



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE

DOTTORATO DI RICERCA IN  
TECNOLOGIE CHIMICHE ED ENERGETICHE  
CICLO XXIV

**RECUPERO ENERGETICO DAGLI OFF-GAS DEI FORNI  
ELETTRICI AD ARCO TRADIZIONALI.  
APPLICAZIONE DI UN PROCEDIMENTO INNOVATIVO CON  
MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE.**

Relatore

Chiar.mo Prof. Gioacchino Nardin

Dottoranda

Ing. Maria Elena Fabiani

Anno accademico 2012/2013



Author's Web Page: [www.diegm.uniud.it](http://www.diegm.uniud.it)

Author's e-mail: [mefabiani@simeautomation.com](mailto:mefabiani@simeautomation.com)

Author's address:

Dipartimento di Ingegneria Elettrica Gestionale e Meccanica

Università degli Studi di Udine

Via delle Scienze, 206

33100 Udine - Italia

tel. +39 0432 558011-15

cell +39347 2507107

fax. +39 0432 558027

web: <http://www.diegm.uniud.it>





## *Ringraziamenti*



*A mio papà Michele: sarai sempre il faro a cui rivolgermi per affrontare ogni cammino con la tua stessa tenacia. Continuerai a brillare nel mio cuore.*

*Alla Sime, per le ore “rubate”, ma soprattutto per l’orgoglio della sua storia ed esperienza che arricchiscono il mio lavoro.*

*A mia mamma Maria Grazia, per la tua premura e gli insegnamenti che continui a darmi. E grazie a Noa per la spensieratezza che mi dona.*

*Alla mia sister Moi e al Simo (con Luna e Pepito). Siete unici anche nei cambiamenti e sacrifici che abbiamo affrontato negli ultimi anni.*

*A “Lo Zio” Ezio, per il tuo prezioso e discreto aiuto e per essermi vicino in tutti i momenti importanti.*

*Alla mia nuova famiglia, Sandra, Gianfranco, Emanuela, Vittorino e nonna Maria: grazie per avermi accolta come una figlia, per l’affetto e gli esempi di vita che mi date.*

*A mio marito Lorenzo, per sapermi capire e spronare al contempo, per tutto il tuo amore, il tuo sostegno e la tua infinita pazienza! Grazie di cuore per ogni giorno unico passato a crescere insieme. Non sarebbe lo stesso senza di te... “Magnificent”.*

*Un grazie al prof. Nardin che mi ha concesso di intraprendere questa entusiasmante ricerca e per la fiducia riposta.*

*Grazie alla prof.ssa Meneghetti e alla prof.ssa Simeoni per i vostri insegnamenti e consigli.*

*Un ringraziamento ai tesisti che ho affiancato in questi anni per il lavoro svolto assieme.*



# INDICE

<b>INDICE</b>	<b>III</b>
<b>LISTA FIGURE</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA TABELLE</b>	<b>XXI</b>
<b>SOMMARIO</b>	<b>XXV</b>
<b>INTRODUZIONE</b>	<b>XXVII</b>
<b>BACKGROUND</b>	<b>29</b>
<b>1 L'ACCIAIO E I PROCESSI PRODUTTIVI</b>	<b>31</b>
1.1 L'ACCIAIO	31
1.2 PROCESSI DI PRODUZIONE DELL'ACCIAIO	33
<b>2 IL FORNO ELETTRICO AD ARCO</b>	<b>37</b>
2.1 L'ARCO ELETTRICO	37
2.2 STORIA DEL FORNO ELETTRICO	38
2.3 TIPOLOGIE DI FORNO ELETTRICO	39
2.3.1 FORNO A INDUZIONE	39
2.3.2 FORNO AD ARCO INDIRETTO O IRRADIANTE	40
2.3.3 FORNO AD ARCO DIRETTO	40
2.4 COMPONENTI GENERALI DI UN EAF TRADIZIONALE	42
2.5 IL PROCESSO FUSORIO DI UN EAF TRADIZIONALE	44
2.5.1 MOVIMENTAZIONE E STOCCAGGIO DELLE MATERIE PRIME DI CARICA	45
2.5.2 MOVIMENTAZIONE E STOCCAGGIO DELLE MATERIE PRIME AUSILIARIE E DEGLI ADDITIVI	46
2.5.3 CARICA DEL FORNO CON O SENZA PRERISCALDAMENTO	46
2.5.4 FUSIONE DEL ROTTAME	47
2.5.5 AFFINAZIONE	49
2.5.6 SCORIFICA	50
2.5.7 SPILLAGGIO	50
2.5.8 RICONFIGURAZIONE DEL FORNO	51
2.5.9 TRASPORTO-ATTESA SIVIERE	51
2.5.10 TRATTAMENTI DI METALLURGIA SECONDARIA	51
2.5.11 COLATA CONTINUA O IN FOSSA DELL'ACCIAIO	51
2.5.12 RISCALDO SIVIERE	51

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

2.5.13	MOVIMENTAZIONE, TRATTAMENTO E STOCCAGGIO DELLA SCORIA	52
<b>2.6</b>	<b>EVOLUZIONE E OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DELL' EAF</b>	<b>53</b>
2.6.1	FORNI ELETTRICI UHP	54
2.6.2	PANNELLI RAFFREDDATI AD ACQUA (WATER JACKET)	54
2.6.3	BRUCIATORI OSSI-COMBUSTIBILE E LANCIA A OSSIGENO	54
2.6.4	FORNO EBT	55
2.6.5	FORMAZIONE DELLA SCORIA SCHIUMOSA	55
2.6.6	FORNO SIVIERA E METALLURGIA SECONDARIA	55
2.6.7	CONTROLLO E AUTOMAZIONE DEL PROCESSO	56
2.6.8	PRERISCALDAMENTO	56
<b>2.7</b>	<b>PERFORMANCE E CARATTERISTICHE TECNICHE DI ALCUNI EAF</b>	<b>56</b>
<b>3</b>	<b>FUMI EMESSI DA UN EAF TRADIZIONALE</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA PRODUZIONE DI EMISSIONI GASSOSE DA EAF</b>	<b>59</b>
<b>3.2</b>	<b>I FUMI PRIMARI</b>	<b>61</b>
3.2.1	CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE DEI FUMI PRIMARI	61
3.2.2	PORTATA DEI FUMI PRIMARI	65
3.2.3	TEMPERATURA DEI FUMI PRIMARI	66
<b>3.3</b>	<b>I FUMI SECONDARI</b>	<b>67</b>
3.3.1	CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE DEI FUMI SECONDARI	67
3.3.2	PORTATA DEI FUMI SECONDARI	68
3.3.3	TEMPERATURA DEI FUMI SECONDARI	69
<b>3.4</b>	<b>LE POLVERI NEI FUMI DA EAF</b>	<b>69</b>
<b>3.5</b>	<b>ELEMENTI INQUINANTI NEI FUMI DI FORNO ELETTRICO AD ARCO</b>	<b>71</b>
3.5.1	COMBUSTIONE DELLA CO	71
3.5.2	CO <sub>2</sub>	71
3.5.3	DIOSSINE	73
3.5.4	POLVERI	75
<b>4</b>	<b>LINEA DI TRATTAMENTO E DEPURAZIONE DEI FUMI DA EAF</b>	<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>COMPONENTI DI UN'ACCIAIERIA CLASSICA: CIRCUITO PRIMARIO E SECONDARIO</b>	<b>77</b>
4.1.1	ELEMENTI DEL CIRCUITO PRIMARIO	79
4.1.1.1	Quarto foro e tronchetto mobile raffreddato	79
4.1.1.2	Gap	79
4.1.1.3	Water Cooled Duct (WCD)	80

## Indice

4.1.1.4	Camera di sedimentazione	81
4.1.1.5	Condotti in semplice parete	81
4.1.1.6	Scambiatore a convezione: FDC/NDC	82
4.1.1.7	Quenching Tower (QT)	82
4.1.2	ELEMENTI DEL CIRCUITO SECONDARIO	83
4.1.2.1	Cappa di aspirazione: Canopy Hood, Doghouse, Elephant house	83
4.1.2.2	Cappe secondarie di ripresa	84
4.1.2.3	Miscelazione dei gas secondari	85
4.1.3	ELEMENTI COMUNI DELLA LINEA FUMI	85
4.1.3.1	Miscelazione dei gas primari e secondari	85
4.1.3.2	Ciclone	86
4.1.3.3	Filtri a maniche (Bag house)	87
4.1.3.4	Altri sistemi filtranti: Elettrofiltri (ESP) e scrub Venturi a umido	88
4.1.3.5	Ventilatori	88
4.1.3.6	Camino	89
4.1.4	PRERISCALDAMENTO ROTTAME	89
<b>4.2</b>	<b>CONFIGURAZIONI TIPICHE DI IMPIANTO E LIVELLI DI EMISSIONE: BAT CONCLUSIONS</b>	<b>90</b>
4.2.1	CONFIGURAZIONE TIPICA PER ASPIRAZIONE FUMI SECONDO LE BAT	90
4.2.2	CONFIGURAZIONE TIPICA PER ABBATTIMENTO POLVERI SECONDO LE BAT	91
4.2.3	CONFIGURAZIONE TIPICA PER ABBATTIMENTO DIOSSINE PCCD/F	92
4.2.4	LIVELLI TIPICI DI EMISSIONE DEI FUMI	93
<b>5</b>	<b>RECUPERO ENERGETICO DA FORNO ELETTRICO AD ARCO</b>	<b>95</b>
<b>5.1</b>	<b>IL CONTESTO ATTUALE</b>	<b>95</b>
<b>5.2</b>	<b>FONTI DI RECUPERO DI CALORE DAL PROCESSO PRODUTTIVO DELL'EAF</b>	<b>96</b>
<b>5.3</b>	<b>CONSUMI ENERGETICI DELL' EAF E POTENZIALITÀ DEL RECUPERO</b>	<b>97</b>
5.3.1	VALUTAZIONE ENERGETICA ED EXERGETICA DEL PROCESSO DI FUSIONE E CONTENUTO ENTALPICO DEI FUMI	97
5.3.2	VALUTAZIONE ENERGETICA DEL RECUPERO	102
<b>5.4</b>	<b>ASPETTI CARATTERISTICI DEL RECUPERO: CRITICITÀ E VANTAGGI</b>	<b>105</b>
5.4.1	VARIABILITÀ DI TEMPERATURA E PORTATA DEI FUMI E ALTRE CRITICITÀ DEL RECUPERO	105
5.4.2	VANTAGGI DEL RECUPERO	106
<b>5.5</b>	<b>STATO DELL'ARTE DEL RECUPERO DA EAF</b>	<b>107</b>

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

5.5.1	RECUPERO PER PRERISCALDAMENTO DEL ROTTAME AD ALTA/BASSA TEMPERATURA NEL PROCESSO PRODUTTIVO	108
5.5.1.1	Preriscaldamento tradizionale	109
5.5.1.2	Tecnologia Shaft	110
5.5.1.3	Tecnologia Consteel®	112
5.5.1.4	Tecnologia COSS	113
5.5.1.5	EPC® System EAF	113
5.5.1.6	Forno ECOARC™®	114
5.5.1.7	Altri sistemi di preriscaldamento	115
5.5.2	RECUPERO E PRODUZIONE DI ENERGIA CHIMICA FUORI DAL PROCESSO PRODUTTIVO	115
5.5.3	POSSIBILITÀ DEL RECUPERO E PRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA FUORI DAL PROCESSO PRODUTTIVO	116
5.5.4	POSSIBILITÀ DEL RECUPERO E PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA FUORI DAL PROCESSO PRODUTTIVO	116
5.5.5	PRODUZIONE DI VAPORE DAI FUMI DI EAF E RECENTI SVILUPPI TECNOLOGICI	117
	<b><u>IL NUOVO SISTEMA DI RECUPERO DAGLI OFF-GAS DI EAF MEDIANTE PCM</u></b>	<b>123</b>
<b>6</b>	<b><u>NUOVO APPARATO A PCM PER IL RECUPERO ENERGETICO</u></b>	<b>125</b>
6.1	PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA DI RECUPERO	126
6.2	OBIETTIVI DEL DIFFERIMENTO TERMICO	127
6.3	TIPOLOGIE DEL SISTEMA DI RECUPERO	128
6.3.1	IL SISTEMA “PASSIVO”	128
6.3.2	IL SISTEMA “ATTIVO”	129
6.3.3	SISTEMA DI RECUPERO ANALIZZATO: IL SISTEMA “PASSIVO”	129
6.4	<b>I MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE: DESCRIZIONE E SCELTA DEL MATERIALE IDONEO AL RECUPERO PROPOSTO</b>	<b>130</b>
6.4.1	SCELTA DEL PCM PER IL DIFFERITORE TERMICO INERZIALE	131
6.4.1.1	Analisi tecnica dei PCM	132
6.4.1.2	Analisi economica dei PCM	143
6.4.1.3	Confronto e scelta tra i PCM	144
<b>7</b>	<b><u>DIFFERITORE TERMICO INERZIALE “PASSIVO”</u></b>	<b>147</b>
7.1	LA SEZIONE DI INTERESSE: LA SETTLING CHAMBER	148
7.2	DATI DI INPUT	150

## Indice

7.2.1	PREMESSA: CONSIDERAZIONI SULL’AFFIDABILITÀ DEI DATI DI INPUT, VARIABILITÀ DELLE CARATTERISTICHE DEI FUMI E POTENZA RECUPERABILE NELLA SEZIONE DI INTERESSE	150
7.2.2	ANALISI DELLA COMPOSIZIONE DEGLI OFF-GAS	154
7.2.3	ANALISI DELL’ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA DEGLI OFF-GAS COME DATO DI INPUT AL SISTEMA E APPROSSIMAZIONI	155
7.2.4	ANALISI DELLA POTENZA E DELL’ENERGIA ACCUMULABILE DAL DIFFERITORE	157
<b>7.3</b>	<b>STIMA DELLA QUANTITÀ DI PCM NECESSARIA ALLA CALMIERAZIONE</b>	<b>165</b>
<b>7.4</b>	<b>CONFIGURAZIONE DI BASE DEL DIFFERITORE</b>	<b>168</b>
7.4.1	DIMENSIONI DEL DIFFERITORE NELLA SETTLING CHAMBER	168
7.4.2	STRUTTURA E MODELLO DEL DIFFERITORE	169
7.4.3	DIMENSIONAMENTO DEL DIFFERITORE	173
<b>7.5</b>	<b>SIMULAZIONI NUMERICHE DEL DIFFERITORE TERMICO E ANALISI DEI RISULTATI</b>	<b>174</b>
7.5.1	CONSIDERAZIONI SUL COEFFICIENTE GLOBALE DI SCAMBIO TERMICO: CONVEZIONE E IRRAGGIAMENTO	174
7.5.2	CONSIDERAZIONI SULLO SPORCAMENTO	174
7.5.3	SIMULAZIONI NUMERICHE	174
7.5.3.1	Configurazione a tubi allineati	176
7.5.3.1.1	Tubi da 2”	179
7.5.3.1.2	Tubi da 1”	181
7.5.3.1.3	Tubi da ¾ ”	184
7.5.3.1.4	Conclusioni sulle configurazioni a tubi allineati	186
7.5.3.2	Configurazione a tubi sfalsati	189
7.5.3.2.1	Tubi da 1” con differitore 4x4	190
7.5.3.2.2	Tubi da 1” con differitore 4x2,65	191
7.5.3.2.3	Tubi da 1” con differitore 4x1,34	192
7.5.3.2.4	Conclusioni sulle configurazioni a tubi sfalsati	193
7.5.3.3	Influenza dello sporcamento	195
7.5.3.3.1	Configurazione con sporcamento sull’intero differitore	195
7.5.3.3.2	Configurazione con sporcamento sulle prime file del differitore	197
7.5.3.4	Confronto configurazione a tubi allineati e sfalsati	198
<b>7.6</b>	<b>CONFIGURAZIONE TECNOLOGICA PROPOSTA PER IL DIFFERITORE TERMICO</b>	<b>202</b>
7.6.1	ANALISI DELLE TENSIONI E DELLE DEFORMAZIONI IN UN TUBO DI ACCIAIO CONTENENTE UN NUCLEO DI ALLUMINIO E SOGGETTO A VARIAZIONI TERMICHE	204

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

<b>IMPIANTO DI RECUPERO CON PCM E DI PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA</b>	<b>207</b>
<b>8 INSERIMENTO DEL NUOVO SISTEMA DI RECUPERO E PRODUZIONE ENERGIA NELLA LINEA FUMI DI UN EAF</b>	<b>209</b>
<b>8.1 STATO A - CARATTERISTICHE DI EAF E LINEA FUMI TRADIZIONALI</b>	<b>210</b>
8.1.1 COMPONENTI DI UN'ACCIAIERIA CON LINEA FUMI TRADIZIONALE	210
8.1.2 CARATTERISTICHE DEGLI OFF-GAS NELLA LINEA FUMI TRADIZIONALE DURANTE LE VARIE FASI DI FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO	214
8.1.2.1 PUNTO 1 - STATO A	216
8.1.2.2 PUNTO 2 - STATO A	218
8.1.2.3 PUNTO 3 - STATO A	219
8.1.2.4 PUNTO 4 - STATO A	220
8.1.3 ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE DEGLI OFF-GAS NELLA SETTLING CHAMBER	222
8.1.4 CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE DEI FUMI	222
8.1.5 SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO DELL'IMPIANTO TRADIZIONALE	224
<b>8.2 AZIONE - DIFFERITORE TERMICO INERZIALE A PCM PASSIVO</b>	<b>226</b>
8.2.1 EFFETTO CALMIERANTE DELL'APPARATO	227
8.2.2 PREVENTIVO DELL'APPARATO A PCM: COSTO DI REALIZZAZIONE	228
<b>8.3 AZIONE - IMPIANTO DI RECUPERO E PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA</b>	<b>230</b>
8.3.1 INSERIMENTO DELL'IMPIANTO	230
8.3.2 CALDAIA DI RECUPERO	231
8.3.2.1 CASO 1: Analisi per dimensionamento caldaia con massima temperatura dei fumi	232
8.3.2.2 CASO 2: Analisi per dimensionamento caldaia con minima temperatura dei fumi	232
8.3.2.3 Scelta della caldaia	237
8.3.3 TURBO-GRUPPO	239
8.3.4 PREVENTIVO IMPIANTO	240
8.3.5 VALUTAZIONE DELLA POTENZA TERMICA NEGLI STATI A E B	241
8.3.5.1 STATO A - Valutazione potenza termica	241
8.3.5.2 STATO B - Valutazione potenza termica	244
8.3.5.3 Curva di durata della temperatura negli STATI A e B	246
8.3.5.4 STATO A - Valutazione in base alla curva di durata della temperatura	247
8.3.5.5 STATO B - Valutazione in base alla curva di durata della temperatura	250
8.3.5.6 Confronto energia e potenza scambiabili lato fumi e caldaia	252



## Indice

8.3.6	VALUTAZIONE POTENZA NOMINALE ED EFFETTIVA DEGLI STATI A E B	252
8.3.6.1	STATO A - Valutazione rendimento e potenza prodotta	252
8.3.6.2	STATO B - Valutazione rendimento e potenza prodotta	253
8.3.6.3	Confronto potenza prodotta STATO A e B	253
8.3.7	EFFETTO TAGLIA	254
<b>8.4</b>	<b>STATO B - CARATTERISTICHE DI UN EAF E DELLA LINEA FUMI CON INSERIMENTO DEL NUOVO APPARATO CALMIERATORE</b>	<b>255</b>
<b>8.5</b>	<b>STATO B1 - LINEE DI TRATTAMENTO FUMI SEPARATE</b>	<b>255</b>
8.5.1	COMPONENTI IMPIANTO A LINEE SEPARATE	255
8.5.2	CARATTERISTICHE E FUNZIONAMENTO IMPIANTO A LINEE SEPARATE	257
8.5.2.1	PUNTO 1 - STATO B1	258
8.5.2.2	PUNTO 2 - STATO B1	258
8.5.2.3	PUNTO 3 - STATO B1	259
8.5.3	VALUTAZIONI TECNICO-IMPIANTISTICHE E SCELTA DEL FILTRO A MANICHE - STATO B1	260
<b>8.6</b>	<b>STATO B2 - LINEE DI TRATTAMENTO FUMI A CIRCUITO UNICO</b>	<b>262</b>
8.6.1	COMPONENTI IMPIANTO A CIRCUITO UNICO	262
8.6.2	CARATTERISTICHE E FUNZIONAMENTO IMPIANTO A CIRCUITO UNICO	263
8.6.2.1	PUNTO 1 - STATO B2	264
8.6.2.2	PUNTO 2 - STATO B2	264
8.6.2.3	PUNTO 3 - STATO B2	265
8.6.2.4	PUNTO 4 - STATO B2	266
8.6.3	VALUTAZIONE TECNICO-IMPIANTISTICHE E SCELTA DEL FILTRO A MANICHE - STATO B2	266
<b>8.7</b>	<b>VALUTAZIONE FINALE SUI FILTRI NEGLI STATI A, B1 E B2</b>	<b>267</b>
<b>9</b>	<b><u>VALUTAZIONE ENERGETICA, ECONOMICA E AMBIENTALE DOPO L'INSERIMENTO DELL'APPARATO A PCM E DELL'IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA</u></b>	<b><u>269</u></b>
<b>9.1</b>	<b>VALUTAZIONE TECNOLOGICA ED ENERGETICA</b>	<b>269</b>
9.1.1	VALUTAZIONE ENERGETICA CON L'INSERIMENTO DEL DIFFERITORE TERMICO A PCM	269
9.1.1.1	Analisi energetica della riduzione delle perdite di carico a parità di sezione dei tubi	270
9.1.1.2	Analisi della riduzione della sezione dei tubi a parità di velocità dei fumi	272
9.1.2	VALUTAZIONE ENERGETICA CON L'INSERIMENTO DELL'IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA	273
9.1.3	VALUTAZIONE ENERGETICA COMPLESSIVA	274

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

<b>9.2 VALUTAZIONE ECONOMICA</b>	<b>275</b>
9.2.1 VALUTAZIONE ECONOMICA CON L'INSERIMENTO DEL DIFFERITORE TERMICO A PCM	275
9.2.1.1 Analisi economica della riduzione delle perdite di carico a parità di sezione dei tubi	275
9.2.1.2 Analisi economica della riduzione della sezione dei tubi a parità di velocità dei fumi	277
9.2.1.2.1 Risparmio materiale da costruzione	277
9.2.1.2.2 Riduzione tubi di raffreddamento condotto a parità di velocità dei fumi	278
9.2.1.2.3 Risparmio complessivo con la riduzione della sezione	278
9.2.2 VALUTAZIONE ECONOMICA CON L'INSERIMENTO DELL'IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA	278
9.2.3 VALUTAZIONI ECONOMICHE COMPLESSIVE	278
<b>9.3 VALUTAZIONE AMBIENTALE</b>	<b>279</b>
<b>9.4 VALUTAZIONI A LIVELLO COMPLESSIVO ACCIAIERIE IN ITALIA</b>	<b>280</b>
<b>10 CONCLUSIONI</b>	<b>281</b>
<b>11 ALLEGATI</b>	<b>285</b>
<b>11.1 ALLEGATO 1 - CALCOLO DEL COEFFICIENTE GLOBALE DI SCAMBIO TERMICO E DELLO SPORCAMENTO</b>	<b>285</b>
11.1.1 CONVEZIONE	285
11.1.2 IRRAGGIAMENTO	288
11.1.3 SPORCAMENTO	290
<b>11.2 ALLEGATO 2 - PROCEDURE DI SIMULAZIONE</b>	<b>291</b>
11.2.1 GAMBIT	291
11.2.2 FLUENT	293
<b>11.3 ALLEGATO 3 - MODELLO REALIZZATIVO DELL'APPARATO A PCM DI TIPO PASSIVO DEL CAPITOLO 8</b>	<b>295</b>
11.3.1 TUBI DI CONTENIMENTO MATERIALE PCM	295
11.3.2 STRUTTURA DI SOLLEVAMENTO TUBI	296
11.3.3 STRUTTURA DI SUPPORTO TUBI	298
11.3.3.1 Analisi della struttura di supporto	302
<b>11.4 ALLEGATO 4 - ANALISI DELLE TENSIONI E DELLE DEFORMAZIONI IN UN TUBO DI ACCIAIO CONTENENTE UN NUCLEO DI ALLUMINIO E SOGGETTO A VARIAZIONI TERMICHE</b>	<b>307</b>

## Indice

<b>11.5 ALLEGATO 5 - STIMA COSTO APPARATO A PCM DI TIPO PASSIVO</b>	<b>319</b>
11.5.1 COSTO MATERIALI	320
11.5.2 COSTO MANODOPERA	322
11.5.3 COSTO COMPLESSIVO DI REALIZZAZIONE DELL'APPARATO	323
<b>11.6 ALLEGATO 6 - PREVENTIVO IMPIANTO DI RECUPERO E PRODUZIONE DI ENERGIA</b>	
<b>ELETTRICA</b>	<b>325</b>
11.6.1 COSTO CALDAIA DI RECUPERO	325
11.6.2 COSTO TURBOGENERATORE, CONDENSATORE, TORRI EVAPORATIVE, DEGASATORE, DEMINERALIZZATORE	326
11.6.3 COSTO TOTALE IMPIANTO DI RECUPERO E PRODUZIONE ENERGIA	327
<b>11.7 ALLEGATO 7 - CARATTERISTICHE TECNICHE E PREVENTIVO DI SPESA DEL FILTRO A MANICHE</b>	<b>329</b>
11.7.1 FILTRI A MANICHE	329
11.7.2 SCELTA FILTRI NELLO STATO A	331
11.7.3 STATO B1	332
11.7.3.1 Linea primaria	332
11.7.3.2 Linea secondaria	333
11.7.3.3 Preventivo totale di spesa del filtro nello STATO B1	334
11.7.4 STATO B2	334
<b>ACRONIMI</b>	<b>337</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>339</b>



## LISTA FIGURE

FIGURA 1 - ANDAMENTO DELLA PRODUZIONE DELL'ACCIAIO DAL 1950 AL 2011. FONTE: [3].	31
FIGURA 2 - GRAFICI RELATIVI AI PAESI MAGGIORI PRODUTTORI DI ACCIAIO AL 2011. ADATTATO DA: [4]	32
FIGURA 3 - PRINCIPALI PROCESSI DI PRODUZIONE DELL'ACCIAIO. ADATTATO DA: [6, P. 9]	34
FIGURA 4 - PRODUZIONE PERCENTUALE DELL'ACCIAIO DAI PROCESSI BF/BOF, EAF E OHF. ADATTATO DA: [7].	35
FIGURA 5 - PROCESSI DI PRODUZIONE DELL'ACCIAIO E LORO POSSIBILE EVOLUZIONE. FONTE: [8]	36
FIGURA 6 - FORNO ELETTRICO AD ARCO, EAF. FONTE: [10].	37
FIGURA 7 - FORNO A INDUZIONE CON NUCLEO MAGNETICO (A SINISTRA) E SENZA (A DESTRA). FONTE: [9].	40
FIGURA 8 - FORNO AD ARCO INDIRETTO. FONTE: [9].	40
FIGURA 9 - FORNO AD ARCO DIRETTO CON SUOLA CONDUTTRICE (A SINISTRA) E CON SUOLA NON CONDUTTRICE (A DESTRA). FONTE: [9].	41
FIGURA 10 - FORNO ELETTRICO AD ARCO AC: FONTE: [13].	41
FIGURA 11 - ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN EAF TRADIZIONALE. ADATTATO DA: [14].	43
FIGURA 12 - SCHEMA DEL CICLO DI PRODUZIONE DELL'ACCIAIO IN UN EAF TRADIZIONALE. FONTE: [6, P. 420].	44
FIGURA 13 - RIASSUNTO SCHEMATICO DEL CICLO TTT DI UN EAF TRADIZIONALE. ADATTATO DA: [16].	45
FIGURA 14 - IL PROCESSO DELL'EAF. FONTE: [9].	49
FIGURA 15 - SCHEMA DEL FLUSSO DI MASSA TIPICO DI UN EAF. FONTE: [6, P. 428]	52
FIGURA 16 - EVOLUZIONE DEL FORNO ELETTRICO AD ARCO. FONTE: [24] (A DESTRA); [15] (A SINISTRA).	53
FIGURA 17 - COMPOSIZIONE GAS PRIMARI (LANCIA A OSSIGENO 6.8 M <sup>3</sup> /T; POLVERINO DI CARBONE 0 KG/T; DIAMETRO FORNO 6.9 M. FONTE: [30].	64
FIGURA 18 - COMPOSIZIONE GAS PRIMARI (LANCIA AD OSSIGENO 20.2 M <sup>3</sup> /T; POLVERINO DI CARBONE: 0 KG/T; DIAMETRO FORNO: 6.9 M. FONTE: [30].	64
FIGURA 19 - COMPOSIZIONE GAS PRIMARI (LANCIA AD OSSIGENO 7.1 M <sup>3</sup> /T; POLVERINO DI CARBONE: 6.0 KG/T; DIAMETRO FORNO: 5.9 M. FONTE: [30].	65
FIGURA 20 - COMPOSIZIONE GAS PRIMARI (LANCIA AD OSSIGENO 30.5 M <sup>3</sup> /T; POLVERINO DI CARBONE: 21 KG/T DIAMETRO FORNO: 5.8 M. FONTE: [30].	65
FIGURA 21 - VARIAZIONE DELLA TEMPERATURA DEI GAS PRIMARI DURANTE UN CICLO TTT: ANDAMENTO REALE E OTTENUTO CON PROGRAMMA CRM. FONTE: [33].	66
FIGURA 22 - DISTRIBUZIONE DI PCDD/F RELATIVA AGLI OFF-GAS DI UN EAF TWIN.SHELL CON PRERISCALDAMENTO DEL ROTTAME, PRIMA E DOPO L'ABBATTIMENTO. FONTE: [6, P. 436].	74
FIGURA 23 - CORRELAZIONE TRA I RESIDUI DI POLVERE E PCDD/F DOPO L'ABBATTIMENTO NEI FILTRI A MANICHE A TEMPERATURE INFERIORI A 85 °C. FONTE: [6, P. 437].	75
FIGURA 24 - ESEMPIO DI UNA POSSIBILE CONFIGURAZIONE DELLA LINEA DI TRATTAMENTO E DEPURAZIONE FUMI DA UN EAF TRADIZIONALE. FONTE: [36].	77

**Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.**

FIGURA 25 - SCHEMA DEI COMPONENTI DELLA LINEA DI TRATTAMENTO E DEPURAZIONE FUMI DI UN'ACCIAIERIA. IN ROSSO, IL CIRCUITO PRIMARIO; IN VERDE, IL CIRCUITO SECONDARIO. FONTE: [36].	78
FIGURA 26 - TRE SISTEMI PRINCIPALI DI ASPIRAZIONE FUMI SECONDO LE BAT. FONTE: [6, p. 431].	91
FIGURA 27 - ESEMPIO DI RIDUZIONE DELLE DIOSSINE DA EAF MEDIANTE POST COMBUSTIONE DEI FUMI, SUCCESSIVO REPENTINO RAFFREDDAMENTO E BANCO FILTRI. FONTE: [6, p. 464].	93
FIGURA 28 - BILANCIO ENERGETICO RELATIVO A 70 FORNI EAF . ADATTATO DA: [22].	100
FIGURA 29 - ESEMPIO DI BILANCIO ENERGETICO. FONTE: [15].	100
FIGURA 30 - BILANCIO DI MASSA DI UN EAF. FONTE: [30].	100
FIGURA 31 - ENERGIA NEL PROCESSO EAF: VALORI LIMITE IDEALE E TECNICO E CAMPO DI INTERVENTO.	103
FIGURA 32 - ENERGIA ELETTRICA RECUPERABILE CON LE ATTUALI TECNOLOGIE.	103
FIGURA 33 - ENERGIA TERMICA RECUPERABILE CON LE ATTUALI TECNOLOGIE.	104
FIGURA 34 - BILANCIO ENERGETICO NEL PROCESSO EAF CON RECUPERO.	104
FIGURA 35 - RECUPERO ENERGETICO DAI FUMI DI ACCIAIERIA ELETTRICA.	107
FIGURA 36 - PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E/O TERMICA DAI FUMI DI ACCIAIERIA ELETTRICA.	107
FIGURA 37 - SCHEMA DEL PRERISCALDAMENTO DIRETTO DEL ROTTAME IN CESTA. FONTE: [41].	110
FIGURA 38 - SCHEMA DI UNO SHAFT FURNACE. FONTE: [41].	110
FIGURA 39 - TECNOLOGIA CONSTEEL <sup>®</sup> (A SINISTRA) E CONSTEEL <sup>®</sup> EVOLUTION <sup>™</sup> (IN ALTO A DESTRA) DI TENOVA E PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO (IN BASSO A DESTRA). ADATTATO DA: [46]- [45] - [41].	113
FIGURA 40 - EPC <sup>®</sup> SYSTEM. FONTE: [49].	114
FIGURA 41 - FORNO ECOARC <sup>™</sup> . FONTE: [50].	115
FIGURA 42 - RECUPERO DELL'ENERGIA CONTENUTA NEI FUMI IN USCITA DA EAF MEDIANTE PCM. FONTE: [51].	116
FIGURA 43 - PRODUZIONE DI VAPORE DIRETTA, UTILIZZANDO GLI EFFLUENTI GASSOSI PROVENIENTI DAL QUARTO FORO DI UN FORNO ELETTRICO AD ARCO. FONTE: [52].	118
FIGURA 44 - SCHEMA DELL'IMPIANTO DI SIEMENS PER LA PRODUZIONE DI VAPORE E ENERGIA CON L'UTILIZZO DEI SALI. COMPARAZIONE TRA I METODI PROPOSTI E VALUTAZIONE ECONOMICA. ADATTATO DA: [53].	119
FIGURA 45 - SCHEMA DEL RECUPERO DI CALORE IRECOVERY <sup>®</sup> A DUE LIVELLI DA EAF. FONTE: [54].	120
FIGURA 46 - STUDIO DELLA GENERAZIONE DI VAPORE O RECUPERO ACQUA CALDA: ADATTATO DA: [56].	120
FIGURA 47 - SCHEMA DEL RECUPERO DEL PROGETTO H-REII. FONTE: [58].	121
FIGURA 48 - ENERGIA E CO <sub>2</sub> RISPARMIABILE IN ITALIA A 5000-8000 H/ANNO SECONDO IL PROGETTO H-REII. ADATTATO DA: [57].	122
FIGURA 49 - PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA DI RECUPERO A PCM.	126
FIGURA 50 - FASE "CALDA": FUSIONE DEL PCM.	127
FIGURA 51 - FASE "FREDDA": SOLIDIFICAZIONE DEL PCM.	127
FIGURA 52 - SISTEMI DI RECUPERO ENERGETICO CON PCM "PASSIVO" E "ATTIVO"	128
FIGURA 53 - DIAGRAMMA TEMPERATURA-ENERGIA DEI PCM.	130
FIGURA 54 - ACCUMULO E CESSIONE DI ENERGIA DEI PCM.	131

## Lista Figure

FIGURA 55 - GRAFICI CON LA TEMPERATURA DI FUSIONE DEI PCM A CONFRONTO CON QUELLA MEDIA DEGLI OFF-GAS (LINEA ROSSA) NELLA SETTLING CHAMBER.....	133
FIGURA 56 - GRAFICO CON LA TEMPERATURA DI EBOLLIZIONE DEI PCM A CONFRONTO CON QUELLE DEGLI OFF-GAS (LINEA ROSSA) NELLA SETTLING CHAMBER. ....	133
FIGURA 57 - TEMPERATURA DEI PCM E ACQUA. ....	136
FIGURA 58 - CONDUTTIVITÀ TERMICA DEI PCM E ACQUA. ....	136
FIGURA 59 - CALORE SPECIFICO DEI PCM E ACQUA. ....	137
FIGURA 60 - CAPACITÀ TERMICA DEI PCM E ACQUA. ....	138
FIGURA 61 - CALORE LATENTE MASSICO DEI PCM E ACQUA. ....	138
FIGURA 62 - CALORE LATENTE VOLUMICO DEI PCM E ACQUA.....	139
FIGURA 63 A), B), C), D), E) - DIAGRAMMA DI STATO DI AL, PB, SN, SALI FUSI E LORO CONFRONTO. ....	141
FIGURA 64 - DENSITÀ DEI PCM E ACQUA. ....	141
FIGURA 65 - DIFFUSIVITÀ TERMICA DEI PCM.....	142
FIGURA 66 - COEFFICIENTE DI ESPANSIONE VOLUMICA DEI PCM. ....	143
FIGURA 67 - COSTO DEI PCM PER: A)UNITÀ DI PESO; B) UNITÀ DI VOLUME; C) CALORE LATENTE. FONTE: [62]. ....	144
FIGURA 68 - SCHEMA DI UNA POSSIBILE ACCIAIERIA: IN EVIDENZA LE QUATTRO MACRO ZONE A DIFFERENTE TEMPERATURA E IL PARTICOLARE DELLE PRIME TRE.....	148
FIGURA 69 - SEZIONE SCELTA PER L'INSERIMENTO DELL'APPARATO DI RECUPERO: SETTLING CHAMBER. FONTE: [39]. .	150
FIGURA 70 - SCHEMA LINEA TRATTAMENTO E DEPURAZIONE FUMI DELL'ACCIAIERIA FERRIERE NORD S.P.A. - GRUPPO PITTINI, ANNI '80. ADATTATO DA: [42].....	151
FIGURA 71 - RILEVAMENTI DI PORTATA (Q), TEMPERATURA (T) E CALORE SPECIFICO DEI FUMI ( $c_p$ ) NELLA SEZIONE C DELL'IMPIANTO CONSIDERATO: EAF 70 T, 3 CESTE DI CARICO, TTT 80 MIN. FONTE [42]. ....	152
FIGURA 72 - ANDAMENTO DI ENTALPIA E POTENZA DEI FUMI NELLA SEZIONE C DELL'IMPIANTO CONSIDERATO: EAF 70 T, 3 CESTE DI CARICO, TTT 80 MIN. FONTE: [42].....	153
FIGURA 73 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NELLA SETTLING CHAMBER RIFERITA ALLE MISURAZIONI DI ECO-D ENVIRONMENTAL SYSTEMS S.R.L : EAF 70 T, DUE CESTE DI CARICO, DUE CICLI TT DA 68 MIN. FONTE: [39]. ....	153
FIGURA 74 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA IN UN CICLO TTT DI 68 MIN (INTERVALLI DI 117 S) NELLA SEZIONE RAPPRESENTATIVA DELLA SETTLING CHAMBER. ....	156
FIGURA 75 - AREA PROPORZIONALE ALL'ENERGIA TERMICA DEGLI OFF-GAS NELLA SEZIONE DELLA SETTLING CHAMBER. ....	158
FIGURA 76 - AREA PROPORZIONALE ALL'ENERGIA SCAMBIATA TRA OFF-GAS E PCM NELLA SEZIONE DELLA SETTLING CHAMBER: CASO IDEALE (TEMPERATURA DI FUSIONE DEL PCM COINCIDENTE CON QUELLA MEDIA DEGLI OFF-GAS). ....	158
FIGURA 77 - AREA PROPORZIONALE ALL'ENERGIA SCAMBIATA NEL CASO IDEALE: VERDE ACCUMULATA DAL PCM, ROSSA CEDUTA DAL PCM.....	159
FIGURA 78 - AREA PROPORZIONALE ALL'ENERGIA SCAMBIATA TRA OFF-GAS E ALLUMINIO NELLA SEZIONE DELLA SETTLING CHAMBER: CASO REALE.....	159

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

FIGURA 79 - AREA PROPORZIONALE ALL'ENERGIA SCAMBIATA NEL CASO REALE: VERDE ACCUMULATA DALL'ALLUMINIO, ROSSA CEDUTA DALL'ALLUMINIO. ....	160
FIGURA 80 - CURVA DI DURATA DELLA TEMPERATURA NELLA SEZIONE DELLA SETTLING CHAMBER. ....	160
FIGURA 81 - ANDAMENTO CALORE SPECIFICO ESPRESSO IN [kJ/Nm <sup>3</sup> K] IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA IN [K]. ....	161
FIGURA 82 - ANDAMENTO POTENZA FUMI NELLA SEZIONE DELLA SETTLING CHAMBER. ....	162
FIGURA 83 - ENERGIA TERMICA DEGLI OFF-GAS NELLA SEZIONE DELLA SETTLING CHAMBER. ....	162
FIGURA 84 - ENERGIA TERMICA SCAMBIATA TRA OFF-GAS E PCM NELLA SEZIONE DELLA SETTLING CHAMBER: CASO IDEALE (ENERGIA DI FUSIONE DEI PCM EGUAGLIA QUELLA MEDIA DEGLI OFF-GAS). ....	163
FIGURA 85 - ENERGIA TERMICA SCAMBIATA NEL CASO IDEALE: VERDE ACCUMULATA DAL PCM, ROSSA CEDUTA DAL PCM. ....	164
FIGURA 86 - CURVA DI DURATA DELLA POTENZA. ....	165
FIGURA 87 - ENERGIE TERMICHE SCAMBIATE TRA OFF-GAS E PCM NELLA SETTLING CHAMBER. ....	167
FIGURA 88 - SPAZIO UTILE PER INSERIMENTO. FONTE: [39]. ....	168
FIGURA 89 - STRUTTURA DEL DIFFERITORE PROPOSTA ALL'INTERNO DELLA SETTLING CHAMBER. ....	169
FIGURA 90 - RIDUZIONE DEL CARICO DI SNERVAMENTO PER ACCIAI INOSSIDABILI AUSTENITICI (304-316) CONFRONTATI CON L'ACCIAIO AL CARBONIO SECONDO L'EUROCODICE 3 PARTE 1.2. FONTE: [64]. ....	170
FIGURA 91 - PROPRIETÀ A CALDO DI ALCUNI ACCIAI INOX DELLA SERIE 300, VALUTATE A 10000 H DI ESPOSIZIONE ALLA TEMPERATURA: A) CARICO DI ROTTURA; B) CARICO CAPACE DI CAUSARE UNO SCORRIMENTO DELL'1%. FONTE: [65]. ....	170
FIGURA 92 - MODELLO REALIZZATIVO APPARATO: 1. TUBO; 2. TONDO CON MATERIALE ISOLANTE; 3. LAMA DI SOLLEVAMENTO; 4. STRUTTURA DI SUPPORTO; 5. MATERIALE REFRATTARIO; 6. BULLONE; 7. PCM (ALLUMINIO). ....	172
FIGURA 93 - CONFIGURAZIONE A TUBI ALLINEATI. ....	176
FIGURA 94 - PRIMA FILA DI TUBI (RIQUADRO ROSSO) NEI PUNTI A,B; ULTIMA FILA DI TUBI (RIQUADRO BLU) NEL PUNTO C. ....	176
FIGURA 95 - TUBO CONTENENTE MATERIALE PCM. ....	177
FIGURA 96 - ANDAMENTO TEMPERATURA TUBI DA 2" ....	179
FIGURA 97 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TUBO E NEL MATERIALE PCM, CON RIFERIMENTO ALLA PRIMA FILA DI TUBI DA 2" ....	180
FIGURA 98 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TUBO E NEL MATERIALE PCM, CON RIFERIMENTO ALL'ULTIMA FILA DI TUBI DA 2" ....	181
FIGURA 99 - ANDAMENTO TEMPERATURA FUMI DA 1" ....	182
FIGURA 100 - ANDAMENTO DI TEMPERATURA NEL TUBO E NEL MATERIALE PCM, CON RIFERIMENTO ALLA PRIMA FILA DI TUBI DA 1" ....	183
FIGURA 101 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TUBO E NEL MATERIALE PCM, CON RIFERIMENTO ALL'ULTIMA FILA DI TUBI DA 1" ....	183
FIGURA 102 - ANDAMENTO TEMPERATURE TUBI DA 3/4" ....	184



## Lista Figure

FIGURA 103 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TUBO E NEL MATERIALE PCM, CON RIFERIMENTO ALLA PRIMA FILA DI TUBI DA $\frac{3}{4}$ ".....	185
FIGURA 104 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL TUBO E NEL MATERIALE PCM, CON RIFERIMENTO ALL'ULTIMA FILA DI TUBI DA $\frac{3}{4}$ ".....	185
FIGURA 105 - CONFRONTO TEMPERATURA MASSIMA NEI TUBI ALLINEATI DA 2", 1", $\frac{3}{4}$ ".....	186
FIGURA 106 - CONFRONTO TEMPERATURA MINIMA NEI TUBI ALLINEATI DA 2", 1", $\frac{3}{4}$ ".....	187
FIGURA 107 - CONFRONTO $\Delta$ TEMPERATURA NEI TUBI ALLINEATI DA 2", 1", $\frac{3}{4}$ ".....	187
FIGURA 108 - TEMPERATURA MASSIMA RAGGIUNTA DAL MATERIALE PCM IN FUNZIONE DEL DIAMETRO DEL TUBO DURANTE UN CICLO TTT (PRIMA FILA DI TUBI).....	188
FIGURA 109 - EFFETTO DEL RAPPORTO SUPERFICIE/VOLUME SULLA DEVIAZIONE STANDARD DELLE TEMPERATURE.....	189
FIGURA 110 - CONFIGURAZIONE A TUBI SFALSATI.....	189
FIGURA 111 - ANDAMENTO TEMPERATURE DIFFERITORE 4x4, TUBI DA 1".....	190
FIGURA 112 - ANDAMENTO TEMPERATURE DIFFERITORE 4x2,65, TUBI DA 1".....	191
FIGURA 113 - ANDAMENTO TEMPERATURE DIFFERITORE 4x1,34, TUBI DA 1".....	192
FIGURA 114 - CONFRONTO TEMPERATURA MASSIMA NEI TUBI SFALSATI DA 1".....	193
FIGURA 115 - CONFRONTO TEMPERATURA MINIMA NEI TUBI SFALSATI DA 1".....	194
FIGURA 116 - CONFRONTO $\Delta$ TEMPERATURA NEI TUBI SFALSATI DA 1".....	194
FIGURA 117 - EFFETTO DELLA MASSA DI PCM INSERITA SULLA DEVIAZIONE STANDARD DELLE TEMPERATURE.....	195
FIGURA 118 - CONFRONTO DELL'ANDAMENTO DI TEMPERATURA DEI FUMI IN USCITA DAL DIFFERITORE TERMICO IN PRESENZA E NON DI SPORCAMENTO DEI TUBI (DISPOSIZIONE TUBI ALLINEATI, 2").....	196
FIGURA 119 - ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA ALL'INTERNO DEL MATERIALE PCM NELL'ULTIMO TUBO DEL DIFFERITORE: CONFRONTO CON E SENZA SPORCAMENTO (DISPOSIZIONE TUBI ALLINEATI, 2").....	197
FIGURA 120 - CONFRONTO DELL'ANDAMENTO DI TEMPERATURA DEI FUMI IN USCITA DAL DIFFERITORE TERMICO IN PRESENZA E NON DI SPORCAMENTO SUI PRIMI 10 TUBI (DISPOSIZIONE TUBI ALLINEATI, 2").....	197
FIGURA 121 - CONFRONTO DELL'ANDAMENTO DI TEMPERATURA DEI FUMI TRA INGRESSO E USCITA DEL DIFFERITORE TERMICO E CONFRONTO CON SOLUZIONE A TUBI DA 1" ALLINEATI E SFALSATI (L=4M).....	198
FIGURA 122 - CONFRONTO $\Delta$ TEMPERATURA NELLE DUE SOLUZIONI A TUBI DA 1" ALLINEATI E SFALSATI (L=4M).....	199
FIGURA 123 - CONFRONTO VARIANZA E DEVIAZIONE STANDARD IN OUTPUT DAL DIFFERITORE NELLE DUE SOLUZIONI A TUBI DA 1" ALLINEATI E SFALSATI (L=4M).....	199
FIGURA 124 - GRAFICI DELLE PERDITE DI CARICO NELLA CONFIGURAZIONE DEL DIFFERITORE A TUBI DA 1" SFALSATI (A SINISTRA) E ALLINEATI (A DESTRA).....	200
FIGURA 125 - CONFRONTO DELLE PERDITE DI CARICO NELLA DUE CONFIGURAZIONI DEL DIFFERITORE A TUBI DA 1" SFALSATI E ALLINEATI.....	200
FIGURA 126 - EFFETTO DEL RAPPORTO SUPERFICIE/VOLUME SULLE PERDITE DI CARICO DEL DIFFERITORE TERMICO.....	201
FIGURA 127 - DISPOSIZIONE TUBI IN SETTLING CHAMBER (VISTA DALL'ALTO): SOLUZIONE PROPOSTA.....	202
FIGURA 128 - DISPOSIZIONE TUBI SFALSATI DA 2": SOLUZIONE PROPOSTA.....	202
FIGURA 129 - DISPOSIZIONE TUBI SFALSATI DA 1: SOLUZIONE PROPOSTA.....	203

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

FIGURA 130 - CONTENIMENTO A TUBI CONCENTRICI.....	205
FIGURA 131 - TENSIONI IN CONFIGURAZIONE A TUBI CONCENTRICI. ....	206
FIGURA 132 - TENSIONI IN TUBO CONTENENTE ALLUMINIO. ....	206
FIGURA 133 - FLUSSO LOGICO DELL'INSERIMENTO DEL NUOVO SISTEMA DI RECUPERO E POSSIBILI CONFIGURAZIONI DELLA NUOVA LINEA FUMI DELL'ACCIAIERIA. ....	209
FIGURA 134 - LINEA DI ESTRAZIONE, TRATTAMENTO, DEPURAZIONE ED ESPULSIONE FUMIDI UN IMPIANTO TRADIZIONALE. .....	210
FIGURA 135 - FASI DI FUNZIONAMENTO LINEA DI TRATTAMENTO E DEPURAZIONE FUMI IMPIANTO TRADIZIONALE. ....	215
FIGURA 136 - ANDAMENTO TEMPERATURA FUMI DURANTE UN CICLO TTT NELLA SETTLING CHAMBER.....	222
FIGURA 137 - SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO FORNO E VOLTA.....	225
FIGURA 138 - SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO CIRCUITO PRIMARIO. ....	225
FIGURA 139 - INSERIMENTO DEL DIFFERITORE TERMICO PASSIVO NELLA SETTLING CHAMBER.....	226
FIGURA 140 - ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE DEI FUMI IN UN CICLO TTT PRIMA (STATO A) E DOPO (STATO B) LA CALMIERAZIONE. ....	227
FIGURA 141 - INSERIMENTO GRUPPO CALDAIA - TURBINA. ....	230
FIGURA 142 - SCHEMA CALDAIA MASSIMA TEMPERATURA: A) LATO FUMI, B) LATO ACQUA-VAPORE. FONTE: [68].....	233
FIGURA 143 - DIAGRAMMA DELLA TEMPERATURA FUMI - ACQUA/VAPORE - MASSIMA TEMPERATURA. FONTE: [68]..	234
FIGURA 144 - SCHEMA CALDAIA MINIMA TEMPERATURA: A) LATO FUMI, B) LATO ACQUA-VAPORE. FONTE: [68].....	235
FIGURA 145 - DIAGRAMMA DELLA TEMPERATURA FUMI - ACQUA/VAPORE - MINIMA TEMPERATURA. FONTE: [68]....	236
FIGURA 146 - CALDAIA INTEGRATA. FONTE: [68]. ....	238
FIGURA 147 - CALDAIE VERTICALI.....	239
FIGURA 148 - ANDAMENTO TEMPERATURA FUMI NELL'IMPIANTO TRADIZIONALE. ....	241
FIGURA 149 - ENERGIA TERMICA SCAMBIATA TRA FUMI E FLUIDO DI LAVORO. ....	242
FIGURA 150 - ENERGIA TERMICA SCAMBIATA TRA FUMI E FLUIDO DI LAVORO: AREA BLU: ASSORBITA DAL FLUIDO DI LAVORO; AREA ROSSA: CEDUTA DAL FLUIDO DI LAVORO AI FUMI.....	243
FIGURA 151 - ANDAMENTO TEMPERATURA FUMI NUOVO IMPIANTO.....	244
FIGURA 152 - ENERGIA TERMICA SCAMBIATA TRA FUMI E FLUIDO DI LAVORO. ....	245
FIGURA 153 - ENERGIA TERMICA CEDUTA DAI FUMI AL FLUIDO DI LAVORO. ....	246
FIGURA 154 - CURVA DI DURATA DELLE TEMPERATURE NELL'IMPIANTO TRADIZIONALE E IN QUELLO CON DIFFERITORE TERMICO. ....	246
FIGURA 155 - CURVA DI DURATA DELLE TEMPERATURE NELL'IMPIANTO TRADIZIONALE E IN QUELLO CON DIFFERITORE A PCM. ....	247
FIGURA 156 - MASSIMA ENERGIA TERMICA SCAMBIABILE TRA FUMI E FLUIDO DI LAVORO NELL'IMPIANTO TRADIZIONALE. .....	247
FIGURA 157 - ENERGIA TERMICA SCAMBIATA TRA FUMI E FLUIDO DI LAVORO NELL'IMPIANTO TRADIZIONALE.....	248
FIGURA 158 - ENERGIA NON SFRUTTATA NELL'IMPIANTO TRADIZIONALE. ....	249

## Lista Figure

FIGURA 159 - MASSIMA ENERGIA TERMICA SCAMBIABILE TRA FUMI E FLUIDO DI LAVORO NELL'IMPIANTO CON DIFFERITORE A PCM.....	250
FIGURA 160 - ENERGIA TERMICA SCAMBIATA TRA FUMI E FLUIDO DI LAVORO NELL'IMPIANTO CON DIFFERITORE A PCM. .....	251
FIGURA 161 - ENERGIA NON SFRUTTATA NELL'IMPIANTO CON DIFFERITORE A PCM. ....	251
FIGURA 162 - SCHEMA IMPIANTO CON APPARATO A PCM + GRUPPO CALDAIA-TURBINA - LINEE SEPARATE. ....	256
FIGURA 163 - SCHEMA IMPIANTO CON APPARATO A PCM + GRUPPO CALDAIA-TURBINA - CIRCUITO UNICO. ....	262
FIGURA 164 - SCHEMA DELLA RIDUZIONE DELL'IMPATTO ENERGETICO, ECONOMICO E AMBIENTALE CON L'INSERIMENTO DEL NUOVO SISTEMA DI RECUPERO E PRODUZIONE ENERGIA. ....	269
FIGURA 165 - VANTAGGI DIFFERITORE TERMICO INERZIALE A PCM INSERITO NELLA LINEA FUMI DI UN'ACCIAIERIA CON EAF.....	283
FIGURA 166 - A) DISPOSIZIONE A TUBI ALLINEATI; B) DISPOSIZIONE A TUBI SFALSATI. FONTE: [77]. ....	285
FIGURA 167 - FATTORE DI CORREZIONE.....	289
FIGURA 168 - GEOMETRIA SEMPLIFICATA DEL MODELLO IN ESAME. ....	292
FIGURA 169 - MESHATURA DELLA GEOMETRIA. ....	292
FIGURA 170 - TENDINA DELLE IMPOSTAZIONI DEL MODELLO IN ESAME DEL SOTWARE FLUENT®.....	293
FIGURA 171 - GEOMETRIA CON PIÙ PUNTI NOTEVOLI IN CUI VERRÀ MONITORATA LA TEMPERATURE. ....	294
FIGURA 172 - POSSIBILE LUNGHEZZA PER I TUBI APPARATO A PCM E DETTAGLIO DEL FONDO ISOLANTE DEL TUBI. ....	296
FIGURA 173 - POSSIBILE STRUTTURA DI SOLLEVAMENTO TUBI. ....	297
FIGURA 174 - SOLLEVAMENTO DEI TUBI. ....	297
FIGURA 175 - POSSIBILE STRUTTURA DI SUPPORTO TUBI. ....	299
FIGURA 176 - VISTA LATERALE DEI TUBI ALL'INTERNO DELLA SETTLING CHAMBER E DIMENSIONI DELLA STRUTTURA DI SUPPORTO. ....	300
FIGURA 177 - VISTA FRONTALE DEI TUBI ALL'INTERNO DELLA SETTLING CHAMBER E DIMENSIONI DELLA STRUTTURA DI SUPPORTO. ....	301
FIGURA 178 - DEFINIZIONE GEOMETRICA STRUTTURA DI SUPPORTO TUBI. ....	302
FIGURA 179 - IMPOSIZIONE CARICO (FIGURA A SINISTRA); IMPOSIZIONE VINCOLO (FIGURA A DESTRA).....	305
FIGURA 180 - FATTORE DI SICUREZZA. ....	305
FIGURA 181 - SPOSTAMENTO.....	306
FIGURA 182 - SOLLECITAZIONE VON MISES. ....	306
FIGURA 183 - TUBO DI ACCIAIO CONTENENTE NUCLEO CILINDRICO DI ALLUMINIO E CON SISTEMA DI RIFERIMENTO {X, Y, Z} (A DESTRA).....	307
FIGURA 184 - TURBOGENERATORE. FONTE: [69].....	327



## LISTA TABELLE

TABELLA 1 - CARATTERISTICHE TECNICHE DI ALCUNI EAF ATTUALMENTE IN USO. FONTE: [9] .....	56
TABELLA 2 - DATI DI INPUT E OUTPUT PER FORNI ELETTRICI AD ARCO ALL'INTERNO DELLA UE. ....	57
TABELLA 3 - PARAMETRI DI COMPOSIZIONE RISONTRABILI IN POLVERI DI ACCIAIERIE ELETTRICA. FONTE: [25].....	61
TABELLA 4 - PRINCIPALI COMPONENTI GASSOSI PRESENTI NEI FUMI PRIMARI. FONTE: [26]. ....	62
TABELLA 5 - PARAMETRI DI COMPOSIZIONE RISONTRABILI NEI FUMI SECONDARI PROVENIENTI DA FORNI ELETTRICI. FONTE: [25]. ....	68
TABELLA 6 - COMPOSIZIONE CHIMICA DELLE POLVERI DA UN EAF TRADIZIONALE PER LA PRODUZIONE DI ACCIAIO AL CARBONIO/BASSO LEGATI E PER ACCIAIO ALTO LEGATO/INOSSIDABILE. FONTE: [6, P. 443] .....	70
TABELLA 7 - FATTORI DI EMISSIONE DI CO <sub>2</sub> NEI DIVERSI SISTEMI DI PRODUZIONE DELL'ACCIAIO. FONTE: [34, P. 4.25]. .	72
TABELLA 8 - CONTENUTO DI CARBONIO MEDIO IN ALCUNE SOSTANZE UTILI ALLA FUSIONE DELL'ACCIAIO. ADATTATO DA: [34, P. 4.26]. ....	73
TABELLA 9 - CONCENTRAZIONE DELLE EMISSIONI DA EAF DOPO I SISTEMI DI ABBATTIMENTO [6, P. 433]. ....	93
TABELLA 10 - FLUSSI ENERGETICI IN INPUT E OUTPUT DA FORNI ELETTRICI AD ARCO. ADATTATO DA: [22]. ....	97
TABELLA 11 - CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA DI UN PROCESSO EAF. FONTE: [38]. ....	101
TABELLA 12 - TEMPERATURE DI FUSIONE, EBOLLIZIONE E CRITICHE DEI PCM. ....	132
TABELLA 13 - CARATTERISTICHE FISICHE E TERMODINAMICHE DI AL, Pb, Sn, SALI FUSI E H <sub>2</sub> O. ....	135
TABELLA 14 - PROPRIETÀ DEI FUMI NELLA SEZIONE RAPPRESENTATIVA DELLA SETTLING CHAMBER. FONTE: [39]. ....	155
TABELLA 15 - VARIANZA E DEVIATIONE STANDARD RIFERITI ALL'ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NELLA SEZIONE CONSIDERATA DELLA SETTLING CHAMBER.....	157
TABELLA 16 - RIASSUNTO PROPRIETÀ AL E Pb E CALCOLO DELLA QUANTITÀ, VOLUME E COSTO DEL MATERIALE NECESSARIO ALLA CALMIERAZIONE. ....	166
TABELLA 17 - DIMENSIONI SETTLING CHAMBER. FONTE: [39].....	168
TABELLA 18 - DIMENSIONI DEL DIFFERITORE TERMICO INERZIALE. ....	168
TABELLA 19 - VOLUME DEL SINGOLO TUBO DA 2" E NUMERO TOTALE DI TUBI DEL DIFFERITORE NEI CASI DI AL E Pb COME PCM. ....	173
TABELLA 20 - DATI RIASSUNTIVI DELLE SIMULAZIONI SUL DIFFERITORE CON DISPOSIZIONE A TUBI ALLINEATI.....	178
TABELLA 21 - CONFRONTO TRA VALORI DI TEMPERATURA DEI FUMI IN INGRESSO E USCITA DAL DIFFERITORE CON TUBI DA 2" .....	179
TABELLA 22 - CONFRONTO TRA VALORI DI TEMPERATURA DEI FUMI IN INGRESSO E USCITA DAL DIFFERITORE CON TUBI DA 1" .....	182
TABELLA 23- CONFRONTO TRA VALORI DI TEMPERATURA DEI FUMI IN INGRESSO E USCITA DAL DIFFERITORE CON TUBI DA ¾" .....	184
TABELLA 24 - CONFRONTO DELLE TEMPERATURE DEI FUMI, PRIMA E DOPO LA CALMIERAZIONE, NELLE DIVERSE CONFIGURAZIONI SIMULATE A TUBI ALLINEATI.....	186

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

TABELLA 25 - DATI RIASSUNTIVI DELLE SIMULAZIONI SUL DIFFERITORE CON DISPOSIZIONE A TUBI SFALSATI .....	190
TABELLA 26 - CONFRONTO TRA VALORI IN INGRESSO E USCITA DAL DIFFERITORE 4x4, TUBI DA 1" .....	191
TABELLA 27 - CONFRONTO TRA VALORI IN INGRESSO E USCITA DAL DIFFERITORE 4x2,65, TUBI DA 1" .....	191
TABELLA 28 - CONFRONTO TRA VALORI IN INGRESSO E USCITA DAL DIFFERITORE 4x1,34, TUBI DA 1" .....	192
TABELLA 29 - CONFRONTO DELLE TEMPERATURE DEI FUMI, PRIMA E DOPO LA CALMIERAZIONE, NELLE DIVERSE CONFIGURAZIONI SIMULATE A TUBI SFALSATI. ....	193
TABELLA 30 - CONFRONTO TRA VALORI DI TEMPERATURA DEI FUMI IN INGRESSO E USCITA DAL DIFFERITORE CON SPORCAMENTO SU TUTTI I TUBI (DISPOSIZIONE TUBI ALLINEATI, 2"). ....	196
TABELLA 31 - CONFRONTO TRA VALORI DI TEMPERATURA DEI FUMI IN INGRESSO E USCITA DAL DIFFERITORE CON SPORCAMENTO SUI PRIMI 10 TUBI (DISPOSIZIONE TUBI ALLINEATI, 2"). ....	198
TABELLA 32 - CONFRONTO PERDITE DI CARICO NELLE DUE CONFIGURAZIONE DEL DIFFERITORE A TUBI DA 1" ALLINEATI E SFALSATI. ....	199
TABELLA 33 - DATI CONFIGURAZIONE FINALE DIFFERITORE E SUO POSSIBILE COSTO. ....	203
TABELLA 34 - DATI DEI TUBI PER LA SIMULAZIONE E CONSEGUENTE ANALISI DELLE TENSIONI.....	205
TABELLA 35 - CARATTERISTICHE DI UN IMPIANTO TRADIZIONALE A FORNO ELETTRICO AD ARCO.....	211
TABELLA 36 - CONDIZIONI DI LAVORO DELLE SERRANDE E VALVOLE NELLE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO NELL'IMPIANTO TRADIZIONALE. ....	216
TABELLA 37 - CONDIZIONI DI LAVORO DELLE SERRANDE E VALVOLE DEI VENTILATORI AL CAMINO E BOOSTER NELLE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO NELL'IMPIANTO TRADIZIONALE. ....	216
TABELLA 38 - CARATTERISTICHE IMPIANTO TRADIZIONALE NEL PUNTO 1 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO. .....	216
TABELLA 39 - CARATTERISTICHE IMPIANTO TRADIZIONALE NEL PUNTO 2 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO. .....	218
TABELLA 40 - CARATTERISTICHE IMPIANTO TRADIZIONALE NEL PUNTO 3 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO. .....	219
TABELLA 41 - CARATTERISTICHE IMPIANTO TRADIZIONALE NEL PUNTO 4 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO. .....	221
TABELLA 42 - CARATTERISTICHE DELLE POLVERI DELL'IMPIANTO CONSIDERATO.....	223
TABELLA 43 - CONFRONTO TEMPERATURA, VARIANZA E DEVIAZIONE STANDARD PRIMA E DOPO IL DIFFERITORE. ....	228
TABELLA 44 - PREVENTIVO APPARATO A PCM. FONTE: [67]- [63]. ....	229
TABELLA 45 - PREVENTIVO GRUPPO CALDAIA-TURBINA. FONTE: [68]- [69]. ....	240
TABELLA 46 - RIASSUNTO VALORI DI ENERGIA E POTENZA IN GIOCO NELLO SCAMBIO FUMI/CALDAIA STATO A E B.....	252
TABELLA 47 - RIASSUNTO POTENZA ELETTRICA PRODOTTA STATO A E B. ....	253
TABELLA 48 - CONDIZIONI DI LAVORO DELLE SERRANDE E VALVOLE NELLE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO NEL NUOVO IMPIANTO - STATO B1. ....	257
TABELLA 49 - CONDIZIONI DI LAVORO DELLE SERRANDE E VALVOLE DEI VENTILATORI E BOOSTER NELLE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO NEL NUOVO IMPIANTO - STATO B1 .....	257

## Lista Tabelle

TABELLA 50 - CARATTERISTICHE IMPIANTO NUOVO NEL PUNTO 1 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO - STATO B1. ....	258
TABELLA 51 - CARATTERISTICHE IMPIANTO NUOVO NEL PUNTO 2 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO - STATO B1. ....	258
TABELLA 52 - CARATTERISTICHE IMPIANTO NUOVO NEL PUNTO 3 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO - STATO B1. ....	259
TABELLA 53 - CARATTERISTICHE FILTRI SCELTI PER L'IMPIANTO TRADIZIONALE (STATO A) E PER QUELLO CON APPARATO A PCM A LINEE SEPARATE (STATO B1). ....	261
TABELLA 54 - COSTO FILTRI PER L'IMPIANTO TRADIZIONALE (STATO A) E PER QUELLO CON APPARATO A PCM A LINEE SEPARATE (STATO B1). ....	261
TABELLA 55 - CONDIZIONI DI LAVORO DELLE SERRANDE E VALVOLE NELLE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO NEL NUOVO IMPIANTO - STATO B2. ....	263
TABELLA 56 - CONDIZIONI DI LAVORO DELLE SERRANDE E VALVOLE DEI VENTILATORI E BOOSTER NELLE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO NEL NUOVO IMPIANTO - STATO B2. ....	263
TABELLA 57 - CARATTERISTICHE IMPIANTO NUOVO NEL PUNTO 1 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO - STATO B2. ....	264
TABELLA 58 - CARATTERISTICHE IMPIANTO NUOVO NEL PUNTO 2 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO - STATO B2. ....	264
TABELLA 59 - CARATTERISTICHE IMPIANTO NUOVO NEL PUNTO 3 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO - STATO B2. ....	265
TABELLA 60 - CARATTERISTICHE IMPIANTO NUOVO NEL PUNTO 4 DURANTE LE QUATTRO FASI DI FUNZIONAMENTO - STATO B2. ....	266
TABELLA 61 - CARATTERISTICHE FILTRI PER L'IMPIANTO TRADIZIONALE (STATO A) E QUELLO CON APPARATO A PCM A CIRCUITO UNICO (STATO B2). ....	267
TABELLA 62 - COSTO FILTRI PER L'IMPIANTO TRADIZIONALE (STATO A) E QUELLO CON APPARATO A PCM A CIRCUITO UNICO (STATO B2). ....	267
TABELLA 63 - DIFFERENZE DI COSTO DEI FILTRI NEGLI STATI A, B1 E B2. ....	267
TABELLA 64 - RIASSUNTO DELLE PERDITE DI CARICO NELL'IMPIANTO TRADIZIONALE (STATO A) E CON APPARATO A PCM (STATO B). ....	272
TABELLA 65 - RIASSUNTO RISPARMIO ECONOMICO ANNUO CON LA RIDUZIONE DELLE PERDITE DI CARICO. ....	276
TABELLA 66 - RIASSUNTO RISPARMIO ECONOMICO ANNUO CON LA RIDUZIONE DEL MATERIALE COSTRUZIONE E TUBI. ....	278
TABELLA 67 - VALORI DELLE COSTANTI C E M. FONTE: [77]. ....	287
TABELLA 68 - RAPPORTO TRA $h_c$ PER N FILE TRASVERSALI E $h_c$ PER DIECI FILE TRASVERSALI NEL MOTO TURBOLENTO. FONTE: [77]. ....	287
TABELLA 69 - PROPRIETÀ TERMICHE E STRUTTURALI DELL'ACCIAIO INOX AISI 316. FONTE: [79]. ....	310
TABELLA 70 - TENSIONE DI SNERVAMENTO PER ALLUMINIO SERIE 2000,2011-T3. FONTE: [81]. ....	311

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

TABELLA 71- VALORI DI STRESS IDEALI PER TUBO ACCIAIO (DE 60 MM, SPESSORE = 4 MM) IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA. ....	314
TABELLA 72 - VALORI DI STRESS PER TUBO ACCIAIO (DE 60 MM, SPESSORE = 4 MM) IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA. ....	317
TABELLA 73 - CARATTERISTICHE TECNICHE FILTRI A MANICHE. FONTE: [70]. ....	329
TABELLA 74 - PREVENTIVO DI SPESA FILTRI A MANICHE. FONTE: [70]. ....	330
TABELLA 75 - PREVENTIVO SI SPESA PER TESSUTO FILTRI A MANICHE. FONTE: [70]. ....	330
TABELLA 76 - SPESA PER TRASPORTO E MONTAGGIO. FONTE: [70]. ....	330
TABELLA 77 - SCELTA FILTRO A MANICHE - STATO A. ....	331
TABELLA 78 - SCELTA DEL FILTRO E PREVENTIVO PER MODULI - STATO A. ....	331
TABELLA 79 - PREVENTIVO TOTALE DI SPESA DEL FILTRO - STATO A. ....	332
TABELLA 80 - PREVENTIVO SPESA FILTRO LINEA PRIMARIA - STATO B1.....	333
TABELLA 81 - SCELTA DEL FILTRO E PREVENTIVO PER MODULI NELLA LINEA SECONDARIA - STATO B1.....	333
TABELLA 82 - PREVENTIVO SPESA FILTRO LINEA SECONDARIA - STATO B1.....	334
TABELLA 83 - PREVENTIVO TOTALE SPESA FILTRO - STATO B2 .....	335



## SOMMARIO

Il presente elaborato affronta il tema del recupero energetico nella produzione di acciaio mediante forno elettrico ad arco. L'argomento suscita particolare interesse in considerazione dell'elevata quantità di energia dissipata dal processo e potenzialmente recuperabile, oltre al fatto che sono poche le tecnologie attualmente realizzate che possano vantare un efficiente recupero. In tal senso i fumi di scarto del processo fusorio rappresentano la fonte più rilevante ai fini del recupero termico per la produzione di energia; tuttavia, l'alta variabilità delle loro temperature e portate, oltre al fattore sporco, rende difficile e poco efficiente qualsiasi tipo di intervento.

Il sistema di recupero studiato e recentemente brevettato consiste nella realizzazione di un differitore termico inerziale contenente opportuni materiali a cambiamento di fase per accumulare energia termica durante le fasi "calde" del processo fusorio per poi cederla in quelle "fredde". Il conseguimento della calmierazione delle temperature e portate lungo la linea di trattamento e depurazione dei fumi del forno elettrico ad arco rende possibile e conveniente un recupero termico e/o la produzione di energia elettrica con tecnologie tradizionali note.

L'apparato è stato oggetto di simulazioni termo-fluidodinamiche e di considerazioni meccaniche e metallurgiche per studiarne il comportamento e individuare un possibile modello realizzativo. Ne è stato valutato l'ipotetico inserimento, unitamente a un impianto di produzione di energia elettrica, nella linea fumi di una tipica acciaieria a forno elettrico con il risultato di ottenere una completa integrazione del sistema nel layout esistente.

Vengono infine riportate le positive valutazioni in ambito energetico, economico, impiantistico e ambientale a supporto del nuovo apparato di recupero proposto.



## INTRODUZIONE

Il risparmio energetico ha un ruolo molto importante, se non addirittura essenziale, nell'industria moderna. L'aumento dei costi dei vettori energetici e le crescenti problematiche di sicurezza ambientale hanno condotto molti paesi ad adottare politiche improntate a un utilizzo più razionale dell'energia puntando al recupero energetico e alla ricerca di fonti alternative (fonti rinnovabili) per rendere lo sviluppo della tecnologia sostenibile e compatibile con l'ambiente.

Le normative in termini di recupero energetico e tutela ambientale, sempre più stringenti (anche se in modalità diverse a livello interazionale), sostengono meccanismi di incentivazione al recupero e risparmio energetico (quali i Titoli di Efficienza Energetica, TEE) e di disincentivazione alla produzione di gas serra (quali i certificati grigi o Emission Trading, ET).

In questo contesto, le soluzioni destinate a migliorare l'efficienza energetica dei processi produttivi possono quindi trovare nella siderurgia un vasto campo di applicazione dato che questo settore è il secondo massimo consumatore di energia. Tra i due principali metodi di produzione dell'acciaio si è focalizzata l'attenzione sui forni elettrici ad arco tradizionali (d'ora in poi EAF, Electric Arc Furnace) valutando la possibilità di recuperare il calore disperso nei fumi emessi durante il processo fusorio (*off-gas*). Questo perché gli *off-gas* presentano un alto contenuto entalpico anche se l'andamento intermittente del forno determina un'alta variabilità nelle temperature e portate degli stessi inficiando l'efficienza di sistemi di recupero e/o produzione di energia. Analizzando lo stato dell'arte sulle tecnologie utilizzate per lo sfruttamento dell'energia dei fumi, l'opzione che è stata sviluppata su scala industriale è quella del preriscaldamento della carica del forno (il rottame); altri sistemi riguardano per lo più la produzione di vapore per diverse possibili applicazioni, soprattutto internamente all'acciaieria, ma sono al vaglio i possibili sfruttamenti termici e di generazione di energia. La tesi s'inserisce in questo ambito, introducendo un sistema di recupero di nuova concezione che ha come obiettivo principale la calmierazione del flusso dei fumi rendendo possibile il successivo sfruttamento per la produzione di energia elettrica mediante tecnologie note. L'elemento innovativo è rappresentato dall'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (d'ora in poi PCM, Phase Change Material) contenuti in un apposito scambiatore e che a contatto coi fumi accumulano grandi quantità di energia termica raffreddando il flusso quando le temperature sono elevate (fase "calda"), per poi cederla nelle fasi a bassa temperatura (fase "fredda"). Il nuovo sistema a PCM, definito come differitore termico inerziale, funge da "volano termico" moderando le temperature e portate dei fumi di scarto del forno. Il focus della tesi riguarda la realizzazione impiantistica del nuovo apparato ed è stata così concepita:

### Background

- Introduzione sull'acciaio quale materiale molto diffuso e sui sistemi altamente energivori per la sua produzione;

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

- Analisi del forno elettrico ad arco (EAF) per capire il processo fusorio e le evoluzioni che hanno portato al miglioramento dello stesso in termini di minor consumi energetici e di tempi di produzione;
- Analisi delle caratteristiche dei fumi emessi durante il processo fusorio evidenziandone sia gli aspetti di variabilità di temperature e portate, sia le caratteristiche chimico-fisiche con la presenza di polveri e altri elementi inquinanti da considerare attentamente in ambito di recupero energetico.
- Analisi della linea di trattamento e depurazione fumi tradizionale indicando le problematiche e criticità per ogni componente; questo studio risulta utile nell'individuazione della zona idonea in cui inserire l'apparato di recupero nella quale i fumi presentino adeguate temperature per lo sfruttamento e senza incorrere in limitazioni strutturali e impiantistiche;
- Analisi dei consumi energetici da EAF e del contenuto entalpico dei fumi che ne giustifica l'utilizzo ai fini del recupero. Valutazione degli aspetti critici e dei vantaggi del recupero. Stato dell'arte delle tecnologie utilizzate per il recupero dai fumi di EAF indicandone in particolare i rispettivi risparmi energetici.

*Il nuovo sistema di recupero dagli off-gas di EAF mediante PCM*

- Principio di funzionamento dell'apparato o differitore termico inerziale a PCM di tipo "passivo" (indagato nel presente elaborato) e "attivo" (in fase di studio). Analisi dei materiali a cambiamento di fase con la scelta del PCM idoneo al recupero da off-gas.
- Analisi del differitore termico inerziale: scelta della zona ideale per il suo inserimento; analisi andamento temperatura, potenza ed energia potenzialmente accumulabile dal PCM; stima della quantità di PCM necessario; struttura del differitore e modello per le simulazioni; simulazioni termofluidodinamiche sull'andamento dello scambio tra fumi e PCM; configurazione tecnologica proposta.

*Impianto di recupero con PCM e di produzione energia elettrica*

- Ipotesi relative all'inserimento del nuovo sistema costituito dal differitore passivo e dal gruppo caldai-turbina per la produzione di energia elettrica in una linea fumi tradizionale di un'acciaieria: confronto sull'andamento (portate, temperature) degli off-gas e degli scambi energetici fumi-caldiaia nell'impianto tradizionale e con il nuovo sistema nei due casi di linee fumi separate o a circuito unico;
- Valutazione dei risultati e degli effetti conseguiti in ambito tecnologico, energetico, economico e ambientale anche a livello nazionale permettendo di valutare globalmente la potenzialità del recupero effettuato;
- Conclusioni.

Si precisa che le simulazioni riportate in questo elaborato sono state commissionate al fine di valutare la fattibilità tecnica e impiantistica del nuovo apparato e di esplorarne le potenzialità; non costituiscono pertanto oggetto specifico della ricerca qui presentata.

# **BACKGROUND**



# 1 L'ACCIAIO E I PROCESSI PRODUTTIVI

## 1.1 L'ACCIAIO

L'acciaio è sostanzialmente una lega a base di ferro con ridotto contenuto di carbonio cui si aggiungono altri elementi metallici e non in quantità strettamente controllate per conferirgli particolari proprietà e ottimizzarne le prestazioni.

L'acciaio è uno dei materiali più diffusi nel mondo, secondo per tonnellate prodotte solo al cemento, ed è presente in tutti i settori della vita sociale per la sua sorprendente versatilità:

- Può essere facilmente forgiato per deformazione a caldo e a freddo, lavorato con macchine utensili, assemblato per saldatura o altri processi;
- Garantisce ottime caratteristiche meccaniche, adattabili a qualsiasi impiego strutturale;
- Può essere sfruttato per le sue proprietà fisiche di resistenza alla temperatura, alla corrosione, alle radiazioni, ecc.;
- È un prodotto dalle molteplici formulazioni, adattabile in funzione della composizione e dei cicli di fabbricazione alle più diverse esigenze degli utilizzatori [1].

A questo si aggiungono la grande riproducibilità di caratteristiche, legata allo stretto controllo dei processi di produzione e l'ampia disponibilità. In particolare, l'acciaio presenta una caratteristica davvero peculiare: è riciclabile al 100% per un numero praticamente infinito di volte senza che ne siano perse le qualità strutturali e di resistenza.

La produzione di acciaio nel mondo negli ultimi 60 anni ha avuto un forte aumento passando da 190 Mln t degli anni '50 [2] a 1,527 Mld t del 2011 [3], in ripresa dopo la forte crisi economica del 2009.



Figura 1 - Andamento della produzione dell'acciaio dal 1950 al 2011. Fonte: [3].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Secondo quanto riportato da Federacciai nel “Rapporto Ambientale 2011” [4, pp. 16-17], l’Asia si classifica al primo posto come produttore d’acciaio: 975,9 Mln t di acciaio nel 2011, pari al 64% del totale mondiale, aumentato rispetto al 2010 del 6,7%. La Cina detiene il primato mondiale di produzione con i 684 Mln t del 2011, il 45% della produzione mondiale, anche se il tasso di produzione è sceso al 7,3% dopo un lungo periodo di crescita a due cifre.

L’Unione Europea, UE, rimane al secondo posto con 177,2 Mln t, l’11,7% del totale, in crescita del 2,7%. L’Italia continua a essere il secondo produttore europeo (16,2%) dopo la Germania, con i 28,7 Mln t del 2011, in aumento dell’11,6% rispetto all’anno precedente.

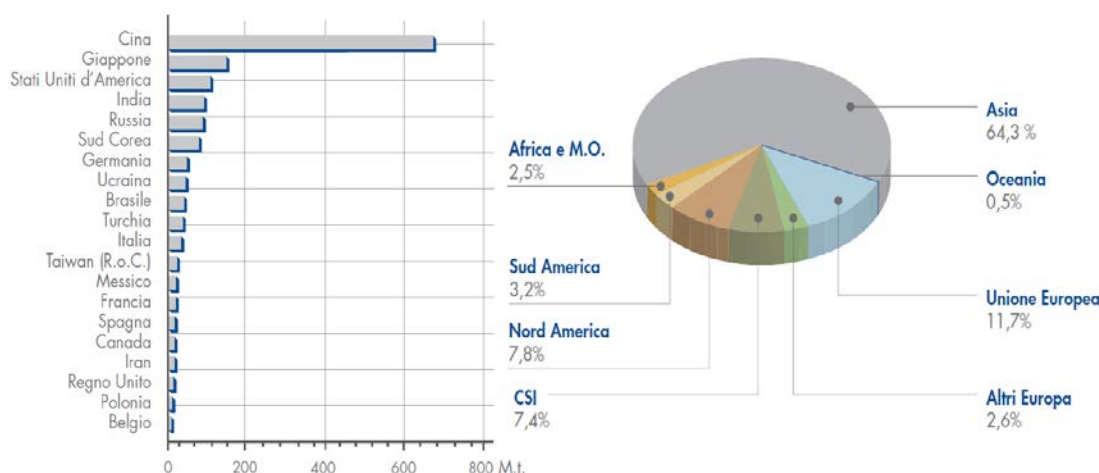


Figura 2 - Grafici relativi ai paesi maggiori produttori di acciaio al 2011. Adattato da: [4]

Tuttavia le classifiche in corso per il 2012 non sembrano essere altrettanto positive. Un articolo pubblicato sul Sole 24ore del 12 ottobre 2012 [5] riporta, soprattutto nel mercato europeo, dati in calo nella domanda di acciaio che “è avviata quest'anno a una contrazione del 5,6%, a 144,5 milioni di tonnellate (prodotti finiti).” La contrazione della domanda di acciaio investe più in generale il campo siderurgico a livello internazionale e “a un ritmo superiore a quello che ci si aspettava solo qualche mese fa, osserva la World Steel Association (Worldsteel), organismo che riunisce 170 imprese siderurgiche di tutto il mondo”. Si legge ancora che “Dopo il +6,2% del 2011, a livello mondiale la domanda di acciaio crescerà quest'anno di appena il 2,1% e il prossimo del 3,6%, quando si porterà a 1,455 miliardi di tonnellate, un livello comunque da record. Lo scorso aprile la stessa Worldsteel indicava un +3,6% nel 2012, seguito da un +4,5% nel 2013. «All'inizio dell'anno vedevamo qualche segno di ripresa rispetto al rallentamento di fine 2011», ha spiegato Hans Jurgen Kerkhoff, che presiede il Comitato economico dell'associazione, nonché la Federazione siderurgica tedesca. «Durante il secondo trimestre, tuttavia, la situazione economica si è deteriorata, a causa delle continue incertezze sollevate dalla crisi dei debiti sovrani nell'Eurozona e per una frenata più netta del previsto in Cina».

Anche il gigante asiatico sta moderando il suo appetito di acciaio: il ritmo di crescita dei consumi, che per anni è stato a due cifre percentuali, quest'anno sarà più che dimezzato (+2,5%, dopo il +6,2% del 2011) e nel 2013 sarà del 3,1 per cento. Incrementi inferiori a quelli previsti per l'India



## 1. L'acciaio e i processi produttivi

(+5,5 e +5%) e per il Nord America, che nel 2012 vedrà un +7,5% grazie alla ripresa di auto ed edilizia (nel 2013 il tasso si ridurrà al 3,6%).

Le difficoltà più gravi riguardano comunque la UE-27: nel 2012 il calo dei consumi, complessivamente del 5,6%, sarà dell'11,9% per la Spagna e addirittura del 12,6% per l'Italia. Non verrà comunque risparmiata nemmeno la Germania (-4,7%). Worldsteel intravede per l'acciaio Ue una ripresa nel 2013, ma sarà molto modesta (+2,4%).”

### 1.2 PROCESSI DI PRODUZIONE DELL'ACCIAIO

Secondo le Best Available Technologies (BAT)<sup>1</sup> sono quattro i processi produttivi attualmente utilizzati a livello mondiale per la produzione dell'acciaio (Figura 3):

1. Ciclo integrale BF/BOF: comprende le operazioni di altoforno (Blast Furnace, BF) e del convertitore a ossigeno (Basic Oxygen Furnace, BOF) secondo il processo Linz-Donawitz (LD):
  - BF: il minerale di ferro, dopo aver subito processi di frantumazione, vagliatura, arricchimento e agglomerazione, viene caricato e portato a fusione in altoforno unitamente a coke e calcare dove subisce un processo di riduzione indiretta: si ottiene ghisa, una lega di ferro-carbonio con un contenuto di carbonio intorno al 4-5%, definita anche come “pig-iron”, ovvero metallo caldo;
  - BOF: la ghisa viene trasportata in acciaieria e nei forni di affinazione viene abbassato il suo il contenuto di carbonio (e di impurità, principalmente zolfo e fosforo) per ottenere l'acciaio. I forni di affinazione si basano prevalentemente sul convertitore a ossigeno, processo Linz-Donawitz, LD; si tratta di un processo basico all'ossigeno ed è infatti talvolta indicato mutandolo dal contesto anglosassone come BOS (Basic Oxygen Steelmaking), BOP (Basic Oxygen Process) o BOF (Basic Oxygen Furnace);
2. Forno elettrico ad arco (in inglese Electric Arc Furnace, EAF):
  - La produzione di acciaio avviene attraverso la fusione del rottame (principalmente usato come carica metallica di base), opportunamente preparato e selezionato, che ha luogo nel forno in cui l'arco scocca tra gli elettrodi, portatori della corrente, e la carica metallica;
3. Riduzione diretta (Direct Reduction, DR):
  - DR: processo di riduzione diretta del minerale di ferro senza il passaggio del metallo alla fase liquida, come accade invece negli altoforni. Il prodotto è una spugna di ferro (“sponge iron” in inglese) chiamato DRI (Direct Reduction Iron) che rappresenta un “rottame sintetico” a elevato tenore di ferro, omogeneità e purezza;

---

<sup>1</sup> Le Best Available Techniques (BAT) sono state introdotte dalla Direttiva Europea IPPC 96/61/CE per la prevenzione e la riduzione integrata dell'inquinamento (ora accorpata nella nuova direttiva europea IED 2010/75/EU); le BAT rappresentano lo stadio più efficiente e avanzato delle tecniche o tecnologie correnti che permettano di evitare o ridurre i valori delle emissioni delle attività produttive e conseguente impatto ambientale [83].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

- EAF: il DRI viene utilizzato come carica negli EAF, utilizzando anche rottame, per la produzione dell'acciaio;
4. Smelting Reduction, SR secondo i processi Corex/Finex:
- SR: processo di produzione della ghisa a partire dal minerale di ferro, ma senza l'utilizzo del coke come avviene nel ciclo integrale BF/BOF. Si impiegano due unità: la prima in cui il minerale viene scaldato e ridotto dai gas prodotti dalla seconda unità che assolve al compito di fusione-gassificazione alimentata da carbone e ossigeno. Il minerale parzialmente ridotto viene fuso nella seconda unità ottenendo ghisa;
  - BOF: la ghisa viene trasferita in acciaieria e trasformata in acciaio nei comuni BOF.

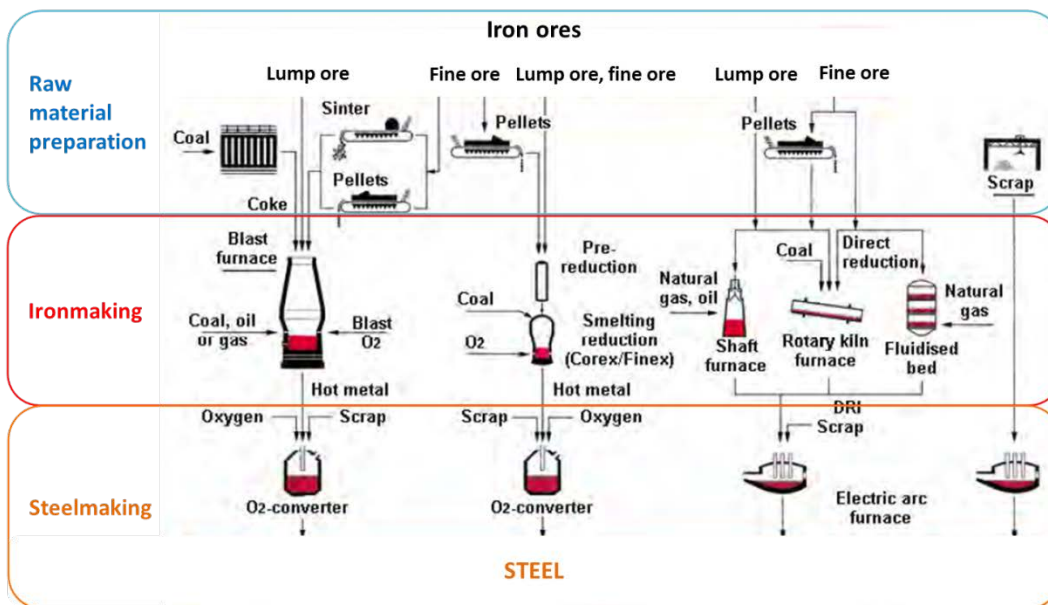


Figura 3 - Principali processi di produzione dell'acciaio. Adattato da: [6, p. 9].

In figura si evidenziano le fasi di:

- Preparazione del materiale (Raw material preparation) per i processi BF, DR, SR;
- Riduzione del minerale di ferro (Ironmaking) mediante BF, DR o SR;
- Produzione dell'acciaio (Steelmaking) mediante BOF (a partire dalla ghisa di BF o SR) o EAF (a partire da rottame e/o DRI).

Il ciclo integrale e il forno elettrico ad arco sono i due principali sistemi utilizzati per la produzione di acciaio, mentre la direct e smelting reduction rappresentano i due principali metodi alternativi; in particolare si registra il crescente utilizzo del DRI come carica per gli EAF grazie alle sue caratteristiche di elevato contenuto di ferro, omogeneità e purezza che portano a migliori qualità di

## 1. L'acciaio e i processi produttivi

acciaio, minori problemi di flickeraggio<sup>2</sup> oltre a limitare i problemi legati alla variabilità del costo del rottame.

Il grafico di figura riporta i valori percentuali di produzione dell'acciaio prodotto nei BOF ed EAF; viene anche indicata la modesta quota dei cicli con altoforno che utilizzano il processo Martin-Siemens (Open Heart Furnace, OHF)<sup>3</sup> anziché quello LD.

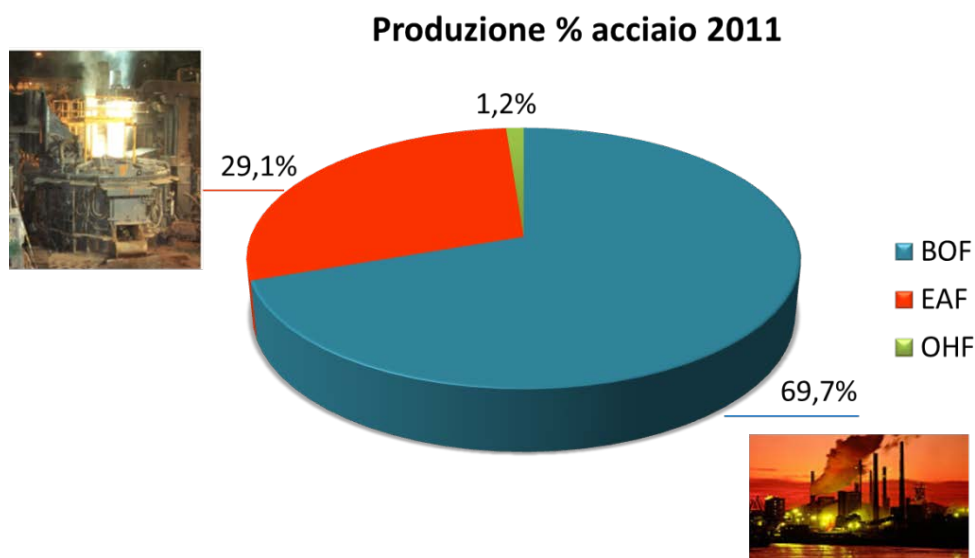


Figura 4 - Produzione percentuale dell'acciaio dai processi BF/BOF, EAF e OHF. Adattato da: [7].

In Figura 5 viene invece rappresentata la proiezione dell'utilizzo dei processi citati. La tecnologia adottata per la produzione dell'acciaio, infatti, varia continuamente, spinta soprattutto dalla necessità di minori consumi e minori inquinanti prodotti dal processo stesso. Dal grafico si evince che il forno elettrico ad arco potrebbe divenire predominante a discapito del convertitore BOF.

---

<sup>2</sup> Il flicker rappresenta una variazione di tensione nella rete elettrica di alimentazione, molto sentita nei processi dell'EAF alimentato da rottame.

<sup>3</sup> L'OHF è un forno a riverbero con un fondo di natura acida o basica. Per il suo funzionamento vengono bruciati metano, gasolio, gas naturale e gas di gasogeno. Il forno viene caricato con rottami di ghisa e acciaio; l'aria e il combustibile vengono preriscaldati tramite degli scambiatori di calore rigenerativi. Il forno Martin-Siemens produce acciai di buona qualità; il processo è molto lento e se da un lato questo ne permette un facile controllo, dall'altro si traduce in una forte anti-economicità che lo rende ormai in via di disuso [86].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

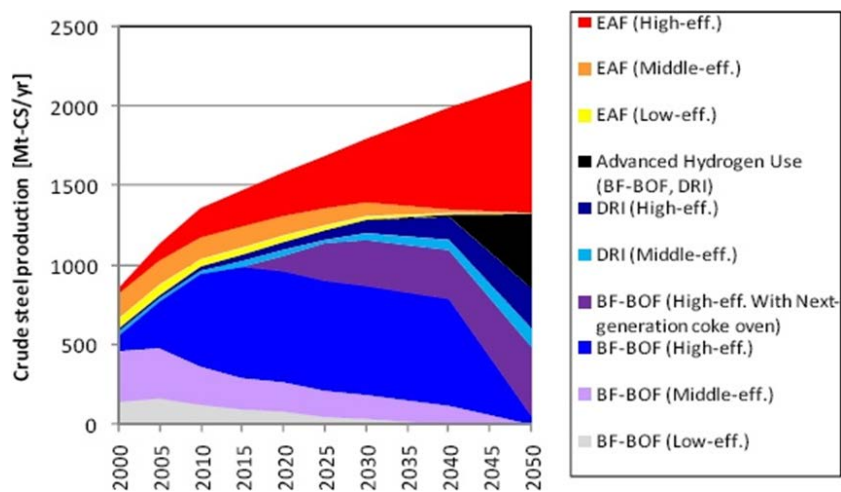


Figura 5 - Processi di produzione dell'acciaio e loro possibile evoluzione. Fonte: [8]

Nella trattazione viene indagato il processo di un EAF tradizionale e la possibilità del recupero di energia dai fumi che, come verrà spiegato nel capitolo 5, rappresenta una notevole fonte termica da considerare nell'ottica del raggiungimento di efficienze energetiche, economiche e ambientali nella produzione dell'acciaio.

## 2 IL FORNO ELETTRICO AD ARCO

Nel presente elaborato si fa riferimento a un forno elettrico ad arco diretto, a suola non conduttrice, a corrente alternata e alimentato da rottame come carica metallica principale. Nel seguito vengono illustrati il funzionamento e caratteristiche peculiari dei forni elettrici e la loro evoluzione negli anni.

### 2.1 L'ARCO ELETTRICO

Il forno elettrico ad arco (EAF) è un impianto che permette di fondere una carica metallica contenente un'elevata percentuale di ferro per produrre direttamente acciaio liquido. Il nome deriva dalla modalità di scambio energetico operante attraverso la radiazione diretta di uno o più archi elettrici. L'arco elettrico è una sorgente radiante determinata da un'elevata densità di corrente che passa attraverso un mezzo gassoso ionizzato. Tale passaggio determina delle condizioni di temperatura talmente elevate da permettere alle molecole del gas stesso di passare allo stato di plasma. Definito come il quarto stato della materia, il plasma è un insieme di elettroni e di ioni, globalmente neutro. A causa di alte temperature gli elettroni si dissociano dai nuclei degli atomi cui appartengono e si muovono verso l'elettrodo positivo, detto anodo; lo stesso accade simmetricamente per i nuclei ionizzati, in quanto, caratterizzati da un eccesso di carica positiva, si muovono verso l'elettrodo negativo, detto catodo. Il plasma, così creato, ha una densità di potenza estremamente elevata ed è in grado di raggiungere temperature elevatissime, superiori a 5000-15000 K, non raggiungibili con i metodi di combustione classica. Dal punto di vista termico, l'arco-plasma si comporta come un corpo nero radiante, avente una densità di potenza estremamente elevata [9].



Figura 6 - Forno Elettrico ad Arco, EAF. Fonte: [10].

## 2.2 STORIA DEL FORNO ELETTRICO

La scoperta dell'arco elettrico che scocca tra due elettrodi di carbonio risale storicamente all'inizio del 1800 per opera di H. Davy, mentre il forno elettrico ad arco venne ideato da W. Siemens nel 1867 e rappresenta tuttora il procedimento più comune per ottenere acciaio da rottami.

La fabbricazione dei primi rudimentali forni ad arco avviene agli inizi del 1900 quando furono progettati tre diversi tipi di forni elettrici per la produzione di acciaio su scala industriale: a Hèroult in Francia, a Stassano in Italia e a Kjellin in Svezia. Il forno elettrico ad arco nella forma attuale (arco diretto) ricalca lo schema del forno di Hèroult, mentre gli altri due rappresentano gli antesignani rispettivamente del forno ad arco indiretto e di quello a induzione.

Il forno elettrico ad arco non si diffuse nell'immediato dato l'elevato costo dell'energia elettrica e la sua scarsa disponibilità; solo dal primo dopoguerra presero piede piccole unità caratterizzate da una potenzialità di 5-9 t per la produzione di acciai alto-legati a partire da semilavorati di qualità. Il forno elettrico ad arco si rivela ben presto l'impianto ideale per fabbricare acciai contenenti quantità di elementi in lega che richiedono alte temperature di fusione e che ossidano facilmente. Oggigiorno i forni hanno capacità maggiori, con range variabili dalle 30 t alle 200 t e oltre in alcuni casi, e vengono utilizzati per la produzione di acciai comunemente utilizzati, incluso l'acciaio legato e inossidabile così come alcuni acciai speciali al carbone o basso legati.

Lo sviluppo del forno elettrico ad arco fu dunque graduale, ma inarrestabile. Le cause di questa crescita sempre maggiore si ritrovano nel crescente fabbisogno di acciaio, nel progressivo aumento della disponibilità di rottame utilizzato come carica primaria, nella saturazione e nella conseguente crisi delle acciaierie integrate (in favore delle mini-acciaierie), nella disponibilità di energia a basso prezzo su reti sempre più potenti e nell'elevato costo specifico dell'acciaio prodotto a partire dalla ghisa rispetto al prezzo di mercato riconosciuto per il semilavorato. In particolare, dagli anni '50 si sono verificate alcune congiunture favorevoli alla diffusione dei forni elettrici ad arco come il crescente utilizzo di acciaio nel cemento armato, la crisi del carbone e l'accresciuta disponibilità di rottame in seguito allo sviluppo dell'era industriale. I principali fattori che rendono vantaggioso il processo dell'EAF, in particolare rispetto al ciclo integrale, si possono così riassumere:

- Maggior compattezza, minor complessità del ciclo produttivo e minori costi di investimento: si fa uso diretto di rottami senza l'utilizzo di impianti e macchinari finalizzati alla produzione della ghisa (compresi i sistemi di trattamento del minerale di ferro e la cokeria) e alla sua trasformazione in acciaio. La dimensione tipica delle acciaierie elettriche (le cosiddette mini-acciaiere) è compresa tra 1 e 2 milioni di tonnellate per anno, con accettabili rapporti tra investimento e capacità produttiva, senza rinunciare a volumi di produzione anche ragguardevoli. Ne conseguono minori investimenti economici per la costruzione dell'impianto.
- Flessibilità di funzionamento e di adattamento all'andamento del mercato;
- Rapidità di messa in marcia;
- Maggiore possibilità di controllare i processi di trasformazione chimica;
- L'indipendenza dell'impianto da porti o altre importanti stazioni di smistamento merci [4, p. 19].

## 2. Il forno elettrico ad arco

Per contro si devono menzionare gli alti consumi e costi di energia elettrica utilizzata, anche se negli ultimi anni la differenza del costo di trasformazione (costo dell'elettricità e degli elettrodi) si è ridotta rispetto alla classica produzione di acciaio da convertitore: da un lato si è cercato di limitare il consumo di kilowattora tramite la sostituzione all'energia fornita dalla corrente elettrica con quella proveniente da altre fonti più economiche, dall'altro lato la spinta all'aumento della produttività ha portato ad una diminuzione di tutte le voci che compongono il costo orario del forno stesso. I costanti miglioramenti introdotti nel processo hanno inoltre consentito di ridurre sensibilmente i tempi di produzione dell'acciaio nel forno elettrico portandoli a valori di poco superiori a quelli di un convertitore a ossigeno e diminuendo di conseguenza il consumo di energia. Nel paragrafo 2.6 vengono indicate le evoluzioni tecnologiche e le relative efficienze introdotte nel processo dell'EAF.

### 2.3 TIPOLOGIE DI FORNO ELETTRICO

I forni elettrici si distinguono principalmente in tre categorie:

- Forno a induzione;
- Forno ad arco indiretto o irradiante;
- Forno ad arco diretto.

#### 2.3.1 *Forno a induzione*

Questa categoria di forni si divide in:

- Forno a induzione con nucleo magnetico: forni a bassa frequenza che si compongono di un crogiolo di forma anulare e piccola sezione trasversale costituente il secondario di un trasformatore all'interno del quale è contenuto il bagno metallico. Il primario è avvolto su un nucleo di ferro a forma di telaio. La corrente alternata che alimenta il primario induce nel bagno metallico una corrente a bassa tensione e forte intensità di corrente, che causa il riscaldamento di quest'ultimo. Questi forni sono scarsamente impiegati nel settore siderurgico, ma trovano impiego, nelle loro evoluzioni, nelle metallurgie speciali quali rame e nichel;
- Forno a induzione senza nucleo magnetico: sono generalmente forni a media frequenza caratterizzati da un primario costituito da una spirale di rame di forma tubolare e percorsa all'interno da una corrente di acqua di raffreddamento. Tale spirale è avvolta intorno al crogiolo refrattario contenente il bagno metallico.

I forni a induzione vengono impiegati per la produzione di acciai di qualità oppure in fonderia per la produzione di ghisa. Rappresentano un processo di fusione pulito, efficiente dal punto di vista energetico e ben regolabile [11].

Per contro, questi forni sono generalmente caratterizzati da una notevole complessità dell'impianto dal punto di vista elettrico dato che comprendono, oltre al gruppo che produce la corrente alla frequenza desiderata, una serie di complesse e sofisticate apparecchiature elettriche supplementari necessarie alla corretta regolazione del forno sia durante la fusione (fase a massimo carico), sia nel periodo

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

successivo in cui le variazioni di temperatura sono modeste. Ne deriva un costo d'impianto notevole accompagnato da una manutenzione piuttosto delicata [12].

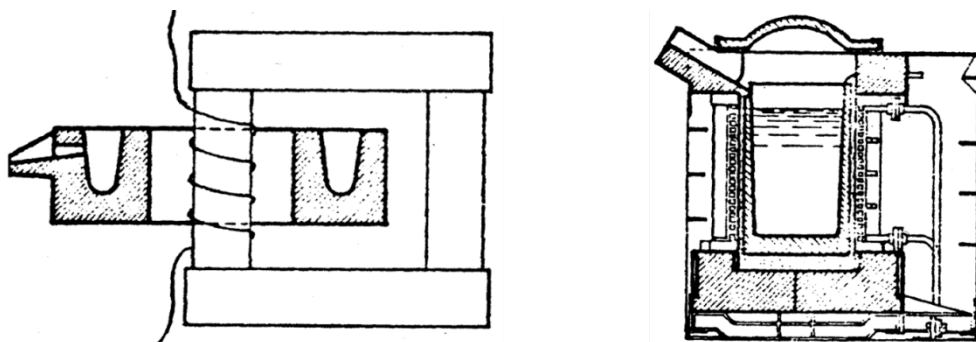


Figura 7 - Forno a induzione con nucleo magnetico (a sinistra) e senza (a destra). Fonte: [9].

### 2.3.2 Forno ad arco indiretto o irradiante

I forni ad arco indiretto o irradiante sono stati un riferimento importante all'interno dell'industria siderurgica tra la fine del 1800 e gli inizi del 1900. Oggi questa tipologia di forno è stata abbandonata. L'arco elettrico scocca tra due o tre elettrodi posti orizzontalmente o con lieve inclinazione appena al di sopra del bagno metallico che viene riscaldato per irraggiamento.

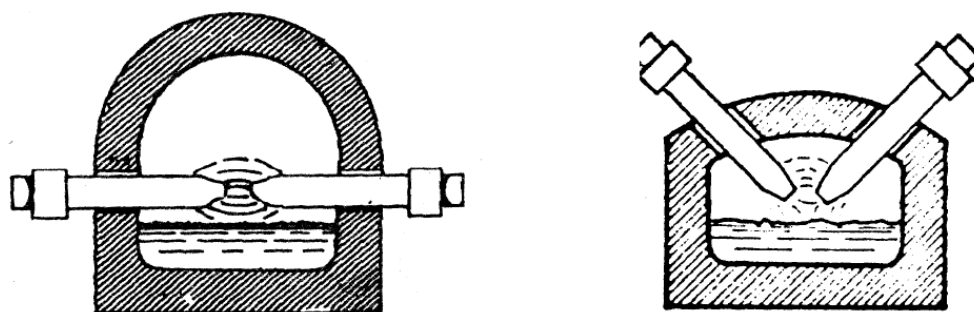


Figura 8 - Forno ad arco indiretto. Fonte: [9].

### 2.3.3 Forno ad arco diretto

In questa tipologia di forni la potenza elettrica viene ceduta alla carica metallica (principalmente rottame) da fondere e quindi al bagno metallico, grazie a uno o più elettrodi. L'arco elettrico necessario alla fusione scocca direttamente tra l'estremità dell'elettrodo e il materiale.

In base al tipo di corrente utilizzata (alternata o continua) si distinguono:

- Forno elettrico ad arco a corrente alternata (AC): forno caratterizzato dalla presenza di tre elettrodi, formanti tra loro un triangolo equilatero o disposti in linea (quest'ultima versione non più utilizzata). L'arco scocca direttamente tra ciascun elettrodo e la carica metallica. Una volta raggiunto un certo livello di bagno liquido (metallo allo stato fuso), gli elettrodi vi si immergono continuando a produrre calore, nell'attesa che l'intero carico di rottame raggiunga il punto di fusione;
- Forno elettrico ad arco a corrente continua (DC): a differenza del forno a corrente alternata, questo tipo di forno ha un unico elettrodo in posizione centrale. L'arco viene scoccato tra elettrodo



## 2. Il forno elettrico ad arco

(catodo) e tre "anodi" posti sul fondo del forno, a triangolo. In questo modo la corrente elettrica viene costretta a passare attraverso il rottame, fondendolo. L'elettrodo di grafite in questo caso non tocca mai la carica metallica, neppure quando si presenta allo stato liquido.

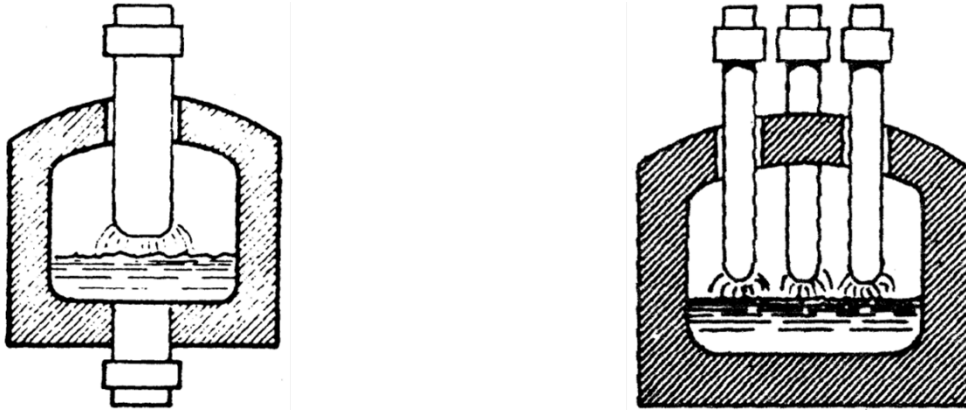


Figura 9 - Forno ad arco diretto con suola conduttrice (a sinistra) e con suola non conduttrice (a destra). Fonte: [9].

La maggiore diffusione di questa tipologia di forni rispetto alle altre è dovuta principalmente a tre aspetti:

- Gli elettrodi possono essere disposti molto vicini tra di loro realizzando di conseguenza un'elevata concentrazione di potenza nel bagno metallico e un riscaldamento più efficace e uniforme;
- Il processo di fusione e la temperatura del bagno metallico possono essere controllati molto più facilmente grazie alla regolazione dei parametri elettrici;
- Il passaggio della potenza elettrica al bagno metallico avviene tramite lo strato di scoria sovrastante: ciò rende possibile un costante controllo della composizione della scoria stessa.

Generalmente sono utilizzati forni ad arco diretto, a suola non conduttrice, trifasi con tre elettrodi.

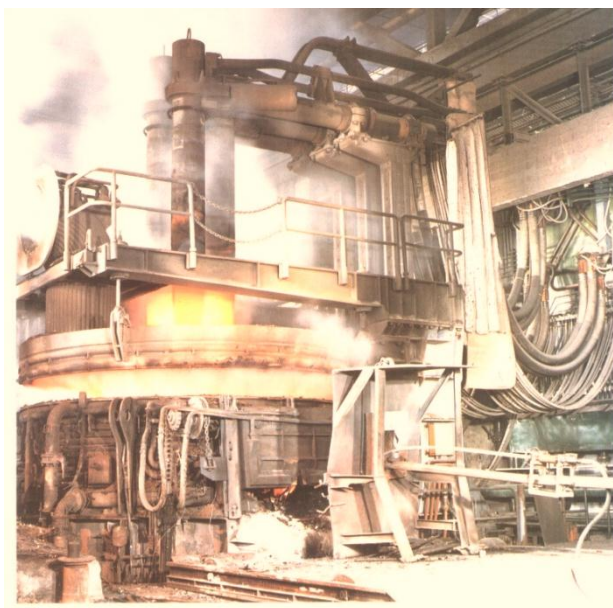


Figura 10 - Forno elettrico ad arco AC: Fonte: [13].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## **2.4 COMPONENTI GENERALI DI UN EAF TRADIZIONALE**

Il forno elettrico ad arco consta di molti elementi che racchiusi in gruppi funzionali ne formano la struttura. In particolare si hanno: componenti che consentono la movimentazione del forno e delle sue parti strutturali; componenti che supportano la fornitura della potenza elettrica necessaria; gli equipaggiamenti per i processi che risiedono sul forno o nelle sue immediate vicinanze.

I principali elementi costitutivi del forno vengono nel seguito descritti.

### Tino

Il forno è generalmente costituito da un crogiuolo cilindrico ad asse verticale, detto tino, per il contenimento del materiale. Dagli anni '70 in poi, con l'aumento delle sollecitazioni termiche all'interno del forno, il materiale refrattario della parte superiore del tino è stato sostituito da pannelli metallici raffreddati ad acqua (water jacket) che sono montati a una certa altezza sopra la linea di scoria per evitare che l'acciaio liquido venga a contatto con essi.

Il tino è delimitato inferiormente da una calotta concava in lamiera imbutita su cui è disposta la suola in materiale refrattario e poggia su una piattaforma basculante che permette di cambiare inclinazione del forno per le operazioni di scorifica (fuoriuscita della scoria formatasi durante il processo di fusione del rottame) e spillaggio (colata dell'acciaio dal forno); in alternativa, molti forni presentano un foro eccentrico, rivestito di materiale refrattario, posto sul fondo del tino per lo spillaggio dell'acciaio (Eccentric Bottom Tapping, EBT), che consente di movimentare poco il forno (inclinazione di 12°)<sup>4</sup>. La capacità del tino varia dalle 30 alle 200 t (e oltre in alcuni casi).

### Volta

Sopra il tino si trova la volta che rappresenta il "coperchio" del forno. Un tempo rivestita di materiale refrattario, presenta anch'essa oggi pannelli raffreddati ad acqua all'interno della sua struttura metallica, fatta eccezione per la parte che circonda gli elettrodi, il cosiddetto DELTA; questa zona è costituita da materiale isolante usato per isolare gli elettrodi dalla volta stessa. Il sostegno della volta del forno avviene mediante un ponte mobile che ne permette il sollevamento e la rotazione allo scopo di aprire il forno per le operazioni di carica del rottame (dall'alto). La volta presenta generalmente quattro fori: tre aperture per il passaggio degli elettrodi, un gomito (quarto foro) per l'aspirazione dei fumi prodotti durante la fusione e talvolta può essere provvista di un'ulteriore apertura per la carica degli additivi (quinto foro) con sistema automatizzato.

### Elettrodi

Gli elettrodi giocano un ruolo molto importante poiché trasportano l'energia elettrica all'interno del forno e per questo sono costituiti da un materiale conduttore quale la grafite. Sono posizionati nella parte centrale del crogiuolo e supportati dai bracci porta elettrodo. Sono disposti verticalmente in modo

---

<sup>4</sup> EBT: Si vedano anche i paragrafi 2.5.7 - 2.6.4.

## 2. Il forno elettrico ad arco

da essere maggiormente protetti (si riduce il rischio di una loro rottura) e formano un “triangolo equilatero” (ricoprono i vertici di un triangolo alla stessa distanza gli uni dagli altri).

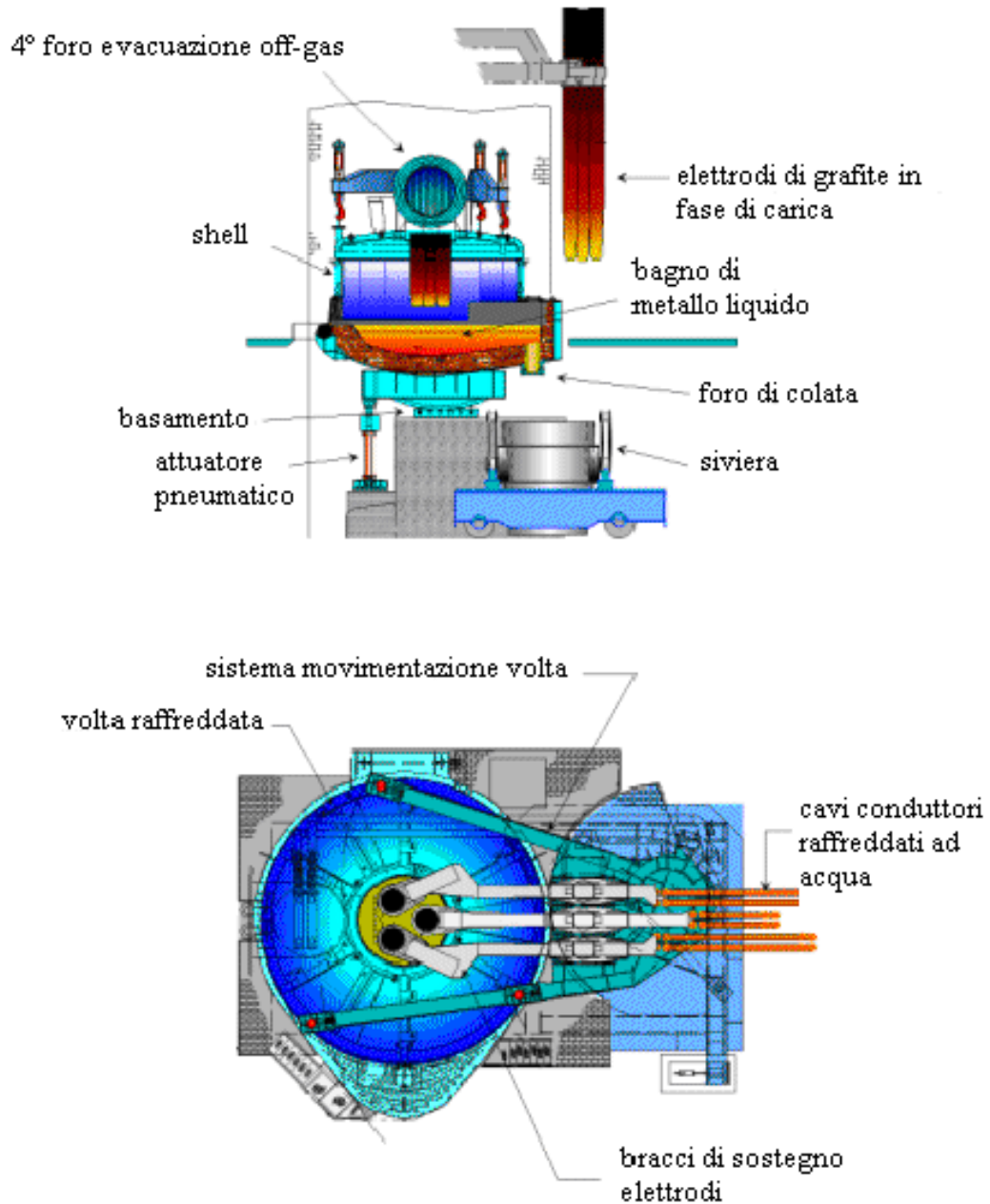


Figura 11 - Elementi costitutivi di un EAF tradizionale. Adattato da: [14].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## 2.5 IL PROCESSO FUSORIO DI UN EAF TRADIZIONALE

Il processo di produzione può essere riassunto nei seguenti punti:

1. *Movimentazione e stoccaggio delle materie prime di carica;*
2. *Movimentazione e stoccaggio di materie prime ausiliarie e additivi;*
3. *Carica del forno, con o senza preriscaldamento del rottame;*
4. *Fusione dell'acciaio;*
5. *Affinazione;*
6. *Scorifica;*
7. *Spillaggio*
8. *Riconfigurazione del forno;*
9. *Trasporto-attesa delle siviere;*
10. *Trattamenti di metallurgia secondaria;*
11. *Colata continua o in fossa dell'acciaio;*
12. *Riscaldamento delle siviere;*
13. *Movimentazione, trattamento e stoccaggio della scoria.*

Ciclo Tap-to-tap

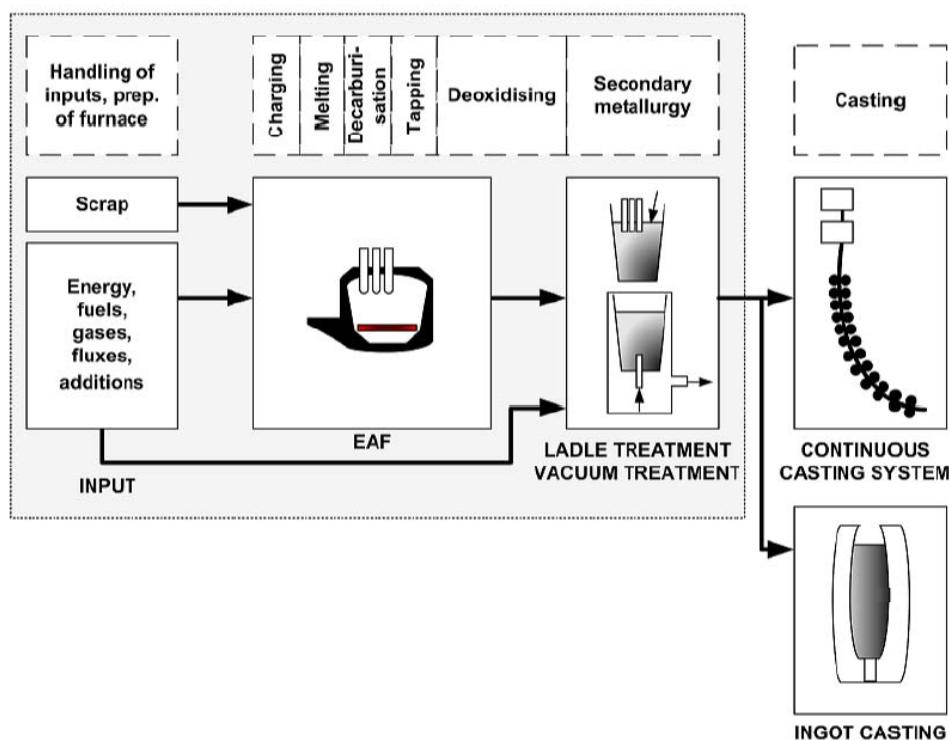


Figura 12 - Schema del ciclo di produzione dell'acciaio in un EAF tradizionale. Fonte: [6, p. 420].

Il forno elettrico ad arco funziona come un processo discontinuo, a lotti (le colate di acciaio fuso), le cui operazioni si ripetono ciclicamente. Il tempo di ciclo che intercorre tra una colata e la successiva prende il nome di “tap-to-tap” (TTT), che letteralmente significa da spillaggio a spillaggio e comprende le fasi dalla carica del forno alla sua riconfigurazione. In questo intervallo di tempo si possono individuare fasi a erogazione di energia elettrica (power-on time) intervallate da periodi non

## 2. Il forno elettrico ad arco

operativi (power-off time) dedicati al ripristino delle condizioni operative dell'impianto. Un EAF moderno presenta un ciclo inferiore ai 60 minuti; esistono alcuni forni particolari, i Twin-Shell (a doppio tino), in cui i tempi si riducono ulteriormente fino a 30-40 minuti [14]- [15].

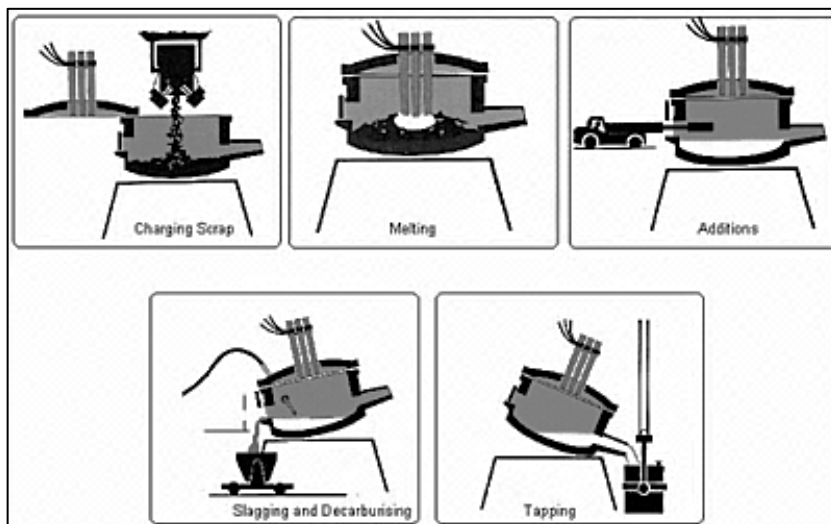


Figura 13 - Riassunto schematico del ciclo TTT di un EAF tradizionale. Adattato da: [16].

### 2.5.1 Movimentazione e stoccaggio delle materie prime di carica

La materia prima in ingresso destinata alla carica del forno è principalmente costituita da rottame di ferro (o *scrap* in inglese), in quantità variabile tra il 60% e il 100% e di diversa tipologia e provenienza:

- Recuperi siderurgici: scarti dei processi produttivi siderurgici;
- Rottame nuovo: scarti delle lavorazioni e trasformazione dell'acciaio;
- Rottame vecchio: prodotti in acciaio che hanno terminato il loro ciclo di vita.

Oltre a esso si ricorre anche all'utilizzo di ghisa in pani o in tornitura e al minerale preridotto (DRI, HBI<sup>5</sup>) per l'equilibrio chimico o per ragioni di economie.

Lo scrap viene stoccato in un'area denominata parco rottame, in genere a cielo aperto, e subisce un controllo radiometrico in ottemperanza alle norme di legge se proveniente dall'esterno. Lo scarico avviene per ribaltamento del cassone del camion o attraverso macchine operatrici, normalmente carriponte, attrezzate con ragni idraulici o con elettromagneti.

Il rottame in arrivo può aver già subito operazioni di preparazione, ma in alcuni casi (rottame automobilistico, demolizione, ecc.) le operazioni di trattamento, ovvero cesoiatura, pressatura, frantumazione e vagliatura, avvengono in una specifica area dell'insediamento [17]: lo scrap viene quindi scelto in base a opportune caratteristiche fisiche, di pezzatura e qualità.

---

<sup>5</sup> HBI, dall'inglese Hot Briquettes Iron: si tratta del DRI compattato a una temperatura di 650 °C; la sua maggiore densità e la particolare forma gli conferiscono migliori caratteristiche di movimentazione, spedizione, stoccaggio e fusione [87].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### **2.5.2 Movimentazione e stoccaggio delle materie prime ausiliarie e degli additivi**

Oltre al rottame ferroso, per la produzione dell'acciaio sono necessarie anche materie prime ausiliarie e additivi che hanno scopi diversi nel processo metallurgico:

- Carbone (circa 2-12 kg/t di acciaio): viene inserito nel forno elettrico con diversi risultati:
  - aumenta il livello di carbonio del bagno e conferisce ai vari tipi di acciaio le loro specifiche proprietà;
  - la reazione del carbonio con l'ossigeno, con formazione di CO, garantisce un apporto energetico durante la fusione contribuendo alla riduzione dell'apporto di potenza elettrica;
  - iniettato tramite apposite lance, insieme all'ossigeno, produce un rigonfiamento della scoria (il cosiddetto foamy slag, in inglese): si producono bolle di CO che gonfiano la scoria e permettono di ricoprire l'arco elettrico. Questo aumenta l'efficienza e protegge il refrattario del forno dall'arco consentendo di lavorare con voltaggi elevati<sup>6</sup>;
  - il CO contribuisce a ridurre la concentrazione di gas dissolti (azoto e idrogeno) nell'acciaio;
  - aggiunto in siviera (contenitore dell'acciaio fuso dopo lo spillaggio), serve a carburare l'acciaio;
- Calce (4% in peso), dolomite, ecc.: agenti scorificanti che concorrono a produrre lo strato di scoria sopra il bagno di metallo fuso, compiendo un'importante azione di defosforazione. Il fosfato di calcio forma una scoria che viene eliminata;
- Ferroleghie: utilizzate per correggere la composizione chimica dell'acciaio da produrre. L'introduzione di manganese, sotto forma di ferrolegha Ferro-Manganese 25/75, secondo un rapporto di 5 kg/t di rottame, frena lo sviluppo eccessivo di ossido di ferro (derivato da una decarburazione troppo spinta) che nuocerebbe alla qualità dell'acciaio.

Dette materie prime sono normalmente fornite in polvere o in pezzatura. La movimentazione avviene attraverso convogliatori a nastro dalla zona di stoccaggio alle tramogge (o silos) di scarico nel forno.

### **2.5.3 Carica del forno con o senza preriscaldamento**

Le materie prime vengono trasferite al forno mediante ceste di carica secondo un mix riconducibile alla tipologia di acciaio da produrre. Solitamente, per ogni singola colata di acciaio liquido vengono utilizzate 2 o 3 ceste di rottame, anche se alcune operazioni specifiche lavorano anche con una singola cesta. La movimentazione delle ceste è garantita da gru, carri-ponte o carrelli su rotaia.

La carica avviene generalmente dall'alto dopo che al forno è stata tolta tensione, gli elettrodi sono stati sollevati e la volta è stata aperta. Gli additivi scorificanti sono iniettati mediante lance o direttamente da tramogge collegate al forno attraverso il 5° foro della volta. In alternativa al metodo di carica descritto esistono altre tecnologie che vanno da quella in continuo di preridotto (DRI), a quella

---

<sup>6</sup> Foamy Slag: si veda paragrafo 2.6.5.

## 2. Il forno elettrico ad arco

in continuo o semicontinuo di rottame preriscaldato, rispettivamente mediante tecnologia Consteel® e Shaft Furnace.

In molti impianti dove viene effettuato il preriscaldamento del rottame sfruttando il calore latente dei fumi, le due tecnologie appena menzionate sono quelle principalmente utilizzate, al posto del preriscaldamento delle ceste di carica. Il preriscaldamento consente numerosi vantaggi, soprattutto in termini di riduzione del ciclo TTT (il materiale arriva in forno già caldo), minor consumo di energia e aumento dell'efficienza del processo. Si rimanda al paragrafo 5.5.1 per una più ampia descrizione dei sistemi di preriscaldamento evidenziandone il valore aggiunto in termini di recupero del calore dai fumi.

### **2.5.4 Fusione del rottame**

Il periodo che comprende la fusione del rottame rappresenta la parte centrale delle operazioni che avvengono nell'EAF. La fusione è accompagnata dall'immissione all'interno del forno di energia elettrica o chimica.

L'energia elettrica rappresenta il contributo maggiore nelle operazioni di fusione; viene fornita alla sottostazione dello stabilimento su linee speciali sotto forma di corrente alternata trifase ad una tensione di 130000-200000 V. I trasformatori dei forni moderni hanno una potenza elevatissima, compresa tra 500 e 1000 kVA per tonnellata di acciaio, e vengono alimentati dalla sottostazione con una tensione intorno a 30000 V, mentre le tensioni secondarie sono variabili in un ampio intervallo, tra 250 e 1200 V, per consentire la regolazione dell'arco elettrico in funzione delle diverse esigenze metallurgiche [18]. Dopo la carica del forno, la volta viene chiusa, gli elettrodi abbassati in direzione del rottame e viene somministrata energia elettrica, che si trasforma in calore mediante lo scocco dell'arco elettrico che si instaura tra ciascun elettrodo e il rottame. La corrente passa attraverso la carica e il riscaldamento avviene principalmente per irraggiamento. Inizialmente viene selezionato un voltaggio intermedio (arco corto) fino a quando gli elettrodi non sono penetrati all'interno del rottame; dopo alcuni minuti può essere scelto un voltaggio più alto (si lavora ad arco lungo massimizzando la potenza trasferita al rottame) senza pericolo di danneggiamento per le pareti del forno a causa della radiazione emessa dall'arco. Durante il processo si osserva una larga oscillazione della corrente (necessità di fondere lo scrap di diversa natura e pezzatura) allo scopo di mantenere un arco continuo e stabile.

L'energia chimica viene fornita in diversi modi e principalmente dalle reazioni esotermiche all'interno del forno, in particolare tra ossigeno iniettato e carbone di carica (o polverino di carbone introdotto appositamente). Viene effettuata un'importante integrazione energetica con l'impiego di bruciatori ossi-combustibile, disposti lungo la circonferenza del forno, in cui gas naturale è bruciato usando ossigeno o una miscela di ossigeno e aria. Il calore è trasferito allo scrap per irraggiamento e convezione, mentre per conduzione all'interno dello stesso. In alcune operazioni si utilizzano anche lance, inserite dalla porta di scorifica o dalla parete, che iniettano ossigeno per "tagliare" il rottame.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Una volta formatasi una pozza di materiale fuso, la lancia può essere iniettata direttamente nel bagno dove reagisce con gli elementi ivi contenuti (es. silicio, manganese, ecc.); tutte queste reazioni sono esotermiche e forniscono ulteriore energia addizionale al processo.

In base alla letteratura esaminata [14]- [19]- [20]- [21], l'energia totale teoricamente necessaria per la fusione e per surriscaldare l'acciaio alla temperatura tipica di spillaggio varia in un range di 350-370 kWh/t. Tuttavia, considerando i rendimenti del processo produttivo come descritti a inizio paragrafo, il consumo medio della sola energia elettrica si attesta tra 400 e 425 kWh/t secondo le stesse fonti. L'energia globalmente richiesta in un processo EAF si attesta tra 510 e 880 kWh/t, a seconda delle dimensioni del forno in esame [22], in particolare tra 560 e 680 kWh/t nei forni di ultima generazione [14]<sup>7</sup>.

Durante la fusione si raggiungono temperature dell'ordine dei 1600 °C (temperatura di fusione del ferro di 1520 °C) e anche maggiori (fino a 3500 °C in alcuni volumi limitati del forno), con formazione di una scoria che racchiude gli ossidi metallici formati durante questa fase inclusi i componenti indesiderati del bagno.

La reazione dell'ossigeno con il carbonio presente nel bagno produce monossido di carbonio, il quale può bruciare nel forno se c'è sufficiente ossigeno, oppure può essere smaltito attraverso gli impianti di evacuazione dei gas.

Una volta fusa anche l'ultima porzione di rottame, le pareti del forno si trovano a essere esposte a un'intensa radiazione proveniente dall'arco; per questo motivo, il voltaggio deve essere ridotto.

---

<sup>7</sup> Al paragrafo 5.3 viene fornita l'analisi sui consumi energetici degli EAF.



## 2. Il forno elettrico ad arco

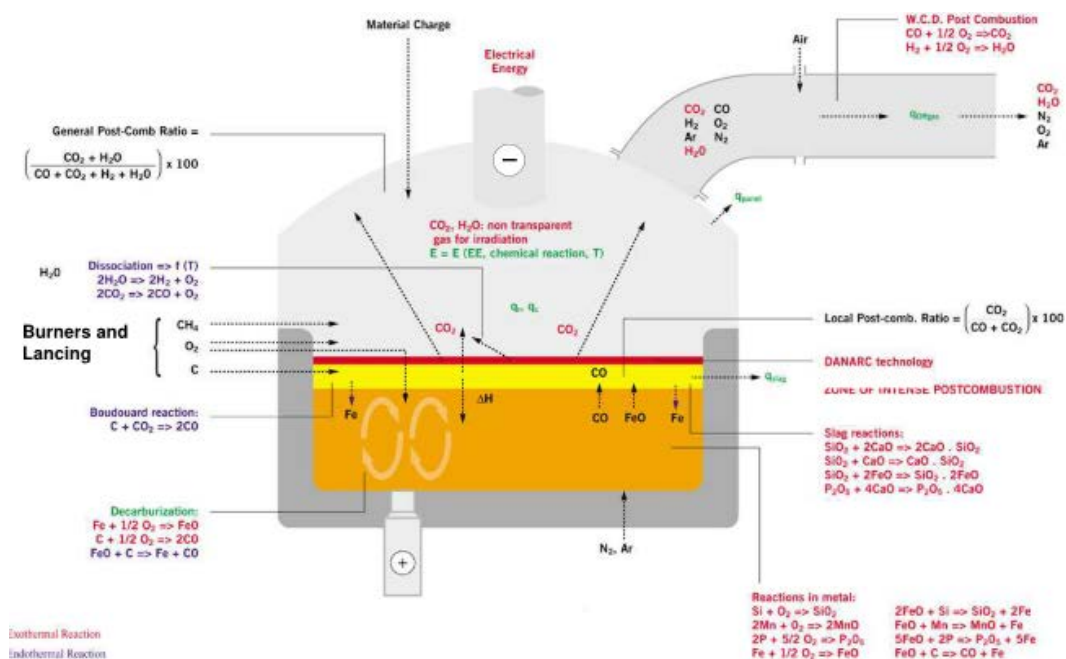


Figura 14 - Il processo dell'EAF. Fonte: [9].

### 2.5.5 Affinazione

Le operazioni di affinazione (refining) riguardano la rimozione dall'acciaio di fosforo (defosforazione), zolfo (desolforazione), alluminio, silicio, manganese e carbonio (decarburazione). Recentemente, anche la rimozione di gas disciolti, specialmente idrogeno e azoto è diventato oggetto di tale processo.

Tradizionalmente, il refining viene svolto dopo la fase di fusione e dipende dalla disponibilità di ossigeno che può essere iniettato sempre mediante lance. Molti dei composti che devono essere rimossi durante l'affinazione hanno una più alta affinità con l'ossigeno rispetto al carbonio; l'ossigeno reagisce quindi preferenzialmente con tali elementi formando ossidi che flottano dall'acciaio verso la scoria.

L'utilizzo dell'ossigeno negli EAF è stato oggetto di crescente considerazione negli ultimi trent'anni non solo per motivi di tipo metallurgico, ma anche per aumentare la produttività dei forni stessi [6, p. 423]:

- L'ossigeno viene utilizzato da un punto di vista metallurgico, per decarburare il metallo fuso e rimuovere gli elementi indesiderati;
- La reazione del carbonio con l'ossigeno per produrre CO è di tipo esotermico e può garantire circa il 30-40% del fabbisogno termico del forno; è dunque molto importante perché consente di risparmiare energia e al contempo esegue alcune reazioni di affinazione;

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

- Contribuisce, come accennato al paragrafo 2.5.2, al fenomeno del foamy slag aumentando l'efficienza termica e consentendo di lavorare con voltaggi elevati<sup>8</sup>;
- L'ossigeno viene anche iniettato nella parte superiore del forno per la post-combustione reagendo con CO e idrocarburi prima che i fumi lascino il forno allo scopo di mantenere quanto possibile il calore formatosi dalle reazioni esotermiche all'interno del forno [6, p. 423].

Anche l'Argon o altri gas inerti possono venire iniettati (processo Stirling) per imprimere al bagno una maggior agitazione termica al fine di omogeneizzare la composizione chimica, la temperatura e la trasmissione del calore.

### **2.5.6 Scorifica**

Le operazioni di scorifica hanno la funzione principale di rimuovere le impurità che si sono ossidate all'interno del bagno. Il deflusso naturale avviene a seguito dell'inclinazione del forno sulla culla oscillante da una luce (porta di scorifica), posta sulle pareti laterali del forno, oppure attraverso operazioni manuali con raspi. La rimozione della scoria elimina la possibilità che il fosforo venga riassorbito dall'acciaio.

La scoria può superare il livello consentito nel forno durante il foamy slag<sup>9</sup> e viene quindi fatta fuoriuscire attraverso l'apertura.

Altre operazioni di scorifica vengono eseguite tutte le volte in cui c'è bisogno di una nuova scoria con lo scopo di favorire le successive operazioni metallurgiche.

### **2.5.7 Spillaggio**

Una volta raggiunte nel forno la temperatura e la composizione chimica desiderata, l'acciaio fuso viene spillato aprendo il foro di colata inclinando il forno per versare l'acciaio oppure, nel caso dei forni EBT, tramite un foro praticato sul fondo del tino. L'acciaio liquido viene colato nel forno siviera (Ladle Furnace, LF) dove viene sottoposto alle successive operazioni di affinazione.

Durante il processo di spillaggio possono essere aggiunti elementi di lega per raggiungere la composizione chimica desiderata e anche deossidanti per abbassare il contenuto di ossigeno (tipicamente alluminio e silicio nella forma di ferro-silicio o silicio-manganese).

Altri elementi formatori della scoria possono inoltre essere immessi nella siviera se la copertura della scoria risulti insufficiente.

---

<sup>8</sup> Foamy Slag: si veda il paragrafo 2.6.5 per maggiori dettagli.

<sup>9</sup> Si veda la nota 7.

## 2. Il forno elettrico ad arco

### **2.5.8 Riconfigurazione del forno**

A seguito dello spillaggio il forno viene preparato per il successivo riscaldamento; in questo periodo gli elettrodi e il coperchio vengono sollevati e il rivestimento refrattario del forno viene esaminato per verificare eventuali danneggiamenti.

Il tempo che comprende la riconfigurazione delle condizioni operative del forno costituisce il maggior tempo morto all'interno di un ciclo completo. Con l'avanzare delle tecnologie dell'acciaieria elettrica, tale tempo è stato ridotto da 20 minuti e a meno di 5 in particolari operazioni.

### **2.5.9 Trasporto-attesa siviera**

Al termine dello spillaggio la siviera contenente l'acciaio viene trasferita tramite carri al forno di affinazione LF. L'insufflazione di gas inerte dal fondo della siviera garantisce l'omogeneizzazione del bagno liquido.

### **2.5.10 Trattamenti di metallurgia secondaria**

L'acciaio liquido è in genere affinato in successivi impianti al fine di conferire al prodotto le caratteristiche e la composizione desiderate. Le operazioni di trattamento dell'acciaio liquido possono essere diverse, quali ad esempio il trattamento in siviera, il degasaggio sottovuoto, il degasaggio ad arco sottovuoto, la decarburazione con argon e ossigeno, la decarburazione sottovuoto a ossigeno, ecc. Al termine dei trattamenti di metallurgia secondari l'acciaio è pronto per essere colato secondo la metodologia più opportuna.

### **2.5.11 Colata continua o in fossa dell'acciaio**

In funzione dei semilavorati da produrre verrà scelto il metodo di versamento dell'acciaio più idoneo. La colata continua, consistente nel versare l'acciaio liquido in una lingottiera senza fondo raffreddata ad acqua, permette di realizzare billette, blumi, bramme, più in generale prodotti "lunghi"; con la colata in fossa si realizzano prevalentemente lingotti (quadrati, rettangolari, ecc.). Nel primo caso si devono prevenire i fenomeni di formazione della "pelle" d'acciaio solidificato sulle pareti della lingottiera, mentre nel secondo caso si devono opportunamente essiccare i canali di colata per prevenire l'assorbimento di umidità (e quindi di idrogeno) da parte dell'acciaio liquido, fenomeno altamente dannoso per la qualità del prodotto.

### **2.5.12 Riscaldamento siviera**

L'operazione di riscaldamento delle siviere si distingue in due tipologie:

- Essiccazione del refrattario: realizzato dopo il rifacimento delle pareti interne isolanti, necessario per la cottura del materiale refrattario, secondo idonei profili di crescita della temperatura;
- Mantenimento: si mantiene alta la temperatura delle pareti interne della siviera con il duplice scopo di scongiurare l'assorbimento di umidità e offrire all'acciaio liquido un ambiente a

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

temperatura sufficientemente alta per non provocare la formazione di punti di solidificazione precoci.

### 2.5.13 Movimentazione, trattamento e stoccaggio della scoria

La scoria proveniente dalle paiole di raccolta è stoccata in apposite aree a cielo aperto (parco scoria) dove viene naturalmente raffreddata e quindi successivamente destinata alle fasi di frantumazione e deferrizzazione. Il prodotto così trattato è inviato a deposito, destinato all'utilizzo come rifiuto recuperabile oppure all'inertizzazione in discarica.

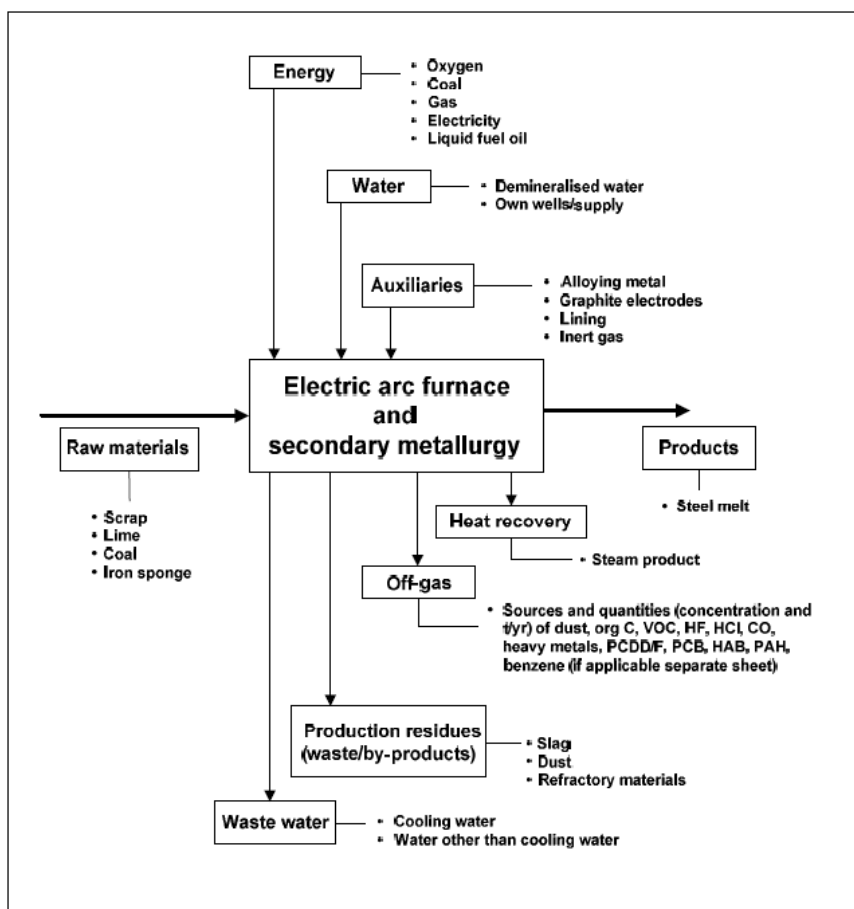


Figura 15 - Schema del flusso di massa tipico di un EAF. Fonte: [6, p. 428]

## 2. Il forno elettrico ad arco

### 2.6 EVOLUZIONE E OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DELL' EAF

Lo sviluppo dei forni elettrici ad arco è stato accompagnato da numerose innovazioni tecnologiche che hanno influito notevolmente sulla produttività e sulla qualità dell'acciaio. Come evidenziato in Figura 16, dal 1965 si assiste a una continua evoluzione dell'acciaieria elettrica caratterizzata dalle seguenti tappe fondamentali [23]- [24]:

- 1965: Affermazione del forno Ultra High Power (UHP), forno elettrico ad alta potenza;
- 1965-1970: Introduzione dell'impiego di ossigeno e affermazione della metallurgia fuori forno;
- 1975: Affermazione del raffreddamento delle pareti con pannelli ad acqua;
- 1976: Esercizio con arco lungo;
- 1977: Controllo computerizzato delle operazioni di fusione e della marcia del forno;
- 1978: Utilizzo delle scorie schiumose (foamy slag);
- 1979: Introduzione di bruciatori ossi-combustibile e applicazione di volte raffreddate ad acqua;
- 1981: Colata dal foro centrale sul fondo;
- 1982: Introduzione del forno siviera;
- 1983: Sviluppo del forno EBT (spillaggio dal fondo con foro eccentrico) e colata senza scoria;
- 1984: Preriscaldamento del rottame;
- 1986: Elettrodi raffreddati a spruzzo e stirring con gas inerte della suola;
- 1988: Iniezione di combustibili fossili.

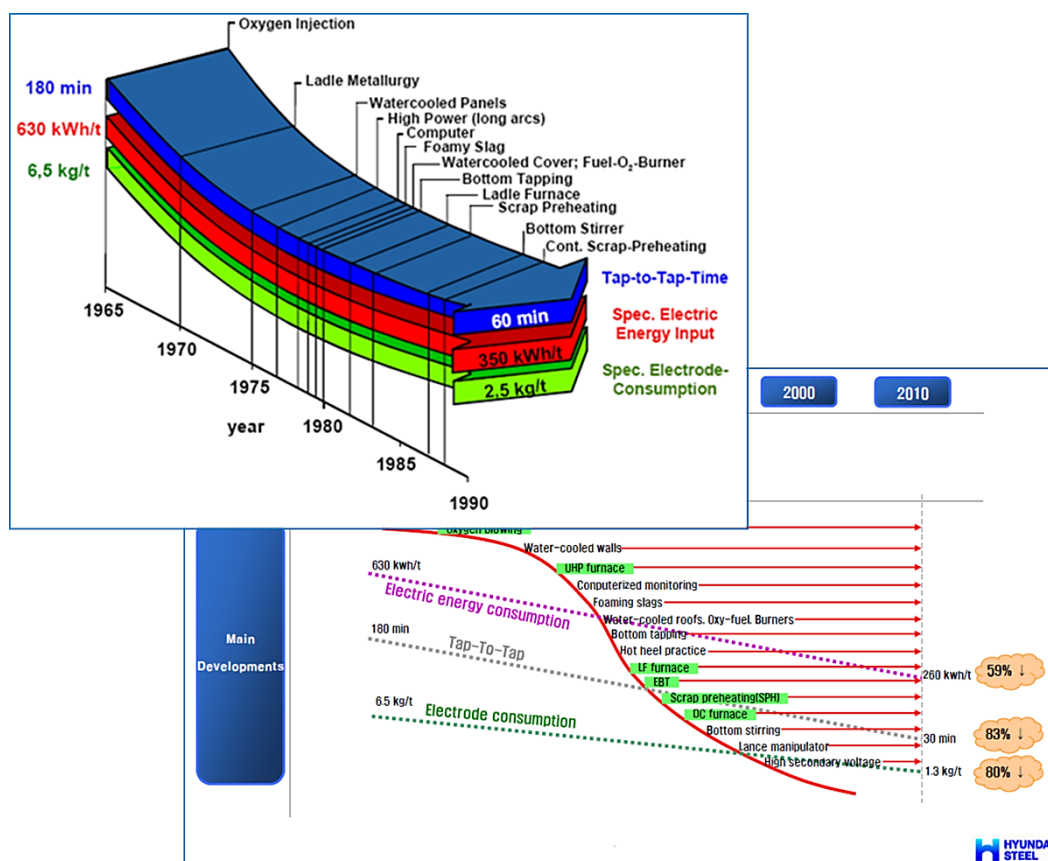


Figura 16 - Evoluzione del forno elettrico ad arco. Fonte: [24] (a destra); [15] (a sinistra).

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Come evidenziato anche in Figura 16, l'evoluzione tecnologica degli ultimi quarant'anni ha permesso il raggiungimento di importanti traguardi in termini di **riduzione del tempo TTT** (inferiori all'ora; 30-40 minuti nei forni veloci) e **riduzione del consumo di energia specifica del forno** (da 630 kWh/t a 350 kWh/t negli anni '90 ai 260 kWh/t attuali nelle soluzioni più efficienti) [14]- [15].

Ne consegue un **aumento della produttività** attraverso:

- Riduzione dei tempi di power-off mediante minimizzazione del numero di ceste;
- Incremento delle taglie di colata e della potenza dei trasformatori;
- Incremento dell'energia chimica e maggior controllo della stessa.

Inoltre è **aumentata l'efficienza** e si sono **ridotti i costi di processo** attraverso:

- Maggiore efficienza dell'arco elettrico (miglioramento del controllo a tensioni elevate, ottimizzazione della pratica con l'impiego di scorie schiumose);
- Riduzione del consumo elettrodi;
- Recupero energetico attraverso il preriscaldamento del rottame.

In base anche a quanto riportato nel nuovo documento BREF (Best Available Technologies Reference documents) sulle migliori tecniche disponibili nell'ambito degli impianti siderurgici, vengono brevemente descritte le tecniche più efficienti e avanzate, adottate o da adottare, per ottimizzare il processo di fusione nell'EAF e conseguendo nel contempo efficienze e riduzione dell'impatto ambientale [6, pp. 449-450].

### **2.6.1 Forni elettrici UHP**

Gli Ultra High Power, UHP, sono forni ad alta potenza, 450-550 kW/t fino a 950 kW/t. Grazie all'installazione di trasformatori più potenti, si raggiunge una grande concentrazione di potenza nella fase di fusione che permette di fondere la carica metallica in minor tempo. Tali forni presentano un alto grado di utilizzazione ( $\geq 0,7$ ) e consentono dunque un aumento della produttività, un minor consumo degli elettrodi e la riduzione del volume specifico di fumi emessi; tuttavia aumenta anche l'usura del refrattario del forno.

### **2.6.2 Pannelli raffreddati ad acqua (water jacket)**

Le pareti interne e il tetto della volta sono ricoperte con pannelli raffreddati ad acqua (water jacket) anziché refrattario per prevenirne l'usura, potendo utilizzare anche i forni UHP, e consentendo anche il riutilizzo del calore disperso adottando opportune tecniche di recupero di energia.

### **2.6.3 Bruciatori ossi-combustibile e lancia a ossigeno**

Lungo la circonferenza del forno, specie in prossimità degli elettrodi, si formano dei "punti caldi" in cui si concentra la fusione che non avviene in modo uniforme. Da qui l'utilizzo di bruciatori ossi-combustibile, alimentati da gas naturale (e un tempo da carbone) e che usano ossigeno o una miscela di ossigeno e aria; vengono disposti all'interno della circonferenza in posizioni tali da indirizzare le

## 2. Il forno elettrico ad arco

loro fiamme in corrispondenza dei “punti freddi”. Portano a un aumento della potenza del forno di circa 50 kWh/t. Si utilizzano anche lance che iniettano un getto di ossigeno nel rottame in fusione e sono inserite dalla porta di scorifica o dalla parete.

L’energia sviluppata attraverso l’impiego delle lance o dei bruciatori, nel contesto del bilancio energetico del forno, contribuisce a sostituire parte dell’energia elettrica diminuendone i consumi.

### **2.6.4 Forno EBT**

Il forno Eccentric Bottom Tapping (EBT) presenta un foro eccentrico, opportunamente rivestito di materiale refrattario, sul fondo del tino; questo consente da un lato di colare l’acciaio fuso senza inclinare eccessivamente (circa 12°) il forno, dall’altro previene il trascinamento della scoria durante lo spillaggio. Si ottiene una riduzione del tempo di colata, un minor consumo del refrattario, minori perdite di energia e la semplificazione delle operazioni di captazione dei fumi.

### **2.6.5 Formazione della scoria schiumosa**

La scoria viene gonfiata iniettando carbone insieme all’ossigeno mediante apposite lance che producono delle bolle (scoria schiumosa). I vantaggi sono nel seguito elencati:

- Migliora il passaggio del calore alla carica: si ha quindi una maggior efficienza termica e di conseguenza un miglioramento del rendimento elettrico, di circa il 60-90%;
- Si riduce il consumo di energia, degli elettrodi e del rumore;
- Protegge il refrattario del forno dall’arco elettrico consentendo di lavorare con voltaggi elevati;
- Porta a vantaggi anche in diverse reazioni metallurgiche.

Tale processo non è applicabile nella produzione di alcuni acciai come acciaio inox e altri acciai alto legati.

### **2.6.6 Forno siviera e metallurgia secondaria**

Alcune operazioni non vengono svolte nel forno (come la desolfurazione o l’omogeneizzazione del bagno), ma si ricorre in particolare al forno siviera. Ne derivano benefici in termini di risparmi energetici (10-30 kWh/t), riduzione del TTT (di 5-20 minuti), aumento della produttività, miglior controllo della temperatura dell’acciaio inviato alla colata continua, possibile riduzione del consumo degli elettrodi (fino a 0.1-0.74 kg/t), risparmio di leghe e riduzione delle emissioni da EAF. Un inconveniente è l’aumento delle sorgenti emissive inquinanti che richiedono investimenti maggiori per l’utilizzo di sistemi di captazione come le cappe<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Si veda la descrizione delle cappe secondarie di ripresa al paragrafo 4.1.2.2.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 2.6.7 Controllo e automazione del processo

Il processo al forno elettrico è regolato e automatizzato tramite calcolatore con l'obiettivo di ottimizzare le prestazioni del forno e di minimizzare i consumi energetici e i costi di esercizio. Nella pratica, è possibile programmare le varie fasi del ciclo, regolando l'immissione di energia elettrica e di energia alternativa (insufflazione di ossigeno, bruciatori ossi-combustibile) in funzione del progredire della fusione; registrare i dati caratteristici a partire dal materiale in entrata, quelli di ogni colata e i parametri metallurgici (composizione, temperatura); fornire all'operatore informazioni sul processo in corso, lasciando la possibilità di effettuare operazioni manuali a discrezione. Inoltre esistono programmi dedicati al monitoraggio delle emissioni che consentono di intervenire in tempo reale sul processo per migliorare l'utilizzo dell'energia chimica (EFSOP®).

### 2.6.8 Preriscaldamento

Come verrà ampiamente descritto nel paragrafo 5.5.1., tale tecnica consiste nel recupero del calore dai fumi in uscita dal forno per effettuare un preriscaldamento del rottame prima del suo ingresso al forno. Le principali tecniche utilizzate sono il Consteel® e la Shaft Furnace, che portano a numerosi vantaggi quali la riduzione del consumo di energia (circa 100 kWh/t), delle emissioni di CO<sub>2</sub> (10-30%), delle polveri (20%) e del ciclo TTT (fino a 35').

## 2.7 PERFORMANCE E CARATTERISTICHE TECNICHE DI ALCUNI EAF

In Tabella 1 vengono riportate a titolo d'esempio le caratteristiche tecniche di alcuni EAF attualmente in uso dotati di: EBT, pareti water jacket, lancia a ossigeno, bruciatori oss-combustibile, scorie schiumose, stirring, LF.

Tabella 1 - Caratteristiche tecniche di alcuni EAF attualmente in uso. Fonte: [9]

	U.tà	I	II	III	IV
<b>Capacità</b>	t	80	85	90	115
<b>Potenza attiva specifica</b>	kW/t	550	750	480	650
<b>Diametro della vasca</b>	m	5,6	5,8	5,4	6,8
<b>Potenza del trasformatore</b>	MVA	70	85	50	105
<b>Potenza durante la fusione</b>	MW	44	64	43	75
<b>Diametro elettrodi</b>	mm	550	610	550	610
<b>Consumo di energia elettrica</b>	kWh/t	385	463	480	430
<b>Consumo O<sub>2</sub></b>	Nm <sup>3</sup>	30	13	30	20
<b>Consumo specifico degli elettrodi</b>	kg/t	2,2	2,1	2,5	1,8
<b>Produzione annua</b>	Mt	0,63	0,65	0,35	0,88
<b>Produzione oraria</b>	t/h	85	88	85	110
<b>TTT</b>	min	54	57	80	63
<b>Numero medio di colate al gg</b>	n	26	25	18	22



## 2. Il forno elettrico ad arco

La Tabella 2 descrive invece valori tipici dei dati di ingresso e uscita da forni elettrici analizzati nella UE.

Tabella 2 - Dati di input e output per forni elettrici ad arco all'interno della UE.

Input			Output		
<b>Raw materials</b>			<b>Products</b>		
Metallic input:			Liquid steel (LS)	kg	1000
Scrap	kg/t LS	1039 – 1232			
Pig iron	kg/t LS	0 – 153			
Liquid hot metal (1)	kg/t LS				
DRI (HBI)	kg/t LS	0 – 215			
Lime/dolomite (2)	kg/t LS	25 – 140	<b>Air emissions</b>		
Coal (including anthracite and coke)	kg/t LS	3 – 28	Off-gas flow	Million Nm <sup>3</sup> /h	1 – 2
Graphite electrodes	kg/t LS	2 – 6		Nm <sup>3</sup> /t LS	8000 – 10000
Refractory lining	kg/t LS	4 – 60		g/t LS	4 – 300
Alloys:				mg/m <sup>3</sup>	0.35 – 52
Carbon steel	kg/t LS	11 – 40	Dust	mg/t LS	2 – 200
High alloy and stainless steel	kg/t LS	23 – 363		mg/t LS	75 – 2850
				mg/t LS	12 – 2800
<b>Gases</b>				mg/t LS	3 – 2000
Oxygen	m <sup>3</sup> /t LS	5 – 65	Zn	mg/t LS	200 – 24000
Argon	m <sup>3</sup> /t LS	0.3 – 1.45	Cd	mg/t LS	1 – 148
Nitrogen	m <sup>3</sup> /t LS	0.8 – 12	Cu	mg/t LS	11 – 510
Steam (3)	kg/t LS	33 – 360	HF	mg/t LS	0.04 – 15000
			HCl	mg/t LS	800 – 35250
<b>Energy</b>			SO <sub>2</sub>	g/t LS	5 – 210
Electricity	kWh/t LS MJ/t LS	404 – 748 1454 – 2693	NO <sub>x</sub>	g/t LS	13 – 460
Fuels (natural gas and liquid fuels)	MJ/t LS	50 – 1500	CO	g/t LS	50 – 4500
			CO <sub>2</sub>	kg/t LS	72 – 180
			TOC	g C/t LS	35 – 260
			Benzene	mg/t LS	30 – 4400
			Chlorobenzenes	mg/t LS	0.2 – 12
			PAH (4)	mg/t LS	9 – 970
			PCB (5)	mg/t LS	0.01 – 5
			PCDD/F	µg I-TEQ/t LS	0.04 – 6
			<b>Production residues (waste/by-products)</b>		
			Slag from furnace	kg/t LS	60 – 270
			Slag from ladle	kg/t LS	10 – 80
			Dusts	kg/t LS	10 – 30
			Waste refractories	kg/t LS	1.6 – 22.8
			Noise	dB (A)	90 – 133
<p>(1) Hot metal is only used in very special cases (about 275 kg/t LS), then the quantity of scrap is lower.  (2) Typically lime is used but in a few cases dolomite alone is used or combinations of dolomite and lime (e.g. weight proportion 63/37).  (3) Steam is generally not used within EAF steelmaking, except for plants with secondary metallurgy with vacuum treatment  (4) No consistent database, some results represent the total of 16 EPA PAH, others only a section of them.  (5) No consistent database, values represent different selections of PCB (2 of them refer to the above-mentioned Ballschmitter PCB, 3 to WHO-TEQ and 2 without further indication).</p> <p>NB: — Some measuring methodologies might vary significantly from country to country and from plant to plant. Not all the emitted substances are measured at all plants. The measuring programmes vary greatly depending on permit requirements.  — Data has been compiled from information provided by EAF melt shop operators (carbon steel, alloy steel and stainless steel) representing 37.4 Mt of steel produced. This represented close to 50 % of the total EAF steel production in the EU in 2004 in 11 different EU countries.  — LS = Liquid steel.</p> <p>Source: [140, Eurofer 2009] [200, Commission 2001] [220, Eurofer 2008] [234, Poland 2007] [367, Prim et al. 2005] [371, Eurofer 2007] [372, Czech TWG member 2008].</p>					



### 3 FUMI EMESSI DA UN EAF TRADIZIONALE

Nel presente capitolo viene fornita un'analisi dei fumi generati dal tipico processo fusorio di un EAF (i cosiddetti "off-gas") per capire meglio quali siano le problematiche da affrontare nell'ambito del recupero dai fumi; tali problemi sono legati soprattutto alla grande variabilità di temperatura e portate degli off-gas e al loro contenuto "aggressivo" e inquinante.

I fumi estratti dall'EAF si possono dividere in due categorie: fumi primari e secondari, che presentano peculiari caratteristiche chimico-fisiche, portate e temperature. Sono convogliati ciascuno in un circuito di captazione (linea primaria e linea secondaria) provvisto di opportuni sistemi di trattamento e depurazione per limitare le emissioni inquinanti e pericolose nell'ambiente; nel Capitolo 4 viene offerta una panoramica della linea fumi, dei suoi componenti e dei valori emissivi raggiunti.

Altri effluenti gassosi derivano dai processi di metallurgia secondaria, dal preriscaldamento del rottame se presente, dal trattamento della scoria e dalla colata continua.

Complessivamente, il volume degli off-gas primari e secondari emessi raggiunge i 600000 m<sup>3</sup>/h-1400000 m<sup>3</sup>/h [6, p. 460] ed è composto principalmente da: polvere, metalli pesanti (zinco, mercurio, ecc.), ossidi di azoto e zolfo, e composti organici quali quelli volatili (VOC), clorobenzene, idrocarburi policiclici (PAH), idrocarburi policlorobifenili (PCB) e diossine e furani (PCDD/F).

Un esempio della composizione dei fumi da EAF è riassunto nella Tabella 2 del capitolo precedente.

#### 3.1 PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA PRODUZIONE DI EMISSIONI GASSOSE DA EAF

I fumi presentano una grande variabilità di composizione, temperatura e portata, strettamente dipendente dai seguenti fattori:

- Caratteristiche della carica.

Si intende in particolare la composizione del rottame che costituisce la percentuale maggiore della carica. La qualità della materia prima risulta di primaria importanza: l'umidità e gli oli eventualmente contenuti nello scrap vaporizzano già in fase di preriscaldamento/caricamento e all'inizio della fusione la combustione delle sostanze oleose porta a forti emissioni di fumo. Analogamente, l'ossidazione del rottame di piccola pezzatura provoca un aumento della fumosità. Si rileva che la presenza di eventuali materiali verniciati o galvanizzanti (piombo, cadmio e zinco) può portare alla formazione di composti corrosivi e tossici. Un primo passo per il controllo delle emissioni consiste in un'accurata scelta e ispezione del rottame, che va preventivamente bonificato.

- Caratteristiche operative e gestionali dell'impianto: marcia e tipo di forno.

Le operazioni del processo fusorio incidono direttamente sulla qualità e quantità dei fumi e sulla velocità di fusione, direttamente legata alla potenza totale installata. Come visto nel paragrafo 2.6, l'evoluzione della tecnologia dei processi fusori è stata indirizzata verso un contenimento dei

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

tempi ciclo TTT e dei fabbisogni energetici. I bruciatori a ossi-combustibile e le lance a ossigeno comunemente adottati hanno portato a questi miglioramenti velocizzando l'operazione di fusione della carica, ma nel contempo hanno anche influito sull'aumento della temperatura e delle portate di effluenti gassosi da elaborare.

Anche la fase di decarburazione influisce direttamente sulla fumosità del processo. L'ossidazione di carbonio, silicio, manganese e zolfo per opera dell'ossigeno sviluppa fumi che trascinano anche una certa quantità di ossidi di ferro.

In funzione della capacità del forno e del tipo di acciaio prodotto, il tasso di polveri captate e separate dai fumi può variare da 10 a 30 kg/t di acciaio liquido [6, p. 473]: dimensioni e tonnellaggio del forno sono quindi discriminanti non trascurabili nella corretta gestione delle emissioni, sia solide che gassose.

- Tipo di acciaio da produrre.

I diversi tipi di acciaio prodotto richiedono differenti condizioni di marcia del forno. Ad esempio, gli acciai inossidabili richiedono un periodo di decarburazione più lungo rispetto a quelli al carbonio: si ha di conseguenza una più elevata produzione di fumi primari, con contemporaneo aumento del contenuto di polveri, dovuto in parte all'ossidazione di una certa quantità di cromo che viene trascinato nella corrente gassosa come ossido polverulento.

Un ulteriore fattore discriminante che può essere menzionato è il punto di misurazione delle proprietà chimico-fisiche degli effluenti gassosi: in funzione del posizionamento delle sonde di misura si possono ottenere risultati molto diversi a parità di processo. Questo perché, per quanto riguarda le emissioni al 4° foro<sup>11</sup>, le caratteristiche dei fumi sono in continua evoluzione, affette dai processi di diluizione, post-combustione e raffreddamento, successivi alle fasi di generazione all'interno del forno.

Appare quindi molto complesso fornire dei valori universali della composizione e qualità dei fumi ed eseguire calcoli affidabili per valutarne la portata. Il metodo migliore consiste nell'attenersi a valori statistici reperibili in letteratura e catalogati in funzione di parametri quali la potenzialità del forno, la potenza elettrica installata, la potenzialità di eventuali bruciatori, il tipo di carica, l'insufflazione o meno di polverino di carbone nel bagno fuso, il tipo di acciaio realizzato, ecc. Occorre però esaminare criticamente tale letteratura per confrontare esperienze e dati sperimentali provenienti da simulazioni o misurazioni valutate con le stesse condizioni al contorno.

---

<sup>11</sup> Quarto foro: si veda la descrizione al paragrafo 4.1.1.1

### 3. Fumi emessi da un EAF tradizionale

#### 3.2 I FUMI PRIMARI

Gli off-gas primari derivano dalla fase di fusione del forno (power-on time) e costituiscono il 95% delle emissioni totali di un EAF. Vengono captati all'85-90% dal 4° foro, l'apertura che mette in comunicazione il forno con il resto della linea di adduzione fumi<sup>12</sup>, o dal 2° foro nei forni a un solo elettrodo. Vi sono tuttavia degli impianti che non utilizzano il 4° foro, ma direttamente la doghouse<sup>13</sup>, una costruzione che riveste completamente il forno catturandone anche le emissioni secondarie e prevista di adeguati sistemi di estrazione dei fumi [6, p. 430].

Il circuito primario è costituito da condutture appositamente raffreddate (WCD) per sopportare le sollecitazioni termiche e da diversi sistemi di trattamento (settling chamber e FDC/NDC o QT) come descritto al paragrafo 4.1.1.

I fumi primari sono caratterizzati da basse portate, elevate temperature e alta polverosità.

##### 3.2.1 Caratteristiche chimico-fisiche dei fumi primari

I componenti principali dei fumi primari sono le polveri; oltre a queste si rilevano gas quali CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, e H<sub>2</sub>O, trascurando una percentuale molto bassa di altri gas (composti volatili). La variabilità di tali concentrazioni obbliga a considerare periodi di misura molto ampi, generalmente paragonabili a un ciclo TTT.

Tabella 3 - Parametri di composizione riscontrabili in polveri di acciaierie elettrica. Fonte: [25].

Parametro	Valore max	Valore min
Ph (1:10 in acqua)	8.5	11.8
Densità apparente [kg/dm <sup>3</sup> ]	0.5	1.0
Perdita in peso a 105°C [%]	<1	12
Perdita in peso a 850°C [%]	1.1	5.4
Calcio [%]	2.1	6.6
Magnesio [%]	0.9	4.6
Sodio [%]	1.3	5.4
Ferro [%]	17	30
Manganese [%]	0.3	4.5
Silicio [%]	0.5	1.8
Piombo [%]	1.5	5.8
Zinco [%]	15	33
Cloruri [%]	1.6	4.5
Alluminio [%]	<0.1	0.5
Cadmio [mg/kg]	20	900
Cromo III [mg/kg]	500	4000
Cromo VI [mg/kg]	<1	13500

<sup>12</sup> Si veda nota 11.

<sup>13</sup> Doghouse: si veda la descrizione al paragrafo 4.1.2.1.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Parametro	Valore max	Valore min
Nichel [mg/kg]	100	4000
Rame [mg/kg]	1500	3500
Stagno [mg/kg]	200	900
Mercurio [mg/kg]	<0.5	35

La Tabella 4 indica le possibili percentuali in cui possono essere presenti i gas costituenti nel forno valutati all'uscita del 4° foro, prima dei processi di diluizione che si verificano al gap, il punto di interruzione nel condotto della linea di captazione dei fumi primari per l'aspirazione di aria esterna<sup>14</sup>.

Tabella 4 - Principali componenti gassosi presenti nei fumi primari. Fonte: [26].

Elemento	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
Concentrazione [%]	20-50%	10-30%	0-40%	10-20%	20-50%

I risultati forniti da Maurer et al. [26] sono in parziale accordo con quanto sostenuto da Tang et al. [27]: le maggiori discrepanze si constatano nei contenuti di CO, per i quali i risultati di Tang et al. prevedono concentrazioni prossime al 13-23%, questo probabilmente a seguito di maggiori portate di ossigeno insufflato nel forno. I dati sperimentali ottenuti da Januard et al. [28] e da Grant [29] concordano pienamente con quanto definito in [26].

La dipendenza dei componenti gassosi dalle condizioni operative e dalle caratteristiche dell'acciaio prodotto è evidente negli studi condotti da Kirschen et al. [30] su acciai inossidabili, riportati in Figura 17 - Figura 18 - Figura 19 - Figura 20. La variabilità delle concentrazioni delle specie gassose in funzione delle condizioni operative e delle dimensioni del forno non consente di creare un modello unico in grado di stimare rigorosamente portate e concentrazioni, ma permette di definire solo dei range di variazione di tali grandezze.

Il controllo del tasso di ossigeno negli off-gas non è considerato dalla letteratura anche se è un parametro chiave della marcia del forno, come descritto ai paragrafi 2.5.4 e 2.5.5, e il suo monitoraggio è di secondaria importanza nei sistemi di controllo delle emissioni (sistemi ALARC-PC®). Quando viene insufflato nel forno (1600 °C) l'O<sub>2</sub> reagisce istantaneamente con la CO; il suo valore resta pressoché costante, intorno al 20%.

Per quanto riguarda l'idrogeno, la sua percentuale di presenza nei fumi dipende strettamente dalle condizioni operative del forno e va monitorata con particolare attenzione per scongiurare la presenza di sacche deflagranti nella linea di adduzione fumi: è importante agire con un'efficace post-combustione nella camera di sedimentazione, posta a valle del forno<sup>15</sup>. L'idrogeno è generato a seguito dei processi di dissociazione dell'acqua presente nella carica sotto forma di umidità, ovvero di

<sup>14</sup> Gap: si veda la descrizione al paragrafo 4.1.1.2.

<sup>15</sup> Camera di sedimentazione: si veda la descrizione al paragrafo 4.1.1.4.

### 3. Fumi emessi da un EAF tradizionale

perdite dell'impianto water jacket del forno e dei sistemi di raffreddamento degli elettrodi, nonché da carenze di ossigeno per bruciare il gas naturale insufflato nel forno. Il tasso di  $H_2$  scende a valori inferiori all'1% se le operazioni di fusione avvengono senza bruciatori ausiliari, ma con grandi volumi d'aria di filtrazione.

Le percentuali di CO e  $CO_2$  nei fumi variano ciclicamente in funzione delle operazioni di caricamento del forno (apertura/chiusura della volta). L'emissione di CO è favorita non soltanto dall'iniezione di ossigeno dalle lance durante la fusione/affinazione, ma anche nelle prime fasi della fusione del rottame dalla combustione degli idrocarburi (oli, lubrificanti, grassi, ecc.) e del carbone additivato presenti nella carica, mentre durante l'intero ciclo TTT è prodotta dalla dissociazione di calce e  $CO_2$  (reazione di Boudouard tra 800-1000 °C), nonché dall'usura degli elettrodi.

L'ossigeno atmosferico filtrato all'interno del forno dalle luci degli elettrodi e dal gap tra volta e tino ossida parzialmente la CO in  $CO_2$  e reagisce con l' $H_2$  formando  $H_2O$ . Processi di ossidazione ben più violenti si verificano nella camera di sedimentazione, dove la CO è quasi completamente convertita in  $CO_2$ ; la CO residuale nei fumi è inferiore allo 0.5% [6, p. 423].

Risultati in sintonia con la letteratura esaminata sono stati registrati anche da Nardin et al. [31] durante misurazioni sperimentali su forni dalle dimensioni analoghe (diametro: 5.3 m).

La quantità di  $NO_x$  prodotti da un ciclo fusorio dipende strettamente dallo specifico processo di combustione al quale è stata sottoposta la carica: in base ai dati forniti dall'Environmental Protection Agency (EPA)<sup>16</sup> nel 2003 si ha una produzione di 0.4 kg  $NO_x$  /t di acciaio spillato.

La quantità di  $N_2$ , rilevata dai sensori di misura, nei fumi al 4° foro, è un indice della quantità di aria falsa aspirata dal forno dalle luci presenti sulla volta del forno e al gap tra tino e la volta stessa e in genere la percentuale è prossima al 50% [26].

---

<sup>16</sup> L'Environmental Protection Agency (EPA) è il principale ente di protezione ambientale degli Stati Uniti. Tra i suoi compiti rientra quello di mettere in atto le leggi emanate in favore della protezione ambientale [88].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

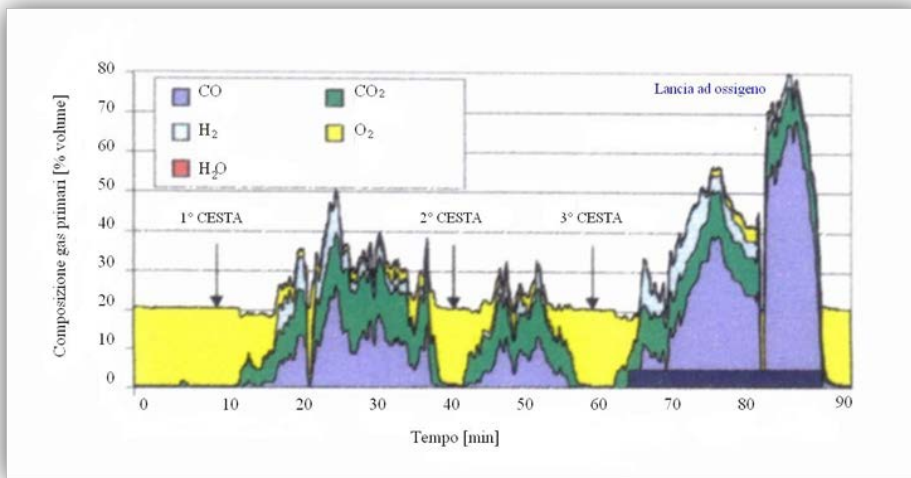


Figura 17 - Composizione gas primari (lancia a ossigeno 6.8 m<sup>3</sup>/t; polverino di carbone 0 kg/t; diametro forno 6.9 m. Fonte: [30].

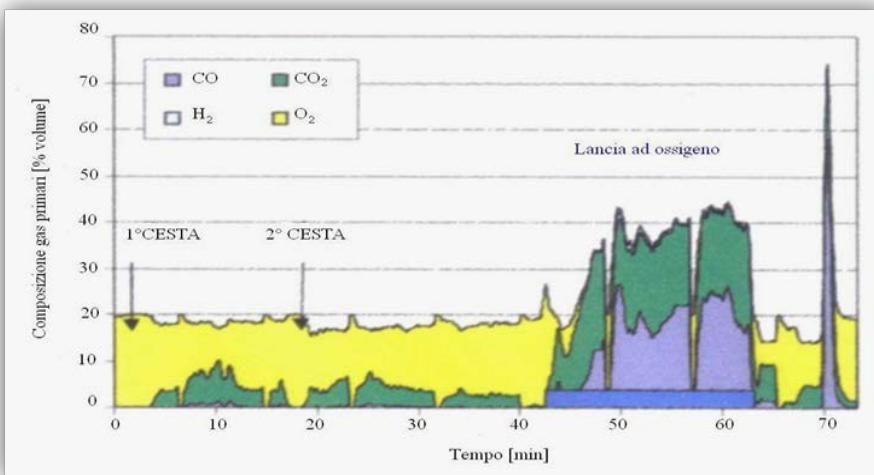


Figura 18 - Composizione gas primari (lancia ad ossigeno 20.2 m<sup>3</sup>/t; polverino di carbone: 0 kg/t; diametro forno: 6.9 m. Fonte: [30].



### 3. Fumi emessi da un EAF tradizionale

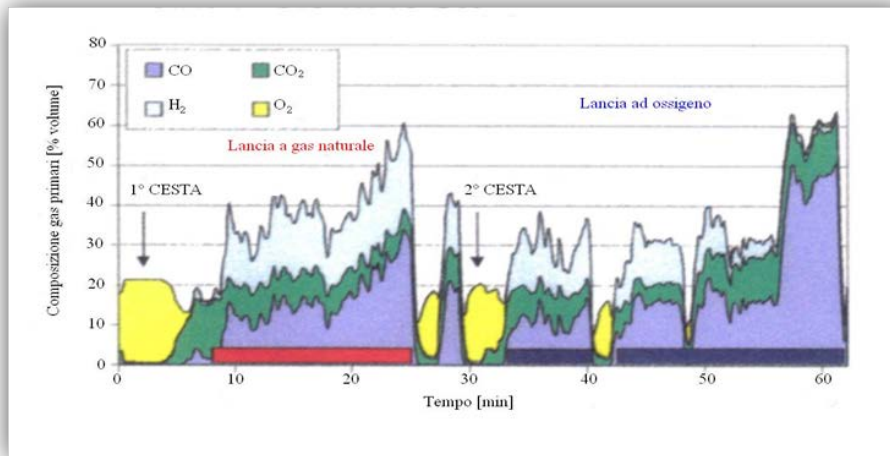


Figura 19 - Composizione gas primari (lancia ad ossigeno 7.1 m<sup>3</sup>/t; polverino di carbone: 6.0 kg/t; diametro forno: 5.9 m. Fonte: [30].

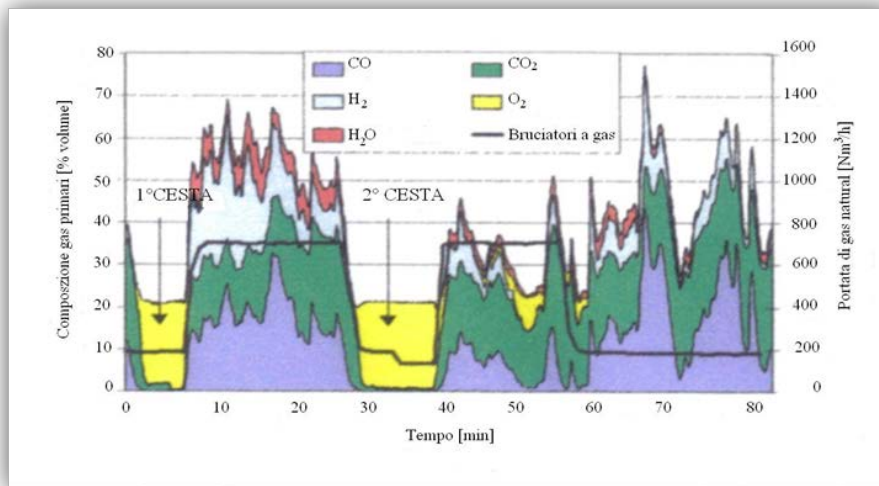


Figura 20 - Composizione gas primari (lancia ad ossigeno 30.5 m<sup>3</sup>/t; polverino di carbone: 21 kg/t diametro forno: 5.8 m. Fonte: [30].

#### 3.2.2 Portata dei fumi primari

Come valore indicativo, si possono stimare 1000 Nm<sup>3</sup>/h di fumi dal 4° foro per tonnellata di acciaio liquido spillato [32]. Per la determinazione della portata è comunque possibile affrontare il problema in maniera scientifica, basandosi su considerazioni derivanti da semplici reazioni chimiche di ossidazione e si può stimare che il volume finale dei fumi sia pari a sei volte il volume di ossigeno iniettato. Tuttavia, le condizioni di combustione sono complesse, altamente condizionate dalle cinetiche di reazione e dalle caratteristiche chimiche dei soggetti interessati alle reazioni stesse, in particolare alla qualità del rottame; non è quindi possibile calcolare la combustione fino a limiti così

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

accurati. Perciò, per il dimensionamento degli impianti di depurazione fumi si assume generalmente una portata pari a 15 volte il volume di ossigeno iniettato.

### 3.2.3 Temperatura dei fumi primari

Per quanto concerne l'andamento della temperatura dei fumi primari si può fare riferimento agli studi condotti da Nyssen et al. [33] nei quali viene illustrata la dipendenza di tale grandezza fisica in funzione della marcia del forno. Anche la temperatura, così come la composizione, non assume valori ben definiti durante il ciclo TTT: il ricorso a sistemi di simulazione, basati sulla misurazione delle concentrazioni di specie chimiche "indicatori" (tasso di CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) presenti negli off-gas consente di prevederne l'andamento con buona accuratezza, al fine di una corretta gestione del forno e di un controllo della qualità dell'acciaio prodotto.

L'importanza di una corretta stima delle caratteristiche termiche dei fumi è di fondamentale importanza per il dimensionamento dei condotti di adduzione, necessari per convogliare gli effluenti gassosi nella linea di aspirazione e trattamento la presenza di picchi di temperatura, prossimi ai 1500-1600 °C nei primi tratti, impone scelte di materiali e tecnologie in grado di rispondere adeguatamente a tali sollecitazioni.

La Figura 21 ben rappresenta il fatto di come il processo definisca l'andamento delle temperature degli off-gas e ne caratterizzi la grande variabilità.

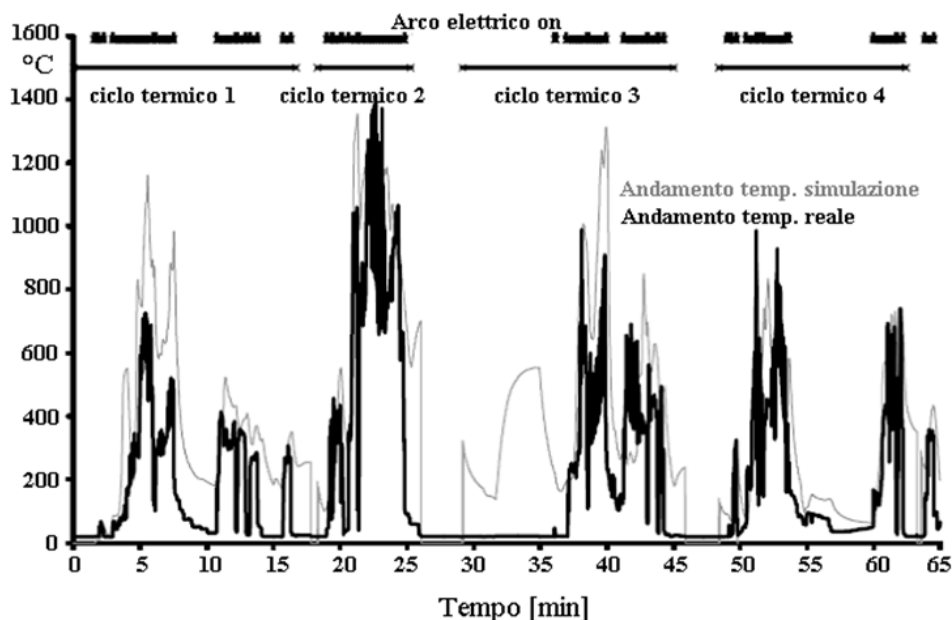


Figura 21 - Variazione della temperatura dei gas primari durante un ciclo TTT: andamento reale e ottenuto con programma CRM. Fonte: [33].

### 3.3 I FUMI SECONDARI

Le emissioni secondarie sono sensibilmente differenti rispetto alle primarie sia come composizione, sia come portate e temperature.

I fumi secondari derivano da tutte quelle operazioni a forno scoperto (power-off time), quando viene effettuata la carica e lo spillaggio, ma anche dalle emissioni che sfuggono alla depressione del forno durante il suo funzionamento: sbuffi per sovrappressione del forno durante la fusione, gas all'uscita della porta di scorifica, fumi uscenti dalle luci degli elettrodi posti sulla volta del forno, ecc.

Sono raccolti dal circuito secondario costituito in genere da una cappa di aspirazione (canopy hood) sopra la volta del forno e dalle cappe secondarie di ripresa; oltre alla cappa tradizionale si possono avere la doghouse o la elephant house, costruzioni che racchiudono il forno o anche l'area limitrofa<sup>17</sup>.

Tra le emissioni secondarie, vanno ricordate quelle prodotte durante i cicli di affinazione in forni siviera (LF), operazioni normalmente effettuate in zone non confinate e presidiate da cappe aspiranti di dimensioni ridotte<sup>18</sup>. Tali circostanze creano notevoli dispersioni di polveri e gas che si propagano all'interno dell'ambiente di lavoro, per poi disperdersi verso l'ambiente esterno attraverso le varie aperture dell'immobile industriale (lucernai, portoni, ecc.). Il fenomeno è notevolmente accentuato dall'utilizzo di gas inerte (Argon) per l'omogeneizzazione dell'acciaio contenuto in siviera (processo Stirling).

I fumi secondari sono caratterizzati da elevate portate, basse temperature e bassa polverosità.

#### 3.3.1 *Caratteristiche chimico-fisiche dei fumi secondari*

Gli elementi principali dei fumi secondari sono polveri di varia natura e altre sostanze come oli, PCB e PCDD/F, oltre a residui organici incombusti presenti nei rottami caricati. Il preriscaldamento di siviere e paniere, normalmente effettuato in ambienti non confinati, produce emissioni e vapori, quali ad esempio PAH, oli, ecc. che si propagano negli ambienti di lavoro e all'esterno. Nella Tabella 5 sono rappresentati i valori tipici di concentrazione dei diversi componenti presenti.

---

<sup>17</sup> Si veda la descrizione dei sistemi di captazione dei fumi secondari al paragrafo 4.1.2.1.

<sup>18</sup> Si veda la descrizione delle cappe secondarie di ripresa al paragrafo 4.1.2.2.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Tabella 5 - Parametri di composizione riscontrabili nei fumi secondari provenienti da forni elettrici. Fonte: [25].

Parametro	Valore max	Valore min.
Ph (1:10 in acqua)	9.0	11.6
Densità apparente [kg/dm <sup>3</sup> ]	0.6	1.0
Perdita in peso a 105°C [%]	4	5.6
Perdita in peso a 850°C [%]	23	35
Calcio [%]	6.2	11.6
Magnesio [%]	1.2	5.6
Sodio [%]	2.3	5.9
Ferro [%]	9.7	12.4
Manganese [%]	0.2	4.1
Piombo [%]	4.3	5.9
Zinco [%]	21	38
Cloruri [%]	1.6	4.5
Alluminio [%]	<0.4	1
Cadmio [mg/kg]	380	880
Cromo III [mg/kg]	490	1200
Cromo VI [mg/kg]	<1	90
Nichel [mg/kg]	110	185
Rame [mg/kg]	500	600
Stagno [mg/kg]	380	895
Mercurio [mg/kg]	19	20
Idrocarburi pesanti C>12 [mg/kg]	6750	7800
IPA	30	92
PCB	0.2	2.6

La mancanza di letteratura in merito alla stima degli andamenti delle emissioni secondarie è da imputare al fatto che essa interessa portate e temperature di effluenti dalle caratteristiche meno critiche rispetto alle primarie, meno rilevanti sulla gestione del processo fusorio, sulla marcia del forno e sulla qualità dell'acciaio prodotto.

### 3.3.2 Portata dei fumi secondari

La variabilità delle condizioni operative analizzata per i primari, si ripercuote anche sull'andamento dei fumi secondari, pur non essendo possibile, dalla letteratura esaminata, quantificarne l'entità: l'assenza di studi in merito impone il ricorso a un'analisi basata sul confronto di dati storici e casi specifici. Le portate possono eccedere 1 milione di m<sup>3</sup>/h [6, p. 430]; generalmente si considerano pari a 4-5 volte quelle dei fumi primari sviluppati durante il picco di produzione (decarburazione dell'acciaio).

### 3. Fumi emessi da un EAF tradizionale

#### 3.3.3 *Temperatura dei fumi secondari*

Generalmente i fumi secondari hanno temperature prossime ai 600-700 °C in prossimità del forno, mentre valori oscillanti tra 50-70 °C si riscontrano in vicinanza delle pareti delle cappe di aspirazione, fortemente dipendenti dalle caratteristiche della zona di fusione, come lo sviluppo verticale della campata dello stabilimento, la presenza di bocche di aerazione o di pareti di contenimento (doghouse, elephant house, ecc.).

#### **3.4 LE POLVERI NEI FUMI DA EAF**

Le polveri sono costituite principalmente da ossidi metallici presenti nei fumi (quali ferro, alluminio, zinco) e da altri elementi che solitamente accompagnano la carica metallica come oli e plastiche; anche i materiali refrattari che rivestono le pareti del forno o dei condotti e soggetti all'erosione dai fumi vengono trasportati nel flusso. Tali elementi non possono essere immediatamente inviati a camino, sia per ragioni impiantistiche (corrosione, abrasione, ecc.), sia soprattutto di carattere ambientale: devono essere perciò abbattuti, dando così origine alle "polveri di acciaieria".

Il contenuto di polveri è pari a circa l'1-2% del peso della carica del forno.

In un EAF, prima dei sistemi di abbattimento, si registrano valori che oscillano tra 10-30 kg/t di acciaio liquido al carbonio o basso legati e 10-18 kg/t di acciaio liquido nel caso di acciai alto legati; per l'acciaio inossidabile il massimo valore di polveri prodotte è di 30 kg/t acciaio liquido.

A seguito dell'abbattimento la presenza delle polveri varia in un range di 0,5-50 mg/Nm<sup>3</sup> in relazione all'efficienza e alle caratteristiche dei sistemi filtranti, nonché dalla modalità di raffreddamento dei fumi (la maggior parte delle installazioni presenta valori prossimi al limite inferiore di tale range) [6, p. 433].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Tabella 6 - Composizione chimica delle polveri da un EAF tradizionale per la produzione di acciaio al carbonio/basso legati e per acciaio alto legato/inossidabile. Fonte: [6, p. 443]

Component	Dust from carbon/low alloyed steel production (wt-%)	Dust from alloy steel production (wt-%)	Dust from stainless steel production (wt-%)
Fe <sub>tot</sub>	10 – 45	17 – 37	20 – 65
SiO <sub>2</sub>	0.6 – 5.1	1.7 – 5	3 – 9
CaO	3 – 17	2 – 16	8 – 20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3 – 3	1 – 4	0.4 – 2
MgO	0.5 – 6	1.2 – 3	1 – 5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1 – 0.37	0.01 – 0.1	0.03 – 0.1
MnO	1.1 – 6	1.5 – 6.9	2.2 – 6.3
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13 – 2	0.12 – 6	9 – 20
Na <sub>2</sub> O	0.3 – 3	NA	0.6 – 2
K <sub>2</sub> O	0.5 – 2.3	NA	0.7 – 3
Zn	21 – 43	2 – 15	2 – 25
Pb	0.4 – 10	0.05 – 3.6	0.2 – 4.5
Cd	0.02 – 0.18	0.01 – 0.04	0.01 – 0.08
Cu	0.08 – 0.5	0.01 – 0.8	0.015 – 0.5
Ni	0.01 – 0.8	0.01 – 0.5	1 – 8
V	0.01 – 0.09	0.01 – 0.2	0.05 – 0.12
W	NA 0	.5 – 1.5 N	A
Co	0.001 – 0.01	0.01 – 0.2	0.02 – 0.04
As	0.001 – 0.02	0.001 – 0.01	0.01
Hg	0.0001 – 0.005	0.05 – 0.7	0.0002 – 0.015
Cl	0.8 – 5	0.7 – 1.7	0.8 – 1
F	0.02 – 0.9	0.01 – 0.65	0.3 – 2.4
S	0.1 – 3	0.25 – 1.42	0.2 – 0.5
C	0.4 – 3.3	0.5 – 3.1	0.05 – 1.3
Basicity	2.0 – 6.5	NA	NA
Moisture 6	– 16	NA	NA

NB: NA = Data not available.  
 Source: [39. EUROFER EAF 1997] [62. Hoffmann 1997] [134. Strohmeier et al. 1996] [277. Wiesenberger 2007] [376. Eurofer 2007] [391. Tavernier et al. 2004].

Per quanto visto sui fumi, anche la variabilità nella composizione delle polveri che si riscontra dall'esame della letteratura reperita è fortemente condizionata dal tipo di acciaio e dal processo produttivo; in generale, come evidenziato dalla tabella, la concentrazione di ferro è molto alta e a seguire quella di calcio, zinco, silicio, manganese e zolfo.

La granulometria delle polveri prodotte comprende frazioni grossolane, dove la misura significativa è costituita dai millimetri e frazioni fini con massima frequenza delle classi tra 2 e 5 micron.

Le polveri vengono abbattute e accumulate in appositi sistemi, tra i quali i più utilizzati sono i sistemi a gravità e il banco filtri<sup>19</sup>. Per quanto concerne il loro smaltimento, sebbene quello diretto in discarica sia una soluzione economicamente vantaggiosa, è reso problematico dalla presenza di metalli pesanti (cadmio, cromo VI, rame, mercurio, ecc.) e da normative sempre più stringenti.

Inoltre le polveri hanno ancora un valore intrinseco di mercato, dovuto proprio al loro alto contenuto residuo di ferro (40-50% in peso), zinco e piombo; cromo e nichel sono invece presenti in quantità rilevanti nelle polveri residue di acciai inossidabili. Il fatto che gli elementi siano presenti nelle

<sup>19</sup> Si veda la descrizione completa degli elementi di captazione delle polveri ai paragrafi 4.1.3.2, 4.1.3.3, 4.1.3.4.

### 3. Fumi emessi da un EAF tradizionale

polveri sotto forma di ossidi costituisce un evidente problema per il loro smaltimento: ne impedisce il loro riciclo nell'EAF poiché il forno non ha capacità, se non modestissime, di riduzione del ferro. Le polveri sono quindi gestite sotto forma di pellets o bricchette, di varia forma e dimensioni con impianti di agglomerazione a secco o a umido (in base alla tipologia di filtrazione delle emissioni gassose); questo ne facilita lo stoccaggio e la movimentazione agli impianti deputati alla loro elaborazione e trattamento per il recupero di metalli. I processi allo stato dell'arte possono essere suddivisi grossolanamente in quattro categorie principali, per la cui descrizione si rimanda a testi specializzati:

- Stabilizzazione/Vetrificazione;
- Riciclo in forno elettrico;
- Pirometallurgia;
- Piro-idrometallurgia.

#### **3.5 ELEMENTI INQUINANTI NEI FUMI DI FORNO ELETTRICO AD ARCO**

Tra gli elementi presenti nei fumi quelli maggiormente inquinanti sono: CO e CO<sub>2</sub>, PCDD/F e polveri, oltre a NO<sub>x</sub> e idrocarburi incombusti. Valori tipici di emissione di questi componenti sono riportati in Tabella 2 (paragrafo 2.7).

##### **3.5.1 Combustione della CO**

Affinché si completino tutti i processi di combustione, tra cui la trasformazione di CO in CO<sub>2</sub> si richiama aria tramite il gap, a valle del quarto foro. Subito dopo il gap si trova la camera di sedimentazione (paragrafo 4.1.1.4) dove l'ossigeno entrato dal gap completa le reazioni di ossidazione e dove avviene anche una separazione delle polveri più grossolane. Si rimanda ai paragrafi 4.1.1.2 e 4.1.1.4 per una descrizione dettagliata dell'argomento. Come anticipato nel paragrafo dedicato ai fumi primari, si ha un minimo di CO residuo nei fumi inferiore allo 0.5% [6, p. 423].

##### **3.5.2 CO<sub>2</sub>**

La stima della produzione di anidride carbonica dai processi elettrosiderurgici può essere fatta in funzione della metodologia di produzione dell'acciaio e in funzione degli input del sistema, come descritto nella guida dell' Integrated Pollution Prevention and Control (IPCC)<sup>20</sup> del 2006 [34]. Nel seguito vengono brevemente riportate due criteri adottati.

---

<sup>20</sup> L' Integrated Pollution Prevention and Control o IPCC (2008/1/CE) è la direttiva a livello UE relativa alla prevenzione e al controllo integrato in materia di inquinamento ambientale a livello europeo. È stata recentemente sostituita dalla direttiva IED (2010/75/EU) [84].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

1. Produzione CO<sub>2</sub> in funzione della metodologia di produzione dell'acciaio:

La quantità di CO<sub>2</sub> prodotta viene valutata in base alla relazione:

$$(1) \quad E_{CO_2} = BOF \times EF_{BOF} + EAF \times EF_{EF} + OHF \times EF_{OHF}$$

dove:

- BOF, EAF, OHF: indicano la quantità di acciaio prodotta (tonnellata) in relazione al processo;
- EF: rappresenta il fattore di emissione (t CO<sub>2</sub>/t di acciaio prodotto) in funzione della tecnologia fusoria adottata. Il fattore di emissione esprime il rapporto tra la massa di sostanza inquinante emessa e l'unità di misura specifica di prodotto elaborato o fabbricato.

In riferimento ai dati forniti dall'IPCC [34], tipici fattori di emissione in base alle metodologie di produzione dell'acciaio sono raccolti Tabella 7:

Tabella 7 - Fattori di emissione di CO<sub>2</sub> nei diversi sistemi di produzione dell'acciaio. Fonte: [34, p. 4.25].

Steelmaking Method		
Basic Oxygen Furnace (BOF) (tonne CO <sub>2</sub> per tonne of steel produced)	1.46	Steel Production: Consensus of experts and IISI Environmental Performance Indicators 2003 STEEL (International Iron and Steel Institute, 2004)
Electric Arc Furnace (EAF) (tonne CO <sub>2</sub> per tonne of steel produced) **	0.08	Steel Production: Consensus of experts and IISI Environmental Performance Indicators 2003 STEEL (International Iron and Steel Institute, 2004)
Open Hearth Furnace (OHF) (tonne CO <sub>2</sub> per tonne of steel produced)	1.72	Steel Production: Consensus of experts and IISI Environmental Performance Indicators 2003 STEEL (International Iron and Steel Institute, 2004)
Global Average Factor (65% BOF, 30% EAF, 5% OHF)* (tonne CO <sub>2</sub> per tonne of steel produced)	1.06	Steel Production: Consensus of experts and IISI Environmental Performance Indicators 2003 STEEL (International Iron and Steel Institute, 2004)
* Factor based on 2003 international data where BOFs accounted for approximately 63 percent of world steel production and EAFs approximately 33 percent; OHF production accounted for the remaining 4 percent but is declining.		
** The emission factor for EAF steelmaking does not include emissions from iron production. The emission factors for BOF and OHF steelmaking do include emissions from blast furnace iron production.		
Note that the CO <sub>2</sub> emission factor for EAF steelmaking in this table is based on production of steel from scrap metal, and therefore the EAF emission factor does not account for any CO <sub>2</sub> emissions from blast furnace iron making. The Tier 1 CO <sub>2</sub> emission factor for EAFs in this table is therefore not applicable to EAFs that use pig iron as a raw material.		

2. Produzione CO<sub>2</sub> in funzione degli input al sistema:

La quantità di CO<sub>2</sub> prodotta viene valutata in base alla relazione:

$$(2) \quad E_{CO_2} = \left[ \frac{PC \cdot C_{PC} + \sum_a (COB_a \cdot C_a) + CI \cdot C_{CI} + L \cdot C_L + D \cdot C_D + CE \cdot C_{CE} + \sum_b (O_b \cdot C_b) + COG \cdot C_{COG} - S \cdot C_s - IP \cdot C_{IP} - BG \cdot C_{BG}}{12} \right] \cdot \frac{44}{12}$$

con:

- PC coke utilizzato per produrre l'acciaio [t];
- COB<sub>a</sub> coke consumato in altoforno per produrre la ghisa da affinare [t];
- CI carbone iniettato direttamente nell'altoforno [t];
- L calce impiegata sia in altoforno che nell'affinazione [t];



### 3. Fumi emessi da un EAF tradizionale

- D dolomite impiegata sia in altoforno che nell'affinazione [t];
- CE elettrodi consumati nell'EAF [t];
- O<sub>b</sub> termine che identifica le altre fonti di carbonio presenti nel processo [t];
- COG gas d'altoforno consumato [m3];
- S acciaio prodotto [t];
- IP ghisa non convertita in acciaio [t];
- BG gas d'altoforno veicolati all'esterno [m3];
- C<sub>x</sub> contenuto di carbonio dei materiali in input/output [tC/unità di materiale]

In Tabella 8 sono raccolti i contenuti medi di carbonio in base ai dati in ingresso al processo di formazione dell'acciaio.

Tabella 8 - Contenuto di carbonio medio in alcune sostanze utili alla fusione dell'acciaio. Adattato da: [34, p. 4.26].

<b>Materiale</b>	<b>Contenuto di carbonio medio [kg C/kg]</b>
Acciaio	0,01
Carbone iniettato in EAF	0,83
Calce	0,12
Gas di cokeria	0,83
Gas d'altoforno	0,17
Elettrodi EAF	0,82
Coke in altoforno	0,83
Dolomite	0,13
Carbone bituminoso	0,67
Ghisa non convertita in acciaio	0,04

Tra i due metodi proposti la letteratura consiglia di utilizzare, se si dispone dei profili di fusione e delle caratteristiche di input al processo, il secondo, data la migliore affidabilità e precisione.

#### 3.5.3 *Diossine*

Tra gli agenti inquinanti la diossina risulta essere tra i più pericolosi. È costituita da un composto di 75 PCDD (polychlorinated dibenzo-p-dioxins) e 135 PCDF (polychlorinated dibenzo furans). Le diossine si generano all'interno del forno, ma vengono quasi completamente distrutte grazie alle alte temperature. Tuttavia, lungo la line d'aspirazione possono riformarsi come risultato della reazione tra componenti organici e cloro in essi presenti che sfruttano le polveri dei fumi come catalizzatore. Questo processo avviene a temperature comprese tra i 280 e i 600 °C, assume il nome di *De novo Synthesis* e ha un massimo di produttività tra i 300-500 °C; per questo motivo si ritrovano spesso alte concentrazioni di diossina nei gas primari. Poiché la reazione chimica della sintesi dipende sia dalla temperatura, sia dal tempo, la quantità di diossina prodotta è legata al tempo di permanenza dei gas a temperature comprese tra i 280 e i 600 °C [35].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Innanzitutto, per limitare le emissioni di diossina si può ricorrere a una efficace post-combustione facendo permanere i fumi nella camera di sedimentazione (paragrafo 4.1.1.4) con un adeguato livello di temperatura e regime turbolento e per un tempo sufficiente.

Per evitare il fenomeno De novo Synthesis è necessario invece operare un brusco raffreddamento dei fumi provenienti dall'aspirazione primaria. Questo può essere fatto con semplice miscelamento tra i fumi primari e secondari, con i dispositivi di raffreddamento previsti lungo la linea di trattamento dei fumi (scambiatori a convezione FDC/NDC, torre evaporativa QT)<sup>21</sup> e qualora non fosse sufficiente con l'iniezione di un materiale assorbente (coke) posto tra il ciclone e il filtro della linea fumi, prima dell'uscita al camino. Per la trattazione approfondita del tema si rimanda al paragrafo 3.5.3.

Diversi sistemi di misurazione disponibili mostrano fattori di emissioni attorno ai 0,4-6 ng I-TEQ/t acciaio liquido [6, p. 435].

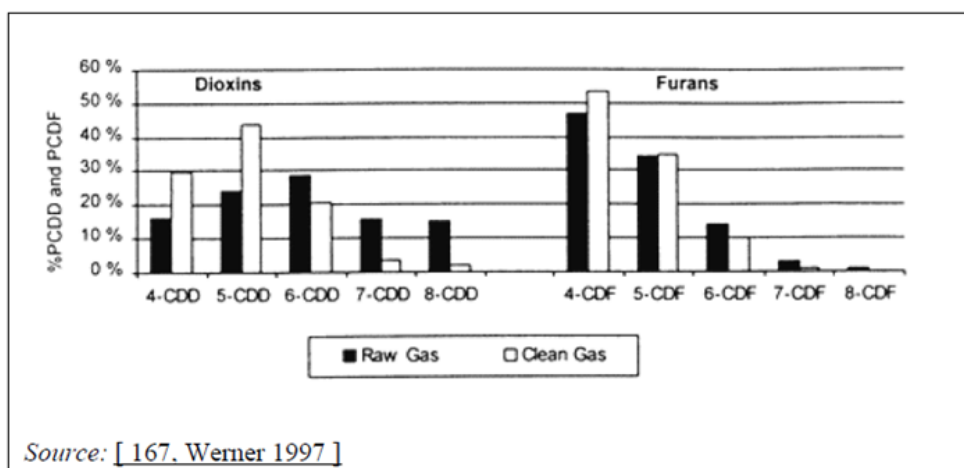


Figura 22 - Distribuzione di PCDD/F relativa agli off-gas di un EAF twin.shell con preriscaldamento del rottame, prima e dopo l'abbattimento. Fonte: [6, p. 436].

<sup>21</sup> Per la descrizione di questi componenti si vedano i paragrafi: 4.1.3.1, 4.1.1.6 e 4.1.1.7 rispettivamente.

### 3. Fumi emessi da un EAF tradizionale

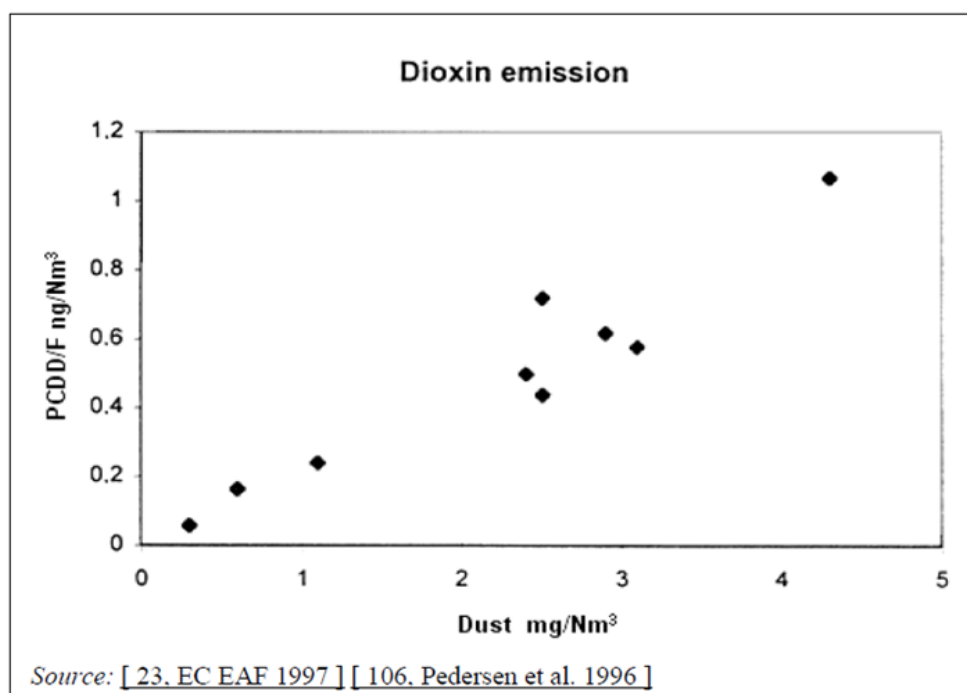


Figura 23 - Correlazione tra i residui di polvere e PCDD/F dopo l'abbattimento nei filtri a maniche a temperature inferiori a 85 °C. Fonte: [6, p. 437].

#### 3.5.4 Polveri

Le polveri subiscono diversi tipi di trattamento e depurazione come ampiamente descritto nel capitolo 4, in particolare al paragrafo 4.2.2 dove vengono indicati i sistemi che garantiscono la migliore captazione nel rispetto dei limiti emissivi. In sintesi, un primo abbattimento delle particelle più grossolane viene effettuato nella camera di sedimentazione (paragrafo 4.1.1.4), mentre lungo la linea di trattamento e depurazione fumi sono previsti altri sistemi quali cicloni (paragrafo 4.1.3.2) e in particolare i filtri a maniche (paragrafi 4.1.3.3, 4.1.3.4).



## 4 LINEA DI TRATTAMENTO E DEPURAZIONE DEI FUMI DA EAF

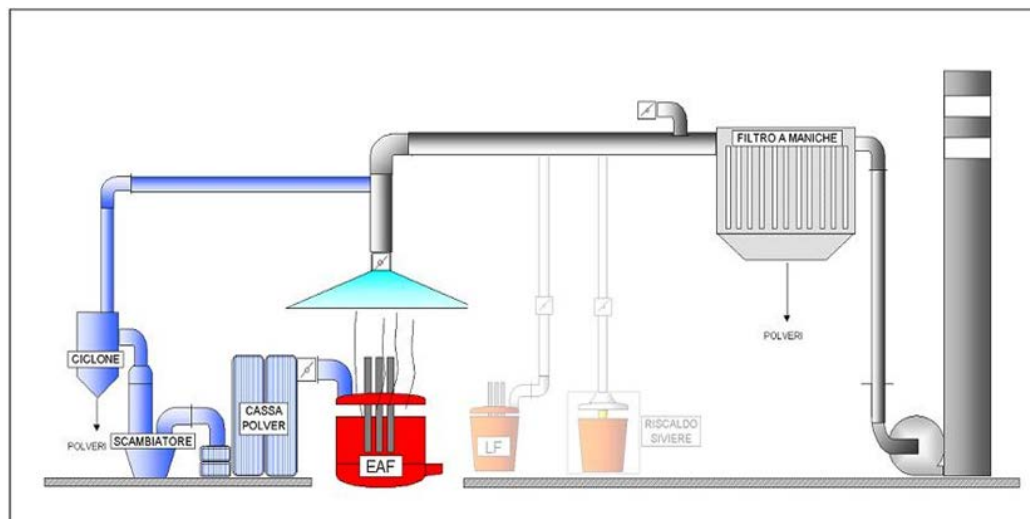


Figura 24 - Esempio di una possibile configurazione della linea di trattamento e depurazione fumi da un EAF tradizionale. Fonte: [36].

### 4.1 COMPONENTI DI UN'ACCIAIERIA CLASSICA: CIRCUITO PRIMARIO E SECONDARIO

La linea di trattamento e depurazione fumi ha il compito di estrarre, convogliare, filtrare e infine espellere in atmosfera i fumi di processo in ottemperanza alle norme vigenti in tema di inquinamento ambientale.

La Figura 25 mette in evidenza i vari componenti della linea di trattamento e depurazione di un'acciaieria tradizionale con EAF. I fumi "primari" sono estratti dal quarto foro della volta del forno e convogliati nel primo tratto dei condotti di aspirazione opportunamente raffreddati (WCD1) per resistere alle forti sollecitazioni termiche cui sono sottoposti (picchi fino a 1600 °C). Nel WCD1 è presente un'apertura, il gap, attraverso la quale entra aria dall'esterno per favorire la combustione del CO e H<sub>2</sub> ancora presenti nei fumi, contribuendo nel contempo al loro raffreddamento. I fumi passano poi alla camera di sedimentazione (settling chamber) dove si completano le reazioni di combustione di CO e H<sub>2</sub> e si separano le particelle di polvere più pesanti e grossolane. I gas attraversano un'altra parte del condotto (WCD2) che li raffredda fino a 600-800 °C; a questo segue un condotto in semplice parete fino al sistema di raffreddamento vero e proprio che li porta a 200-300 °C. I sistemi di raffreddamento principalmente usati sono la torre di raffreddamento (QT) oppure appositi scambiatori a convezione forzata o naturale (FDC/NDC). I fumi "primari" vengono quindi mescolati (mediante la valvola *Dec Dumper*) con quelli "secondari" captati dalla cappa di aspirazione posizionata sopra il

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

forno: si raggiungono così temperature al di sotto di 130 °C, appropriate per la filtrazione (in genere, filtri a maniche). A questo punto i fumi vengono espulsi dal camino [35].

Di seguito viene data una breve descrizione dei componenti principali della linea fumi [36].

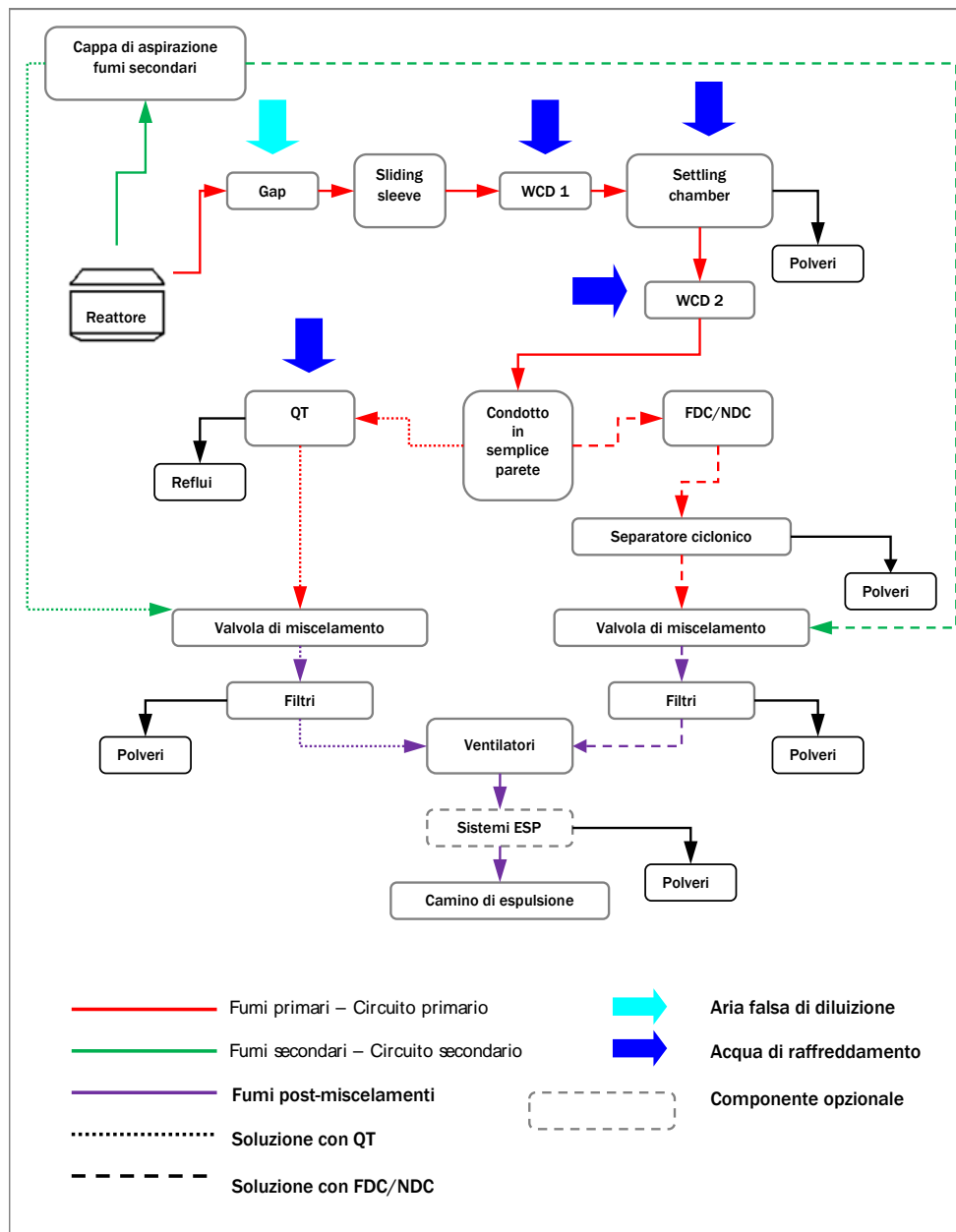


Figura 25 - Schema dei componenti della linea di trattamento e depurazione fumi di un'acciaieria. In rosso, il circuito primario; in verde, il circuito secondario. Fonte: [36].

## 4. Linea di trattamento e depurazione dei fumi da EAF

### 4.1.1 Elementi del circuito primario

#### 4.1.1.1 Quarto foro e tronchetto mobile raffreddato

##### Obiettivo

Estrarre gli effluenti prodotti nel forno in maniera veloce ed efficiente in modo da evitare fughe (“sbuffi”) attraverso i giochi tra sedi ed elettrodi o tra volta e forno.

##### Descrizione componente

Sulla volta del forno vi sono solitamente quattro aperture, tre per gli elettrodi e una per l'estrazione dei gas chiamata quarto foro; può essere presente un ulteriore foro (quinto foro) per l'inserimento degli additivi. Al quarto foro è collegato un condotto a gomito svincolato dal resto dei condotti che garantisce l'apertura e la chiusura della volta. I fumi appena estratti hanno una temperatura molto elevata ( $T_{\text{media}}$  superiore a 800 °C con punte di 1600 °C) e per l'integrità del componente è quindi necessario un raffreddamento. Questo si realizza con un'incamiciatura del condotto all'interno della quale scorre acqua di raffreddamento (condotto WCD, paragrafo 4.1.1.3).

##### Processo

I fumi vengono aspirati attraverso un foro sulla volta del forno, chiamato quarto foro. Il foro è generalmente circolare e le velocità di passaggio in corrispondenza di esso sono elevate (maggiori di 60 m/s).

##### Idealità

I fumi vengono evacuati velocemente, ma non troppo per non sottrarre eccessivo calore al bagno. Tutti i fumi passano attraverso il quarto foro e si cerca di mantenere le perdite di carico più basse possibili.

##### Problematiche

Per limitare le perdite di carico, che dipendono dal quadrato della velocità, bisognerebbe ridurre la velocità dei fumi ad esempio aumentando la dimensione del quarto foro o aggiungendo fori, soluzione non praticabile: lo spazio sulla volta è limitato e un foro troppo grande o fori in più potrebbero compromettere la solidità della volta e dell'impianto di estrazione. Inoltre, occorrerebbe valutare di quanto effettivamente ridurre la velocità: se troppo bassa, i gas potrebbero restare a lungo nel forno rallentando la fusione.

#### 4.1.1.2 Gap

##### Obiettivo

- Richiamare nel condotto una certa portata d'aria affinché si completino i processi di combustione di CO e H<sub>2</sub>;
- Contribuisce in seconda misura al raffreddamento dei fumi.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### Descrizione componente

Il gap è un componente “virtuale” nel senso che consiste in una semplice interruzione del condotto, a valle del quarto foro.

#### Processo

Il gap favorisce l'entrata di aria esterna nel condotto fumi; l'aria viene trascinata dal flusso di gas uscente dal quarto foro e garantisce il completamento della combustione dei fumi.

#### Idealità

Il gap deve essere tale da permettere l'ingresso della giusta portata d'aria, non in quantità maggiore del necessario per non avere portate troppo elevate e quindi condotti più grandi e ventilatori più potenti.

#### Problematiche

L'aria che viene richiamata in realtà è maggiore di quella necessaria per garantire la trasformazione del CO in CO<sub>2</sub>. Inoltre, la dimensione del gap è legata alla portata e alla concentrazione di CO, grandezze estremamente variabili. Bisognerebbe prevedere una regolazione che segua le variazioni di queste due grandezze, cosa molto difficile da realizzare. Per comodità si prendono in considerazione per il dimensionamento del gioco le condizioni più sfavorevoli, ovvero quelle di massima portata e massima concentrazione di CO.

#### 4.1.1.3 *Water Cooled Duct (WCD)*

#### Obiettivo

Raffreddare i fumi ad alta temperatura (caratterizzati da punte di 1600 °C) nel primo tratto del condotto (WCD1) fino a 600-800 °C nel secondo tratto (WCD2).

#### Descrizione componente

Il WCD è un condotto a pareti tubolari o circondato da serpentine, che collega il forno alla camera di sedimentazione (WCD1) e questa al condotto in semplice parete. All'interno del WCD scorre l'acqua di raffreddamento.

#### Processo

Il calore è asportato sia per irraggiamento, sia per convezione grazie all'acqua di raffreddamento che scorre nei tubi.

#### Idealità

Il raffreddamento voluto dovrebbe essere ottenuto con il tratto di tubo più corto possibile, che comporterebbe minori perdite di carico e minori costi della tubazione stessa.



#### 4. Linea di trattamento e depurazione dei fumi da EAF

##### Problematiche

La lunghezza della tubazione deve essere stimata in base alla temperatura finale dei fumi e all'efficienza di raffreddamento del componente. Inoltre si possono verificare depositi o incrostazioni che diminuiscono l'efficienza dello scambio termico e aumentano le perdite di carico.

##### *4.1.1.4 Camera di sedimentazione*

La camera di sedimentazione (settling chamber) viene anche chiamata cassa polveri (drop Out Box) o camera di post combustione (post-combustion chamber).

##### Obiettivo

- Completare la combustione del CO e dell'H<sub>2</sub> e di possibili gas combustibili, se i rottami sono ricchi di oli, grassi, vernici;
- Separare le polveri più grossolane, talvolta veri e propri pezzi di metallo;
- Inoltre la camera, mediante un adeguato tempo di permanenza, regime turbolento e temperature dei fumi, contribuisce alla riduzione della diossina (PCDD/F)<sup>22</sup>.

##### Descrizione componente

La camera è realizzata in cemento con rivestimento refrattario ed è chiusa da una volta raffreddata ad acqua. È dotata di un bruciatore per completare i processi di combustione e presenta dei portali per permettere l'entrata dei mezzi di rimozione delle polveri.

##### Processo

I fumi passano all'interno della camera nella quale vengono bruciati e/o riscaldati tramite un bruciatore supplementare. Le scorie e le polveri più grandi si separano dai fumi e si depositano sul fondo della camera da cui vengono estratte.

##### Idealità

Tutte le reazioni di combustione si completano all'interno della camera.

##### Problematiche

I fumi che attraversano la camera sono caldi e le polveri possono essere incandescenti; il rischio di scintille ed esplosioni è alto.

##### *4.1.1.5 Condotti in semplice parete*

Veicolano i fumi primari a temperature inferiori ai 550-600 °C nei sistemi di raffreddamento (FDC/NDC, QT). Sono generalmente realizzati in acciaio COR-TEN®, in grado di sopportare gli stress termici, senza necessità di sistemi di raffreddamento ausiliari.

---

<sup>22</sup> Descrizione del problema di emissione diossine al paragrafo 3.5.3.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 4.1.1.6 Scambiatore a convezione: FDC/NDC

Questo sistema viene utilizzato in alternativa alla quenching tower descritta al paragrafo seguente (4.1.1.7).

##### Obiettivo

- Raffreddare i fumi fino a una temperatura di 200-300 °C;
- Inoltre, contribuisce a limitare la rigenerazione di diossina (PCDD/F)<sup>23</sup>.

##### Descrizione componente

Il sistema è posto a valle della settling chamber con cui è collegato dal WCD e dal condotto in semplice parete e prima della miscelazione coi fumi secondari. Si tratta di scambiatori a pacco tubiero o a piastre a flussi incrociati e possono essere di due tipi: a convezione naturale (Natural Draught Cooler, NDC) o forzata (Forced Draught Cooler, FDC). La scelta di ricorrere a questi scambiatori è dettata esclusivamente da esigenze economiche, più che funzionali.

- NDC: l'efficacia dello scambio termico è garantita prevalentemente dalla superficie e dalla temperatura dell'aria ambiente; soluzione preferibile.
- FDC: l'efficienza dello scambio termico è aumentata con l'utilizzo di ventilatori in modo che la direzione dei fumi caldi e quella dell'aria ambiente formino un angolo di 90 °C.

##### Processo

Il flusso dei fumi cede calore per convezione a una corrente d'aria a temperatura ambiente.

##### Idealità

Abbassamento rapido della temperatura e basse perdite di carico.

##### Problematiche

Questa soluzione non garantisce un abbassamento sufficientemente rapido della temperatura per cui si presenta il problema della rigenerazione della diossina; è necessario dunque prevedere l'iniezione a valle di un materiale assorbente (in genere coke di lignite) che favorisce l'aggregazione delle diossine facilitandone la cattura da parte dei filtri<sup>24</sup>.

#### 4.1.1.7 Quenching Tower (QT)

Questo sistema viene utilizzato in alternativa agli scambiatori FDC/NDC precedentemente descritti.

##### Obiettivo

- Raffreddare i fumi fino a una temperatura di 200-300 °C;

---

<sup>23</sup> Descrizione del problema di emissione diossine al paragrafo 3.5.3.

<sup>24</sup> Descrizione del problema di emissione diossine al paragrafo 3.5.3.

#### 4. Linea di trattamento e depurazione dei fumi da EAF

- Inoltre, contribuisce a limitare la rigenerazione di diossina (PCDD/F)<sup>25</sup>.

##### Descrizione componente

Il sistema è posto a valle della settling chamber con cui è collegato dal WCD e dal condotto in semplice parete e prima della miscelazione coi fumi secondari. La QT è una torre verticale in acciaio di forma cilindrica, con diametro compreso tra i 3,2 e i 6 m e con altezza compresa tra i 10 e i 15 m. Un insieme di lance con ugelli spruzzatori è posto intorno alla torre nella parte inferiore di essa. Le lance utilizzano aria compressa per spruzzare nel gas caldo acqua nebulizzata. La superficie di scambio fumi acqua è grande e i tempi di evaporazione ridottissimi.

##### Processo

I gas caldi entrano dalla parte inferiore della QT passando attraverso un'ampia camera centrale dove si ha una diminuzione della velocità. Il raffreddamento del gas caldo avviene mediante l'evaporazione di acqua nebulizzata iniettata nella parte inferiore mediante apposite lance. Il gas raffreddato esce dalla sommità della QT ed entra in un altro condotto per essere poi miscelato con i fumi secondari.

##### Idealità

La concentrazione di diossina in uscita è inferiore ai limiti normativi.

##### Problematiche

Possibilità di condensazione, che riduce la durata e l'efficienza dei filtri a maniche posti a valle. La QT risulta inefficiente in termini di rispetto dei livelli di emissione delle diossine. Il problema può essere risolto come nel caso degli scambiatori, iniettando nei fumi del materiale assorbente<sup>26</sup>.

#### **4.1.2 Elementi del circuito secondario**

##### *4.1.2.1 Cappa di aspirazione: Canopy Hood, Doghouse, Elephant house*

##### Obiettivo

Captare e incanalare le emissioni secondarie provenienti dal forno.

##### Descrizione componente

La cappa principale (canopy hood) è posta sopra l'EAF ed è caratterizzata da una sezione di apertura nella parte inferiore e da un volume che ne caratterizza la capacità di contenimento e che "immagazzina" i fumi secondari.

---

<sup>25</sup> Descrizione del problema di emissione diossine al paragrafo 3.5.3.

<sup>26</sup> Descrizione del problema di emissione diossine al paragrafo 3.5.3.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### Processo

I fumi secondari provenienti dal forno (fase carica/spillaggio o perdite durante la fusione) e dalla siviera formano un flusso ascensionale captato dalla cappa.

#### Idealità

La cappa capta ed evacua i fumi in modo graduale, ma veloce.

#### Problematiche

Lo sviluppo dei fumi durante la carica è repentino, tale da non consentire alla portata della canopy hood di evacuarli immediatamente. Il volume del capannone nella zona forno può rappresentare un polmone di contenimento momentaneo. Questa fase di “ristagno” dei fumi rischia di rendere l’ambiente di lavoro troppo polveroso. L’efficienza della cappa viene spesso diminuita da correnti d’aria trasversali che deviano il flusso ascensionale.

In alternativa alla canopy hood si possono avere dei sistemi di captazione più efficaci:

- Doghouse: consiste nella predisposizione di pannelli metallici servo-assistiti che incapsulano la zona perimetrale del forno limitando le emissioni nell’ambiente interno al capannone industriale;
- Elephant house: prevede la completa chiusura della zona di lavoro mediante pannelli metallici servo-assistiti che incapsulano totalmente il forno e la cappa di aspirazione, garantendo la massima efficienza di captazione dei fumi secondari.

#### *4.1.2.2 Cappe secondarie di ripresa*

#### Obiettivo

Captare le emissioni secondarie che la cappa principale non riesce a raccogliere, come quelle provenienti dalla siviera, dalla colata o dalla zona di preriscaldamento delle ceste (se presente).

#### Descrizione componente

Le cappe secondarie sono geometricamente simili a quella principale, ma hanno dimensioni molto inferiori.

#### Processo

Le cappe saranno del tipo catturante, superiori o laterali, ciascuna servita da un piccolo ventilatore, dato che non si ha un flusso ascensionale come quello che si forma sopra il forno.

#### Idealità

La cappa riesce a evacuare i fumi a mano a mano che si formano.

#### Problematiche

Il dimensionamento risulta anche in questo caso difficile. Minori sono i problemi di polverosità (minor concentrazione di polveri e granulometria inferiore).

#### 4. Linea di trattamento e depurazione dei fumi da EAF

##### 4.1.2.3 *Miscelazione dei gas secondari*

###### Obiettivo

Immettere in un'unica linea tutte le emissioni secondarie, cioè tutte quelle non provenienti dal quarto foro.

###### Descrizione componente

Semplice giunto a T o a Y tra i condotti.

###### Processo

In uno o più punti avviene il miscelamento adiabatico tra il flusso proveniente dalla cappa, di portata maggiore, e i flussi provenienti dal forno siviera, dal reparto colata, ecc.

###### Idealità

Perdite di carico nulle.

###### Problematiche

Nessuna in particolare se non il fatto che il giunto è sede di perdite di carico concentrate.

##### 4.1.3 *Elementi comuni della linea fumi*

###### 4.1.3.1 *Miscelazione dei gas primari e secondari*

###### Obiettivo

- Avere un'unica linea per il trasporto delle emissioni e raffreddare i gas primari a una temperatura conveniente per i filtri;
- Contribuisce inoltre a regolare il flusso dei fumi primari in modo da non asportare troppo calore nelle fasi in cui la generazione è limitata.
- In alcuni casi, può bastare al raffreddamento dei fumi per limitare o la rigenerazione della diossina (PCDD/F)<sup>27</sup>.

###### Descrizione componente

Semplice giunto a T o a Y tra i condotti (*Dec Dumper*)

###### Processo

Quando le due correnti si incontrano avviene un miscelamento adiabatico tra due flussi diversi: i gas secondari hanno portate normali 4-5 volte quelle superiori ai primari e temperature massime intorno a 80 °C, mentre i gas primari hanno una temperatura di circa 300 °C e una portata normale inferiore. Dopo il miscelamento si ottiene una corrente alla temperatura di 100-130 °C.

---

<sup>27</sup> Descrizione del problema di emissione diossine al paragrafo 3.5.3.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### Idealità

Perdite di carico nulle.

### Problematiche

Il punto di miscelazione costituisce una concentrazione di perdita di carico. Il problema maggiore è in quale punto della linea fumi effettuare la miscelazione delle due correnti: infatti il punto di miscelazione deve essere a valle dei componenti necessari alla sola corrente primaria (cassa polveri, torre di quenching, ecc.), ma è bene realizzarlo più lontano possibile dai filtri e dal ciclone in modo da minimizzare la portata reale totale. Talvolta si preferisce mantenere separati i due circuiti fino all'espulsione in atmosfera.

#### 4.1.3.2 *Ciclone*

### Obiettivo

- Separare le polveri più grossolane (con diametri anche superiori al millimetro);
- Previene inoltre che particelle incandescenti arrivino nel banco filtri col rischio di scintille.

### Descrizione componente

Posizionato a monte del banco filtri, il ciclone è costituito da un corpo cilindrico con fondo tronco-conico che funge da tramoggia, mentre un cilindro di diametro inferiore esce dall'alto del ciclone, con la funzione di estrarre i gas "depolverati". I gas entrano tangenzialmente nella parte superiore del ciclone.

### Processo

Tramite ingressi tangenziali o alette sagomate viene impresso ai fumi un moto circolare, che sviluppa sulle particelle di polvere delle forze centrifughe. Le particelle grandi vanno così a impattare sulle superfici laterali perdendo la loro energia cinetica e cadendo sul fondo per azione della gravità.

### Idealità.

Alta efficienza di separazione per le particelle di grandi dimensioni e buona per quelle di medio-piccole dimensioni: in questo modo può essere inserito a valle un filtro di dimensioni minori. Basse perdite di carico.

### Problematiche

I cicloni basano la loro efficienza sulla velocità dei gas. In un impianto EAF al ciclone arrivano fumi a velocità molto elevate (40-60 m/s) il che da un lato è un vantaggio perché aumenta l'efficienza di separazione, dall'altro comporta elevate perdite di carico. Inoltre la portata dei fumi non è costante e il ciclone ne risente fortemente. È infine soggetto a erosione, abrasione e intasamento.

#### 4. Linea di trattamento e depurazione dei fumi da EAF

##### 4.1.3.3 Filtri a maniche (Bag house)

I filtri a maniche (bag house) costituiscono il sistema di abbattimento polveri principalmente utilizzato.

##### Obiettivo

Separare le particelle di polvere dalla corrente gassosa per rilasciare nell'ambiente emissioni "pulite".

##### Descrizione componente

La bag house si trova nella parte della linea fumi dove convergono sia i primari, sia i secondari. È costituita da camere parallelepipedi, denominate moduli o compartimenti, entro i quali sono disposte, fissate a una piastra, le maniche filtranti, solitamente in poliestere resistente al rischio scintille o rivestito in feltro PTFE. Il numero di moduli e maniche dipende dalle condizioni operative, in particolare dalle portate di effluenti gassosi da trattare e loro temperatura. Ogni modulo può essere isolato dal resto della bag house, in modo tale che durante le operazioni di pulizia non sia necessario interrompere l'attività fusoria (sistemi *on-line*). I meccanismi di pulizia possono essere:

- Meccanico: per scuotimento o vibrazione delle maniche. Si utilizza solo con filtri a captazione interna, ma sollecita molto le fibre;
- Corrente inversa: si fanno passare gas depolverati in senso inverso a quello di marcia;
- Pulse-jet: utilizzabile solo con maniche a captazione esterna. Non richiede l'esclusione della manica dal flusso e non è traumatico per i tessuti. All'interno di ciascuna manica viene sparato un getto d'aria a 6-7 bar, il quale genera un'onda di pressione che la fa bruscamente espandere e determina il distacco del particolato accumulato su di essa.

##### Processo

I gas da depurare passano attraverso i filtri di tessuto con una velocità dell'ordine di 1,5 m/s. La filtrazione avviene per effetto combinato di tre meccanismi:

3. Impatto inerziale: le particelle solide trascinate dal gas, a causa della loro massa, non seguono la traiettoria del gas quando questo curva trovando un ostacolo e vanno a impattare sull'ostacolo stesso (prevalentemente particelle  $> 1 \mu\text{m}$ );
4. Intercettazione: le particelle solide seguono la traiettoria del gas attorno all'ostacolo, ma si trovano a distanze dall'ostacolo inferiori al loro raggio e vengono intercettate (prevalentemente particelle di 0,2-1  $\mu\text{m}$ );
5. Diffusione: le particelle urtano tra loro deviando dalla loro traiettoria e andando a urtare l'ostacolo.

Periodicamente si provvede alla pulizia dei tessuti facendo precipitare sul fondo il particolato accumulato sulle maniche.

##### Idealità

Alte efficienze di separazione e basse perdite di carico.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### Problematiche

La temperatura dei gas in ingresso deve essere relativamente bassa, inferiore a 150 °C, ma deve comunque essere superiore a quella di rugiada; se si formasse della condensa sulle maniche, non solo aumenterebbe la resistenza al passaggio dell'aria e di conseguenza le perdite di carico, ma si scioglierebbero anche eventuali composti acidi causa di corrosione del componente. È necessario, quindi, un controllo rigoroso della temperatura e dell'umidità dei gas in ingresso. Si riscontra anche il pericolo di incendio per polveri incandescenti. I costi di gestione sono elevati per impianti di grosse dimensioni.

#### 4.1.3.4 Altri sistemi filtranti: Elettrofiltri (ESP) e scrub Venturi a umido

Elettrofiltri (Electrostatic precipitator, ESP). La separazione delle particelle avviene per azione di forze elettriche sviluppate all'interno dell'elettrofiltro, che si ottengono mantenendo elevate le differenze di potenziale (30-100 kV) tra due elettrodi. Gli ESP sono utilizzati in pochi impianti e risultano molto meno efficienti della bag house [6, p. 461].

Scrubber Venturi, a umido. È costituito da un condotto convergente-divergente (Venturi) in cui viene immessa acqua che accelerata produce particelle finissime che inglobano quelle di polveri. Questo sistema è poco utilizzato negli EAF visti gli alti costi operativi legati alle perdite di carico, senza tener conto del trattamento dei fanghi residui e dell'umidità non trascurabile che genera al camino il cosiddetto "pennacchio bianco".

#### 4.1.3.5 Ventilatori

##### Obiettivo

Garantire una certa depressione  $\Delta p$  lungo la linea, tale da compensare in ogni momento le perdite di carico.

##### Descrizione componente

I ventilatori, solitamente centrifughi, devono lavorare con portate molto grandi, dell'ordine delle centinaia di migliaia di Nm<sup>3</sup>/h. Oltre a questi ci sono i motori elettrici che li muovono, gli inverter per la regolazione della velocità e delle sonde che rivelano lungo la linea la pressione in modo da comandare la regolazione.

##### Processo

Nei ventilatori centrifughi la depressione creata al centro della rotazione di una girante genera un flusso d'aria che entra nel ventilatore in direzione assiale ed esce in direzione radiale. Un diffusore di tipo a chiocciola funge da collettore di flusso in uscita e permette di aumentare la pressione statica del ventilatore.



#### 4. Linea di trattamento e depurazione dei fumi da EAF

##### Idealità

Le potenze elettriche assorbite sono le minime, ma tali da garantire un funzionamento efficiente dell'impianto.

##### Problematiche

È difficile effettuare una corretta regolazione, ovvero tale da minimizzare le potenze elettriche assorbite.

##### 4.1.3.6 Camino

##### Obiettivo

Disperdere in atmosfera le emissioni dell'impianto.

##### Descrizione componente

Il camino è una canna fumaria realizzata in cemento o in acciaio posto al termine della linea fumi.

##### Processo

L'espulsione dei fumi in atmosfera avviene grazie alla differenza di pressione che si genera all'interno del camino.

##### Idealità

Gli effluenti vengono dispersi e diluiti in aria in modo da evitare ricadute di inquinanti nella zona dell'impianto e in quelle limitrofe.

##### Problematiche

Una corretta dispersione dipende sia dal camino, sia dalle condizioni meteo-climatiche della zona in cui è inserito l'impianto.

##### 4.1.4 Preriscaldamento rottame

Il preriscaldamento del rottame è stato comunemente adottato da molti impianti negli ultimi 30 anni. Questa tecnica consente di riscaldare il rottame prima del suo ingresso in forno dai fumi in uscita dallo stesso; il preriscaldamento può avvenire a bassa temperatura, mediamente 300-400 °C, con sistemi di carica continua (Consteel®) e ad alta temperatura, 800-1000 °C, con sistemi di carica discontinua (es, ceste di carico, Shaft Furnace). Si ottengono numerosi vantaggi soprattutto in termini di riduzione della durata del ciclo TTT e quindi del consumo energetico. Si rimanda al paragrafo 5.5.1 per una più ampia descrizione delle varie tipologie di preriscaldamento e del recupero energetico effettuato.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## **4.2 CONFIGURAZIONI TIPICHE DI IMPIANTO E LIVELLI DI EMISSIONE: BAT CONCLUSIONS**

Le BAT (Best Available Techniques) rappresentano lo stadio più efficiente e avanzato delle tecniche o tecnologie correnti che permettano di evitare o ridurre i valori delle emissioni delle attività produttive e conseguente impatto ambientale e il BREF (Best Available Techniques Reference Document) ne rappresenta il documento di riferimento.

Vengono nel seguito riassunte le configurazioni tipiche utilizzate nella linea fumi in accordo a quanto riportato nel nuovo BREF per gli impianti elettrosiderurgici (*“Best Available Techniques Reference Document for Iron and Steel Production”*), e alla nuova direttiva europea 2010/75/UE, meglio nota come IED (Industrial Emission Directive) in materia di emissioni inquinanti ambientali dalle attività industriali ad alto potenziale inquinante: tale direttiva include la vecchia IPPC 96/61/CE .

La vera novità della Direttiva IED per le BAT è rappresentata dalle BAT Conclusions e dalla loro coerenza a livello comunitario nell’ambito dei processi autorizzativi; derivano dai contenuti del BREF e consentono un approccio diretto nell’identificazione delle BAT e delle prestazioni ambientali associate (BAT-AEL, BAT Associated Emission Level).

Il BREF è già vigente, senza bisogno di alcun recepimento da parte delle legislazioni nazionali, mentre allo stato attuale sono stati già adottati dalla Commissione le decisioni sulle BAT Conclusion per l’industria del vetro e per la produzione dell’acciaio: *“2012/135/UE: Decisione di esecuzione della Commissione, del 28 febbraio 2012, che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT) per la produzione di ferro e acciaio ai sensi della Direttiva IED 2010/75/EU del Parlamento Europeo e del Consiglio relativa alle emissioni industriali.”*

L’Articolo 135, recante la decisione, è entrato in vigore a seguito della pubblicazione l’8 marzo 2012 sulla Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea.

### **4.2.1 Configurazione tipica per aspirazione fumi secondo le BAT**

Le tecniche di captazione dei fumi primari e secondari principalmente utilizzate, in accordo al nuovo BREF, sono:

- Combinazione dell’estrazione al quarto (o secondo) foro e cappa di aspirazione;
- Estrazione diretta e doghouse;
- Estrazione diretta e chiusura completa dell’edificio.

L’efficienza del sistema complessivo di aspirazione fumi associata alle BAT è del 98%.

#### 4. Linea di trattamento e depurazione dei fumi da EAF

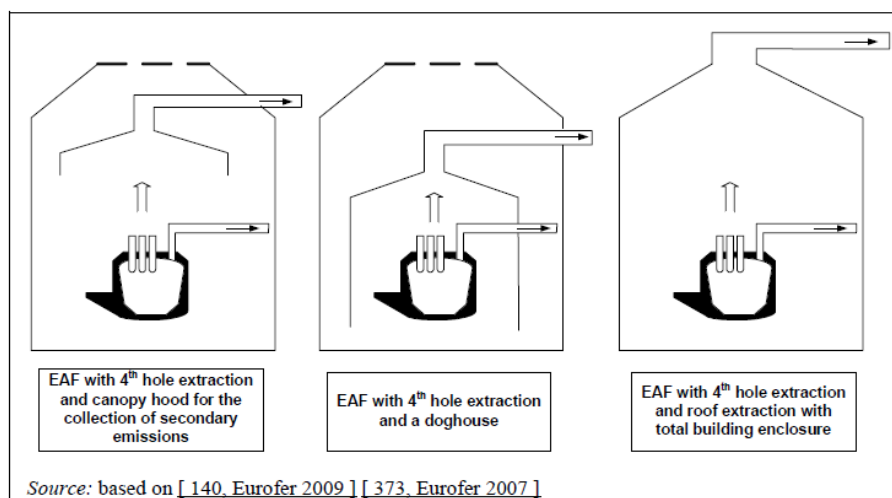


Figura 26 - Tre sistemi principali di aspirazione fumi secondo le BAT. Fonte: [6, p. 431].

#### 4.2.2 Configurazione tipica per abbattimento polveri secondo le BAT

Un primo abbattimento delle polveri viene effettuato nella settling chamber, dove vengono fatte cadere le particelle più pesanti e grossolane.

L'abbattimento polveri da EAF vero e proprio è la bag house che è il sistema più comunemente utilizzato dato che risulta molto efficiente nel catturare gli aggregati di particelle inquinanti, come i metalli pesanti, ma anche inquinanti come le diossine PCDD/F, soprattutto se vengono immessi degli agenti assorbenti (si veda paragrafo 3.5.3).

A monte del banco filtri viene spesso installato il ciclone che garantisce un'ulteriore separazione della polvere dai fumi, ma soprattutto previene l'arrivo di particelle incandescenti nei filtri.

Nelle BAT Conclusions si riporta che per l'abbattimento della polvere (compresi i sistemi di preriscaldamento, carica, fusione, spillaggio, LF e metallurgia secondaria) sono necessari:

- un efficiente sistema di estrazione dei fumi utilizzando una delle tecniche come riportate al paragrafo 4.2.1

e

- l'utilizzo del banco filtri.

Il livello di emissione delle polveri associato alle BAT risulta  $< 5 \text{ mg/Nm}^3$ , determinato come valore medio giornaliero, mentre quello associato al mercurio è  $< 0,05 \text{ mg/Nm}^3$ , determinato come media del periodo di campionatura (misurazioni discontinue, campionature a spot per almeno 4 ore).

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 4.2.3 Configurazione tipica per abbattimento diossine PCDD/F

Per quanto descritto al paragrafo 3.5.3 le diossine si generano nel forno, ma vengono quasi del tutto distrutte dalle alte temperature, ma possono riformarsi nella linea di trattamento dei fumi secondo il processo di *De Novo Synthesis*.

Innanzitutto, per limitare le emissioni di diossina è opportuno effettuare una efficace post-combustione facendo permanere i fumi nella settling chamber con un adeguato livello di temperatura e regime turbolento e per un tempo sufficiente.

Per evitare il fenomeno della riformazione delle diossine è necessario invece operare un brusco raffreddamento dei fumi provenienti dall'aspirazione primaria. In alcuni casi potrebbe bastare il miscelamento coi gas secondari per diluire la temperatura, ma generalmente si ricorre alla QT. Qualora l'effetto della quenching non sia sufficiente a ridurre la concentrazione di diossina entro i limiti previsti o nel caso in cui il raffreddamento dei fumi venga effettuato con uno scambiatore (tipicamente a convezione forzata FDC) allora è necessario disporre di un sistema d'iniezione di materiale assorbente posto tra il ciclone e il filtro. Questo materiale è generalmente coke di lignite porosa macinata molto fine e caratterizzata da un elevato rapporto superficie/volume; favorisce l'aggregazione delle diossine facilitandone la cattura da parte del filtro posto a valle.

Nelle BAT Conclusions si riporta che un altro obiettivo fondamentale dei sistemi di abbattimento fumi è quello di prevenire e ridurre la formazione delle diossine PCDD/F e degli idrocarburi policlorobifenili PCB o loro precursori utilizzando:

- una delle tecniche sopra esposte (post-combustione, QT, materiale assorbente)

oppure

- una combinazione di esse in comunione con l'utilizzo della bag hose.

I livello di emissione di diossine associato alle BAT è  $< 0,1 \text{ ng I-TEQ/Nm}^3$ , basato su un campione random di 6-8 ore in regime stazionario.

#### 4. Linea di trattamento e depurazione dei fumi da EAF

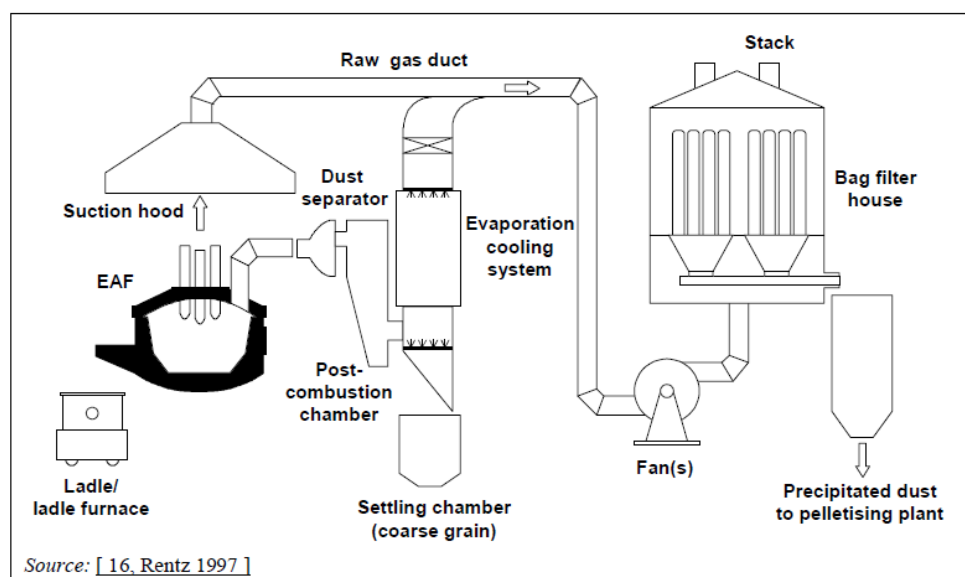


Figura 27 - Esempio di riduzione delle diossine da EAF mediante post combustione dei fumi, successivo repentino raffreddamento e banco filtri. Fonte: [6, p. 464].

#### 4.2.4 Livelli tipici di emissione dei fumi

La Tabella 9 riporta tipici valori dei contenuti dei fumi a valle dei sistemi di abbattimento in base ai dati forniti dal BREF in ambito siderurgico.

Tabella 9 - Concentrazione delle emissioni da EAF dopo i sistemi di abbattimento [6, p. 433].

Parameter		Bag filter	Electrostatic precipitator <sup>(1)</sup>	Unit
Dust		0.35 – 3.4	1.8	mg/Nm <sup>3</sup>
CO		88 – 256		mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>		0.97 – 70		mg/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>x</sub>		8 – 17		mg/Nm <sup>3</sup>
Metals:	Hg	0.016 – 0.019	<0.0003	mg/Nm <sup>3</sup>
	Total (including Sb, Pb, Cr, CN, F, Cu, Mn, V, Se, Te, Ni, Co, Sn)	0.006 – 0.022	0.01 – 0.07	mg/Nm <sup>3</sup>
	Cr (except Cr (VI))	0.013		
	Mn	0.036		
	Ni	0.003		
PAH		<0.00001	<0.001	mg/Nm <sup>3</sup>
PCDD/F		0.0015 – 0.1 <sup>(2)</sup>		ng/Nm <sup>3</sup>
HF		0.085 – 0.2		mg/Nm <sup>3</sup>
HCl		3 – 5.4		mg/Nm <sup>3</sup>
Cl <sub>2</sub>		<3		mg/Nm <sup>3</sup>

<sup>(1)</sup> Values relate to one German stainless steel plant.  
<sup>(2)</sup> Upper end of the range relates to measurements carried out in 1997.  
 NB: — Values are annual averages and relate to the central dedusting system.  
 — PAH contain benzo(a)pyrene and dibenzo-(a,h)-anthracene.  
 Source: [244, Plickert 2007] [277, Wiesenberger 2007].



# 5 RECUPERO ENERGETICO DA FORNO ELETTRICO AD ARCO

## 5.1 IL CONTESTO ATTUALE

Il tema del recupero energetico si è rafforzato notevolmente negli ultimi anni accompagnato di pari passo dal ricorso alle fonti rinnovabili. Questo aspetto è legato a diversi fattori:

- Il crescente aumento del fabbisogno energetico, specie in relazione ai paesi emergenti altamente energivori;
- L'aumento del costo dei vettori energetici;
- L'inquinamento ambientale e le relative normative sempre più stringenti, specie in quei paesi, che, come l'Unione Europea, hanno aderito al protocollo di Kyoto per la riduzione delle emissioni inquinanti, CO<sub>2</sub> in particolare<sup>28</sup>;
- Gli incentivi economici offerti dalle varie nazioni e dall'UE, come gli Emission Trading, ET,<sup>29</sup> in tema di limitazioni dei gas a effetto serra e i Titoli di Efficienza Energetica, TEE,<sup>30</sup> in tema di efficienza energetica, ovvero di riduzione dell'utilizzo di energia a parità di livello di attività o servizio economico;
- A questo si può aggiungere il tema alquanto dibattuto della stima delle riserve di fonti primarie.

---

<sup>28</sup> Il protocollo di Kyoto è stato firmato nel 1997 da oltre 160 Paesi in occasione della Conferenza COP3 della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) e il riscaldamento globale, ma è entrato in vigore solo il 16 febbraio 2005. È uno dei più importanti strumenti giuridici internazionali volti a combattere i cambiamenti climatici. Esso contiene gli impegni dei paesi industrializzati a ridurre le emissioni di alcuni gas a effetto serra, responsabili del riscaldamento del pianeta. Le emissioni totali dei paesi sviluppati devono essere ridotte almeno del 5 % nel periodo 2008-2012 rispetto ai livelli del 1990. Con l'accordo Doha l'estensione del protocollo si è prolungata fino al 2020 anziché alla fine del 2012. Il protocollo di Kyoto prevede inoltre, per i Paesi aderenti, la possibilità di servirsi di un sistema di meccanismi flessibili per l'acquisizione di crediti di emissioni di CO<sub>2</sub>: Clean Development Mechanism (CDM); Joint Implementation (JI); Emission Trading (ET) [89].

<sup>29</sup> Nella gestione delle attività di progetto del Protocollo di Kyoto, la Direttiva 2003/87/CE, Emission Trading, istituisce un sistema per lo scambio di quote di emissioni dei gas a effetto serra nell'UE. Il sistema si articola attualmente in tre periodi distinti: 2005-2007; 2008-2012; 2013-2020. Mentre i primi due periodi sono regolati dalla Direttiva 2003/87/CE nella sua versione originaria, il terzo periodo sarà regolato dalle disposizioni recentemente introdotte dalla nuova Direttiva 2009/29/CE. Gli impianti di produzione acciaio (sia a ciclo integrale, sia a forno elettrico) sono soggetti agli obblighi imposti dalla normativa Emission Trading fin dal 2005. A partire dal 2008 il campo di applicazione è stato esteso anche alle attività di trasformazione dell'acciaio (ad esempio, laminazione a caldo) integrate nei siti di produzione, mentre dal 2013 in avanti tutte le attività di lavorazione e trasformazione siderurgiche (con potenza termica complessiva superiore ai 20 MW) rientreranno nel sistema [90].

<sup>30</sup> In base alla Direttiva dell'UE 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici, i TEE rappresentano un obbligo di risparmi annuali che viene definito a livello nazionale e ripartito in capo a diversi soggetti, che devono produrre e presentare anno per anno un certo target di risparmi [91].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Il recupero di energia si traduce nell'efficienza dei processi produttivi con la riduzione dei costi di esercizio, l'aumento della produttività e del rendimento d'impianto, il minor inquinamento. I numerosi vantaggi di tipo operativo, energetico, economico, ambientale e anche sociale a esso legati sono fondamentali al giorno d'oggi; il recupero è divenuto ormai una pratica comunemente adottata in molti impianti sia di nuova generazione, sia preesistenti anche per essere competitivi sul mercato, soprattutto nei confronti dei paesi in via di sviluppo che hanno legislature carenti dal punto di vista ambientale e costi dell'energia inferiori.

Il settore industriale, in particolare quello ad alta intensità energetica (quali cementifici, vetrerie, fonderie, altiforni, acciaierie, cartiere, laterizi) rappresenta il principale campo di intervento per operare il recupero energetico: i processi industriali utilizzano, infatti, grandi quantità di energia e spesso solo una piccola parte di essa è necessaria per la realizzazione del prodotto finale, mentre una considerevole parte viene dissipata.

Considerando i dati forniti dall'International Energy Agency (IEA)<sup>31</sup>, il settore siderurgico è il secondo maggior consumatore di energia (circa 24 EJ nel 2006) e il primo in termini di emissioni di gas serra (emissioni dirette di 2.16 Gt nel 2006). Anche se recentemente si sono raggiunti notevoli miglioramenti, questo settore possiede un potenziale tecnico per ridurre ulteriormente di un 20% questi fattori, risparmiando complessivamente 4.7 EJ di energia e 350 Mt di CO<sub>2</sub> [37].

È dunque in questo contesto che si inserisce l'analisi dei forni elettrici e degli off-gas da questi emessi proponendo un nuovo apparato di recupero.

## **5.2 FONTI DI RECUPERO DI CALORE DAL PROCESSO PRODUTTIVO DELL'EAF**

Le fonti di recupero da EAF sono principalmente:

- Acqua di raffreddamento delle pareti della camera di sedimentazione e dei vari condotti raffreddati: le temperature non sono né idonee, né convenienti per effettuare un recupero;
- La scoria metallica in uscita dal forno: il recupero è minimo e molto difficoltoso;
- Gas di scarico o "off-gas": come descritto nel Capitolo 3, i fumi esausti durante il processo dell'EAF presentano portate e temperature medie molto alte, anche se altrettanto variabili nel tempo e con una elevata percentuale di polverosità; nel contempo possiedono un rilevante contenuto entalpico.

L'esame del recupero si concentra dunque sugli off-gas dell'EAF.

---

<sup>31</sup> L'International Energy Agency, IEA, è un'organizzazione autonoma che lavora per garantire un'energia affidabile, accessibile e pulita ai suoi 28 paesi membri e non solo. Le quattro aree principali di intervento dell'IEA sono: la sicurezza energetica, lo sviluppo economico, la consapevolezza ambientale, e l'impegno in tutto il mondo.



## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

Nel seguito viene fornita un'analisi sul consumo energetico dei forni elettrici ad arco e sul contenuto energetico recuperabile dai fumi; vengono anche evidenziate le problematiche e altresì i vantaggi legati a tale recupero e lo stato dell'arte in materia.

### 5.3 CONSUMI ENERGETICI DELL' EAF E POTENZIALITÀ DEL RECUPERO

#### 5.3.1 Valutazione energetica ed exergetica del processo di fusione e contenuto entalpico dei fumi

Una prima valutazione del contenuto entalpico dei fumi viene fatta, in termini quantitativi, analizzando i flussi energetici che caratterizzano il processo di fusione di un forno elettrico ad arco. Tra la letteratura esaminata, si riporta un estratto di uno studio condotto da Kirshen et al. [22] in cui vengono quantificati questi flussi da un esame di 70 bilanci energetici di diversi forni attualmente in uso con rendimenti compresi tra il 40% e il 75%.

Tabella 10 - Flussi energetici in input e output da forni elettrici ad arco. Adattato da: [22].

FORNO		INPUT					OUTPUT				
N	Cap.tà	Energia elettrica	Reazioni esotermiche	Combustibili gassosi	Preriscald. rottame	TOT.	Acciaio	Scoria	Off-gas	Raffredd	TOT.
U	[t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]
1	100	541	234	23		798	423	80	168	127	798
2	55	571	155			726	415	59	100	152	726
3	60	408	204	20	51	683	367	68	109	139	683
4	80	560	118			678	382	50	81	165	678
5	100	577	155			732	415	59	33	225	732
6	150	450	199			649	385	35	102	127	649
7		390	170	60	12	632	345	50	170	67	632
8	100	557	233	21		810	427	83	158	142	810
9	115	487	217			704	397	46	127	134	704
10	125	462	94	34	70	660	401	70	48	140	660
11	100	459	295			754	354	62	138	199	754
12	100	413	378			791	354	62	140	235	791
13	100	401	397			798	354	62	141	241	798
14	100	445	341			786	355	47	141	243	786
15	100	423	325	61		809	355	47	141	266	809
16	100	91	249	182	106	628	385	50	68	125	628
17	80	380	195	15		590	388	52	85	65	590
18	100	365	222	33		625	5	431	110	84	625
19	100	287	223	33		606	63	431	97	78	606
20	75	459	230	7		696	362	49	90	195	696
21	75	422	237			659	362	40	105	152	659
22	70	477	187			664	392	62	96	114	664
23	150	312	278	88		678	320	47	229	83	678
24	150	300	377	97		775	355	53	232	135	775

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

FORNO		INPUT					OUTPUT				
N	Cap.tà	Energia elettrica	Reazioni esotermiche	Combustibili gassosi	Preriscald. rottame	TOT.	Acciaio	Scoria	Off-gas	Raffredd	TOT.
U	[t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]
25	55	347	399	86		832	407	26	317	82	832
26		368	348	38		754	380	32	155	187	754
27		482	170	25		677	360	31	160	126	677
28	60	465	215	36		715	408	72	150	86	715
29	60	429	215	21	50	715	408	72	150	86	715
30		450	130	90		670	395	35	122	118	670
31	135	400	190	40		630	385	50	135	50	630
32	135	285	190	50	55	580	385	50	65	70	580
33	92	410	180	40		630	380	50	140	60	630
34	92	340	180	40		560	380	50	58	72	560
35	50	338	198			536	385	46	47	58	536
36		420	190	30		633	365	60	130	78	633
37		580	125			705	365	80	50	210	705
38		400	190	40		630	385	50	135	60	630
39		450	195	60		705	382	76	135	112	705
40		320	236	80		636	382	76	58	120	636
41		260	192	60		512	382	69	21	40	512
42	125	490	123	160		773	386	78	158	40	773
43	145	477	281			758	408	41	128	181	758
44	100	394	335	55		784	388	57	170	181	784
45	140	431	342			773	429	89	127	128	773
46	120	497	343			840	399	46	125	270	840
47	120	343	285	118		746	375	59	116	196	746
48	30	570	204			774	382	118	153	121	774
49	85	494	248	12		754	383	30	79	262	754
50	145	510	271			781	365	36	121	259	781
51	100	485	114			600	342	48	66	144	600
52	100	390	112	119		624	356	50	69	150	624
53	120	487	217			704	397	46	127	135	704
54	60	427	256	15	31	729	381	48	131	169	729
55	120	323	305	119		745	380	52	238	75	745
56		578	85	42		705	402	56	120	127	705
57		557	251			811	430	81	154	146	811
58		410	213	40		665	379	53	160	73	665
59		340	201	47		590	378	47	83	83	590
60		310	202	50		560	381	45	50	84	560
61	40	371	296	63		730	393	105	114	118	730
62	128	413	297	15		725	407	63	137	118	725
63	30	350	417			767	292	46	123	306	767
64	36	372	446	65		883	381	96	167	239	883
65		368	346	38		752	380	32	155	185	752

## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

L'energia in ingresso a un EAF, come anche visto nel paragrafo 2.5.4 è costituita da più fonti:

Tipo	%
<b>Energia elettrica, necessaria per l'attivazione degli elettrodi</b>	<b>40-65</b>
Energia chimica, generata dalle reazioni esotermiche all'interno del forno	20-50
Bruciatori	il 2-10

Secondo lo studio, l'energia richiesta in un processo EAF si attesta attorno a 510 e 880 kWh/t, a seconda delle dimensioni del forno in esame e tra 560 e 680 kWh/t nei forni di ultima generazione [14]. In base alla letteratura esaminata [14]- [19]- [20]- [21], l'energia totale teoricamente necessaria per la fusione e per surriscaldare l'acciaio alla temperatura tipica di spillaggio varia in un range di 350-370 kWh/t. Tuttavia, considerando i rendimenti del processo produttivo, come descritti a inizio paragrafo, il consumo medio della sola energia elettrica si attesta tra 400 e 425 kWh/t secondo le stesse fonti. Ovviamente i dati riportati dipendono fortemente dalle singole operazioni e possono variare considerevolmente l'una dall'altra. Fattori quali la composizione della materia prima, il rateo di potenza in ingresso e operazioni particolari (post-combustione, preriscaldamento dello scrap) possono influenzare il bilanciamento energetico e l'energia richiesta per lo specifico forno.

L'energia in uscita è rappresentata da:

Tipo	%
Entalpia dell'acciaio fuso	45-60
Entalpia della scoria	5-10
Perdite	10-20
<ul style="list-style-type: none"> <li>• circuiti di raffreddamento del forno</li> <li>• condotti di estrazione dei fumi</li> </ul>	
<b>Entalpia degli off-gas, potenzialmente recuperabile</b>	<b>15-35</b>

In base ai dati reperiti in letteratura [6, p. 451], il valore del calore sensibile presente nei fumi è stimabile attorno ai 140 kWh/t di acciaio liquido (d'ora in poi LS, Liquid Steel). Da questo bilancio di energia, riassunto in Figura 28, si evince come una tale energia disponibile a elevata temperatura sia un'ottima opportunità per un recupero energetico. L'utilizzo di tale calore è stato sviluppato nel corso degli ultimi 40 anni e oggi rappresenta un comprovato sistema per ridurre il consumo di energia totale nelle operazioni di un EAF.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

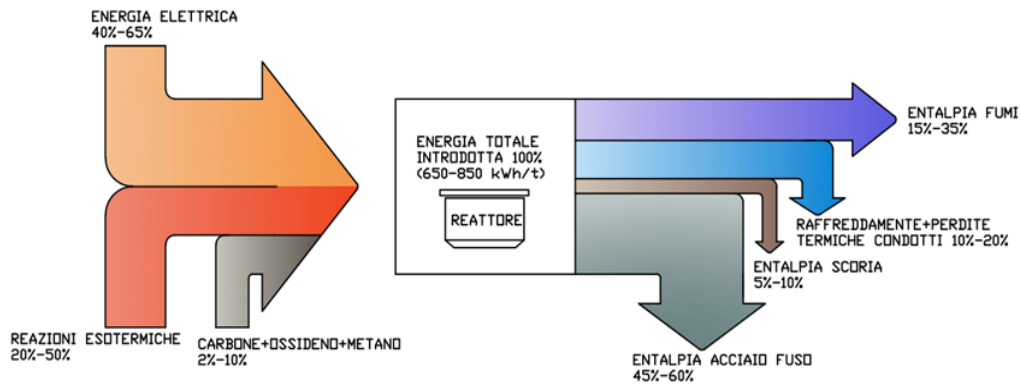


Figura 28 - Bilancio energetico relativo a 70 forni EAF. Adattato da: [22].

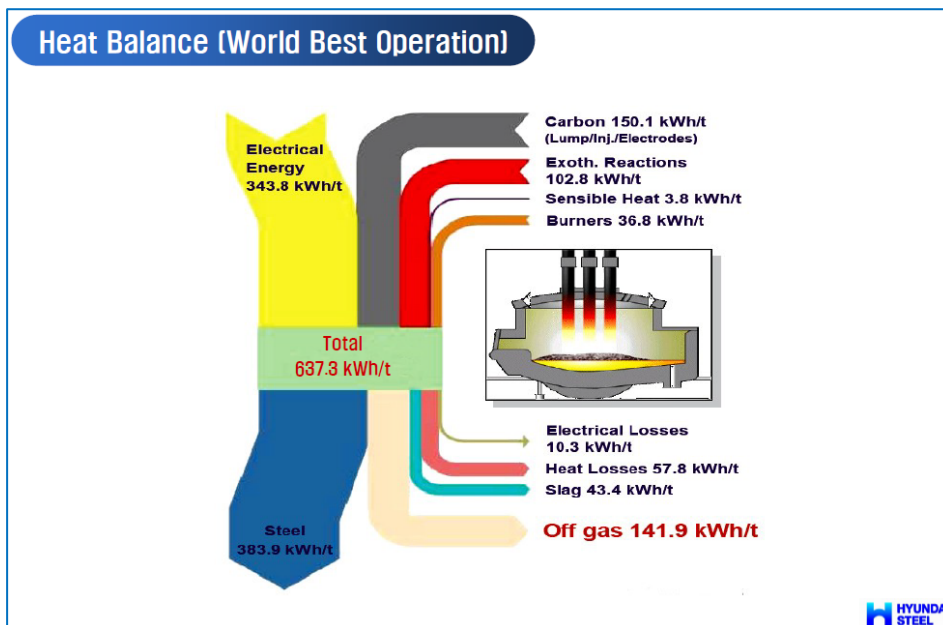


Figura 29 - Esempio di bilancio energetico. Fonte: [15].

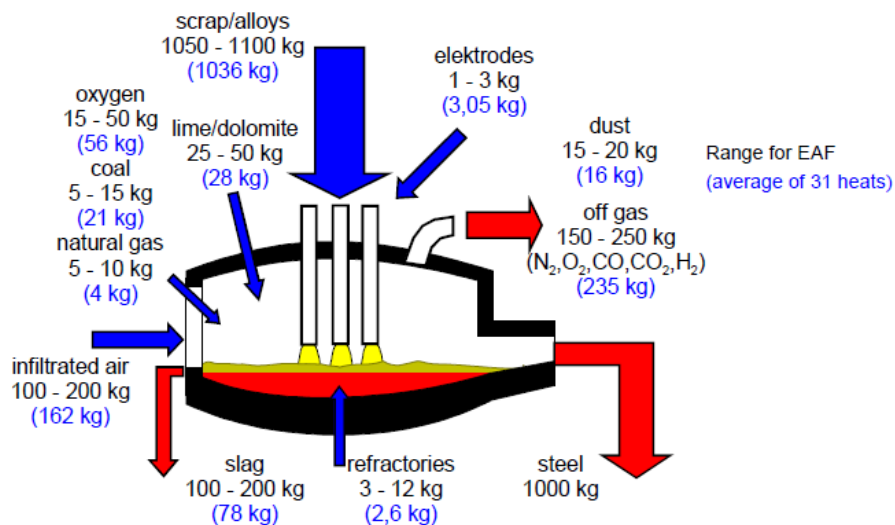


Figura 30 - Bilancio di massa di un EAF. Fonte: [30].

## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

In un bilancio energetico di primo principio si paragonano energie diverse per qualità, compiendo di fatto un errore. Gran parte dell'energia in ingresso al processo fusorio è energia pregiata (chimica ed elettrica), quella in uscita no (energia termica). Il problema deve quindi essere affrontato mediante un'analisi di secondo principio che permette di valutare i flussi energetici da un punto di vista qualitativo e non solo quantitativo. In Tabella 11 - si riportano i risultati del confronto tra un'analisi di tipo energetico e una di tipo exergetico applicate a un impianto EAF con preriscaldamento del rottame. Si nota che gli off-gas in uscita hanno il 21% di energia, ma anche un ottimo 15% di exergia, a testimonianza dell'alta temperatura e perciò dell'alta potenzialità intrinseca per un possibile recupero.

Tabella 11 - Confronto tra analisi energetica ed exergetica di un processo EAF. Fonte: [38].

Inlet energies and exergies			Outlet energies and exergies		
Source	Energy (%)	Exergy (%)	Product	Energy (%)	Exergy (%)
Electrical energy	60	60	Liquid steel	57	41.9
Scrap	7	2.16	Waste gas	21	15.3
Oxy-fuel burner	3	3	Slag	10	7.6
Liquid reaction chemical energy	30	30	Refrigeration water and various	12	0.3
			Exergy destruction in the furnace		30.06

Per quanto riguarda il rendimento di un EAF, è definito come:

$$(3) \quad \eta_{\text{EAF}} = \frac{\Delta h_{\text{acciaio}}}{E_{\text{input}}}$$

in cui  $\Delta h_{\text{acciaio}}$  rappresenta l'aumento di entalpia dell'acciaio durante il processo (effetto utile),  $E_{\text{input}}$  l'energia assorbita dal processo (spesa energetica).

La perdita di energia viene si trova invece dalla relazione:

$$(4) \quad E_{\text{persa}} = E_{\text{input}} - \Delta h_{\text{acciaio}}$$

Il rendimento fornisce una stima della qualità del processo fusorio. Si definisce ottimo il processo in cui la totalità dell'energia assorbita contribuisce all'aumento dell'entalpia dell'acciaio: le perdite energetiche sono nulle e il rendimento è unitario. Per aumentare il rendimento di un forno elettrico si deve cercare di ottenere più acciaio in un ciclo o di abbassare l'energia in entrata con sistemi che consentano il recupero di quota parte dell'energia in uscita e la sua reintroduzione nel sistema. Dal bilancio dei forni considerati nello studio di Kirshen et al. i valori di rendimento si aggirano attorno al 40-75%.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 5.3.2 Valutazione energetica del recupero

Si vuole ora mettere in evidenza il campo di intervento e le percentuali di energia recuperabili da un EAF: infatti il recupero non può essere totale, esistono dei limiti tecnologici ed energetici che non consentono il recupero totale dell'energia in uscita dal forno.

Si consideri ad esempio l'energia di input al processo fusorio pari a 750 kWh/t; come esposto al paragrafo precedente, solo una quota compresa tra il 45% e il 60% dell'energia fornita al processo è destinata alla fusione dell'acciaio. Basandosi su uno studio di Fruehan et al. [19], l'entalpia di una tonnellata di acciaio non legato alla temperatura di spillaggio di 1600 °C è pari a 361 kWh/t: questa rappresenta idealmente l'energia minima richiesta in un processo fusorio a rendimento unitario e varia in funzione del tipo di acciaio prodotto.

Il resto dell'energia viene dissipato nella scoria, nei circuiti di raffreddamento e negli off-gas; per quanto concerne la scoria, questa non viene considerata dal punto di vista termodinamico nelle seguenti considerazioni. Si deve inoltre osservare che una parte dell'energia del flusso viene inevitabilmente persa: infatti, si ipotizzi di inviare i fumi al trattamento e al camino a una temperatura dell'ordine di 200 °C al fine di evitare condense acide al camino e di garantire l'integrità dei filtri; l'entalpia dei fumi a tale temperatura è stata stimata pari a 110 kWh/t, considerando una portata di 100000 Nm<sup>3</sup>/h, in base ai dati forniti da una società di engineering, *ECO-D Environmental Systems S.r.l.* di Udine<sup>32</sup> [39] e confrontati con la letteratura esaminata. Si precisa inoltre che le considerazioni fatte riguardano esclusivamente i fumi del circuito primario.

Riassumendo si ha:

	kWh/t	%
Energia totale fornita al forno	750	100
Entalpia dell'acciaio fuso	361	48
Entalpia dei fumi a trattamento (a 200 °C)	110	15
<b>Entalpia off-gas + perdite per raffreddamento</b>	<b>279</b>	<b>37</b>

Il recupero energetico può quindi operare sul 37% di energia in entrata.

In Figura 31 vengono schematizzate le energie in gioco e viene evidenziato il campo di inserimento dell'apparato di recupero termico.

---

<sup>32</sup> La stessa società ha fornito i dati relativi alle caratteristiche dei fumi per lo studio e le simulazioni del sistema di recupero oggetto della tesi e riportati al Capitolo 7.

## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

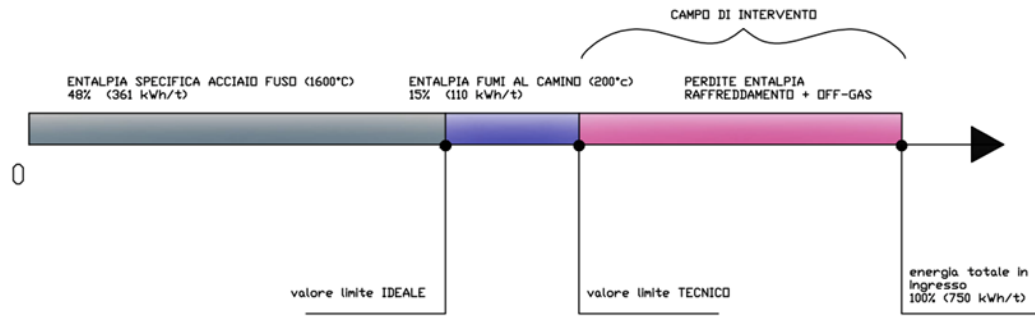


Figura 31 - Energia nel processo EAF: valori limite ideale e tecnico e campo di intervento.

In realtà un sistema di recupero interviene solo su quota parte del totale; si stima ora, in base a considerazioni del tutto approssimative, in che percentuale sia possibile recuperare questa energia. Con le attuali tecnologie disponibili (ORC ad alta temperatura) il valore di energia elettrica producibile sfruttando gli off-gas di un impianto EAF è pari a 40 kWh/t. Questo dato è stato calcolato considerando un profilo di temperatura relativo a una sezione caratteristica della settling chamber che, come verrà spiegato al Capitolo 7, rappresenta la parte dell'impianto più idonea a ospitare il sistema di recupero oggetto della tesi.

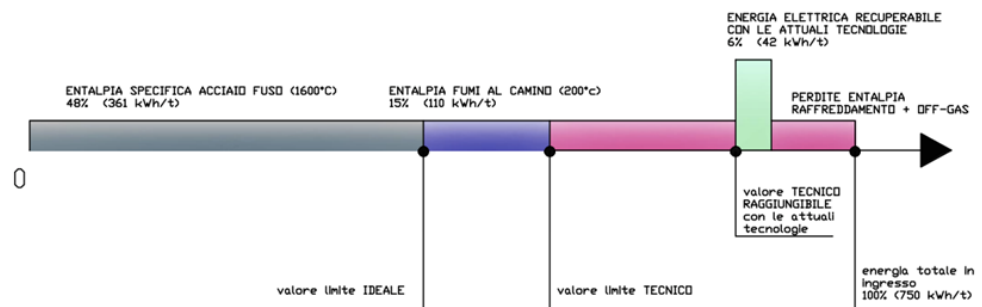


Figura 32 - Energia elettrica recuperabile con le attuali tecnologie.

Tenendo presente che 40 kWh/t elettrici corrispondono a circa il 10% del fabbisogno di energia elettrica in ingresso, il recupero risulta efficiente. Inoltre bisogna tenere conto che l'energia recuperabile dai fumi può raggiungere valori più elevati, se si considerano per esempio forni elettrici più potenti (energia elettrica o energia chimica maggiori) rispetto a quello considerato.

Come seconda osservazione, in un bilancio di primo principio, le quote di energia prodotta tramite recupero termico non rispecchiano pienamente il valore termodinamico ed economico, in quanto l'energia prodotta è energia elettrica ed è confrontata con energia termica; per un raffronto più corretto si propone lo schema in Figura 33 considerando l'equivalente termico dell'energia elettrica  $\varphi = 2,56$  [40], ottenendo circa 108 kWh/t termici. L'energia recuperabile si aggira quindi attorno al 15% di quella in ingresso; nel futuro questo valore deve necessariamente aumentare per evitare perdite inutili e quindi costi economici non indifferenti.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

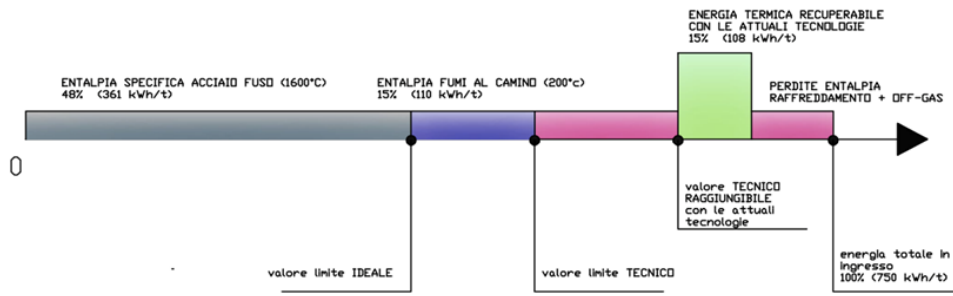


Figura 33 - Energia termica recuperabile con le attuali tecnologie.

Si precisa che l'energia elettrica prodotta da recupero termico può essere messa in rete o utilizzata per l'alimentazione diretta dell'impianto stesso. In entrambi i casi comunque si ha un risparmio energetico: per questo motivo l'energia elettrica da recupero viene indicata nella Figura 34 come energia entrante in quella totale necessaria al processo fusorio.

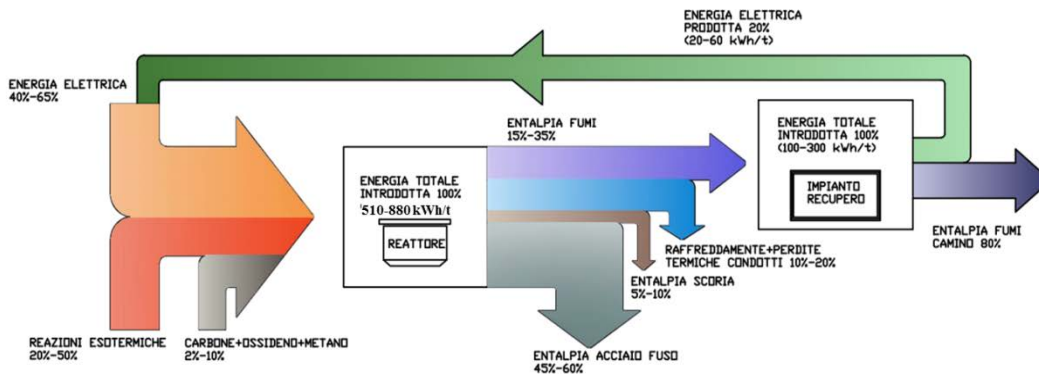


Figura 34 - Bilancio energetico nel processo EAF con recupero.

Secondo i dati riportati dall'IEA, considerando un consumo medio di energia elettrica 425 kWh/t di acciaio prodotto da EAF con bruciatori a ossi-combustibile, una sua riduzione fino 350 kWh/t comporterebbe una riduzione annuale di 0,1 EJ a livello mondiale [20].



## 5.4 ASPETTI CARATTERISTICI DEL RECUPERO: CRITICITÀ E VANTAGGI

### 5.4.1 Variabilità di temperatura e portata dei fumi e altre criticità del recupero

La variazione dei parametri che caratterizzano l'output di un processo fusorio da EAF è diretta conseguenza della variabilità dei parametri che ne caratterizzano l'input. Come evidenziato al paragrafo 3.1, le caratteristiche della carica, il tipo di acciaio prodotto e la variabilità delle condizioni operative (marcia del forno) durante un ciclo TTT condizionano in maniera significativa qualsiasi parametro caratteristico del processo: l'andamento della temperatura, la portata e velocità dei fumi, la composizione degli stessi, polveri comprese.

Per quanto concerne la carica del forno, il rottame presenta elevate percentuali di metalli pesanti, come cadmio, piombo e zinco, composti organici e plastiche, responsabili della presenza di diossine e furani nei fumi. L'eterogeneità della carica si ripercuote anche sulle cinetiche di reazione, che condizionano la portata di "aria" necessaria alla completa combustione del CO e dell'idrogeno gassoso residui all'interno del forno e nei primi tratti della linea di trattamento fumi. La presenza di questi elementi, se non controllata, può essere causa di deflagrazioni nei condotti di adduzione fumi.

L'ostacolo principale ai fini del recupero energetico è la grande variabilità delle temperature e delle portate dei fumi. Come visto nel paragrafo 3.2.3, le temperature dei fumi in uscita dal forno e all'ingresso della settling chamber subiscono variazioni repentine nel tempo, in relazione alle operazioni di power-on e power-off; in pochi secondi si passa da picchi di temperatura prossimi a 1500 °C a valori minimi attorno a 100 °C o inferiori.

In queste condizioni operative risulta molto difficile se non impossibile dimensionare uno scambiatore di calore a recupero diretto anche con gli opportuni sovradimensionamenti e le appropriate regolazioni. Analogamente, le caratteristiche termodinamiche dei fumi incidono sulle dinamiche di produzione dell'energia dal recupero: le alte velocità di transito dei fumi con sospensioni solide rilevanti e le oscillazioni della temperatura compromettono rispettivamente lo scambio termico (elevati coefficienti di sporcamento dei fasci tubieri degli scambiatori) e la regolarità delle prestazioni. Un qualunque sistema di recupero deve essere alimentato da un vettore energetico costante per ottenere valori costanti in uscita, pena un suo sfruttamento poco efficiente e poco conveniente con l'aggravante di dilatare i tempi di rientro dall'investimento iniziale.

Per la produzione di energia è necessario prestare attenzione inoltre alle caratteristiche termomeccaniche dei materiali da costruzione degli scambiatori (acciai resistenti all'abrasione e alle alte temperature) e dei fluidi vettore (evitare fenomeni di cracking delle molecole degli oli e/o dei fluidi organici), oltre che alle scelte impiantistiche.

Non bisogna trascurare l'alta criticità dell'impianto di trattamento fumi abbinato a soluzioni di recupero/produzione energetica per non sottovalutare gli aspetti legati alla sicurezza del personale e dell'impianto stesso (pressioni di esercizio dei fluidi vettore, temperature critiche, ecc.) che devono

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

essere sempre costantemente perseguibili. Sostanziosi sistemi di controllo devono quindi garantire un monitoraggio permanente dell'unità funzionale.

Più significativi sono gli aspetti economici che devono considerare non soltanto i costi legati agli studi di fattibilità, indispensabili per giustificare investimenti che possono prevedere "tempi di rientro" superiori ai 3-4 anni, ma soprattutto l'onere monetario necessario alle spese di manutenzione, gestione e approvvigionamento dei vettori energetici.

Recupero energetico e produzione di energia elettrica e/o termica non devono in ogni modo incidere sull'affidabilità del forno, non devono nuocere al processo, né tanto meno alla sua continuità. Anche se l'intervento di recupero, in senso generale, può essere conveniente, eventuali incidenze dello stesso sul processo fusorio lo rendono non funzionale e quindi inapplicabile.

#### **5.4.2 Vantaggi del recupero**

I principali vantaggi tecnologici, gestionali, economici e ambientali che un accurato sfruttamento delle fonti energetiche (elettrica e chimica) ha sul processo fusorio all'EAF sono così riassumibili:

- Massima riduzione del consumo specifico di energia;
- Diminuzione dei costi energetici di processo
- Possibilità di produzione di energia per uso interno o rivendibile esternamente;
- Possibilità di accesso agli incentivi;
- Possibilità di separare i flussi primario e secondario con conseguente diminuzione della spesa energetica di ventilazione, eliminazione della valvola di miscelamento e riduzione complessiva del costo di gestione; per contro si devono prevedere due ventilatori e due batterie filtri, quindi aumenta il costo di impianto;
- Diminuzione delle dimensioni della torre evaporativa, ove presente;
- Diminuzione della portata reale dei fumi a valle del recuperatore con conseguente diminuzione delle dimensioni d'impianto e/o diminuzione delle perdite di carico
- Riduzione del consumo degli elettrodi di grafite;
- Riduzione del consumo dei refrattari;
- Riduzione delle operazioni di manutenzione del forno;
- Abbattimento della portata d'aria di diluizione;
- Massima riduzione della durata del ciclo TTT;
- Aumento dell'efficienza di abbattimento degli inquinanti;
- Attenuazione del carico termico e del carico inquinante dei fumi esausti (e conseguente alleggerimento dell'impianto di depurazione).

Dal punto di vista ambientale, in particolare, il recupero energetico e la produzione d'energia elettrica comportano una riduzione del fattore d'emissione, come definito al paragrafo 3.5. Si assiste, infatti, a una riduzione della produttività d'anidride carbonica derivante dal processo (kg CO<sub>2</sub>/t LS) in quanto parte del calore necessario alla fusione della carica nel forno non deve essere generato, eliminando quindi la quota di CO<sub>2</sub> corrispondente dai prodotti della combustione.

### 5.5 STATO DELL'ARTE DEL RECUPERO DA EAF

Il recupero energetico “diretto” da forno elettrico ad arco può essere sfruttato nell’ambito del processo produttivo (fusione del rottame e affinazione del bagno metallico), per ottenere:

- Preriscaldamento delle ceste di carico del rottame o direttamente del rottame a bassa/alta temperatura;
- Riscaldamento delle siviere per la raccolta dell’acciaio fuso.

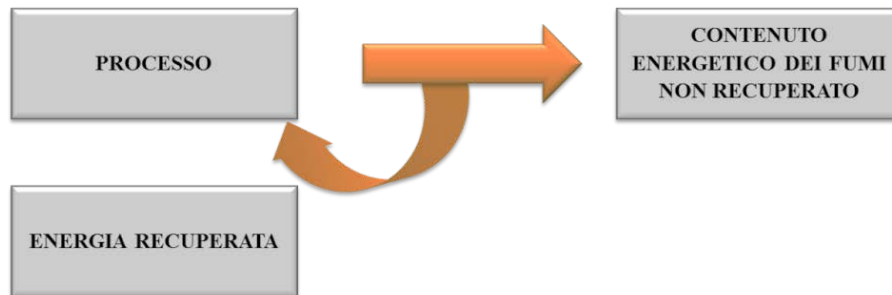


Figura 35 - Recupero energetico dai fumi di acciaieria elettrica.

Il recupero può essere anche di tipo “indiretto” con diverse finalità in uso o in fase di studio/finalizzazione e nel seguito riportate: si registra, infatti, una costante ricerca e sviluppo nel caso del recupero ai fini della produzione di energia:

- Sviluppo di energia chimica;
- Alimentazione di un bacino di utenze termiche (scopi termici);
- Produzione di energia elettrica per i fabbisogni dell’attività (utenze interne) o da rendere disponibile al mercato (utenze esterne);
- Produzione di vapore per diversi fini interni o esterni all’acciaieria.

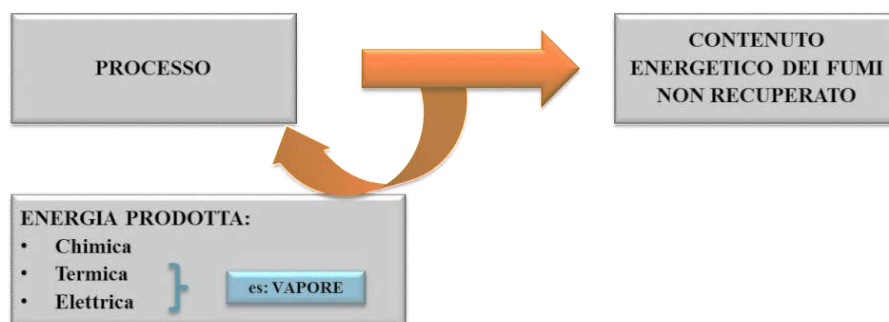


Figura 36 - Produzione di energia elettrica e/o termica dai fumi di acciaieria elettrica.

Nel seguito viene presentata una panoramica sui sistemi principalmente utilizzati negli impianti e su alcuni studi in fase di sperimentazione. Sono poche le tecnologie attualmente realizzate che possano vantare un efficiente recupero; il loro principale utilizzo avviene a livello termico, internamente all’impianto stesso.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### ***5.5.1 Recupero per preriscaldamento del rottame ad alta/bassa temperatura nel processo produttivo***

Il preriscaldamento del rottame è divenuto una tecnica comunemente impiegata negli ultimi 30 anni. Il rottame può essere preriscaldato a bassa temperatura mediamente attorno ai 300-400 °C con sistemi di carica continua (es., Consteel®) e ad alta temperatura a 800-1000 °C con sistemi di carica discontinua (es., ceste di carico, Shaft Furnace).

Obiettivo principale è la riduzione del consumo di energia necessario alla fusione: infatti, il materiale arriva già caldo in forno e questo contribuisce alla riduzione del tempo di ciclo TTT e quindi al consumo energetico. Tale tecnica contribuisce quindi all'ottimizzazione del processo da EAF aumentandone l'efficienza e la produttività.

I vantaggi associati a questa tecnica si possono così riassumere:

- Riduzione del consumo energetico durante un ciclo TTT;
- Incremento della produttività del forno;
- Riduzione del consumo degli elettrodi e loro rottura;
- Riduzione del consumo dei refrattari del forno;
- Riduzione dell'umidità del rottame prevenendo in tal modo eventuali esplosioni nel forno;
- Riduzione del consumo dell'ossigeno necessario al processo;
- Riduzione delle emissioni in atmosfera (CO<sub>2</sub> in particolare) in abbinamento a un avanzato sistema di trattamento e depurazione dei fumi;
- Riduzione delle polveri: infatti, i fumi, attraversando il rottame, si legano ad esso che funziona come un "filtro";
- Riduzione della volumetria de gas emessi e conseguente possibile riduzione delle sezioni di passaggio con benefici sugli ingombri e sui costi relativi;
- Riduzione delle operazioni di manutenzione del forno;
- Riduzione dei costi del processo.

Il problema principale dovuto al preriscaldamento è insito nella composizione dei fumi: infatti, nel rottame possono trovarsi sostanze organiche come oli, materie plastiche e altre sostanze organiche, la cui incompleta combustione porta alla formazione di ulteriori sostanze tossiche. Con riferimento particolare alle diossine, i sistemi di carica continua associati a rapidi sistemi di raffreddamento dei fumi (come le QT) sembrano garantire il rispetto dei limiti normativi (<0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>); tuttavia in almeno due impianti che utilizzano tale tecnologia sono stati registrati valori maggiori. Inoltre, in un sistema di preriscaldamento tradizionale (ceste di carico) sono stati misurati fino a 9,2 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup> [6, p. 453]. Per ovviare al problema è necessario utilizzare le camere di post-combustione con bruciatori a combustibile fossile oltre ai sistemi tipo QT per evitare il processo di De Novo Syntesis;

## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

questo riduce in parte il problema e inoltre l'efficienza del recupero è ridimensionata dall'energia spesa per bruciare le diossine<sup>33</sup>.

Nel seguito vengono riassunte le tecnologie tradizionali di preriscaldamento e le due principalmente utilizzate: Shaft Furnace e Consteel® con rispettivamente 31 e 35 impanianti presenti al 2009.

Un breve accenno viene fatto su altri interessanti sistemi di ultima generazione: COSS e EPC system che unirebbero i benefici dei due precedenti sistemi e il forno ECOARC™.

### 5.5.1.1 Preriscaldamento tradizionale

#### Preriscaldamento delle ceste di carico

Una quota dei gas provenienti dal quarto foro viene reindirizzata verso la camera contenente le ceste ("camere calde") o direttamente verso la cesta. Questo sistema prevede l'innesto di condotti all'inizio della linea di captazione delle emissioni primarie, subito dopo la camera di combustione, e l'utilizzo di appositi ventilatori per reindirizzare il flusso di fumi.

Il preriscaldamento avviene a temperature tipicamente di 315-450 °C con un risparmio energetico di 40-60 kWh/t [41], la riduzione delle emissioni delle polveri, il minor consumo degli elettrodi e del refrattario del forno. Il ricorso invece a un preriscaldamento alle alte temperature comporta in genere complicazioni impiantistiche come la realizzazione di condutture raffreddate e inconvenienti come l'ossidazione superficiale della carica, la formazione di un gradiente termico nello scrap (che può verificarsi già alle basse temperature), la deformazione della cesta e la possibile parziale fusione di elementi basso-fondenti con occlusione della cesta stessa; in quest'ultimo caso, si può ovviare al problema grazie al miglioramento delle caratteristiche del rottame e a una sua attenta selezione (oli, grassi, altri elementi estranei).

Si è lontani dalle condizioni ritenute ottimali per un conseguimento di massimo risparmio energetico (540-650 °C). Il sistema inoltre non risulta conveniente sotto diversi aspetti: alimentazione discontinua del flusso di fumi alle ceste a causa dell'alta variabilità di temperature e portate dei fumi stessi; minimo risparmio energetico per cicli con TTT inferiore ai 70 minuti [41]; breve durata delle ceste per problemi di deformazione strutturale; oneri tecnici e manutentivi; oltre a ciò, il sistema costituisce un altro punto di emissione. Un aspetto negativo riguarda poi l'emissione delle diossine che, come anticipato, può raggiungere valori elevati, anche fino a 9,2 ng ITEQ/Nm<sup>3</sup> [6, p. 453]. Dai dati raccolti da Nardin et al. [42]- [43] il preriscaldamento delle ceste può essere effettuato dopo diluizione con aria falsa e senza l'adozione di bruciatori ausiliari di integrazione, quindi a bassa temperatura; in questo modo si ovvia a gran parte delle complicazioni di un preriscaldamento ad alta temperatura, ma non viene ottimizzato il recupero e non viene risolto il problema diossine.

Tali inconvenienti sembrano siano stati superati tramite le due principali tecnologie Shaft e Consteel®.

---

<sup>33</sup> Si veda quanto detto al paragrafo 3.5.3.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

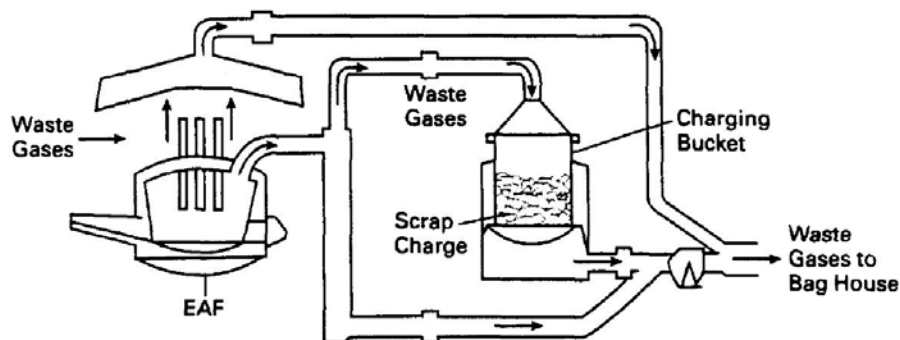


Figura 37 - Schema del preriscaldamento diretto del rottame in cesta. Fonte: [41].

#### Preriscaldamento con gas naturale

Anziché utilizzare i fumi del foro, questo preriscaldamento viene effettuato con le emissioni derivanti dai bruciatori a gas naturale, posti sopra la cesta di carico. Il rottame viene scaldato tipicamente a 540-650 °C con un recupero di energia pari a 40 kWh/t: a temperature maggiori si rischia l'ossidazione del materiale con conseguente riduzione del rendimento del processo. Il processo di fatto è disaccoppiato da quello fusorio e non è influenzato dal ciclo TTT. Tuttavia, il maggior svantaggio risiede nel costo addizionale per l'utilizzo di un ulteriore vettore energetico [41].

#### 5.5.1.2 Tecnologia Shaft

Nel 1988 l'azienda *Fuchs Systemtechnik GmbH*, ora *SIEMENS VAI Metals Technologies*, iniziò a sviluppare una soluzione che superasse le carenze e problematiche legate al preriscaldamento delle ceste di carico. La tecnologia Shaft consiste nell'utilizzo di un tino supplementare, di minor diametro rispetto al forno, posto centralmente sopra di esso e contenente il rottame che viene così riscaldato dai fumi uscenti dal forno. Contrariamente al *Consteel®*, rappresenta un sistema di carica discontinuo. Con questa tecnologia almeno il 50% del rottame viene preriscaldato a temperature molto elevate, 800-1000 °C.

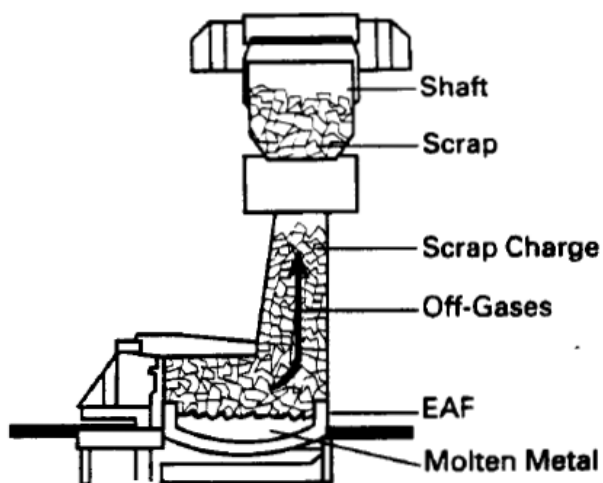


Figura 38 - Schema di uno Shaft Furnace. Fonte: [41].

## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

La successiva tecnologia Double Shaft Furnace massimizza gli effetti positivi della Shaft: prevede un forno con due corpi aventi in comune il sistema porta elettrodi: mentre viene fuso il materiale nel primo corpo, nel secondo viene caricata una cesta, e quando nel primo si passa allo spillaggio nel secondo inizia la fusione. I gas provenienti dal forno che sta fondendo vengono fatti transitare in quello in cui sta avvenendo la carica.

Un sistema molto efficiente è poi il Finger Shaft Furnace che prevede lo sfruttamento dei gas di scarico durante le operazioni a bagno piatto. Metà del rottame viene caricata su un sistema, Finger, all'interno di un camino posizionato sopra il forno durante la fase di affinazione del precedente riscaldamento; l'altra metà del rottame viene aggiunta nel Finger dopo che la prima è stata fatta cadere nel forno ed è stata applicata la potenza. Lo scrap viene riscaldato al 100% a temperature molto elevate, 1000 °C, e si ottiene una sostanziale riduzione del ciclo TTT a ben 35 minuti.

In generale, con la tecnologia Shaft si riducono i tempi ciclo così come i consumi di energia di circa 70-100 kWh/t LS, in alcuni casi fino a 120 kWh/t LS, vale a dire il 10-25% dell'intera energia in ingresso al forno [2, pp. 451-452]. Tuttavia, per contenere il problema delle diossine si rende necessario un post-riscaldamento laddove esistono limiti normativi da rispettare.

Ulteriori vantaggi sono [41]:

- Aumento della produttività del forno fino al 20%;
- Aumento del rendimento fino al 2%;
- Riduzione delle emissioni di polvere di circa il 20%;
- Riduzione del consumo degli elettrodi;
- Riduzione dei problemi di armoniche e flicker e dei costi legati al processo.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 5.5.1.3 Tecnologia Consteel®

Il Consteel® fu sviluppato dalla *Intersteel Technology Inc.* oggi di proprietà di *Tenova*, leader di questa tecnologia nel mondo. È un sistema di alimentazione diretta e in continuo nel forno del rottame che viene anche preriscaldato; diversamente dalla tecnologia Shaft, lo scrap viene caricato in continuo su un nastro trasportatore in un lungo tunnel fino al forno dove viene versato; nel contempo i fumi di processo, uscendo dal forno, si muovono in controcorrente preriscaldandolo il materiale a una temperatura media di 300-400 °C, mentre superficialmente si raggiungono 600 °C e oltre [44]; opportuni sistemi di monitoraggio e controllo garantiscono il regolare funzionamento del sistema. Si realizza così un contenimento del ciclo TTT al di sotto dei 50 min circa [41] e del consumo dell'energia abbassandolo mediamente di 50 kWh/t LS [45].

In alcune installazioni si sono registrati contenimenti energetici dell'ordine di 80-120 kWh/t con temperature di preriscaldamento di 400-600 °C [46].

Ulteriori principali vantaggi sono [47] - [46]:

- Aumento della produttività del 33%;
- Riduzione dell'emissione di polveri del 20% e fino al 30%;
- Riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> del 10-30%;
- Minor consumo di ossigeno;
- Emissioni di diossina, CO e NO<sub>x</sub> nel rispetto delle normative tedesche, giapponesi e americane;
- Minor consumo degli elettrodi del 40% e minor rischio della loro rottura;
- Abbattimento del rumore < 95 dB;
- Riduzione dei problemi di armoniche e flicker;
- Payback contenuto;
- Flessibilità.

Con il Consteel® Evolution™ *Tenova* ha raggiunto l'obiettivo di ridurre ulteriormente il consumo di energia elettrica, pari a 297 kWh/t di acciaio prodotto. La principale differenza con quello tradizionale risiede nella progettazione della sezione del preriscaldamento divisa in due tunnel: il primo in cui lo scrap viene caricato, il secondo, posto in cima all'altro, in cui la carica viene riscaldata ad alte temperature mediante bruciatori (aria/gas) altamente efficienti. Sostituendo l'energia elettrica con quella chimica dei bruciatori si riducono i costi operativi (in particolare in quelle zone deli USA in cui il gas è largamente disponibile e poco costoso). La temperatura di preriscaldamento raggiunge mediamente i 500 °C, il consumo di energia cala fino a 100 kWh/t, il ciclo TTT viene ulteriormente ridotto, così come le emissioni pericolose (diossine in particolare) e si registra un aumento della produttività fino a 3 t/MW (il 50% rispetto a un EAF tradizionale). La stabilizzazione delle temperature degli off-gas fornisce le condizioni operative per un efficace recupero di calore [45].



## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

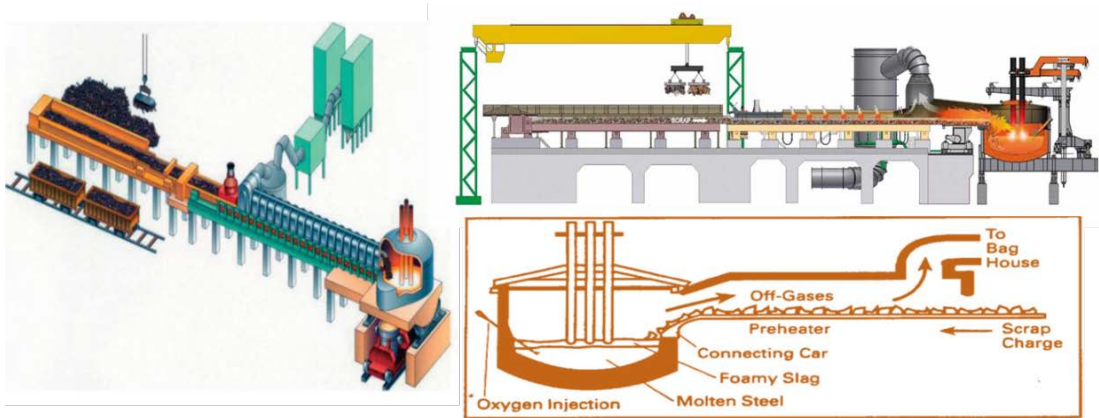


Figura 39 - Tecnologia Consteel® (a sinistra) e Consteel® Evolution™ (in alto a destra) di Tenova e principio di funzionamento (in basso a destra). Adattato da: [46]- [45] - [41].

### 5.5.1.4 Tecnologia COSS

Il Continuous Optimized Shaft System, COSS, è una tecnologia di ultima generazione, sviluppata dalla *Fuchs Technology AG* che combinerebbe i benefici del sistema Shaft (preriscaldamento ad alte temperature) con quelli del processo Consteel (alimentazione continua della carica). Il tino viene caricato col rottame senza interrompere la fornitura di energia al forno. Il forno può operare con o senza il tino che è collegato all'EAF mediante un carro mobile. Il rottame viene caricato nel tino senza interrompere la somministrazione di energia. I minori costi di manutenzione, i minor tempi di fermo, l'alto contenuto energetico delle operazioni a bagno piatto e le maggiori temperature di preriscaldamento rispetto alle altre due tecnologie garantiscono bassi costi di conversione e alta produttività [48].

### 5.5.1.5 EPC® System EAF

*CVS MAKINA*, in collaborazione con *KR Tec GmbH*, ha sviluppato l'EPC® (Environmental Preheating and Continuous Charging System), un sistema di preriscaldamento rottame di ultima generazione, "eco-compatibile" e caratterizzato da un'elevata efficienza di preriscaldamento: unirebbe i vantaggi di efficienza del preriscaldamento totale della carica (tecnologia Shaft) con quelli dell'alimentazione continua dello scrap (tecnologia Consteel®). Inoltre il design è stato notevolmente semplificato per aumentare l'affidabilità e la redditività degli investimenti. Il sistema EPC è installato accanto all'EAF e il rottame preriscaldato può essere caricato in continuo dal sistema di alimentazione telescopico nella camera di fusione durante il periodo di power-on.

La temperatura di preriscaldamento raggiunge i 700-800 °C e si riducono notevolmente sia i tempi di power-on e power-off (e complessivamente il ciclo TTT), sia il consumo di energia, diminuito di circa 100 kWh/t. Tuttavia, per contenere il problema delle diossine, si rende necessario un post-riscaldamento laddove esistono limiti normativi da rispettare.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Ulteriori vantaggi riguardano:

- Aumento della produttività del 20%;
- Riduzione delle emissioni di polvere del 30%;
- Riduzione del volume degli off-gas del 30%;
- Alti ritorni sugli investimenti.
- Caricamento dello scrap indipendente;
- Sistema compatto. [49]

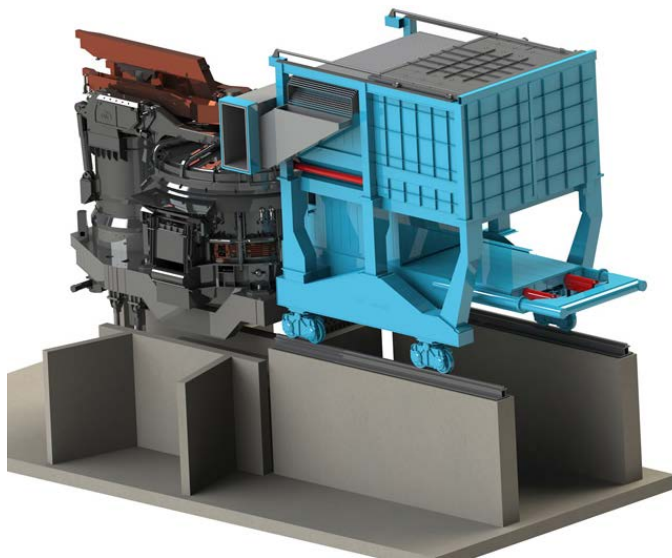


Figura 40 - EPC® System. Fonte: [49].

#### 5.5.1.6 Forno ECOARC™®

L'ECOARC™ della JP Steel PLantech Co. è un forno di nuova generazione, innovativo, economico ed “eco-compatibile”. Il rottame viene continuamente alimentato nel tino di preriscaldamento (Shaft) ed è in contatto diretto con l'acciaio fuso nel forno; durante la fusione, il forno, inclusa la Shaft, è inclinato all'indietro. Il consumo elettrico è notevolmente minimizzato ed è pari a circa 200 kWh/t, livello non raggiunto dagli altri sistemi finora menzionati.

Ulteriori principali vantaggi di questa tecnologia sono riassunti nel seguito:

- Aumento della produttività del 40%;
- Riduzione delle emissioni di polveri del 40%
- Riduzione delle emissioni di diossina nel rispetto dei limiti normativi;
- Riduzione del volume degli off-gas;
- Riduzione del consumo degli elettrodi fino al 50%;
- Riduzione del flicker (del 40%);
- Assenza di odore o fumo bianco anche dal preriscaldamento dello scrap;
- Alte temperature di post-combustione e rapido raffreddamento. [50]

## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

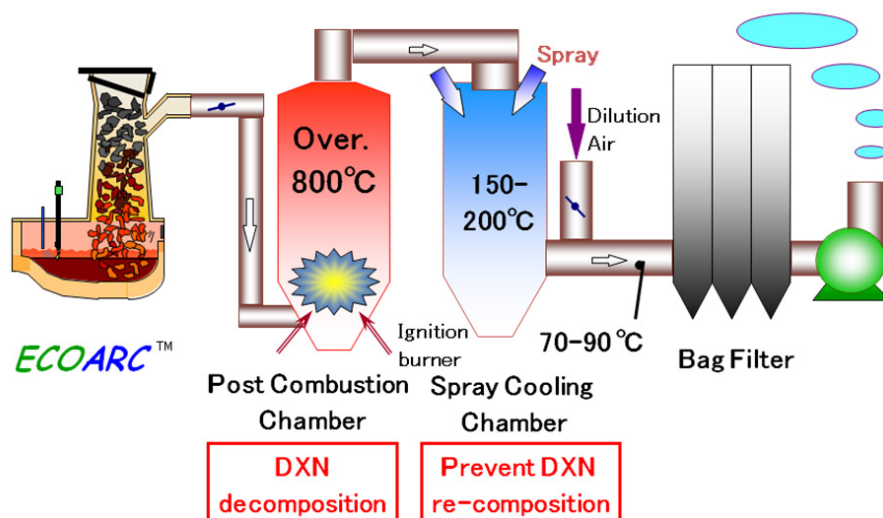


Figura 41 - Forno ECOARC™. Fonte: [50].

### 5.5.1.7 Altri sistemi di preriscaldamento

Si citano per completezza della ricerca altri sistemi di preriscaldamento non considerati in questa trattazione, rimandando a test specifici:

- Processo a forno rotante BBS Brusa;
- Forno Shaft IHI;
- Sistema Endless Charging System (ESC) Danieli;
- Forno Twin-shell.

### 5.5.2 Recupero e produzione di energia chimica fuori dal processo produttivo

Un possibile recupero, non realizzato industrialmente, sfrutta i materiali a cambiamento di fase per recuperare il calore dalle diverse fonti di emissione da acciaieria. Questa tecnica prevede l'accumulazione dell'energia contenuta nei fumi in uscita dal forno mediante PCM; questo funge da fonte di calore per la reazione endotermica di steam-reforming del metano per la produzione di idrogeno e non per fini energetici che richiedono vincoli tecnici, economici, di fattibilità diversi [51].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

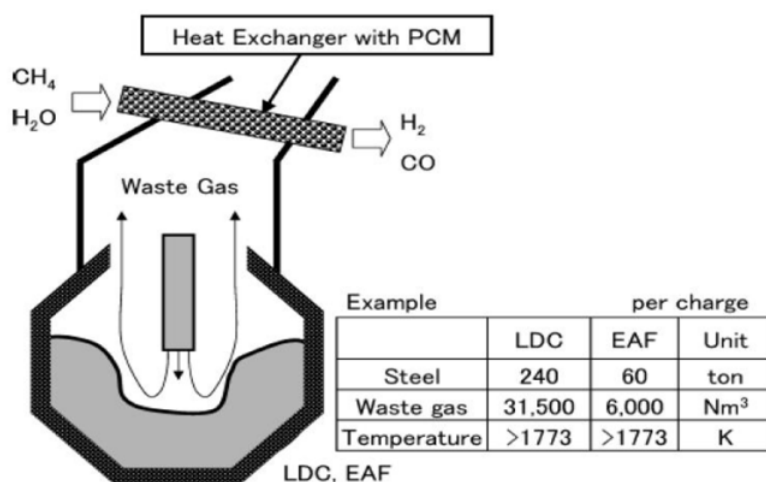


Figura 42 - Recupero dell'energia contenuta nei fumi in uscita da EAF mediante PCM. Fonte: [51].

### 5.5.3 Possibilità del recupero e produzione di energia termica fuori dal processo produttivo

La produzione di energia termica, con sistemi diretti di recupero dei cascami energetici dei fumi, ha una bassa rilevanza economica a causa del fatto che non può prescindere da uno sfruttamento intermittente, coerentemente all'andamento delle temperature e delle portate dei fumi; inoltre, gli scambiatori vengono sovradimensionati in funzione delle punte di carico con un rendimento di utilizzo molto basso. Volendo regolarizzare il flusso di entalpia in uscita, immediatamente a monte del recupero, si possono adottare sistemi integrativi con bruciatori ausiliari a metano. In questo caso il sistema impiantistico assume una taglia rilevante a causa delle portate in gioco. Inoltre il recupero energetico ai soli fini termici è praticabile in associazione a reti di teleriscaldamento, considerata la scarsa rilevanza di energia termica a bassa entalpia nell'ambito del comprensorio industriale. L'energia termica prodotta può essere utilizzata per il riscaldamento di sedi industriali o civili adiacenti o per gli uffici stessi dell'acciaieria che effettua il recupero. Tale pratica, seppure tecnicamente fattibile, richiede una grande interazione e collaborazione con gli enti amministrativi locali: il teleriscaldamento necessita cooperazione su vari livelli e una visione d'insieme oggi molto difficile da raggiungere; tale operazione è ancora molto lontana dal core-business di un'attività siderurgica.

### 5.5.4 Possibilità del recupero e produzione di energia elettrica fuori dal processo produttivo

La produzione di energia elettrica mediante recupero prevede un circuito esterno con un fluido termovettore (acqua, vapore, aria, olio diatermico, fluido organico) e può essere utilizzata al di fuori del processo produttivo per:

- Produrre energia elettrica per utenze interne;
- Produrre energia elettrica per utenze esterne (rete elettrica).

Diverse possono essere le tecnologie utilizzate per la produzione di energia elettrica:

## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

- Ciclo Rankine a vapore d'acqua.

Il recupero di calore avviene mediante scambio termico fumi/acqua con l'eventuale produzione di vapore (ciclo Rankine a vapore d'acqua) per generare energia elettrica. Viene reso difficoltoso dalla grande variabilità della temperatura dei fumi durante la marcia del forno. Questo problema è difficilmente superabile anche con l'adozione di bruciatori di integrazione per smorzare le oscillazioni termiche della corrente. Dai dati sperimentali reperiti durante le misurazioni, Nardin et al. [42]- [43] hanno ottenuto rendimenti di recupero alquanto modesti con l'aggravante dello sporco e deterioramento delle superfici di scambio.

- Ciclo Rankine organico a olio diatermico e fluidi frigorigeni.

L'Organic Rankine Cycle (ORC) consente di aggirare le complicazioni derivanti dall'utilizzo di acqua demineralizzata come fluido vettore (temperature del fluido superiori a 400 °C, costante presenza di personale qualificato, ecc.). La possibilità di operare a temperature più basse con idonei fluidi di lavoro (olio diatermico e fluidi organici) permette di collocare i sistemi di scambio in sezioni dell'impianto di estrazione/convogliamento fumi dalla ridotta polverosità, con benefici sulla durata dei fasci tubieri. Tra i principali vantaggi di un ORC si sottolinea, inoltre, l'alta affidabilità ed efficienza del ciclo e del recupero effettuato e il funzionamento continuo e autonomo.

### 5.5.5 *Produzione di Vapore dai fumi di EAF e recenti sviluppi tecnologici*

Per quanto visto, la produzione di energia è fortemente soggetta all'intermittenza del processo produttivo. La pratica del recupero di energia dai fumi per la produzione di vapore è un processo ormai conosciuto e adottato largamente nei BOF, mentre negli EAF attualmente esistono diversi studi e alcune realizzazioni tecnologiche. Nei forni elettrici, il vapore viene generalmente accumulato in un serbatoio per ridurre la variabilità nella fornitura del vapore a diverse possibili applicazioni, soprattutto internamente all'acciaieria, quali l'impianto di degasaggio (processo VD/VOD)<sup>34</sup>, la refrigerazione, la produzione d'ossigeno, ecc.; sono al vaglio i possibili sfruttamenti termici e di generazione di energia dal vapore.

Nel seguito viene presentata una panoramica dei principali studi e/o realizzazioni al riguardo.

Una tecnica proposta nel 2009 da *SMS SIEMAG AG* consiste nel raffreddare il condotto dei gas primari con vapore anziché acqua: l'energia termica viene convertita in vapore che viene fatto transitare in un accumulatore e utilizzato internamente all'acciaieria, per gli scopi sopraccitati; nel caso della generazione di energia elettrica mediante turbina si potrebbe arrivare fino a 1 MW di potenza con 7 t/h di vapore prodotto. [52].

---

<sup>34</sup> Vacuum Degassing (VD) e Vacuum Oxygen Decarburization (VOD).

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

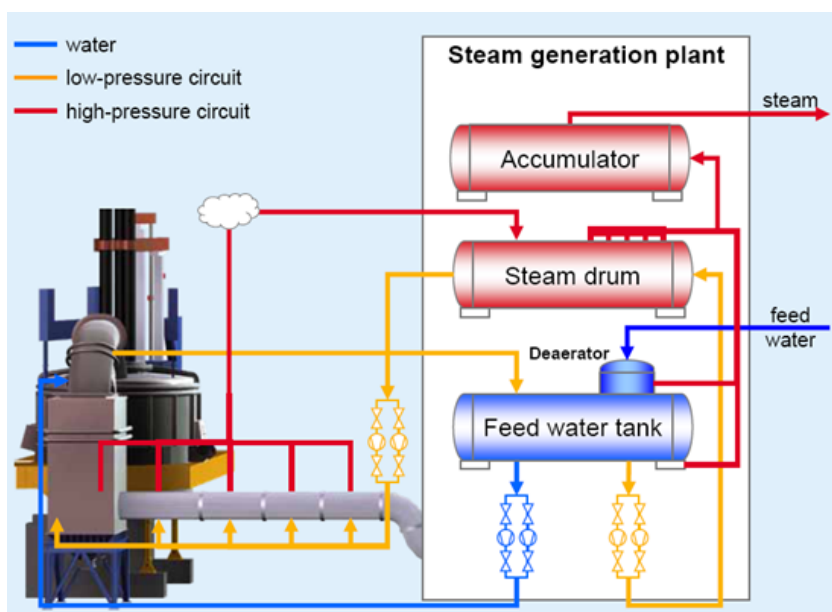


Figura 43 - Produzione di vapore diretta, utilizzando gli effluenti gassosi provenienti dal quarto foro di un forno elettrico ad arco. Fonte: [52].

Di recente *SIEMENS VAI MT* ha sviluppato una nuova tecnologia di forno elettrico, il SIMETAL EAF Quantum™, che unisce i benefici delle operazioni a bagno piatto al recupero di energia direttamente dagli off-gas del forno per il preriscaldamento del 100% dello scrap, il tutto nel rispetto delle normative sulle emissioni ambientali. Il risultato è un minor consumo di energia, sotto di 280 kWh/t.

Il secondo step dello studio proposto prevede il recupero del calore dei fumi per la produzione di vapore come nella tecnica proposta da *SMS SIEMAG*. Si possono raggiungere in tal caso fino a 32 t/h di vapore (in un forno da 120 t/h, TTT di 55 min).

Nel terzo step si prevede il recupero ai fini di produzione di energia elettrica mediante turbina. Il sistema comprende una caldaia di recupero dei gas (WHB, Waste Heat Boiler) per la produzione del vapore, un serbatoio di accumulo del vapore per calmarne l'intermittenza del flusso fornito alla turbina e un accumulatore con sali che immagazzino il calore dei fumi in uscita dal forno così da surriscaldare il vapore nei periodi di power-off del forno garantendo una fornitura costante alla turbina. I risultati raggiungibili sono riassunti in Figura 44; il metodo con i sali risulta "eco-compatibile" e meno costoso [53].

## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

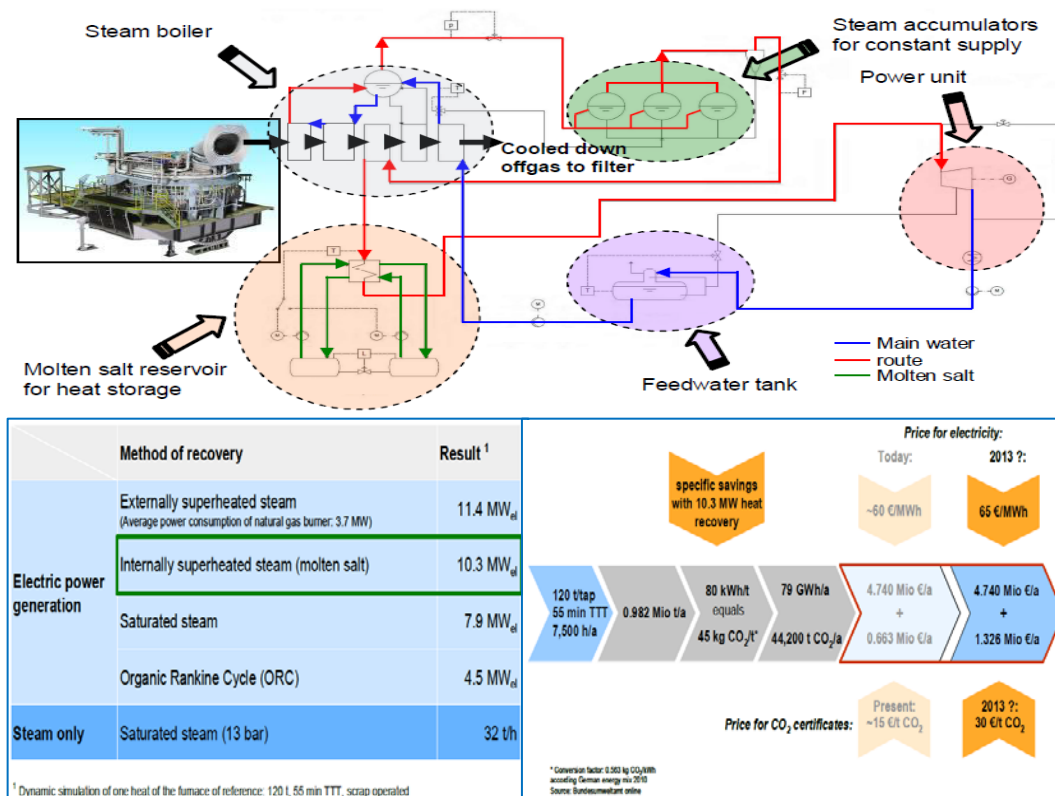


Figura 44 - Schema dell'impianto di Siemens per la produzione di vapore e energia con l'utilizzo dei sali. Comparazione tra i metodi proposti e valutazione economica. Adattato da: [53].

Al 2009 risale invece la prima applicazione di Tenova del sistema di recupero iRecovery<sup>®</sup> del calore dagli off-gas dell'EAF utilizzato per la produzione di vapore (impianto di Georgsmarienhütte GmbH, Germania). L'iRecovery<sup>®</sup> (Figura 45) prevede un condotto uguale al WCD tradizionale, ma con temperature dell'acqua maggiori, 180-230 °C (rispetto ai 35-45 °C dei WCD) che viene immessa in circolo ad alta pressione (15-40 bar); inoltre, è previsto un accumulatore del vapore per cercare di sopperire alle interruzioni di fornitura del calore dei fumi durante il ciclo TTT. Come per i WCD, l'iRecovery<sup>®</sup> viene utilizzato fino a temperature dei gas superiori a 600 °C per il rilevante contributo dell'irraggiamento, mentre a temperature più basse l'efficacia cala notevolmente. Tuttavia è possibile effettuare un ulteriore recupero anche nella fascia dei 200 °C (temperatura in uscita dalle QT) utilizzando una caldaia per il calore dissipato (WHB) (Livello 2 dell'iRecovery<sup>®</sup>).

Il sistema iRecovery<sup>®</sup> viene integrato con la tecnologia EFSOP<sup>®</sup> che consente di monitorare costantemente il processo di fusione per ottimizzare l'utilizzo dell'energia chimica del bagno e ridurre conseguentemente l'energia totale necessaria. Il risultato è il recupero di circa il 25% dell'energia totale fornita all'EAF; nel forno dell'impianto in Germania di 140 t/h e con una potenza termica di 80 MW si possono recuperare circa 15 MW termici sotto forma di vapore. Inoltre, con le due tecnologie si riducono ulteriormente le emissioni di gas serra. Lo sfruttamento del vapore per processi produttivi interni all'acciaieria sembra essere quello dai migliori risultati in termini di fattibilità ed economie

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

derivanti (risparmi nei costi di produzione, incentivi legati all'utilizzo del vapore e alla riduzione di gas serra); in alternativa il vapore può essere venduto alle reti locali [54] - [55].

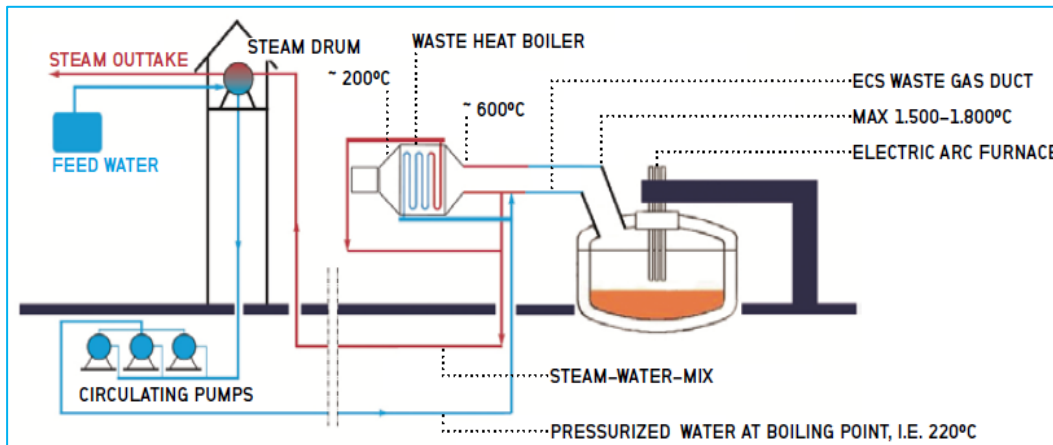


Figura 45 – Schema del recupero di calore iRecovery® a due livelli da EAF. Fonte: [54].

Un altro studio simile, ma ancora al vaglio, è proposto dalla *JP Steel Plantech Co.* Anche in tal caso viene proposto il recupero dai fumi di un EAF (con DRI come carica) per la produzione di vapore per i processi interni all'acciaieria o per la produzione di energia; per scopi analoghi può venir recuperata anche l'acqua calda dei condotti WCD. In alternativa il vapore può venir surriscaldato per migliorare l'efficienza della produzione di energia utilizzando dei bruciatori ausiliari. Il condotto degli off-gas è utilizzato come caldaia per la generazione di vapore, accumulato in un serbatoio per sopperire al fabbisogno durante le fasi intermittenti del ciclo fusorio.

Possono venire recuperati circa 130 kWh/t (efficienza del 30%); se il recupero è utilizzato per produrre vapor saturo si possono ottenere 2,8 MWh/anno di energia elettrica; con vapor surriscaldato si possono raggiungere 15,1 MWh/anno di energia. Anche in tal caso le emissioni di CO<sub>2</sub> si riducono di 12600 t/anno nel primo caso e 73400 nel secondo [56].

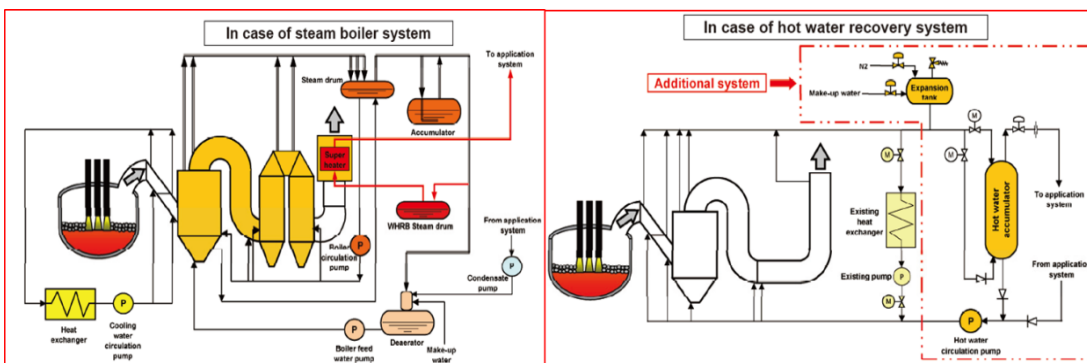


Figura 46 - Studio della generazione di vapore o recupero acqua calda: Adattato da: [56]



## 5. Recupero energetico da forno elettrico ad arco

Infine, un progetto degno di merito è sicuramente l'H-REII, Heat Recovery in Energy Intensive Industries, (LIFE08 ENV/IT/000422), co-finanziato dal programma "LIFE+" della Commissione Europea<sup>35</sup>. Il progetto è nato a Brescia nel 2008 con l'obiettivo di sviluppare un modello pilota di approccio al tema del recupero di calore dagli effluenti delle industrie altamente energivore (d'ora in poi EII, Energy Intensive Industries). Nel gennaio 2010 si avviava il primo progetto europeo riguardante la mappatura del potenziale termico recuperabile dalle EEI sul territorio pilota con l'utilizzo della tecnologia ORC (Organic Rankine Cycle) per la generazione di energia elettrica (taglie di 0,5 e 5 MW<sub>e</sub>). Il progetto ha seguito alcuni punti fondamentali: creazione di un osservatorio sulla tematica heat recovery con vari soggetti; definizione e classificazione delle EEI (siderurgie, cementifici, vetrerie, metalli non ferrosi, oil&gas); realizzazione di 50 audit in Italia e Austria; stima del potenziale nei diversi settori; promozione di azioni di policy e governance; proposta di linee di BREF esistenti con l'inserimento del recupero di calore nei BREFs di settore; intensa campagna di divulgazione rivolta soprattutto ad accrescere la conoscenza dell'opportunità di recupero per i differenti processi industriali.

Come riassunto in Figura 48, si ottengono elevati valori in termini di possibile riduzione dei consumi energetici in Italia di 1263-2021 GWh/anno con ore di funzionamento comprese tra un minimo di 5000 e un massimo di 8000 h/anno; nel caso della CO<sub>2</sub> i risparmi sono di 499-798 kt/anno [57].

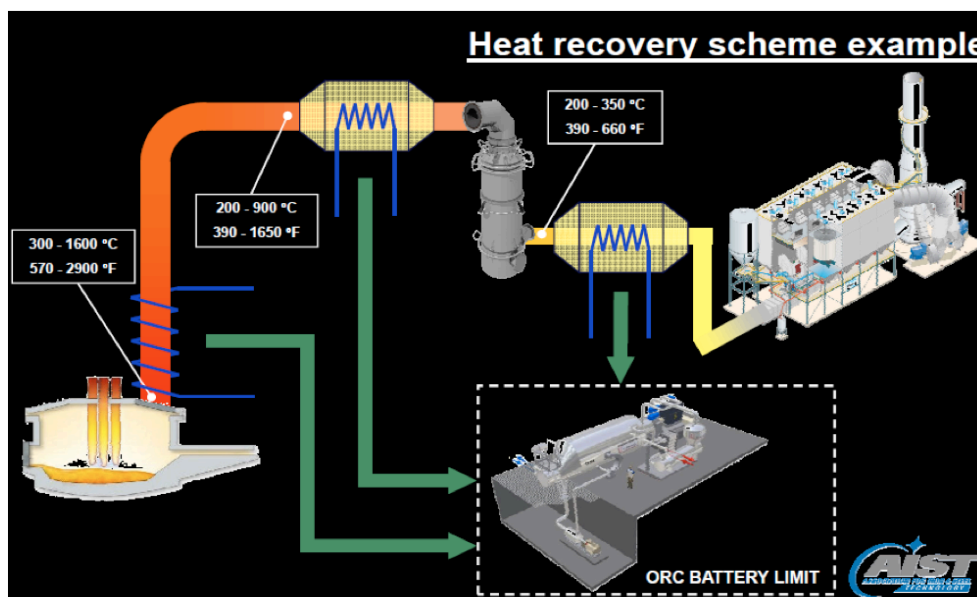


Figura 47 - Schema del recupero del progetto H-REII. Fonte: [58].

<sup>35</sup> Il programma LIFE+ finanzia progetti che contribuiscono allo sviluppo e all'attuazione della politica e del diritto in materia ambientale. Questo programma facilita in particolare l'integrazione delle questioni ambientali nelle altre politiche e, in linea più generale, contribuisce allo sviluppo sostenibile [82].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

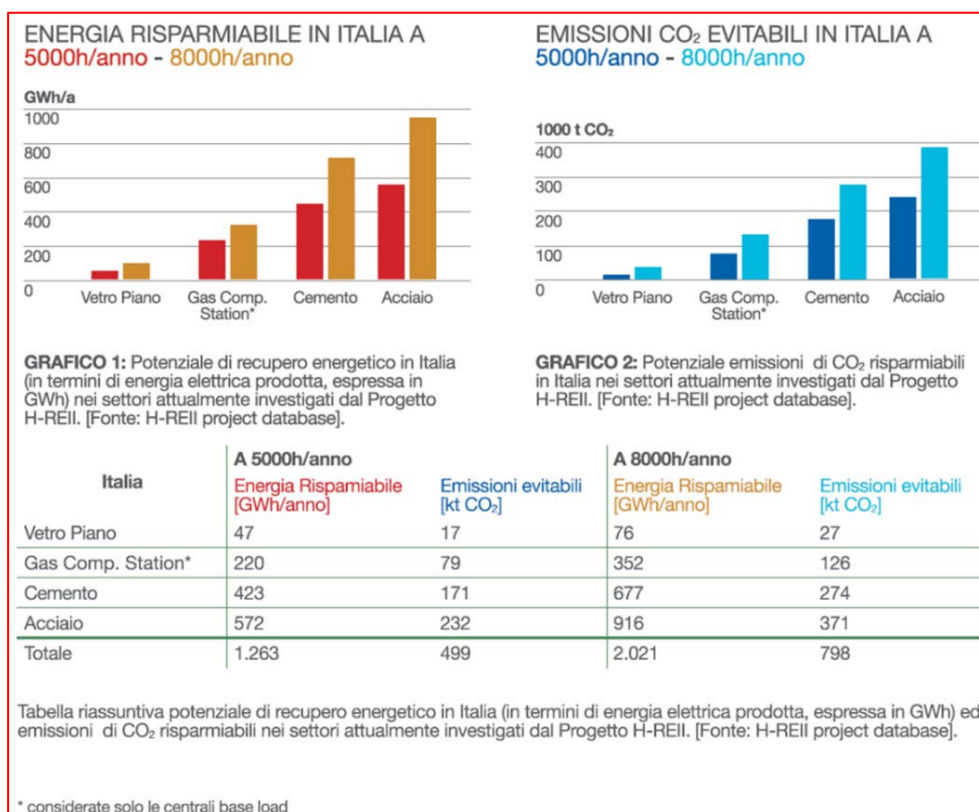


Figura 48 - Energia e CO<sub>2</sub> risparmiabile in Italia a 5000-8000 h/anno secondo il progetto H-REII. Adattato da: [57].

Il progetto H-REII Demo è la prosecuzione e implementazione del progetto H-REII e finanziato sempre dal programma “LIFE+” (LIFE10 ENV/IT/009397); vede la realizzazione del primo impianto di recupero calore nel settore siderurgico e specificatamente da EAF. Il gruppo *Feralpi*, primario produttore d'acciaio a livello europeo, che da sempre sperimenta e investe in ricerca, installerà l'impianto prototipale di recupero calore con ORC nel suo stabilimento tedesco *ESF* di Riesa. Questo sistema di recupero, integrato nell'impianto di trattamento dei fumi del forno elettrico fusorio, viene alimentato dal vapore d'acqua prodotto dai fumi di scarto del processo. L'energia generata consente di ridurre i consumi dell'impianto di trattamento fumi, contribuendo alla riduzione delle emissioni globali di gas effetto serra. Oltre alla produzione elettrica, mediante modulo ORC da 3 MW, il sistema di recupero del calore prevede che parte del vapore prodotto (circa un terzo) venga immesso nella rete della Municipalizzata di Riesa, per essere utilizzato dal processo produttivo del vicino stabilimento *Goodyear*. L'entrata in esercizio dell'impianto è prevista per il primo semestre 2013 [59].

**IL NUOVO SISTEMA DI  
RECUPERO DAGLI OFF-GAS DI  
EAF MEDIANTE PCM**



## 6 NUOVO APPARATO A PCM PER IL RECUPERO ENERGETICO

Per quanto esposto nel capitolo 5, gli off-gas emessi da forno elettrico ad arco sono allettanti per l'elevato contenuto entalpico in essi presente.

D'altro canto, si è anche visto che il principale ostacolo ai fini del recupero energetico e strettamente dipendente dal processo è rappresentato da:

- Alta variabilità delle temperature dei fumi;
- Alta variabilità delle portate dei fumi;
- Sporcamiento (polverosità).

Questi fattori dipendono dalle caratteristiche della carica, dal tipo di acciaio prodotto e dalle condizioni operative del forno durante un ciclo TTT; ne consegue una fornitura intermittente al sistema di recupero e quindi uno sfruttamento poco efficiente e poco conveniente dello stesso.

La tecnologia proposta nel presente elaborato, recentemente brevettata, ha come obiettivo la calmierazione del flusso dei fumi, smorzandone l'oscillazione di temperatura e portata, mediante un apparato contenente materiali a cambiamento di fase (PCM). Un sistema così concepito è in grado di accumulare e rilasciare grandi quantità di energia termica dai fumi in poco tempo, fungendo da "volano termico". Si realizza in tal modo un utile differimento delle potenze in gioco rendendo possibile e vantaggioso l'utilizzo delle tecnologie tradizionali per il recupero e/o produzione di energia.

Dall'esame della letteratura effettuato nel capitolo precedente (paragrafo 5.5) non sono emerse tecnologie attualmente realizzate che impieghino i PCM nei forni elettrici tradizionali per tale fine, né per la produzione di energia elettrica. Questo quanto emerso:

- Con riferimento gli articoli di Sharma et al. [60] e di Zalba et al. [61] si dimostrano le proprietà dei PCM come efficaci accumulatori di energia termica (calore latente);
- Esiste uno studio di Maruoka et al. [51] in cui i PCM sono utilizzati per recuperare il calore dalle diverse fonti di emissione da acciaieria; tuttavia, il fine di questo recupero è di tipo chimico e non energetico come quello dell'apparato indagato nella tesi;
- Nel recente studio della *SIEMENS VAI MT* si prevede il recupero del calore dei fumi emessi da un forno di nuova concezione (il *SIMETAL EAF Quantum™*) per la produzione di vapore e il suo accumulo in un serbatoio, utilizzando sali fusi, per l'eventuale fornitura costante a una turbina per la generazioni di energia elettrica [53].
- E' invece prevista nel 2013 la realizzazione di un impianto prototipale di recupero calore con ORC sempre a partire dal vapore prodotto dai fumi di scarto del processo; si tratta del progetto HREII [58].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

I sistemi sopraccitati sono comunque diversi da quello proposto dal punto di vista concettuale e impiantistico.

Nel 2012 ad Atlanta (GA, USA), durante l'ultimo anno di dottorato, ho presentato l'articolo "Technological Apparatus for the Moderation of Meltshop Off-Gas" di G. Nardin, A. Meneghetti, M. E. Fabiani relativo al sistema di recupero analizzato all' AISTech, il congresso internazionale annuale del settore siderurgico; l'articolo è pubblicato nel Conference Proceedings [62].

Si precisa che il sistema indagato non è ancora stato tecnicamente realizzato; sono in corso ulteriori approfondimenti e simulazioni termofluidodinamiche a riguardo.

## 6.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA DI RECUPERO

Il principio di funzionamento è riassunto in Figura 49. La calmierazione del flusso dei fumi si ottiene utilizzando uno scambiatore di calore contenente al suo interno PCM; lo scambiatore è ermeticamente sigillato per impedire la fuoriuscita del materiale e funge da accumulatore/differitore termico inerziale. L'apparato, posto a valle dell'EAF, viene lambito dagli off-gas in uscita dal forno.

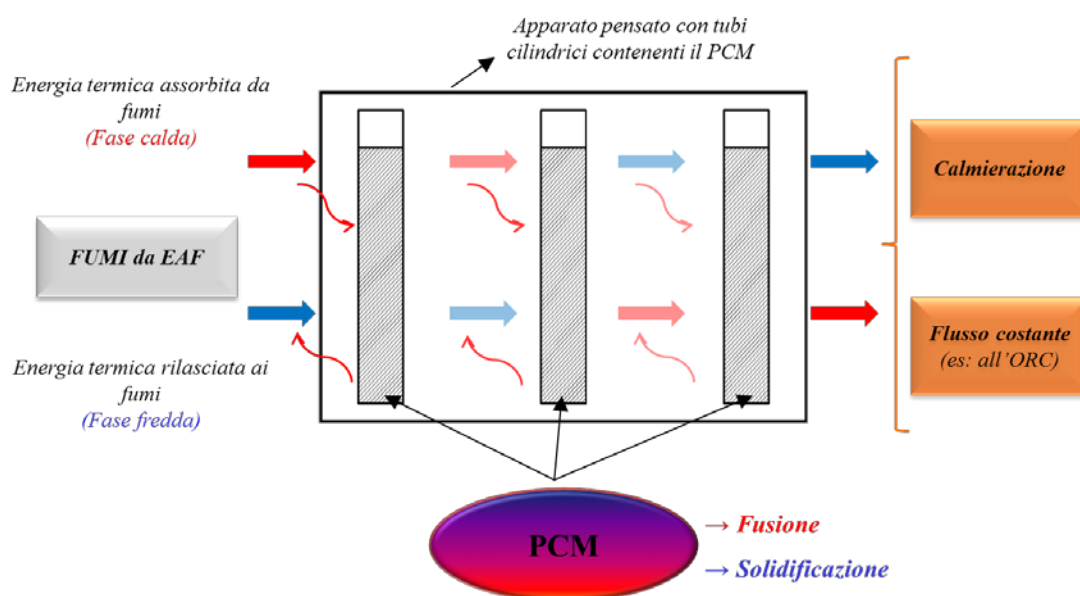


Figura 49 - Principio di funzionamento del sistema di recupero a PCM.

Si distinguono due fasi di funzionamento del PCM, rappresentate in Figura 50 e Figura 51:

- Fase "calda", cosiddetta per indicare che la temperatura dei fumi che attraversano il PCM è maggiore della temperatura di cambiamento di fase del materiale stesso; tale fase coincide con le operazioni di power-on del forno. Il calore dei fumi innalza la temperatura del PCM; quando si raggiunge la soglia di fusione del materiale, avviene il passaggio di questo dallo stato solido a quello liquido con accumulo di calore latente di fusione in un intervallo di tempo relativamente limitato; infine si ha un surriscaldamento del materiale.

## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

Nel dettaglio, l'energia termica del PCM aumenta linearmente all'aumento della temperatura sia durante la fase solida, sia durante quella liquida; la temperatura del PCM rimane invece costante durante l'accumulo di energia termica per il cambiamento di fase (calore latente di fusione).

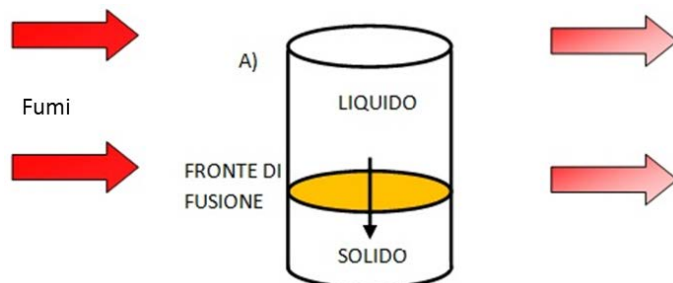


Figura 50 - Fase "calda": fusione del PCM.

- Fase "fredda", cosiddetta per indicare che la temperatura dei fumi che attraversano il PCM è minore della temperatura di cambiamento di fase del materiale; tale fase coincide con le operazioni di power-off del forno. La temperatura dei fumi è inferiore a quella di solidificazione della massa termica inerziale e si ha il passaggio di questa dallo stato liquido a quello solido con cessione di calore latente di solidificazione.

Nel dettaglio, l'energia termica del PCM diminuisce linearmente al diminuire della temperatura sia durante la fase liquida, sia durante quella solida; la temperatura del PCM rimane costante durante la cessione dell'energia termica per il cambiamento di fase (calore latente di solidificazione).

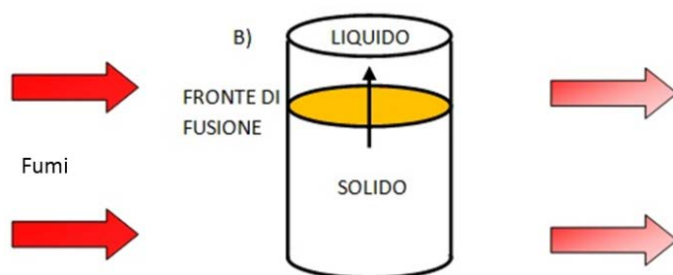


Figura 51 - Fase "fredda": solidificazione del PCM.

### 6.2 OBIETTIVI DEL DIFFERIMENTO TERMICO

Noto che l'obiettivo del differitore termico è la calmierazione dell'andamento dei fumi, è necessario:

- Diminuire la temperatura massima degli off-gas ( $T_{\max} \downarrow$ );
- Aumentare la temperatura minima degli off-gas ( $T_{\min} \uparrow$ );
- Minimizzare la differenza di temperatura ( $\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_{\min} \downarrow$ );
- Minimizzare la variabilità nel tempo della potenza termica in uscita dal differitore, proporzionale, a portata costante, alla velocità di variazione della temperatura: questo al fine di facilitare e ottimizzare le regolazioni a valle in un eventuale sistema di recupero.

### 6.3 TIPOLOGIE DEL SISTEMA DI RECUPERO

Sono state ideate e studiate due tipologie di sistemi di recupero energetico che utilizzano i materiali a cambiamento di fase (Figura 52):

- Sistema di recupero a PCM “passivo”;
- Sistema di recupero a PCM “attivo”.

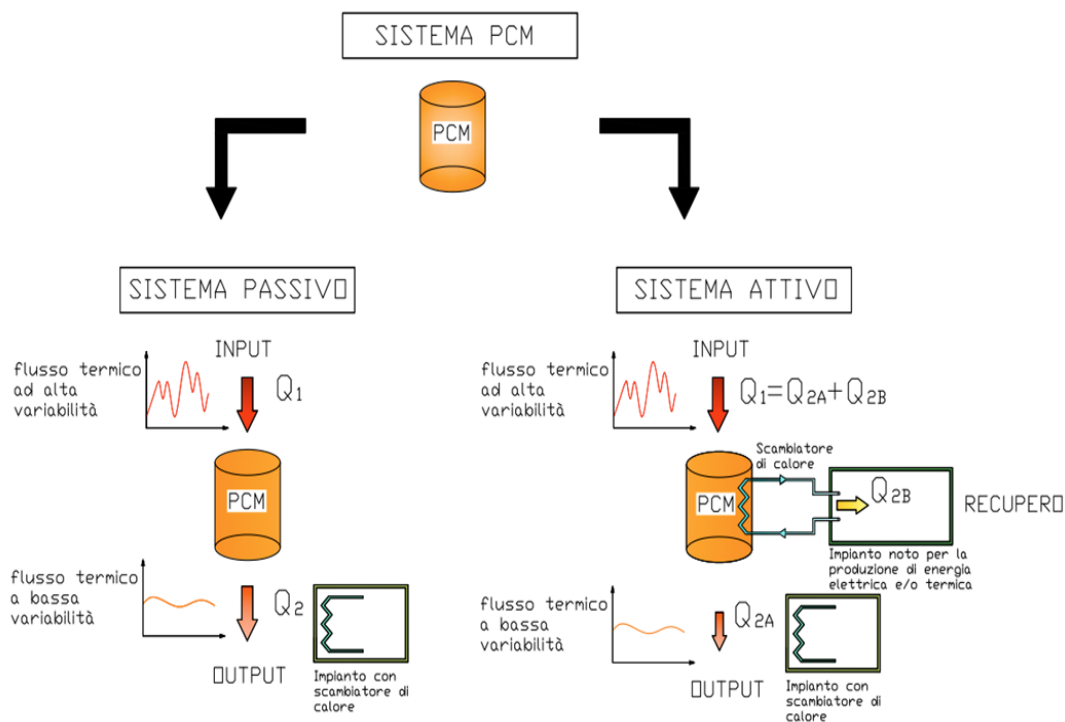


Figura 52 - Sistemi di recupero energetico con PCM “passivo” e “attivo”.

#### 6.3.1 Il sistema “passivo”

Il sistema “passivo” (n° brevetto MI2012A001815) prevede l'utilizzo dei materiali PCM esclusivamente per la calmierazione delle temperature e portate degli off-gas ai fini di un successivo recupero termico: il flusso dei fumi viene forzato attraverso le masse termiche inerziali opportunamente contenute nell'apparato, uno scambiatore di tipo tradizionale. In questo caso tutta l'energia termica  $Q_1$  assorbita dal materiale viene idealmente rilasciata ai fumi dopo la calmierazione,  $Q_2$ .

Il PCM scelto avrà una temperatura quanto più vicina possibile a quella media della corrente gassosa per garantire un ottimale assorbimento di calore durante la fase “calda” e una altrettanto adeguata cessione di calore durante la fase “fredda”.



## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

### 6.3.2 *Il sistema “attivo”*

Il sistema “attivo” (n° brevetto MI2012A001791) svolge due funzioni: la prima è quella di calmierare le temperature e portate dei fumi per un successivo recupero termico, analogamente a quanto svolto dal sistema “passivo”; la seconda è quella di permettere un ulteriore recupero tramite uno scambiatore di calore tradizionale posto a diretto contatto con il sistema a PCM. In questo caso si ottiene un disaccoppiamento del flusso termico ceduto dagli off-gas rispetto a quello prelevato dal fluido transfer dello scambiatore incorporato: una parte  $Q_1$  dell'energia termica accumulata dal PCM viene ceduta nuovamente ai fumi,  $Q_{2A}$ , mentre una parte,  $Q_{2B}$ , viene prelevata dal fluido transfer che andrà ad alimentare un sistema impiantistico di tipo noto per la produzione di energia. Il vantaggio derivante dall'effetto di calmierazione del flusso termico degli off-gas è un'alimentazione continua e pressoché costante del sistema di produzione energetica.

In questo caso è necessario che si mantenga una differenza di temperatura  $\Delta t$  rilevante tra temperatura di fusione del PCM e temperatura del fluido transfer così da favorire lo scambio termico: la temperatura di fusione del PCM deve essere sempre inferiore a quella media dei fumi per far sì che in continuo il PCM assorba e trasferisca calore al fluido transfer.

### 6.3.3 *Sistema di recupero analizzato: il sistema “passivo”*

Nel presente elaborato è stato analizzato in dettaglio l'apparato di recupero a PCM di tipo “passivo” per la calmierazione delle temperature e portate dei fumi da EAF. Questo tipo di apparato presenta una maggiore semplicità rispetto a quello “attivo” sia dal punto di vista processuale e termodinamico, sia da quello realizzativo: nel sistema passivo, infatti, i flussi di calore presenti sono solamente quelli tra gli off-gas e il PCM; nel sistema attivo invece devono essere considerati anche i flussi termici tra PCM e fluido termovettore dello scambiatore di calore incorporato. Inoltre lo studio del sistema passivo vale in parte anche per quello attivo: in entrambi i casi è prevista una calmierazione del flusso gassoso e un successivo recupero energetico mediante un opportuno impianto.

## 6.4 I MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE: DESCRIZIONE E SCELTA DEL MATERIALE IDONEO AL RECUPERO PROPOSTO

Come anticipato a inizio capitolo, i PCM sfruttano il fenomeno della transizione di fase solido-liquido: rendono possibile l'accumulo e il rilascio di un'elevata quantità di calore in un intervallo di tempo relativamente limitato.

L'assorbimento di calore (calore sensibile) provoca un aumento di temperatura proporzionale all'assorbimento stesso: maggiore calore assorbito corrisponde a un maggiore salto di temperatura. La relazione è legata dalla classica formula:

$$(5) \quad \Delta Q = m \times c_p \times \Delta T \text{ [J]}$$

dove Q è il calore sensibile [J], m rappresenta la massa di PCM [kg] e  $\Delta T$  la variazione finita di temperatura [K].

Quando si raggiunge e supera la temperatura di fusione del PCM (caratteristica di ciascun materiale) esso fonde accumulando calore sotto forma di calore latente di fusione (L), sottratto all'ambiente in cui il materiale è posto. Il calore Q viene fornito a temperatura costante ed è proporzionale alla quantità di sostanza (m) che ha cambiato fase e continua fino a che tutta la sostanza non ha terminato il passaggio di stato. In tal caso vale la formula:

$$(6) \quad Q_{\text{fusione}} = m \times L \text{ [J]}$$

Allo stesso modo, quando la temperatura scende al di sotto del valore soglia, il materiale solidifica cedendo calore (calore latente di solidificazione).

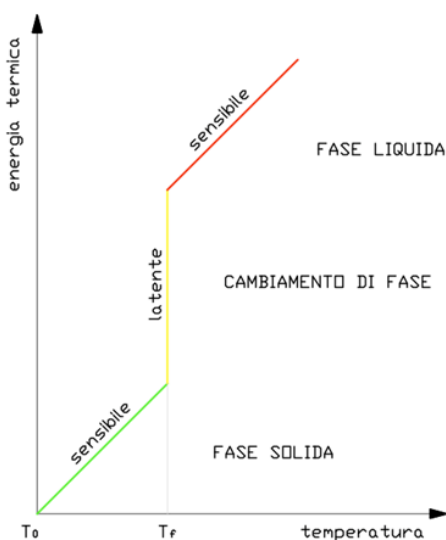


Figura 53 - Diagramma temperatura-energia dei PCM.

Lo schema in Figura 54 evidenzia l'assorbimento di energia nel periodo di accumulo  $T_a$  e la successiva cessione nel periodo di rilascio  $T_r$ . I due periodi sono diversi tra loro: si parla in questo caso di differimento temporale tra immagazzinamento e cessione di energia da parte della massa termica inerziale.

## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

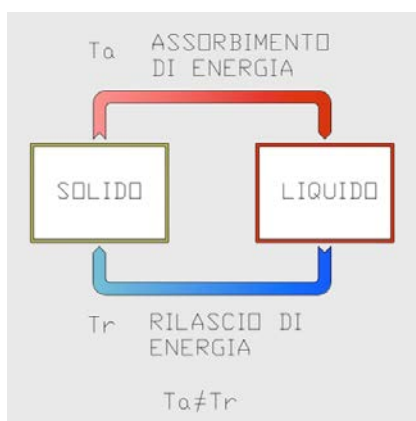


Figura 54 - Accumulo e cessione di energia dei PCM.

Ovviamente tutti i materiali esistenti possono essere considerati a cambiamento di fase essendo una caratteristica intrinseca della materia. In generale, però, si attribuisce il nome PCM a quei materiali in cui il periodo di cambiamento di fase richiede un'elevata quantità di energia, consentendo il loro utilizzo proprio a cavallo della temperatura di fusione. Non sono utilizzati in questo campo quei materiali in cui il cambiamento di fase avviene con una cessione di calore relativamente modesta in quanto non rispecchieranno la caratteristica voluta di mantenimento di una temperatura fissa per un intervallo di tempo elevato. A livello pratico, questo si traduce con la richiesta di avere un elevato calore latente di fusione; se così non fosse occorrerebbe una massa maggiore per assorbire la stessa quantità di energia.

I PCM sono largamente impiegati in ambito industriale per le caratteristiche sopracitate e perché rappresentano un buon compromesso tra semplicità costruttiva ed efficienza di calmierazione. Studi di Sharma et al. [60] e di Zalba et al. [61] dimostrano le proprietà dei PCM come efficaci accumulatori di energia termica (calore latente).

Per questo si è pensato all'impiego dei materiali a cambiamento di fase: un loro utilizzo porterebbe alla realizzazione di un sistema di recupero caratterizzato da un'alta efficienza e un basso impatto ambientale.

### 6.4.1 Scelta del PCM per il differitore termico inerziale

La scelta del materiale a cambiamento di fase più idoneo al sistema di recupero dai fumi dell'EAF viene fatta in base a considerazioni sia tecniche, sia economiche nel seguito esposte, ma è soprattutto legata al valore del coefficiente del calore latente di fusione e alla temperatura di fusione che dev'essere prossima a quella media dei gas nella sezione di recupero considerata. Come verrà ampiamente spiegato al paragrafo 7.1, la sezione scelta è la settling chamber: qui le temperature dei fumi oscillano tra i 400 °C e i 600 °C, a seconda dei processi industriali; nel caso dell'impianto studiato per valutare le potenzialità del recupero energetico, la temperatura media è di 600 °C.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 6.4.1.1 Analisi tecnica dei PCM

1. Innanzitutto sono stati considerati materiali basso fondenti, in particolare alcuni metalli non-ferrosi (alluminio, bismuto, cadmio, stagno, zinco, zolfo) e sali fusi.

Si è escluso il ricorso alle leghe metalliche per evitare possibili fenomeni di isteresi durante il cambiamento di fase comportando la possibile degradazione del materiale e quindi compromettendo la regolarità e l'efficienza del fenomeno.

Per quanto concerne i sali, invece, questi materiali, largamente utilizzati come fluido vettore negli impianti solari termodinamici, sono composti da una miscela per il 60% costituita da nitrato di sodio  $\text{NaNO}_3$  e per il 40% da potassio  $\text{KNO}_3$ . La loro temperatura di esercizio oscilla tra i 255 °C e i 550 °C: al di sotto dei 240 °C, infatti, la miscela inizia il processo di solidificazione passando dallo stato liquido a quello solido attraverso una serie di stati intermedi durante i quali si ha elevata viscosità; al di sopra dei 600 °C (temperatura critica), invece, possono insorgere problemi di corrosione e oltre i 620 °C c'è il pericolo di autoaccensione. Queste caratteristiche costituiscono dei problemi tecnologici e limitano l'impiego dei sali fusi negli apparati di recupero energetico. Tuttavia il costo contenuto ne legittima l'utilizzo (per esempio come PCM "secondari") al fine di migliorare il processo di accumulo termico.

2. I PCM sono stati quindi esaminati in base a:

- Temperatura di fusione: dev'essere quanto più vicino possibile a quella media dei fumi nella sezione esaminata (400-600 °C) per garantire un ottimale assorbimento di calore durante la fase "calda" e una altrettanto adeguata cessione di calore durante la fase "fredda";
- Temperatura di ebollizione: dev'essere molto più alta dei fumi (1500 °C);

La Tabella 12 riporta i valori di queste temperature e i grafici di Figura 55 e Figura 56 ne offrono un'interpretazione più immediata.

Tabella 12 - Temperature di fusione, ebollizione e critiche dei PCM.

	U.M.	Alluminio	Bismuto	Cadmio	Piombo	Stagno	Zinco	Zolfo	Sali fusi
<b>T fusione</b>	°C	660	271	320,9	327,4	231,9	419,5	112,8	238
<b>T ebollizione</b>	°C	2057	1560	767	1620	2602	907	444,6	-
<b>T critica</b>	°C	-	-	-	-	-	-	-	600

## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

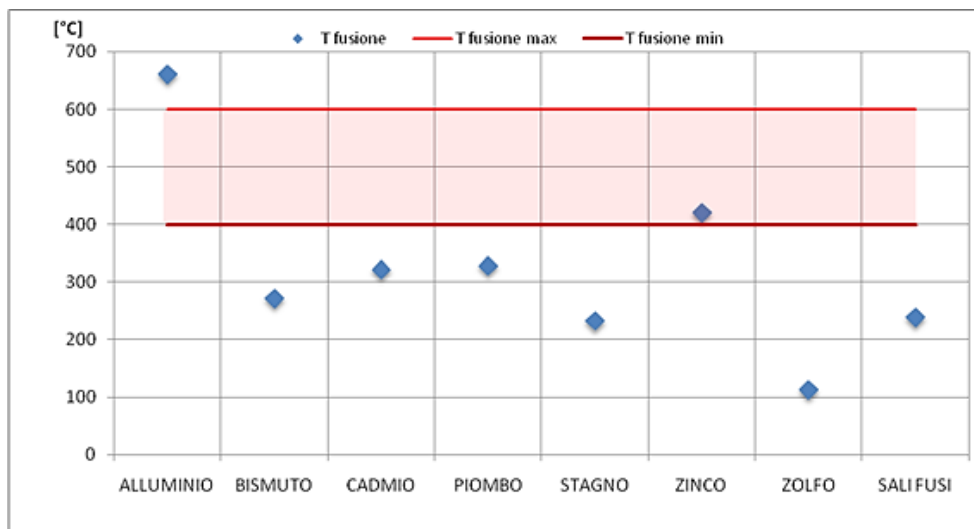


Figura 55 - Grafici con la temperatura di fusione dei PCM a confronto con quella media degli off-gas (linea rossa) nella settling chamber.

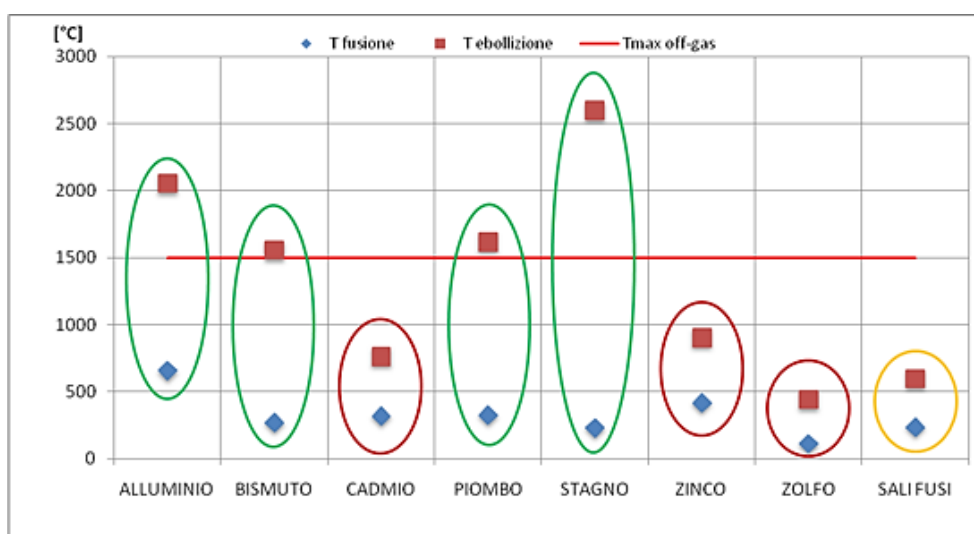


Figura 56 - Grafico con la temperatura di ebollizione dei PCM a confronto con quelle degli off-gas (linea rossa) nella settling chamber.

3. La scelta ricade poi sui materiali caratterizzati principalmente da:

- Alto calore latente: per immagazzinare quanto più calore possibile;
- Alta conducibilità termica: per poter scambiare il calore;
- Alta densità: per non avere ingombri troppo elevati, sempre importante in un'installazione.

Si ricorda a questo proposito che il meccanismo di scambio a PCM deve essere inserito nella linea fumi all'interno della settling chamber (paragrafo 7.1) e quindi non può essere troppo voluminoso. In particolare, questo meccanismo è pensato per essere utilizzato anche in linee di

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

fumi già esistenti, nelle quali non si possono fare modifiche sostanziali, ottenendo così un recupero energetico da quelle acciaierie ormai datate e molto energivore.

Da questa prima analisi vengono esclusi zolfo, zinco e cadmio per la loro bassa temperatura di ebollizione e il bismuto per la bassa conducibilità termica. L'analisi si concentra quindi sui tre materiali principali, alluminio, stagno e piombo, che soddisfano pienamente le esigenze richieste. Questi sono i PCM "primari" e vengono messi a diretto contatto con gli off-gas. Per quanto riguarda i sali fusi, un loro utilizzo non sarebbe conveniente date le loro caratteristiche termodinamiche. Tuttavia, vengono presi in considerazione per l'elevata capacità termica e il basso costo. Questi materiali potrebbero essere impiegati come PCM "secondari", in accoppiamento a uno "primario" (che garantisca temperature operative dei sali fusi inferiori ai 550 °C). In questo modo non insorgerebbero problemi di corrosione e autoaccensione e migliorerebbe lo scambio termico globale.

4. In ultima analisi i PCM vengono confrontati in base alle caratteristiche fisiche e termodinamiche quali:

- Conducibilità termica [ $W/(m \cdot K)$ ] in fase solida e liquida;
- Calore specifico [ $J/(kg \cdot K)$ ] in fase solida e liquida;
- Capacità termica [ $J/(dm^3 \cdot K)$ ] in fase solida e liquida;
- Calore latente volumico [ $J/m^3$ ] in fase solida e liquida;
- Calore latente massico [ $J/kg$ ];
- Densità [ $kg/m^3$ ] in fase solida e fase liquida;
- Diffusività termica [ $m^2/s$ ] in fase solida e liquida;
- Coefficiente di espansione volumica [%].

Questi parametri sono tutti ugualmente importanti poiché esprimono la capacità di ogni materiale di scambiare energia (conducibilità termica) e di accumularla (calore specifico, capacità termica e calore latente), la loro velocità di diffusione (diffusività termica), oltre alle caratteristiche fisiche quali densità e coefficiente di espansione volumica.

La Tabella 13 riporta i valori di questi parametri per i materiali considerati adatti all'apparato in esame e anche dell'acqua per avere un metro di paragone e di riferimento.

## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

Tabella 13 - Caratteristiche fisiche e termodinamiche di Al, Pb, Sn, Sali fusi e H<sub>2</sub>O.

		PCM PRIMARIO			PCM SECONDARIO	Riferimento
	U di misura	ALLUMINIO	PIOMBO	STAGNO	SALI FUSI	ACQUA
Conduttività termica fase solida	W/mK	215	33	67	2,1	-
Conduttività termica fase liquida	W/mK	90	16	35	0,54	0,6
Calore specifico fase solida	J/kgK	992	130	238	1200	-
Calore specifico fase liquida	J/kgK	1179	147	254	1530	4186
Capacità termica stato solido	J/dm <sup>3</sup> K	2529,6	1474	1733	2160	-
Capacità termica stato liquido	J/dm <sup>3</sup> K	2806,02	1567,02	1772,92	1836	4186
Calore latente volumico di fusione fase solida	kJ/m <sup>3</sup>	1009800	269892	436072	237600	-
Calore latente volumico di fusione fase liquida	kJ/m <sup>3</sup>	942480	253708	418102	158400	333000
Calore latente massico di fusione	kJ/kg	396	23,8	59,9	132	333
Densità fase solida	kg/m <sup>3</sup>	2550	11340	7280	1800	-
Densità fase liquida	kg/m <sup>3</sup>	2380	10660	6980	1200	1000
Coefficiente di espansione volumica	%	6,9	3,8	2,4	6,7	-
Diffusività termica fase solida	m <sup>2</sup> /s	8,49E-05	2,23E-05	3,86E-05	9,72E-07	-
Diffusività termica fase liquida	m <sup>2</sup> /s	3,20E-05	1,02E-05	1,97E-05	2,94E-07	1,43E-07

Per un confronto diretto si riportano gli istogrammi delle principali caratteristiche dei PCM considerati sia durante la fase solida, sia durante la fase liquida.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### Temperatura

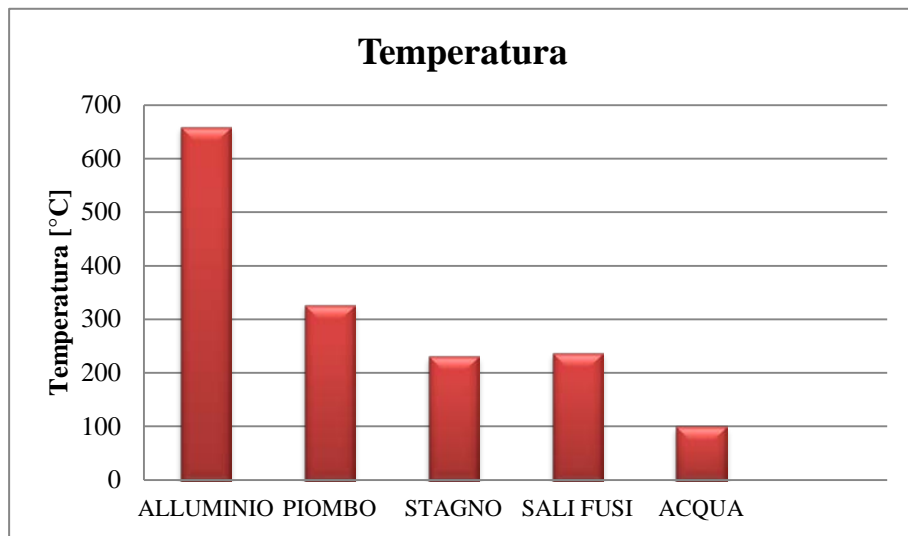


Figura 57 - Temperatura dei PCM e acqua.

Si vede come l'alluminio sia più adatto al recupero alle alte temperature in quanto la temperatura di fusione molto è più alta rispetto agli altri elementi. Seguono il piombo e lo stagno insieme ai sali fusi, adatti a recuperi a più basso contenuto exergetico.

### Conduttività termica dei PCM

Valori alti di questo parametro garantiscono un veloce e omogeneo riscaldamento del materiale: la quantità di PCM utilizzata nell'apparato di recupero diminuisce e di conseguenza i costi dello stesso. In figura si nota che l'alluminio è il materiale che presenta in assoluto la maggiore conduttività termica, i sali fusi invece presentano bassissimi valori di questo parametro.

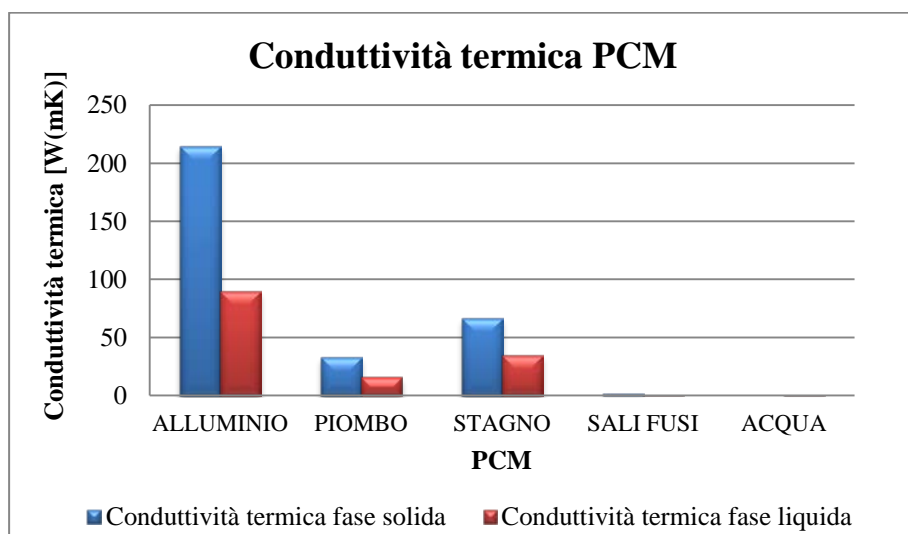


Figura 58 - Conduttività termica dei PCM e acqua.



## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

### Calore specifico PCM

Il calore specifico  $c_p$  di una sostanza è definito come la quantità di calore sensibile necessaria per innalzare di 1 K la temperatura di una unità di massa; la sua unità di misura nel sistema internazionale è [J/kgK]:

$$(7) \quad c_p = \frac{Q}{m \times \Delta T} \text{ [J/kgK]}$$

dove Q è il calore sensibile espresso in [J], m rappresenta la massa di PCM espressa in [kg] e  $\Delta T$  la variazione finita di temperatura in [K].

Maggiore è il calore specifico, minore sarà la quantità di materiale necessaria per arrivare al punto di fusione del materiale stesso. Si nota che l'alluminio e i sali fusi sono i PCM che presentano maggiori valori di questa grandezza, il piombo quelli minori.

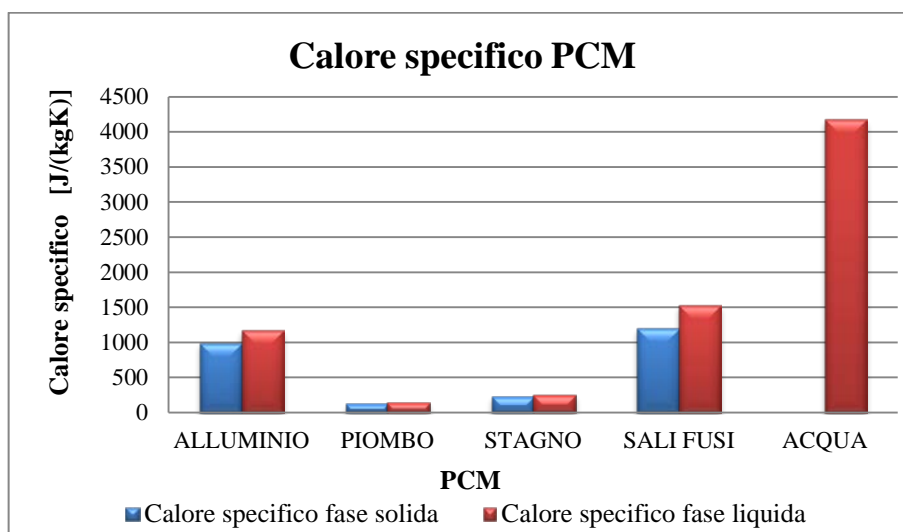


Figura 59 - Calore specifico dei PCM e acqua.

### Capacità termica dei PCM

La capacità termica rappresenta il rapporto fra il calore scambiato tra il corpo e l'ambiente e la variazione di temperatura che ne consegue. Anche per quanto riguarda questo parametro l'alluminio presenta valori maggiori sia per quanto riguarda la fase solida, sia per quella liquida. Il piombo ha il valore minore.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

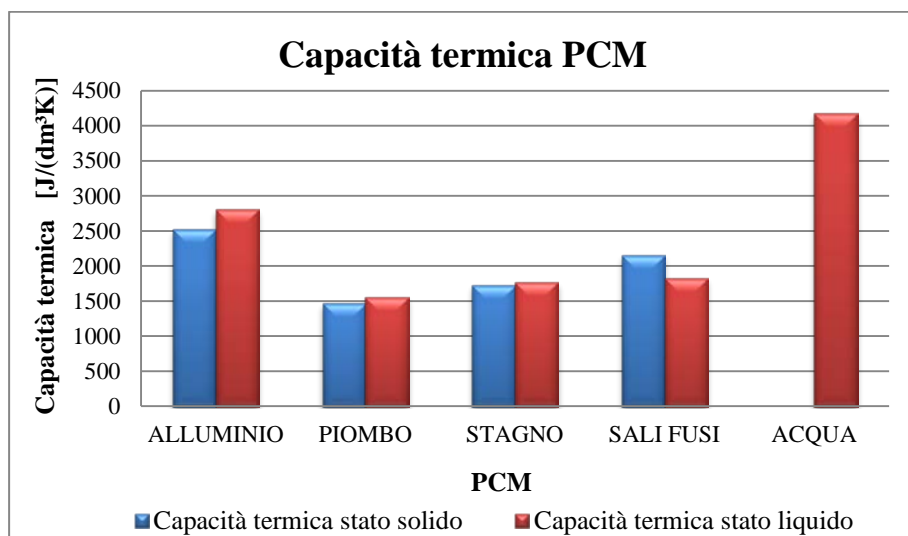


Figura 60 - Capacità termica dei PCM e acqua.

#### Calore latente di fusione dei PCM

Il calore latente associato a una trasformazione termodinamica è la quantità di energia necessaria al cambiamento di stato. Maggiore è il suo valore, minore è la quantità di materiale necessaria per assorbire una determinata quantità di calore. Un elevato calore latente equivale quindi ad avere dimensioni contenute dell'apparato e minori costi d'impianto. Si riporta il grafico del calore latente dei PCM, tra i quali spicca l'alluminio.

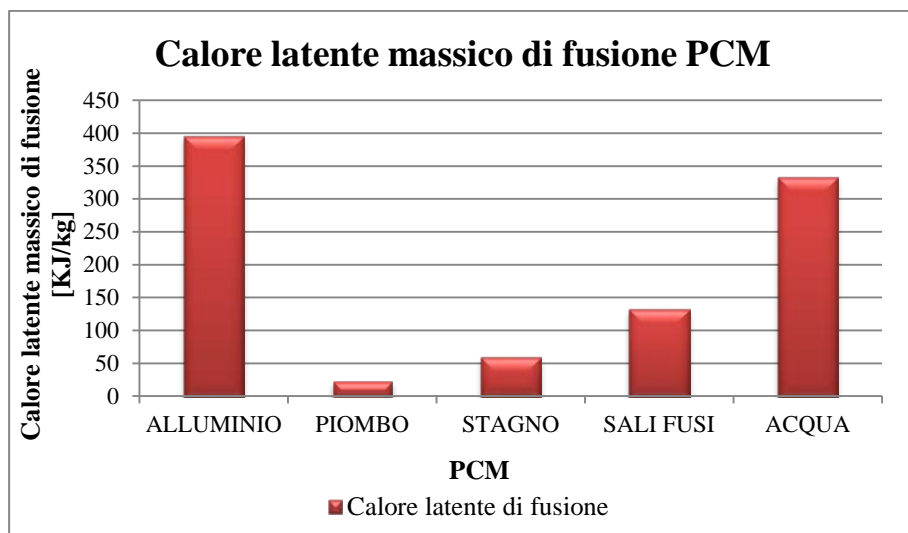


Figura 61 - Calore latente massico dei PCM e acqua.

## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

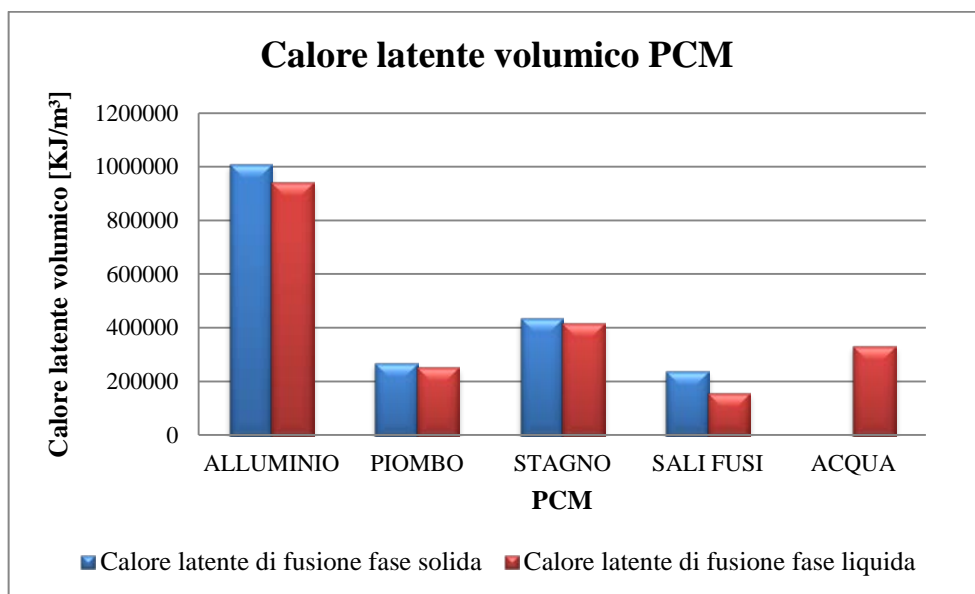
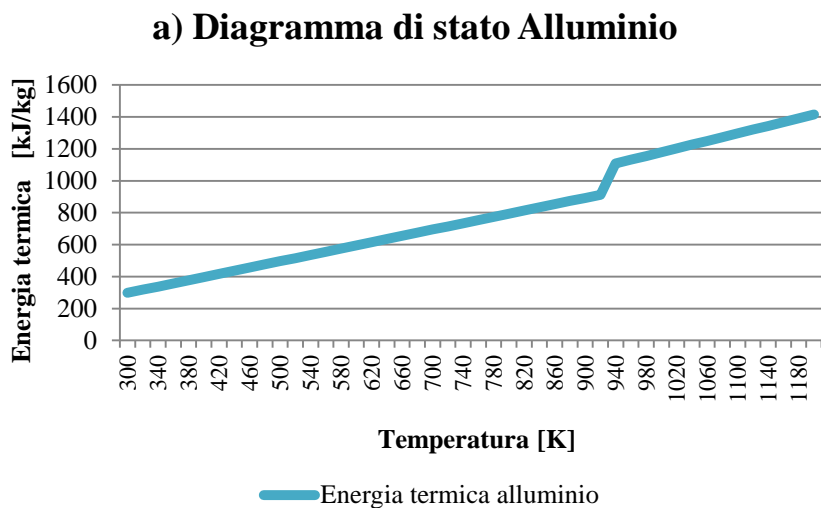


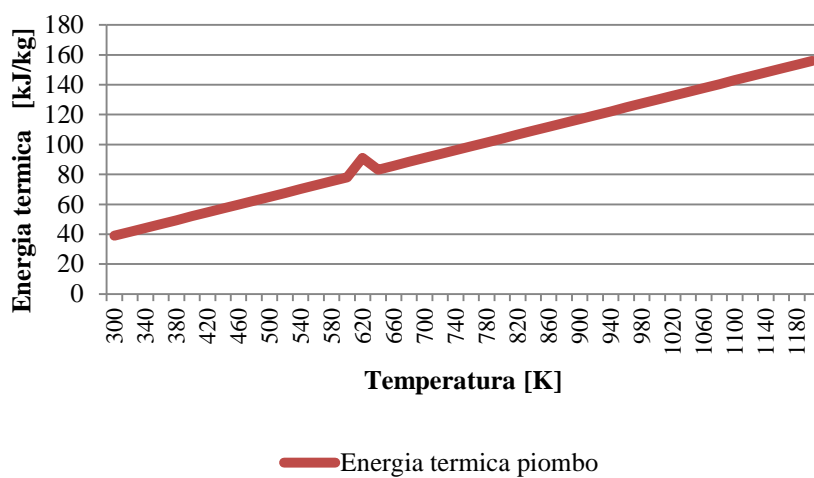
Figura 62 - Calore latente volumico dei PCM e acqua.

Il calore specifico e il calore latente dei PCM considerati viene mostrato nei diagrammi di stato riportati in Figura 63 a), b), c), d) e confrontati in e): l'alluminio e i sali fusi presentano i maggiori calori latenti massici di fusione.

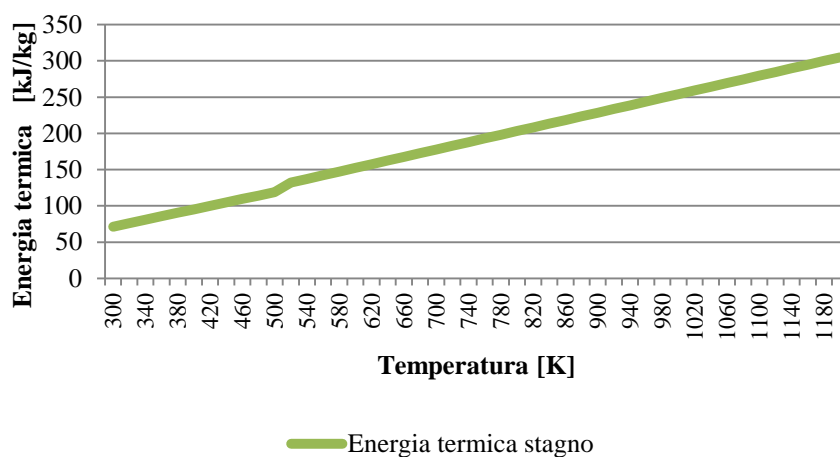


Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

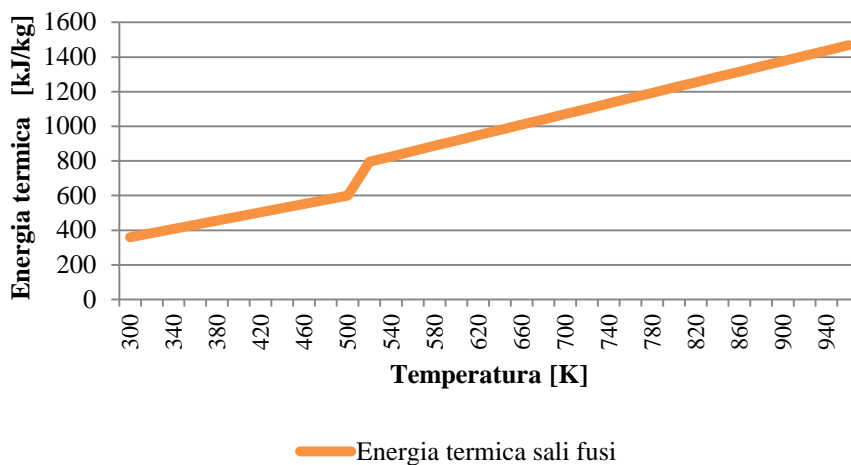
### b) Diagramma di stato Piombo



### c) Diagramma di stato Stagno



### d) Diagramma di stato Sali Fusi



## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

### e) Diagramma di stato dei PCM

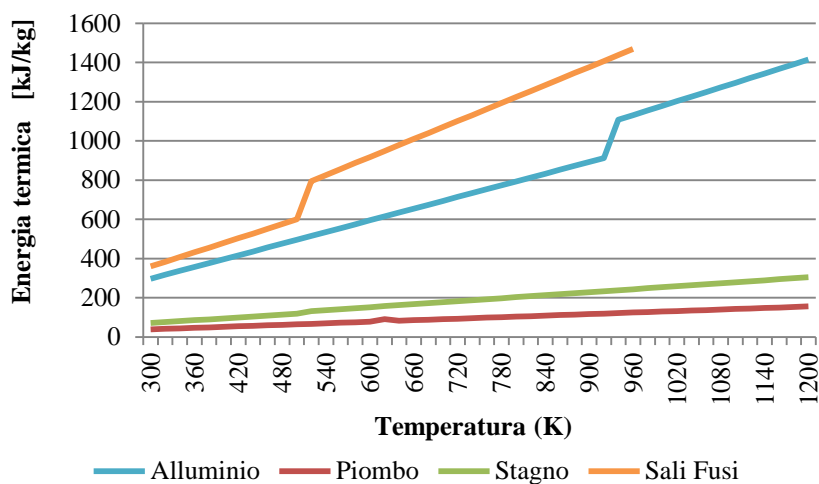


Figura 63 a), b), c), d), e) - Diagramma di stato di Al, Pb, Sn, Sali Fusi e loro confronto.

### Densità dei PCM

Questo parametro influisce notevolmente sulle dimensioni e quindi sui costi del sistema di contenimento dell'apparato stesso. Il piombo presenta i valori di densità maggiori sia in fase solida, sia in fase liquida; i sali fusi quelli minori.

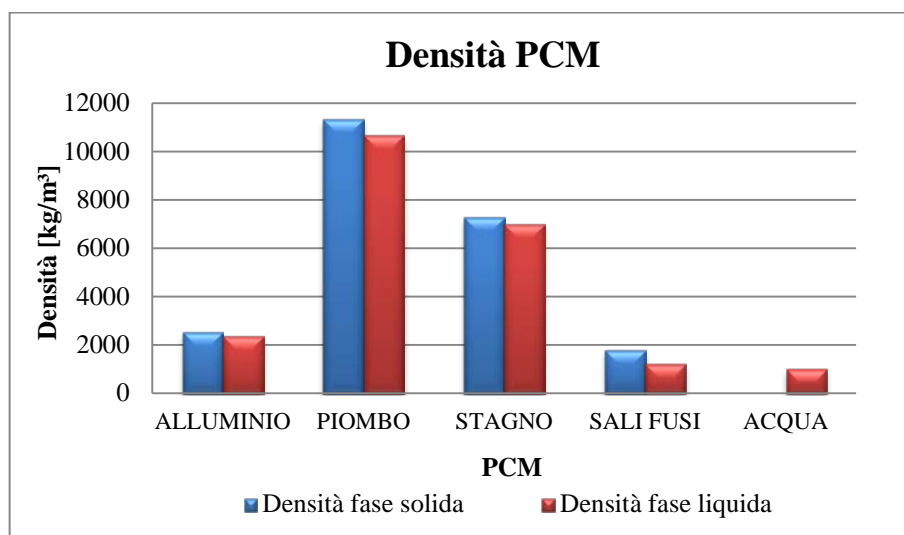


Figura 64 - Densità dei PCM e acqua.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### Diffusività termica dei PCM

La diffusività termica esprime la velocità con cui un materiale scambia calore con l'esterno e si misura in m<sup>2</sup>/s. Essa è definita come:

$$(8) \quad \alpha = \frac{\lambda}{\rho \times c_p}$$

dove  $\lambda$  rappresenta la conduttività termica espressa in [W/mK],  $\rho$  la densità in [kg/m<sup>3</sup>] e  $c_p$  il calore specifico in [J/kgK]. Maggiore è la velocità con cui un materiale cede o assorbe calore, migliore sarà la calmierazione degli off-gas. In base al grafico di Figura 65, l'alluminio si rileva un ottimo materiale da questo punto di vista dato l'alto valore di diffusività termica, a differenza dei sali fusi che presentano valori di molto bassi. Come precedentemente accennato, questo tipo di PCM può essere sfruttato come materiale secondario, la cui funzione non sia la diretta calmierazione delle temperature dei fumi, ma il miglioramento dell'efficienza del processo.

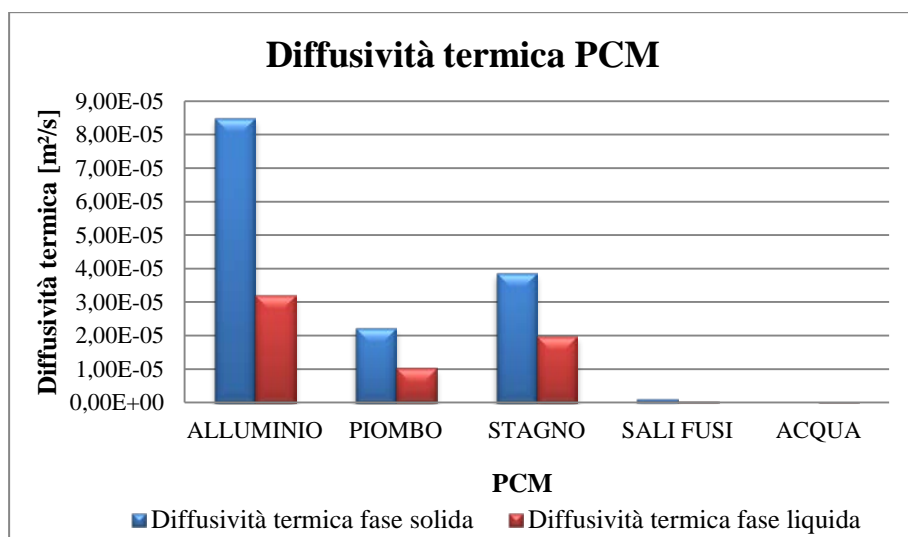


Figura 65 - Diffusività termica dei PCM.

### Coefficiente di espansione volumica dei PCM

Maggiore è il coefficiente di espansione volumica, maggiori saranno le problematiche riguardo un possibile sistema di contenimento del materiale. Si nota che l'alluminio e i sali fusi presentano i valori maggiori.

## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

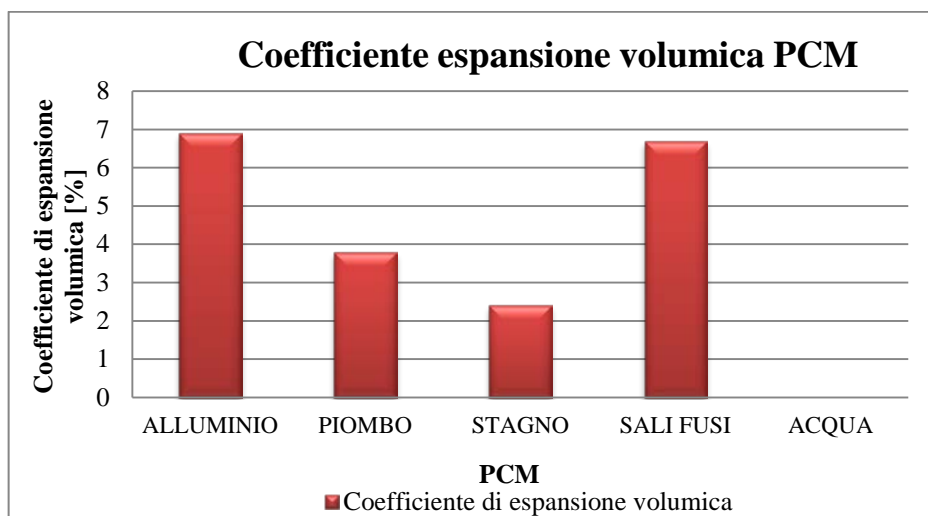
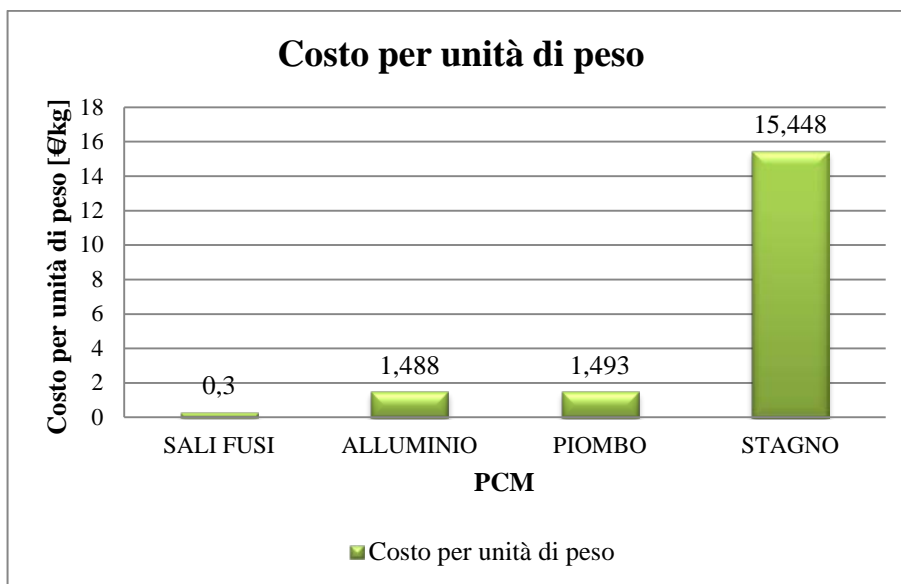


Figura 66 - Coefficiente di espansione volumica dei PCM.

### 6.4.1.2 Analisi economica dei PCM

L'analisi tecnica dei PCM deve essere affiancata da una economica.

Data l'elevata massa da usare, il costo della materia prima può essere non indifferente e incidere molto sul computo finale inficiando i vantaggi energetico-ambientali derivanti da un recupero. In Figura 67 si riportano i costi dei PCM per unità di peso, volume e calore latente con riferimento alla quotazione del 2012 del London Metal Exchange [63].



Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

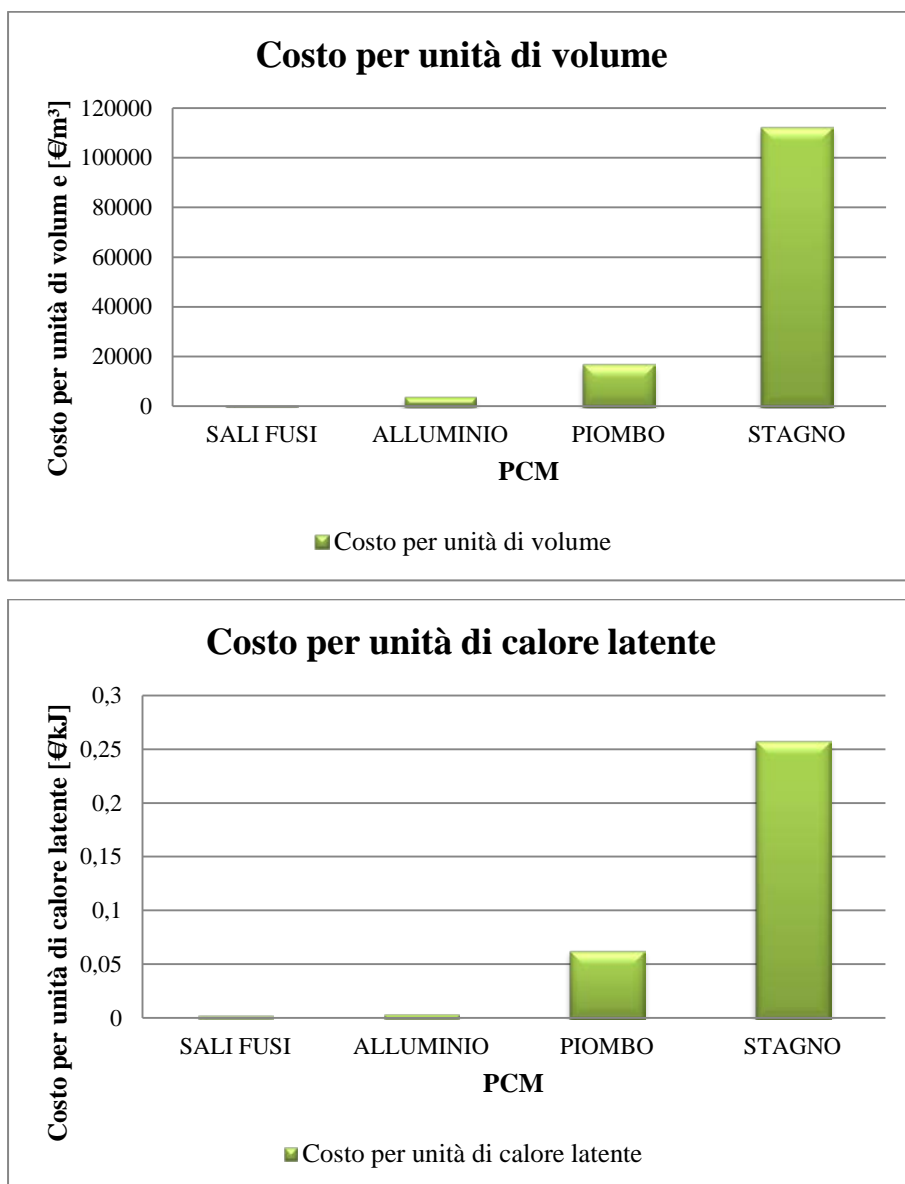


Figura 67 - Costo dei PCM per: a) unità di peso; b) unità di volume; c) calore latente. Fonte: [62].

#### 6.4.1.3 Confronto e scelta tra i PCM

In base all'analisi tecnica ed economica, confrontando i diversi PCM, si evince che:

- L'alluminio si rivela un ottimo materiale da utilizzare per il recupero termico dati gli alti valori di conduttività termica, capacità termica, calore latente di fusione e diffusività termica. Inoltre, presenta bassi valori di densità e costi. Tuttavia, il coefficiente di espansione di questo materiale è molto elevato e potrebbe portare a problemi di contenimento;
- Il piombo è caratterizzato da alti valori di densità, bassi valori di conduttività termica, capacità termica e calore latente. Presenta maggiori svantaggi rispetto all'alluminio, ma minori valori di coefficiente di espansione. Il costo del materiale è contenuto;



## 6. Nuovo apparato a PCM per il recupero energetico

- Lo stagno si colloca in una posizione intermedia rispetto all'alluminio e al piombo risultando un materiale discreto per questo tipo di applicazioni: presenta infatti valori medi di ogni proprietà. Tuttavia, presenta costi molto elevati;
- I sali fusi hanno grandi potenzialità grazie agli alti valori del calore specifico e della capacità termica e un costo assai contenuto, ma anche grandi criticità come i bassi valori di conduttività e calore latente.

Si può concludere quindi che il PCM più adatto ai sistemi di recupero sia senza dubbio l'alluminio: esso presenta un'elevata efficacia termodinamica, rispetto per esempio ai sali fusi, e costi contenuti, a differenza del piombo e dello stagno. Tuttavia, l'elevata reattività chimica del materiale allo stato fuso con l'ossigeno potrebbe rappresentare un serio problema tecnologico. In fase di progettazione quindi, dovrà essere condotta un'attenta analisi tecnologica che definisca l'ambiente di lavoro e la collocazione più sicura del materiale (ambiente inerte e contenitori a tenuta stagna); nel caso dell'apparato indagato l'alluminio è inserito in uno scambiatore ermeticamente sigillato (come spiegato in dettaglio al paragrafo 7.4).



## 7 DIFFERITORE TERMICO INERZIALE “PASSIVO”

Lo studio del differitore termico inerziale “passivo” contenente alluminio come PCM è stato concepito nei seguenti punti all’interno della linea fumi di un EAF tradizionale:

- Individuazione della sezione ottimale per il recupero termico: settling chamber;
- Dati di input al sistema sperimentali e relativi a una sezione rappresentativa della settling chamber:
  - composizione degli off-gas;
  - analisi dell’andamento della loro temperatura, valutata in termini di varianza e deviazione standard;
  - stima del possibile effetto calmierante del PCM sulle temperature in termini di potenza ed energia accumulabile dalla massa;
  - approssimazioni;
- Stima della quantità di PCM necessaria per una completa calmierazione dei fumi a partire dalla valutazione dell’energia accumulabile dagli stessi; considerazioni sulle approssimazioni del calcolo;
- Configurazione di base proposta per il differitore termico inerziale e suo dimensionamento sulla base della quantità di PCM considerata;
- Simulazioni del comportamento termodinamico del PCM e del differitore nel suo complesso per:
  1. *valutare l’effetto calmierante (riduzione delle oscillazioni di temperatura/portata in uscita dal differitore);*
  2. *creare un modello generale da utilizzarsi nei diversi casi specifici;*
- Si riportano le ipotesi/semplificazioni introdotte nelle simulazioni, le simulazioni per diverse configurazioni del differitore, l’influenza dello sporcamento (polveri) sull’apparato e le conclusioni;
- Configurazione tecnologica finale proposta per il differitore.

I dati di input sperimentali sugli off-gas sono stati forniti dalla società *ECO-D Environmental Systems S.r.l* di Udine [39] e fanno riferimento a un EAF da 70 t a due ceste con ciclo TTT di circa 70 min (68 min per l’esattezza).

Si precisa che l’analisi assume un carattere del tutto generale e può essere estesa a impianti simili se opportunamente contestualizzata, considerando le determinate condizioni operative del forno in esame e le caratteristiche termofluidodinamiche dei fumi.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## 7.1 LA SEZIONE DI INTERESSE: LA SETTLING CHAMBER

La Figura 68 rappresenta un possibile schema di un'acciaiera con forno elettrico ad arco e linea di trattamento e depurazioni fumi tradizionali, come descritta nel Capitolo 4.

Si possono individuare quattro zone caratterizzate da diversi livelli di temperatura:

- Zona A ad altissima temperatura che comprende il forno elettrico ad arco e il quarto foro;
- Zona B ad alta temperatura che comprende il tronchetto mobile e il gap;
- Zona C a media temperatura che comprende la settling chamber;
- Zona D a bassa temperatura che comprende i sistemi di raffreddamento aggiuntivi e il ciclone.

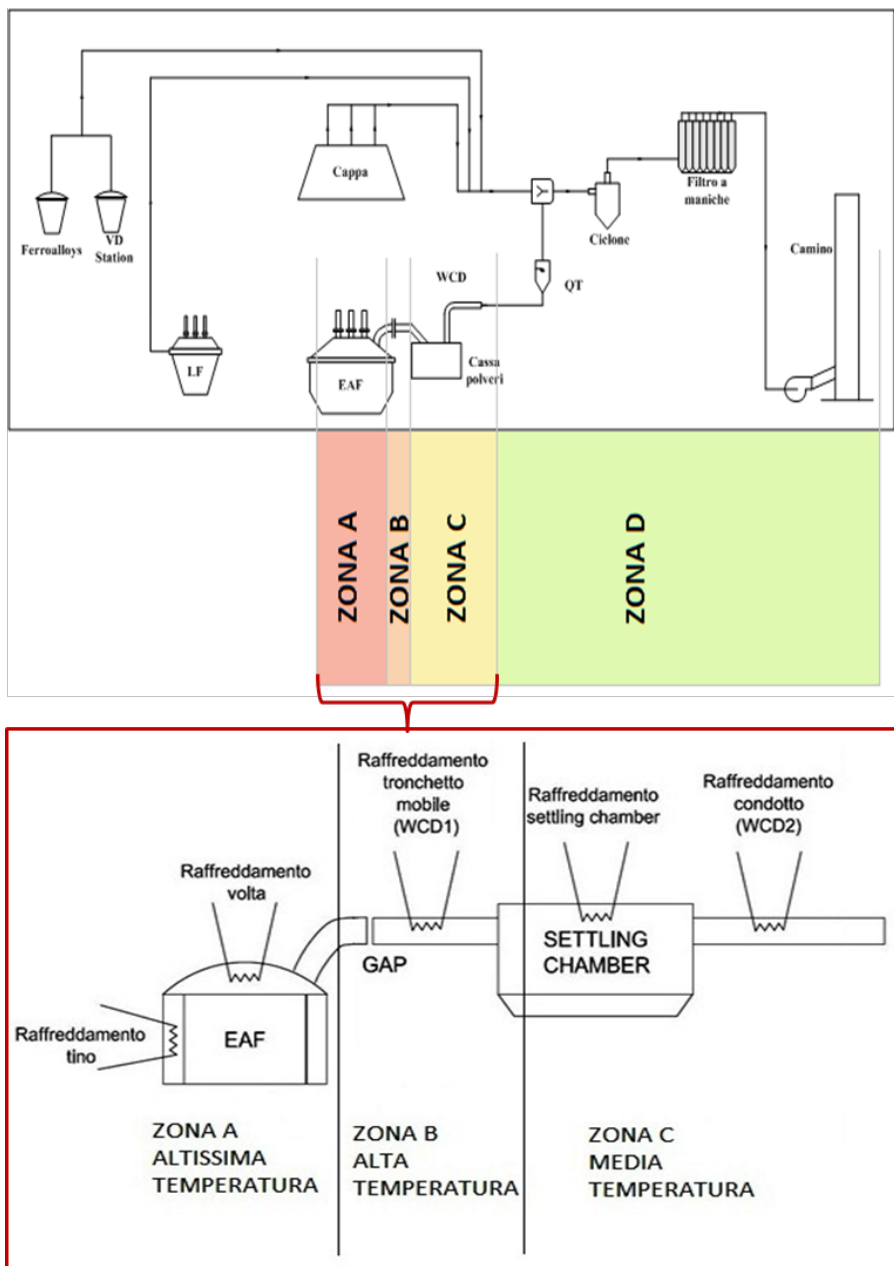


Figura 68 - Schema di una possibile acciaiera: in evidenza le quattro macro zone a differente temperatura e il particolare delle prime tre.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

Nelle Zone A e B gli off-gas devono essere raffreddati tramite pannelli di raffreddamento ad acqua (water jacket); le temperature dei fumi sono molto elevate, con picchi di oltre 1500 °C, e possono compromettere la resistenza strutturale del forno e dell'impianto di depurazione. In queste zone è difficile intervenire principalmente per due motivi:

- Limiti tecnologici: le alte temperature in gioco richiedono materiali con elevata resistenza termica e alla corrosione;
- Limiti di installazione: la presenza di zone critiche, come il tronchetto mobile, impediscono l'inserimento di un eventuale apparato a PCM.

Nella Zona D vengono effettuati raffreddamenti spinti sui fumi mediante QT o scambiatori FDC/NDC che portano le temperature attorno ai 200 °C. Un ulteriore abbassamento delle temperature si ha poi col miscelamento dei fumi primari e secondari per consentire un'adeguata temperatura di ingresso ai filtri (tipicamente 120-130 °C). Le temperature in gioco sono quindi troppo basse per poter effettuare un efficiente recupero termico. Pertanto, anche questa parte dell'impianto non è adatta al posizionamento di un sistema di recupero.

Nella Zona C i fumi presentano temperature ancora alte; con riferimento all'impianto esaminato, si hanno minime attorno ai 200 °C durante le fasi di apertura della volta e massime attorno ai 1000 °C in quelle di fusione; la temperatura media si assesta attorno ai 600 °C. La zona a media temperatura risulta ottima per l'inserimento di un apparato di recupero termico e l'eventuale conseguente produzione di energia elettrica. La scelta di collocare il differitore termico inerziale all'interno della settling chamber è dovuta a seguenti principali fattori:

- Il raffreddamento che avviene in questa zona attraverso i condotti WCD non è molto spinto e i fumi sono ancora molto caldi e quindi sfruttabili ai fini di un recupero termico;
- Si è completata la combustione del CO e H<sub>2</sub> contenuti negli off-gas ed è stata intercettata gran parte delle componenti solide disperse nei fumi;
- Non sono necessari ulteriori sistemi di rimozione polveri oltre a quelli già presenti dato che le polveri intercettate dall'apparato si sommano a quelle normalmente prodotte nella settling chamber;
- La camera permette un facile inserimento dell'apparato di recupero senza particolari modifiche alla struttura esistente.

Alcune considerazioni:

- Si esclude la possibilità del recupero dei flussi termici dissipati attraverso i circuiti di raffreddamento nella zona ad altissima e alta temperatura; per quanto detto i fumi possiedono ancora temperature sufficientemente elevate per un recupero termico nella settling chamber dove inoltre avviene la post-combustione e questo aumenta la quota di energia recuperabile;
- Collocare l'apparato di recupero all'interno della camera di sedimentazione comporta anche numerosi problemi: le elevate temperature potrebbero alterare le proprietà dei materiali e causare la fuoriuscita di materiale fuso e l'elevato sporcamento potrebbe intasare l'apparato e ridurre l'effetto calmierante. Questi aspetti tuttavia non costituiscono grosse limitazioni come verrà

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

spiegato in dettaglio nel paragrafo 7.4.2: infatti, il PCM verrà inserito in tubi sigillati di acciaio inox di tipo austenitico (materiale caratterizzato da elevata resistenza termica e quindi capace di lavorare in ambienti ad alta temperatura), opportunamente distanziati in modo da garantire l'integrità termica dell'apparato e una corretta calmierazione.

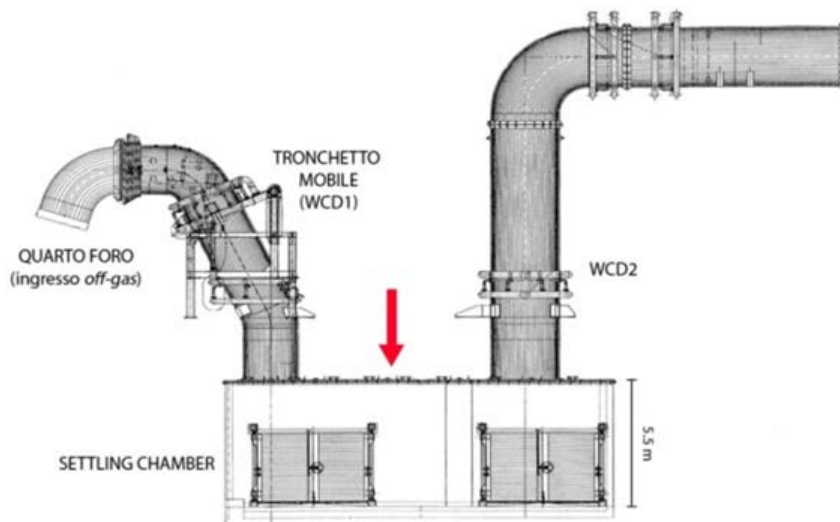


Figura 69 - Sezione scelta per l'inserimento dell'apparato di recupero: settling chamber. Fonte: [39].

## 7.2 DATI DI INPUT

Si considerano le caratteristiche degli off-gas in una sezione rappresentativa della settling chamber di un tipico processo con EAF di capacità 70 t, a due ceste di carico e ciclo tap-to-tap di 68 min (e suddiviso a intervalli di 117 s). I dati derivano da misurazioni sperimentali fornite dalla società *ECO-D Environmental Systems S.r.l* di Udine [39].

### 7.2.1 Premessa: considerazioni sull'affidabilità dei dati di input, variabilità delle caratteristiche dei fumi e potenza recuperabile nella sezione di interesse

Ci si pone il problema dell'affidabilità e validità dei dati dei fumi utilizzati come input al sistema e che dipendono significativamente dalla tecnologia utilizzata per il loro rilievo. Come detto, nella trattazione si è fatto affidamento ai dati forniti da *ECO-D Environmental Systems S.r.l* [39] in merito alle caratteristiche degli off-gas nella settling chamber e i valori misurati sono stati confrontati con quelli reperibili in letteratura. In particolare si è fatto riferimento ai rilievi effettuati da Nardin et al. [42] - [43] effettuati durante la prima metà degli anni '80 sugli impianti industriali delle *Ferriere Nord - Gruppo Pittini* di Osoppo (Udine). L'indagine era stata condotta per studiare le caratteristiche chimico-fisiche dei fumi di scarico in tutte le fasi del processo fusorio e il calore sensibile della corrente gassosa al fine di individuare il punto più idoneo a ospitare eventuali sistemi di recupero energetico e di attuare un controllo accurato degli effetti inquinanti. La sezione C con la settling chamber risultò essere la migliore per quanto illustrato al paragrafo 7.1.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

L'impianto di riferimento è del tipo rappresentato in Figura 70 con potenzialità nominale del forno di 70 t, 3 ceste di carico e TTT superiore agli 80 min.

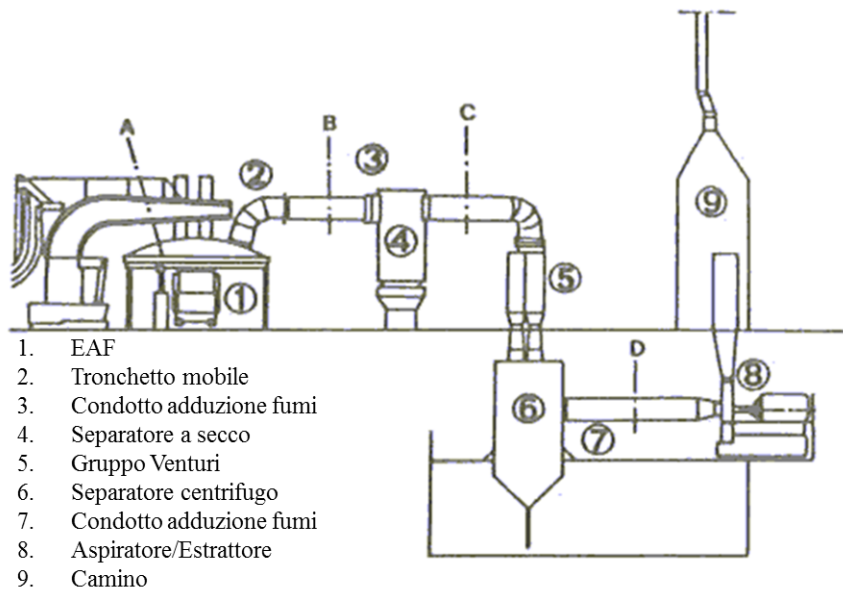


Figura 70 - Schema linea trattamento e depurazione fumi dell'acciaieria Ferriere Nord S.p.A. - Gruppo Pittini, anni '80. Adattato da: [42].

In Figura 71 si riportano le fasi di un ciclo TTT dell'EAF e gli andamenti di portata, temperatura e calore specifico dei fumi emessi durante il ciclo nella sezione C.

Le temperature medie dei fumi sono state registrate sperimentalmente durante il ciclo TTT; oscillano moltissimo, con grandi differenze tra picchi superiori ai 600 °C e momenti invece in cui la temperatura scende a meno di 200 °C in corrispondenza alle diverse fasi di power-on e power-off del forno. La portata è abbastanza costante e si attesta attorno ai 200000 Nm<sup>3</sup>/h.

*Sono le condizioni operative oltre al tipo di rottame che determinano l'andamento della temperatura dei fumi e la sua grande variabilità.*

Una cosa importante di questo grafico è l'andamento del coefficiente  $c_p$  nel tempo ciclo; tale valore è molto altalenante e rispecchia abbastanza bene quello delle temperature. Occorre tener conto di ciò in fase di progettazione del sistema di recupero dagli off-gas (non si può far affidamento ad un valore medio).

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

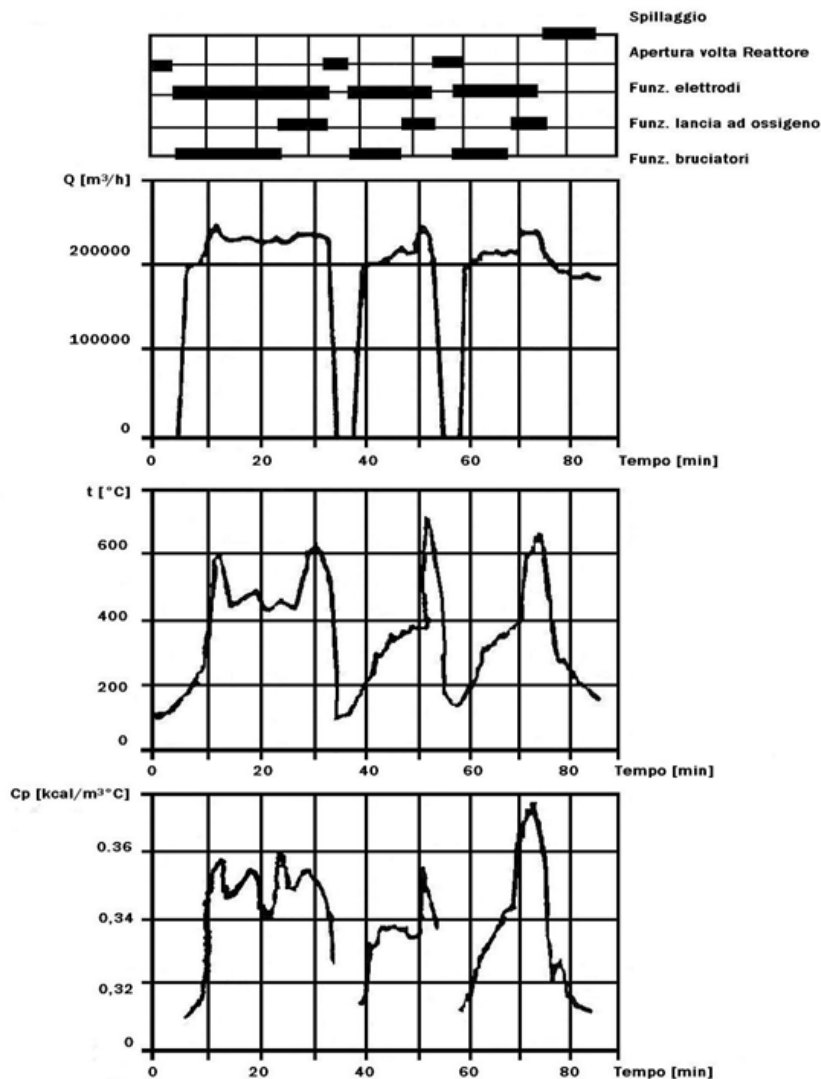


Figura 71 - Rilevamenti di portata ( $Q$ ), temperatura ( $t$ ) e calore specifico dei fumi ( $c_p$ ) nella sezione C dell'impianto considerato: EAF 70 t, 3 ceste di carico, TTT 80 min. Fonte [42].

La potenza immagazzinata da questi fumi è molto alta e dipende dalle componenti della miscela degli off-gas. Può essere calcolata con la seguente formula:

$$(9) \quad q = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \sum_{j=1}^n \frac{c_{p,ij} * X_j}{100} * Q_i t_i$$

con:

- $\tau$  durata del ciclo TTT [min];
- $n$  numero di componenti la miscela gassosa;
- $c_{p,ij}$  calore specifico del componente j-esimo [ $J/Nm^3K$ ];
- $X_j$  contenuto percentuale del componente j-esimo nella miscela gassosa;
- $Q_i$  portata dei fumi nella sezione considerata [ $Nm^3/h$ ];
- $t_i$  temperatura dei fumi nella sezione considerata [K].



## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

I valori della potenza sono ottenuti a intervalli di un minuto in cui è stata discretizzata l'intera durata dell'operazione di misura e l'andamento è rappresentato nella seguente figura, unitamente a quello dell'entalpia dei fumi.

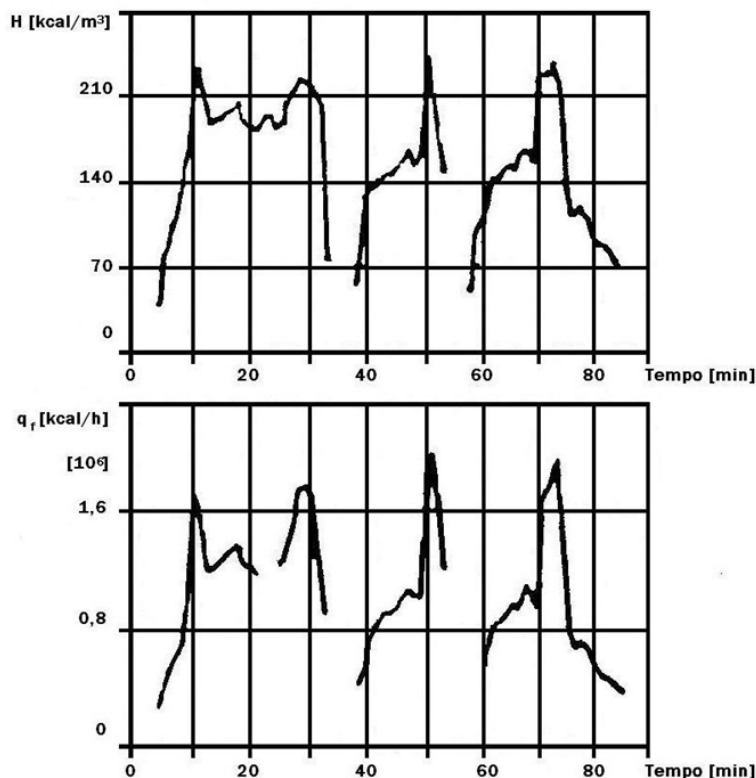


Figura 72 - Andamento di entalpia e potenza dei fumi nella sezione C dell'impianto considerato: EAF 70 t, 3 ceste di carico, TTT 80 min. Fonte: [42].

I valori misurati, per quanto datati, trovano comunque riscontro nelle misurazioni effettuate da ECO-D Environmental Systems S.r.l. [39]. Le uniche differenze si riscontrano nella durata del ciclo TTT (68 min, intervalli di 117 s) e nel numero di ceste utilizzate (2 anziché 3).

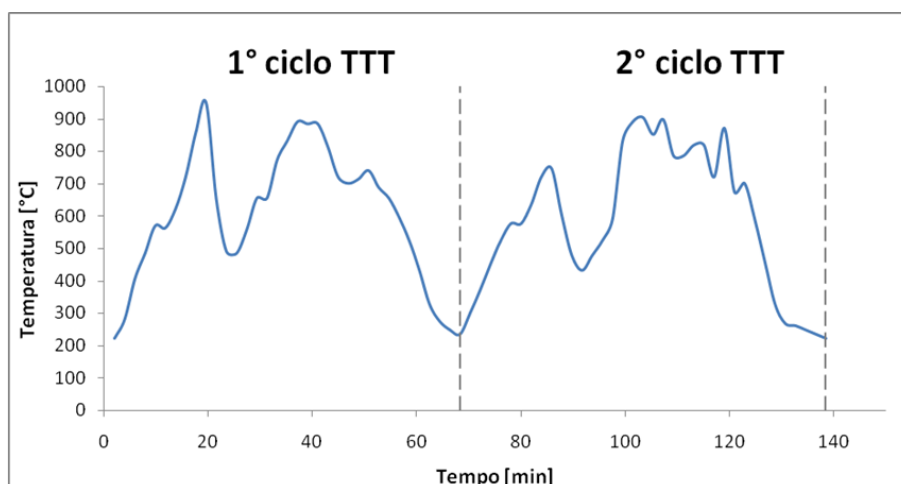


Figura 73 - Andamento della temperatura nella settling chamber riferita alle misurazioni di ECO-D Environmental Systems S.r.l.: EAF 70 t, due ceste di carico, due cicli TT da 68 min. Fonte: [39].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Il rilevamento di Nardin non viene preso in considerazione nei calcoli effettuati sul sistema di recupero proposto, ma è servito sia per evidenziare e analizzare nel dettaglio la variabilità delle temperature e portate dei fumi, sia per avere un ordine di grandezza delle potenze in gioco e dell'energia potenzialmente recuperabile dai fumi. Inoltre dai dati sperimentali provenienti dalle due distinte fonti si può notare come *la temperatura media dei fumi e l'energia contenuta in essi (proporzionale all'area sottesa dal profilo di temperatura) presentino sempre gli stessi ordini di grandezza e una discreta ripetibilità in diversi cicli TTT*. Questo permette di affermare con buona approssimazione che in presenza di un sistema di recupero energetico *può essere garantita una fornitura tendenzialmente costante di energia*.

D'altra parte è doveroso ricordare che le caratteristiche termodinamiche dei fumi al primario e i tempi ciclo possono variare sensibilmente in funzione del tipo di acciaio prodotto.

### **7.2.2 Analisi della composizione degli off-gas**

#### Fumi primari

Per la composizione dei fumi primari in ingresso alla settling chamber si fa riferimento ai dati reperiti in letteratura, come spiegato al paragrafo 3.2: i principali componenti degli off-gas sono quelli riportati in Tabella 3 al paragrafo 3.2.1. Per quanto riguarda gli elementi gassosi si considerano le percentuali riportate nella Tabella 4 dello stesso paragrafo, ma con una semplificazione, ovvero considerando nulle quelle di H<sub>2</sub> e CO: infatti, dato che lo scopo della trattazione è di recuperare la maggior quantità di energia, si è ipotizzato che l'entrata di aria dal gap sia la minore possibile per completare la post-combustione, ottenendo così la minima diluizione possibile; ne consegue che tutta la CO e H<sub>2</sub> abbiano completato le loro reazioni di post-combustione. Ad ogni modo, i residui incombusti (ppm) hanno rilevanza dal punto di vista ambientale, ma non tecnico-energetico.

#### Fumi secondari

Anche in questo caso, per le caratteristiche dei fumi secondari si fa riferimento alla letteratura (paragrafo 3.3) e si considerano i dati della Tabella 5.

#### Polveri

Per quanto riguarda le polveri, queste, come anticipato al paragrafo 3.4, sono legate al tipo di acciaio prodotto e al processo. Come verrà descritto al paragrafo 7.5.3.3, le simulazioni per studiare l'andamento del PCM nel differitore vengono dapprima fatte senza considerare lo sporco causato dalle polveri; questo fenomeno è valutato separatamente ipotizzando il deposito di uno strato di polvere pari a 1 cm sull'apparato.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

### 7.2.3 *Analisi dell'andamento della temperatura degli off-gas come dato di input al sistema e approssimazioni*

In Tabella 14 sono riassunte le proprietà medie dei fumi esaminati nella sezione rappresentativa della settling chamber, quali la temperatura, la velocità, la portata, la viscosità, la densità, il calore specifico e la conducibilità termica; in Figura 74 è riportato l'andamento della temperatura dei fumi durante un ciclo TTT di 68 min, suddiviso a intervalli di 117 s.

Tabella 14 - Proprietà dei fumi nella sezione rappresentativa della settling chamber. Fonte: [39].

<b>PROPRIETÀ DEI FUMI</b>			
Temperatura media (approssimata)	$T_m$	°C	600,0
Temperatura massima	$T_{max}$	°C	950,8
Temperatura minima	$T_{min}$	°C	223,0
Velocità	$v$	m/s	10
Portata volumetrica teorica	$\dot{Q}_t$	Nm <sup>3</sup> /h	100.000
Portata volumetrica reale	$\dot{Q}_r$	m <sup>3</sup> /h	319.780
Portata massica	$M$	Kg/s	36,11
Viscosità dinamica	$\mu$	Kg/ms	3,30E-05
Densità teorica	$\rho_t$	Kg/Nm <sup>3</sup>	1,3
Densità reale	$\rho_r$	Kg/m <sup>3</sup>	0,41
Calore specifico	$c_p$	J/Nm <sup>3</sup> K	1330
Conducibilità termica	$\lambda$	W/mK	0,051

*Non vengono invece presi in considerazione l'irraggiamento, la polverosità e altre caratteristiche chimico-fisiche degli off-gas, salvo poi tenerne conto in termini di sporcamiento e variazioni indotte da questi fattori sullo scambio termico.*

*Un'ulteriore approssimazione fatta in tutta la trattazione riguarda la portata degli off-gas che è stata considerata costante: questo ha semplificato il calcolo delle energie in gioco senza per altro discostarsi molto dalla realtà del fenomeno.*

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

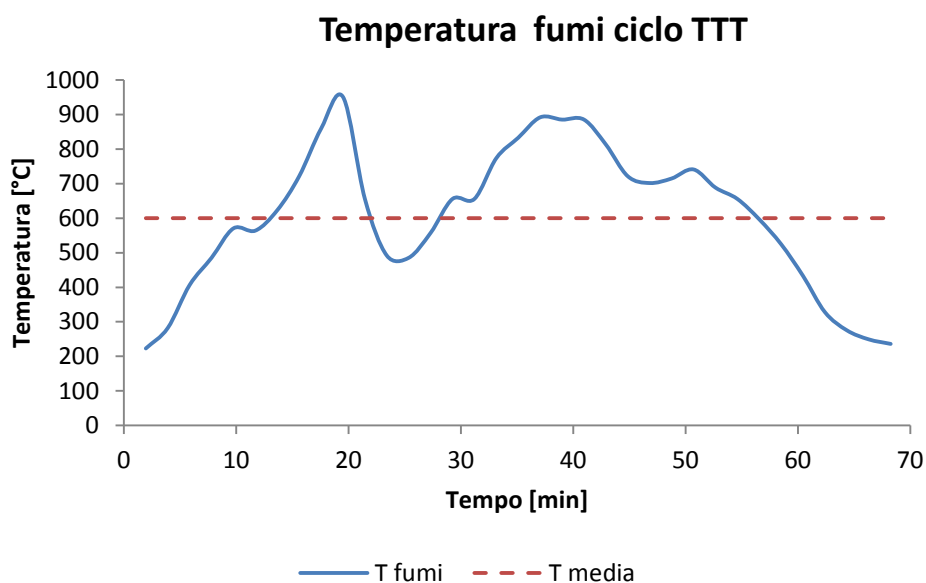


Figura 74 - Andamento della temperatura in un ciclo TTT di 68 min (intervalli di 117 s) nella sezione rappresentativa della settling chamber.

Osservando il grafico della temperatura si distinguono chiaramente le fasi caratteristiche di un ciclo fusorio: all'aumento della temperatura dei fumi a partire da 200 °C corrisponde la fusione della prima cesta; si nota un piccolo calo di temperatura verso i 600 °C dovuto all'apertura dei bruciatori. La temperatura continua poi ad aumentare raggiungendo quasi i 1000 °C in seguito alla post-combustione. A fusione completata, gli elettrodi vengono spenti e la volta aperta per consentire l'introduzione della seconda cesta; a questa fase corrisponde una diminuzione della temperatura dei fumi che raggiungono i 500 °C. Ha inizio quindi la seconda fusione con il relativo aumento della temperatura: anche in questo caso si nota un calo verso i 700 °C dovuto all'apertura dei bruciatori e un picco di temperatura pari a circa 900 °C in seguito alla post-combustione. Quando l'acciaio risulta completamente fuso gli elettrodi vengono spenti e alzati per consentirne lo spillaggio dall'EBT: si ha in questo caso una nuova diminuzione della temperatura dei fumi. Un'ulteriore abbassamento si verifica in corrispondenza della chiusura dell'EBT e dell'apertura della volta per l'inizio di un nuovo ciclo fusorio.

*Come già affermato, è il processo che definisce l'andamento delle temperature degli off-gas e ne caratterizza la grande variabilità, cosa che rende molto difficile qualsiasi intervento in termini di recupero termico.*

Occorre quindi ridurre la variabilità della temperatura dei fumi (e di conseguenza dell'energia termica) minimizzando la differenza tra la temperatura massima e quella minima raggiunte ( $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ ). Per quantificare questa variabilità si fa riferimento a due grandezze statistiche, varianza e deviazione standard, che permettono di valutare gli scostamenti tra le temperature istantanee e la temperatura media dei fumi.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

La varianza di una variabile aleatoria  $x$  fornisce una misura di quanto siano vari i valori assunti dalla variabile, ovvero di quanto si discostino dal valore atteso. Per il calcolo della varianza si considera la seguente relazione:

$$(10) \quad s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, n$$

con  $x_i$  che rappresenta il valore  $i$ -esimo di temperatura,  $\bar{x}$  il valore medio di temperatura,  $n$  il numero totale di valori rilevati.

La deviazione standard o scarto quadratico medio misura la variazione dei valori dalla media, descrivendo come i valori tendano a disporsi attorno alla loro media. Se la variazione standard è piccola si ha un fitto addensamento dei valori attorno alla loro media, se è grande i valori sono lontani da essa.

$$(11) \quad s = \sqrt{s^2}$$

I valori di queste grandezze riferiti all'andamento di temperatura di Figura 74 e calcolati in base alle equazioni (10) e (11) sono riportati in Tabella 15.

Tabella 15 - Varianza e deviazione standard riferiti all'andamento della temperatura nella sezione considerata della settling chamber.

<b>VARIANZA</b>	$s^2$	41508,6
<b>DEVIAZIONE STANDARD</b>	$s$	203,7

*Minimizzare la differenza tra la temperatura massima e quella minima raggiunta dai fumi per permettere un recupero termico si traduce nella riduzione della varianza e della deviazione standard.*

### 7.2.4 Analisi della potenza e dell'energia accumulabile dal differitore

Per valutare la possibilità e funzionalità del differimento termico è necessario valutare anche le potenze in gioco e quindi l'energia che l'apparato è in grado di assorbire nella settling chamber.

La potenza termica dei fumi è proporzionale alla temperatura degli stessi e presenta pertanto un andamento del tutto analogo: l'alta variabilità delle temperature si ripercuote sull'energia termica disponibile rendendone lo sfruttamento poco efficiente e conveniente.

L'energia termica degli off-gas è in prima approssimazione proporzionale all'area sottesa alla curva di temperatura, indicata in colore blu in Figura 75.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

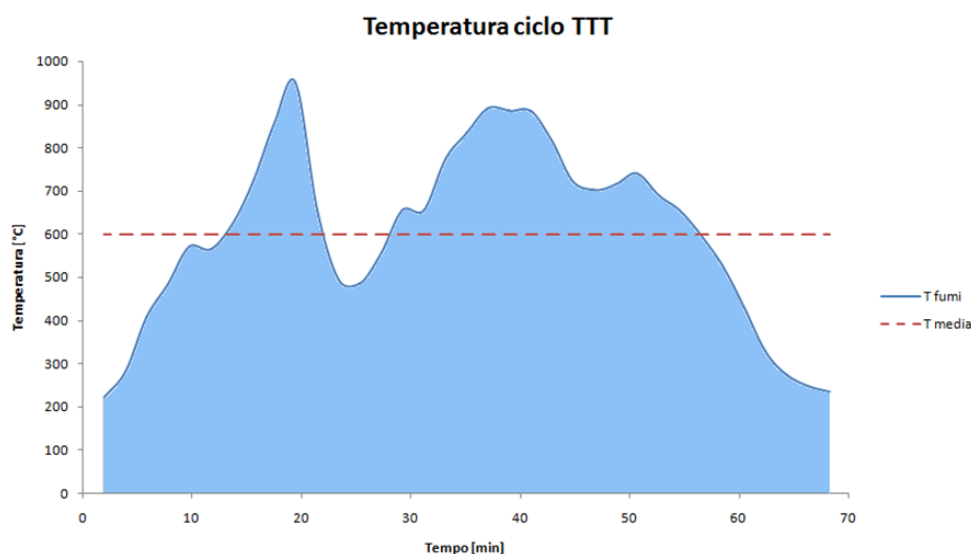


Figura 75 - Area proporzionale all'energia termica degli off-gas nella sezione della settling chamber.

L'area compresa tra il profilo di temperatura e la temperatura media dei fumi (area viola in Figura 76) approssima idealmente l'energia termica scambiabile con il materiale a cambiamento di fase dell'apparato di recupero, considerando una temperatura di fusione di questo prossima a quella media degli off-gas.

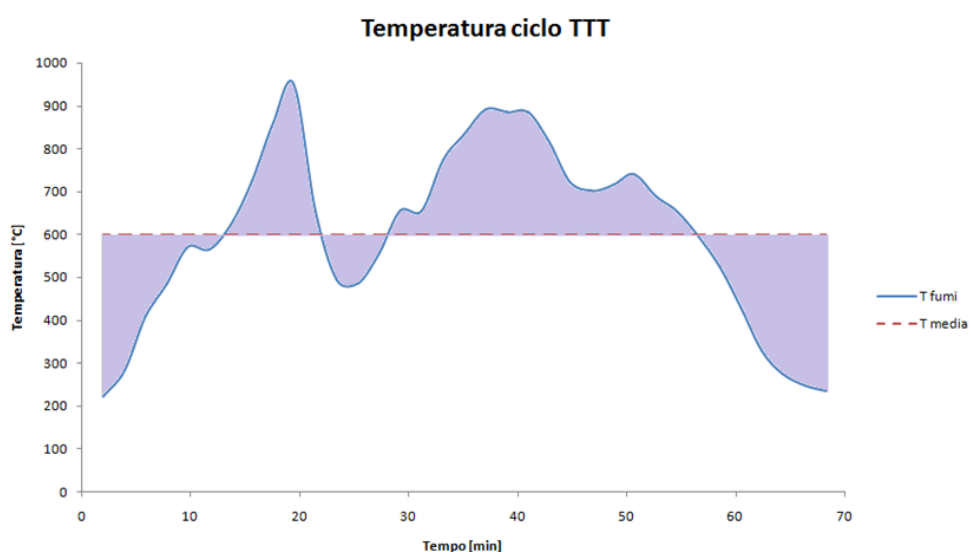


Figura 76 - Area proporzionale all'energia scambiata tra off-gas e PCM nella sezione della settling chamber: caso ideale (temperatura di fusione del PCM coincidente con quella media degli off-gas).

Le parti di quest'area che si trovano al di sopra della temperatura media dei fumi, aree verdi della Figura 77, approssimano l'energia accumulabile dal PCM: in questo caso, infatti, la temperatura dei fumi è maggiore di quella di fusione del materiale a cambiamento di fase, che passa dallo stato solido a quello liquido accumulando energia sotto forma di calore latente di fusione (fase "calda"). Quando invece la temperatura dei fumi è minore di quella di fusione del PCM, questo solidifica cedendo

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

calore latente di solidificazione (fase “fredda”). L’energia termica ceduta dal materiale sotto forma di calore latente di solidificazione è rappresentata dalle aree rosse della Figura 77.

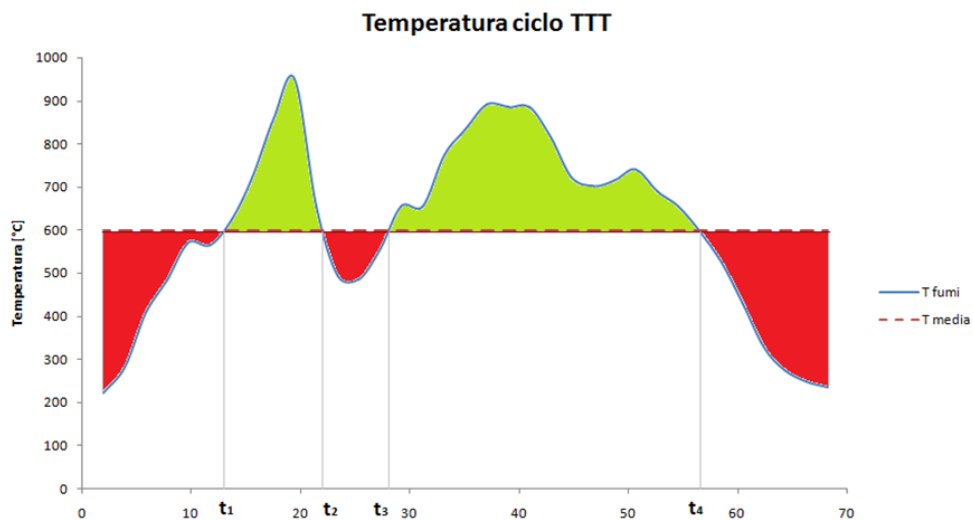


Figura 77 - Area proporzionale all’energia scambiata nel caso ideale: verde accumulata dal PCM, rossa ceduta dal PCM.

L’analisi è stata condotta dal punto di vista ideale, ovvero ipotizzando che la temperatura di fusione del PCM coincida con quella media degli off-gas. In realtà c’è una differenza, come si può vedere in Figura 78: avendo scelto l’alluminio come materiale a cambiamento di fase, la sua temperatura di fusione è di 660 °C, maggiore di quella media dei fumi di 600 °C.

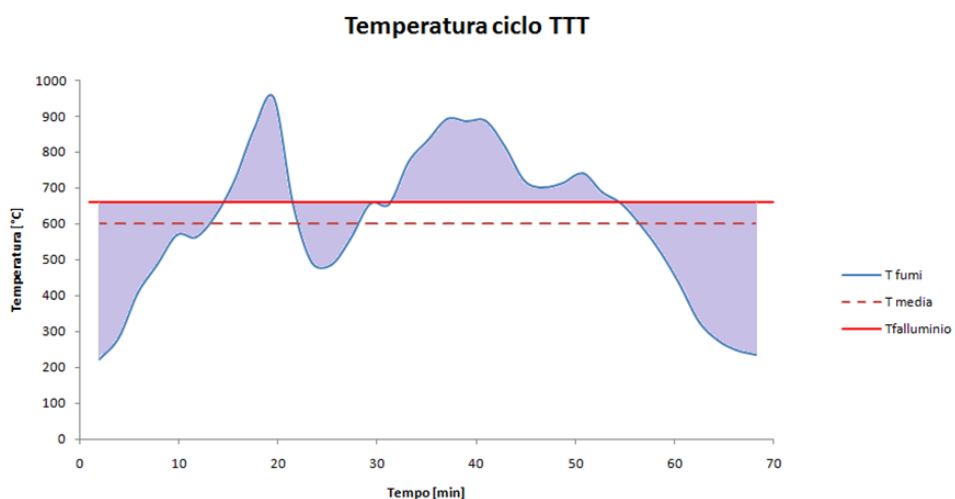


Figura 78 - Area proporzionale all’energia scambiata tra off-gas e alluminio nella sezione della settling chamber: caso reale.

Nel caso reale l’energia scambiabile tra off-gas e PCM rimane la stessa (area viola in Figura 78), ma variano le energie accumulabili e rilasciabili dal materiale a cambiamento di fase. L’energia

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

accumulabile dall'alluminio durante la fase calda (area verde in Figura 79) è minore rispetto al caso precedente, mentre l'energia rilasciata ai fumi durante la fase fredda (area rossa in Figura 79) aumenta

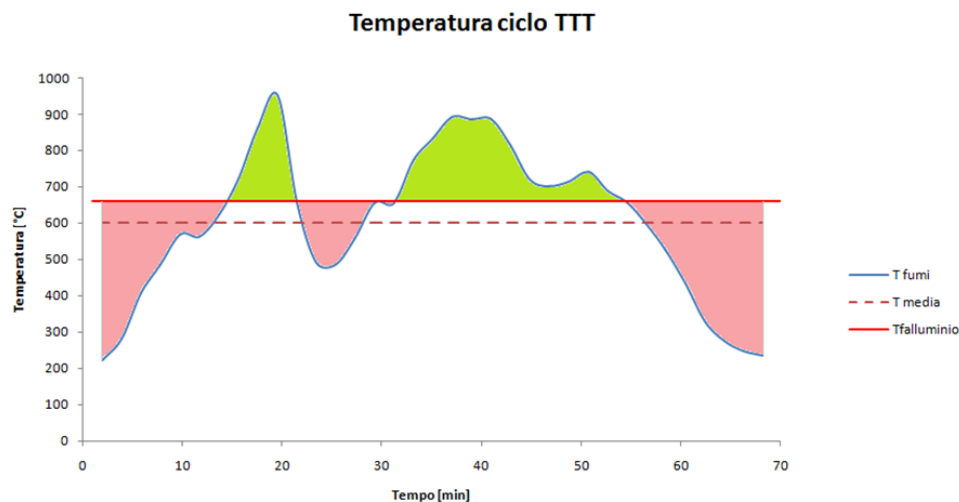


Figura 79 - Area proporzionale all'energia scambiata nel caso reale: verde accumulata dall'alluminio, rossa ceduta dall'alluminio.

Si riporta nel grafico di Figura 80 la curva di durata della temperatura: ogni punto rappresenta i minuti di un intero ciclo TTT in cui la temperatura degli off-gas risulta maggiore a quella indicata dal punto stesso nel grafico. Interpolando tali punti si ottiene la curva di durata che rappresenta la probabilità di avere fumi a una certa temperatura. Conoscere la frequenza con cui gli off-gas si presentano a una determinata temperatura risulta molto utile ai fini dello studio dell'effetto calmierante dell'apparato in esame.

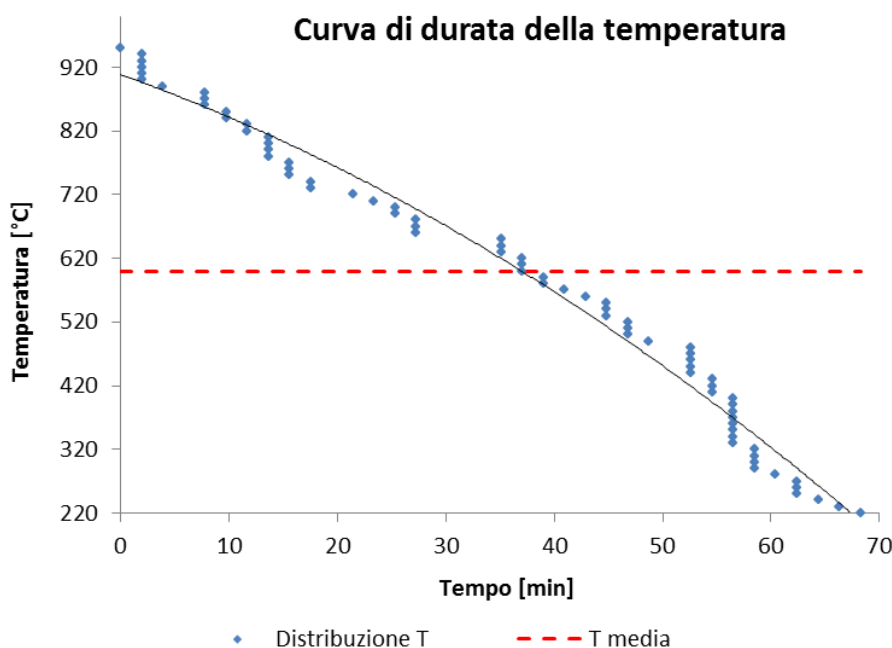


Figura 80 - Curva di durata della temperatura nella sezione della settling chamber.



## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

La potenza termica degli off-gas è calcolabile direttamente dal profilo di temperatura: avendo a disposizione le temperature che i fumi presentano in ogni istante del ciclo di fusione, mediante la formula (12) è possibile trovare la potenza termica messa a disposizione in ogni istante del ciclo fusorio:

$$(12) \quad N(\tau) = Q_f \cdot c_{pf}(\tau) \cdot T(\tau) \text{ [W]}$$

con:

- $Q_f$  portata dei fumi nella sezione considerata [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ];
- $c_{pf}$  calore specifico dei fumi [ $\text{J}/\text{Nm}^3\text{K}$ ];
- $T$  temperatura dei fumi [ $\text{K}$ ];
- $\tau$  istante di tempo del ciclo TTT [ $\text{min}$ ];

L'andamento del coefficiente  $c_p$  nel tempo ciclo è molto altalenante e rispecchia abbastanza bene quello delle temperature. Occorre tener conto di ciò in fase di progettazione del sistema di recupero senza considerare un andamento medio. Essendo il calore specifico funzione della temperatura, si è scelto di utilizzare per la sua valutazione la relazione:

$$(13) \quad c_{pf}(\tau) = 0,0002 \cdot T(\tau) + 1,291 \text{ [kJ}/\text{Nm}^3\text{K]}$$

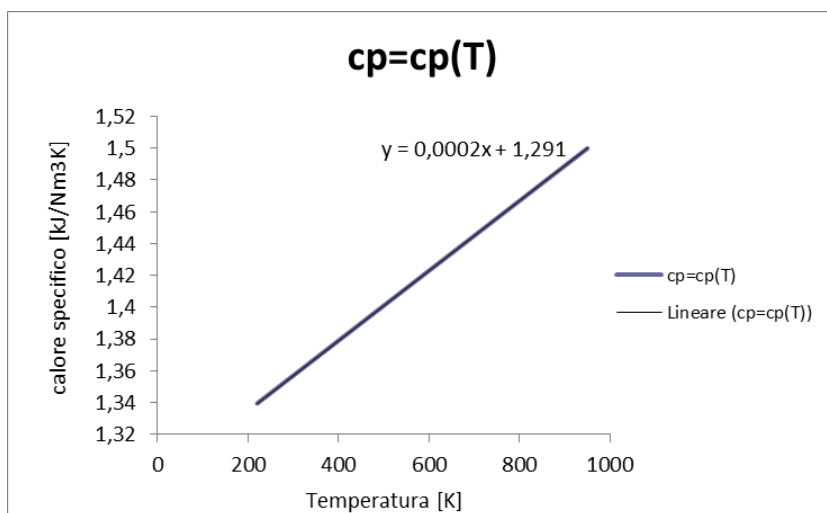


Figura 81 - Andamento calore specifico espresso in [ $\text{kJ}/\text{Nm}^3\text{K}$ ] in funzione della temperatura in [ $\text{K}$ ].

Il grafico di Figura 82 riporta l'andamento della potenza termica resa disponibile dagli off-gas durante un ciclo TTT e la potenza media dei fumi, che, in base ai dati di input, può essere approssimata a 25 MW.

<b>Potenza termica media fumi</b>	<b>25 MW</b>
-----------------------------------	--------------

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

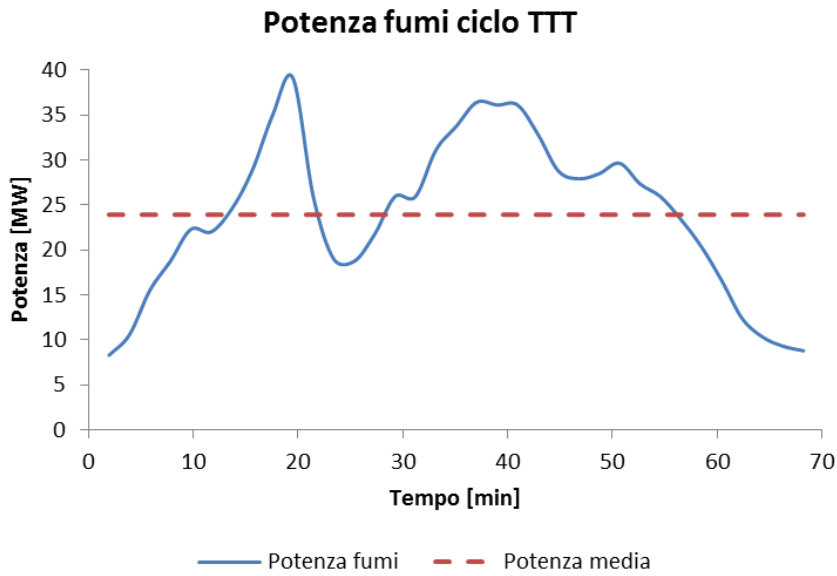


Figura 82 - Andamento potenza fumi nella sezione della settling chamber.

Come detto a inizio paragrafo, potenza termica e temperatura sono direttamente proporzionali tra loro; gli andamenti di queste due grandezze sono simili e presentano la stessa variabilità: la massima potenza termica estraibile si ha quando i fumi raggiungono le massime temperature e viceversa. L'area sottesa alla curva di potenza rappresenta l'energia termica degli off-gas (area blu in Figura 83) e viene espressa mediante la formula (14):

$$(14) \quad \text{AREA blu} = E_{\text{off-gas}} = \int_0^{TTT} N \, d\tau$$

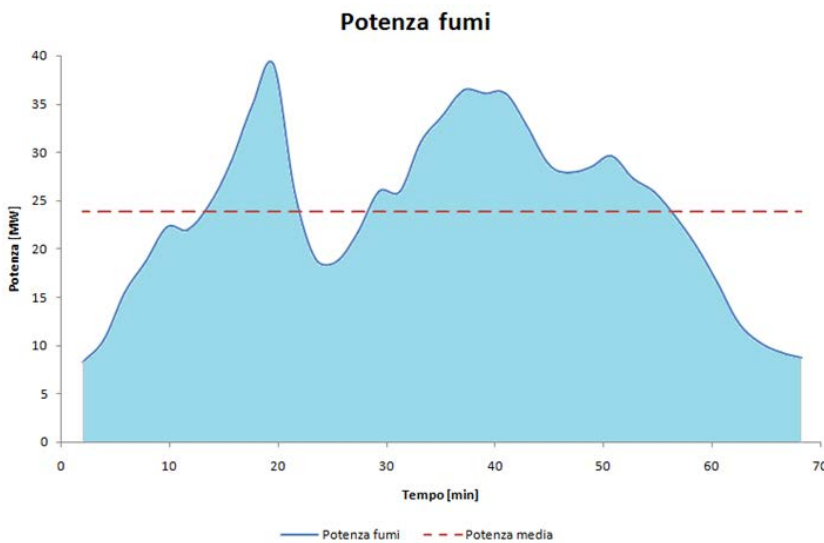


Figura 83 - Energia termica degli off-gas nella sezione della settling chamber.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

L'area compresa tra la curva e la potenza media dei fumi (area viola in Figura 84) rappresenta invece l'energia termica scambiabile con il PCM (alluminio), essendo la relativa temperatura di fusione (e di conseguenza la potenza termica) prossima a quella media degli off-gas. L'energia termica totale scambiata tra PCM e fumi è calcolabile mediante l'equazione:

$$(15) \quad AREA \text{ viola} = E_{scambio} = \int_0^{TTT} (N - N_m) dt$$

con N che rappresenta la potenza termica istantanea dei fumi,  $N_m$  quella media e t gli istanti finali e iniziali di tempo nel ciclo TTT.

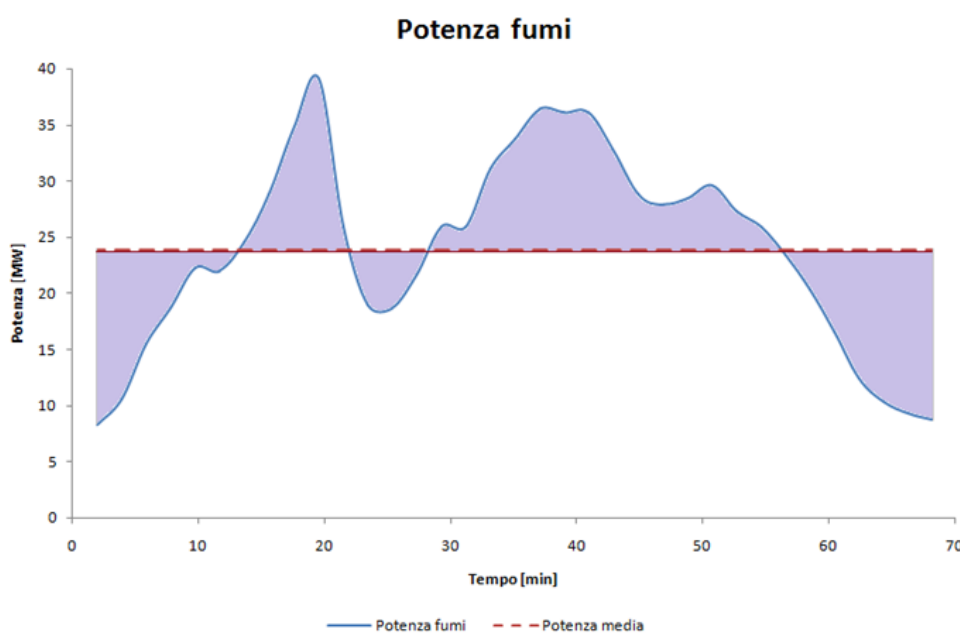


Figura 84 - Energia termica scambiata tra off-gas e PCM nella sezione della settling chamber: caso ideale (energia di fusione dei PCM eguaglia quella media degli off-gas).

In particolare la parte di quest'area che si trova al di sopra della temperatura media dei fumi (area verde in Figura 85) rappresenta l'energia accumulabile dal PCM sotto forma di calore latente di fusione durante la fase “calda”, le parte che si trova al di sotto (area rossa in Figura 85) è l'energia termica ceduta dal materiale a cambiamento di fase sotto forma di calore latente di solidificazione durante la fase “fredda”. L'energia termica assorbita dal PCM è calcolabile mediante l'equazione:

$$(16) \quad AREA \text{ verde} = E_{ass} = \int_{t_1}^{t_2} (N - N_m) dt + \int_{t_3}^{t_4} (N - N_m) dt$$

con t gli istanti di tempo in cui la potenza istantanea eguaglia la potenza media.

L'energia termica ceduta dal PCM è calcolabile mediante l'equazione:

$$(17) \quad AREA \text{ rossa} = E_{ced} = \int_{t_4}^{t_1} (N - N_m) dt = \int_{t_2}^{t_3} (N - N_m) dt$$

con t gli istanti di tempo in cui la potenza istantanea eguaglia la potenza media.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Per semplicità di calcolo, si prende in considerazione unicamente l'energia termica assorbita dal PCM durante la fase calda.

Sostituendo i dati relativi al caso in esame nell'equazione (16) si ottiene:

$E_{\text{ass}}$	<b>15900 MJ</b>	<b>4417 kWh</b>
------------------	-----------------	-----------------

Questo dal punto di vista ideale, ovvero se l'energia di fusione dei PCM coincidesse perfettamente con quella media degli off-gas. In realtà c'è una differenza che non è ancora valutabile dipendendo essa dalla quantità di PCM inserito.

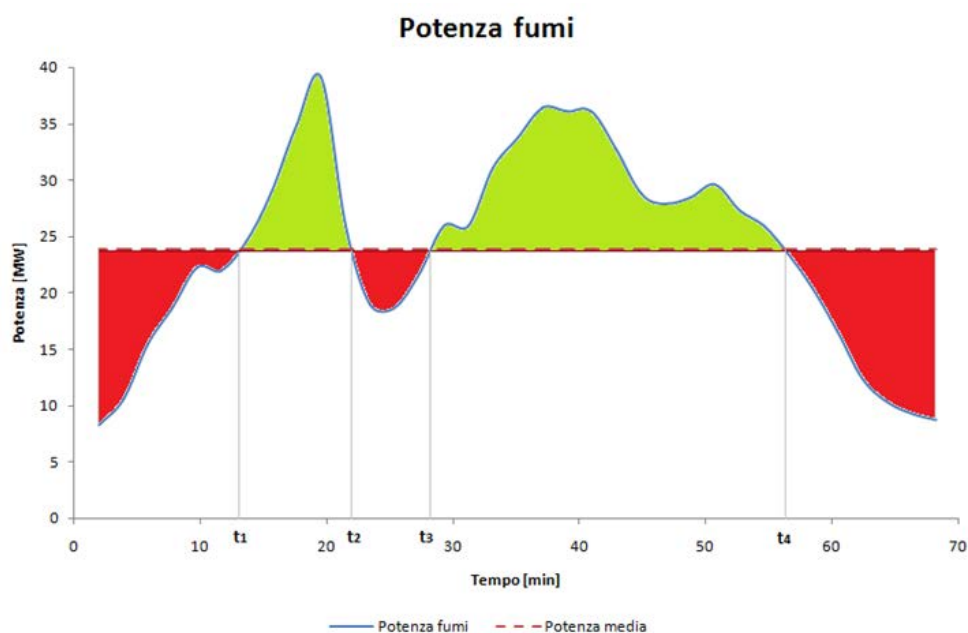


Figura 85 - Energia termica scambiata nel caso ideale: verde accumulata dal PCM, rossa ceduta dal PCM.

Si riporta nel grafico di Figura 86 la curva di durata della potenza: ogni punto rappresenta i minuti di un intero ciclo TTT in cui la potenza termica degli off-gas risulta superiore a quella indicata dal punto stesso nel grafico. Interpolando tali punti si ottiene la curva di durata che permette di stimare la frequenza con la quale i fumi hanno una determinata potenza termica. Anche in questo caso gli andamenti delle curve di durata della temperatura e della potenza sono simili data la diretta dipendenza tra le due grandezze.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

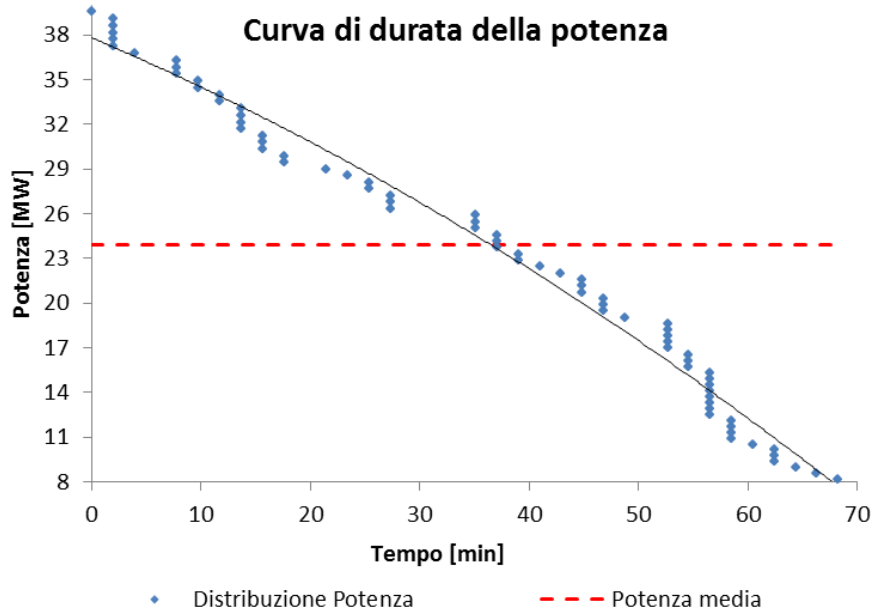


Figura 86 - Curva di durata della potenza.

### 7.3 STIMA DELLA QUANTITÀ DI PCM NECESSARIA ALLA CALMIERAZIONE

Calcolato il valore dell'energia assorbita, si può procedere alla stima della quantità di PCM necessaria per il differitore.

La capacità di accumulo del PCM viene espressa mediante l'equazione:

$$(18) \quad E_{acc} = \int_{T_{if}}^{T_{mf}} mc_{p,s}dT + ma_mL + \int_{T_{mf}}^{T_{ff}} mc_{p,l}dT$$

in cui le temperature  $T$  rappresentano gli estremi inferiore e superiore rispetto alla temperatura di fusione  $T_{mf}$ ,  $c_p$  rappresenta il calore specifico (differente in fase solida,  $s$ , e liquida,  $l$ ),  $m$  la massa generica di PCM,  $a_m$  la frazione del materiale allo stato liquido e  $L$  il calore latente di fusione.

Il primo e ultimo termine dell'equazione sono proporzionali al calore sensibile di solidificazione e fusione, il secondo al calore latente.

*Si trascurano per semplicità di calcolo i termini proporzionali ai calori sensibili.*

Ponendo il termine  $(m \cdot a_m)$  pari a  $M_l$ , ovvero la quantità in [kg] di PCM che deve essere inserito nell'apparato, si ottiene la seguente relazione:

$$(19) \quad E_{acc} = L \cdot M_l$$

La capacità di accumulo deve eguagliare l'energia termica assorbita dal PCM.

$$(20) \quad E_{ass} = E_{acc} \\ \int_{t_1}^{t_2} (N - N_m)dt + \int_{t_3}^{t_4} (N - N_m)dt = L \cdot M_l$$

Essendo nota sia l'energia termica da assorbire, sia il calore latente del materiale, la quantità di materiale da inserire nell'apparato è calcolabile mediante l'equazione:

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

$$(21) \quad M_l = \frac{E_{ass}}{L}$$

Noti la quantità di PCM da inserire nell'apparato e la sua densità in fase liquida si può determinare il volume occupato dal materiale mediante la relazione:

$$(22) \quad V_l = \frac{M_l}{\rho_l}$$

con  $\rho$  la densità in fase liquida in [kg/m<sup>3</sup>]. In Tabella 16 sono riassunti i dati di due PCM, Alluminio e Piombo, e i valori calcolati di massa, volume e costo.

Tabella 16 - Riassunto proprietà Al e Pb e calcolo della quantità, volume e costo del materiale necessario alla calmierazione.

	Simbolo	U misura	Al	Pb
<b>Diffusività termica fase liquida</b>	$\alpha$	m <sup>2</sup> /s	3,20E-05	1,02E-05
<b>Densità fase liquida</b>	$\rho_l$	kg/m <sup>3</sup>	2380	10660
<b>Calore latente</b>	L	kJ/kg	396	23,8
<b>Calore assorbito</b>	Q <sub>ass</sub>	MJ	15900	15900
<b>Costo<sup>36</sup></b>	c	€/kg	1,488	1,493
<b>Quantità richiesta</b>	M <sub>l</sub>	t	40	668
<b>Volume richiesto</b>	V <sub>l</sub>	m <sup>3</sup>	16,87	62,67
<b>Costo totale richiesto</b>	C	€	59.520	997.324

Per quanto visto al paragrafo 6.4.1.3 è stato scelto l'alluminio e il confronto con il piombo ne mostra i vantaggi di seguito riassunti.

<b>VANTAGGI ALLUMINIO:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'alluminio ha una temperatura di fusione prossima a quella degli off-gas in esame;</li> <li>• Presenta un elevato calore latente di fusione, quindi una grande capacità di accumulo;</li> <li>• Presenta un'elevata diffusività termica, quindi risponde in tempi rapidi alle variazioni di temperatura;</li> <li>• La quantità di alluminio necessaria ad assorbire l'energia termica dei fumi è minore rispetto a quella del piombo, quindi minori saranno il costo totale del materiale necessario e il peso dell'apparato. Sarà inferiore anche la dimensione dell'apparato di contenimento;</li> <li>• Per quanto riguarda invece il volume occupato dal PCM, il vantaggio derivante dall'utilizzo dell'alluminio è minore a causa della minore densità in fase liquida del materiale rispetto al piombo.</li> </ul>

<sup>36</sup> Per i costi dei materiali si sono assunti valori medi al 2012 dal London Metal Exchange.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

È opportuno precisare che si sono sovrastimate le reali necessità richieste per ottenere la giusta calmierazione.

La quantità di PCM da inserire nell'apparato è stata calcolata considerando:

- La capacità di assorbimento di energia termica esclusivamente sotto forma di calore latente di fusione, trascurando l'effetto del calore sensibile (surriscaldamento). In realtà quindi per assorbire l'energia termica necessaria occorre una quantità di PCM minore rispetto a quella calcolata nella precedente analisi.
- Un unico assorbimento di calore. In realtà il materiale fonde e solidifica più di una volta durante un ciclo TTT: con riferimento alla Figura 87, parte dell'energia termica che il PCM assorbe durante il suo primo passaggio di stato (area verde scuro) viene ceduta in un secondo momento ai fumi (area rosso scuro), riassorbita (area verde chiaro) dal materiale durante il secondo cambiamento di fase e riceduta poi agli off-gas (area rosso chiaro). Ciò significa che lo stesso calore viene assorbito e ceduto più volte: per stimare la quantità di PCM da inserire nell'apparato sarebbe quindi sufficiente considerare l'energia termica estraibile dai fumi quando questi permangono più a lungo alle alte temperature (area verde chiaro).

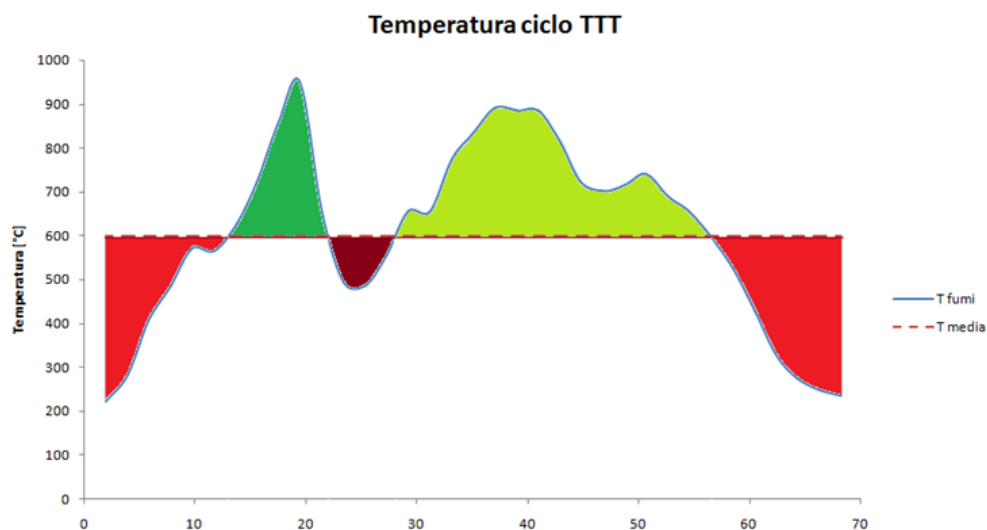


Figura 87 - Energie termiche scambiate tra off-gas e PCM nella settling chamber.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## 7.4 CONFIGURAZIONE DI BASE DEL DIFFERITORE

### 7.4.1 Dimensioni del differitore nella settling chamber

La sezione scelta, come indicato al paragrafo 7.1, è la settling chamber di cui vengono riportate le dimensioni in base i dati della *ECO-D Environmental Systems S.r.l* [39] dell'impianto considerato.

Tabella 17 - Dimensioni settling chamber. Fonte: [39].

lunghezza	$L$	$m$	10
altezza	$H$	$m$	5,5
larghezza	$B$	$m$	4

La zona evidenziata in rosso in Figura 88 rappresenta lo spazio utile per l'installazione dell'apparato di calmierazione, le cui dimensioni sono di seguito riportate.

Tabella 18 - Dimensioni del differitore termico inerziale.

lunghezza	$l$	$m$	4
larghezza	$b$	$m$	4
superficie	$A$	$m^2$	16

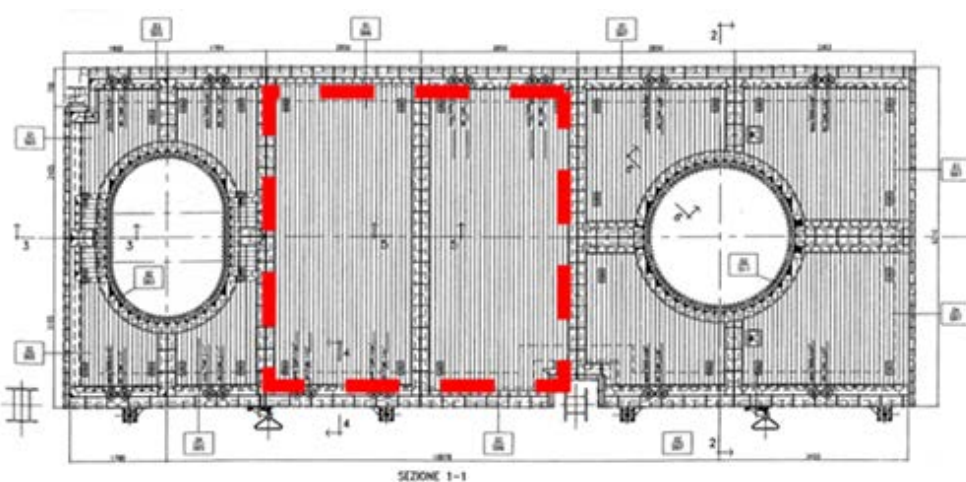


Figura 88 - Spazio utile per inserimento. Fonte: [39].



7.4.2 *Struttura e modello del differitore*

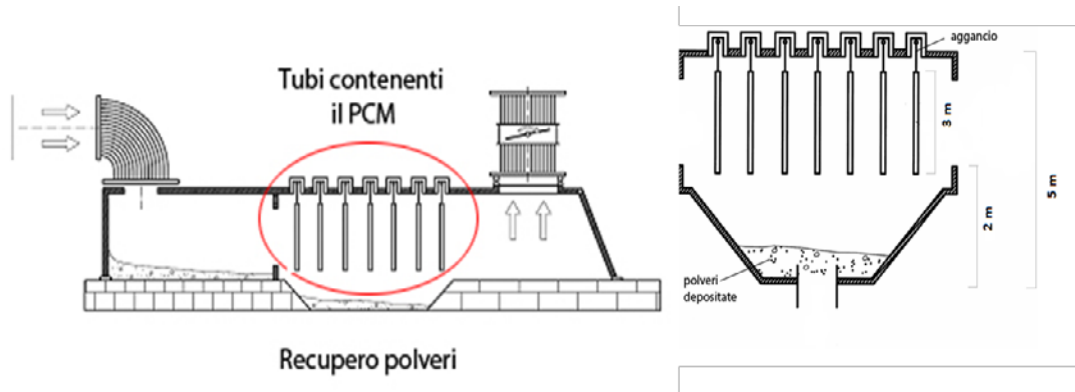


Figura 89 - Struttura del differitore proposta all'interno della settling chamber.

Nel seguito viene descritta la struttura di base ipotizzata per il differitore e indagata nelle successive simulazioni termofluidodinamiche:

- La tipologia del differitore scelta è quella di tubi di forma cilindrica; tale forma viene scelta per diversi motivi:
  - presenta maggiori superfici di scambio rispetto ad altre configurazioni;
  - questo porta a un'ottimizzazione del processo sia dal punto di vista dell'efficienza di recupero, sia da quello economico;
  - non presenta spigoli vivi, frequente causa di rottura e formazione di cricche, né insenature o concavità, sedi di incrostazioni e accumuli di materiale;
  - come conseguenza, l'eventuale pulizia dell'apparato (effettuata per esempio mediante vibratori azionati manualmente o automaticamente) ne risulta facilitata.
- I tubi sono sigillati ermeticamente per impedire la fuoriuscita del materiale; in realtà è previsto un foro sulla parte superiore del tubo per consentire la fuoriuscita e l'entrata dell'aria durante la fase di espansione e contrazione del PCM per evitare eccessive pressioni interne.
- I tubi sono riempiti fino al 90% con il PCM; il restante 10% viene lasciato vuoto per consentire la libera espansione/contrazione dell'alluminio durante le fasi “calde”/”fredde”.
- Come anticipato al 7.1, l'ambiente in cui viene inserito l'apparato presenta numerose criticità, tra cui le alte temperature. Il materiale scelto per la realizzazione dei tubi di contenimento del PCM deve essere caratterizzato da:
  - un'elevata resistenza termica: le caratteristiche chimico-fisiche del materiale devono rimanere invariate durante il processo in modo da evitare eventuali rotture con fuoriuscita del PCM;
  - una temperatura di fusione maggiore di quella massima raggiunta dagli off-gas;
  - una elevata conducibilità termica e bassa reattività chimica con il materiale contenuto per rendere possibile la fusione e la solidificazione del PCM senza interferire nel processo.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

La scelta del materiale di contenimento ricade sull'acciaio inossidabile di tipo austenitico<sup>37</sup>, anche se molti sono i materiali che potrebbero essere utilizzati, primo tra tutti il rame. Questo tipo di acciaio viene scelto per la grande resistenza all'ossidazione e alla corrosione e per la resistenza meccanica alle alte temperature.

Nel caso in questione si prevede l'utilizzo di acciaio AISI 316 di diametro 60 mm e spessore 4 mm.

Al paragrafo 7.6.1 si riportano i risultati di un'analisi delle tensioni e delle deformazioni in un tubo contenente un nucleo di PCM (alluminio) e soggetto a variazioni termiche, le criticità e le ipotesi/soluzioni proposte.

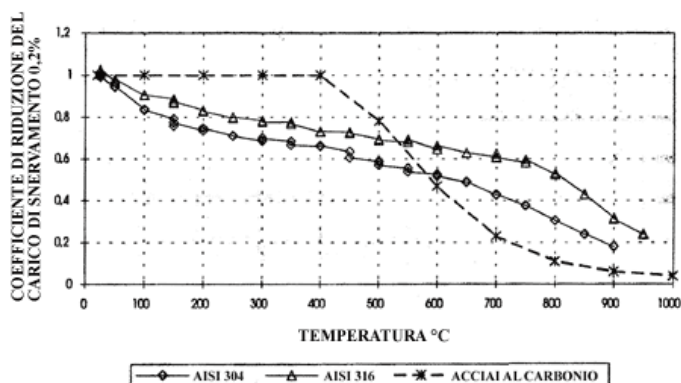


Figura 90 - Riduzione del carico di snervamento per acciai inossidabili austenitici (304-316) confrontati con l'acciaio al carbonio secondo l'eurocodice 3 parte 1.2. Fonte: [64].

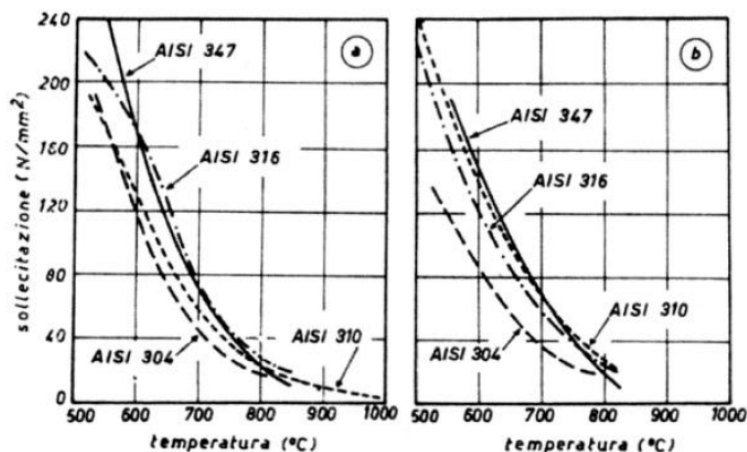


Figura 91 - Proprietà a caldo di alcuni acciai inox della serie 300, valutate a 10000 h di esposizione alla temperatura: a) carico di rottura; b) carico capace di causare uno scorrimento dell'1%. Fonte: [65].

<sup>37</sup> Gli acciai inossidabili austenitici sono gli acciai inossidabili più comuni e hanno un tenore di carbonio inferiore allo 0,1%. Il cromo invece può variare tra il 18% e il 25% e il nichel dall'8% al 20%.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

- Nel fondo dei tubi è previsto l’inserimento di un tondo di materiale isolante (15 mm circa) per ridurre il surriscaldamento e possibili corrosioni del contenitore.
- Un’altra criticità della settling chamber è legata allo sporco da parte delle polveri dei fumi che potrebbero intasare l’apparato e ridurre l’effetto calmierante. I tubi vengono quindi opportunamente distanziati per ovviare al problema. Tuttavia deve essere definito il passo ottimo che permette di sfruttare al meglio gli spazi disponibili senza incorrere in problemi di sporco: infatti
  - se il passo è eccessivamente ridotto si ha una diminuzione dell’effetto calmierante a causa dello sporco;
  - maggiore invece è il passo tra i tubi, minore è lo sfruttamento dell’energia termica dei fumi e dello spazio disponibile nella settling chamber.
- I tubi sono liberi di oscillare in modo da:
  - garantire una certa flessibilità strutturale prevenendo eventuali rotture e distorsioni;
  - permettere la libera caduta del materiale intercettato: le polveri e le ceneri in eccesso che si accumulano sulle pareti dei tubi possono scivolare e cadere senza provocare corrosioni di altre parti del sistema.
- La lunghezza dei tubi è calcolata in base alle dimensioni della settling chamber: avendo questa un’altezza di 5 m, i tubi non dovrebbero essere lunghi più di 3 m: bisogna infatti permettere il passaggio dei mezzi di estrazione polveri che possono raggiungere anche altezze di 2 m (vedi Figura 89).
- Si sono considerati tubi da ¾”, da 1” e da 2”.
- La struttura di sollevamento dei tubi viene concepita con travi IPE 120 di adeguata lunghezza: ogni trave prevede dei ganci di sollevamento posizionati nella parte superiore con cui sollevare una fila di “n” tubi; nella parte inferiore invece vengono avviati i tubi lasciati liberi di oscillare. Questa configurazione premette una facile manutenzione dell’apparato: i tubi sollevati possono essere facilmente trasportati, puliti e sostituiti in caso di rottura dato che possono essere svitati uno ad uno. Mediante questo sistema di sollevamento, si compie anche un’azione autopulente dei tubi: nel momento in cui essi vengono sollevati parte delle polveri depositate sulle pareti in seguito al passaggio degli off-gas viene eliminata per raschiamento<sup>38</sup>.
- La struttura di supporto dei tubi prevede una piastra forata in acciaio di adeguate dimensioni supportata da travi IPE 300 di opportuna lunghezza. Nella parte inferiore della piastra sono saldati dei tubi di adeguata altezza che costituiscono la sede dei tubi contenenti il PCM. È opportuno che ci sia un certo gioco tra le sedi e i tubi stessi per permettere eventuali dilatazioni e per garantire

---

<sup>38</sup> Nell’Allegato 3 viene descritto in dettaglio un possibile modello realizzativo dell’apparato, della struttura di sollevamento e quella di supporto concepiti per la configurazione del differitore delle simulazioni del capitolo 8, paragrafo 8.2: tubi allineati da 2” e 3,4 m di altezza, 841 tubi, disposti in file di 29, con passo pari a 130 mm.



## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

### 7.4.3 Dimensionamento del differitore

Stimata la quantità e il volume di PCM da inserire nell'apparato per la calmierazione, si procede al dimensionamento del differitore termico inerziale.

Il volume del singolo tubo d'acciaio è esprimibile mediante la relazione:

$$(23) \quad V_t = \frac{\pi D_i^2}{4} \cdot h$$

con:

- $D_i$  diametro [m];
- $h$  altezza della singola tubazione [m].

Il numero di tubi necessario per contenere il PCM si ottiene dal rapporto tra volume di PCM richiesto dall'apparato e quello di un singolo tubo:

$$(24) \quad N = \frac{V_l}{V_t}$$

Prendendo in considerazione tubi da 2” e 3 m di altezza<sup>40</sup>, vengono riportati i valori ottenuti per l'alluminio e per il piombo in Tabella 19.

Tabella 19 - Volume del singolo tubo da 2” e numero totale di tubi del differitore nei casi di Al e Pb come PCM.

	<b>Simbolo</b>	<b>U misura</b>	<b>Al</b>	<b>Pb</b>
<b>Volume richiesto</b>	$V_l$	$m^3$	16,87	62,67
<b>Volume singolo tubo</b>	$V_t$	$m^3$	0,0069	0,0069
<b>Numero totale tubi</b>	$N$	-	2428	9021

Si nota che, a parità di volume, il numero di tubi necessari per contenere l'alluminio risulta minore rispetto al piombo. Un minor numero di tubi comporta minori costi dell'apparato e la possibilità di utilizzare un passo maggiore tra i tubi prevenendo eventuali problemi legati allo sporcammento

---

<sup>40</sup> Questa scelta iniziale potrà essere modificata in seguito, in base ai risultati ottenuti calcolando lo scambio termico.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## **7.5 SIMULAZIONI NUMERICHE DEL DIFFERITORE TERMICO E ANALISI DEI RISULTATI**

### **7.5.1 Considerazioni sul coefficiente globale di scambio termico: convezione e irraggiamento**

La fase di simulazione viene preceduta dalla stima del coefficiente globale di scambio termico e dell'influenza che i fenomeni della convezione e dell'irraggiamento hanno sullo stesso. Questo perché nelle simulazioni numeriche svolte non viene considerata la componente di scambio dovuta all'irraggiamento che in ogni caso interessa soprattutto le prime file di tubi. Le analisi effettuate (Allegato 1) mostrano che *la componente dovuta all'irraggiamento ha un'influenza minore del 15% sullo scambio termico totale*; i risultati ottenuti validano quindi le simulazioni effettuate.

### **7.5.2 Considerazioni sullo sporcamiento**

L'Allegato 1 riporta anche la resistenza termica specifica indotta dallo sporcamiento dei tubi, fenomeno che deve essere preso in considerazione data l'alta polverosità dei fumi considerati.

Data l'assenza di dati sperimentali a riguardo, si è fatto riferimento alle informazioni fornite dalla società *ECO-D Environmental Systems S.r.l.* [39] di *considerare mediamente sulla superficie del differitore uno spessore di sporcamiento pari a 1 cm e con bassa conduttività termica*; il fenomeno sarà molto più marcato nelle file frontali, dove si hanno temperature più elevate, e molto limitato nelle ultime file di tubi, dove le temperature sono inferiori al valore di rammollimento e fusione. Lo sporcamiento dovuto alla polvere dei fumi non viene quindi considerato da un punto di vista tecnologico, ma in relazione alla trasmittanza.

### **7.5.3 Simulazioni numeriche**

Si analizza ora l'effetto calmierante del differitore termico inerziale di tipo passivo mediante simulazioni termofluidodinamiche (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Viene definito un modello affidabile e vengono eseguite simulazioni numeriche in modo da valutare il più accuratamente possibile l'andamento delle temperature in uscita dall'apparato e le modalità di cambiamento di stato (solido e liquido) del PCM contenuto in funzione della storia delle temperature.

Per analizzare il comportamento del differitore viene utilizzato il software Fluent.6.2.16 associato al preprocessore Gambit.2.2.30, utilizzato per disegnare la geometria del problema, imporre i tipi di condizioni al contorno ed effettuare la *meshatura* (discretizzazione) del dominio. In questo modo si ottiene un "file.msh" che viene importato in Fluent<sup>®</sup> dove vengono definite le condizioni al contorno e vengono implementati tutti i parametri necessari per la simulazione.

Un successivo confronto dei risultati ottenuti con quelli teorici permette di valutarne la validità e la correttezza.

Per poter svolgere le simulazioni è stato necessario fare alcune ipotesi approssimative dei dati in ingresso:

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

- *La portata volumetrica dei gas viene considerata costante nel tempo; in realtà, durante il ciclo TTT varia in funzione delle diverse fasi del processo;*
- *Non viene considerato l'irraggiamento nello scambio termico: come anticipato al paragrafo 7.5.1 e verificato nell'Allegato 1, lo scambio termico radiativo ha un'influenza minore del 15% sullo scambio termico globale e interessa le prime file di tubi;*
- *Lo sporcamento delle superfici viene simulato separatamente dalle simulazioni sui banchi di tubi, considerando uno strato medio di 1 cm sulle file di tubi, come spiegato nel paragrafo 7.5.2;*
- *Per simulare il regime turbolento viene utilizzato il modello k-epsilon;*
- *Non è possibile imporre proprietà diverse al materiale PCM in funzione della fase (solida/liquida); in particolare, nel caso dell'alluminio, il valore di diffusività termica cala sensibilmente passando dalla fase solida a quella liquida: nel caso specifico sono stati considerati i valori medi nell'intorno della temperatura di fusione.*

Le simulazioni sono relative a tubi di vari diametri, disposti in due diverse configurazioni:

- Le prime tre simulazioni riguardano la configurazione del differitore a tubi allineati da 2, 1 e  $\frac{3}{4}$  di pollice. In tal caso lo studio di diametri differenti ha permesso di analizzare l'effetto della variazione del rapporto superficie/volume dei tubi a parità di massa di PCM inserito;
- Nel caso dei tubi allineati si analizza inoltre l'andamento delle temperature nel tubo e nel PCM in corrispondenza a determinati punti per verificare nel primo caso la resistenza del materiale di contenimento del PCM e nel secondo caso l'efficienza del PCM stesso;
- Le successive tre simulazioni riguardano invece la configurazione a tubi sfalsati da 1 pollice disposti in differitori di diverse dimensioni. In questo caso viene invece evidenziato l'effetto della variazione di massa di PCM introdotta;
- In entrambi i casi non viene considerato lo sporcamento delle superfici dei tubi, fenomeno simulato separatamente.

Si rimanda all'Allegato 2 per la spiegazione della procedura di simulazione.

Si precisa che le simulazioni riportate in questo elaborato sono state commissionate e si fa pertanto riferimento a una precedente tesi, seguita in qualità di correlatrice [66], incentrata sull'aspetto termodinamico del comportamento del PCM. Nel presente elaborato vengono valutati l'effetto calmierante del nuovo apparato, la fattibilità tecnica e impiantistica e le potenzialità in ambito energetico e ambientale.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 7.5.3.1 Configurazione a tubi allineati

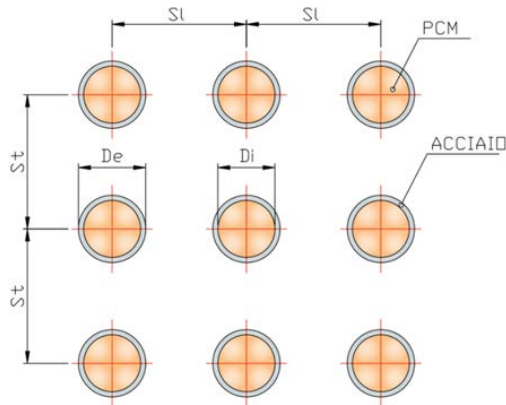


Figura 93 - Configurazione a tubi allineati.

- Con la disposizione a tubi allineati sono state svolte tre simulazioni considerando rispettivamente tubi da 1", da 2" e da 3/4";
- Per ogni configurazione viene calcolato il numero di tubi che possono essere introdotti nella sezione di inserimento dell'apparato che è stata definita quadrata di lato pari a 4 m (paragrafo 7.4.1);
- Si calcola la massa totale di acciaio impiegato, quella di PCM (alluminio) e quella dell'apparato (acciaio+alluminio) in base ai volumi e ai calori specifici dei materiali considerati. La Tabella 20 riporta questi dati per le tre configurazioni considerate;
- Viene analizzato il comportamento del tubo e del PCM:
  - nella prima fila di tubi: punto a nello spessore del tubo di acciaio e punto b nel PCM in prossimità della parete interna. Si sceglie di monitorare questi due punti per avere un'idea di come l'acciaio e l'alluminio rispondano all'aumento e alla diminuzione della temperatura dei fumi;
  - nell'ultima fila di tubi: punto c. Si verifica l'efficienza del materiale a cambiamento di fase anche in questa zona in cui la variazione di temperatura dei fumi è minore.

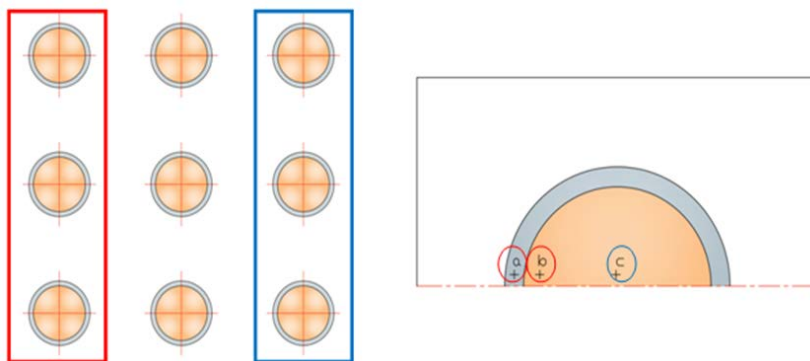


Figura 94 - Prima fila di tubi (riquadro rosso) nei punti a,b; ultima fila di tubi (riquadro blu) nel punto c.



## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

Di seguito si riportano i calcoli eseguiti.

Il numero dei tubi per ogni fila è definito come:

$$(25) \quad N_t = \frac{l}{S_t}$$

con:

- $t$  tubo;
- $l$  lunghezza del lato della sezione di inserimento [m];
- $S_t$  il passo longitudinale tra i tubi [m].

Il volume del singolo tubo d'acciaio è esprimibile mediante la (26):

$$(26) \quad V_t = \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2)}{4} \cdot h$$

con:

- $D_e$  diametro esterno [m];
- $D_i$  diametro interno [m];
- $h$  altezza della singola tubazione [m].



Figura 95 - Tubo contenente materiale PCM.

La massa di acciaio utilizzato in ogni singola configurazione si ricava dalla relazione:

$$M_t = P_{st} \cdot V_t$$

con

- $P_{st}$  il peso specifico dell'acciaio.

Moltiplicando la massa di acciaio per il numero dei tubi si ottiene la massa totale di acciaio necessaria per l'apparato:

$$(27) \quad M_{t \text{ tot}} = N_t \cdot M_t$$

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Si calcola poi il volume di PCM contenuto in un singolo tubo d'acciaio mediante la formula:

$$(28) \quad V_{PCM} = \frac{\pi(D_i)^2}{4} \cdot h$$

Mentre la massa di PCM contenuta in un singolo tubo si calcola con la seguente:

$$(29) \quad M_{PCM} = P_{S_{PCM}} \cdot V_{PCM}$$

con

- $P_{S_{PCM}}$  il peso specifico del materiale a cambiamento di fase.

Moltiplicando la massa di PCM per il numero dei tubi si ottiene la massa totale da inserire nell'apparato:

$$(30) \quad M_{PCM\ tot} = N_t \cdot M_{PCM}$$

Dai dati riportati in Tabella 20 si nota che *la massa ottenuta è minore rispetto a quella necessaria per assorbire tutta l'energia termica messa a disposizione dagli off-gas* (si veda quanto spiegato al paragrafo 7.3). *Nonostante ciò i risultati delle simulazioni mostrano un ottimo effetto calmierante.*

Infine viene calcolato il peso totale dell'apparato:

$$(31) \quad M_{apparato} = M_{PCM\ tot} + M_{t\ tot}$$

Si nota inoltre che *il numero totale di tubi varia esponenzialmente con la variazione del diametro degli stessi; questo aspetto è di particolare rilevanza per quanto riguarda il costo dell'apparato.*

Tabella 20 - Dati riassuntivi delle simulazioni sul differitore con disposizione a tubi allineati.

CONFIGURAZIONE	Simbolo	U misura	2"	1"	¾"
<b>TUBI</b>					
Diametro esterno	$D_e$	mm	60,3	33,4	26,7
Diametro interno	$D_i$	mm	52,3	28,4	22,7
Spessore	s	mm	4	2,5	2
Passo longitudinale	$S_l$	mm	121,21	66,66	53,33
Passo trasversale	$S_t$	mm	121,21	66,66	53,33
Altezza tubi	h	m	3	3	3
Volume acciaio tubo	$V_t$	$m^3$	0,00212	0,00073	0,00047
Peso specifico inox	$P_{S_t}$	$kg/m^3$	8000	8000	8000
Massa acciaio tubo	$M_t$	kg	16,96	5,84	3,76
N° tubi	$N_t$	-	1089	3600	5625
Massa acciaio totale	$M_{t\ tot}$	t	18,49	20,97	20,95
<b>PCM</b>					
Massa PCM	$M_{PCM}$	kg	15,3272	4,522	2,8798
Volume PCM tubo	$V_{PCM}$	$m^3$	0,00644	0,00190	0,00121
Peso specifico PCM	$P_s$	$kg/m^3$	2380	2380	2380
Massa PCM totale	$M_{PCM\ tot}$	t	16,70	16,28	16,25
<b>DIFFERITORE</b>					
Massa apparato	$M_{apparato}$	t	35,2	37,3	37,2
Massa acciaio/Massa PCM		-	1,11	1,29	1,29
Superficie/volume tubo		1/m	88,18	165,64	207,26

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

### 7.5.3.1.1 Tubi da 2”

In base ai dati ottenuti in seguito alle simulazioni, si è potuto definire l’andamento delle temperature dei fumi in uscita dal differitore termico inerziale (linea blu in figura). Per un confronto diretto è stato riportato anche il profilo di temperatura dei fumi non calmierati (linea rossa tratteggiata in figura).

La

Tabella 21 contiene i valori delle temperature massime e minime raggiunte dai fumi, della varianza e della deviazione standard prima e dopo la calmierazione, all’ingresso (INPUT) e all’uscita (OUTPUT) dell’apparato. Si nota che i picchi di temperatura sono scesi intorno ai 700 °C, la temperatura minima è aumentata del doppio e la differenza tra la massima e la minima è diminuita notevolmente: il valore di output della deviazione standard mostra che l’effetto calmierante dell’apparato è notevole. Il risultato è soddisfacente soprattutto considerando che la massa di PCM utilizzata nelle simulazioni è minore rispetto a quella necessaria per sfruttare tutta l’energia termica messa a disposizione dai fumi (per quanto già annunciato al paragrafo 7.3).

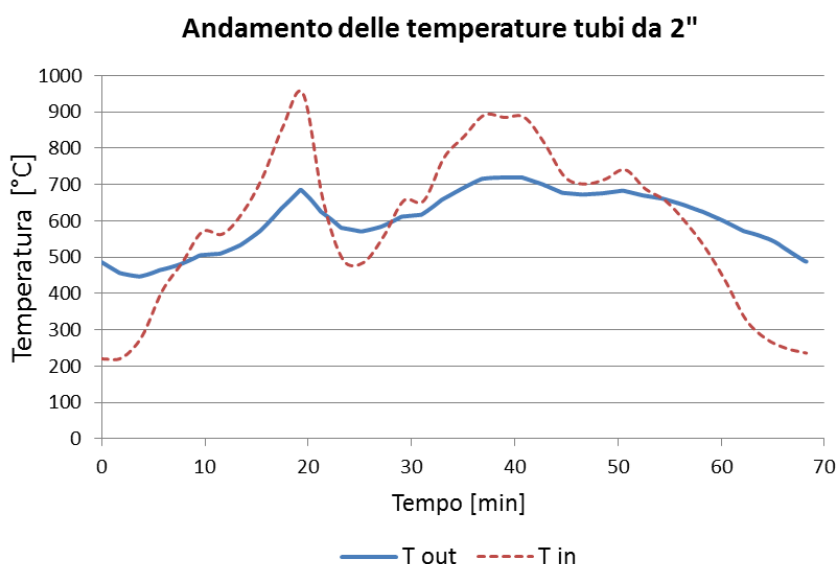


Figura 96 - Andamento temperatura tubi da 2”.

Tabella 21 - Confronto tra valori di temperatura dei fumi in ingresso e uscita dal differitore con tubi da 2”.

	<b>Simbolo</b>	<b>U<sub>misura</sub></b>	<b>INPUT</b>	<b>OUTPUT</b>
<b>Temperatura massima</b>	$T_{max}$	°C	950,8	719,8
<b>Temperatura minima</b>	$T_{min}$	°C	223,0	447,2
<b>Differenza di temperatura</b>	$\Delta T = T_{max} - T_{min}$	°C	727,9	272,7
<b>Varianza</b>	$s^2$	-	41508,6	6445,9
<b>Deviazione standard</b>	$s$	-	203,7	80,3

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Viene analizzato ora l'andamento delle temperature nel PCM rilevato nella prima fila di tubi in corrispondenza dei punti a e b e nell'ultima fila del differitore, zona in cui la variazione di temperatura dei fumi è minore, in corrispondenza al punto c (Figura 94). Dal grafico di Figura 97 si nota che gli andamenti sono simili tranne quando il PCM si trova alla temperatura di fusione. In questo caso, infatti, si ha il passaggio di stato con accumulo di calore latente, cosa che non avviene per l'acciaio il quale non raggiunge mai la sua temperatura di fusione. Non viene riportato l'andamento delle temperature in corrispondenza del punto c dato che è simile a quello rilevato nel punto b: questo fatto evidenzia l'elevata velocità di trasmissione dell'energia termica dell'alluminio e l'assenza di inerzia termica nel caso dei piccoli volumi.

Dal grafico si nota inoltre che l'andamento delle temperature del PCM è strettamente legato a quelle degli off-gas: durante la fusione della prima cesta i fumi si scaldano e di conseguenza il PCM, che assorbe calore sensibile. Raggiunta la propria temperatura di fusione l'alluminio effettua il passaggio di stato accumulando calore latente: in questo caso la temperatura del PCM, e quindi dell'acciaio, si mantiene costante. Successivamente, il calo di temperatura dei fumi in seguito all'apertura della volta e al caricamento della seconda cesta determina una diminuzione della temperatura dell'alluminio, che solidifica cedendo calore latente a temperatura costante. Considerazioni analoghe possono essere fatte per la fusione della seconda cesta: in questo caso i fumi si presentano per più tempo alle alte temperature, di conseguenza la fase di fusione del PCM (temperatura costante nel grafico) e l'accumulo di energia termica è maggiore. In corrispondenza a questa fase si nota un surriscaldamento del PCM. Durante la fase di spillamento il PCM solidifica.

Si distinguono quindi due fusioni del PCM, due solidificazioni e un solo surriscaldamento.

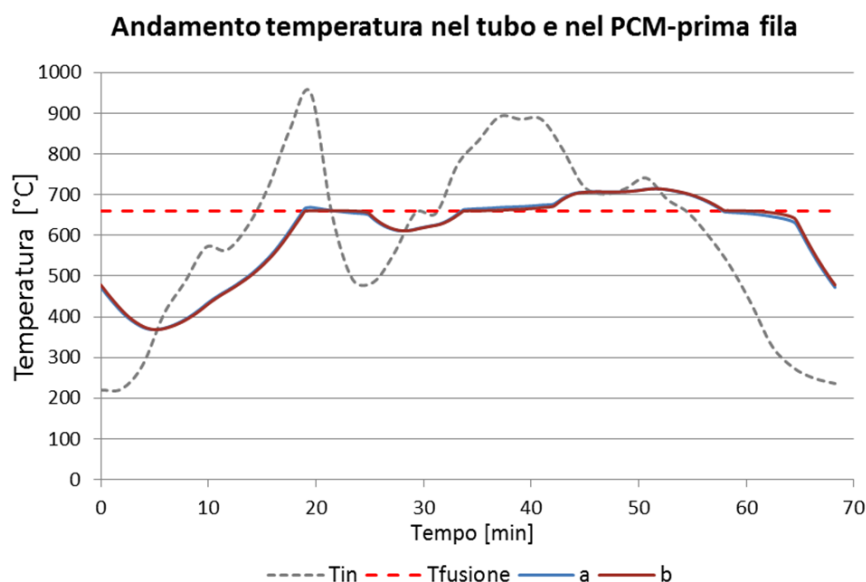


Figura 97 - Andamento della temperatura nel tubo e nel materiale PCM, con riferimento alla prima fila di tubi da 2".

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

Nel grafico di Figura 98 si riporta l'andamento della temperatura dell'alluminio nell'ultima fila del differitore, zona in cui la variazione di temperatura dei fumi è minore, in corrispondenza al punto c (Figura 94). Si nota come durante buona parte del ciclo TTT il materiale a cambiamento di fase si trova alla temperatura di fusione e quindi accumuli molta energia termica.

Si distinguono una sola fusione, una sola solidificazione e nessun surriscaldamento del materiale.

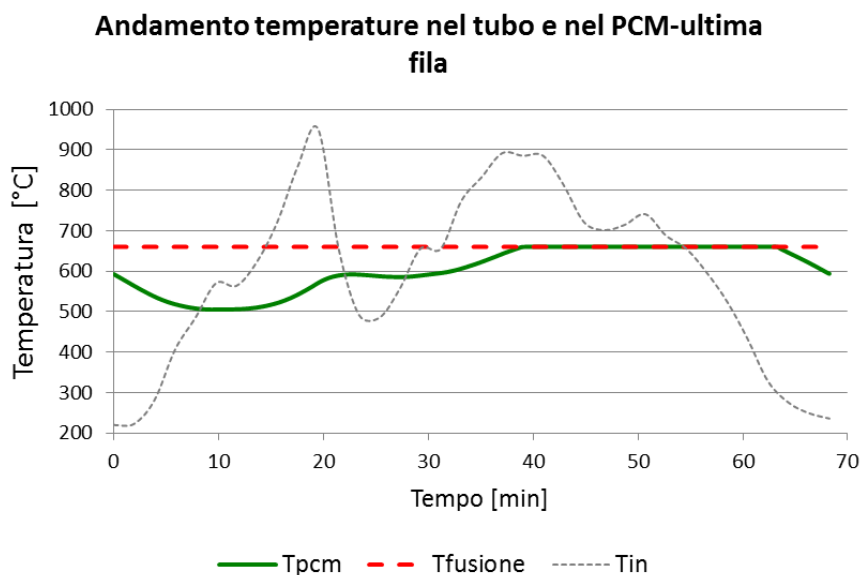


Figura 98 - Andamento della temperatura nel tubo e nel materiale PCM, con riferimento all'ultima fila di tubi da 2”.

### 7.5.3.1.2 Tubi da 1”

In Figura 99 viene riportato l'andamento della temperatura dei fumi in uscita dal differitore termico inerziale con tubi allineati da 1” (in blu) e quello dei fumi non calmierati (linea rossa tratteggiata).

Il profilo è simile a quello ottenuto mediante simulazione con tubi da 2”, ma l'effetto calmierante è migliore: la superficie utile allo scambio termico è maggiore e di conseguenza il coefficiente globale di scambio termico tra fumi e PCM. In questo caso il picco di temperatura raggiunto dagli off-gas in corrispondenza della prima fusione viene completamente smorzato e non solo ridotto come nel caso dei 2”; la temperatura minima aumenta oltre il doppio rispetto al valore non calmierato come nel caso dei 2”. Il profilo di temperatura in uscita dal differitore termico inerziale non presenta grandi scostamenti rispetto alla temperatura media, fatta eccezione per le fasi a bassa temperatura. Si nota inoltre una buona reattività del sistema che risponde bene alle variazioni di temperatura.

I dati riportati in Tabella 22 mettono in evidenza la significativa riduzione tra la temperatura massima e minima raggiunte dai fumi: il valore in output della deviazione standard si è ulteriormente ridotto; l'effetto calmierante è ottimo, migliore di quello ottenuto mediante tubi da 2”.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

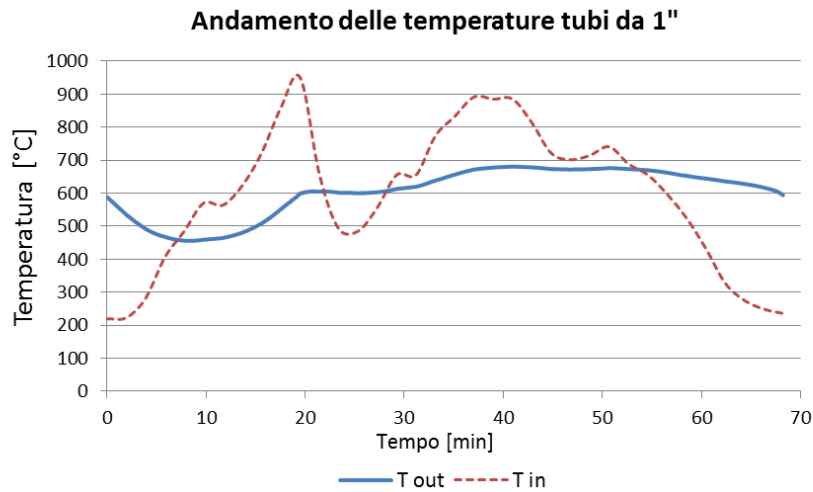


Figura 99 - Andamento temperatura fumi da 1".

Tabella 22 - Confronto tra valori di temperatura dei fumi in ingresso e uscita dal differitore con tubi da 1".

	Simbolo	U <sub>misura</sub>	INPUT	OUTPUT
<b>Temperatura massima</b>	$T_{max}$	°C	950,8	681,0
<b>Temperatura minima</b>	$T_{min}$	°C	223,0	455,9
<b>Differenza di temperatura</b>	$\Delta T = T_{max} - T_{min}$	°C	727,9	225,1
<b>Varianza</b>	$s^2$	-	41508,6	5107,7
<b>Deviazione standard</b>	$s$	-	203,7	71,5

Anche in questo caso viene analizzato l'andamento delle temperature rilevato nella prima fila di tubi in corrispondenza dei punti a e b (Figura 100): si distinguono quattro fasi di fusione e due surriscaldamenti del PCM con temperature che superano gli 800 °C. Il significativo aumento delle temperature massime dell'alluminio all'interno delle prime file di tubi comporta problemi di resistenza strutturale.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

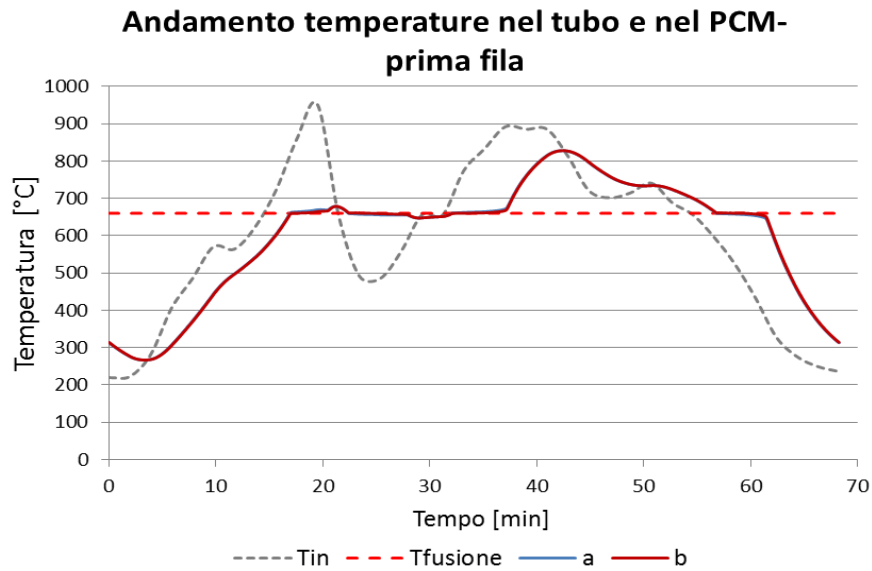


Figura 100 - Andamento di temperatura nel tubo e nel materiale PCM, con riferimento alla prima fila di tubi da 1".

Nell'ultima fila del differitore in corrispondenza al punto c (Figura 101) si distinguono invece una sola fase di fusione e nessun surriscaldamento.

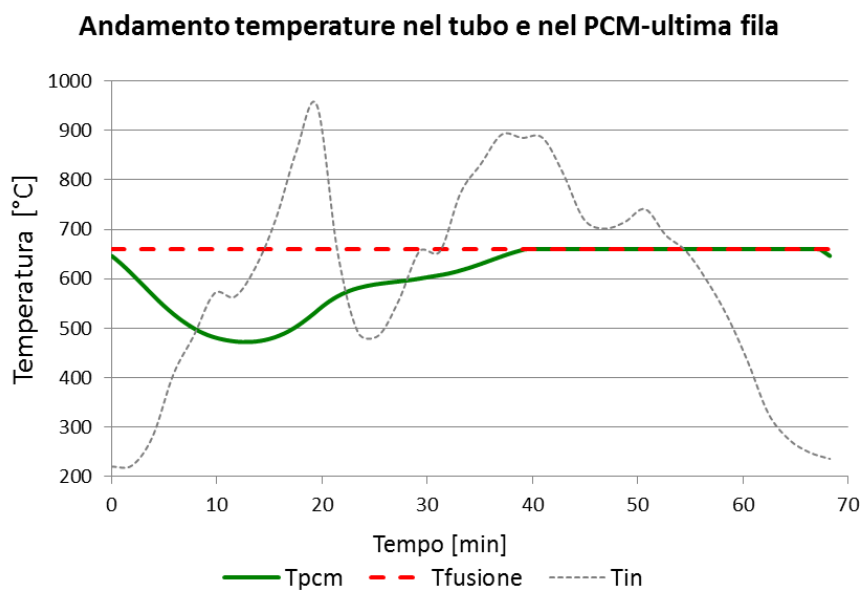


Figura 101 - Andamento della temperatura nel tubo e nel materiale PCM, con riferimento all'ultima fila di tubi da 1".

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 7.5.3.1.3 Tubi da 3/4 ”

In Figura 102 si riporta l’andamento della temperatura degli off-gas in uscita dal differitore termico inerziale con la soluzione a tubi allineati da 3/4 di pollice (linea blu) e l’andamento dei fumi in assenza della calmierazione (linea rossa tratteggiata).

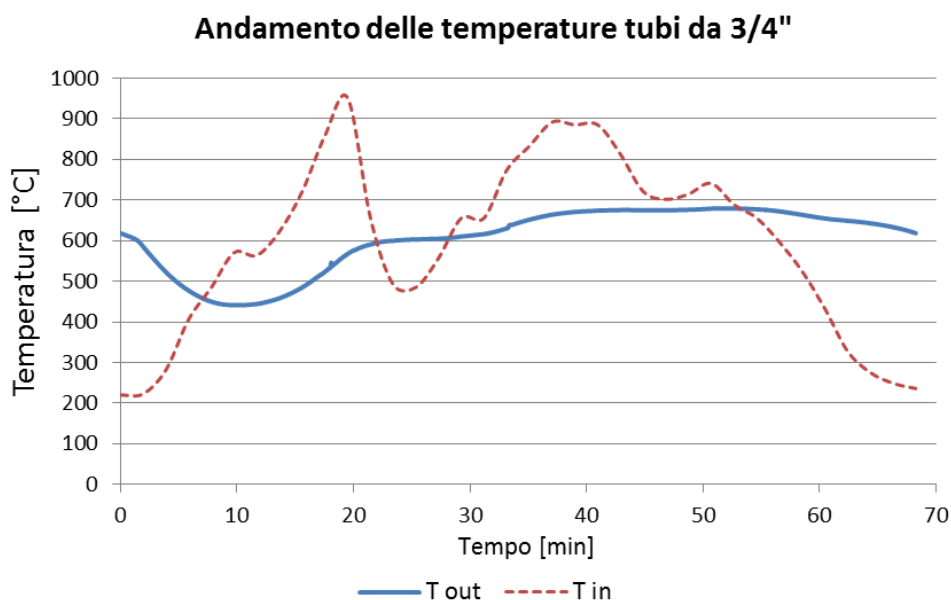


Figura 102 - Andamento temperature tubi da 3/4”.

I risultati presentano un andamento simile ai precedenti e l’effetto calmierante risulta intermedio rispetto a quello ottenuto mediante le altre due configurazioni.

La Tabella 23 mette in evidenza la grande riduzione tra la temperatura massima e minima raggiunte dai fumi.

Tabella 23- Confronto tra valori di temperatura dei fumi in ingresso e uscita dal differitore con tubi da 3/4”.

	Simbolo	U <sub>misura</sub>	INPUT	OUTPUT
<b>Temperatura massima</b>	$T_{max}$	°C	950,8	679,2
<b>Temperatura minima</b>	$T_{min}$	°C	223,0	441,3
<b>Differenza di temperatura</b>	$\Delta T = T_{max} - T_{min}$	°C	727,9	237,9
<b>Varianza</b>	$s^2$	-	41508,6	6009,6
<b>Deviazione standard</b>	$s$	-	203,7	77,5

Anche in questo caso viene analizzato l’andamento delle temperature rilevato nella prima fila di tubi in corrispondenza dei punti a e b (Figura 103): si distinguono quattro fasi di fusione e due surriscaldamenti del PCM con temperature che superano gli 850 °C.

Nonostante l’aumento della superficie di scambio e del coefficiente globale di scambio termico tra fumi e PCM, l’eccessivo surriscaldamento del PCM soprattutto nelle prime file di tubi ne



## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

compromette la resistenza strutturale. Le elevate temperature raggiunte confermano la grande reattività del sistema dovuto all’aumento della superficie di scambio e del coefficiente globale di scambio termico, ma ne costituiscono anche una criticità.

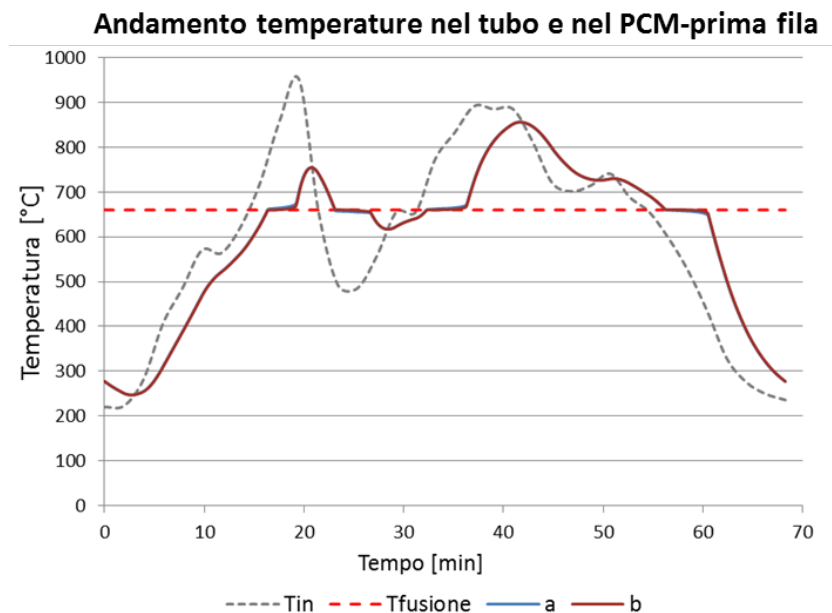


Figura 103 - Andamento della temperatura nel tubo e nel materiale PCM, con riferimento alla prima fila di tubi da  $\frac{3}{4}$  ”.

Per quanto riguarda l’ultima fila di tubi (Figura 104), anche in questo caso il PCM si trova alla temperatura di fusione durante buona parte del ciclo TTT, svolgendo pienamente l’obiettivo prefissato; si distinguono in tal caso una sola fase di fusione e nessun surriscaldamento.

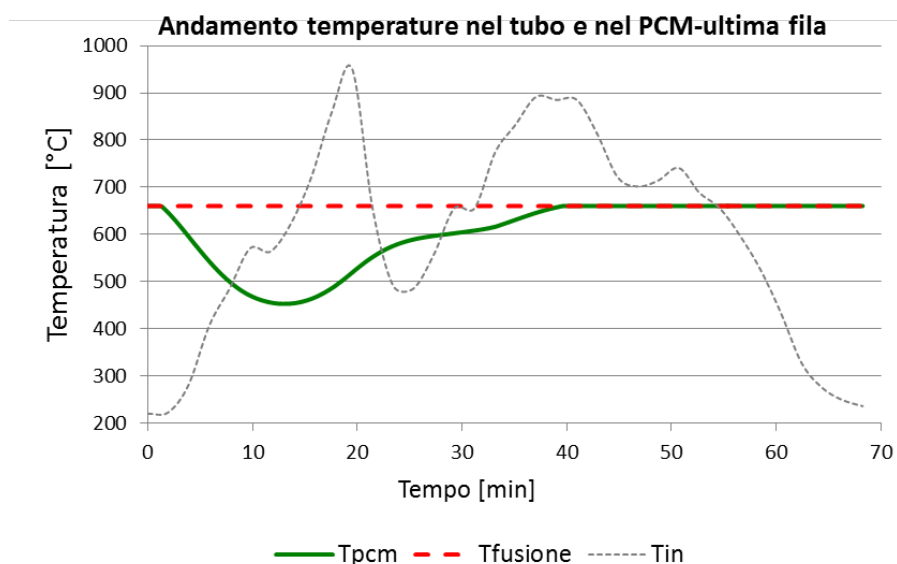


Figura 104 - Andamento della temperatura nel tubo e nel materiale PCM, con riferimento all’ultima fila di tubi da  $\frac{3}{4}$  ”.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 7.5.3.1.4 Conclusioni sulle configurazioni a tubi allineati

Tabella 24 - Confronto delle temperature dei fumi, prima e dopo la calmierazione, nelle diverse configurazioni simulate a tubi allineati

	Simbolo	U <sub>misura</sub>	INPUT	OUTPUT Tubi 2"	OUTPUT Tubi 1"	OUTPUT Tubi ¾"
<b>Temperatura massima</b>	$T_{max}$	°C	950,8	719,8	681,0	679,2
<b>Temperatura minima</b>	$T_{min}$	°C	223,0	447,2	455,9	441,3
<b>Differenza di temperatura</b>	$\Delta T = T_{max} - T_{min}$	°C	727,9	272,7	225,1	237,9
<b>Varianza</b>	$s^2$	-	41508,6	6445,9	5107,7	6009,6
<b>Deviazione standard</b>	$s$	-	203,7	80,3	71,5	77,5

- Tutte le configurazioni determinano una diminuzione della temperatura massima dei fumi di oltre 230 °C (Figura 105): i fumi calmierati presentano un coefficiente di espansione volumica minore e le dimensioni dell'impianto a valle della settling chamber potrebbero essere ridotte.

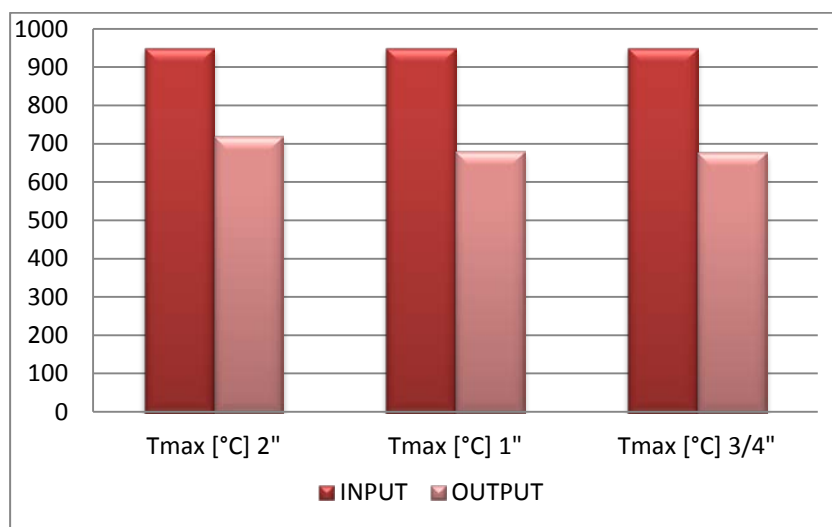


Figura 105 - Confronto temperatura massima nei tubi allineati da 2", 1", ¾".

- Tutte le configurazioni determinano un aumento della temperatura minima dei fumi di oltre 220 °C (Figura 106). In particolare si osserva che la temperatura minima raggiunta dagli off-gas in seguito alla calmierazione è sempre superiore ai 300 °C, temperatura massima di alimentazione ad esempio di un impianto ORC ad alta temperatura per produzione di energia elettrica eventualmente introdotto a valle dell'apparato di calmierazione.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

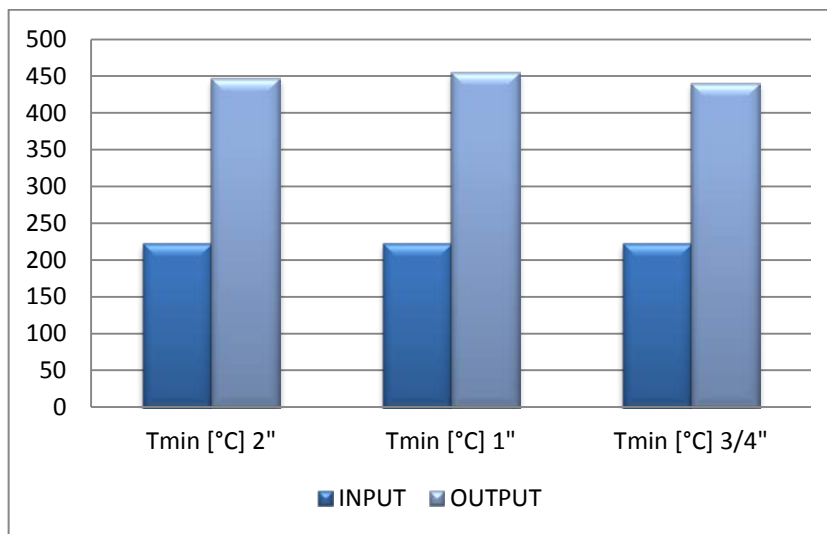


Figura 106 - Confronto temperatura minima nei tubi allineati da 2", 1", 3/4".

- Tutte le configurazioni determinano una notevole riduzione della differenza tra temperatura massima e minima raggiunta dai fumi (Figura 107). Si passa da valori prossimi ai 730 °C per i fumi non calmierati a valori minori di 300 °C per quelli calmierati: questo risultato è rilevante ai fini della possibilità di inserire un eventuale impianto di recupero a valle del differitore termico. Viene garantita una certa continuità nella fornitura di energia termica, essenziale per la produzione di energia elettrica, e si rende possibile una corretta regolazione dell'impianto di recupero.

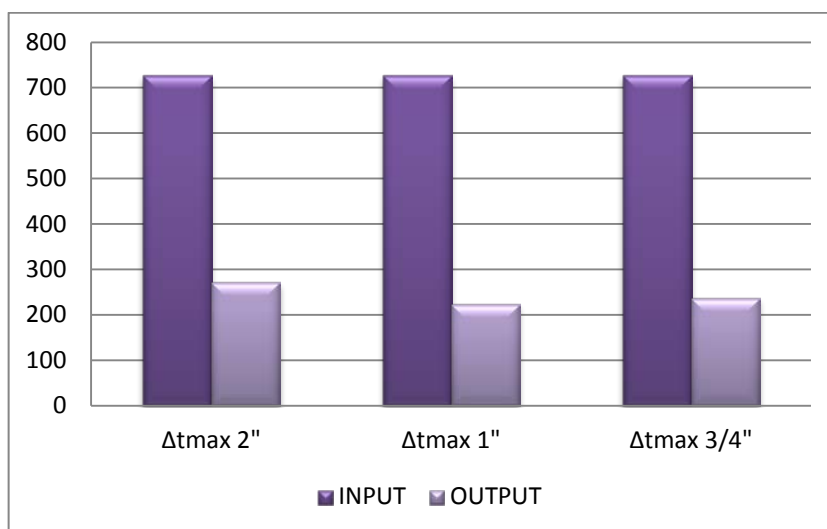


Figura 107 - Confronto  $\Delta$  temperatura nei tubi allineati da 2", 1", 3/4".

- In tutte le configurazioni si ottiene un buon effetto calmierante anche nelle ultime file di tubi, zona in cui le variazioni di temperatura dei fumi sono minori: il materiale PCM svolge adeguatamente la sua funzione di “volano termico”.
- Il surriscaldamento dell'alluminio oltre la temperatura di fusione durante le fasi ad alta temperatura nella prima fila di tubi varia sensibilmente in funzione del diametro del tubo contenente il materiale basso fondente: ciò potrebbe compromettere la resistenza strutturale del

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

tubo stesso, quindi va rivolta particolare attenzione a quest'aspetto; se le temperature massime raggiungono valori critici, si può ipotizzare l'utilizzo di tubi di maggior diametro nelle prime file del differitore. Si riporta in Figura 108 la temperatura massima raggiunta dall'alluminio in funzione del diametro del tubo, relativa ai casi simulati.

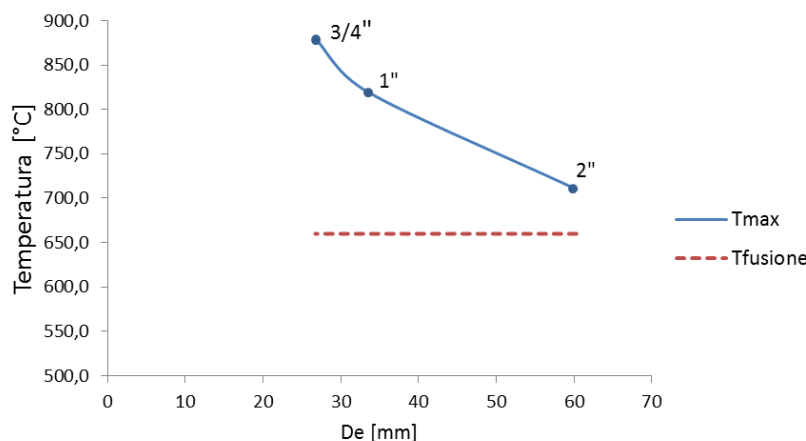


Figura 108 - Temperatura massima raggiunta dal materiale PCM in funzione del diametro del tubo durante un ciclo TTT (prima fila di tubi).

- L'effetto del rapporto superficie/volume sulla deviazione standard non ha un andamento lineare, ma presenta un punto di ottimo, nel caso in esame costituito dalla configurazione con tubi di diametro 1"; questo è probabilmente dovuto al fatto che, nel caso dell'utilizzo di tubi da 3/4", il materiale PCM si surriscalda in un numero significativo di tubi e di conseguenza diminuisce lo scambio termico tra fumi e alluminio a causa della minor differenza di temperatura. In generale si può però affermare che, a parità di materiale PCM, l'effetto del rapporto superficie/volume sulla calmierazione non è determinante nei casi analizzati: a fronte di una diminuzione del  $\Delta T$  di circa 450 °C tra ingresso e uscita del differitore termico, l'incidenza del rapporto superficie/volume è di circa 50 °C (Figura 109). Si deve quindi valutare se il beneficio ottenuto con tubi di minor diametro giustifichi l'aumento di complessità e del costo dell'impianto. Si deve però notare come all'aumentare del rapporto superficie/volume aumenti in modo significativo la reattività del sistema ai picchi di temperatura: infatti, nel profilo di temperatura in uscita di Figura 102 quasi non si distinguono le due differenti fasi ad alta temperatura e, in particolare, il picco di temperatura presente durante la prima fase del ciclo TTT viene quasi totalmente smorzato.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

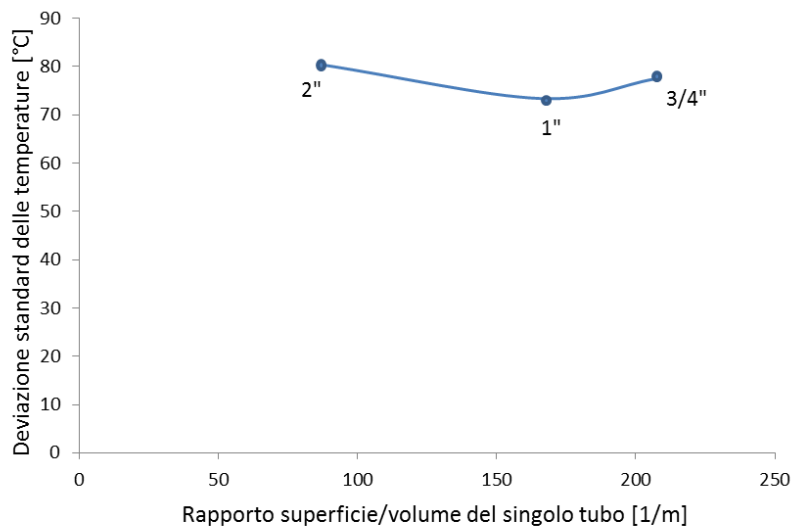


Figura 109 - Effetto del rapporto superficie/volume sulla deviazione standard delle temperature.

### 7.5.3.2 Configurazione a tubi sfalsati

Si sono svolte tre simulazioni con disposizione a tubi sfalsati considerando tubi da 1" e dimensioni diverse dell'apparato: in questo modo è stato possibile analizzare come la diversa quantità di PCM inserita nel differitore incida sull'effetto calmierante.

I dati ottenuti sono stati poi confrontati con quelli ricavati nelle simulazione a tubi allineati da 1".

Si precisa che, a parità di dimensioni del differitore termico, il numero di tubi collocabili con disposizione a tubi sfalsati risulta minore rispetto a quello ottenuto con disposizione a tubi paralleli.

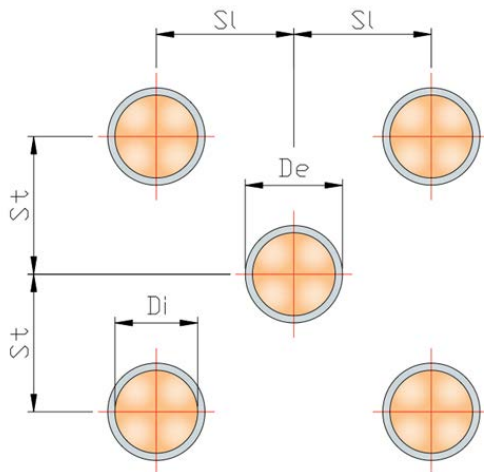


Figura 110 - Configurazione a tubi sfalsati.

La prima simulazione prevede tubi da 1" inseriti in un apparato di sezione quadrata mentre negli altri due casi la sezione è rettangolare: in particolare, l'apparato analizzato nella seconda simulazione è più grande e può contenere un numero maggiore di tubi e di PCM rispetto a quello analizzato nell'ultima. La Tabella 25 riassume i dati relativi alle tre configurazioni.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Tabella 25 - Dati riassuntivi delle simulazioni sul differitore con disposizione a tubi sfalsati

CONFIGURAZIONE	Simbolo	U <sub>misura</sub>	1"	1"	1"
<b>TUBI</b>					
Larghezza differitore	s	m	4	4	4
Lunghezza differitore	l	[m	4	2,65	1,34
Diametro esterno	D <sub>e</sub>	mm	33,4	33,4	33,4
Diametro interno	D <sub>i</sub>	mm	28,4	28,4	28,4
Spessore	s	mm	2,5	2,5	2,5
Passo longitudinale	S <sub>l</sub>	mm	47,2	47,2	47,2
Passo trasversale	S <sub>t</sub>	mm	47,2	47,2	47,2
N° totale tubi	N	-	3486	2324	1162
<b>PCM</b>					
Massa PCM	M	t	15,8	10,5	5,3

#### 7.5.3.2.1 Tubi da 1" con differitore 4x4

Nel grafico di Figura 111 vengono riportati gli andamenti di temperatura dei fumi in entrata (INPUT) e in uscita (OUTPUT) dal differitore termico inerziale di dimensioni 4x4.

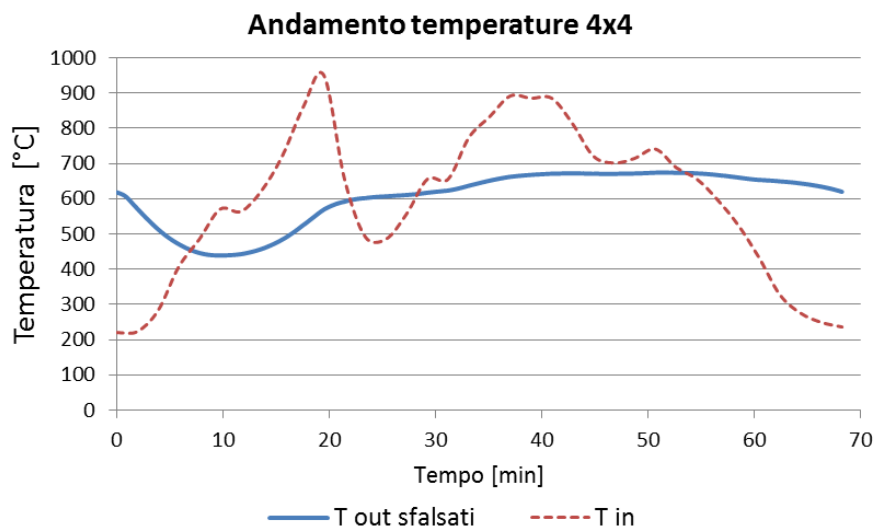


Figura 111 - Andamento temperature differitore 4x4, tubi da 1".

La Tabella 26 riporta i valori delle temperature massime e minime raggiunte dai fumi, della varianza e della deviazione standard prima e dopo la calmierazione, all'ingresso (INPUT) e all'uscita (OUTPUT) dell'apparato. Si nota che i picchi di temperatura dopo la calmierazione sono ridotti (poco superiori ai 650 °C) e la temperatura minima è aumentata quasi del doppio rispetto ai fumi non calmierati. La differenza tra la temperatura massima e la minima è diminuita notevolmente: il valore di output della deviazione standard, nettamente inferiore a quello di input, mostra che l'effetto calmierante dell'apparato è notevole.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

Tabella 26 - Confronto tra valori in ingresso e uscita dal differitore 4x4, tubi da 1”.

	Simbolo	U <sub>misura</sub>	INPUT	OUTPUT
<b>Temperatura massima</b>	$T_{max}$	°C	950,8	674,2
<b>Temperatura minima</b>	$T_{min}$	°C	223,0	439,2
<b>Differenza di temperatura</b>	$\Delta T = T_{max} - T_{min}$	°C	727,9	235,0
<b>Varianza</b>	$s^2$	-	41508,6	6024,3
<b>Deviazione standard</b>	$s$	-	203,7	77,6

### 7.5.3.2.2 Tubi da 1” con differitore 4x2,65

Nel grafico di Figura 112 vengono riportati gli andamenti di temperatura dei fumi in entrata e in uscita del differitore termico inerziale di dimensioni 4x2,65

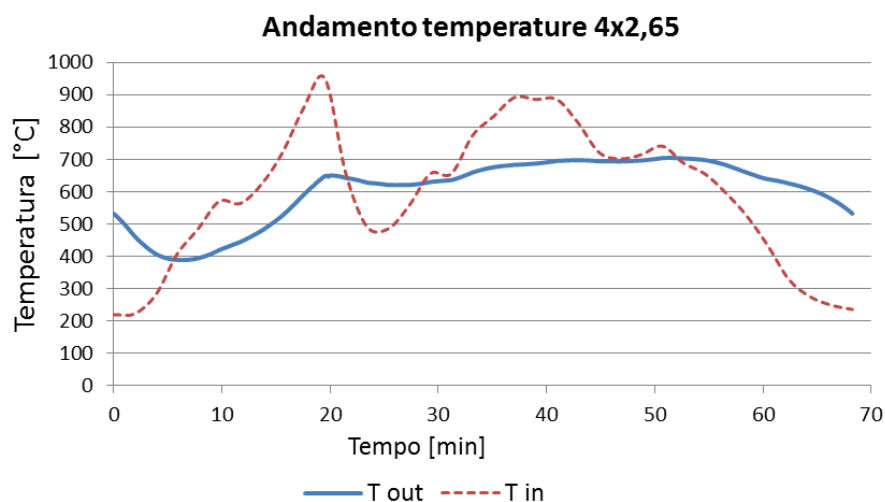


Figura 112 - Andamento temperature differitore 4x2,65, tubi da 1”.

La Tabella 27 riporta i valori delle temperature massime e minime raggiunte dai fumi, della varianza e della deviazione standard prima e dopo la calmierazione. Valgono considerazioni analoghe sulle temperature fatte nel caso 4x4: la riduzione tra la temperatura massima e minima dei fumi raggiunta anche in tal caso è indice di una buona calmierazione.

Tabella 27 - Confronto tra valori in ingresso e uscita dal differitore 4x2,65, tubi da 1”.

	Simbolo	U <sub>misura</sub>	INPUT	OUTPUT
<b>Temperatura massima</b>	$T_{max}$	°C	950,8	704,6
<b>Temperatura minima</b>	$T_{min}$	°C	223,0	388,8
<b>Differenza di temperatura</b>	$\Delta T = T_{max} - T_{min}$	°C	727,9	315,7
<b>Varianza</b>	$s^2$	-	41508,6	9827,3
<b>Deviazione standard</b>	$s$	-	203,7	99,1

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 7.5.3.2.3 Tubi da 1" con differitore 4x1,34

Nel grafico di Figura 113 vengono riportati gli andamenti di temperatura dei fumi in entrata e in uscita del differitore termico inerziale di dimensioni 4x1,34.

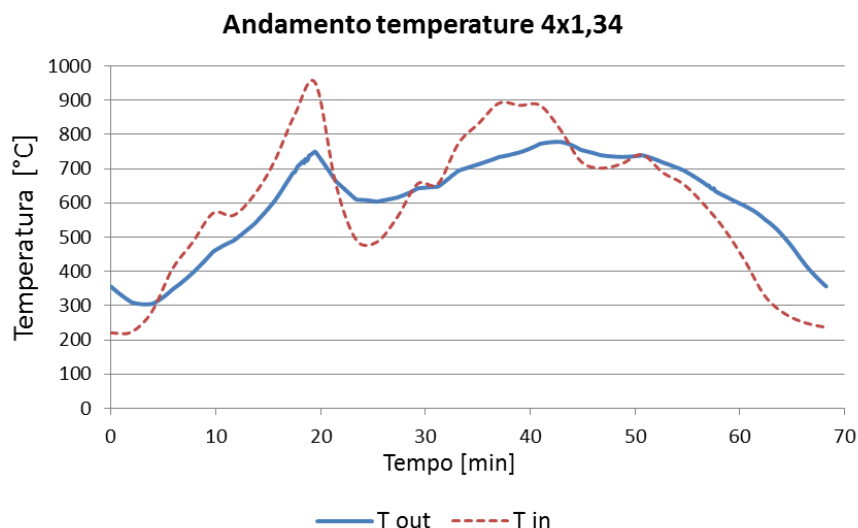


Figura 113 - Andamento temperature differitore 4x1,34, tubi da 1".

La seguente Tabella 28 riporta i valori delle temperature massime e minime raggiunte dai fumi, della varianza e della deviazione standard prima e dopo la calmierazione. Rispetto ai due casi precedenti, la temperatura minima aumenta, ma meno del doppio rispetto al flusso non calmierato. La riduzione tra la temperatura massima e minima dei fumi è indice di buona calmierazione.

Tabella 28 - Confronto tra valori in ingresso e uscita dal differitore 4x1,34, tubi da 1".

	Simbolo	U <sub>misura</sub>	INPUT	OUTPUT
<b>Temperatura massima</b>	$T_{max}$	°C	950,8	778,7
<b>Temperatura minima</b>	$T_{min}$	°C	223,0	303,8
<b>Differenza di temperatura</b>	$\Delta T = T_{max} - T_{min}$	°C	727,9	474,9
<b>Varianza</b>	$s^2$	-	41508,6	19636,8
<b>Deviazione standard</b>	$s$	-	203,7	140,1



## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

### 7.5.3.2.4 Conclusioni sulle configurazioni a tubi sfalsati

Tabella 29 - Confronto delle temperature dei fumi, prima e dopo la calmierazione, nelle diverse configurazioni simulate a tubi sfalsati.

	Simbolo	U <sub>misura</sub>	INPUT	OUTPUT 4x4 tubi 1”	OUTPUT 4x2,65 tubi 1”	OUTPUT 4x1,34 tubi 1”
<b>Temperatura massima</b>	$T_{max}$	°C	950,8	674,2	704,6	778,7
<b>Temperatura minima</b>	$T_{min}$	°C	223,0	439,2	388,8	303,8
<b>Differenza di temperatura</b>	$\Delta T = T_{max} - T_{min}$	°C	727,9	235,0	315,7	474,9
<b>Varianza</b>	$s^2$	-	41508,6	6024,3	9827,3	19636,8
<b>Deviazione standard</b>	$s$	-	203,7	77,6	99,1	140,1

- Tutte le configurazioni determinano una diminuzione della temperatura massima, più spinta nel caso di un maggior numero di tubi (configurazione 4x4) (Figura 114): i fumi calmierati presentano un coefficiente di espansione volumica minore e le dimensioni dell’impianto a valle della settling chamber potrebbero essere ridotte.

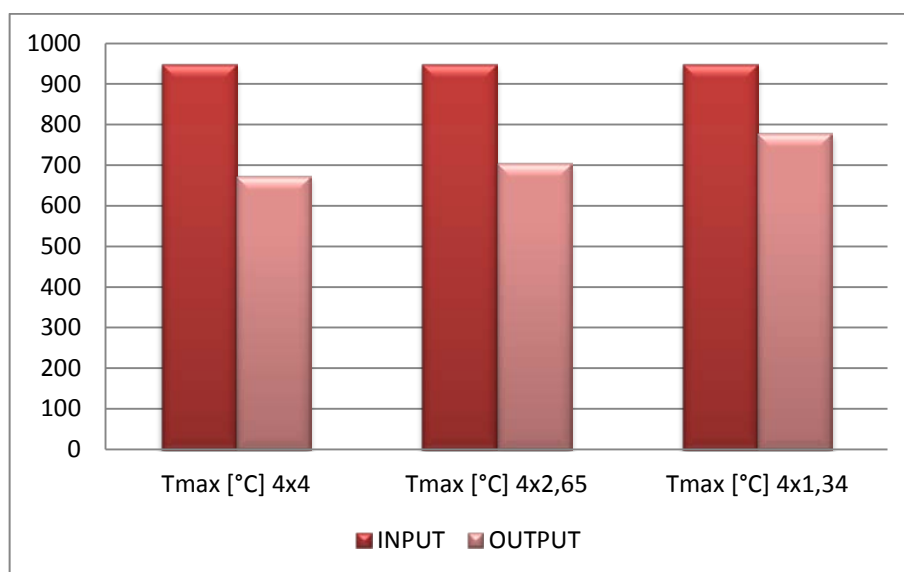


Figura 114 - Confronto temperatura massima nei tubi sfalsati da 1”.

- La temperatura minima degli off-gas uscenti dal differitore termico è sempre maggiore di 300 °C, temperatura necessaria ad esempio per l’alimentazione di un ORC ad alta temperatura per la produzione di energia elettrica (Figura 115) eventualmente introdotto a valle dell’apparato di calmierazione.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

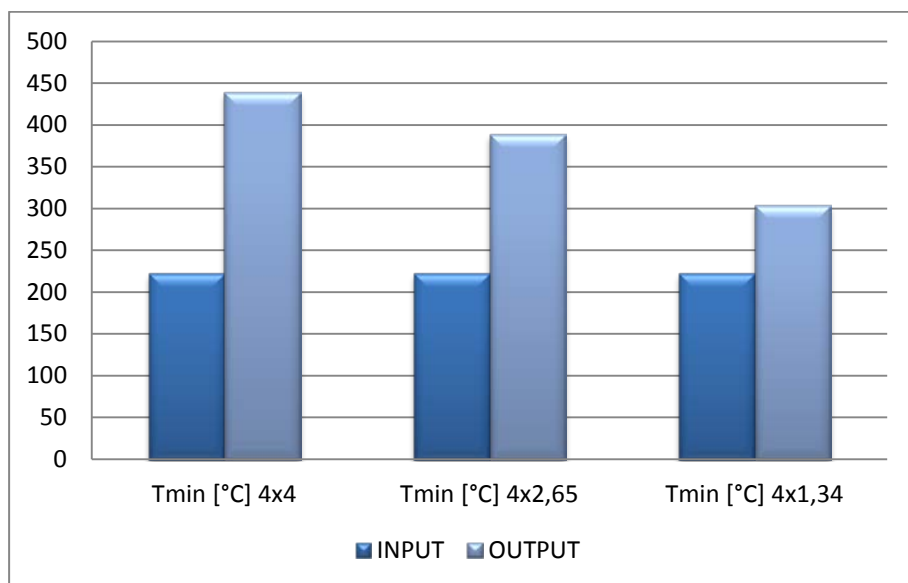


Figura 115 - Confronto temperatura minima nei tubi sfalsati da 1”.

- Tutte le configurazioni inoltre determinano una buona riduzione della differenza tra temperatura massima e minima raggiunta dai fumi (Figura 116): questo risultato è rilevante ai fini della possibilità di inserire un eventuale impianto di recupero a valle del differitore termico. Si garantisce, infatti, una certa continuità nella fornitura di energia termica, essenziale per la produzione di energia elettrica, e si rende possibile una corretta regolazione dell’impianto di recupero.

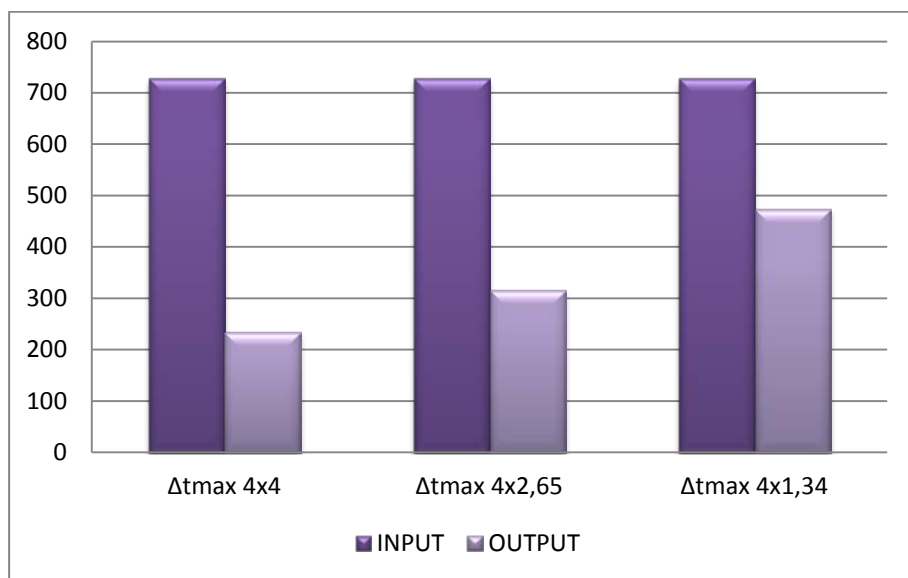


Figura 116 - Confronto  $\Delta$  temperatura nei tubi sfalsati da 1”.

- L’effetto calmierante dipende fortemente dalla quantità di PCM e quindi dalle dimensioni dell’apparato: dai grafici in Figura 117 si nota, infatti, che la soluzione 4x4 è quella che garantisce un migliore effetto calmierante e che presenta un apparato più grande capace di contenere una maggiore quantità di PCM. La figura mette in evidenza l’effetto delle dimensioni del differitore (e

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

quindi della quantità di PCM inserita) sulla deviazione standard e sul  $\Delta t_{max}$ : all'aumentare della quantità di alluminio diminuiscono i valori di queste due grandezze, indice di un miglior effetto calmierante.

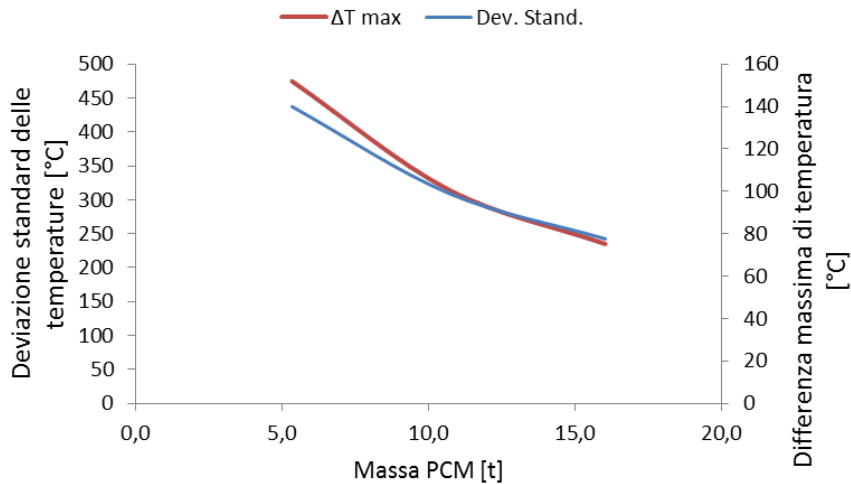


Figura 117 - Effetto della massa di PCM inserita sulla deviazione standard delle temperature.

- Si sottolinea inoltre che, in tutte le configurazioni analizzate, il PCM fonde e solidifica almeno una volta: la scelta di inserire tubi di diametro pari a 1” è quindi corretta.

### 7.5.3.3 Influenza dello sporcamiento

I seguenti risultati si riferiscono alla configurazione a tubi allineati da 2” con sporcamiento di 1 cm a bassa conduttività termica, in base ai dati forniti dalla *ECO-D Environmental Systems S.r.l.* [39] (si veda paragrafo 7.5.2 e Allegato 1).

Si effettuano due tipi simulazioni: nella prima si prevede uno strato di sporcamiento sulla superficie di tutti i tubi del differitore; nella seconda, più realistica, tale strato aggiuntivo viene applicato solamente alle prime 10 file di tubi.

#### 7.5.3.3.1 Configurazione con sporcamiento sull'intero differitore

In Figura 118 si riporta l'andamento della temperatura in uscita dal differitore termico considerando lo strato di sporcamiento su tutti i tubi del differitore; il risultato è confrontato con i dati ottenuti in assenza di depositi sulla superficie dei tubi. Con uno strato di polvere a bassa conduttività termica sulla superficie dei tubi migliora leggermente la calmierazione delle temperature come dimostrano i dati in

Tabella 30; questo probabilmente è dovuto a due fattori:

- Lo spessore aggiuntivo diminuisce la sezione di passaggio tra i tubi e, di conseguenza, aumenta la velocità di passaggio dei fumi e quindi il coefficiente globale di scambio termico;
- In secondo luogo il surriscaldamento del materiale PCM nei primi tubi è minore, quindi viene garantito un  $\Delta T$  maggiore nelle fasi più calde del processo.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

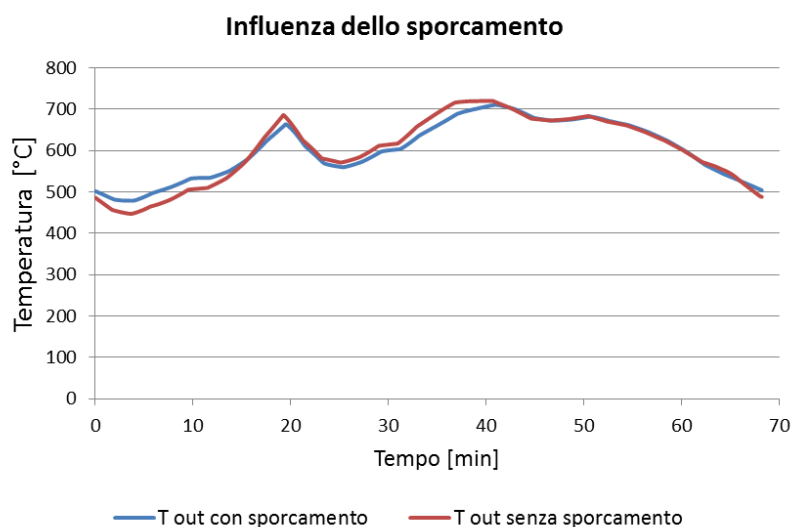


Figura 118 - Confronto dell'andamento di temperatura dei fumi in uscita dal differitore termico in presenza e non di sporcamento dei tubi (disposizione tubi allineati, 2").

Tabella 30 - Confronto tra valori di temperatura dei fumi in ingresso e uscita dal differitore con sporcamento su tutti i tubi (disposizione tubi allineati, 2").

	INPUT	OUTPUT
<b>T<sub>max</sub> [°C]</b>	950,8	710,8
<b>T<sub>min</sub> [°C]</b>	223,0	478,9
<b>ΔT<sub>max</sub></b>	727,9	231,9
<b>Varianza</b>	41508,6	4725,2
<b>Deviazione standard</b>	203,7	68,7

Per quanto riguarda l'ultima fila di tubi, il materiale basso fondente raggiunge la temperatura di fusione solo durante breve parte del ciclo TTT; dal confronto con i risultati ottenuti in assenza di sporcamento (Figura 119) si vede tuttavia come nel caso esaminato l'andamento della temperatura vari in un range minore: anche questo aspetto giustifica il miglioramento nei risultati ottenuti.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

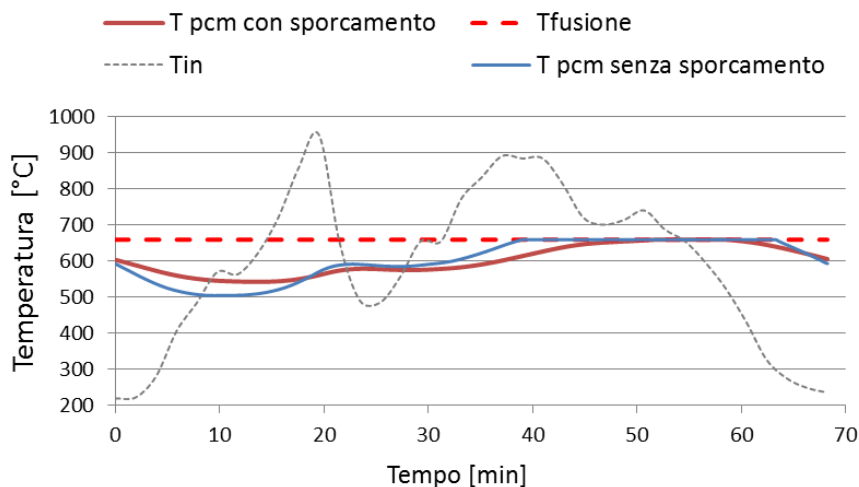


Figura 119 - Andamento della temperatura all'interno del materiale PCM nell'ultimo tubo del differitore: confronto con e senza sporcamento (disposizione tubi allineati, 2").

### 7.5.3.3.2 Configurazione con sporcamento sulle prime file del differitore

In Figura 120 si riporta l'andamento della temperatura in uscita dal differitore termico inerziale considerando uno strato di sporcamento sui primi 10 tubi del differitore; il risultato è confrontato con i dati ottenuti in assenza di depositi sulla superficie dei tubi: si verifica una situazione intermedia tra le due confrontate precedentemente.

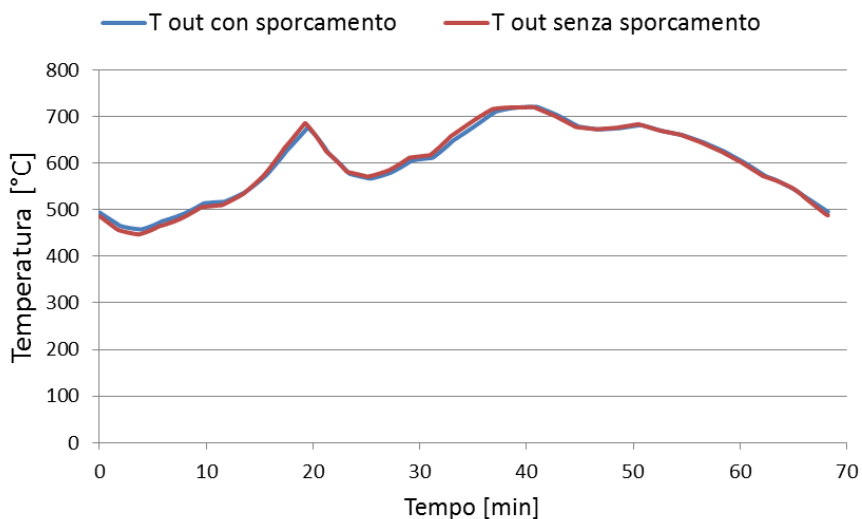


Figura 120 - Confronto dell'andamento di temperatura dei fumi in uscita dal differitore termico in presenza e non di sporcamento sui primi 10 tubi (disposizione tubi allineati, 2").

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Tabella 31 - Confronto tra valori di temperatura dei fumi in ingresso e uscita dal differitore con sporcamento sui primi 10 tubi (disposizione tubi allineati, 2").

	INPUT	OUTPUT
$T_{\max}$ [°C]	950,8	720,9
$T_{\min}$ [°C]	223,0	457,8
$\Delta T_{\max}$	727,9	263,1
<b>Varianza</b>	41508,6	5880,4
<b>Deviazione standard</b>	203,7	76,7

#### 7.5.3.4 Confronto configurazione a tubi allineati e sfalsati

La Figura 121 mette a confronto l'andamento di temperatura dei fumi calmierati ottenuto con disposizione a tubi sfalsati e a tubi allineati da 1" nella configurazione 4x4. I profili di temperatura sono simili, ma quello ottenuto con tubi sfalsati risulta più uniforme: il sistema reagisce più velocemente alle variazioni di temperatura.

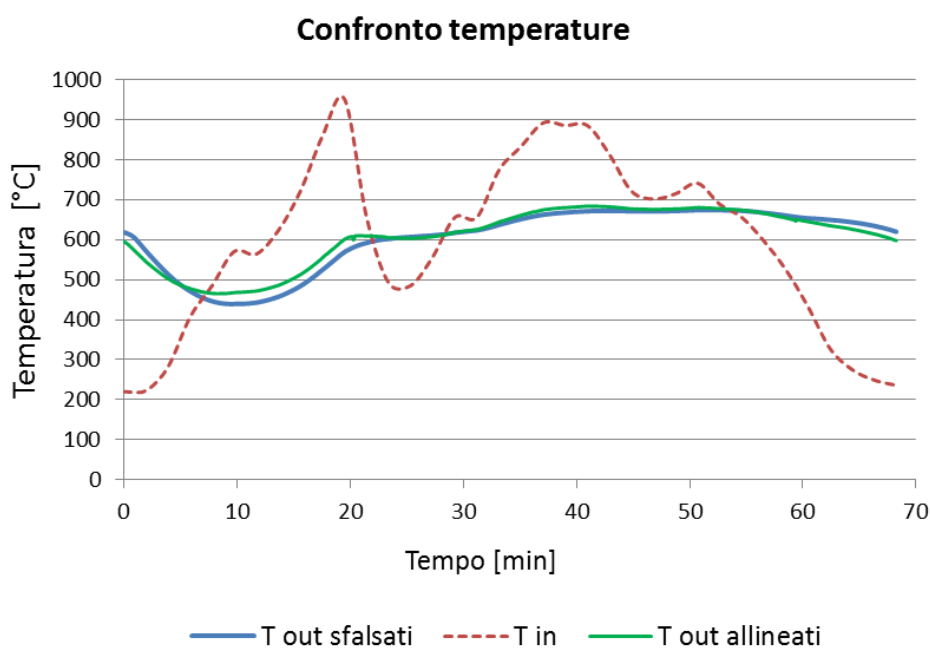


Figura 121 - Confronto dell'andamento di temperatura dei fumi tra ingresso e uscita del differitore termico e confronto con soluzione a tubi da 1" allineati e sfalsati ( $L=4m$ ).

Tuttavia in base ai grafici di Figura 122, la soluzione a tubi allineati risulterebbe migliore ai fini della calmierazione: nonostante le temperature massime raggiunte dai gas calmierati siano maggiori rispetto alla configurazione a tubi sfalsati, il  $\Delta T$  risulta minore.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

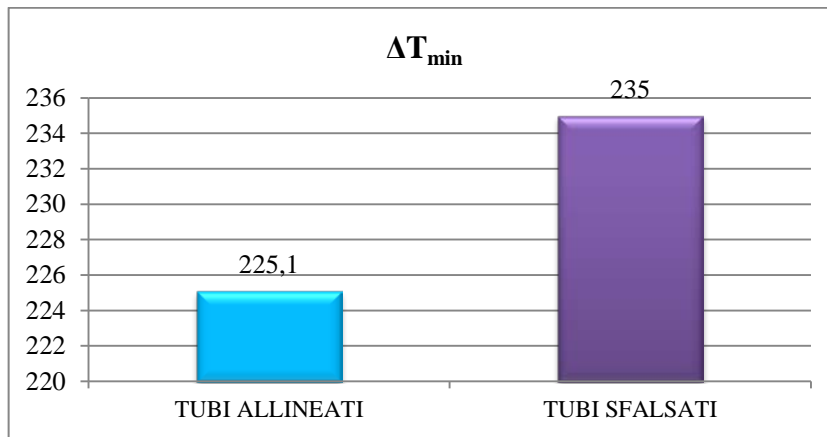


Figura 122 - Confronto  $\Delta$  temperatura nelle due soluzioni a tubi da 1” allineati e sfalsati ( $L=4m$ ).

Anche la varianza e la deviazione standard hanno valori più piccoli nella configurazione a tubi allineati, si vedano i grafici in Figura 123. La migliore calmierazione in questo caso è dovuta al fatto che il numero totale di tubi inseriti è più elevato e di conseguenza è maggiore la quantità di PCM inserita nel differitore.

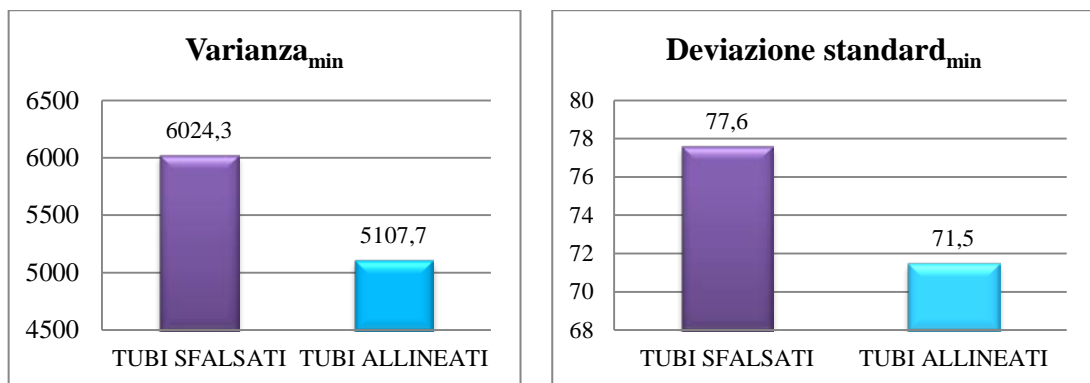


Figura 123 - Confronto varianza e deviazione standard in output dal differitore nelle due soluzioni a tubi da 1” allineati e sfalsati ( $L=4m$ ).

Si analizzano anche le perdite di carico per le diverse configurazioni e si riportano i dati in Tabella 32 e in Figura 124- Figura 125.

Tabella 32 - Confronto perdite di carico nelle due configurazioni del differitore a tubi da 1” allineati e sfalsati.

CONFIGURAZIONE TUBI	Simbolo	U <sub>misura</sub>	2”	1”	¾”
<b>ALLINEATI</b>					
Diametro tubi	D	pollici	2	1	3/4
Numero tubi	N	-	1089	3600	5625
Perdite di carico	Dp	Pa	257	459	592
<b>SFALSATI</b>					
Diametro tubi	D	pollici	4x4	4x2,65	4x1,34
Numero tubi	N	-	3548	2365	1182
Perdite di carico	Dp	Pa	973	653	333

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

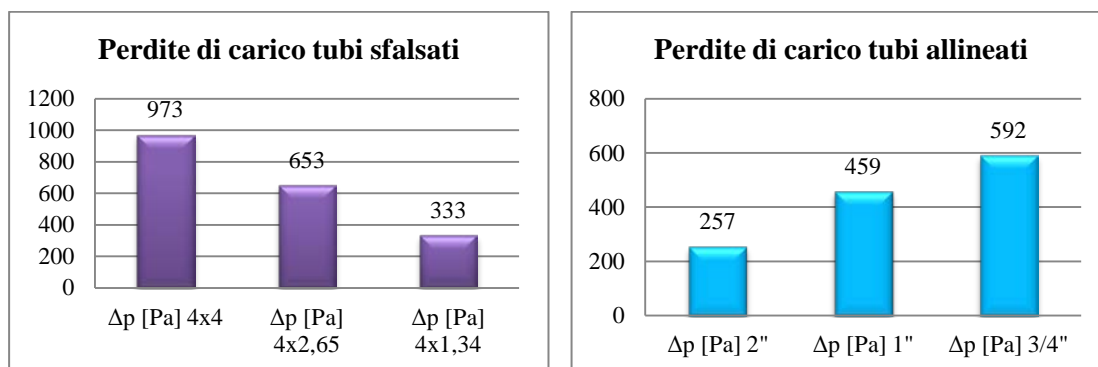


Figura 124 - Grafici delle perdite di carico nella configurazione del differitore a tubi da 1" sfalsati (a sinistra) e allineati (a destra).

Si nota che i valori variano in base al diametro dei tubi e alla loro disposizione: le perdite di carico diminuiscono al diminuire del numero dei tubi introdotti nell'apparato.

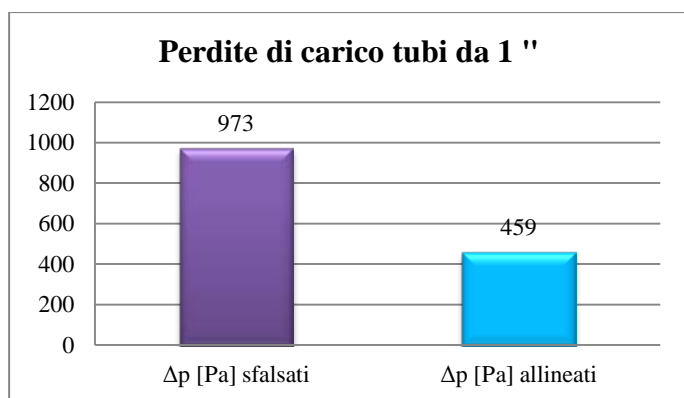


Figura 125 - Confronto delle perdite di carico nella due configurazioni del differitore a tubi da 1" sfalsati e allineati.

Per quanto riguarda poi i tubi da 1" la configurazione a tubi sfalsati presenta perdite di carico decisamente maggiori rispetto a quelle con configurazione a tubi allineati. In generale però le perdite di carico introdotte dal differitore termico non incidono molto sulle perdite di carico totali di una linea di depurazione fumi di forno elettrico ad arco.

Si riporta l'andamento delle perdite di carico in funzione del rapporto superficie volume del singolo tubo (Figura 126).



## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

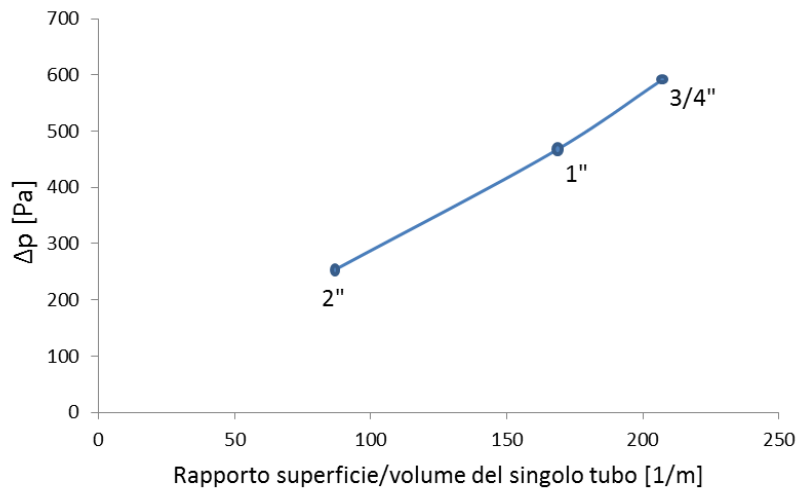


Figura 126 - Effetto del rapporto superficie/volume sulle perdite di carico del differitore termico.

Per stimare l'incremento di potenza assorbita dal ventilatore dovuto alla perdita di carico introdotta dal differitore termico inerziale si può utilizzare la relazione:

$$(32) \quad N = \frac{Q \times \Delta H}{102 \times \eta}$$

con:

- N potenza del ventilatore [kW];
- Q portata volumetrica [ $\text{Nm}^3/\text{s}$ ];
- $\Delta H$  prevalenza totale [ $\text{mmH}_2\text{O}$ ];
- 102 fattore di conversione;
- $\eta$  rendimento del ventilatore, compreso tra 0,7 e 0,8.

Per il caso in esame si stimano incrementi di potenza variabili tra un minimo di 15 kW e un massimo di 39 kW.

A fronte di una potenza elettrica di 2-3 MW, prodotta tramite sistema di recupero, risulta trascurabile il contributo delle perdite di carico del differitore.

Per quanto riguarda il problema di deposito polveri sui tubi, è preferibile la soluzione a tubi sfalsati: con questa disposizione, le prime file trasversali intercettano buona parte delle polveri più grossolane fungendo da schermo. Si ha in questo caso un duplice vantaggio: innanzitutto diminuisce lo sporco globale del differitore che sarà concentrato nelle prime file; in secondo luogo i primi tubi possono raggiungere valori di temperatura critici per la propria resistenza strutturale, come visto in precedenza, e, sotto questo aspetto, le polveri depositate possono limitare l'eccessivo surriscaldamento fungendo da isolante; bisogna considerare il fatto che globalmente aumenta l'abbattimento delle polveri in settling chamber e, di conseguenza, ne aumenta la frequenza di estrazione.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## 7.6 CONFIGURAZIONE TECNOLOGICA PROPOSTA PER IL DIFFERITORE TERMICO

Considerando i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche, si propone una possibile configurazione del differitore termico inerziale di tipo passivo come nelle figure seguenti:

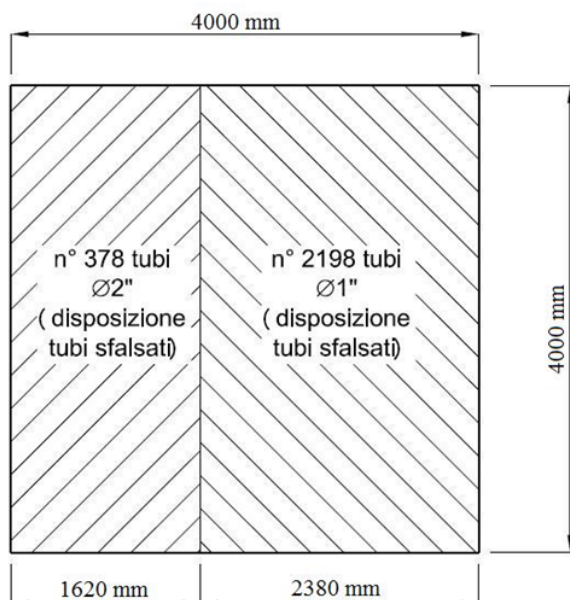


Figura 127 - Disposizione tubi in settling chamber (vista dall'alto): soluzione proposta.

- Configurazione a tubi sfalsati del diametro di 2" nelle prime file del differitore (come evidenziato in Figura 127) per evitare un eccessivo surriscaldamento del materiale PCM e con passo maggiore (come in Figura 128) rispetto a quello utilizzato nelle simulazioni per evitare l'otturazione delle sezioni di passaggio a causa del deposito delle polveri sui tubi.

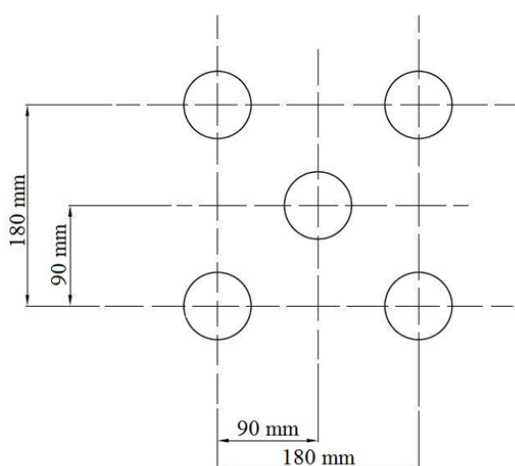


Figura 128 - Disposizione tubi sfalsati da 2": soluzione proposta.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

- Configurazione a tubi sfalsati del diametro di 1” nella seconda zona del differitore (come evidenziato in Figura 127) per migliorare lo scambio termico e quindi l’effetto calmierante.

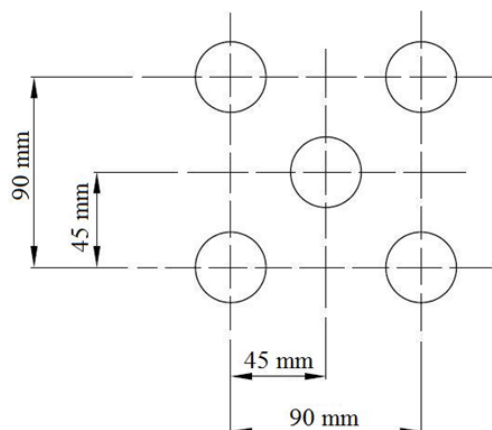


Figura 129 - Disposizione tubi sfalsati da 1: soluzione proposta.

Vengono riassunti nella Tabella 33 i dati relativi alle dimensioni e ai costi del differitore nella configurazione scelta.

Tabella 33 - Dati configurazione finale differitore e suo possibile costo.

	U <sub>misura</sub>	2"	1"	TOT
N° tubi		378	2198	2576
<b>Massa PCM [t]</b>	t	5,8	9,9	<b>15,7</b>
<b>Massa acciaio [t]</b>	t	6,4	12,8	<b>19,2</b>
Massa PCM/ massa acciaio	-	0,90	0,77	0,82
<b>Massa differitore [t]</b>	t	-	-	<b>35</b>
Costo PCM [€]	€	8.630,40	14.731,20	23.361,60
Costo tubi [€]	€	14.742	39.564	54.306
Costo PCM/ costo tubi	-	0,7	0,5	0,5
<b>Costo ipotetico del differitore [€]</b>	€	-	-	<b>77.667,60</b>

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### ***7.6.1 Analisi delle tensioni e delle deformazioni in un tubo di acciaio contenente un nucleo di alluminio e soggetto a variazioni termiche***

I tubi di acciaio contenenti alluminio sono sottoposti a notevoli stress termici essendo investiti da fumi che raggiungono temperature massime attorno ai 1000 °C. È opportuno quindi verificare la tenuta dei tubi analizzando il comportamento dei materiali e l'andamento delle sollecitazioni.

Si effettua l'analisi delle tensioni e delle deformazioni del sistema costituito da un tubo in acciaio contenente un nucleo cilindrico di alluminio portato a fusione dalle variazioni di temperatura cui è soggetto. Lo studio effettuato dal prof. Igino Pitacco del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura Università degli studi di Udine, riportato nell'Allegato 4, riguarda l'analisi del sistema in fase elastica, l'analisi con il nucleo di alluminio in fase plastica e l'analisi del nucleo di alluminio e del tubo in acciaio interamente plasticizzati. Vengono riportate nel seguito le conclusioni:

- Utilizzando acciai inox ordinari, indipendentemente dalle dimensioni geometriche del tubo, durante un ciclo di lavoro l'acciaio è soggetto a snervamento e quindi a scorrimento plastico. In altri termini, a meno di utilizzare acciai speciali ad alto costo, non è possibile rimanere in campo elastico, mantenendo la sezione circolare e una forma allungata dei tubi in acciaio.
- Il fatto che i tubi lavorino in campo plastico non è necessariamente indice di pericolo. Le deformazioni plastiche sono relativamente contenute (stimate per eccesso in circa 3.5 % per un ciclo di lavoro con 500 °C di escursione) e pertanto sopportabili anche da un acciaio solo mediamente duttile. La problematica principale è rappresentata piuttosto dalla resistenza a fatica del tubo. È necessario capire per quanti cicli in cui si sviluppano deformazioni plastiche il materiale possa resistere senza rompersi. Rispondere a tale quesito sulla base di metodi teorici è praticamente impossibile. Si tratta, infatti, di fatica per basso numero di cicli (20000 circa), situazione in cui la teoria della fatica è meno precisa, con ampie escursioni termiche e per giunta non lontane dalla temperatura di normalizzazione (annealing) dell'acciaio. In effetti, il fatto che durante un ciclo di lavoro l'acciaio arrivi a temperature di 700-800 °C e le mantenga per diversi minuti potrebbe avere anche un effetto positivo in quanto si tratta di una normalizzazione parziale (forse di un trattamento di ricottura) perlomeno nei confronti delle dislocazioni cristalline prodotte dallo snervamento. L'adeguatezza del sistema dotato di tubi circolari allungati può essere determinata solo tramite sperimentazione.

## 7. Differitore termico inerziale “passivo”

Le criticità precedentemente esposte sono ridotte se si prevede, oltre al tubo di contenimento, un ulteriore tubo di acciaio interno all'alluminio (tubi concentrici) come si vede in Figura 130

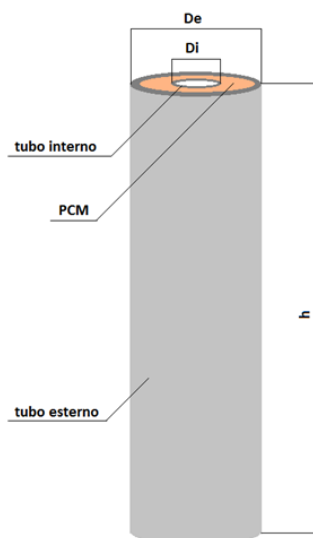


Figura 130 - Contenimento a tubi concentrici.

Per analizzare il comportamento del tubo, si è effettuata una simulazione numerica agli elementi finiti in ambito elastico con i dati riportati di seguito e considerando una variazione termica di 200 °C.

Tabella 34 - Dati dei tubi per la simulazione e conseguente analisi delle tensioni.

CONFIGURAZIONE	Simbolo	U <sub>misura</sub>	Valore
Diametro tubo esterno	D <sub>e</sub>	mm	60
Spessore tubo esterno	s <sub>e</sub>	mm	5,625
Diametro tubo interno	D <sub>i</sub>	mm	30
Spessore tubo interno	S <sub>i</sub>	mm	1,5

I risultati della simulazione vengono mostrati in Figura 131: le tensioni massime nel tubo esterno sono di 562 MPa, mentre nel tubo interno raggiungono il valore di 690 MPa.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

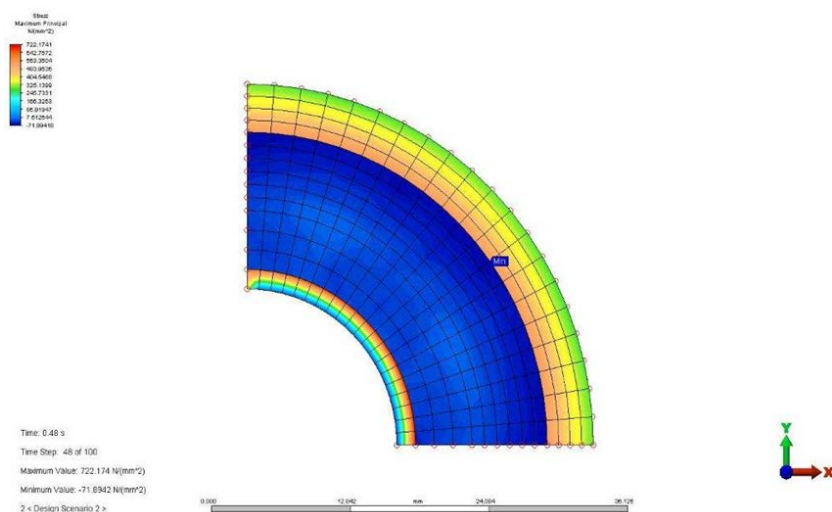


Figura 131 - Tensioni in configurazione a tubi concentrici.

La simulazione numerica agli elementi finiti in ambito elastico del tubo di acciaio con all'interno l'alluminio, considerando una variazione termica di 200 °C, fornisce i seguenti dati: massime tensioni circonferenziali nell'acciaio pari a 770 MPa sul diametro interno del tubo, come si vede in Figura 132.

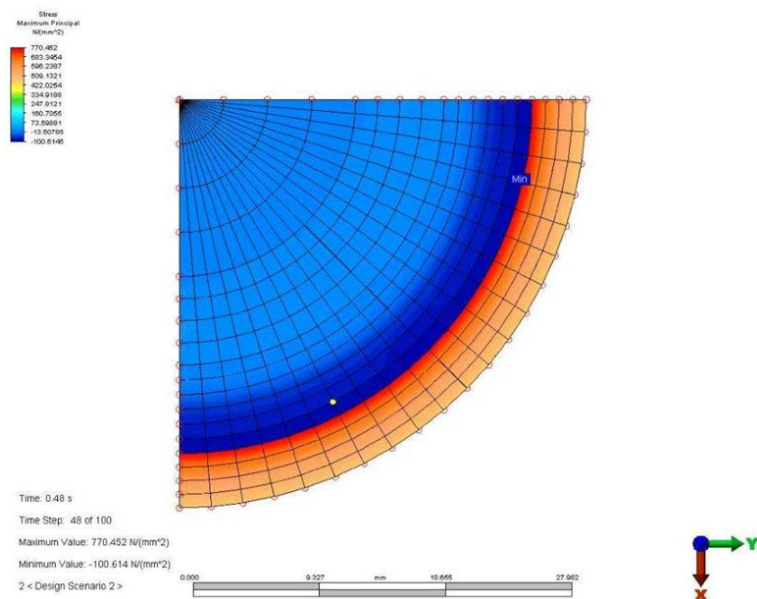


Figura 132 - Tensioni in tubo contenente alluminio.

Rispetto al caso di tubo completamente riempito di alluminio, la soluzione a tubi di acciaio concentrici abbassa di fatto le tensioni massime di circa 100 MPa: la presenza del tubo interno infatti permette una redistribuzione delle tensioni che ha effetto benefico sul tubo esterno, effetto che però non è sufficiente a impedire lo snervamento del materiale.

Si precisa che il sistema costituito dal tubo e nucleo di alluminio e quello a tubi concentrici è attualmente in fase di sperimentazione.

**IMPIANTO DI RECUPERO CON  
PCM E DI PRODUZIONE  
ENERGIA ELETTRICA**





## 8 INSERIMENTO DEL NUOVO SISTEMA DI RECUPERO E PRODUZIONE ENERGIA NELLA LINEA FUMI DI UN EAF

Le simulazioni riportate nel Capitolo 7 hanno permesso di stimare l'effetto calmierante del differitore termico passivo a PCM sui fumi emessi durante il processo di fusione dell'acciaio mediante forno elettrico ad arco. La moderazione delle temperature degli off-gas favorisce l'inserimento di un impianto di recupero e produzione di energia elettrica. In questo capitolo si analizza una linea di estrazione, trattamento, depurazione ed espulsione fumi tradizionale (STATO A) nell'ipotesi di introdurre (AZIONE) sia l'apparato a PCM di tipo passivo, sia un impianto per la produzione di energia elettrica. Le possibili configurazioni della nuova linea fumi (STATO B) derivanti sono due: a linee separate (STATO B1) e a ciclo unico (STATO B2). Gli effetti della calmierazione e le modifiche da apportare all'impianto tradizionale sono valutati dal punto di vista tecnologico e impiantistico nel presente capitolo e in quello seguente (9) dove vengono inoltre approfonditi gli aspetti energetici, economici e ambientali del nuovo sistema.



Figura 133 - Flusso logico dell'inserimento del nuovo sistema di recupero e possibili configurazioni della nuova linea fumi dell'acciaiera.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## 8.1 STATO A - CARATTERISTICHE DI EAF E LINEA FUMI TRADIZIONALI

Per quantificare in modo corretto le conseguenze dell'inserimento dell'apparato a PCM e dell'impianto di produzione di energia elettrica si prende in considerazione la linea di estrazione, trattamento, depurazione ed espulsione fumidi di una tipica acciaieria con EAF.

I dati sono stati forniti da un'acciaieria italiana che per motivi di privacy non verrà nominata.

Si descrivono brevemente le caratteristiche e i componenti principali della linea fumi considerata, sulla base anche di quanto spiegato al Capitolo 4.

### 8.1.1 Componenti di un'acciaieria con linea fumi tradizionale

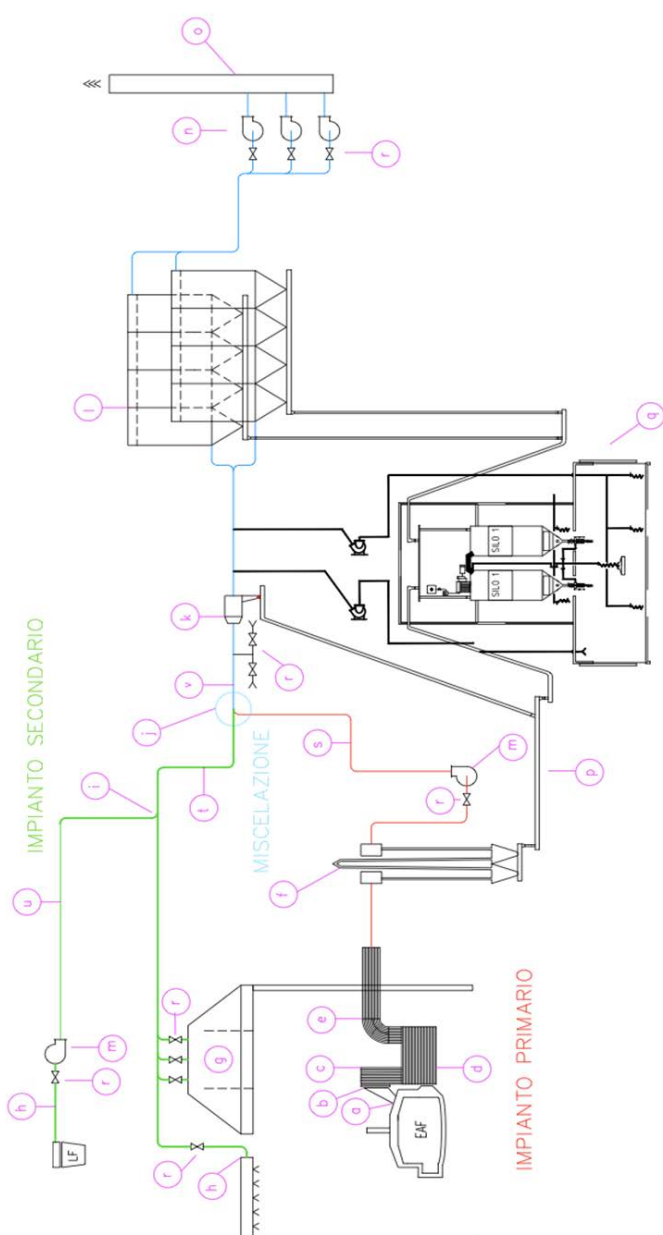


Figura 134 - Linea di estrazione, trattamento, depurazione ed espulsione fumidi un impianto tradizionale.

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Le caratteristiche generali del forno elettrico ad arco preso in esame vengono riportate in Tabella 35.

Tabella 35 - Caratteristiche di un impianto tradizionale a forno elettrico ad arco.

CARATTERISTICHE IMPIANTO DI PRODUZIONE ACCIAIO		
Capacità forno	<i>t</i>	120
N° colate/giorno	-	24-25
Produzione giornaliera acciaio	<i>t/g</i>	3000
Produzione giornaliera polveri	<i>t/g</i>	71,4

La Figura 134 riporta lo schema dell'impianto fumi. Si distinguono le due linee di captazione fumi: gli off-gas della linea primaria attraversano la settling chamber e il raffreddatore, per poi unirsi ai fumi della linea secondaria e proseguire verso il separatore ciclonico e il filtro a maniche. I fumi vengono infine espulsi in atmosfera attraverso il camino.

Nel seguito vengono elencati i componenti principali:

**a. Quarto foro**

Diametro	<i>mm</i>	2200
----------	-----------	------

**b. Gap**

**c. Tronchetto mobile raffreddato**

**d. Settling chamber**

Lunghezza	<i>m</i>	10
Larghezza	<i>m</i>	4
Altezza	<i>m</i>	5

**e. WCD**

**f. Raffreddatore**

**g. Cappa secondaria**

Lunghezza	<i>m</i>	35
Larghezza	<i>m</i>	18
Altezza	<i>m</i>	10

**h. Cappe secondarie di ripresa**

**i. Miscelazione dei gas secondari**

**j. Miscelazione dei gas primari e secondari**

		FUSIONE	CARICA
Diametro nominale	<i>mm</i>	5200	
Lunghezza tubazione	<i>m</i>	80	
Spessore tubazione	<i>mm</i>	5	
Velocità fumi	<i>m/s</i>	14	26

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### k. Separatore centrifugo ad asse orizzontale

Diametro nominale	<i>mm</i>	6000
Lunghezza	<i>m</i>	15

#### l. Filtro a maniche

Funzionamento OFF LINE-ON LINE. Ogni compartimento può essere completamente isolato per la manutenzione tramite una valvola a comando manuale e due valvole di uscita a comando pneumatico. Il sistema di pulizia del filtro è ad alta pressione con valvole di pulizia che garantiscono elevati livelli di efficienza di pulizia delle maniche. Tutte le parti che richiedono manutenzione sono dotate di accessi (scale e passerelle). Il filtro a maniche è completo di:

- Struttura di base;
- Camera filtro in acciaio al carbonio;
- Valvole manuali in ingresso;
- Valvole in uscita a comando pneumatico;
- Maniche e cestelli;
- Serie di sistemi di pulizia con aria compressa;
- Serie di pannelli con logica di pulizia maniche;
- Trasmettitori di pressione a cavallo del filtro;
- Paranchi elettrici per estrazione maniche.

La temperatura richiesta al filtro a maniche è di 100 °C

Numero totale compartimenti	-	18
Numero maniche e cestelli	-	5760
Diametro singola manica	<i>mm</i>	160
Lunghezza singola manica	<i>mm</i>	7000
Superficie filtrante totale	<i>m<sup>2</sup></i>	20000
Portata massima in carica	<i>m<sup>3</sup>/h</i>	2000000
Velocità di filtrazione in carica	<i>m/h</i>	100
Portata presunta in fusione	<i>m<sup>3</sup>/h</i>	1200000
Superficie effettiva con 2 compartimenti di lavaggio	<i>m<sup>2</sup></i>	18000
Velocità di filtrazione in fusione (approx.)	<i>m/h</i>	70
Fabbisogno aria compressa (essicata e disoleata)	<i>Nm<sup>3</sup>/h</i>	1.400
Frequenza nominale lavaggio maniche	<i>s</i>	360

#### m. Ventilatore booster

Due sono i ventilatori booster presenti nell'impianto: uno posizionato nel sistema di aspirazione aggiuntivo, l'altro posizionato nel sistema primario. Questi ventilatori sono inseriti nei tratti di tubazione in cui la depressione creata dai ventilatori al camino non è sufficiente per garantire la corretta portata in ogni istante. Il booster del circuito primario garantisce il giusto tiraggio del forno in tutte le fasi di funzionamento.

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Velocità di rotazione presunta	<i>rpm</i>	1000
Potenza installata	<i>kW</i>	800
Pressione totale presunta in esercizio	<i>mmCA</i>	500

**n. Ventilatori**

I ventilatori principali sono tre a doppia bocca di aspirazione, completi di girante, cassa, basamento, albero passante, supporti con cuscinetti a rotolamento e lubrificazione a grasso, giunti antivibranti, giunto elastico, serranda sull'aspirazione completa di comando, direttamente accoppiati a motori da 1750 kW a 6 poli, previsti con azionamento a velocità variabile. Le caratteristiche costruttive sono:

- Cassa: in Corten, spessore 8 e 10 mm;
- Girante: in Corten;
- Bulloni di fondazione;
- 2 Serrande ad alette con comando ON/OFF pneumatico sulle bocche aspiranti;
- Giunto elastico;
- Giunti antivibranti sulle bocche di mandata e aspirazione;
- Sensori di temperatura.

		<b>FUSIONE</b>	<b>CARICA</b>
Portata totale	<i>m<sup>3</sup>/h</i>	1122000	2000000
Numero ventilatori in esercizio	-	3	3
Portata unitaria	<i>m<sup>3</sup>/h</i>	374000	666670
Temperatura di esercizio	<i>°C</i>	90-100	80
Pressione totale presunta in esercizio	<i>mmCA</i>	300	560
Potenza assorbita all'asse	<i>kW</i>	250	1338
Velocità di rotazione presunta	<i>rpm</i>	550	1000

**o. Camino**

		<b>FUSIONE</b>	<b>CARICA</b>
Diametro	<i>mm</i>	6500	
Altezza	<i>m</i>	55	
Velocità passaggio	<i>m/s</i>	9	16

**p. Sistemi di trasporto polveri**

Il sistema di trasporto e scarico polveri di tipo meccanico a catena, che convoglia le polveri scaricate dal filtro fino alla sommità di un silo da 300 m<sup>3</sup>. È costituito da:

- Trasportatori orizzontali;
- Trasportatore verticale.

**q. Sistema di insilaggio polveri**

Costituito da 2 sili da 150 m<sup>3</sup>, ognuno completo di:

- Cono da scarico fluidificato;
- Indicatori di livello;

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

- Scaricatore di fondo;
- Scaricatore telescopico motorizzato con sistema di aspirazione.

Sono previsti due filtri per ogni silo.

**r. Valvole e serrande**

**s. Tubazione primaria**

Diametro nominale	<i>mm</i>	2200
Lunghezza tubazione	<i>m</i>	300
Spessore tubazione	<i>mm</i>	5

**t. Tubazione secondaria**

Diametro nominale	<i>mm</i>	5200
Lunghezza tubazione	<i>m</i>	250
Spessore tubazione	<i>mm</i>	5

**u. Sistema di aspirazione aggiuntivo**

Il sistema di aspirazione aggiuntivo raccoglie i fumi prodotti dal LF.

Diametro nominale	<i>mm</i>	2600
Spessore tubazione	<i>mm</i>	5

**v. Tubazioni di raccordo**

**8.1.2 Caratteristiche degli off-gas nella linea fumi tradizionale durante le varie fasi di funzionamento dell'impianto**

Le fasi del ciclo fusorio possono essere riassunte in:

- STAND-BY fase di fermo temporaneo dell'impianto;
- FUSIONE fase in cui il rottame viene fuso;
- CARICA fase a volta aperta per la carica della cesta di rottame nel forno;
- DOPO CARICA fase immediatamente successiva alla carica caratterizzata dalla presenza di fumi in cappa e inizio fusione.

La Figura 135 riporta i punti significativi dell'impianto di trattamento e depurazione fumi in corrispondenza dei quali sono state rilevate le portate e le temperature, variabili nelle diverse fasi operative.

*Si precisa che le temperature sono state rilevate sperimentalmente.*

*Anche la polverosità media è un dato rilevato sperimentalmente sull'impianto considerato ed è un dato variabile.*

*I valori di temperatura cui si fa riferimento non tengono in considerazione della diversa composizione dei gas e della variazione della capacità termica con le temperature. Tuttavia si ritiene questa approssimazione più che valida per le analisi che vengono effettuate.*

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

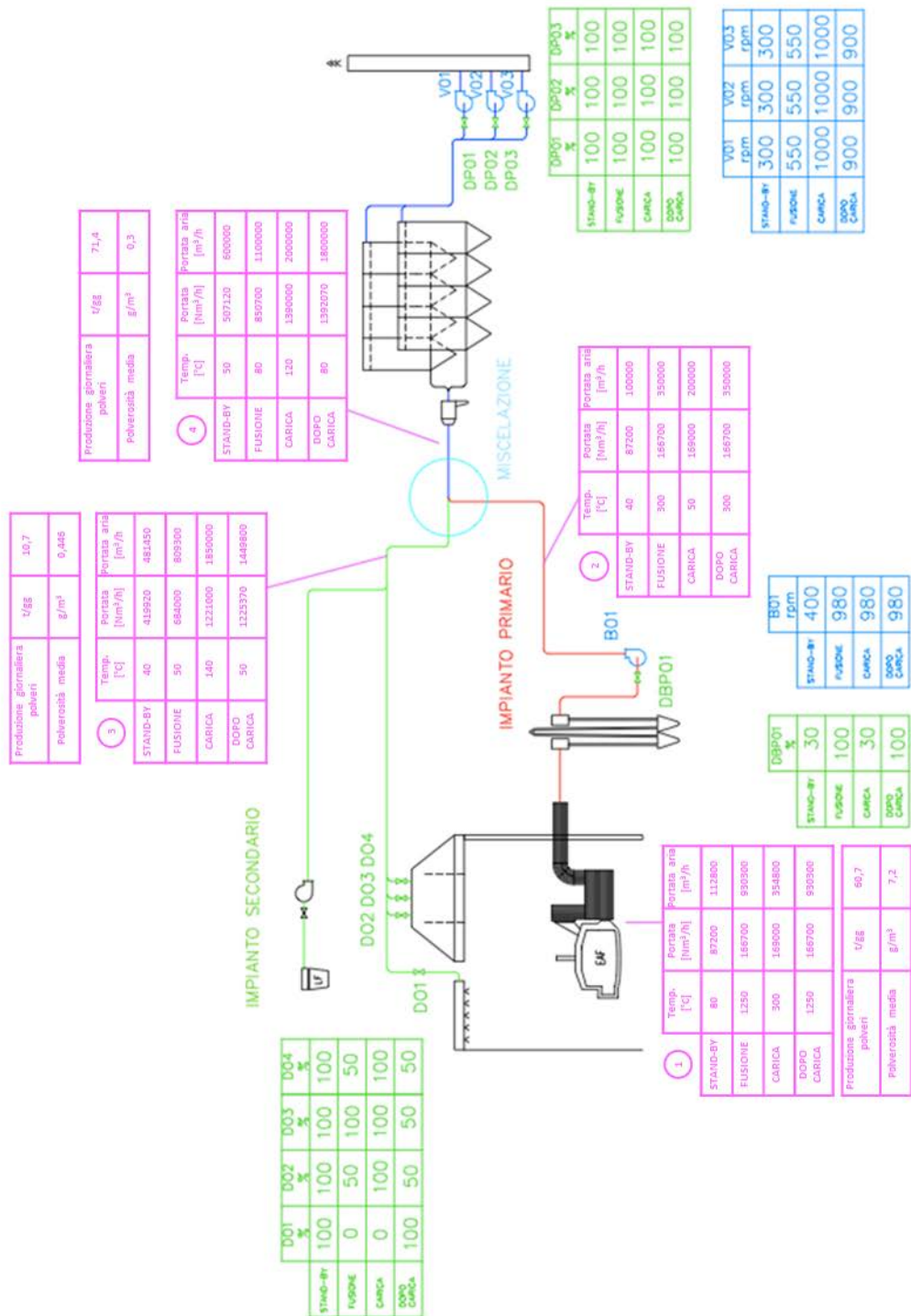


Figura 135 - Fasi di funzionamento linea di trattamento e depurazione fumi impianto tradizionale.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Nella Figura 135 vengono schematizzate le condizioni di lavoro delle valvole e serrande (colore verde), sia quelle dei ventilatori del camino e del booster (colore blu); si vedano anche le tabelle di seguito riportate.

Tabella 36 - Condizioni di lavoro delle serrande e valvole nelle quattro fasi di funzionamento nell'impianto tradizionale.

		D01	D02	D03	D04	DP01	DP02	DP03	DBP01
<b>STAND-BY</b>	%	100	100	100	100	100	100	100	30
<b>FUSIONE</b>	%	0	50	100	50	100	100	100	100
<b>CARICA</b>	%	0	100	100	100	100	100	100	30
<b>DOPO CARICA</b>	%	100	50	50	50	100	100	100	100

Tabella 37 - Condizioni di lavoro delle serrande e valvole dei ventilatori al camino e booster nelle quattro fasi di funzionamento nell'impianto tradizionale.

		V01	V02	V03	B01
<b>STAND-BY</b>	rpm	300	300	300	400
<b>FUSIONE</b>	rpm	550	550	550	980
<b>CARICA</b>	rpm	1000	1000	1000	980
<b>DOPO CARICA</b>	rpm	900	900	900	980

#### 8.1.2.1 PUNTO 1 - STATO A

Le temperature dei fumi prima dell'ingresso alla settling chamber, punto 1 di Figura 135, possono raggiungere i 1250 °C in fase di fusione mentre in fase di carica scendono a 300 °C.

La fase di fusione è approssimativamente quella prevalente in termini di tempo nel ciclo TTT rispetto alle altre.

La tabella riassume le caratteristiche principali per il punto 1 nelle quattro fasi (i valori sono stati arrotondati).

Tabella 38 - Caratteristiche impianto tradizionale nel punto 1 durante le quattro fasi di funzionamento.

<b>IMPIANTO PRIMARIO PUNTO 1</b>			
<b>Produzione giornaliera polveri**</b>	$P_{1g}$	t/gg	60,7
<b>Polverosità media</b>	$P_1$	g/m <sup>3</sup>	7,2
<b>Densità fumi</b>	$\gamma_1$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,3
<b>FASE STAND-BY</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-SB}$	°C	80
<b>Portata a 80 °C</b>	$Q_{NI-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	87200
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-SB}$	m <sup>3</sup> /h	112800
<b>Densità fumi a 80 °C</b>	$\gamma_{1-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	1,0054
<b>Portata massica a 80 °C</b>	$Q_{1m-80}$	kg/h	113400
<b>FASE FUSIONE</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-F}$	°C	1250
<b>Portata a 1250 °C</b>	$Q_{NI-F}$	Nm <sup>3</sup> /h	166700
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-F}$	m <sup>3</sup> /h	930300
<b>Densità fumi a 1250 °C</b>	$\gamma_{1-F}$	kg/m <sup>3</sup>	0,2330
<b>Portata massica a 1250 °C</b>	$Q_{1m-F}$	kg/h	216800



8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

IMPIANTO PRIMARIO PUNTO 1			
<b>FASE CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-C}$	$^{\circ}\text{C}$	300
<b>Portata a 300 °C</b>	$Q_{N1-C}$	$\text{Nm}^3/\text{h}$	169000
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-C}$	$\text{m}^3/\text{h}$	354800
<b>Densità fumi a 300 °C</b>	$\gamma_{1-C}$	$\text{kg}/\text{m}^3$	0,6194
<b>Portata massica a 300 °C</b>	$Q_{1m-C}$	$\text{kg}/\text{h}$	219800
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-DC}$	$^{\circ}\text{C}$	1250
<b>Portata a 1250 °C</b>	$Q_{N1-DC}$	$\text{Nm}^3/\text{h}$	166700
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-DC}$	$\text{m}^3/\text{h}$	930300
<b>Densità fumi a 1250 °C</b>	$\gamma_{1-DC}$	$\text{kg}/\text{m}^3$	0,2330
<b>Portata massica a 1250 °C</b>	$Q_{1m-DC}$	$\text{kg}/\text{h}$	216800

\*\* a esclusione delle sostanze solide che si depositano nella settling chamber.

Le temperature delle varie fasi di funzionamento sono state rilevate sperimentalmente.

Le portate d'aria espresse in  $\text{m}^3/\text{h}$  sono state stabilite in base al ventilatore booster dell'impianto primario: il ventilatore infatti determina nel punto 2 di Figura 135 una portata d'aria pari a 350000  $\text{m}^3/\text{h}$  per le fasi di fusione e dopo carica, di 200000  $\text{m}^3/\text{h}$  per la fase di carica e di 100000  $\text{m}^3/\text{h}$  per quella di stand-by (si veda la Tabella 39). In base a queste sono state calcolate le portate espresse in  $\text{Nm}^3/\text{h}$  nel punto 2 per le varie fasi di funzionamento che sono uguali a quelle nel punto 1:

$$(33) \quad Q_{N1-i} = Q_{N2-i} = Q_{2-i} \frac{273}{(273 + T_{2-i})} [\text{Nm}^3/\text{h}]$$

con  $T_{2-i}$  la temperatura del punto 2 relativa alla fase i-esima espressa in  $^{\circ}\text{C}$  e  $Q_{2-i}$  la portata d'aria del punto 2 relativa alla fase i-esima in  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Si procede quindi con il calcolo delle portate reali  $Q_{1-i}$  nel punto 1 relative alle varie fasi secondo la relazione:

$$(34) \quad Q_{1-i} = Q_{N2-i} \frac{(273 + T_{1-i})}{273} [\text{m}^3/\text{h}]$$

con  $Q_{N2-i} = Q_{N1-i}$

dove  $T_{1-i}$  rappresenta la temperatura del punto 1 della fase i-esima espressa in  $^{\circ}\text{C}$  e  $Q_{N1-i}$  la portata d'aria del punto 1 della fase i-esima in  $\text{Nm}^3/\text{h}$ .

Vengono inoltre calcolate le portate massiche  $Q_{1m-i}$  nel punto 1 relative alle diverse fasi mediante la relazione:

$$(35) \quad Q_{1m-i} = Q_{1-i} \times \gamma_{1-i} [\text{kg}/\text{h}]$$

con  $\gamma_{1-i}$  la densità dei fumi alla temperatura della fase di funzionamento considerata e calcolata come segue:

$$(36) \quad \gamma_{1-i} = \gamma_1 \frac{273}{(273 + T_{1-i})} [\text{kg}/\text{m}^3]$$

con  $\gamma_1$  la densità nominale dei fumi espressa in  $\text{kg}/\text{Nm}^3$ . A sua volta, la densità nominale dei fumi primari viene calcolata in base alla formula:

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

$$(37) \quad \gamma_1 = \frac{\%CO \times \gamma_{CO} + \%CO_2 \times \gamma_{CO_2} + \%N_2 \times \gamma_{N_2} + \%H_2O \times \gamma_{H_2O} + \%H_2 \times cp_{H_2}}{100} = 1,3 \text{ [kg/Nm}^3\text{]}$$

#### 8.1.2.2 PUNTO 2 - STATO A

A valle di settling chamber, condotto raffreddato e raffreddatore le temperature dei fumi diminuiscono: in fase di fusione scendono a 300 °C; in fase di carica raggiungono i 50 °C.

La tabella riassume le caratteristiche principali per il punto 2 nelle quattro fasi (i valori sono stati arrotondati).

Tabella 39 - Caratteristiche impianto tradizionale nel punto 2 durante le quattro fasi di funzionamento.

<b>IMPIANTO PRIMARIO PUNTO 2</b>			
<b>Produzione giornaliera polveri**</b>	$P_{2g}$	t/gg	60,7
<b>Polverosità media</b>	$P_2$	g/m <sup>3</sup>	7,2
<b>Densità fumi</b>	$\gamma_2$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,3
<b>FASE STAND-BY</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{2-SB}$	°C	40
<b>Portata a 40 °C</b>	$Q_{N2-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	87200
<b>Portata aria</b>	$Q_{2-SB}$	m <sup>3</sup> /h	100000
<b>Densità fumi a 40 °C</b>	$\gamma_{2-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	1,1339
<b>Portata massica a 40 °C</b>	$Q_{2m-SB}$	kg/h	113400
<b>FASE FUSIONE</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{2-F}$	°C	300
<b>Portata a 300 °C</b>	$Q_{N2-F}$	Nm <sup>3</sup> /h	166700
<b>Portata aria</b>	$Q_{2-F}$	m <sup>3</sup> /h	350000
<b>Densità fumi a 300 °C</b>	$\gamma_{2-F}$	kg/m <sup>3</sup>	0,6190
<b>Portata massica a 300 °C</b>	$Q_{2m-F}$	kg/h	216800
<b>FASE CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{2-C}$	°C	50
<b>Portata a 50 °C</b>	$Q_{N2-C}$	Nm <sup>3</sup> /h	169000
<b>Portata aria</b>	$Q_{2-C}$	m <sup>3</sup> /h	200000
<b>Densità fumi a 50 °C</b>	$\gamma_{2-C}$	kg/m <sup>3</sup>	1,0988
<b>Portata massica a 50 °C</b>	$Q_{2m-C}$	kg/h	219800
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{2-DC}$	°C	300
<b>Portata a 300 °C</b>	$Q_{N2-DC}$	Nm <sup>3</sup> /h	166700
<b>Portata aria</b>	$Q_{2-DC}$	m <sup>3</sup> /h	350000
<b>Densità fumi a 300 °C</b>	$\gamma_{2-DC}$	kg/m <sup>3</sup>	0,6190
<b>Portata massica a 300 °C</b>	$Q_{2m-DC}$	kg/h	216800

\*\* a esclusione delle sostanze solide che si depositano nella settling chamber.

Le temperature delle varie fasi di funzionamento sono state rilevate sperimentalmente.

Come detto in precedenza, le portate espresse in m<sup>3</sup>/h sono imposte dal ventilatore booster, mentre le portate nominali e quelle massiche sono uguali a quelle calcolate nel punto 1.

Per il calcolo della densità dei fumi alla temperatura della fase di funzionamento considerata si è considerata la formula:

$$(38) \quad \gamma_{2-i} = \gamma_1 \frac{273}{(273 + T_{2-i})} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

8.1.2.3 PUNTO 3 - STATO A

La tabella riassume le caratteristiche principali del circuito secondario nel punto 3 durante le fasi di funzionamento (i valori sono stati arrotondati).

Tabella 40 - Caratteristiche impianto tradizionale nel punto 3 durante le quattro fasi di funzionamento.

<b>IMPIANTO SECONDARIO PUNTO 3</b>			
<b>Produzione giornaliera polveri**</b>	$P_{3g}$	t/gg	10,7
<b>Polverosità media</b>	$P_3$	g/m <sup>3</sup>	0,446
<b>Densità fumi</b>	$\gamma_3$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,29
<b>FASE STAND-BY</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{3-SB}$	°C	40
<b>Portata a 40 °C</b>	$Q_{N3-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	419920
<b>Portata aria</b>	$Q_{3-SB}$	m <sup>3</sup> /h	481450
<b>Densità fumi a 40 °C</b>	$g_{3-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	1,1251
<b>Portata massica a 40 °C</b>	$Q_{3m-SB}$	kg/h	541700
<b>FASE FUSIONE</b>			
<b>Temperatura minima</b>	$T_{3-F}$	°C	50
<b>Portata a 50 °C</b>	$Q_{N3-F}$	Nm <sup>3</sup> /h	684000
<b>Portata aria</b>	$Q_{3-F}$	m <sup>3</sup> /h	809300
<b>Densità fumi a 50 °C</b>	$\gamma_{3-F}$	kg/m <sup>3</sup>	1,0903
<b>Portata massica a 50 °C</b>	$Q_{3m-F}$	kg/h	882400
<b>FASE CARICA</b>			
<b>Temperatura massima</b>	$T_{3-C}$	°C	140
<b>Portata a 140 °C</b>	$Q_{N3-C}$	Nm <sup>3</sup> /h	1223000
<b>Portata aria</b>	$Q_{3-C}$	m <sup>3</sup> /h	1850000
<b>Densità fumi a 140 °C</b>	$\gamma_{3-C}$	kg/m <sup>3</sup>	0,8527
<b>Portata massica a 140 °C</b>	$Q_{3-C}$	kg/h	1577500
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
<b>Temperatura minima</b>	$T_{3-DC}$	°C	50
<b>Portata a 50 °C</b>	$Q_{N3-DC}$	Nm <sup>3</sup> /h	1225370
<b>Portata aria</b>	$Q_{3-DC}$	m <sup>3</sup> /h	1449800
<b>Densità fumi a 50 °C</b>	$\gamma_{3-DC}$	kg/m <sup>3</sup>	1,0903
<b>Portata massica a 50 °C</b>	$Q_{3-DC}$	kg/h	1580600

\*\* a esclusione delle sostanze solide che si depositano nella settling chamber.

Le temperature delle varie fasi di funzionamento sono state rilevate sperimentalmente.

Le portate d'aria espresse in m<sup>3</sup>/h sono state stabilite in base ai ventilatori a monte del camino: i ventilatori, infatti, determinano nel punto 4 di Figura 135 una portata d'aria pari a 600000 m<sup>3</sup>/h per la fase di stand-by, 1100000 m<sup>3</sup>/h per la fase di fusione, 2000000 m<sup>3</sup>/h per la fase di carica, 1800000 m<sup>3</sup>/h per la fase di dopo-carica (si veda la Tabella 41). In base a queste, si sono calcolate le portate espresse in Nm<sup>3</sup>/h nel punto 4 per le varie fasi di funzionamento mediante la formula:

$$(39) \quad Q_{N4-i} = Q_{4-i} \frac{273}{(273 + T_{4-i})} [Nm^3/h]$$

con  $T_{4-i}$  la temperatura del punto 4 relativa alla fase i-esima espressa in °C e  $Q_{4-i}$  la portata d'aria del punto 4 relativa alla fase i-esima in m<sup>3</sup>/h. Le portate espresse in Nm<sup>3</sup>/h nel punto 3 per le varie fasi di funzionamento sono date dalla differenza tra le portate nominali del punto 4 e del punto 2:

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

$$(40) \quad Q_{N3-i} = Q_{N4-i} - Q_{N2-i} \text{ [Nm}^3\text{/h]}$$

Si sono calcolate quindi le portate reali  $Q_{3-i}$  nel punto 3 relative alle varie fasi di funzionamento come:

$$(41) \quad Q_{3-i} = Q_{N3-i} \frac{(273 + T_{3-i})}{273} \text{ [m}^3\text{/h]}$$

con  $T_{3-i}$  la temperatura del punto 3 relativa alla fase i-esima espressa in °C e  $Q_{N3-i}$  la portata d'aria del punto 3 relativa alla fase i-esima in Nm<sup>3</sup>/h.

Vengono inoltre calcolate le portate massiche  $Q_{3m-i}$  nel punto 3 relative alle varie fasi mediante la relazione:

$$(42) \quad Q_{3m-i} = Q_{3-i} \times \gamma_{3-i} \text{ [kg/h]}$$

con  $\gamma_{3-i}$  la densità dei fumi alla temperatura della fase di funzionamento. La densità  $\gamma_{3-i}$  è calcolata come:

$$(43) \quad \gamma_{3-i} = \gamma_3 \frac{273}{(273 + T_{3-i})} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

con  $\gamma_3$  la densità nominale dei fumi espressa in kg/Nm<sup>3</sup> e assunta pari a quella dell'aria a temperatura ambiente, pari a 1,29 kg/m<sup>3</sup>.

La polverosità media è un dato di progetto e sarà minore rispetto a quella rilevata nel circuito primario.

Come si vede dalle tabelle precedenti, i fumi primari saranno caratterizzati da elevata polverosità, circa sedici volte quella dei fumi secondari, e bassa portata, un terzo di quella del circuito secondario. Si riporta schematicamente il confronto in termini di rapporto dei parametri alle condizioni reali:

	FUMI PRIMARI	FUMI SECONDARI
<b>Rapporto portata aria</b>	1	3
<b>Rapporto temperatura massima</b>	8	1
<b>Rapporto polverosità media</b>	16	1

#### 8.1.2.4 PUNTO 4 - STATO A

Come precedentemente detto, le due linee primaria e secondaria convergono in un'unica linea che convoglia i fumi al filtro a maniche.

La tabella riassume le caratteristiche principali dei fumi in ingresso al filtro, punto 4, nelle quattro fasi (i valori sono stati arrotondati).

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Tabella 41 - Caratteristiche impianto tradizionale nel punto 4 durante le quattro fasi di funzionamento.

<b>AL FILTRO A MANICHE PUNTO 4</b>			
<b>Produzione giornaliera polveri**</b>	$P_{4g}$	t/gg	71,4
<b>Polverosità media</b>	$P_4$	g/m <sup>3</sup>	0,3
<b>Densità fumi</b>	$\gamma_4$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,29
<b>FASE STAND-BY</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{4-SB}$	°C	50
<b>Portata a 50 °C</b>	$Q_{N4-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	507120
<b>Portata aria</b>	$Q_{4-SB}$	m <sup>3</sup> /h	600000
<b>Densità fumi a 50 °C</b>	$\gamma_{4-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	1,0903
<b>Portata massica a 50 °C</b>	$Q_{4-SB}$	kg/h	654200
<b>FASE FUSIONE</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{4-F}$	°C	80
<b>Portata aria a 80°</b>	$Q_{N4-F}$	Nm <sup>3</sup> /h	850700
<b>Portata aria</b>	$Q_{4-F}$	m <sup>3</sup> /h	1100000
<b>Densità fumi a 80 °C</b>	$\gamma_{4-F}$	kg/m <sup>3</sup>	0,9976
<b>Portata massica a 80 °C</b>	$Q_{4-F}$	kg/h	1097400
<b>FASE CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{4-C}$	°C	120
<b>Portata aria a 120 °C</b>	$Q_{N4-C}$	Nm <sup>3</sup> /h	1390000
<b>Portata aria</b>	$Q_{4-C}$	m <sup>3</sup> /h	2000000
<b>Densità fumi a 120 °C</b>	$\gamma_{4-C}$	kg/m <sup>3</sup>	0,8961
<b>Portata massica a 120 °C</b>	$Q_{4-C}$	kg/h	1792200
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{4-DC}$	°C	80
<b>Portata aria a 80 °C</b>	$Q_{N4-DC}$	Nm <sup>3</sup> /h	1392070
<b>Portata aria</b>	$Q_{4-DC}$	m <sup>3</sup> /h	1800000
<b>Densità fumi a 80 °C</b>	$\gamma_{4-DC}$	kg/m <sup>3</sup>	0,9976
<b>Portata massica a 80 °C</b>	$Q_{4-DC}$	kg/h	1795800

\*\* a esclusione delle sostanze solide che si depositano nella settling chamber.

Le temperature delle varie fasi di funzionamento sono state rilevate sperimentalmente.

Come detto in precedenza, le portate espresse in m<sup>3</sup>/h sono determinate dai ventilatori, mentre le portate nominali e quelle massiche delle varie fasi sono state calcolate mediante le formule (44) e (45) rispettivamente:

$$(44) \quad Q_{N4-i} = Q_{4-i} \frac{273}{(273 + T_{4-i})} [Nm^3/h]$$

$$(45) \quad Q_{4m-i} = Q_{4-i} \times \gamma_{4-i} [kg/h]$$

con  $T_{4-i}$  la temperatura relativa alla fase espressa in °C e  $\gamma_{4-i}$  la densità calcolata mediante la relazione:

$$(46) \quad \gamma_{4-i} = \gamma_4 \frac{273}{(273 + T_{4-i})} [kg/m^3]$$

con  $T_{4-i}$  la temperatura relativa alla fase specifica espressa in °C e  $\gamma_4$  la densità nominale dei fumi espressa in kg/Nm<sup>3</sup> e assunta pari a quella dei fumi secondari data la portata nettamente maggiore di questi rispetto ai fumi del circuito primario.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 8.1.3 Andamento delle temperature degli off-gas nella settling chamber

Il profilo di temperatura dei fumi nella settling chamber viene riportato nel grafico di Figura 136 durante un intero ciclo TTT, valutato pari a 68 min.

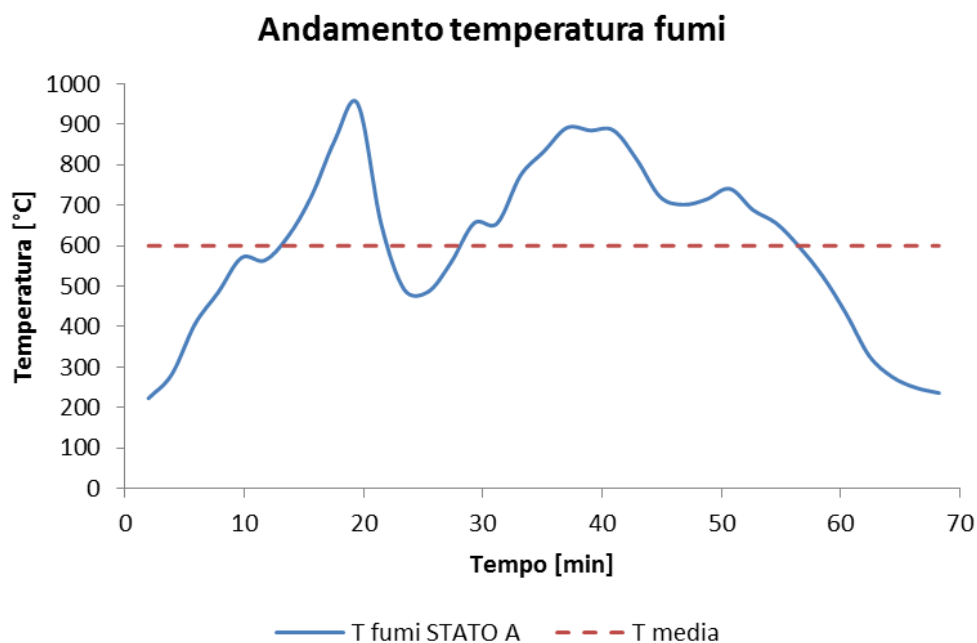


Figura 136 - Andamento temperatura fumi durante un ciclo TTT nella settling chamber.

### 8.1.4 Caratteristiche chimico-fisiche dei fumi

#### Fumi primari

Per la composizione dei fumi primari in ingresso alla settling chamber si fa riferimento ai dati reperiti in letteratura, come spiegato al paragrafo 3.2 e 7.2.2: i principali componenti degli off-gas sono quelli riportati in Tabella 3 al paragrafo 3.2.1. Per quanto riguarda gli elementi gassosi si considerano le percentuali riportate nella Tabella 4 dello stesso paragrafo, ma con una semplificazione, ovvero considerando nulle quelle di  $H_2$  e  $CO$ : infatti, dato che lo scopo della trattazione è di recuperare la maggior quantità di energia, si è ipotizzato che l'entrata di aria dal gap sia la minore possibile per completare la post-combustione, ottenendo così la minima diluizione possibile; ne consegue che tutta la  $CO$  e  $H_2$  abbiano completato le loro reazioni di post-combustione. Ad ogni modo, i residui incombusti (ppm) hanno rilevanza dal punto di vista ambientale, ma non tecnico-energetico.

#### Fumi secondari

Anche in questo caso, per le caratteristiche dei fumi secondari si fa riferimento alla letteratura (paragrafo 3.3) e si considerano i dati della Tabella 5.

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Polveri

Le caratteristiche delle polveri prodotte nell'impianto trattamento e depurazione fumi sono riportate nella Tabella 42 e sono afferenti alla loro captazione al raffreddatore, separatore centrifugo e filtri. Come anticipato, i dati riportati sono di tipo sperimentale.

Tabella 42 - Caratteristiche delle polveri dell'impianto considerato.

<b>PARAMETRI</b>	<b>U<sub>misura</sub></b>	<b>Valore</b>
Residuo secco a 150 °C	%	99,9
Arsenico	mg/Kg	<0,5
Cadmio	mg/Kg	600
Cromo totale	mg/Kg	4200
Cromo VI	mg/Kg	<0,5
Rame	mg/Kg	2000
Boro	mg/Kg	680
Manganese	mg/Kg	10000
Berillio	mg/Kg	<0,5
Mercurio	mg/Kg	<0,1
Nichel	mg/Kg	120
Piombo	mg/Kg	30000
Selenio	mg/Kg	120
Antimonio	mg/Kg	120
Zinco	mg/Kg	211000
Stagno	mg/Kg	250
Tallio	mg/Kg	<0,5
Tellurio	mg/Kg	<0,5
Cobalto	mg/Kg	15
Bario	mg/Kg	500
Vanadio	mg/Kg	<0,5
Cloruri	mg/Kg	26000
Solfati	mg/Kg	9000
Cianuri liberi	mg/Kg	<0,1
Fluoruri	mg/Kg	300
Solventi organici clorurati	mg/Kg	<5
<b>GRANULOMETRIA:</b>	<b>U<sub>misura</sub></b>	<b>Valore</b>
Frazione inferiore a 2mm	%	100
<b>IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI:</b>	<b>U<sub>misura</sub></b>	<b>Valore</b>
Naftalene	mg/Kg	<0,01
Acenaftene	mg/Kg	<0,01
Fluorene	mg/Kg	3
Fenantrene	mg/Kg	0,08
Antracene	mg/Kg	<0,01
Fluorantrene	mg/Kg	1
Pirene	mg/Kg	<0,01
Benzo(a)antracene	mg/Kg	<0,01
Crisene	mg/Kg	<0,01
Benzo(b)fluorantene	mg/Kg	<0,01
Benzo(K)fluorantene	mg/Kg	<0,01
Benzo(j)fluorantene	mg/Kg	<0,01
Benzo(a)pirene	mg/Kg	<0,01

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Benzo(b)pirene	mg/Kg	<0,01
Dibenzo(a,h)antracene	mg/Kg	<0,01
Benzo(g,h,i)perilene	mg/Kg	<0,01
Indeno(1,2,3-c,d)pirene	mg/Kg	<0,01
Acenaftilene	mg/Kg	<0,01
<b>COMPOSIZIONE IN OSSIDI:</b>		
	<b>U<sub>misura</sub></b>	<b>Valore</b>
Na <sub>2</sub> O	%p	2
K <sub>2</sub> O	%p	0,6
CaO	%p	22
MgO	%p	5
BaO	%p	<0,01
pH	-	9,7
Conducibilità elettrica	μS/cm	8970
Arsenico	mg/l	<0,001
Bario	mg/l	0,3
Cadmio	mg/l	25
Cromo totale	mg/l	<0,001
Rame	mg/l	0,7
Mercurio	mg/l	<0,001
Molibdeno	mg/l	0,001
Nichel	mg/l	0,03
Piombo	mg/l	6
Antimonio	mg/l	<0,001
Selenio	mg/l	0,02
Zinco	mg/l	900
Cloruri	mg/l	2600
Fluoruri	mg/l	30
Cianuri	mg/l	<0,01
Solfati	mg/l	900
Carbonio Organico Disciolto (DOC)	mg/l	3,5

#### 8.1.5 Sistema di raffreddamento dell'impianto tradizionale

Si riporta in Figura 137 lo schema dell'impianto di raffreddamento della volta e del forno. I componenti principali sono:

- Tubi di raffreddamento;
- Torre evaporativa;
- Vasca di contenimento;
- Valvole;
- Pompe di mandata.



8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

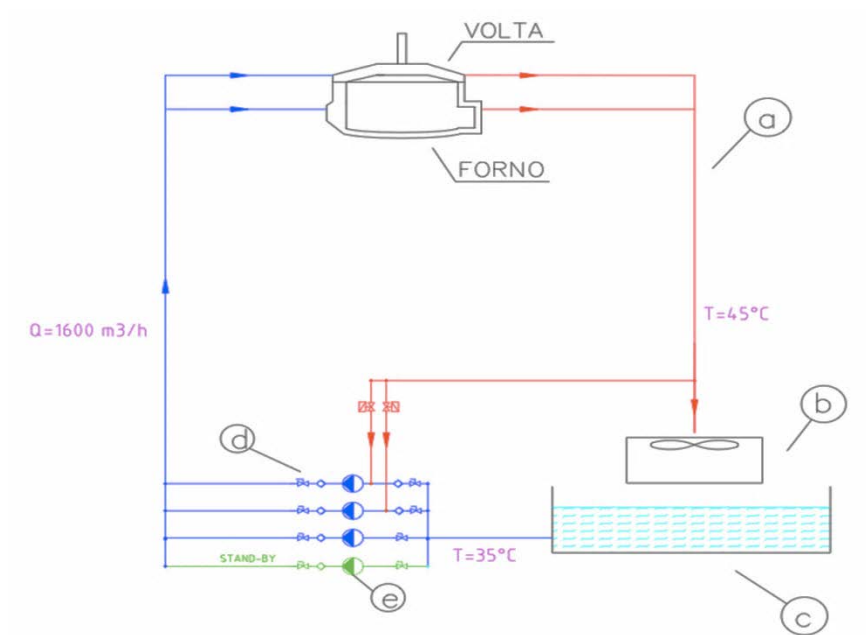


Figura 137 - Sistema di raffreddamento forno e volta.

In Figura 138 si riporta lo schema dell'impianto di raffreddamento relativo alla settling chamber e al condotto fumi primario. I componenti principali sono anche in questo caso:

- a. Tubazioni di raffreddamento;
- b. Torre evaporativa;
- c. Vasca di contenimento;
- d. Valvole;
- e. Pompe di mandata.

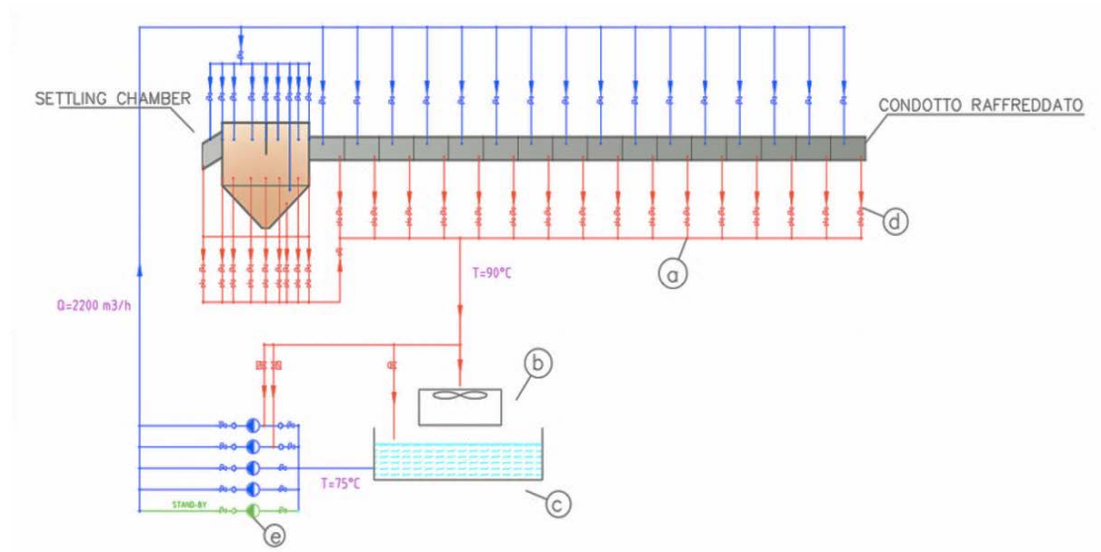


Figura 138 - Sistema di raffreddamento circuito primario.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## 8.2 AZIONE - DIFFERITORE TERMICO INERZIALE A PCM PASSIVO

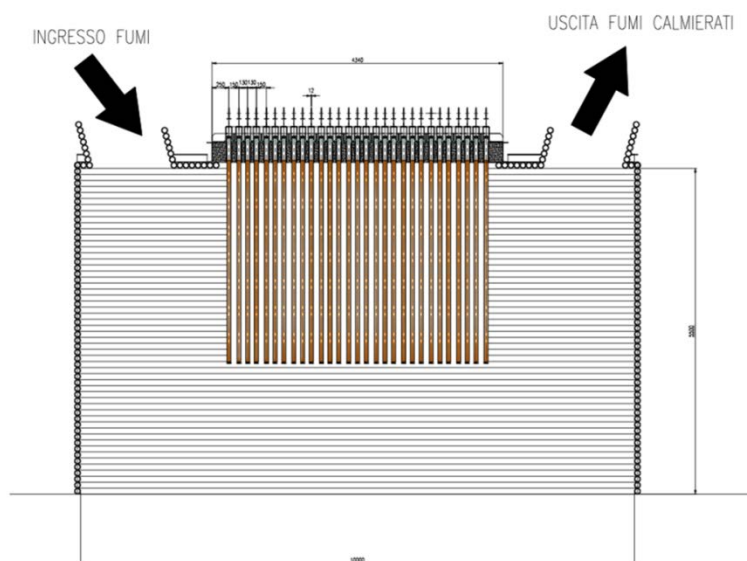


Figura 139 - Inserimento del differitore termico passivo nella settling chamber.

Si ipotizza di inserire il differitore termico inerziale “passivo” contenente alluminio come PCM nella settling chamber allo scopo di calmiere le temperature degli off-gas del forno.

Valgono le considerazioni e analisi svolte nel capitolo 7.

L'apparato presenta le stesse dimensioni di ingombro (4mx4m) e la stessa struttura di quello precedentemente descritto ai paragrafi 7.4.1 e 7.4.2. L'unica differenza riguarda numero di tubi, loro lunghezza e disposizione. Nelle conclusioni riportate al paragrafo 7.6, la migliore configurazione tecnologica dell'apparato dal punto di vista termofluidodinamico risultava essere a tubi sfalsati con un numero di tubi pari a 2576: 378 con diametro da 2” e passo 90 mm posti nella prima sezione dell'apparato; 2198 con diametro da 1” e passo 45 mm posti nella parte finale. In questo modo si otterrebbe un buono scambio termico grazie ai tubi da 1” e si eviterebbe il surriscaldamento degli stessi grazie al posizionamento dei tubi da 2” nella parte più calda dell'apparato a diretto contatto con i fumi. Tuttavia, per il modello realizzativo proposto si prevede una diversa configurazione: tubi allineati da 2” e 3,4 m di altezza, minor numero, 841, con passo maggiore, pari a 130 mm, e disposti in file di 29.

La scelta effettuata porta a una semplificazione della realizzazione del sistema che prevede una sezione di contenimento tubi delle stesse dimensioni sia nella parte iniziale, sia in quella finale. Impiegando tubi da 2” si previene il possibile, seppur limitato, surriscaldamento dei tubi garantendo comunque un efficiente scambio termico fumi-PCM. Inoltre, se da un lato il passo maggiore tra i tubi, riducendone di fatto il numero, penalizza l'effetto calmierante, dall'altro previene l'otturazione delle sezioni di passaggio degli off-gas dovuta al deposito delle polveri sulle pareti dei tubi stessi (fenomeno dello sporcamento). Infine, dal punto di vista economico, il costo dell'apparato diminuisce

## 8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

essendo la quantità di materiale per i tubi e di PCM minore ed essendo le caratteristiche costruttive uguali per tutti i componenti (ordine in blocco).

Nell'Allegato 3 si riporta il dettaglio del possibile modello realizzativo concepito per l'apparato passivo a PCM sopra descritto e della relativa struttura di sollevamento e supporto.

*È bene precisare che in fase progettuale operativa dell'impianto sarà necessaria:*

- Una rilevazione puntuale delle temperature in gioco, in particolare all'interno della settling chamber (o immediatamente a valle di essa) su più cicli TTT;
- Una rilevazione puntuale delle portate;
- Un'analisi qualitativa e quantitativa delle polveri;
- Dovrà essere svolta una simulazione termofluidodinamica specifica per il caso in esame e un'attività di progettazione sulla base dei dati rilevati.

*Le analisi svolte per la trattazione in esame sono giustificate in quanto afferenti a rilevamenti effettuati e letteratura consolidata sulla base di dati noti.*

### 8.2.1 Effetto calmierante dell'apparato

In base ai dati delle simulazioni effettuate (paragrafo 7.5.3.1.1), si riporta il grafico delle temperature raggiunte dai fumi in camera di sedimentazione dopo l'effetto calmierante dell'apparato a PCM descritto. A seguito della calmierazione la differenza tra le temperature massima e minima raggiunte dagli off-gas  $\Delta T_B$  sarà pari a circa 273 °C, nettamente inferiore rispetto al caso di un impianto tradizionale dove la differenza  $\Delta T_A$  è di 728 °C.

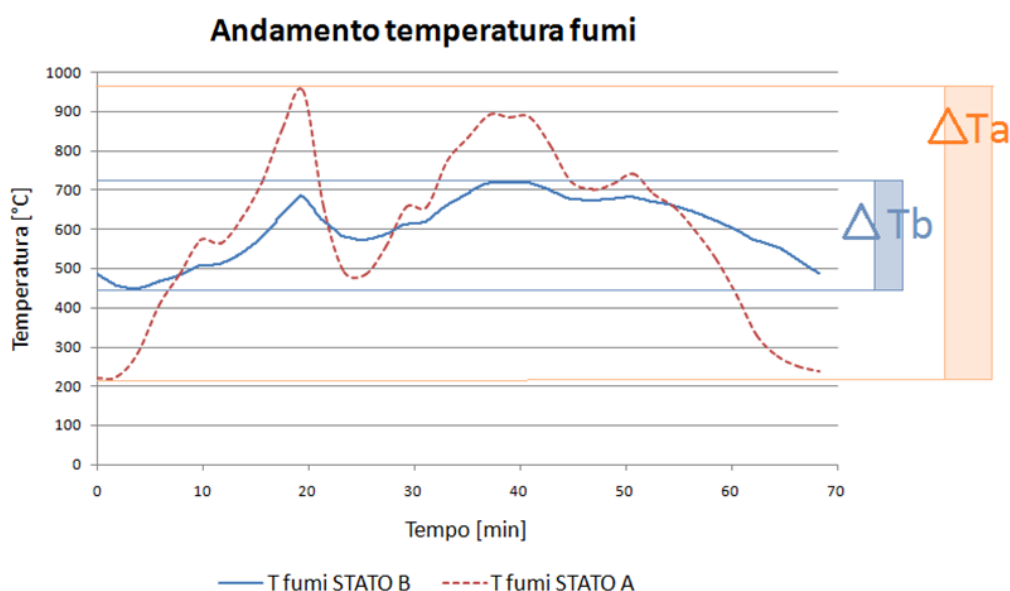


Figura 140 - Andamento delle temperature dei fumi in un ciclo TTT prima (STATO A) e dopo (STATO B) la calmierazione.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

La tabella riassume i valori della temperatura massima, minima, della varianza e della deviazione standard in uscita dalla settling chamber per un impianto fumi tradizionale (STATO A) e per uno con apparato a PCM (STATO B).

Tabella 43 - Confronto temperatura, varianza e deviazione standard prima e dopo il differitore.

		STATO A		STATO B	
<b>Temperatura massima</b>	°C	$T_{maxA}$	950,8	$T_{maxB}$	719,8
<b>Temperatura minima</b>	°C	$T_{minA}$	223,0	$T_{minB}$	447,2
<b>Differenza di temperatura</b>	°C	$\Delta T_A = T_{max} - T_{min}$	727,9	$\Delta T_B = T_{max} - T_{min}$	272,7
<b>Varianza</b>	-	$s_A^2$	41508,6	$s_B^2$	6445,9
<b>Deviazione standard</b>	-	$s_A$	203,7	$s_B$	80,3

### 8.2.2 Preventivo dell'apparato a PCM: costo di realizzazione

Il modello realizzativo proposto viene analizzato dal punto di vista economico: viene fatto un preventivo dell'apparato considerando sia la struttura di supporto, sia quella di sollevamento tubi in modo da quantificare l'investimento da effettuare per realizzare la calmierazione dei fumi. Il preventivo è stato realizzato nell'ottica di contenere il più possibile i costi ed è riportato dettagliatamente nell'Allegato 5.

Le considerazioni sulla realizzazione impiantistica del differitore e i valori per stimarne la spesa (compresa la struttura di supporto e sollevamento) sono stati forniti dall'ing. S. Canta di *Mangiarotti S.p.A.* in provincia di Udine [67].

Il preventivo (Tabella 44) riguarda sia il costo complessivo del materiale impiegato per la realizzazione dei singoli componenti, sia quello della manodopera. Il costo totale risulta pari a 170.340 € (Totale 1) ; aumenta in base al margine aziendale (assunto pari al 20%) e arriva a 212.925 € (Totale 2).

Si è ipotizzato il costo dell'ulteriore materiale (refrattario e dischi di ceramica) e di trasporto, installazione e collaudo finale dell'apparato; il preventivo totale (3) dell'apparato risulta pari a circa 300.000 €

Infine, tenendo conto della quantità di materiale PCM (si veda il paragrafo 7.5.3.1) e del relativo costo, si stima un totale di circa 320.000 € (Totale 4).

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Tabella 44 - Preventivo apparato a PCM. Fonte: [67]- [63].

<b>MATERIALI</b>		
Costo materiale tubo	€	55.600
Costo materiale lama di sollevamento	€	1.312
Costo materiale struttura si supporto	€	24.421
Costo viteria	€	673
Materiale per abbattimento fumi	€	62.234
Costo totale materiale	€	144.240
<b>MANODOPERA</b>		
Tubo completo	€	12.965
Lama di sollevamento	€	5.550
Struttura di supporto	€	7.585
Costo totale manodopera	€	26.100
<b>TOTALI</b>		
Totale 1 - Costo materiale e manodopera	€	170.340
Totale 2 - Comprensivo di margine aziendale (hp max: 20%)	€	212.925
<b>Totale 3 approx. - Comprensivo di altro materiale e dell'installazione e collaudo</b>	<b>€</b>	<b>300.000</b>
Costo PCM	€/kg	1,488
M <sub>PCM</sub> singolo tubo (paragrafo 7.5.3.1)	kg	15,3272
M <sub>PCM</sub> totale per 841 tubi	t	12,89
Costo M <sub>PCM</sub> totale	€	19.180
<b>Totale 4 - Costo apparato approx (Totale 3) + Costo M<sub>PCM</sub> totale</b>	<b>€</b>	<b>~ 320.000</b>

Il costo complessivo sarebbe dunque molto basso e avrebbe una lieve incidenza sul bilancio economico globale del recupero energetico. L'investimento maggiore sarà costituito dal gruppo caldaia-turbina e dalle eventuali modifiche impiantistiche della linea fumi. Rispetto ai sistemi di recupero energetico attualmente in opera (sistemi ORC) che sfruttano direttamente gli off-gas, l'azione calmierante dell'apparato proposto permetterebbe di migliorare la regolazione e l'efficienza dell'impianto di produzione dell'energia elettrica senza alti costi aggiuntivi.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 8.3 AZIONE - IMPIANTO DI RECUPERO E PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

Viene ipotizzato e analizzato l'inserimento dell'impianto di recupero e produzione di energia elettrica dagli off-gas all'interno della linea di trattamento e depurazione fumi tradizionale dell'acciaieria considerata. L'impianto è costituito da una caldaia di recupero a vapore e il relativo turbo-gruppo per la produzione di energia elettrica. Si prevedono anche dei pannelli water jacket a parete da inserire nella settling chamber.

#### 8.3.1 Inserimento dell'impianto

L'impianto sfrutta l'energia termica dei fumi nella settling chamber e nella tubazione raffreddata, come indicato in Figura 141.

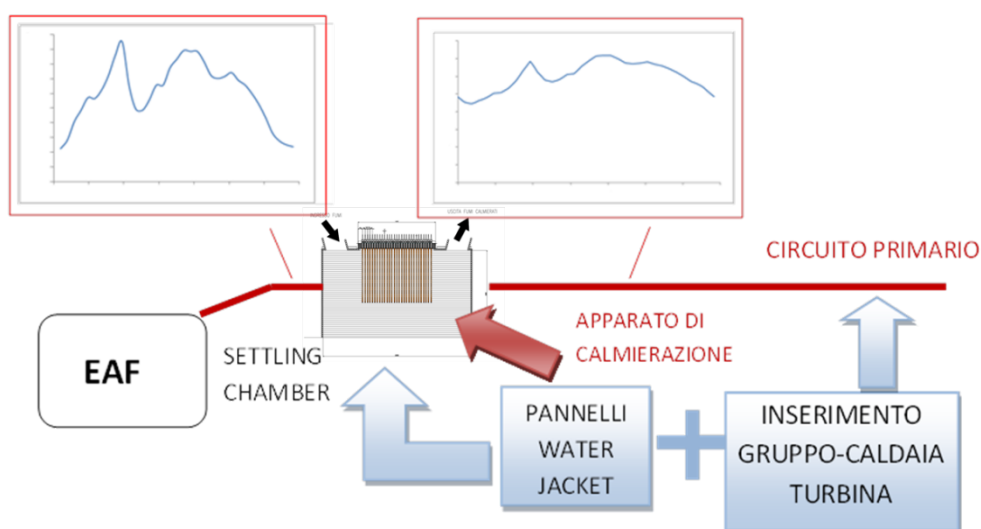


Figura 141 - Inserimento gruppo caldaia - turbina.

Il tratto di tubazione compreso tra la settling chamber e la caldaia deve essere opportunamente rivestito di materiale isolante in modo da non disperdere il calore dei fumi necessario per il recupero. Parte dell'attuale sistema di raffreddamento dell'impianto primario dovrà quindi essere rimosso.

## 8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

### 8.3.2 Caldaia di recupero

In base ai dati di temperatura e di portata degli off-gas viene effettuato il dimensionamento dell'apparato di recupero e produzione di energia elettrica, la caldaia.

La caldaia di recupero è costituita da:

- Una camera radiante di circa 100 m<sup>2</sup> rivestita in materiale tipo Sic 90 (pannelli water jacket) da inserire all'interno della camera di sedimentazione; le superfici di scambio vengono calcolate prevedendo una protezione con "liner" refrattario.
- Una prima sezione della caldaia che esercita con gas molto sporchi e che include i seguenti banchi:
  - Screen Surriscaldatore, superficie evaporante realizzata con tubi molto rarefatti;
  - Banco SH2;
  - Banco SH1;
  - Banco Evaporatore HT.

*Per questa sezione si sono considerate basse velocità del vapore ed elevato fattore di sporramento; le polveri a valle dello Screen potrebbero però essere poco "adesive" essendo la temperatura dei gas inferiore ai 650 °C (max ca. 640 °C) e i composti "basso-fondenti" delle polveri non dovrebbero essere causa di elevato sporramento. Tuttavia, la sezione in esame potrebbe essere ulteriormente ampliata a seguito di una più attenta analisi delle ceneri.*

- Una seconda sezione della caldaia che esercita con gas pre-trattati da ciclone e che include i seguenti banchi:
  - Banco Evaporatore LT;
  - Banco Economizzatore.

*In questa sezione sono previste velocità del vapore elevate (attorno ai 10-12 m/s) e fattori di sporramento ridotti.*

Si prevede l'inserimento in parallelo di due cicloni ad asse verticale per il trattamento dei fumi tra la prima sezione della caldaia (a contatto con i fumi a maggiore temperatura) e la seconda sezione (a contatto con i fumi a minore temperatura).

La caldaia verrà quindi integrata nell'impianto fumi in modo da ottenere maggiore efficienza di recupero.

La tipologia di caldaia e i relativi dati, compreso il preventivo, sono stati forniti dal sig. R. Galleri di *Neoterm S.r.l.* di Varese [68].

I casi analizzati per il dimensionamento della caldaia sono due:

1. Massima temperatura dei fumi in ingresso alla caldaia: 720 °C;
2. Minima temperatura dei fumi in ingresso alla caldaia: 447 °C.

Le analisi termodinamiche, effettuate sempre con la collaborazione di *Neoterm S.r.l.* [68], vengono riportate nei seguenti grafici e riassumono le caratteristiche della produzione di vapore.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 8.3.2.1 CASO 1: Analisi per dimensionamento caldaia con massima temperatura dei fumi

In Figura 142 a) è riportato lo schema del lato fumi e in Figura 142 b) lo schema del lato vapore/acqua all'interno della caldaia. La Figura 143 riporta il diagramma del profilo di temperatura.

In seguito alla calmierazione i fumi hanno una temperatura massima di 720 °C nella settling chamber. L'azione della camera radiante (superficie di scambio di 100 m<sup>2</sup>) inserita nella settling chamber permette di ottenere fumi in uscita a 703 °C che investono la prima sezione della caldaia (screen surriscaldatore, surriscaldatore secondario, surriscaldatore primario ed evaporatore ad alta temperatura); ne consegue un ulteriore abbassamento della temperatura fino a valori di 387 °C. I fumi attraversano i cicloni prima di investire la seconda sezione della caldaia (evaporatore a bassa temperatura ed economizzatore). La temperatura dei fumi in uscita dalla caldaia è prossima ai 200 °C. Per quanto riguarda il circuito acqua-vapore (in controcorrente rispetto ai fumi), la temperatura di ingresso all'economizzatore è di 105 °C e aumenta fino a 225 °C all'uscita dello stesso. Il passaggio di stato avviene a temperatura pari a 267 °C. Il primo surriscaldatore porta il vapore a temperatura di 388 °C, il secondo a temperatura di 420 °C. Si prevedono due controlli, uno di pressione e uno di livello, un attemperatore (SH2) e uno spillamento per la pulizia dei tubi.

La camera radiante e lo screen surriscaldatore sono superfici evaporanti che prevedono quindi temperature di vapore pari a 267 °C.

#### 8.3.2.2 CASO 2: Analisi per dimensionamento caldaia con minima temperatura dei fumi

In Figura 144 a) è riportato lo schema del lato fumi Figura 144 b) lo schema del lato vapore/acqua all'interno della caldaia. La Figura 145 riporta il diagramma del profilo di temperatura.

In seguito alla calmierazione i fumi hanno una temperatura minima di 447 °C nella settling chamber. L'azione della camera radiante inserita nella settling chamber permette di ottenere fumi in uscita a 441 °C che investono la prima sezione della caldaia (screen surriscaldatore, surriscaldatore secondario, surriscaldatore primario ed evaporatore ad alta temperatura); ne consegue un ulteriore abbassamento della temperatura fino a valori di 320 °C. I fumi attraversano i cicloni prima di investire la seconda sezione della caldaia (evaporatore a bassa temperatura e economizzatore). La temperatura dei fumi in uscita dalla caldaia è prossima ai 200 °C.

Per quanto riguarda il circuito acqua-vapore (in controcorrente rispetto ai fumi), la temperatura di ingresso all'economizzatore è di 105 °C e aumenta fino a 260 °C all'uscita dello stesso. Il passaggio di stato avviene a temperatura pari a 261 °C. Il primo surriscaldatore porta il vapore alla temperatura di 348 °C, il secondo a 385 °C. Si prevedono due controlli, uno di pressione e uno di livello, un attemperatore (SH2) e uno spillamento per i soffiatori di pulizia dei ranghi.

La camera radiante e lo screen surriscaldatore sono superfici evaporanti che prevedono quindi temperature di vapore pari a 261 °C.



8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

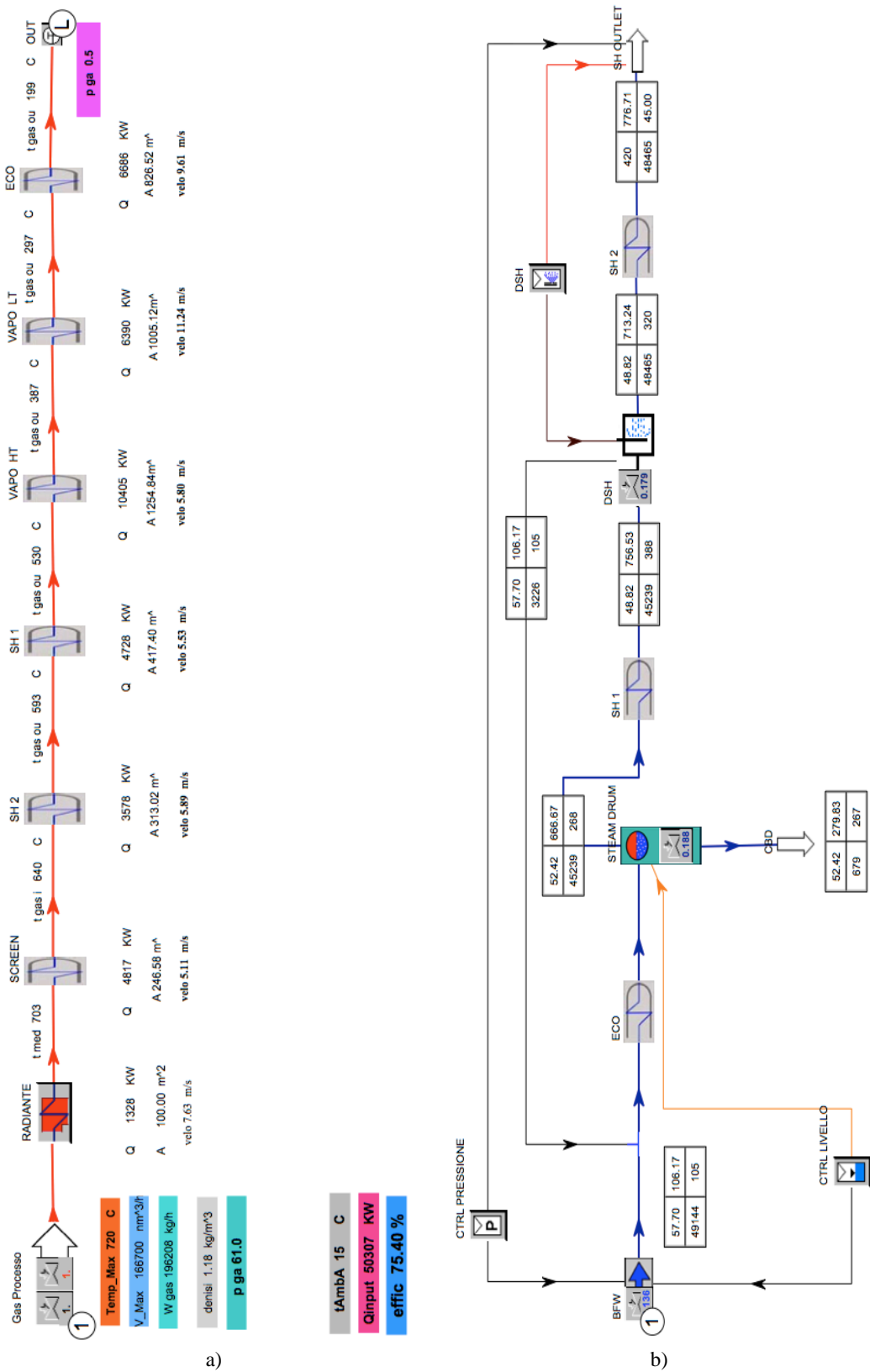


Figura 142 - Schema caldaia massima temperatura: a) lato fumi, b) lato acqua-vapore. Fonte: [68].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

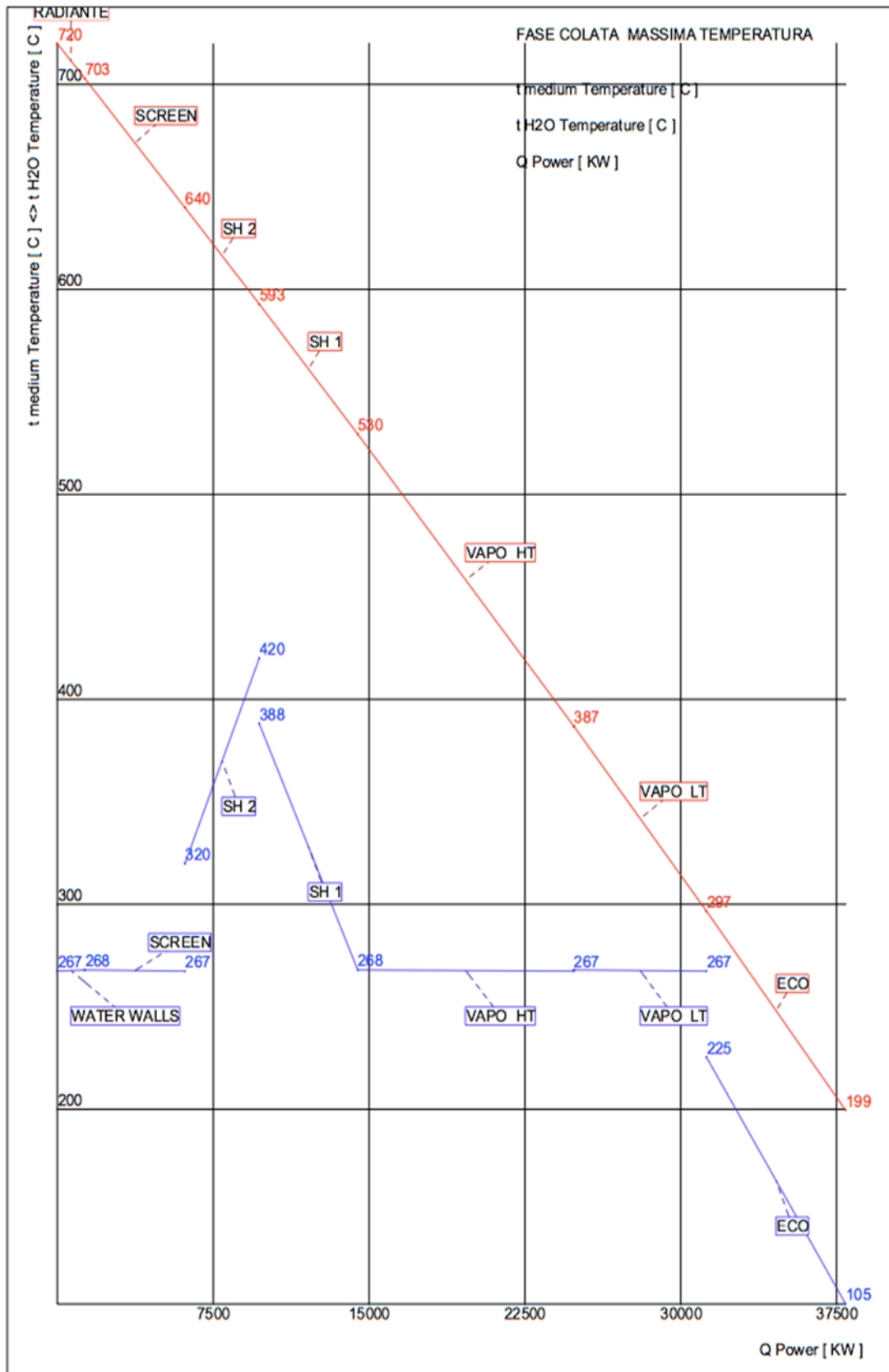


Figura 143 - Diagramma della temperatura fumi - acqua/vapore - massima temperatura. Fonte: [68].

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

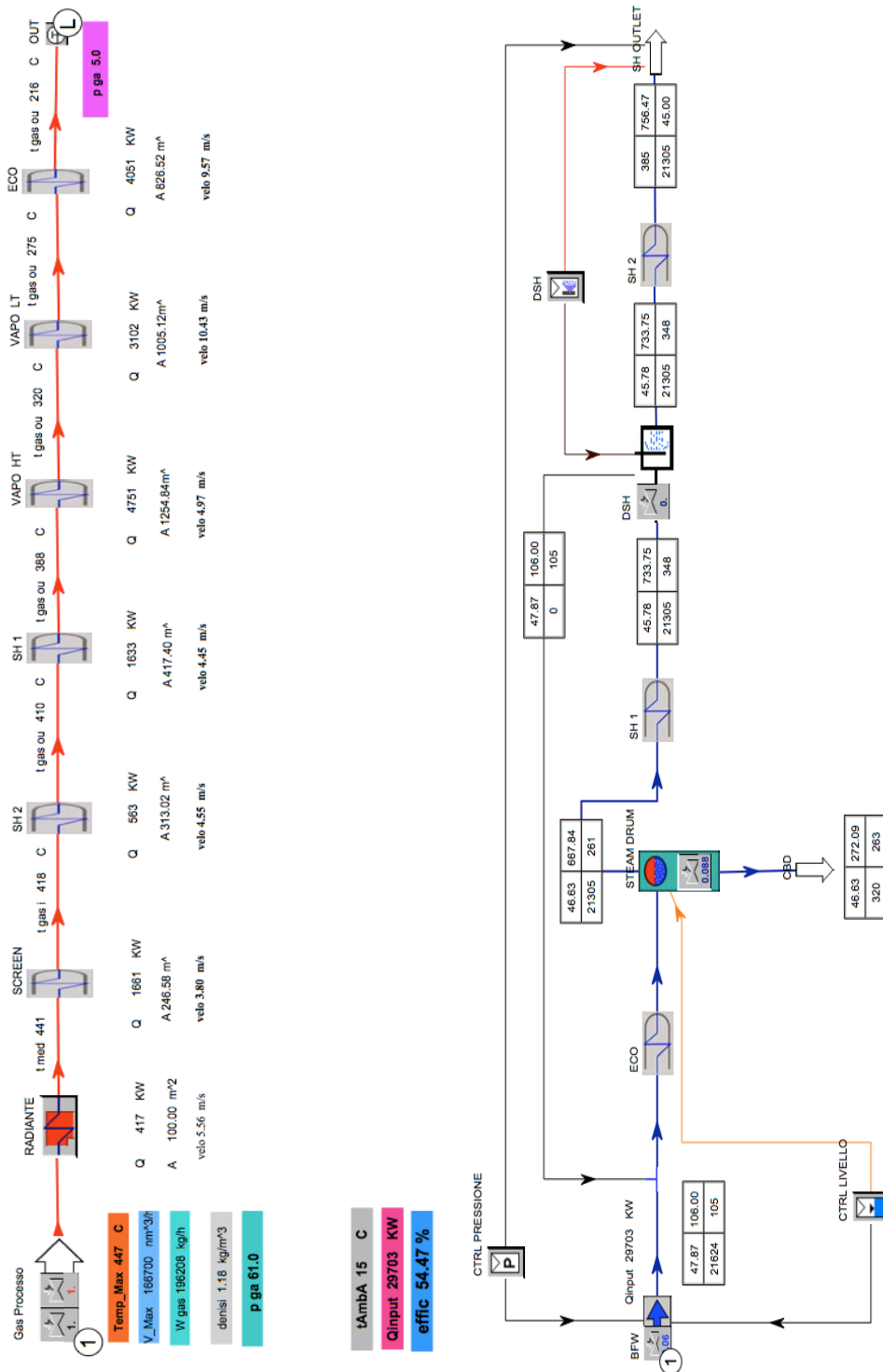


Figura 144 - Schema caldaia minima temperatura: a) lato fumi, b) lato acqua-vapore. Fonte: [68].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

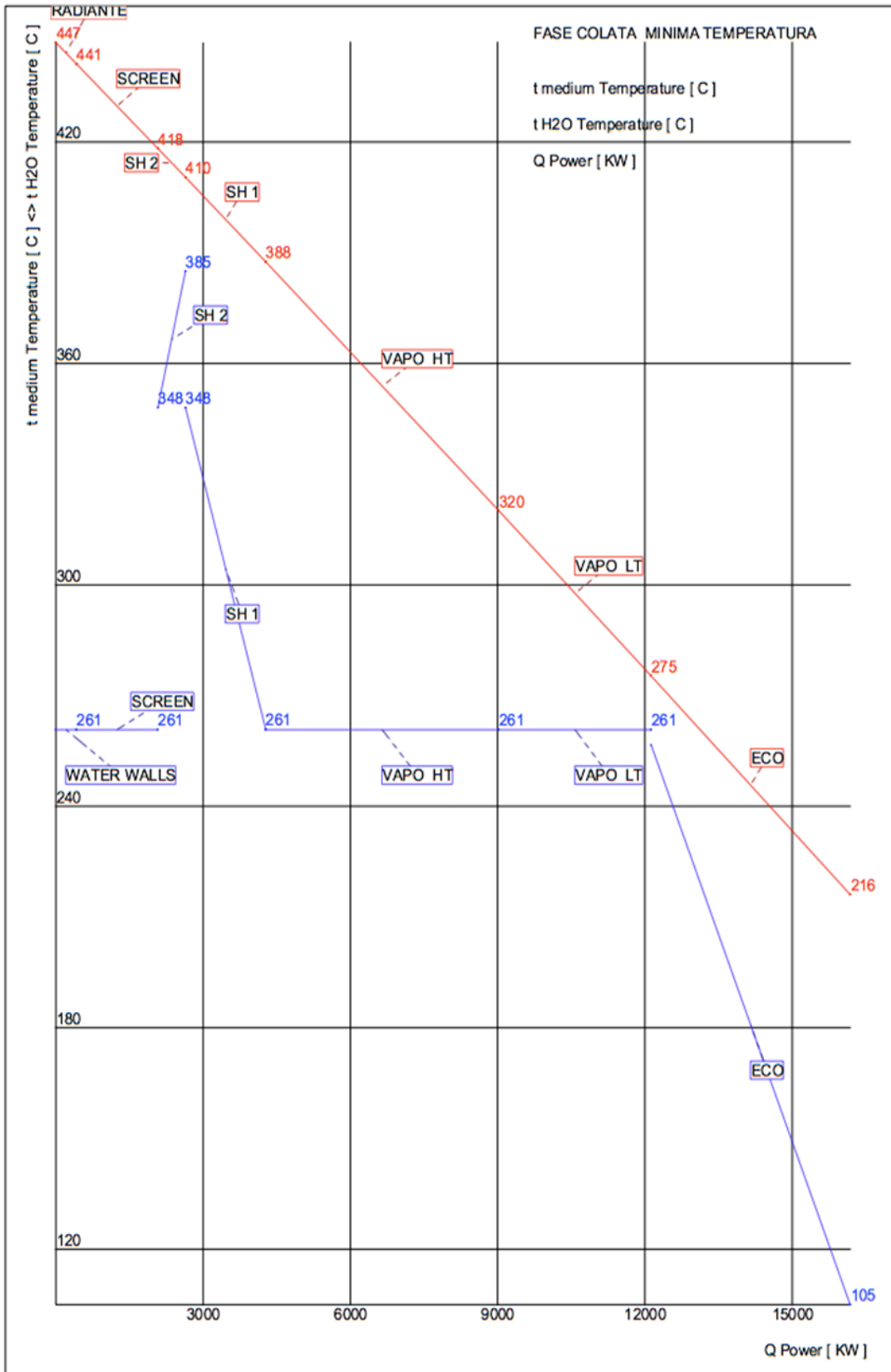


Figura 145 - Diagramma della temperatura fumi - acqua/vapore - minima temperatura. Fonte: [68].

## 8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

### 8.3.2.3 Scelta della caldaia

La scelta della caldaia, in base a quanto riportato da *Neoterm S.r.l.* [68], è ricaduta sul modello P 11.026/GVR - WHRB con portata di vapore pari a 49 t/h, temperatura 400 °C e pressione 40 bar, a parziale circolazione. È quindi prevista l'installazione di 2 pompe di circolazione, una in esercizio e una in stand-by, con assorbimento massimo di circa 40 kW<sub>e</sub> (autoconsumo da considerare). È stata stimata una consistenza in peso della fornitura sintetizzabile come:

- Peso parti in pressione: ca. 200000 kg;
- Peso varie carpenterie: ca. 280000 kg.

La Figura 146 riporta lo schema di come la caldaia verrebbe integrata nella linea primaria di trattamento: si distinguono le due sezioni descritte in precedenza separate dai cicloni.

La caldaia proposta è solo una delle diverse soluzioni che possono essere adottate per il recupero. Potrebbero, infatti, essere impiegate delle caldaie verticali in cui i fumi entrano dall'alto e viene immessa in continuo una certa quantità di sfere metalliche che assieme ai fumi investono i fasci tubieri mantenendoli puliti. Sul fondo è prevista la separazione delle sfere che vengono rimesse in circolo. La quantità di sfere da reintegrare viene calcolata in base al loro peso a causa dell'usura delle stesse. In sostanza, la manutenzione preventiva delle caldaie verticali viene effettuata al massimo una o due volte all'anno quando l'acciaieria ferma e consiste nella verifica dello spessore dei tubi. L'utilizzo delle caldaie verticali (Figura 147) è stato suggerito dal sig. Maieron, di *Gemini Industriale S.r.l.* in provincia di Padova [69].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

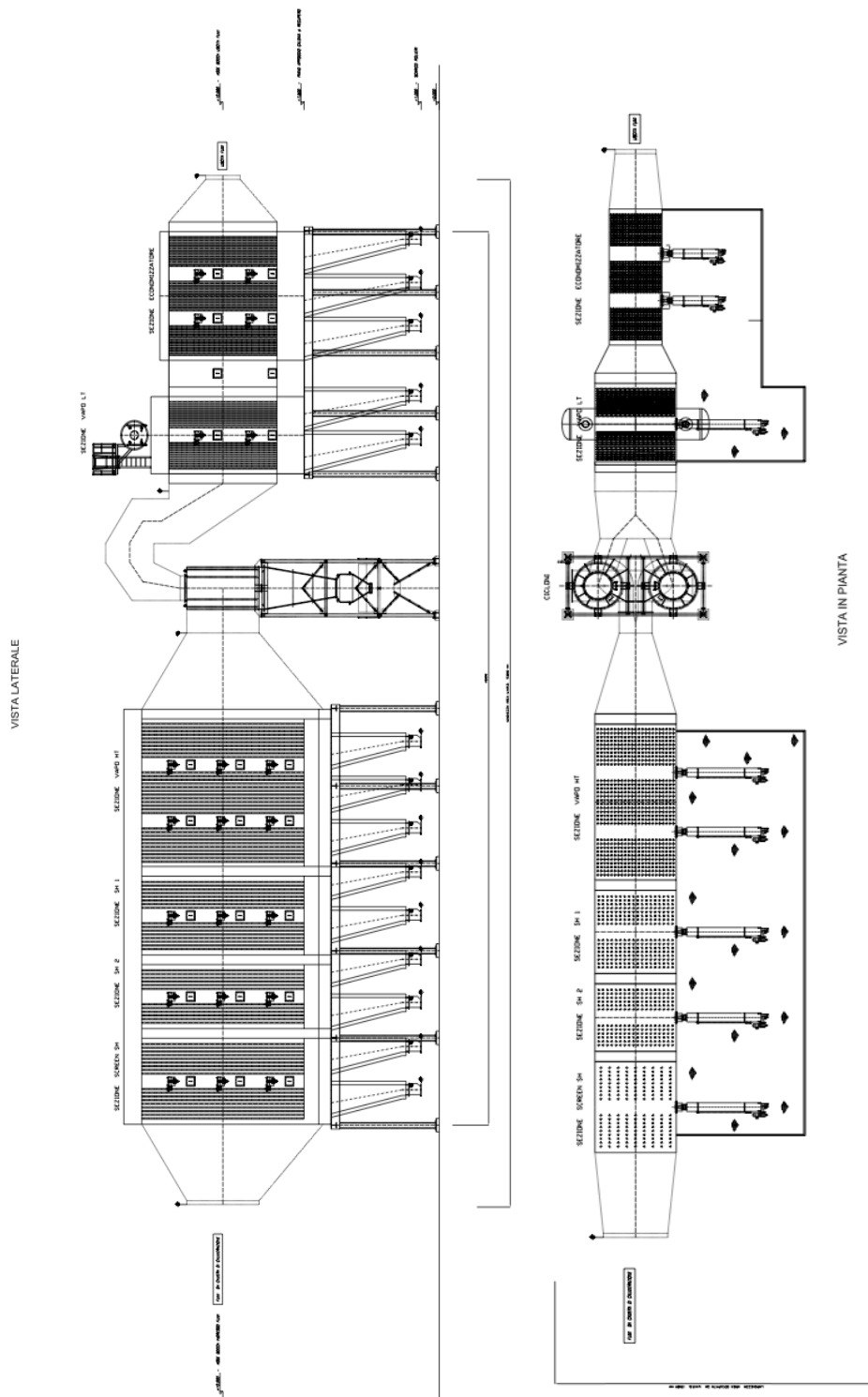


Figura 146 - Caldaia integrata. Fonte: [68].

## 8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

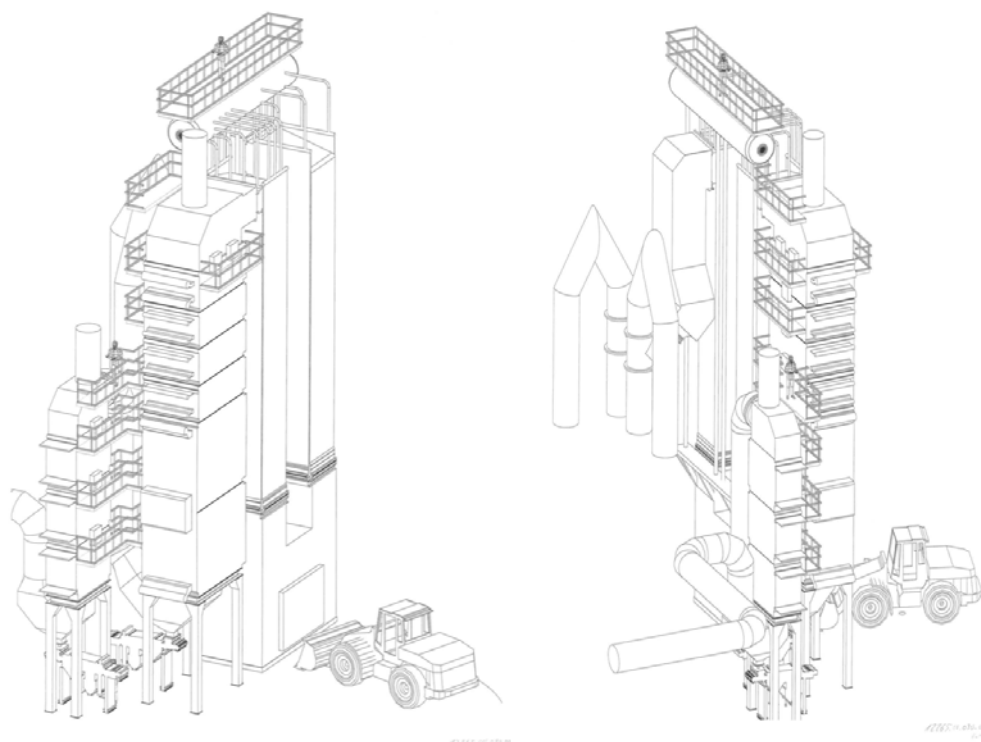


Figura 147 - Caldaie verticali.

### 8.3.3 Turbo-gruppo

Una volta effettuata la scelta del tipo di caldaia da inserire nell'impianto si può procedere al dimensionamento del turbo-gruppo. Lo studio e le scelte sono state fatte in collaborazione con il sig. Maieron, *Gemini Industriale S.r.l.* [69].

In base ai dati di vapore analizzati in precedenza si scelgono:

- Turbogeneratore modello DE PRETTO MANN:
  - potenza nominale: 11,5 MWe;
- Condensatore ad acqua:
  - pressione vapore: 0,08 bar;
  - condizioni dell'acqua di raffreddamento: standard a 27-35 °C con  $\Delta T$  di 10 °C.

Si prevedono inoltre il degasatore, il demineralizzatore da 2 t/h e le torri evaporative del circuito di condensazione. Tuttavia, essendo la temperatura in uscita dal condensatore pari a circa 35 °C con un  $\Delta T$  di 10 °C, il circuito di condensazione potrebbe essere integrato con quello di raffreddamento del forno e della volta già esistente; è opportuno in ogni caso una verifica delle effettive temperature di funzionamento della torre. Si risparmierebbe in tal modo sulle torri evaporative e sulle tubazioni e si ridurrebbe la complessità impiantistica.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 8.3.4 Preventivo impianto

La tabella riporta il preventivo complessivo dell'impianto di recupero e produzione di energia elettrica in base allo studio condotto. I valori per le stime dei costi sono stati forniti dal sig. R. Galleri, *Neoterm S.r.l.* [68] per quanto concerne la caldaia e dal sig. Maieron, *Gemini Industriale S.p.A.*, relativamente al turbo-gruppo [69]. I dettagli dei calcoli sono riportati in Allegato 6.

Tabella 45 - Preventivo gruppo caldaia-turbina. Fonte: [68]- [69].

<b>CALDAIA</b>		
Caldaia di recupero 11.026/GVR - W.H.R.B. - 49 t/h - 400 °C - 40 bar	€	7.800.000
<b>TURBO-GRUPPO</b>		
Turbina DE PRETTO MANN (potenza nominale 11,5 MWe)	€	5.000.000
Condensatore acqua (27-35°C a 0,08 bar)		
Degasatore		
Torri evaporative		
Demineralizzatore (2 t/h)		
Montaggio		
<b>VARIE</b>		
Accessori	€	1.000.000
Quadristica elettrica		
Opere edili		
Imprevisti		
<b>TOTALE</b>		
<b>Spesa complessiva dell'impianto di recupero e produzione energia elettrica</b>	<b>€</b>	<b>13.800.000</b>



## 8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

### 8.3.5 Valutazione della potenza termica negli STATI A e B

Si valuta ora il potenziale inserimento del gruppo caldaia-turbina nella linea fumi di un impianto tradizionale (STATO A) e nella linea fumi di un impianto con differitore termico a PCM (STATO B) con riferimento allo scambio energetico tra caldaia e fumi.

Il ciclo TTT, come già anticipato, è di 68 min, suddiviso in time step di 117 s.

*Nei calcoli viene approssimata la portata dei fumi; come visto in precedenza, questa varia essendo funzione delle fasi di funzionamento del forno. Si può però, in via approssimativa, considerarla costante e pari a quella della fase di fusione ( $166700 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) dato che questa dura più dell'80% di un ciclo TTT.*

#### 8.3.5.1 STATO A - Valutazione potenza termica

Il grafico di Figura 148 riporta l'andamento della temperatura dei fumi in ingresso alla caldaia ( $T_{in}$ ) in un impianto tradizionale (linea blu), la temperatura media che i fumi raggiungono in seguito allo scambio termico con la caldaia (linea verde) e la temperatura media di uscita del vapore dal surriscaldatore in seguito allo scambio termico coi fumi (approssimativamente  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , linea rossa). Per garantire un efficace scambio termico e una maggiore efficienza nella produzione di energia elettrica, la temperatura dei fumi dovrebbe essere in ogni istante del ciclo TTT superiore a questa temperatura, cosa che non accade in un impianto tradizionale.

*Entrambe queste temperature vengono considerate in prima approssimazione costanti.*

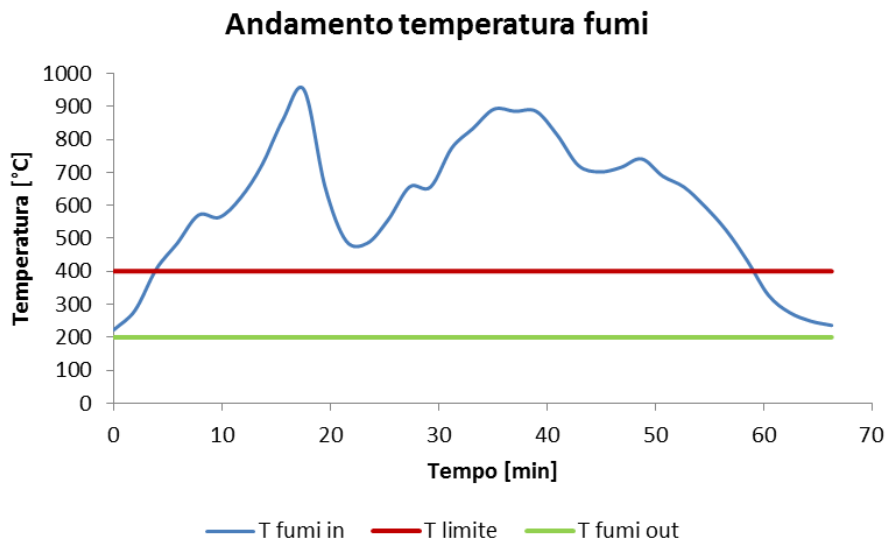


Figura 148 - Andamento temperatura fumi nell'impianto tradizionale.

Il grafico di Figura 149 riporta l'andamento della potenza termica dei fumi in ingresso alla caldaia e quello dei fumi in uscita.

L'AREA A rappresenta l'energia termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro ed è definita dalla relazione:

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

$$(47) \quad \text{AREA A} = \int_0^{TTT} N_{IN} - N_{OUT} d\tau = 33 \text{ [MWh}_t\text{]}$$

$N_{IN}$  e  $N_{OUT}$  sono le potenze termiche dei fumi prima e dopo lo scambio termico esprimibili mediante la relazione:

$$(48) \quad N(\tau) = Q_f \cdot c_{pf}(T) \cdot T(\tau) [W]$$

con  $Q_f$  la portata dei fumi,  $c_{pf}$  il calore specifico dei fumi funzione della temperatura e  $T(\tau)$  la temperatura dei fumi funzione del tempo.

Per quanto detto, si considera costante la portata dei fumi e pari a quella di fusione ( $166700 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) dato che questa dura più dell'80% di un ciclo TTT.

Il calore specifico dei fumi è funzione della temperatura ed è calcolabile mediante la formula:

$$(49) \quad c_p(T) = 0,0002 \cdot T(\tau) + 1,291 \text{ [kJ/Nm}^3\text{K]}$$

Si ottiene quindi:

$$(50) \quad \text{Potenza termica scambiata con la caldaia} = 29 \text{ [MW}_t\text{]}$$

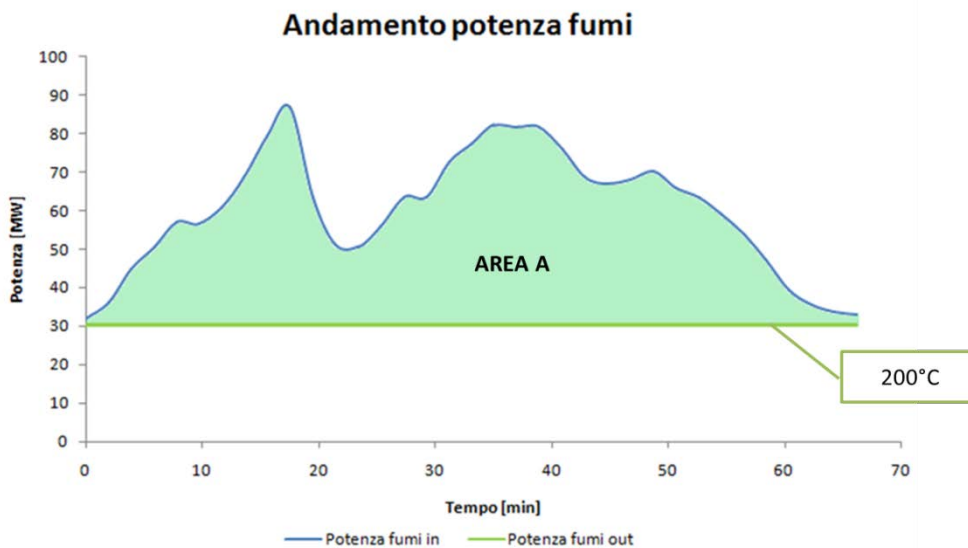


Figura 149 - Energia termica scambiata tra fumi e fluido di lavoro.

Prendendo ora in considerazione la temperatura limite, pari a quella del vapore surriscaldato, si nota che l'energia termica scambiata tra fumi e fluido di lavoro (Figura 150) comprende: l'energia termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro (AREA a in blu), considerata positiva; l'energia termica ceduta dal fluido di lavoro ai fumi (AREA b in rosso), considerata negativa perché potenzialmente non sfruttabile per il recupero energetico. L'inversione del flusso di calore dal fluido di lavoro ai fumi avviene nelle fasi di funzionamento in cui i fumi si trovano a una temperatura inferiore a quella del fluido, che possono essere la fase di carica o quella di stand by. Se una caldaia venisse inserita all'interno di un impianto tradizionale parte dell'energia termica dei fumi verrebbe sottratta al fluido di lavoro, diminuendo l'efficienza di scambio termico e di conseguenza il rendimento del gruppo caldaia-turbina.

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

L'energia ceduta dai fumi al fluido di lavoro del surriscaldatore, AREA a, è definita in base alla relazione:

$$(51) \quad \text{AREA a} = \text{Energia fumi, vapore surr} = \int_{T_1}^{T_2} N_{IN} - N_{OUT} d\tau = 19 \text{ [MWh}_t\text{]}$$

$T_1$  e  $T_2$  sono gli istanti in cui la temperatura dei fumi eguaglia quella del fluido di lavoro;  $N_{IN}$  e  $N_{OUT}$  sono le potenze termiche dei fumi prima e dopo lo scambio termico esprimibili mediante la relazione (48).  $T_s$ , temperatura del vapore surriscaldato, è pari a 400 °C.

Vale quanto detto per l'approssimazione della portata dei fumi considerata costante e pari a quella della fase di fusione (166700 Nm<sup>3</sup>/h).

Il calore specifico si ottiene mediante la relazione (49).

La potenza termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro durante il ciclo è quindi pari a:

$$(52) \quad \text{Potenza termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro}_a = 17 \text{ [MW}_t\text{]}$$

Lo stesso ragionamento viene fatto per l'energia ceduta dal fluido di lavoro ai fumi AREA b:

$$(53) \quad \text{AREA b} = \text{Energia vapore surr, fumi} = \int_{T_2}^{T_1} N_{IN} - N_{OUT} d\tau = 2 \text{ [MWh}_t\text{]}$$

Si ottiene:

$$(54) \quad \text{Potenza termica ceduta dal fluido di lavoro ai fumi}_b = 1,7 \text{ [MW}_t\text{]}$$

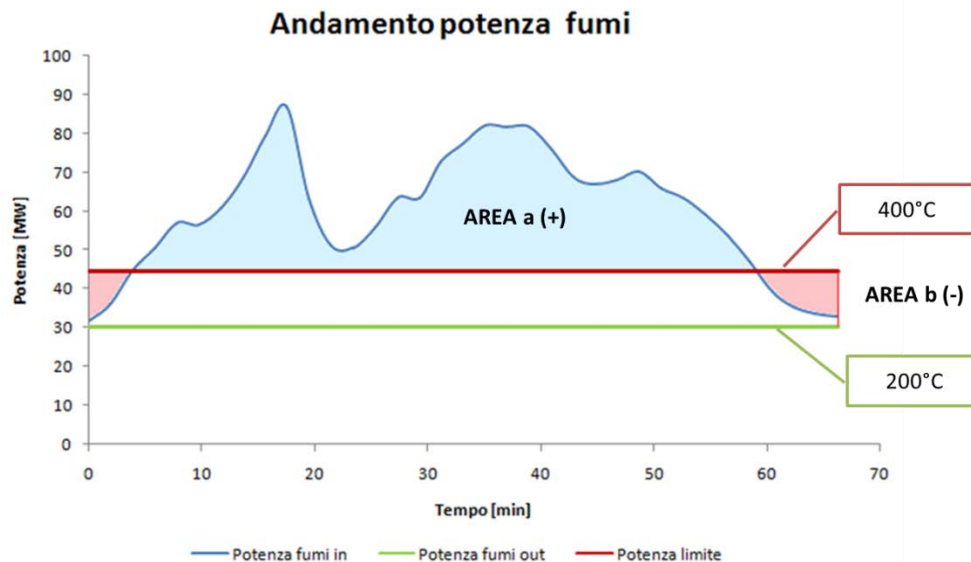


Figura 150 - Energia termica scambiata tra fumi e fluido di lavoro: area blu: assorbita dal fluido di lavoro; area rossa: ceduta dal fluido di lavoro ai fumi.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 8.3.5.2 STATO B - Valutazione potenza termica

Il grafico di Figura 151 riporta l'andamento delle temperature dei fumi in ingresso alla caldaia ( $T_{in}$ ) in un impianto con differitore termico inerziale a PCM (linea blu), la temperatura media che i fumi raggiungono in seguito allo scambio termico (linea verde) e la temperatura media di uscita del vapore dal surriscaldatore in seguito allo scambio termico coi fumi (linea rossa). Per garantire un efficace scambio termico e una maggiore efficienza nella produzione di energia elettrica, la temperatura dei fumi dovrebbe essere in ogni istante del ciclo TTT superiore a questa temperatura, situazione garantita dalla calmierazione.

Entrambe queste temperature vengono considerate in prima approssimazione costanti.

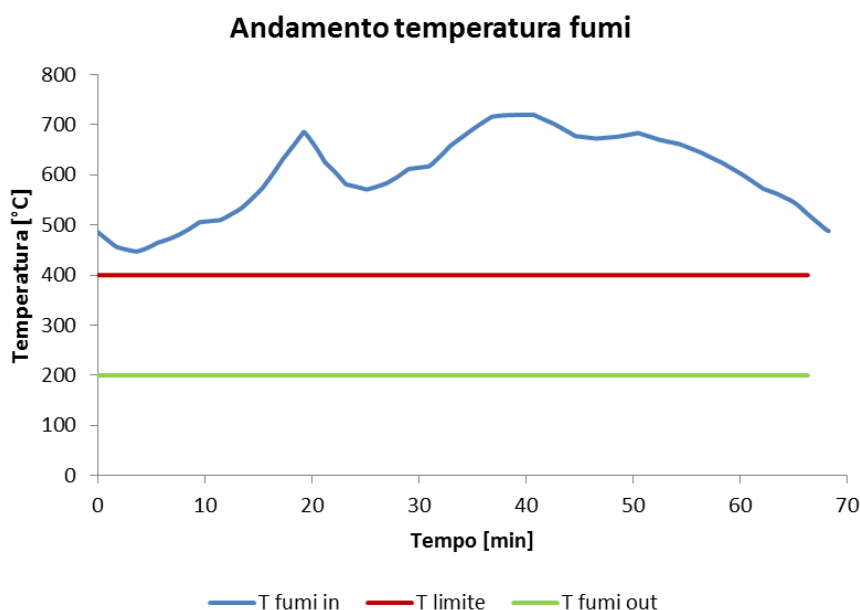


Figura 151 - Andamento temperatura fumi nuovo impianto

Il grafico di Figura 152 riporta l'andamento della potenza termica dei fumi in ingresso alla caldaia e quello dei fumi in uscita. L'AREA A rappresenta l'energia termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro ed è definita dalla relazione:

$$(55) \quad \text{AREA A} = \int_0^{TTT} N_{IN} - N_{OUT} d\tau = 33 \text{ [MWh}_t\text{]}$$

$N_{IN}$  e  $N_{OUT}$  sono le potenze termiche dei fumi prima e dopo lo scambio termico esprimibili mediante la relazione (48):

$$N(\tau) = Q_f \cdot c_{pf}(T) \cdot T(\tau) [W]$$

con  $Q_f$  la portata dei fumi,  $c_{pf}$  il calore specifico dei fumi funzione della temperatura e  $T(\tau)$  la temperatura dei fumi funzione del tempo.

Per quanto detto, si considera costante la portata dei fumi e pari a quella di fusione ( $166700 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) dato che questa dura più dell'80% di un ciclo TTT.

Il calore specifico si ottiene mediante la relazione (49).

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Si ottiene quindi:

$$(56) \quad \text{Potenza termica scambiata con la caldaia} = 29 \text{ [MW}_t\text{]}$$

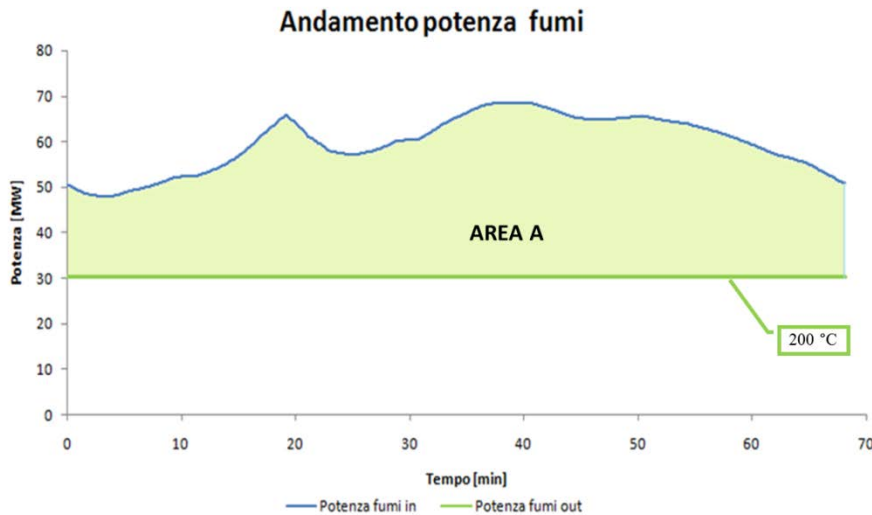


Figura 152 - Energia termica scambiata tra fumi e fluido di lavoro.

Prendendo ora in considerazione la temperatura limite, pari a quella del vapore surriscaldato, si nota che l'energia termica scambiata tra fumi e fluido di lavoro (Figura 153) comprende, a differenza del precedente caso, solo l'energia termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro (AREA a).

L'energia ceduta dai fumi al fluido di lavoro del surriscaldatore AREA a è definita in base alla relazione (48):

$$(57) \quad \text{AREA a} = \text{Energia fumi, vapore surr} = \int_{T_1}^{T_2} N_{IN} - N_{OUT} d\tau = 17 \text{ [MWh}_t\text{]}$$

$T_1$  e  $T_2$  sono gli istanti in cui la temperatura dei fumi eguaglia quella del fluido di lavoro;  $N_{IN}$  e  $N_{OUT}$  sono le potenze termiche dei fumi prima e dopo lo scambio termico esprimibili mediante la relazione (48).  $T_s$ , temperatura del vapore surriscaldato, è pari a 400 °C.

Vale quanto detto per l'approssimazione della portata dei fumi costante e pari a quella della fase di fusione (166700 Nm<sup>3</sup>/h).

Il calore specifico si ottiene mediante la relazione (49).

Si ottiene:

$$(58) \quad \text{Potenza termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro} = 15 \text{ [MW}_t\text{]}$$

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

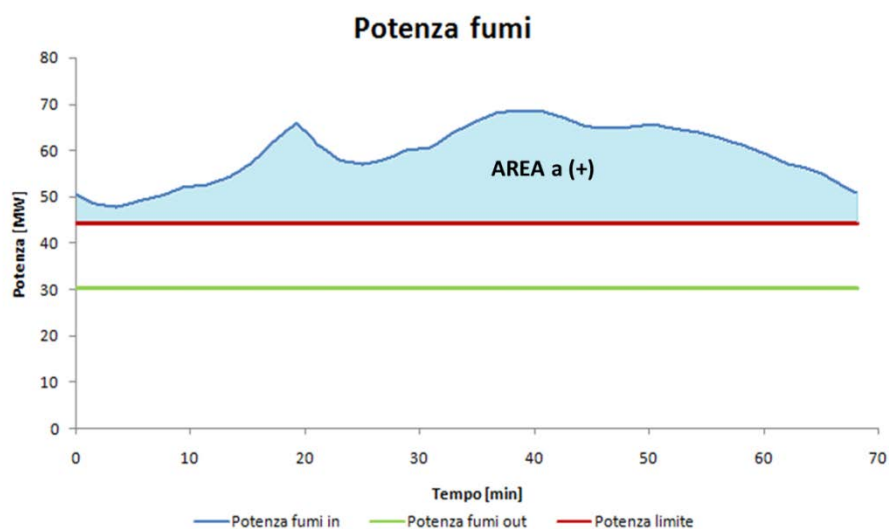


Figura 153 - Energia termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro.

### 8.3.5.3 Curva di durata della temperatura negli STATI A e B

Si analizzano ora le curve di durata della temperatura dell'impianto tradizionale e di quello con il differitore termico a PCM riportate in Figura 154.

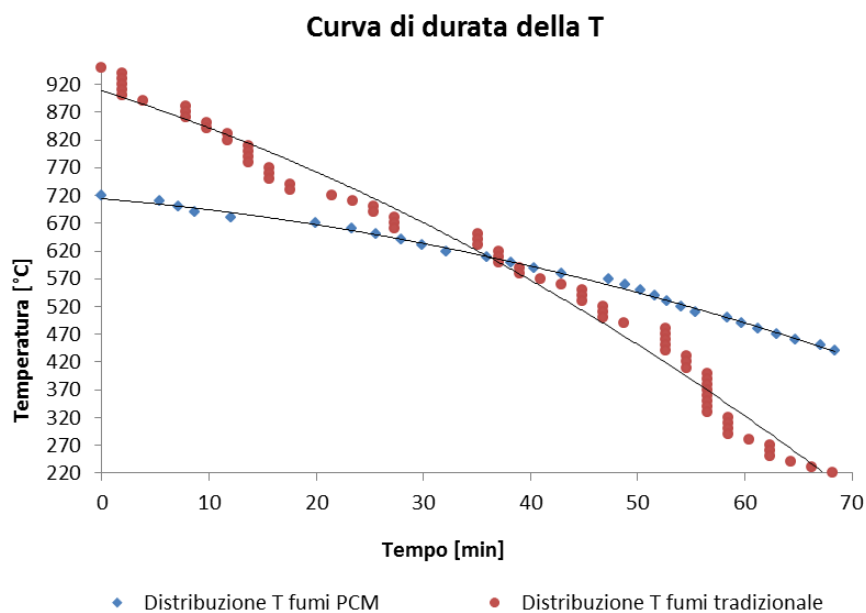


Figura 154 - Curva di durata delle temperature nell'impianto tradizionale e in quello con differitore termico.

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Il grafico di Figura 155 riporta le curve di durata e la temperatura di uscita dei fumi dalla caldaia, durante la fase di fusione.

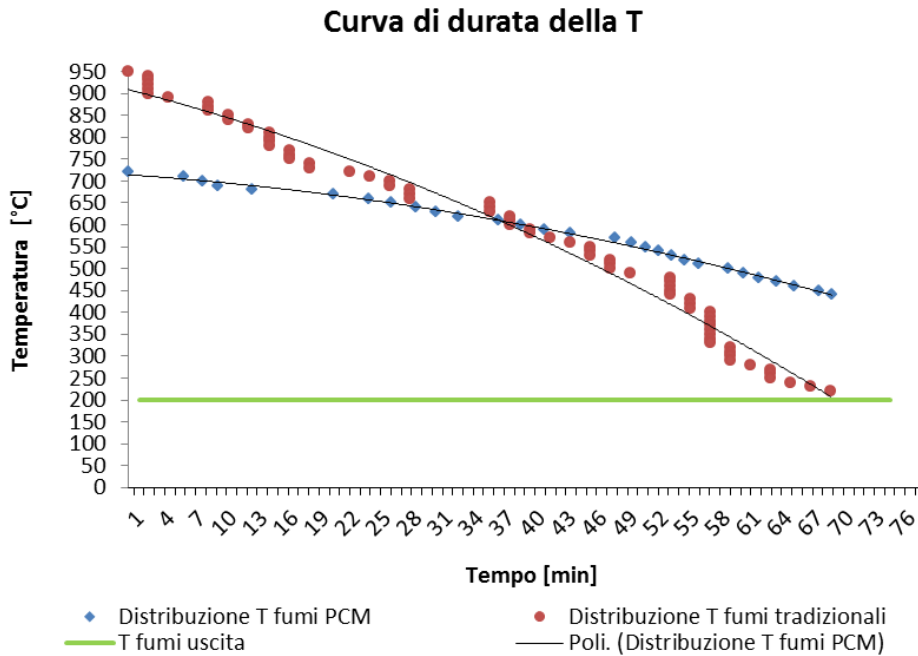


Figura 155 - Curva di durata delle temperature nell'impianto tradizionale e in quello con differitore a PCM.

8.3.5.4 STATO A - Valutazione in base alla curva di durata della temperatura

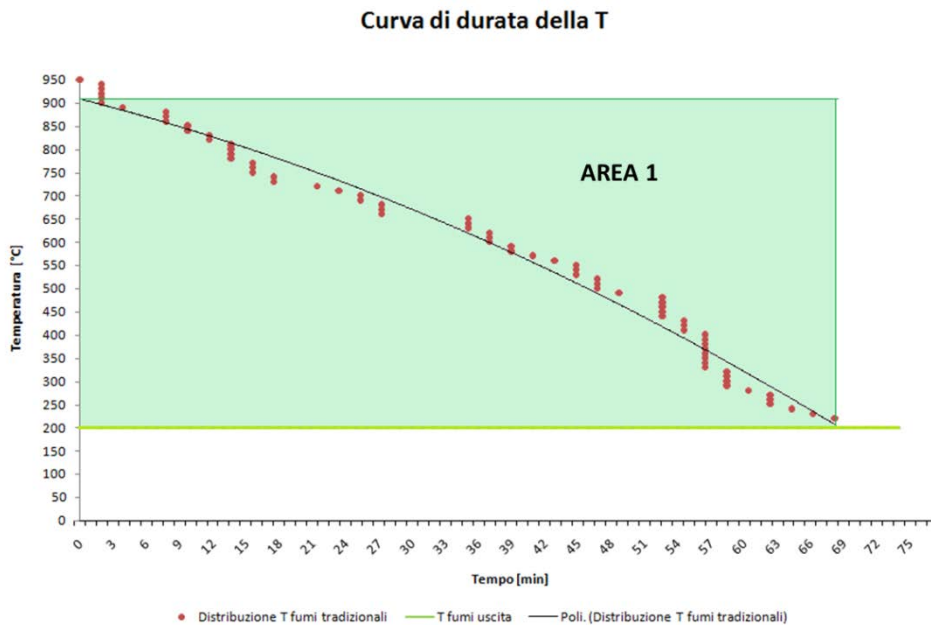


Figura 156 - Massima energia termica scambiabile tra fumi e fluido di lavoro nell'impianto tradizionale.

Si considera la linea fumi di un impianto tradizionale. Il grafico di Figura 156 mostra la massima energia termica ceduta potenzialmente dai fumi al il fluido di lavoro (AREA 1). Per massima energia

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

termica si intende l'energia che i fumi potrebbero rendere disponibile per il recupero termico se raggiungessero in ogni istante le massime temperature. La massima energia termica potenzialmente scambiabile tra fumi e surriscaldatore (caldaia) è espressa mediante la:

$$(59) \quad AREA 1 = \int_0^{TTT} N_{max} - N_{OUT} dt = 64 [MWh_t]$$

con  $N_{max}$  la massima quantità di calore scambiata tra i fumi e il fluido di lavoro della caldaia nell'unità di tempo esprimibile come:

$$(60) \quad N_{max} = Q_f \cdot c_{pf} \cdot T_{max} [W]$$

con  $Q_f$  la portata dei fumi,  $c_{pf}$  il calore specifico dei fumi funzione della temperatura,  $T_{max}$  la temperatura massima raggiunta dai fumi nella settling chamber e pari a 950 °C. La portata dei fumi, come visto in precedenza, varia in funzione delle fasi di funzionamento del forno. *Si può però, in via approssimata, considerare la portata costante e pari a quella della fase di fusione (166700 Nm<sup>3</sup>/h) dato che questa dura più dell'80% di un ciclo TTT.*

Anche il calore specifico dei fumi è funzione della temperatura ed è calcolabile mediante la relazione:

$$(61) \quad c_p(T) = 0,0002 \cdot T_{max} + 1.291$$

Si ottiene:

$$(62) \quad \text{Potenza termica massima messa a disposizione dai fumi} = 56 [MW_t]$$

L'energia termica realmente scambiata tra i fumi e il fluido di lavoro del surriscaldatore in un impianto tradizionale è rappresentata dall'area compresa tra le curve di durata e quella del fluido di lavoro (AREA 2 di Figura 157). Per quanto riportato al paragrafo 8.3.5.1, l'energia termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro è pari a 33 MWh<sub>t</sub>, relazione (47), e la potenza termica scambiata è pari a 29 MW<sub>t</sub>, relazione (50).

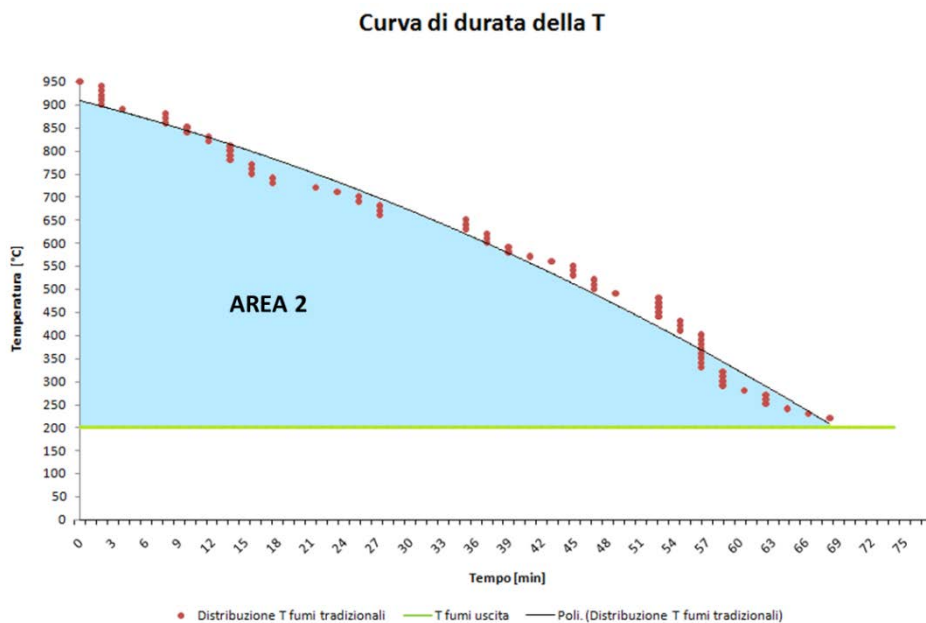


Figura 157 - Energia termica scambiata tra fumi e fluido di lavoro nell'impianto tradizionale.



8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Si valuta quindi l'energia termica dei fumi non sfruttabile a causa della variazione della temperatura degli stessi dovuta al processo di fusione (AREA 3 in Figura 158). Si ottiene che

$$(63) \quad \text{Area 3} = \text{Area 1} - \text{Area 2} = 31 \text{ [MWh}_t\text{]}$$

Si ottiene:

$$(64) \quad \text{Potenza termica non sfruttabile dalla caldaia} = 27 \text{ [MW}_t\text{]}$$

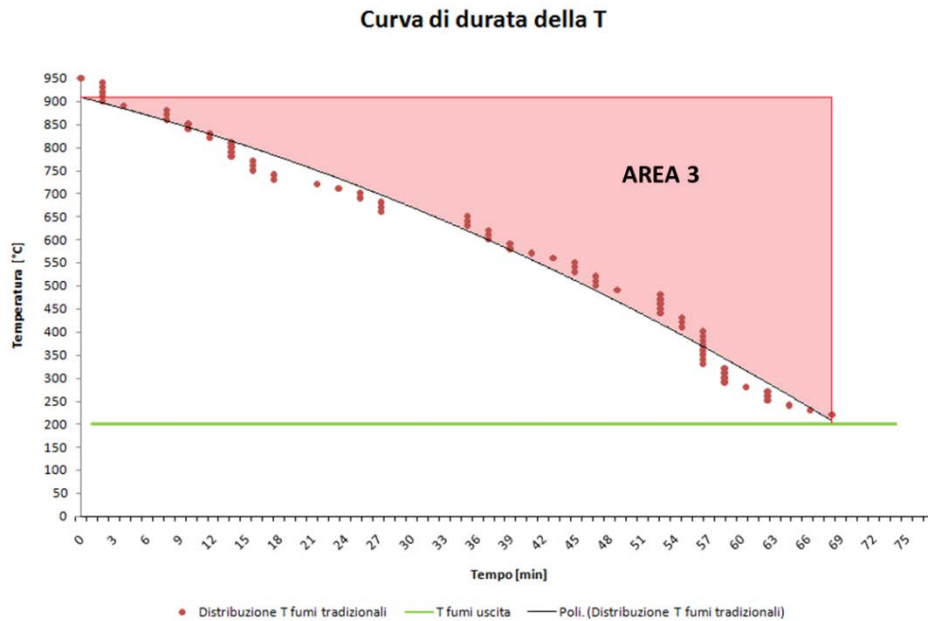


Figura 158 - Energia non sfruttata nell'impianto tradizionale.

Il rapporto tra energia utile allo scambio termico ed energia massima potenziale, che rappresenta l'efficienza di utilizzo della potenza installata, si ottiene come segue:

$$(65) \quad \varepsilon_A = \frac{\text{Area 2}}{\text{Area 1}} = 0,51$$

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 8.3.5.5 STATO B - Valutazione in base alla curva di durata della temperatura

Curva di durata della T

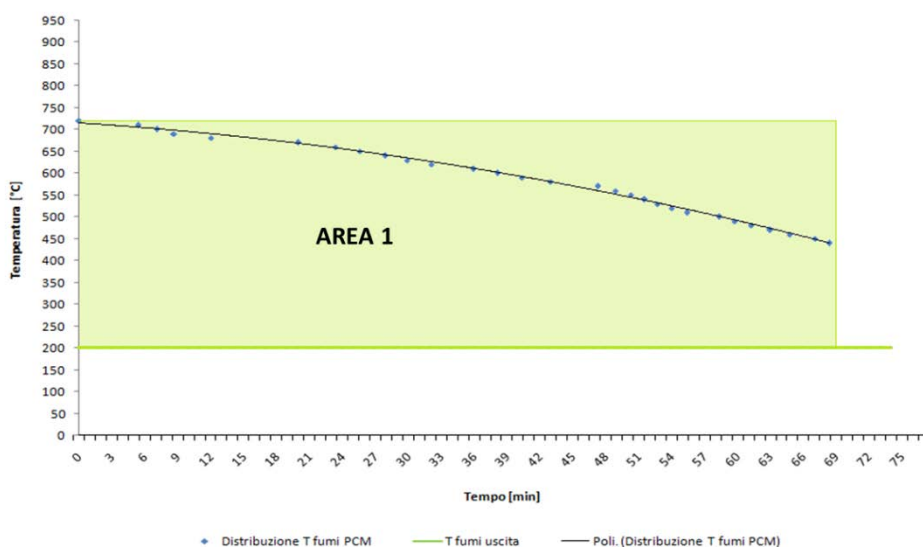


Figura 159 - Massima energia termica scambiabile tra fumi e fluido di lavoro nell'impianto con differitore a PCM.

Si considera la linea fumi di un impianto con differitore termico a PCM. Il grafico di Figura 159 mostra la massima energia termica ceduta potenzialmente dai fumi al il fluido di lavoro (AREA 1), ovvero l'energia che i fumi potrebbero rendere disponibile per il recupero termico se raggiungessero in ogni istante le massime temperature. La massima energia termica potenzialmente scambiabile tra fumi e surriscaldatore (caldaia) si calcola, come nel caso A, con la relazione:

$$(66) \quad \text{AREA 1} = \int_0^{TTT} N_{max} - N_{OUT} dt = 43 [MWh_t]$$

Seguendo le stesse considerazioni fatte nel caso A, si ottiene:

$$(67) \quad \text{Potenza termica massima messa a disposizione dai fumi} = 38 [MW_t]$$

L'energia termica realmente scambiata tra i fumi e il fluido di lavoro della caldaia in un impianto tradizionale è rappresentata dall'area compresa tra le curve di durata e quella del fluido di lavoro (AREA 2 di Figura 160). L'energia termica ceduta dai fumi al fluido di lavoro è pari a 33 MWh<sub>t</sub>, relazione (55), e la potenza termica scambiata è pari a 29 MW<sub>t</sub>, relazione (56).

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

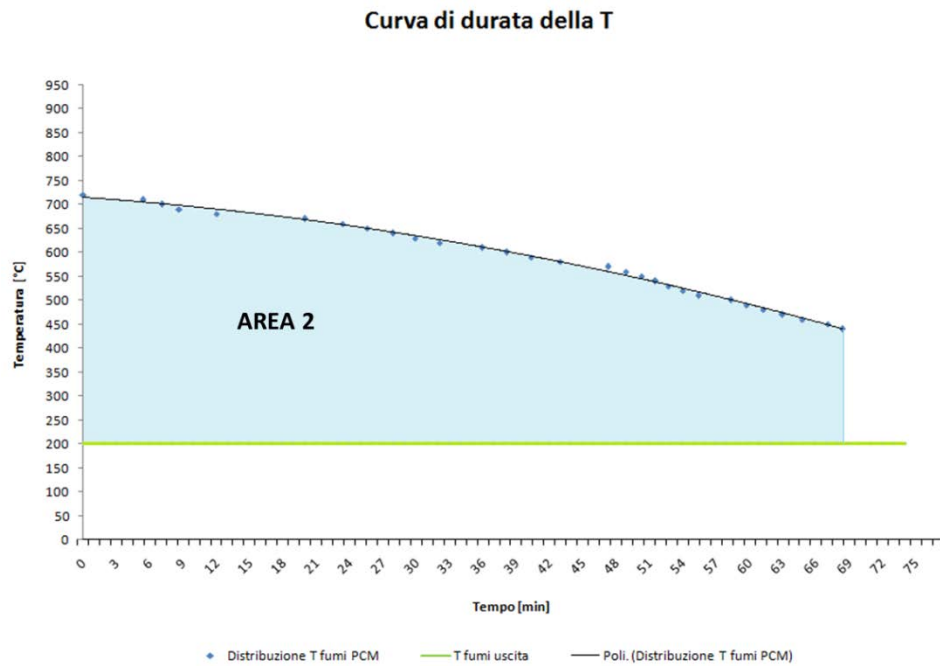


Figura 160 - Energia termica scambiata tra fumi e fluido di lavoro nell'impianto con differitore a PCM.

Si valuta quindi l'energia termica dei fumi non sfruttabile a causa della variazione della temperatura degli stessi dovuta al processo di fusione (AREA 3 in Figura 161). Si ottiene che:

$$(68) \quad \text{Area 3} = \text{Area1} - \text{Area2} = 10 \text{ [MWh}_t\text{]}$$

Si ottiene:

$$(69) \quad \text{Potenza termica non sfruttabile dalla caldaia} = 9 \text{ [MW}_t\text{]}$$

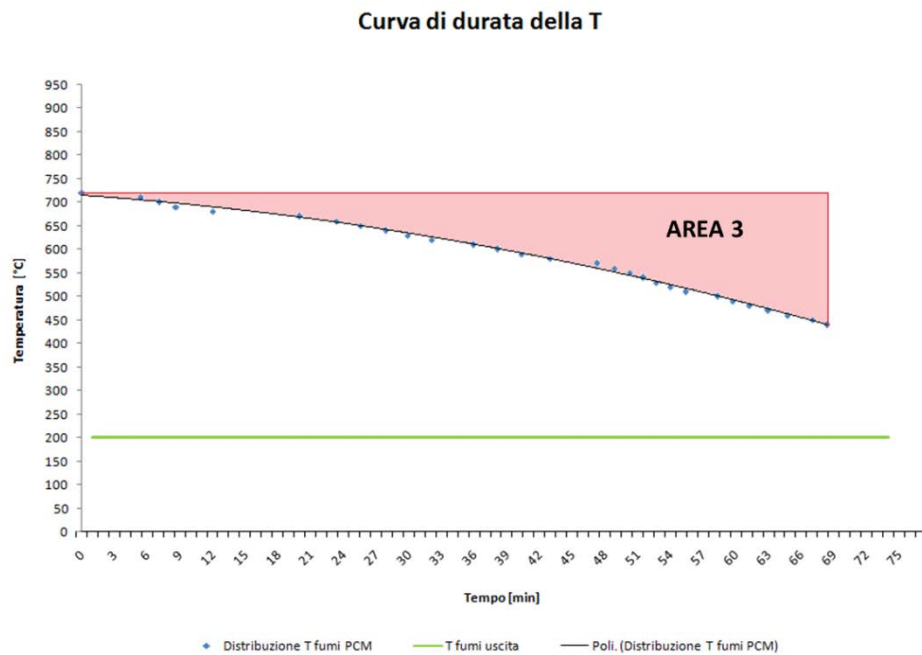


Figura 161 - Energia non sfruttata nell'impianto con differitore a PCM.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Il rapporto tra energia utile allo scambio termico ed energia massima potenziale, che rappresenta l'efficienza di utilizzo, si ottiene come segue:

$$(70) \quad \varepsilon_B = \frac{\text{Area 2}}{\text{Area 1}} = 0,76$$

### 8.3.5.6 Confronto energia e potenza scambiabili lato fumi e caldaia

I valori di potenza ed energia dei due stati vengono riassunti nella tabella seguente.

Si nota come l'efficienza di utilizzo sia maggiore nello stato B con apparato calmierante a PCM.

Tabella 46 - Riassunto valori di energia e potenza in gioco nello scambio fumi/caldaia STATO A e B.

			STATO A	STATO B
<b>E max t potenziale</b>	AREA 1	MWh <sub>t</sub>	64	43
<b>P max t potenziale</b>		MW <sub>t</sub>	56	38
<b>E reale t</b>	AREA 2	MWh <sub>t</sub>	33	33
<b>P reale t</b>		MW <sub>t</sub>	29	29
<b>E non sfruttabile</b>	AREA 3	MWh <sub>t</sub>	31	10
<b>P non sfruttabile</b>		MW <sub>t</sub>	27	9
<b>Efficienza utilizzo</b>		$\varepsilon$	0,51	0,76

### 8.3.6 Valutazione potenza nominale ed effettiva degli STATI A e B

Si suppone ora di inserire lo stesso gruppo caldaia-turbina nell'impianto tradizionale (STATO A) e in quello con calmierazione mediante differitore a PCM (STATO B). La potenza nominale del turbo gruppo è di  $N_N = 11,5 \text{ MW}_e$ .

#### 8.3.6.1 STATO A - Valutazione rendimento e potenza prodotta

Il rendimento elettrico medio di utilizzo, considerando la potenza termica scambiata tra fumi e fluido di lavoro della caldaia (62), è calcolabile come:

$$(71) \quad \eta_{emu} = \frac{N_N}{N_{\max A}} = \frac{11,5}{56} = 0,2$$

Considerando invece:

$$(72) \quad \text{Potenza termica scambiabile con l'ambiente} = N_{\max f-amb A} = 71 \text{ [MW}_t\text{]}$$

si ottiene:

$$(73) \quad \eta_{emu} = \frac{N_N}{N_{\max f-amb A}} = \frac{11,5}{71} = 0,16$$

Considerando l'efficienza di utilizzo pari  $\varepsilon_A$  pari a 0,51 in base alla relazione (65), la potenza prodotta sarebbe in prima approssimazione:

$$(74) \quad N_A = N_N \cdot \varepsilon_A = 11,5 \times 0,51 = 5,865 \text{ [MW}_e\text{]}$$

Si riduce tuttavia di un 5-10% dovuto alla parzializzazione. Si ottiene quindi:

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

$$(75) \quad \text{Potenza prodotta} = N_A = 5 \text{ [MW}_e\text{]}$$

In realtà la parzializzazione sarà maggiore in questo caso.

### 8.3.6.2 STATO B - Valutazione rendimento e potenza prodotta

Il rendimento medio elettrico di utilizzo, considerandola potenza termica scambiata tra fumi e fluido di lavoro della caldaia (67), è calcolabile come:

$$(76) \quad \eta_{emu} = \frac{N_N}{N_{\max B}} = \frac{11,5}{38} = 0,3$$

Considerando invece:

$$(77) \quad \text{Potenza termica scambiabile con l'ambiente} = N_{\max f-amb B} = 52 \text{ [MW}_t\text{]}$$

si ottiene:

$$(78) \quad \eta_{emu} = \frac{N_N}{N_{\max f-amb B}} = \frac{11,5}{52} = 0,22$$

Essendo l'efficienza di utilizzo pari  $\epsilon_B$  a 0,76 (70), la potenza prodotta sarebbe in prima approssimazione:

$$(79) \quad N_B = N_N \cdot \epsilon_B = 11,5 \times 0,76 = 8,74 \text{ [MW}_e\text{]}$$

Si riduce tuttavia di un 5-10% dovuto alla parzializzazione. Si ottiene quindi:

$$(80) \quad \text{Potenza prodotta} = N_B = 7,866 \text{ [MW}_e\text{]}$$

Per i calcoli energetici nel caso reale si considerano cautelativamente:

$$(81) \quad \text{Potenza prodotta} = N_B = 7 \text{ [MW}_e\text{]}$$

### 8.3.6.3 Confronto potenza prodotta STATO A e B

La tabella seguente riassume i valori della potenza prodotta nei due stati, maggiore nel caso B con apparato calmierante a PCM.

Tabella 47 - Riassunto potenza elettrica prodotta STATO A e B.

			STATO A	STATO B
<b>Potenza prodotta</b>	<i>N</i>	<i>MW<sub>e</sub></i>	5	7

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 8.3.7 Effetto taglia

La potenza nominale del turbo-gruppo è  $N = 11,5 \text{ MW}_e$ .

L'investimento nel caso dello stato B è pari a  $I_B = 13.800.000 \text{ €}$  per quanto visto al paragrafo 8.3.4.

Si calcola la potenza nominale dallo stesso turbo-gruppo inserito in un impianto fumi tradizionale (STATO A) in base alla proporzione:

$$(82) \quad N_{NA} : T_A = N_{NB} : T_B$$

Maggiore è la temperatura massima raggiunta dai fumi nei due casi, maggiore sarà la taglia dell'impianto di produzione di energia elettrica, proporzionale alla potenza nominale a parità di portata. Considerando  $T_A = 950 \text{ °C}$  e  $T_B = 720 \text{ °C}$  si ottiene:

$$(83) \quad N_{NA} = N_{NB} \frac{T_A}{T_B} = 15,17 [\text{MW}_e]$$

Senza calmierazione quindi dovrà essere inserito un gruppo caldaia-turbina di potenza nominale, e di conseguenza potenza installata, maggiore.

Per quantificare l'effetto taglia si utilizza la formula che mette in relazione gli investimenti iniziali e le potenze nominali:

$$(84) \quad I_A = I_B \cdot \left( \frac{N_{NA}}{N_{NB}} \right)^m = 16.755.000 [\text{€}]$$

L'esponente  $m$  caratteristico di questo tipo di impiantistica è assunto pari a 0,7.

**L'utilizzo del calmieratore consentirebbe una riduzione dei costi di quasi 3.000.000 €, circa il 17%, inserendo un apparato a PCM del costo di 320.000 € invece del solo turbo-gruppo.**

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

#### **8.4 STATO B - CARATTERISTICHE DI UN EAF E DELLA LINEA FUMI CON INSERIMENTO DEL NUOVO APPARATO CALMIERATORE**

L'inserimento dell'apparato a PCM e dell'impianto di produzione di energia elettrica in una tradizionale linea di trattamento e depurazione fumi comporta sostanziali modifiche tecniche e impiantistiche. Per definire e quantificare queste modifiche si prende in considerazione l'impianto descritto nel paragrafo 8.1 e si analizzano due configurazioni dell'impianto: a linee separate e a ciclo unico.

#### **8.5 STATO B1 - LINEE DI TRATTAMENTO FUMI SEPARATE**

##### **8.5.1 Componenti impianto a linee separate**

A seguito del recupero energetico, le temperature dei fumi del circuito primario non saranno superiori a 200 °C ai filtri. Ciò rende superflua sia l'azione del raffreddatore (cooler), sia il miscelamento dei fumi primari con quelli secondari che garantisce una temperatura dei fumi di 100 °C, ideale per il successivo trattamento di depurazione mediante filtri a maniche. L'unione tra i fumi del circuito primario e secondario non è più necessaria: i fumi vengono trattati separatamente mediante linee di depurazione dedicate. Si prevedono quindi due camini con rispettivi ventilatori, due separatori e due filtri a maniche, componenti che dovranno però essere dimensionati in base alle caratteristiche specifiche dei fumi. Si riporta in Figura 162 lo schema dell'impianto con l'inserimento dell'apparato per la produzione di energia elettrica (gruppo caldaia-turbina).

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

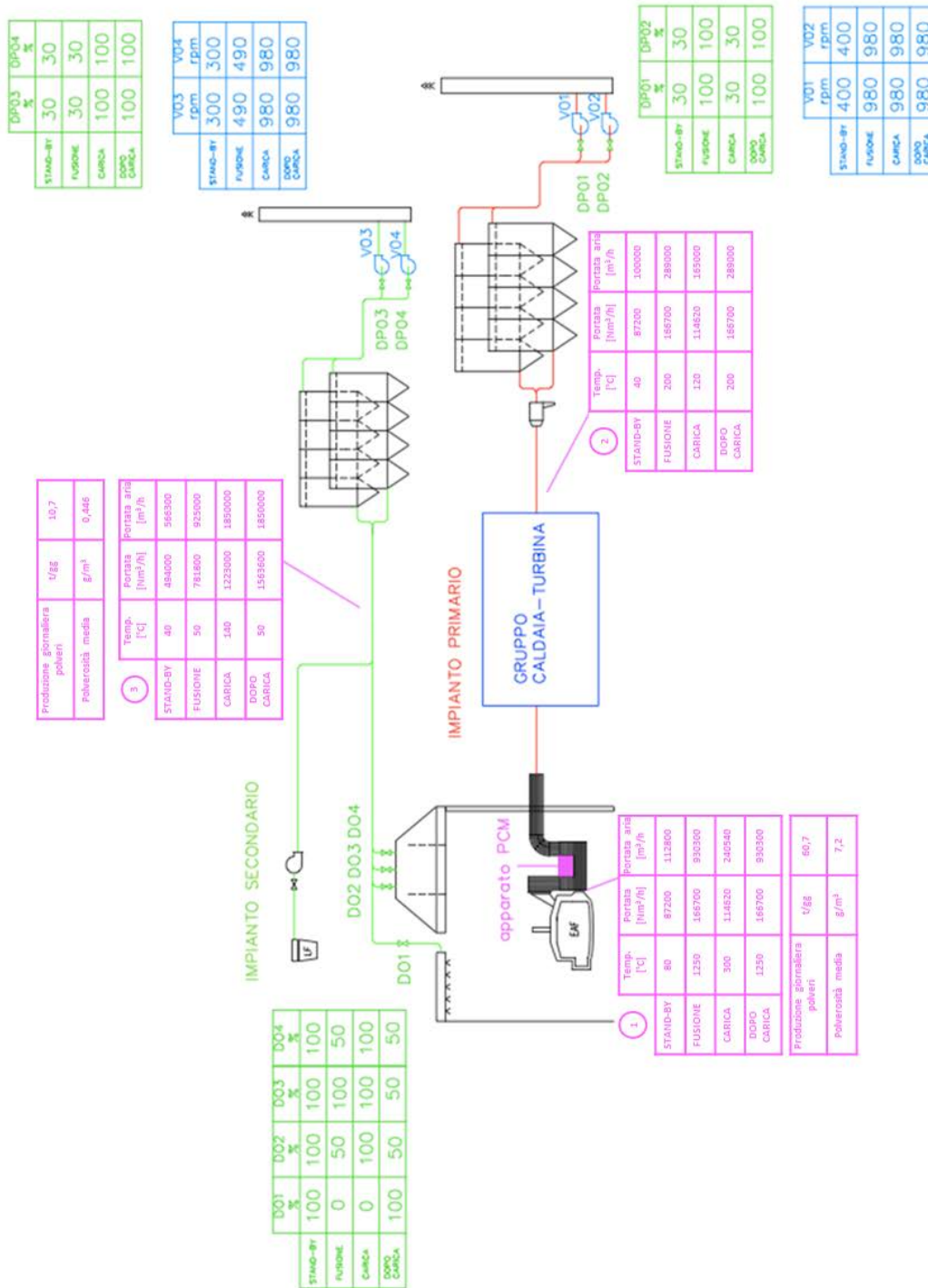


Figura 162 - Schema impianto con apparato a PCM + gruppo caldaia-turbina - Linee separate.



8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

**8.5.2 Caratteristiche e funzionamento impianto a linee separate**

Il ciclo fusorio è sempre caratterizzato dalle quattro modalità di funzionamento (o fasi):

- FASE STAND-BY
- FASE FUSIONE
- FASE CARICA
- FASE DOPO CARICA.

La Figura 162 riporta i punti dell'impianto di trattamento e depurazione fumi, in corrispondenza dei quali sono state rilevate le portate e le temperature nelle diverse fasi operative. Vengono schematizzate sia le condizioni di lavoro delle valvole e delle serrande (colore verde), sia quelle dei ventilatori al camino e del booster del circuito primario (colore blu). Le condizioni delle serrande e delle valvole, riferite alle quattro modalità di funzionamento, vengono di seguito schematizzate.

*Tabella 48 - Condizioni di lavoro delle serrande e valvole nelle quattro fasi di funzionamento nel nuovo impianto - STATO B1.*

		D01	D02	D03	D04	SDF01/02	DP01	DP02	DP03	DP04
STAND-BY	%	100	100	100	100	0	30	30	30	30
FUSIONE	%	0	50	100	50	0	100	100	30	30
CARICA	%	0	100	100	100	0	30	30	100	100
DOPO CARICA	%	100	50	50	50	0	100	100	100	100

*Tabella 49 - Condizioni di lavoro delle serrande e valvole dei ventilatori e booster nelle quattro fasi di funzionamento nel nuovo impianto - STATO B1*

		V01	V02	V03	V04
STAND-BY	rpm	400	400	300	300
FUSIONE	rpm	980	980	490	490
CARICA	rpm	980	980	980	980
DOPO CARICA	rpm	980	980	980	980

Si riportano nel seguito le tabelle riassuntive con i dati caratteristici nei punti dell'impianto considerati relativi alle quattro fasi.

*La portata reale di off-gas aspirata dal forno è stata mantenuta pari a quella dell'impianto tradizionale: bisogna sempre garantire il giusto tiraggio dal forno per il corretto funzionamento dello stesso. L'unica differenza riguarda la portata aspirata durante la fase di carica.*

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 8.5.2.1 PUNTO 1 - STATO B1

Tabella 50 - Caratteristiche impianto nuovo nel punto 1 durante le quattro fasi di funzionamento - STATO B1.

<b>IMPIANTO PRIMARIO PUNTO 1</b>			
<b>Produzione giornaliera polveri**</b>	$P_{1g}$	t/gg	60,7
<b>Polverosità media</b>	$P_1$	g/m <sup>3</sup>	7,2
<b>Densità fumi</b>	$\gamma_1$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,29
<b>FASE STAND-BY</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-SB}$	°C	80
<b>Portata a 80 °C</b>	$Q_{N1-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	87200
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-SB}$	m <sup>3</sup> /h	112800
<b>Densità fumi a 80 °C</b>	$\gamma_{1-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	0,9976
<b>Portata massica a 80 °C</b>	$Q_{1m-80}$	kg/h	112500
<b>FASE FUSIONE</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-F}$	°C	1250
<b>Portata a 1250 °C</b>	$Q_{N1-F}$	Nm <sup>3</sup> /h	166700
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-F}$	m <sup>3</sup> /h	930300
<b>Densità fumi a 1250 °C</b>	$\gamma_{1-F}$	kg/m <sup>3</sup>	0,2312
<b>Portata massica a 1250 °C</b>	$Q_{1m-F}$	kg/h	215170
<b>FASE CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-C}$	°C	300
<b>Portata a 300 °C</b>	$Q_{N1-C}$	Nm <sup>3</sup> /h	114620
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-C}$	m <sup>3</sup> /h	240540
<b>Densità fumi a 300 °C</b>	$\gamma_{1-C}$	kg/m <sup>3</sup>	0,6146
<b>Portata massica a 300 °C</b>	$Q_{1m-C}$	kg/h	147860
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-DC}$	°C	1250
<b>Portata a 1250 °C</b>	$Q_{N1-DC}$	Nm <sup>3</sup> /h	166700
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-DC}$	m <sup>3</sup> /h	930300
<b>Densità fumi a 1250 °C</b>	$\gamma_{1-DC}$	kg/m <sup>3</sup>	0,2312
<b>Portata massica a 1250 °C</b>	$Q_{1m-DC}$	kg/h	215170

\*\* a esclusione delle sostanze solide che si depositano nella settling chamber.

#### 8.5.2.2 PUNTO 2 - STATO B1

Tabella 51 - Caratteristiche impianto nuovo nel punto 2 durante le quattro fasi di funzionamento - STATO B1.

<b>IMPIANTO PRIMARIO PUNTO 2</b>			
<b>Produzione giornaliera polveri**</b>	$P_{2g}$	t/gg	60,7
<b>Polverosità media</b>	$P_2$	g/m <sup>3</sup>	7,2
<b>Densità fumi</b>	$\gamma_2$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,29
<b>FASE STAND-BY</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{2-SB}$	°C	40
<b>Portata a 40 °C</b>	$Q_{N2-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	87200
<b>Portata aria</b>	$Q_{2-SB}$	m <sup>3</sup> /h	100000
<b>Densità fumi a 40 °C</b>	$\gamma_{2-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	1,1251
<b>Portata massica a 40 °C</b>	$Q_{2m-SB}$	kg/h	112500
<b>FASE FUSIONE</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{2-F}$	°C	200

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

<b>IMPIANTO PRIMARIO PUNTO 2</b>			
Portata a 200 °C	$Q_{N2-F}$	$Nm^3/h$	166700
Portata aria	$Q_{2-F}$	$m^3/h$	289000
Densità fumi a 200 °C	$\gamma_{2-F}$	$kg/m^3$	0,7445
Portata massica a 200 °C	$Q_{2m-F}$	$Kg/h$	215170
<b>FASE CARICA</b>			
Temperatura	$T_{2-C}$	°C	120
Portata a 120 °C	$Q_{N2-C}$	$Nm^3/h$	114620
Portata aria	$Q_{2-C}$	$m^3/h$	165000
Densità fumi a 120 °C	$\gamma_{2-C}$	$kg/m^3$	0,8961
Portata massica a 120 °C	$Q_{2m-C}$	$kg/h$	147860
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
Temperatura	$T_{2-DC}$	°C	200
Portata a 200 °C	$Q_{N2-DC}$	$Nm^3/h$	166700
Portata aria	$Q_{2-DC}$	$m^3/h$	289000
Densità fumi a 200 °C	$\gamma_{2-DC}$	$kg/m^3$	0,7445
Portata massica a 200 °C	$Q_{2m-DC}$	$kg/h$	215170
** a esclusione delle sostanze solide che si depositano nella settling chamber.			

8.5.2.3 PUNTO 3 - STATO B1

Tabella 52 - Caratteristiche impianto nuovo nel punto 3 durante le quattro fasi di funzionamento - STATO B1.

<b>IMPIANTO SECONDARIO PUNTO 3</b>			
Produzione giornaliera polveri**	$P_{3g}$	$t/gg$	10,7
Polverosità media	$P_3$	$g/m^3$	0,446
Densità fumi	$\gamma_3$	$kg/Nm^3$	1,29
<b>FASE STAND-BY</b>			
Temperatura	$T_{3-SB}$	°C	40
Portata a 40 °C	$Q_{N3-SB}$	$Nm^3/h$	494000
Portata aria	$Q_{3-SB}$	$m^3/h$	566300
Densità fumi a 40 °C	$\gamma_{3-SB}$	$kg/m^3$	1,1251
Portata massica a 40 °C	$Q_{3m-SB}$	$kg/h$	637170
<b>FASE FUSIONE</b>			
Temperatura minima	$T_{3-F}$	°C	50
Portata a 50 °C	$Q_{N3-F}$	$Nm^3/h$	781800
Portata aria	$Q_{3-F}$	$m^3/h$	925000
Densità fumi a 50 °C	$\gamma_{3-F}$	$kg/m^3$	1,0903
Portata massica a 50 °C	$Q_{3m-F}$	$kg/h$	1008540
<b>FASE CARICA</b>			
Temperatura massima	$T_{3-C}$	°C	140
Portata a 140 °C	$Q_{N3-C}$	$Nm^3/h$	1223000
Portata aria	$Q_{3-C}$	$m^3/h$	1850000
Densità fumi a 140 °C	$\gamma_{3-C}$	$kg/m^3$	0,8527
Portata massica a 140 °C	$Q_{3-C}$	$kg/h$	1577500
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
Temperatura minima	$T_{3-DC}$	°C	50
Portata a 50 °C	$Q_{N3-DC}$	$Nm^3/h$	1563600
Portata aria	$Q_{3-DC}$	$m^3/h$	1850000
Densità fumi a 50 °C	$\gamma_{3-DC}$	$kg/m^3$	1,0903

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

IMPIANTO SECONDARIO PUNTO 3			
Portata massica a 50 °C	$Q_{3-DC}$	kg/h	2020000

### 8.5.3 Valutazioni tecnico-impianistiche e scelta del filtro a maniche - STATO B1

La grande differenza tra le caratteristiche dei due flussi giustifica la separazione tra le due linee di trattamento fumi: in questo modo è possibile utilizzare sistemi di abbattimento dedicati (utilizzo di specifici tessuti per maniche filtri) e adatti alle particolari caratteristiche dei fumi delle due linee in modo da garantire livelli più bassi di polverosità e di microinquinanti. La gestione del trattamento risulta più mirata rispetto a quella del sistema tradizionale e si ha una riduzione dei consumi.

Questa soluzione porta, però, a una complicazione sia impiantistica, sia logistica che tuttavia viene controbilanciata, sotto il profilo ambientale, da un miglior trattamento dei fumi.

Si valuta inoltre il tipo filtro a maniche da inserire nel nuovo impianto a linee separate (STATO B1).

L'inserimento viene confrontato con quello di un filtro caratterizzato dalla stessa lunghezza delle maniche nell'impianto tradizionale (STATO A). In entrambi gli stati si considera un filtro composto da 5 moduli per un totale di 720 maniche, pannellature e profili strutturali verniciati, cestelli di sostegno maniche con dispositivo venturi, sistema di pulizia ad aria compressa, coclea di estrazione materiale completa e valvola rotante con relative motorizzazioni, condotte a sezione scalare di entrata/uscita e accessori vari. La scelta dei filtri da inserire negli impianti viene fatta in base alle considerazioni dettagliate riportate nell'Allegato 7 in cui sono elencate le principali caratteristiche tecniche per diverse lunghezze delle singole maniche ( $L=7000$  mm,  $L=5000$  mm e  $L=3000$  mm).

Viene inoltre valutato l'impatto economico della scelta dei filtri in modo da confrontare le configurazioni delle nuove linee di trattamento fumi con quelle dell'impianto tradizionale. Per gli impianti considerati si utilizza un filtro composto da 5 moduli caratterizzato da lunghezza della singola manica di 5000 mm e velocità di attraversamento di 0,022 m/s. La portata nominale  $Q_n$  risulta quindi pari a 143193 m<sup>3</sup>/h. Per l'impianto tradizionale la scelta ricade su un filtro in CORTEN con tessuto NOMEX, utilizzato (con numero di moduli e di maniche minore) anche nella linea primaria nel nuovo impianto a linee separate B1; invece, per quanto riguarda la linea secondaria separata, si sceglie un filtro in CORTEN con tessuto in POLIESTERE data la minor polverosità minore. In questo caso il numero delle maniche è alto vista l'elevata portata dei fumi, ma il costo del materiale impiegato è minore.

La Tabella 53 riassume i filtri con relativo numero di moduli e di maniche nei due diversi casi. La Tabella 54 riporta invece il preventivo di spesa per i filtri, comprensivo di costo di installazione.

Si precisa che i filtri a maniche e i materiali analizzati sono stati opportunamente scelti grazie alla collaborazione del sig. Marco Mittone di *Progetto Carpenteria Manzanese S.r.l.* [70].

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Tabella 53 - Caratteristiche filtri scelti per l'impianto tradizionale (STATO A) e per quello con apparato a PCM a linee separate (STATO B1).

	<b>Materiale</b>	<b>Tessuto</b>	<b>Numero moduli M</b>	<b>Numero maniche N</b>
<b>STATO A</b>	CORTEN	NOMEX	70	10080
<b>STATO B1 Primario</b>	CORTEN	NOMEX	10	1440
<b>STATO B1 Secondario</b>	CORTEN	POLIESTERE	65	9360

Tabella 54 - Costo filtri per l'impianto tradizionale (STATO A) e per quello con apparato a PCM a linee separate (STATO B1).

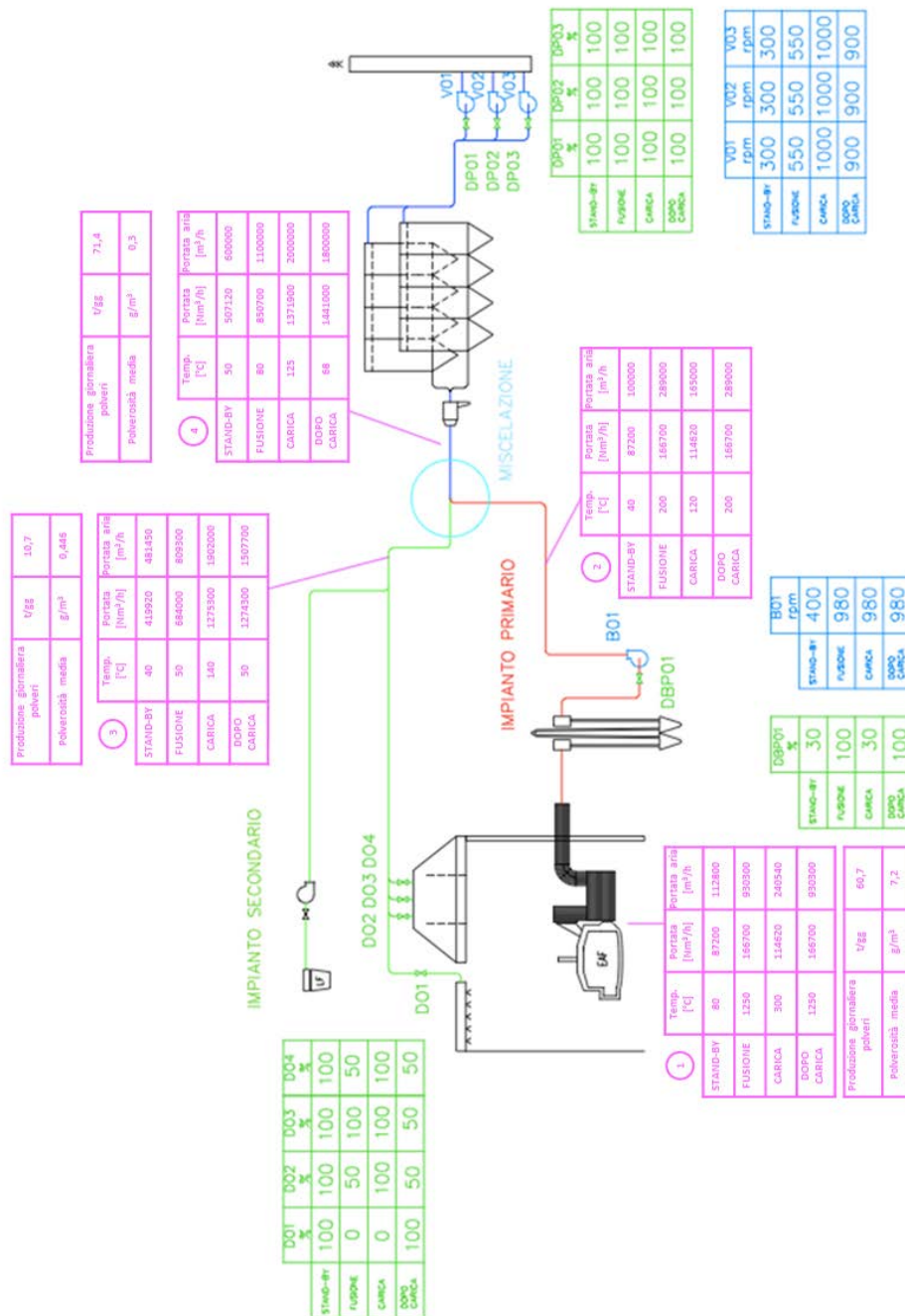
		<b>TOTALE COSTO FILTRI</b>	
<b>STATO A</b>	Costo filtri per Impianto tradizionale	€	<b>2.636.200</b>
<b>STATO B1</b>	Nuovo impianto a linee separate	€	<b>2.470.900</b>

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## 8.6 STATO B2 - LINEE DI TRATTAMENTO FUMI A CIRCUITO UNICO

### 8.6.1 Componenti impianto a circuito unico

Dopo il recupero energetico, la temperatura dei fumi raggiunge i 200 °C e l'utilizzo del raffreddatore non risulta più necessario (come nel precedente caso), ma può essere mantenuta la struttura dell'impianto tradizionale a valle del recuperatore. Si riporta in Figura 163 lo schema dell'impianto con l'inserimento dell'apparato per la produzione di energia elettrica. Il circuito secondario e primario si uniscono in un unico condotto che convoglia i fumi verso il filtro a maniche.



8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

**8.6.2 Caratteristiche e funzionamento impianto a circuito unico**

Il ciclo fusorio è caratterizzato sempre da quattro fasi di funzionamento:

- FASE STAND-BY
- FASE FUSIONE
- FASE CARICA
- FASE DOPO CARICA.

La Figura 163 riporta i punti dell'impianto di trattamento e depurazione fumi. Vengono schematizzate sia le condizioni in opera delle valvole e delle serrande (colore verde), sia quelle dei ventilatori al camino e del booster del circuito primario (colore blu). Le condizioni delle serrande e delle valvole, riferite alle quattro modalità di funzionamento, vengono di seguito schematizzate:

*Tabella 55 - Condizioni di lavoro delle serrande e valvole nelle quattro fasi di funzionamento nel nuovo impianto - STATO B2.*

		D01	D02	D03	D04	SDF01/02	DP01	DP02	DP03	DBP01
STAND-BY	%	100	100	100	100	0	100	100	100	30
FUSIONE	%	0	50	100	50	0	100	100	100	100
CARICA	%	0	100	100	100	0	100	100	100	30
DOPO CARICA	%	100	50	50	50	0	100	100	100	100

*Tabella 56 - Condizioni di lavoro delle serrande e valvole dei ventilatori e booster nelle quattro fasi di funzionamento nel nuovo impianto - STATO B2.*

		V01	V02	V03	B01
STAND-BY	rpm	300	300	300	400
FUSIONE	rpm	550	550	550	810
CARICA	rpm	1000	1000	1000	810
DOPO CARICA	rpm	900	900	900	810

Si riportano nel seguito le tabelle riassuntive con i dati caratteristici nei punti dell'impianto considerati relativi alle quattro fasi.

*La portata reale di off-gas aspirata dal forno è stata mantenuta pari a quella dell'impianto tradizionale: bisogna sempre garantire il giusto tiraggio dal forno per il corretto funzionamento dello stesso. L'unica differenza riguarda la portata aspirata durante la fase di carica.*

*La portata reale di off-gas ai filtri, e quindi anche al camino, è stata mantenuta pari a quella dell'impianto tradizionale. Si è quindi imposta la portata al punto 4 e grazie alla portata del primario (punto 2) si è calcolata quella del secondario (punto 3).*

L'intervento sull'impianto tradizionale, che prevede la miscelazione delle due linee, non deve subire alcuna modifica né per quanto riguarda i filtri, né per quanto riguarda il ciclone.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 8.6.2.1 PUNTO 1 - STATO B2

Tabella 57 - Caratteristiche impianto nuovo nel punto 1 durante le quattro fasi di funzionamento - STATO B2.

<b>IMPIANTO PRIMARIO PUNTO 1</b>			
<b>Produzione giornaliera polveri**</b>	$P_{1g}$	t/gg	60,7
<b>Polverosità media</b>	$P_1$	g/m <sup>3</sup>	7,2
<b>Densità fumi</b>	$\gamma_1$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,29
<b>FASE STAND-BY</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-SB}$	°C	80
<b>Portata a 80 °C</b>	$Q_{N1-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	87200
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-SB}$	m <sup>3</sup> /h	112800
<b>Densità fumi a 80 °C</b>	$\gamma_{1-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	0,9976
<b>Portata massica a 80 °C</b>	$Q_{1m-80}$	kg/h	112500
<b>FASE FUSIONE</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-F}$	°C	1250
<b>Portata a 1250 °C</b>	$Q_{N1-F}$	Nm <sup>3</sup> /h	166700
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-F}$	m <sup>3</sup> /h	930300
<b>Densità fumi a 1250 °C</b>	$\gamma_{1-F}$	kg/m <sup>3</sup>	0,2312
<b>Portata massica a 1250 °C</b>	$Q_{1m-F}$	kg/h	215170
<b>FASE CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-C}$	°C	300
<b>Portata a 300 °C</b>	$Q_{N1-C}$	Nm <sup>3</sup> /h	114620
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-C}$	m <sup>3</sup> /h	240540
<b>Densità fumi a 300 °C</b>	$\gamma_{1-C}$	kg/m <sup>3</sup>	0,6146
<b>Portata massica a 300 °C</b>	$Q_{1m-C}$	kg/h	147860
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{1-DC}$	°C	1250
<b>Portata a 1250 °C</b>	$Q_{N1-DC}$	Nm <sup>3</sup> /h	166700
<b>Portata aria</b>	$Q_{1-DC}$	m <sup>3</sup> /h	930300
<b>Densità fumi a 1250 °C</b>	$\gamma_{1-DC}$	kg/m <sup>3</sup>	0,2312
<b>Portata massica a 1250 °C</b>	$Q_{1m-DC}$	kg/h	215170

### 8.6.2.2 PUNTO 2 - STATO B2

Tabella 58 - Caratteristiche impianto nuovo nel punto 2 durante le quattro fasi di funzionamento - STATO B2.

<b>IMPIANTO PRIMARIO PUNTO 2</b>			
<b>Produzione giornaliera polveri**</b>	$P_{2g}$	t/gg	60,7
<b>Polverosità media</b>	$P_2$	g/m <sup>3</sup>	7,2
<b>Densità fumi</b>	$\gamma_2$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,29
<b>FASE STAND-BY</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{2-SB}$	°C	40
<b>Portata a 40 °C</b>	$Q_{N2-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	87200
<b>Portata aria</b>	$Q_{2-SB}$	m <sup>3</sup> /h	100000
<b>Densità fumi a 40 °C</b>	$\gamma_{2-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	1,1251
<b>Portata massica a 40 °C</b>	$Q_{2m-SB}$	kg/h	112500
<b>FASE FUSIONE</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{2-F}$	°C	200
<b>Portata a 200 °C</b>	$Q_{N2-F}$	Nm <sup>3</sup> /h	166700
<b>Portata aria</b>	$Q_{2-F}$	m <sup>3</sup> /h	289000



8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

<b>IMPIANTO PRIMARIO PUNTO 2</b>			
Densità fumi a 200 °C	$\gamma_{2-F}$	kg/m <sup>3</sup>	0,7445
Portata massica a 200 °C	$Q_{2m-F}$	kg/h	215170
<b>FASE CARICA</b>			
Temperatura	$T_{2-C}$	°C	120
Portata a 120 °C	$Q_{N2-C}$	Nm <sup>3</sup> /h	114620
Portata aria	$Q_{2-C}$	m <sup>3</sup> /h	165000
Densità fumi a 120 °C	$\gamma_{2-C}$	kg/m <sup>3</sup>	0,8961
Portata massica a 120 °C	$Q_{2m-C}$	kg/h	147860
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
Temperatura	$T_{2-DC}$	°C	200
Portata a 200 °C	$Q_{N2-DC}$	Nm <sup>3</sup> /h	166700
Portata aria	$Q_{2-DC}$	m <sup>3</sup> /h	289000
Densità fumi a 200 °C	$\gamma_{2-DC}$	kg/m <sup>3</sup>	0,7445
Portata massica a 200 °C	$Q_{2m-DC}$	kg/h	215170

8.6.2.3 PUNTO 3 - STATO B2

Tabella 59 - Caratteristiche impianto nuovo nel punto 3 durante le quattro fasi di funzionamento - STATO B2.

<b>IMPIANTO SECONDARIO PUNTO 3</b>			
Produzione giornaliera polveri**	$P_{3g}$	t/gg	10,7
Polverosità media	$P_3$	g/m <sup>3</sup>	0,446
Densità fumi	$\gamma_3$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,29
<b>FASE STAND-BY</b>			
Temperatura	$T_{3-SB}$	°C	40
Portata a 40 °C	$Q_{N3-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	419920
Portata aria	$Q_{3-SB}$	m <sup>3</sup> /h	481450
Densità fumi a 40 °C	$\gamma_{3-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	1,1251
Portata massica a 40 °C	$Q_{3m-SB}$	kg/h	541700
<b>FASE FUSIONE</b>			
Temperatura minima	$T_{3-F}$	°C	50
Portata a 50 °C	$Q_{N3-F}$	Nm <sup>3</sup> /h	684000
Portata aria	$Q_{3-F}$	m <sup>3</sup> /h	809300
Densità fumi a 50 °C	$\gamma_{3-F}$	kg/m <sup>3</sup>	1,0903
Portata massica a 50 °C	$Q_{3m-F}$	kg/h	882400
<b>FASE CARICA</b>			
Temperatura massima	$T_{3-C}$	°C	140
Portata a 140 °C	$Q_{N3-C}$	Nm <sup>3</sup> /h	1275300
Portata aria	$Q_{3-C}$	m <sup>3</sup> /h	1902000
Densità fumi a 140 °C	$\gamma_{3-C}$	kg/m <sup>3</sup>	0,8527
Portata massica a 140 °C	$Q_{3-C}$	kg/h	1621900
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
Temperatura minima	$T_{3-DC}$	°C	50
Portata a 50 °C	$Q_{N3-DC}$	Nm <sup>3</sup> /h	1274300
Portata aria	$Q_{3-DC}$	m <sup>3</sup> /h	1507700
Densità fumi a 50 °C	$\gamma_{3-DC}$	kg/m <sup>3</sup>	1,0903
Portata massica a 50 °C	$Q_{3-DC}$	kg/h	1643900

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 8.6.2.4 PUNTO 4 - STATO B2

Tabella 60 - Caratteristiche impianto nuovo nel punto 4 durante le quattro fasi di funzionamento - STATO B2.

<b>AL FILTRO A MANICHE PUNTO 4</b>			
<b>Produzione giornaliera polveri**</b>	$P_{4g}$	t/gg	71,4
<b>Polverosità media</b>	$P_4$	g/m <sup>3</sup>	0,3
<b>Densità fumi</b>	$\gamma_4$	kg/Nm <sup>3</sup>	1,29
<b>FASE STAND-BY</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{4-SB}$	°C	50
<b>Portata a 50 °C</b>	$Q_{N4-SB}$	Nm <sup>3</sup> /h	507120
<b>Portata aria</b>	$Q_{4-SB}$	m <sup>3</sup> /h	600000
<b>Densità fumi a 50 °C</b>	$\gamma_{4-SB}$	kg/m <sup>3</sup>	1,0903
<b>Portata massica a 50 °C</b>	$Q_{4-SB}$	kg/h	654200
<b>FASE FUSIONE</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{4-F}$	°C	80
<b>Portata aria a 80 °C</b>	$Q_{N4-F}$	Nm <sup>3</sup> /h	850700
<b>Portata aria</b>	$Q_{4-F}$	m <sup>3</sup> /h	1100000
<b>Densità fumi a 80 °C</b>	$\gamma_{4-F}$	kg/m <sup>3</sup>	0,9976
<b>Portata massica a 80 °C</b>	$Q_{4-F}$	kg/h	1097400
<b>FASE CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{4-C}$	°C	125
<b>Portata aria a 125 °C</b>	$Q_{N4-C}$	Nm <sup>3</sup> /h	1371900
<b>Portata aria</b>	$Q_{4-C}$	m <sup>3</sup> /h	2000000
<b>Densità fumi a 125 °C</b>	$\gamma_{4-C}$	kg/m <sup>3</sup>	0,8848
<b>Portata massica a 125 °C</b>	$Q_{4-C}$	kg/h	1769700
<b>FASE DOPO CARICA</b>			
<b>Temperatura</b>	$T_{4-DC}$	°C	68
<b>Portata aria a 68 °C</b>	$Q_{N4-DC}$	Nm <sup>3</sup> /h	1441000
<b>Portata aria</b>	$Q_{4-DC}$	m <sup>3</sup> /h	1800000
<b>Densità fumi a 68 °C</b>	$\gamma_{4-DC}$	kg/m <sup>3</sup>	1,0328
<b>Portata massica a 68 °C</b>	$Q_{4-DC}$	kg/h	1859000

#### 8.6.3 Valutazione tecnico-impiantistiche e scelta del filtro a maniche - STATO B2

Il nuovo impianto a ciclo unico presenta gli stessi vantaggi e svantaggi di quello tradizionale dal punto di vista impiantistico, l'unica differenza sta nel fatto che la temperatura al filtro è minore. Questo permette una riduzione delle dimensioni del filtro.

Si valuta il tipo di filtro a maniche che deve essere impiegato nell'impianto a ciclo unico. Anche in questo caso l'inserimento viene confrontato con quello di un filtro caratterizzato dalla stessa lunghezza delle maniche dell'impianto tradizionale (STATO A).

Le caratteristiche del filtro scelto sono le medesime di quello per lo STATO A e riportate in dettaglio nell'Allegato 7. Si riportano nelle seguenti tabelle le conclusioni sul tipo di filtro e sui costi relativi.

8. Inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia nella linea fumi di un EAF

Tabella 61 - Caratteristiche filtri per l'impianto tradizionale (STATO A) e quello con apparato a PCM a circuito unico (STATO B2).

	<b>Materiale</b>	<b>Tessuto</b>	<b>Numero moduli M</b>	<b>Numero maniche N</b>
<b>STATO A – B2</b>	CORTEN	NOMEX	70	10080

Tabella 62 - Costo filtri per l'impianto tradizionale (STATO A) e quello con apparato a PCM a circuito unico (STATO B2).

		<b>TOTALE COSTO FILTRI</b>	
<b>STATO A - B2</b>	Costo filtri uguale nei due casi	€	<b>2.636.200</b>

### 8.7 VALUTAZIONE FINALE SUI FILTRI NEGLI STATI A, B1 E B2

I fumi all'entrata dei filtri a maniche devono avere una temperatura notevolmente inferiore rispetto a quella che presentano in uscita dal quarto foro. Nell'impianto tradizionale, considerando la sola fase di fusione del rottame, l'abbassamento della temperatura da 1250 °C (temperatura fumi al quarto foro) a 100 °C (temperatura richiesta dal filtro a maniche) è garantito dal raffreddatore posto nel circuito primario all'uscita del quale la temperatura dei fumi raggiunge i 300 °C e dal miscelamento tra fumi primari e secondari. L'unione delle linee primaria e secondaria è utile anche da un punto di vista prettamente impiantistico per le semplificazioni che ne derivano: il numero di componenti, infatti, è minore contando un unico separatore, un unico filtro a maniche e un unico camino con relativi ventilatori. Tuttavia, date le diverse caratteristiche dei fumi primari e secondari, i componenti citati devono essere dimensionati per grandi portate (linea secondaria) ed elevati livelli di polverosità e temperatura (linea primaria). Basandosi sui preventivi a disposizione, la soluzione a linee separate risulterebbe più economica rispetto a quella a circuito unico, come riassunto in Tabella 63.

Tabella 63 - Differenze di costo dei filtri negli stati A, B1 e B2.

		<b>TOTALE COSTO FILTRI</b>	
<b>Differenza STATO A/B2 e B1</b>		€	<b>165.300</b>

La soluzione a linee separate viene avvalorata sia dal punto di vista tecnologico, permettendo un miglior trattamento dei fumi e una miglior gestione degli stessi, sia da quello economico in base al risparmio sul costo dei filtri. In ogni caso, la scelta di separare le due linee con componenti dedicati alle diverse tipologie di fumi convogliate e trattate dovrà essere attentamente valutata in base a considerazioni sulla manutenzione dei filtri e a valutazioni relative alla semplificazione impiantistica nel caso del circuito unico (stato B2).



## 9 VALUTAZIONE ENERGETICA, ECONOMICA E AMBIENTALE DOPO L'INSERIMENTO DELL'APPARATO A PCM E DELL'IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA



Figura 164 - Schema della riduzione dell'impatto energetico, economico e ambientale con l'inserimento del nuovo sistema di recupero e produzione energia.

L'inserimento dell'apparato a PCM e del gruppo caldaia-turbina per la produzione di energia elettrica porta a conseguenze tecnologiche, energetiche, economiche e ambientali sull'impianto tradizionale. Queste conseguenze vengono di seguito analizzate e discusse.

### 9.1 VALUTAZIONE TECNOLOGICA ED ENERGETICA

#### 9.1.1 Valutazione energetica con l'inserimento del differitore termico a PCM

La riduzione della temperatura massima raggiunta dagli off-gas in uscita della settling chamber a seguito dell'azione calmierante del differitore determina la riduzione del coefficiente di espansione fumi.

Viene calcolato il coefficiente di espansione dei fumi nello STATO A, ovvero per l'impianto tradizionale:

$$(85) \quad \alpha_A = \frac{T_{maxA} + 273}{273} = \frac{950 + 273}{273} = 4,48$$

e per lo STATO B, ovvero per l'impianto con apparato a PCM:

$$(86) \quad \alpha_B = \frac{T_{maxB} + 273}{273} = \frac{720 + 273}{273} = 3,64$$

Nel caso di impianto con apparato a PCM il coefficiente di espansione diminuisce quasi del **19%**.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Questa diminuzione porta a due conseguenze:

1. Riduzione delle perdite di carico a parità di sezione tubi;
2. Riduzione della sezione dei tubi a parità di velocità dei fumi.

Di seguito si riportano le analisi energetiche effettuate nei due casi. I valori calcolati sono stati arrotondati.

#### 9.1.1.1 Analisi energetica della riduzione delle perdite di carico a parità di sezione dei tubi

Si valuta la riduzione delle perdite di carico del circuito primario nello STATO B ipotizzando di mantenere la stessa sezione dei tubi nei due stati.

#### **Perdite carico STATO A**

Si considera la portata dei fumi in uscita dalla settling chamber alla temperatura massima di 950 °C:

$$(87) \quad \begin{aligned} Q_{NA} &= 166700 \text{ [N m}^3\text{/h]} \\ Q_A &= Q_{NA} \times \alpha_A = 746800 \text{ [m}^3\text{/h]} = 207 \text{ [m}^3\text{/s]} \end{aligned}$$

Conoscendo la portata dei fumi, il diametro della tubazione del circuito primario,  $\phi_{\text{primario}} = 2,2$  m, e la sezione di passaggio fumi,  $S_{\text{primario}} = \pi \frac{\phi^2}{4} = 4 \text{ [m}^2\text{]}$ , si calcola la velocità dei fumi:

$$(88) \quad v_a = \frac{Q_A}{S_{\text{primario}}} = 55 \text{ [m/s]}$$

La pressione dinamica nello STATO A è definita in base alla relazione:

$$(89) \quad p_{dA} = \frac{1}{2g} \times \gamma_A \times v_a^2 = 44 \text{ [mmCA]}$$

con  $v_a$  la velocità dei fumi del circuito primario nella fase di fusione e  $\gamma_A$  la densità calcolabile mediante la formula:

$$(90) \quad \gamma_A = \gamma_{Nfumi} \times \frac{273}{273 + T_{maxA}} = 0,288 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

con  $\gamma_{Nfumi}$  pari alla densità dei fumi calcolata a temperatura ambiente di valore  $1,29 \text{ kg/m}^3$ .

La prevalenza totale del condotto primario è pari a 500 mmCA, mentre quella relativa al ventilatore booster  $H_{\text{Booster A}}$  è di 400 mmCA e tale da vincere la pressione di aspirazione dal forno, le perdite di carico concentrate relative al quarto foro, al gap, alla settling chamber, all'attraversamento del raffreddatore e le perdite di carico distribuite relative ai diversi tratti di tubazione.

Conoscendo la pressione dinamica e considerando unicamente le condizioni di massima velocità e temperatura, si ottengono le perdite di carico della tubazione primaria alle condizioni di progetto  $\Delta p_{\text{caricoA}}$ :

$$(91) \quad \Delta p_{\text{caricoA}} = H_{\text{BoosterA}} - p_{dA} = 356 \text{ [mmCA]}$$

La tubazione primaria è lunga circa  $l = 150$  m; si calcolano le perdite di carico a metro di tubazione:

$$(92) \quad \Delta p_{\text{carico/lA}} = \frac{\Delta p_{\text{caricoA}}}{l} = 2,373 \text{ [mmCA/m]}$$

9. Valutazione energetica, economica e ambientale dopo l'inserimento dell'apparato a PCM e dell'impianto per la produzione di energia elettrica

Le perdite di carico del condotto sono date dalla formula:

$$(93) \quad \Delta p_{caricoA} = \frac{\lambda}{\Phi} \times p_{dA}$$

Imponendo le perdite di carico al metro della tubazione si ottiene:

$$(94) \quad \Delta p_{carico/lA} = \frac{\frac{\lambda}{\Phi} \times p_{dA}}{l} \text{ [mmCA/m]}$$

e quindi:

$$(95) \quad \Delta p_{carico/lA} = k \times p_{dA} \text{ [mmCA/m]}$$

con k che è funzione della rete e risulta pari a 0,054.

**Riduzione perdite carico STATO B**

In seguito all'azione calmierante dell'apparato a PCM i fumi raggiungono una temperatura massima di fusione di 720 °C. La portata in uscita dalla settling chamber sarà:

$$(96) \quad \begin{aligned} Q_{NB} &= 166700 \text{ [Nm}^3\text{/h]} \\ Q_B &= Q_{NB} \times \alpha_B = 606.400 \text{ [m}^3\text{/h]} = 168 \text{ [m}^3\text{/s]} \end{aligned}$$

Conoscendo la portata dei fumi, il diametro della tubazione del circuito primario,  $\Phi_{\text{primario}} = 2,2 \text{ m}$ , e la sezione di passaggio fumi,  $S_{\text{primario}} = \pi \frac{\Phi^2}{4} = 4 \text{ [m}^2\text{]}$ , si calcola la velocità dei fumi:

$$(97) \quad v_b = \frac{Q_B}{S_{\text{primario}}} = 44 \text{ [m/s]}$$

La pressione dinamica nello STATO B è definita in base alla relazione:

$$(98) \quad p_{dB} = \frac{1}{2g} \times \gamma_B \times v_b^2 = 35 \text{ [mmCA]}$$

con  $v_b$  la velocità dei fumi del circuito primario nella fase di fusione e  $\gamma_B$  la densità calcolabile mediante la formula:

$$(99) \quad \gamma_B = \gamma_{Nfumi} \times \frac{273}{273 + 720} = 0,355 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

con  $\gamma_{Nfumi}$  pari alla densità dei fumi calcolata a temperatura ambiente di valore  $1,29 \text{ kg/m}^3$ .

In questo caso non si conosce la prevalenza del booster e le perdite di carico sono date dalla formula:

$$(100) \quad \Delta p_{caricoB} = \frac{\lambda}{\Phi} \times p_{dB}$$

Il parametro dell'impianto k pari a 0,054 rimane lo stesso nei due impianti essendo le tubazioni le stesse, quindi si possono ottenere le perdite di carico specifiche per il nuovo impianto:

$$(101) \quad \Delta p_{carico/lB} = k \times p_{dB} = 1,877 \text{ [mmCA/m]}$$

Si ricavano quindi le perdite di carico complessivo del nuovo impianto:

$$(102) \quad \Delta p_{caricoB} = l \times \Delta p_{carico/lB} = 283 \text{ [mmCA]}$$

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

La prevalenza del booster si ottiene mediante la formula seguente:

$$(103) \quad H_{Booster\ B} = \Delta p_{carico\ B} + p_{dB} = 318 \text{ [mmCA]}$$

### **Confronto perdite carico STATO A e B**

Tabella 64 - Riassunto delle perdite di carico nell'impianto tradizionale (STATO A) e con apparato a PCM (STATO B).

	U <sub>misura</sub>	STATO A		STATO B		Riduzione %
<b>Temperatura massima</b>	°C	$T_{maxA}$	950	$T_{maxB}$	720	24
<b>Portata</b>	$m^3/s$	$Q_A$	207	$Q_B$	168	<b>19</b>
<b>Velocità</b>	m/s	$v_A$	55	$v_B$	44	20
<b>Perdita di carico</b>	mmCA	$\Delta p_{caricoA}$	356	$\Delta p_{caricoB}$	283	<b>20</b>
<b>Prevalenza booster</b>	mmCA	$H_{boosterA}$	400	$H_{boosterB}$	318	<b>20</b>

Il fattore di riduzione delle perdite di carico è:

$$(104) \quad \frac{\lambda \Delta p_{caricoB}}{\Delta p_{caricoA}} = 0,795$$

#### 9.1.1.2 Analisi della riduzione della sezione dei tubi a parità di velocità dei fumi

Si valuta ora la riduzione della sezione della tubazione del circuito primario ipotizzando di mantenere costante la velocità dei fumi.

### **Sezione dello STATO A**

Al punto 9.1.1.1 si sono già indicati il diametro della tubazione del circuito primario, la sezione di passaggio dei fumi e la velocità, ovvero:

- $\phi_{primario} = 2,2[m]$
- $S_{primario} = \pi \frac{\phi^2}{4} = 4 [m^2]$
- $v_a = \frac{Q_A}{S_{primario}} = 55 [m/s]$  (relazione (88)).

### **Riduzione della sezione dello STATO B**

In base alla relazione (96), la portata in uscita della settling chamber sarà:

- $Q_B = 168 [m^3/s]$

e imponendo una velocità pari a quella raggiunta dai fumi nello STATO A,  $v_a = 55 [m/s]$ , si determina la sezione del condotto primario nel caso di impianto con apparato calmieratore mediante la formula:

$$(105) \quad S_{primarioB} = \frac{Q_B}{v_A} = 3,05 [m^2]$$



9. Valutazione energetica, economica e ambientale dopo l'inserimento dell'apparato a PCM e dell'impianto per la produzione di energia elettrica

Il diametro della tubazione sarà pari a:

$$\Phi_B = \sqrt{\frac{4 \times S_{primarioB}}{\pi}} = 1,97[m]$$

Si deve considerare un tubo commerciale di 2 m.

**Confronto sezione STATO A e B**

Il diametro della tubazione è quindi passato da 2,2 m a 2 m.

			STATO A	STATO B	Riduzione %
<b>Velocità costante</b>	$v_a$	$m/s$	55	55	-
<b>Diametro tubazione primaria</b>	$m$	$\emptyset$	2.2	2	<b>9</b>

**9.1.2 Valutazione energetica con l'inserimento dell'impianto per la produzione di energia elettrica**

La diminuzione della temperatura in seguito allo scambio termico fumi-caldaia determina ancora una volta la riduzione del coefficiente di espansione fumi.

Viene calcolato il coefficiente di espansione dei fumi nello STATO A, ovvero per l'impianto tradizionale:

$$(106) \quad \alpha_A = \frac{T_{maxA} + 273}{273} = \frac{300 + 273}{273} = 2,099$$

e nello STATO B, ovvero per l'impianto con apparato a PCM.

$$(107) \quad \alpha_B = \frac{T_{maxB} + 273}{273} = \frac{200 + 273}{273} = 1,733$$

Il coefficiente di espansione diminuisce, quindi, nel caso di impianto con apparato a PCM e gruppo caldaia-turbina del **17%**.

Anche in questo caso questa riduzione porta a due conseguenze:

1. Riduzione delle perdite di carico a parità di sezione tubi;
2. Riduzione della sezione dei tubi a parità di velocità dei fumi.

*Tuttavia si trascurano questi due aspetti dato che il tubo è mantenuto a sezione costante.*

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 9.1.3 Valutazione energetica complessiva

In tabella si riassume i risultati ottenuti relativi all'energia producibile utilizzando il nuovo impianto costituito dall'apparato a PCM unitamente al gruppo caldaia-turbina per il recupero e produzione di energia elettrica.

La h di funzionamento dell'impianto sono stati approssimati considerando i fermi impianto per la manutenzione [71].

Energia prodotta			
<b>h funzionamento impianto (hp)</b>	$h_{\text{tot anno}}$	h/anno	7500
<b>Potenza producibile dall'impianto - STATO B</b> (paragrafo 8.3.6.2 - (81))	N	$MW_e$	7
<b>Energia annua producibile dall'impianto - STATO B</b> potenzialmente immessa in rete o utilizzabile internamente all'acciaieria	$E_{\text{prodotta anno}}$	$MWh_e/\text{anno}$	52500
<b>Energia elettrica annua consumata dall'acciaieria - STATO A</b>	$E_{\text{consumata anno}}$	$GWh_e/\text{anno}$ $MWh_e/\text{anno}$	400000
<b>% Energia producibile - STATO B</b>	$E_{\text{prodotta}}$	%	<b>13%</b>

Energia specifica consumata			
<b>Produzione oraria EAF</b>	$C_{\text{oraria}}$	t/h	120
<b>h funzionamento impianto (hp)</b>	$h_{\text{tot anno}}$	h/anno	7500
<b>Produzione annua EAF</b>	$C_{\text{annua}}$	t/anno	900000
<b>Energia elettrica annua consumata dall'acciaieria - STATO A</b>	$E_{\text{consumata anno}}$	$GWh_e/\text{anno}$ $MWh_e/\text{anno}$	400000
<b>Energia elettrica specifica consumata - STATO A</b>	$E_{\text{consumata specifica A}}$	$kWh_e/t$	<b>445</b>
<b>Energia elettrica annua consumata dall'apparato di recupero - STATO B</b>	$E_{\text{consumata anno B}}$	$MWh_e/\text{anno}$	344000
<b>Energia elettrica specifica consumata - STATO B</b>	$E_{\text{consumata specifica B}}$	$kWh_e/t$	<b>382</b>
<b>Il risparmio nel consumo specifico di energia con il sistema di recupero/produzione energia</b>	$R_{\text{energia}}$	%	<b>14%</b>

9. Valutazione energetica, economica e ambientale dopo l'inserimento dell'apparato a PCM e dell'impianto per la produzione di energia elettrica

## 9.2 VALUTAZIONE ECONOMICA

### 9.2.1 Valutazione economica con l'inserimento del differitore termico a PCM

#### 9.2.1.1 Analisi economica della riduzione delle perdite di carico a parità di sezione dei tubi

Si analizzano e si confrontano le potenze assorbite dal ventilatore booster sia nel caso di impianto tradizionale (STATO A), sia nel caso di impianto con inserimento dell'apparato a PCM e impianto per la produzione di energia elettrica (STATO B).

*La valutazione viene eseguita esclusivamente per la fase di fusione dato che questa ricopre circa l'80% di un ciclo TTT e si considera solo il circuito primario.*

La prevalenza dell'intera linea fumi (circuito primario e secondario) è determinata dai tre ventilatori al camino. Nella linea primaria deve essere aspirata un'elevata portata di fumi durante tutta la fusione mentre durante la carica la portata dei fumi aspirati è minore. Viceversa nel circuito secondario la portata dei fumi aspirati è maggiore durante la carica e minore durante la fusione. Per garantire queste situazioni è necessario inserire un ventilatore booster nel circuito primario: le dimensioni della tubazione del circuito primario, infatti, sono più piccole rispetto a quelle dell'intera linea fumi (cappa-camino).

*Nella seguente analisi viene presa in considerazione unicamente la prevalenza del booster per rendere possibile un confronto diretto anche con l'impianto a PCM a linee separate .*

Come detto al paragrafo 9.1.1.1, la prevalenza totale del condotto primario è pari a 500 mmCA. Escludendo la prevalenza dinamica in quanto ceduta al ventilatore del camino posto in serie, la prevalenza relativa al ventilatore booster è di  $H_{\text{booster A}} = 400$  mmCA e tale da vincere la pressione di aspirazione dal forno, le perdite di carico concentrate relative al quarto foro, al gap, alla settling chamber, all'attraversamento del raffreddatore e le perdite di carico distribuite relative ai diversi tratti di tubazione.

#### **Perdite carico STATO A**

La portata dei fumi al booster nella fase di fusione, a 300 °C, è:

$$(108) \quad \begin{aligned} Q_A &= 350000 \text{ [m}^3/\text{h]} = 97 \text{ [m}^3/\text{s]} \\ Q_{NA} &= 166700 \text{ [Nm}^3/\text{h]} \end{aligned}$$

sapendo che la prevalenza relativa al ventilatore booster è di  $\Delta p_{\text{Booster A}} = 400$  mmCA, la potenza assorbita dal booster sarà alle condizioni massime sarà:

$$(109) \quad N_A = \frac{Q_A \times \Delta p_{\text{Booster A}}}{102 \times \eta} = 500 \text{ [kW]}$$

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### **Riduzione perdite carico STATO B**

In seguito all'azione calmierante dell'apparato a PCM e all'inserimento del gruppo caldaia-turbina i fumi raggiungono una temperatura di 200 °C durante la fase di fusione. La portata al booster sarà:

$$(110) \quad \begin{aligned} Q_B &= 289000 [m^3/h] = 80 [m^3/s] \\ Q_{NB} &= 166700 [Nm^3/h] \end{aligned}$$

Considerando la prevalenza del ventilatore pari a  $\Delta p_{\text{Booster B}} = 318$  mmCA, come calcolato nella relazione (103), la potenza per garantire una portata in fase di fusione pari a 80 m<sup>3</sup>/s sarà:

$$(111) \quad N_B = \frac{Q_B \times \Delta p_{\text{Booster B}}}{102 \times \eta} = 330 [kW]$$

Si nota quindi che la potenza del ventilatore non diminuisce solo del 20%, ma di una quota maggiore dato che le temperature dopo l'azione del recupero sono minori. La potenza risparmiata sarà:

$$(112) \quad N_R = N_A - N_B = 170 [kW]$$

**La potenza del ventilatore diminuisce di circa il 34%.**

Con 7500 h di funzionamento annue dell'impianto in esame, l'energia risparmiata sarà:

$$(113) \quad E_R = 1.275.000 [kWh/anno]$$

Considerando il solo costo diurno dell'energia per un'acciaieria da 120 t pari a 78 €/MWh [72], ovvero 0,078 €/kWh, il risparmio che si ottiene è:

$$(114) \quad R = 99.450 [€/anno]$$

*Tabella 65 - Riassunto risparmio economico annuo con la riduzione delle perdite di carico.*

		<b>STATO B</b>
<b>Energia risparmiata in un anno</b>	<i>kWh/anno</i>	<b>1.275.000</b>
<b>Risparmio</b>	<i>€/anno</i>	<b>99.450</b>
<i>Nel bilancio globale tuttavia non viene preso in considerazione perché marginale.</i>		

9. Valutazione energetica, economica e ambientale dopo l'inserimento dell'apparato a PCM e dell'impianto per la produzione di energia elettrica

9.2.1.2 *Analisi economica della riduzione della sezione dei tubi a parità di velocità dei fumi*

Si valuta in termini economici la riduzione della sezione della tubazione del circuito primario mantenendo costante la velocità dei fumi.

Due sono i risparmi conseguiti:

1. Risparmio nel materiale di costruzione;
2. Riduzione, almeno nel primo tratto, dei tubi di raffreddamento del condotto fumi.

9.2.1.2.1 *Risparmio materiale da costruzione*

**Materiale STATO A**

Si considera il diametro esterno del condotto primario  $\varphi_e = 22$  dm e uno spessore del tubo  $s = 5$  mm. Il diametro interno del condotto sarà  $\varphi_i = 21,95$  dm. Si considera una lunghezza del tubo  $l = 150$  m

Il volume del condotto sarà:

$$(115) \quad V = S \times l = 2600 [dm^3]$$

Con l'area di base calcolata come:

$$(116) \quad S = \frac{\pi}{4} \times (\varphi_e^2 - \varphi_i^2) = 1,726 [dm^2]$$

Considerando il peso specifico pari a  $\gamma = 7,8$  kg/dm<sup>3</sup> si ottiene un peso del condotto  $P = 20280$  kg.

Considerando poi il costo del materiale pari a  $C_m = 5$  €/kg si ottiene:

$$(117) \quad C = C_m \times P = 101.400 [€]$$

**RISPARMIO MATERIALE STATO B**

Si considera il nuovo diametro esterno del condotto primario  $\varphi_e = 19,7$  dm e uno spessore del tubo  $s = 5$  mm. Il diametro interno del condotto sarà  $\varphi_i = 19,65$  dm. Si considera una lunghezza del tubo  $l = 150$  m. Il volume del nuovo condotto sarà:

$$(118) \quad V = S \times l = 2320 [dm^3]$$

Con l'area di base calcolata come:

$$(119) \quad S = \frac{\pi}{4} \times (\varphi_e^2 - \varphi_i^2) = 1,545 [dm^2]$$

Considerando il peso specifico pari a  $\gamma = 7,8$  kg/dm<sup>3</sup> si ottiene un peso del condotto  $P = 18096$  kg.

Considerando poi il costo del materiale pari a  $C_m = 5$  €/kg si ottiene:

$$(120) \quad C = C_m \times P = 90.480 [€]$$

Il risparmio conseguito sarà:

$$(121) \quad R = 10.920 [€] \sim 11\%$$

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 9.2.1.2.2 Riduzione tubi di raffreddamento condotto a parità di velocità dei fumi

Essendo il diametro del condotto diminuito di 0,23 m si potranno togliere 4 tubi di raffreddamento. Considerando la lunghezza di un tubo di raffreddamento del circuito primario pari a  $l = 120$  m e un peso al metro pari a  $P_s = 18$  kg/m, si ottiene un peso totale del tubo di raffreddamento di  $P_r = 2160$  kg. Considerando il costo del tubo di  $C_r = 5$  €/kg, si ottiene un risparmio di:

$$(122) \quad R = C_t \times P_t \times 4 = 43.200 \text{ [€]}$$

#### 9.2.1.2.3 Risparmio complessivo con la riduzione della sezione

Tabella 66 - Riassunto risparmio economico annuo con la riduzione del materiale costruzione e tubi.

<b>Risparmio materiale da costruzione</b>	€	10.920
<b>Risparmio riduzione tubi di raffreddamento condotto</b>	€	43.200
<b>Totale risparmiato</b>	€	<b>54.120</b>
<i>Il risparmio ottenuto può essere preso in considerazione se non si considera quello ottenuto mediante le perdite di carico.</i>		
<i>Nel bilancio globale tuttavia non viene preso in considerazione perché marginale.</i>		

#### 9.2.2 Valutazione economica con l'inserimento dell'impianto per la produzione di energia elettrica

Come detto in precedenza, si trascurano i due aspetti di riduzione delle perdite di carico o riduzione della sezione dei tubi a parità di velocità dei fumi essendo il tratto di tubazione coinvolto di lunghezza trascurabile.

#### 9.2.3 Valutazioni economiche complessive

Vengono riassunte nelle seguenti tabelle i costi e risparmi globali relativi all'acciaieria esaminata.

<b>Investimento economico iniziale STATO B</b>			
<b>Costo dell'apparato di calmierazione</b> (paragrafo 8.2.2)	$C_{\text{apparatoPCM}}$	€	320.000
<b>Costo dell'impianto di produzione di energia elettrica</b> (paragrafo 8.3.4) (l'inserimento è dimensionato in funzione dell'impianto specifico)	$C_{\text{impianto produzione}}$	€	13.800.000
<b>Valutazione infortunistica e oneri vari</b>	$C_{\text{infortunistica}}$	€	1.070.000
<b>Altri costi:</b>			
<i>Costo di manutenzione annuo</i>	$C_{\text{manutenzione}}$	€/anno	535.000
<i>Costo del personale</i>	$C_{\text{personale}}$	€/anno	100.000
<b>Totale investimento iniziale approx.</b>	$I_0$	€	<b>15.825.000</b>

9. Valutazione energetica, economica e ambientale dopo l'inserimento dell'apparato a PCM e dell'impianto per la produzione di energia elettrica

Risparmio economico legato all' energia elettrica STATO B			
Il gruppo caldaia-turbina produce	$E_{\text{prodotta anno}}$	MWh <sub>e</sub> /anno	52.500
Il costo dell'energia per un'acciaieria elettrica pari a circa	$C_{\text{energia}}$	€MWh <sub>e</sub>	78 [72]
<b>Risparmio annuo - STATO B</b>	<b><math>R_{\text{energia}}</math></b>	<b>€/anno</b>	<b>4.095.000</b> ~ 14%

Guadagno economico con incentivi (certificati bianchi o titoli di efficienza energetica, TEE) STATO B	
Il valore dei certificati bianchi (TEE) per la produzione di energia elettrica da reflui gassosi [73]	~ 86,98 €/tep risparmiato
1 kWh [40]	$0,187 \times 10^{-3}$ tep
$E_{\text{prodotta anno}}$	9.818 tep/anno
<b>Guadagno annuo da TEE</b> (per 5 anni di incentivo) [74]	<b>~854.000 €/anno</b>

Pay-back STATO B			
<b>Capitale investito / Risparmio totale annuo</b> (senza i TEE)	<b>Pay-back</b>	<b>anni</b>	<b>entro i 4</b>
<b>Capitale investito / Risparmio totale annuo con TEE</b>	<b>Pay-back</b>	<b>anni</b>	<b>~3</b>

### 9.3 VALUTAZIONE AMBIENTALE

La valutazione ambientale viene fatta in base alla quantità di CO<sub>2</sub> non emessa in seguito al recupero energetico.

Riduzione CO <sub>2</sub>			
Fattore di emissione nazionale [75]	$\varepsilon$	t CO <sub>2</sub> /MWh <sub>e</sub>	0,483
Produzione di CO <sub>2</sub> da impianto di recupero con produzione di energia elettrica dello STATO B ( $E_{\text{prodotta anno}}$ 52.500 MWh)	CO <sub>2 anno B</sub>	t CO <sub>2</sub> /anno	~25400
Energia elettrica consumata dall'acciaieria produce ( $N_{\text{consumata}} = 400$ GWh <sub>e</sub> /anno)	CO <sub>2 anno acciaieria</sub>	t CO <sub>2</sub> /anno	~ 194000
<b>Riduzione nella produzione di CO<sub>2</sub></b>		<b>%</b>	<b>13%</b>

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

## **9.4 VALUTAZIONI A LIVELLO COMPLESSIVO ACCIAIERIE IN ITALIA**

Lo studio evidenzia come l'inserimento del sistema di recupero e produzione di energia elettrica sia significativo e degno di approfondimento soprattutto in considerazione del fatto che le acciaierie a forno elettrico ad arco, e la siderurgia in generale, sono un settore ad alta intensità energetica (costituiscono circa il 14% del consumo industriale a livello nazionale). Con riferimento al 2011 la produzione di acciaio in Italia era di 28843000 t/anno di cui il 65,6% prodotto da EAF, pari a circa 18843000 t/anno [4]. Considerando il numero di forni in Italia, all'incirca 30, una capacità media di 100 t e l'energia elettrica media consumata di 440 kWh<sub>e</sub>/t, l'energia consumata in un anno risulterebbe pari a circa 8290920 MWh<sub>e</sub>/anno. Ipotizzando di estendere a tutte le acciaierie a forno elettrico ad arco il sistema di recupero proposto, si otterrebbe un risparmio in via approssimativa di 1112000 MWh<sub>e</sub>/anno.

Riferendosi sempre al 2011 il consumo di energia elettrica in Italia era attorno ai 314 TWh [76]; il possibile risparmio mediante l'intervento proposto sarebbe pari a circa lo 0,36% del consumo elettrico nazionale.

Dal punto di vista ambientale, con riferimento al consumo nazionale di energia elettrica da forno elettrico, la produzione di CO<sub>2</sub> era di circa 4004500 t/anno con fattore di emissione nazionale 0,483 tCO<sub>2</sub>/MWh<sub>e</sub>. Il risparmio di CO<sub>2</sub> raggiungibile, a seguito dell'inserimento dell'apparato di recupero analizzato, sarebbe attorno 537000 t/anno, pari a uno 0,12% rispetto al totale emissioni a livello nazionale del 2011 di 433000000 t/anno.



## 10 CONCLUSIONI

Le analisi effettuate sulle acciaierie a forno elettrico ad arco dimostrano che gli off-gas emessi durante un ciclo TTT presentano un elevato contenuto entalpico valutato ai fini di un recupero energetico. Tale recupero è reso problematico principalmente dall'alta variabilità delle temperature e portate, dovuta essenzialmente al processo produttivo intermittente, ma anche dalla polverosità dei fumi (sporcamento).

E' stato proposto e analizzato un innovativo sistema di recupero, un differitore termico inerziale, di tipo "passivo", contenente materiali a cambiamento di fase (ad esempio alluminio) al fine di calmierare la variabilità delle caratteristiche dei fumi. Queste masse assorbono e rilasciano grandi quantità di energia termica sfruttando il calore latente di fusione-solidificazione garantendo una maggiore regolarità del contenuto energetico dei fumi. In questo modo si rende possibile e vantaggiosa l'introduzione di un impianto per la produzione di energia elettrica costituito da caldaia a vapore integrata e turbo-gruppo (ad esempio ciclo Rankine a vapore).

Lo studio è stato applicato a una tipica acciaieria con EAF e ha evidenziato come l'inserimento del sistema di recupero e produzione di energia elettrica porti a numerosi vantaggi di carattere tecnologico, energetico, economico e ambientale ampiamente discussi. Tali vantaggi sono nel seguito sintetizzati ed evidenziati in Figura 165:

- Diminuzione dell'energia specifica (kWh/t) di processo di circa il 14%;
- Diminuzione dei costi energetici di processo di circa il 13%;
- Riduzione di emissioni di gas serra e del relativo fattore di emissione di circa il 13%;
- Possibilità di separare i flussi dei fumi primari e secondari con conseguente diminuzione della spesa energetica di ventilazione e/o eliminazione della valvola di miscelazione;
- Possibilità di ridurre le dimensioni della torre evaporativa;
- Diminuzione della portata reale dei fumi a valle del recuperatore con conseguente possibile riduzione delle dimensioni dell'impianto e/o delle perdite di carico;
- Aumento dell'efficienza di abbattimento degli inquinanti.

Negli anni di dottorato sono stati scritti due articoli sul nuovo sistema calmieratore di tipo "passivo":

- Il primo articolo intitolato "Development of a prototype system for energy recovery from Electric Arc Furnace" è stato presentato al convegno internazionale *AMST'11 - 9° International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology*, 16-17 Giugno 2011, Mali Losinj, Croazia;
- Il secondo articolo intitolato "Technological Apparatus for the Moderation of Meltshop Off-Gas" è stato presentato al convegno internazionale *AISTech 2012, THE IRON&STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPOSITION*, 7-10 May 2012, Georgia World Congress Center, Atlanta, USA; l'articolo si trova pubblicato nel Conference Proceedings.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

I due convegni hanno carattere diverso, il primo di tipo scientifico, il secondo di tipo applicativo. Il convegno annuale dell'AISTech è uno dei più rinomati e importanti del settore siderurgico e vede tra i partecipanti i grandi gruppi internazionali di produttori di acciaio (quali *ArcelorMittal*, *Gerdau*) e costruttori (quali *Tenova*, *Siemens*). Questo congresso rappresenta dunque una buona vetrina per il sistema di recupero proposto: l'articolo presentato ha, infatti, suscitato un vivo interesse da parte del pubblico partecipante. Anche sulla base di esperienze e comunicazioni personali con produttori/fornitori del settore emerge l'aspetto della continua ricerca e sviluppo di sistemi che concretizzino i risparmi dei consumi delle acciaierie e ne migliorino l'efficienza. Il periodo economico di questi ultimi anni ha messo a dura prova il mondo dell'acciaio; la tremenda crisi del 2009 che ha colpito questo settore, come tanti altri, ha allentato la presa negli ultimi anni, ma in base a quanto emerge dalla letteratura e da convegni di settore (*AISTech Italy*, 24 Ottobre 2012, Tenova, Milano) il 2013 presenterà ancora dati poco confortanti per una ripresa globale.

Un altro fattore ricercato dai produttori di acciaio è naturalmente la competitività e questo vale soprattutto nei confronti di quei paesi dove vigono norme meno restrittive (o meno controllate) in ambito di emissioni di inquinanti: sono, infatti, in molti ad aver delocalizzato la propria produzione in tali paesi compromettendo l'equilibrio del mercato.

Ben vengano dunque soluzioni e proposte innovative e tecnologicamente soddisfacenti come quella analizzata.

Il sistema "passivo" è stato recentemente brevettato (n° brevetto MI2012A001815) insieme a quello "attivo" (n° brevetto MI2012A001791) e sono tuttora in corso ulteriori indagini rivolte in particolare ai seguenti aspetti:

- Analisi di un numero maggiore di forni EAF per ottenere una generalizzazione più accurata dell'andamento delle temperature degli off gas in uscita dal quarto foro;
- Analisi di altri PCM (ad esempio Sali fusi);
- Analisi più accurate con la Computational Fluid Dynamics (CFD);
- Indagini sul gap con l'obiettivo di esaurire il processo di ossidazione, ma senza degradare termodinamicamente gli off-gas;
- La realizzazione del progetto illustrato in un impianto con EAF esistente;
- Lo studio e la sperimentazione di un apparato con differimento termico di tipo attivo, con spillamento diretto di energia termica;

L'estensione dello studio è prevista anche ad altri tipi di impianto, quali i convertitori LD.

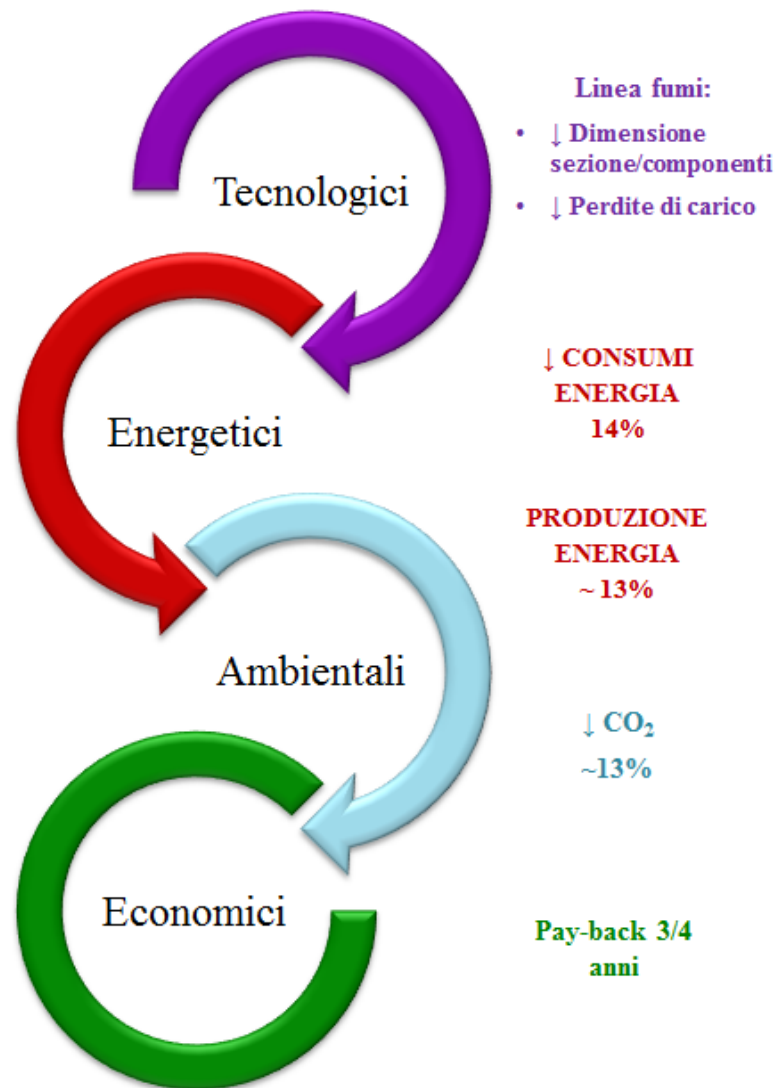


Figura 165 - Vantaggi differitore termico inerziale a PCM inserito nella linea fumi di un'acciaieria con EAF.



# 11 ALLEGATI

## 11.1 ALLEGATO 1 - CALCOLO DEL COEFFICIENTE GLOBALE DI SCAMBIO TERMICO E DELLO SPORCAMENTO

### 11.1.1 Convezione

Si valuta il coefficiente globale di scambio termico convettivo relativamente al banco di tubi investito ortogonalmente dal fluido.

L'analisi del flusso e la determinazione della potenza termica scambiata sono particolarmente complesse: l'area della sezione ortogonale al moto del fluido varia comportando periodiche accelerazioni e rallentamenti del fluido del lato mantello. Lo scambio termico pertanto dipende dal tipo di moto e dal grado di turbolenza che, a loro volta, sono funzioni della velocità del fluido e della geometria del banco (dimensione e disposizione dei tubi).

La disposizione dei tubi può essere di due tipi: disposizione a tubi allineati e disposizione a tubi sfalsati (Figura 166). Si definiscono  $S_T$  il passo trasversale,  $S_L$  il passo longitudinale,  $D_e$  il diametro esterno dei tubi e  $S'_L$  lo spazio tra i tubi sfalsati posti su file adiacenti (in Figura 166 b) [77].

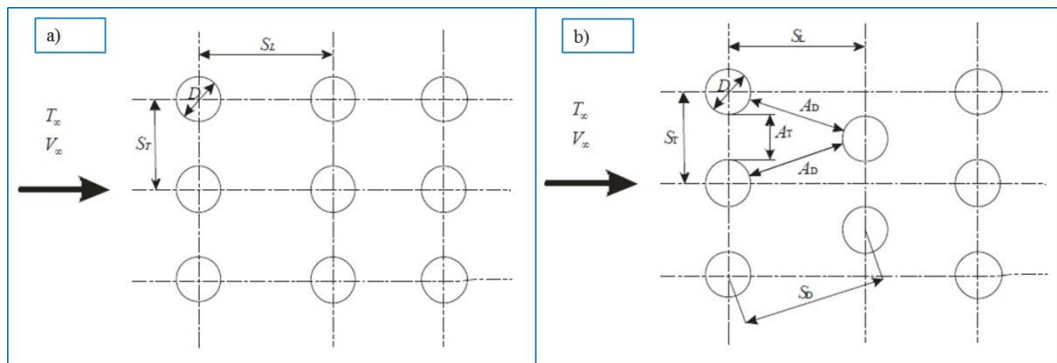


Figura 166 - a) Disposizione a tubi allineati; b) Disposizione a tubi sfalsati. Fonte: [77].

Il calcolo del coefficiente globale di scambio termico convettivo per un banco di tubi investito ortogonalmente da un flusso è calcolabile mediante l'equazione:

$$(123) \quad \bar{Nu}_D = K \cdot (\text{Re})^m \cdot (\text{Pr})^n$$

È formalmente simile a quella utilizzata nel caso di tubo singolo.

L'equazione richiede la determinazione di una velocità di riferimento calcolata in base all'area minima di passaggio a disposizione del fluido.

Nel caso di disposizione a tubi allineati, la sezione minima di passaggio per unità di lunghezza del tubo vale:

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

$$(124) \quad A_{\min} = A_T = S_T - D_e$$

La velocità massima vale:

$$(125) \quad V_{MAX} = \frac{S_T}{S_T - D_e} * V_{\infty}$$

con:

- $v_{\infty}$  velocità del fluido indisturbato, ovvero la velocità del fluido che scorre in un condotto privo di tubi.

Per i tubi sfalsati, il flusso dopo aver attraversato la sezione  $A_T$  pari a  $S_T - D$  si divide in due sezioni  $A_D$  pari a  $S_D - D$ . Nel calcolare qual è la velocità massima, bisogna valutare qual è la sezione minima.

La velocità sarà massima nell'attraversamento della sezione AD se:

$$(126) \quad 2A_D < A_T$$

e cioè se:

$$(127) \quad 2(S_D - D) < S_T - D_e$$

ma si ha anche che:

$$(128) \quad S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} < \frac{S_T + D_e}{2}$$

La sezione minima di passaggio è quella tra tubi posti diagonalmente.

In questo caso la velocità massima vale:

$$(129) \quad v_{\max} = \frac{S_T}{2 \cdot (S_D - D_e)} \cdot v_{\infty}$$

*La disposizione dei tubi quindi influenza il coefficiente di scambio termico convettivo.*

Con la velocità massima si determina il numero di Reynolds:

$$(130) \quad Re = \frac{v_{MAX} * D_e}{\mu_m}$$

con:

- $\mu_m$  viscosità cinematica del fluido.

Mentre per il numero di Prandtl vale la relazione:

$$(131) \quad Pr = \frac{c_p * \mu}{\lambda}$$

con:

- $c_p$  calore specifico del fluido;
- $\mu$  viscosità dinamica del fluido;
- $\lambda$  conduttività termica del fluido;

Allegato 1

I dati sperimentali permettono di riscrivere la correlazione (123) per il regime turbolento nella forma [66]:

$$(132) \quad Nu = \frac{\bar{h}_c D_e}{\lambda} = 0,33 \cdot C \cdot Re^m \cdot Pr^{\frac{1}{s}}$$

In particolare, nel regime turbolento, indipendentemente dalla disposizione in tubi allineati o sfalsati e per un banco con almeno dieci file di tubi, la (132) può venire riscritta nella forma seguente:

$$(133) \quad \frac{\bar{h}_c D_e}{k_f} = 0,33 \cdot C \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,3}$$

con:

- $\bar{h}_c$  coefficiente di scambio termico convettivo;
- C coefficiente empirico funzione della disposizione dei tubi, del numero di Reynolds e del rapporto tra passo longitudinale e passo trasversale compreso tra 1,25 e 3,0.

Tabella 67 - Valori delle costanti C e m. Fonte: [77].

$\frac{S_L}{D}$	$\frac{S_T}{D}$							
	1,25		1,50		2,00		3,00	
	C	m	C	m	C	m	C	m
Tubi allineati								
1,25	0,348	0,592	0,275	0,608	0,100	0,704	0,0633	0,752
1,50	0,367	0,586	0,250	0,620	0,101	0,702	0,0678	0,744
2,00	0,418	0,570	0,299	0,602	0,229	0,632	0,198	0,648
3,00	0,290	0,601	0,357	0,584	0,374	0,581	0,286	0,608
Tubi sfalsati								
0,600							0,213	0,636
0,900					0,446	0,571	0,401	0,581
1,000			0,497	0,558				
1,125					0,478	0,565	0,518	0,560
1,250	0,518	0,556	0,505	0,554	0,519	0,556	0,522	0,562
1,500	0,451	0,568	0,460	0,562	0,452	0,568	0,488	0,568
2,000	0,404	0,572	0,416	0,568	0,482	0,556	0,449	0,570
3,000	0,310	0,592	0,356	0,580	0,440	0,562	0,421	0,574

In Tabella 68 è riportato il coefficiente correttivo da considerare per la variazione del coefficiente medio di scambio termico per tutto il banco, in funzione del numero di file trasversali e in regime turbolento. Per valori del rapporto  $S_L/S_T$  compresi tra 1,25 e 1,5 il valore di C non si discosta di più del 10% dall'unità per ogni disposizione dei tubi studiata.

Tabella 68 - Rapporto tra  $\bar{h}_c$  per N file trasversali e  $\bar{h}_c$  per dieci file trasversali nel moto turbolento. Fonte: [77].

Rapporto	N° file trasversali									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Tubi sfalsati</b>	0,68	0,75	0,83	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99	1
<b>Tubi allineati</b>	0,64	0,80	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99	1

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Determinato il valore del Nusselt, si ricava quindi il valore del coefficiente di scambio termico convettivo.

$$(134) \quad \bar{h}_c = \frac{Nu * \lambda}{D_e}$$

Nel caso di regime laminare così come per il regime di transizione tra laminare e turbolento si assume:

$$(135) \quad j = \frac{\bar{h}_c}{c_p v_{\max}} \cdot Pr_m^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{\mu_s}{\mu_m} \right)^{0,14} = \varphi \left( \frac{v_{\max} D_e}{\mu_m} \right)$$

### 11.1.2 Irraggiamento

La trasmissione di calore per irraggiamento è proporzionale al  $\Delta T^4$  e diventa quindi importante alle alte temperature, come nel caso di un forno elettrico ad arco.

Si valuta pertanto il coefficiente globale di scambio termico radiativo relativo al banco di tubi investito ortogonalmente da un fluido. A temperature elevate dei gas di combustione alcuni composti come vapore acqueo e anidride carbonica trasmettono un'elevata quantità di calore per irraggiamento. Nel calcolo della quantità di calore scambiata va tenuta in considerazione la porzione di superficie irraggiata.

Per valutare il calore trasmesso per irraggiamento in un banco di tubi, si può valutare il coefficiente di scambio termico, espresso in  $W/m^2K$ , con una correlazione empirica fornita da *Cornetti* [78]:

$$(136) \quad h_{irr} = F_s \cdot h_{irr}^* \cdot K$$

con:

- $F_s$  porzione di superficie irraggiata (valori compresi tra 0,7 e 0,95);
- $K$  coefficiente funzione dello spessore dello strato irraggiante e del tipo di combustibile (0,4 per il carbone; 0,5 per olio combustibile; 0,6 per gas naturale);
- $h_{irr}^*$  coefficiente base di cavità dato dalla relazione:

$$(137) \quad h_{irr}^* = 0,055 \cdot \Delta T_m + 0,1 \cdot (T_s - 500)$$

con:

- $T_s$  temperatura della superficie che riceve il calore [K];
- $\Delta T_m$  differenza media di temperatura, espressa come:

$$(138) \quad \Delta T_m = \frac{(T_{ci} - T_{fu}) - (T_{cu} - T_{fi})}{\ln \left( \frac{T_{ci} - T_{fu}}{T_{cu} - T_{fi}} \right)} F_{corr}$$

con:



## Allegato 1

- $T_{ci}$  temperatura ingresso fluido caldo [K];
- $T_{cu}$  temperatura uscita fluido caldo [K];
- $T_{fi}$  temperatura ingresso fluido freddo [K];
- $T_{fu}$  temperatura uscita fluido freddo [K];
- $F_{corr}$  fattore di correzione, valutato in base alla Figura 167.

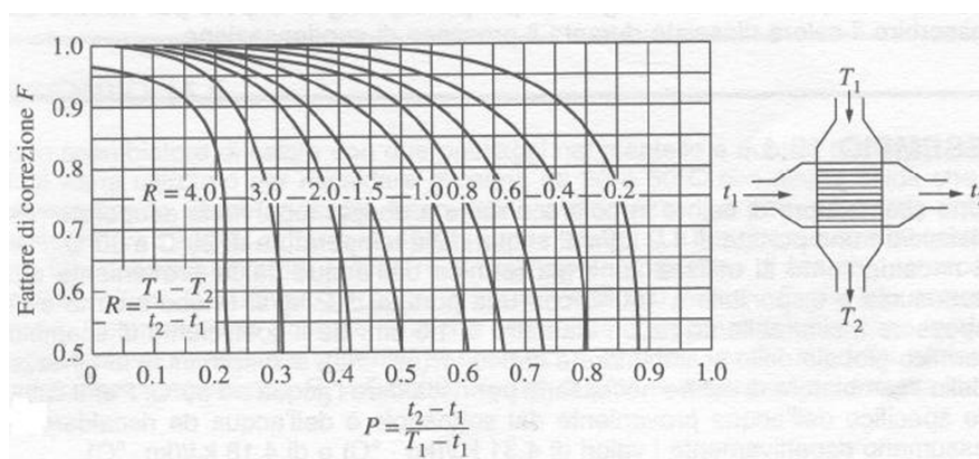


Figura 167 - Fattore di correzione.

Stimando il coefficiente globale di scambio termico con i metodi appena esposti relativamente alle diverse configurazioni dell'apparato di calmierazione, si verifica che *la componente dovuta all'irraggiamento ha un'influenza minore del 15% sullo scambio termico totale*. Nelle simulazioni effettuate per analizzare la calmierazione delle temperature degli off-gas non è stata considerata questa componente.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 11.1.3 Sporramento

Nella settling chamber gli off-gas presentano elevate concentrazioni di polveri e residui di scoria. Le caratteristiche fisiche di tali componenti e le alte temperature in gioco portano al rammollimento e alla fusione degli stessi con successiva adesione alla superficie dei tubi contenenti il materiale PCM. Questo fenomeno, detto sporramento, può ridurre in modo significativo lo scambio termico fumi-PCM. In assenza di dati sperimentali a riguardo per l'applicazione esaminata, è stato fatto riferimento alle informazioni fornite dall'azienda *Eco-D Environmental Systems S.r.l.*: *l'ipotesi è quella di considerare mediamente sulla superficie del differitore uno spessore di sporramento pari a 1 cm; in realtà il fenomeno sarà più marcato nelle file frontali, dove si hanno temperature più elevate, meno nelle ultime file di tubi, dove le temperature sono inferiori al valore di rammollimento e fusione dei residui di scoria.* La conduttività termica di tali depositi di materiale varia in misura notevole in relazione alla loro composizione chimica, alla loro porosità e alla loro struttura cristallina. Nel caso in esame si è fatto riferimento alla conduttività termica delle incrostazioni di caldaia, valore compreso nell'intervallo 1,2 e 3,5 W/mK, scegliendolo pari a 2,5 W/mK. La resistenza termica specifica introdotta dallo sporramento dei tubi, espressa in m<sup>2</sup>K/W, può essere calcolata come:

$$(139) \quad R'' = \frac{s}{\lambda}$$

con:

- $\lambda$  conduttività termica del materiale depositato [W/mK];
- $s$  spessore di sporramento [m].

## 11.2 ALLEGATO 2 - PROCEDURE DI SIMULAZIONE

Viene riportata la procedura di simulazione seguita in una precedente tesi di cui sono stata correlatrice [66], in cui è stato analizzato il comportamento termodinamico del PCM e del differitore mediante simulazioni termo-fluidodinamiche (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Per comprendere e analizzare il comportamento del differitore è stato utilizzato il software Fluent.6.2.16 associato a un preprocessore Gambit.2.2.30, utilizzato per disegnare la geometria del problema, imporre i tipi di condizioni al contorno ed effettuare la *meshatura* (discretizzazione) del dominio. In questo modo si ottiene un “file.msh” che viene importato in Fluent® dove si definiscono le condizioni al contorno e si implementano tutti i parametri necessari per la simulazione. Lo scopo delle simulazioni è quello di studiare il comportamento del differitore termico composto dai tubi contenenti il materiale PCM, nel caso in cui si adotti l’alluminio. Per poter svolgere le simulazioni è stato necessario fare alcune ipotesi approssimative dei dati in ingresso:

- *La portata volumetrica dei gas viene considerata costante nel tempo; in realtà, durante il ciclo TTT varia in funzione delle diverse fasi del processo;*
- *Non viene considerato l’irraggiamento nello scambio termico: come verificato nell’Allegato 1, lo scambio termico radiativo ha un’influenza minore del 15% sullo scambio termico globale e interessa le prime file di tubi;*
- *Lo sporco delle superfici viene simulato separatamente dalle simulazioni sui banchi di tubi, considerando uno strato medio di 1 cm sulle file di tubi;*
- *Per simulare il regime turbolento viene utilizzato il modello k-epsilon;*
- *Non è possibile imporre proprietà diverse al materiale PCM in funzione della fase (solida/liquida); in particolare, nel caso dell’alluminio, il valore di diffusività termica cala sensibilmente passando dalla fase solida a quella liquida: nel caso specifico sono stati considerati i valori medi nell’intorno della temperatura di fusione.*

### 11.2.1 Gambit

Tramite il software Gambit.2.2.30 è stata creata la geometria del dominio da simulare. Considerata la complessità dei dati in ingresso (ovvero il profilo di temperatura in una sezione rappresentativa della settling chamber e la portata volumetrica media dei fumi) si è ritenuto opportuno modellare un dominio di tipo bidimensionale, piuttosto che uno di tipo tridimensionale. In questo modo si trascura l’eventuale moto di galleggiamento del materiale PCM parzialmente fuso all’interno del tubo che lo contiene, quindi viene trascurato il contributo dell’eventuale flusso termico convettivo dovuto al moto del materiale fluido.

In Figura 168 viene rappresentata la porzione del dominio riferita al singolo tubo. Il dominio, nella sua totalità, è costituito dalla ripetizione modulare della geometria in figura in un numero pari al numero delle file trasversali di tubi.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

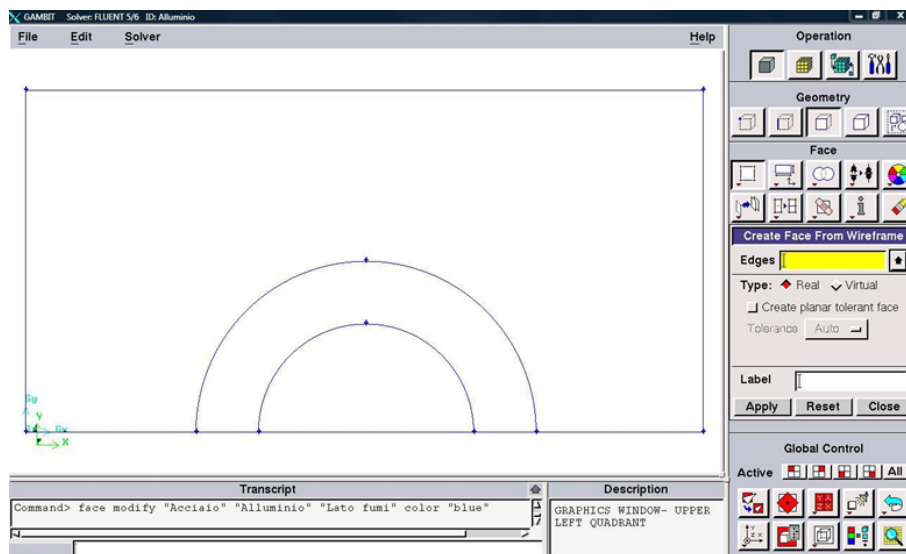


Figura 168 - Geometria semplificata del modello in esame.

Per la creazione della geometria sono stati creati prima dei punti di riferimento, poi i segmenti e infine le superfici. A ogni superficie creata si associa un materiale: all'interno del tubo è stato assegnato l'alluminio, al tubo stesso l'acciaio e all'esterno sono state definite le caratteristiche degli off-gas. Successivamente è stata realizzata la griglia di calcolo; ovvero sono stati individuati i volumi entro cui verranno discretizzate le equazioni che esprimono la legge di conservazione considerata. La *mesh* utilizzata è del tipo rappresentato in Figura 169.

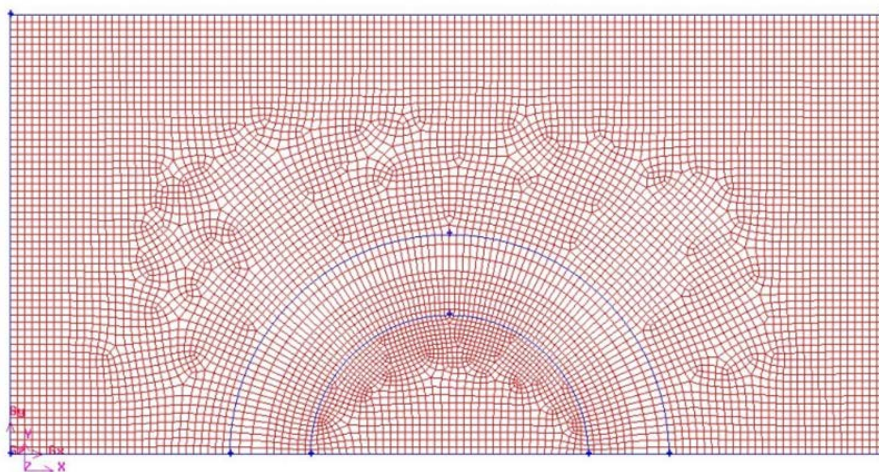


Figura 169 - Meshatura della geometria.

### 11.2.2 Fluent

La geometria precedentemente creata con il software Gambit viene implementata nel software Fluent.6.2.16 al fine di attuare la simulazione termo-fluidodinamica.

Vengono quindi impostati i parametri del problema attraverso la tendina “Define”, riportata in figura 3.

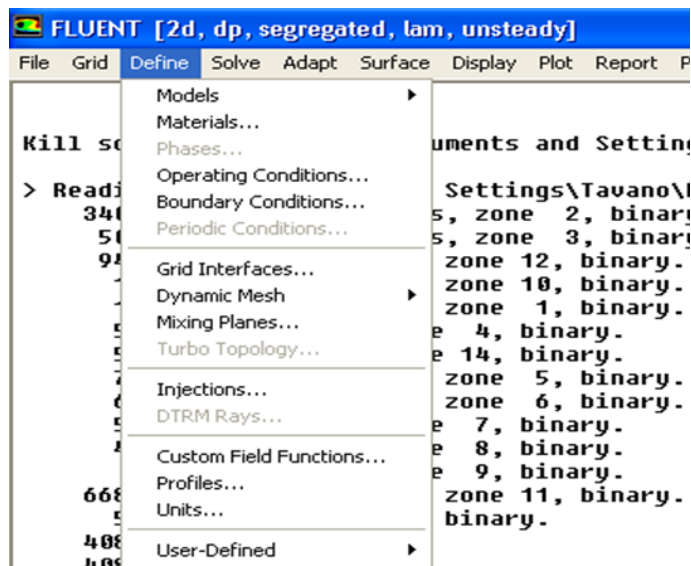


Figura 170 - Tendina delle impostazioni del modello in esame del software FLUENT®.

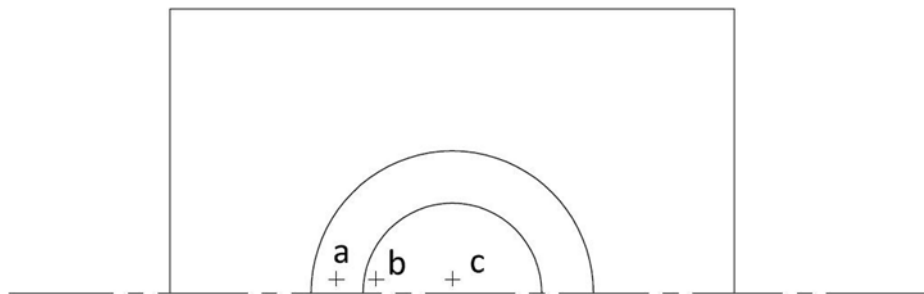
Si rilevano varie impostazioni: Models, Materials e boundary conditions, settate come descritto:

- *Models*. Tramite tale finestra di dialogo si è imposto che: il problema è non stazionario, data la grande variabilità della temperatura; si è in presenza di fenomeni di solidificazione e fusione; il solutore deve risolvere l'equazione dell'energia, in quanto è necessario determinare il campo di temperature;
- *Materials*. Si sono definite tutte le proprietà dei materiali solidi o fluidi presenti nel dominio, ovvero alluminio, acciaio e off-gas. In particolare si definiscono: densità, calore specifico, conduttività termica, viscosità, calore latente di fusione, temperatura di Solidus e Liquidus;
- *Boundary Conditions*. Sono state imposte le condizioni al contorno relative alle differenti superfici.

Successivamente sono stati definiti i punti del dominio in cui si vogliono monitorare le temperature (rappresentati in Figura 171). Dapprima è stato monitorato l'andamento della temperatura nella sezione d'uscita dell'ultima fila di tubi, per verificare l'effetto calmierante dell'apparato. Successivamente è stato osservato l'andamento della temperatura nel primo tubo (quello soggetto a temperature più elevate) all'interno (punto “a”) e nel materiale PCM in prossimità della parete del tubo (punto “b”) allo scopo di controllare che le temperature di pelle non raggiungano livelli tali da compromettere la resistenza strutturale dello stesso; nel materiale PCM in prossimità del centro del tubo (punto “c”), per verificare che il materiale basso fondente svolga la sua funzione anche nel punto

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

più distante dalla parete del tubo; infine, è stata valutata la perdita di carico generata dall'apparato monitorando l'andamento della pressione totale in ingresso e uscita del differitore termico inerziale.



*Figura 171 - Geometria con più punti notevoli in cui verrà monitorata la temperatura.*

### **11.3 ALLEGATO 3 - MODELLO REALIZZATIVO DELL'APPARATO A PCM DI TIPO PASSIVO DEL CAPITOLO 8**

Viene descritto un possibile modello di differitore termico inerziale contenente PCM, la struttura di sollevamento e quella di supporto per le simulazioni del capitolo 8.

#### ***11.3.1 Tubi di contenimento materiale PCM***

L'apparato presenta le stesse dimensioni di ingombro (4mx4m) e la stessa struttura di quello precedentemente descritto ai paragrafi 7.4.1 e 7.4.2, ovvero:

- La tipologia del differitore scelta è quella di tubi di forma cilindrica;
- I tubi sono sigillati ermeticamente per impedire la fuoriuscita del materiale; in realtà è previsto un foro sulla parte superiore del tubo per consentire la fuoriuscita e l'entrata dell'aria durante la fase di espansione e contrazione del PCM per evitare eccessive pressioni interne.
- I tubi sono riempiti fino al 90% con il PCM; il restante 10% viene lasciato vuoto per consentire la libera espansione/contrazione dell'alluminio durante le fasi "calde"/"fredde".
- Il materiale scelto per la realizzazione dei tubi è AISI 316 di diametro 60 mm e spessore 4 mm.
- Nel fondo del tubi è previsto l'inserimento di un tondo di materiale isolante (15 mm circa) per ridurre il surriscaldamento e possibili corrosioni del contenitore.
- I tubi sono liberi di oscillare;

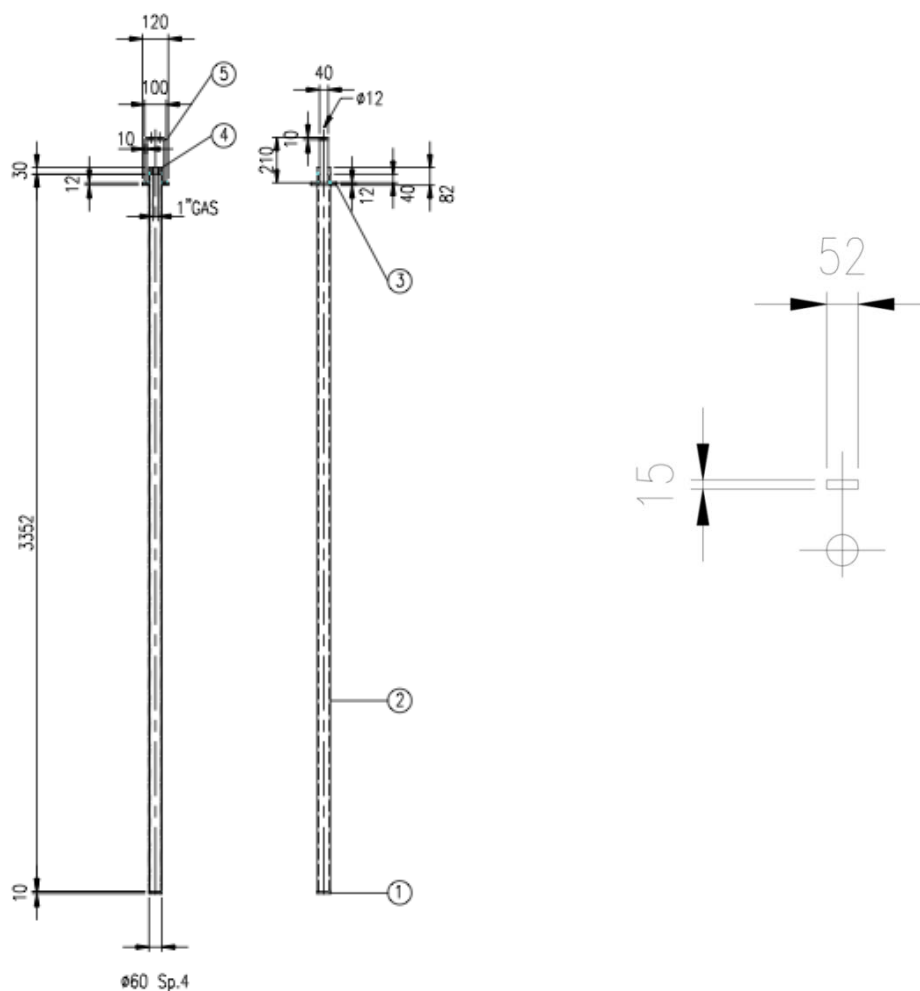
L'unica differenza riguarda il numero di tubi, loro lunghezza e disposizione. Il modello realizzativo proposto prevede:

- Numero di tubi inferiore, pari a 841;
- Passo maggiore, pari a 130 mm;
- Lunghezza 3,4 m, oltre i 3 m previsti per evitare di intralciare i mezzi di estrazione polveri dalla camera di sedimentazione;
- Tubi allineati, disposti in file di 29;
- Tubi da 2".

La struttura di sollevamento e quella di supporto vengono nel seguito descritte.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

1	TONDO PER FONDO $\phi 60$ Sp.10	AISI 316
2	TUBO $\phi 60$ Sp.4 L=3352	AISI 316
3	ANELLO DI APPOGGIO 120X120 Sp.12	AISI 316
4	TONDO PER TAPPO $\phi 60$ Sp.30	AISI 316
5	PIATTO 500X40 Sp.10	AISI 316



**TUBO**

**TONDO ISOLANTE**

Figura 172 - Possibile lunghezza per i tubi apparato a PCM e dettaglio del fondo isolante dei tubi.

### 11.3.2 Struttura di sollevamento tubi

La struttura di sollevamento tubi è costituita da 29 travi IPE 120 di lunghezza 3914 mm (Figura 173). Ogni trave prevede due piatti forati 160x160 di spessore 12 mm per i ganci di sollevamento posizionati sulla parte superiore.

Nella parte inferiore della trave invece vengono avvitate i tubi di contenimento del PCM a file: ogni trave solleverà quindi una fila di 29 tubi.

Questo sistema permette una facile manutenzione dell'apparato: i tubi sollevati possono essere facilmente trasportati, puliti e sostituiti in caso di rottura dato che possono essere svitati uno ad uno. Mediante questo sistema di sollevamento si compie anche un'azione autopulente dei tubi: nel



### Allegato 3

momento in cui essi vengono sollevati parte delle polveri depositate sulle pareti in seguito al passaggio degli off-gas vengono eliminate per raschiamento.

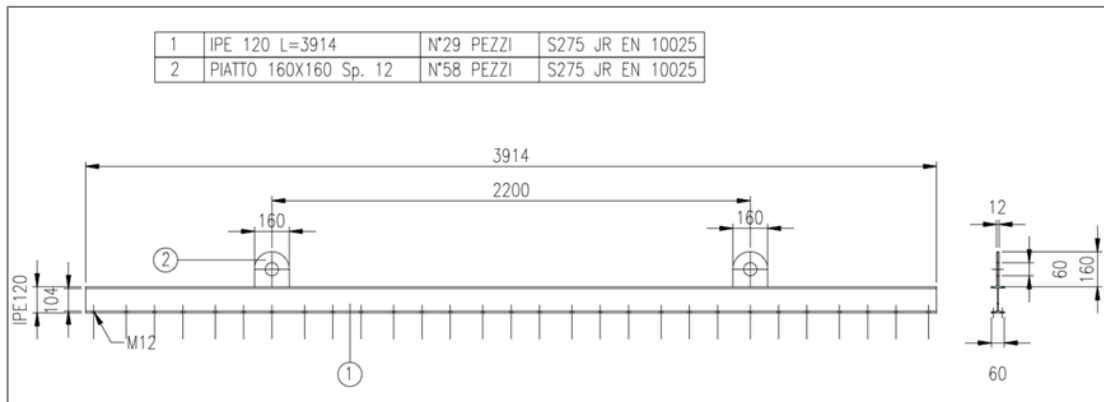


Figura 173 - Possibile struttura di sollevamento tubi.

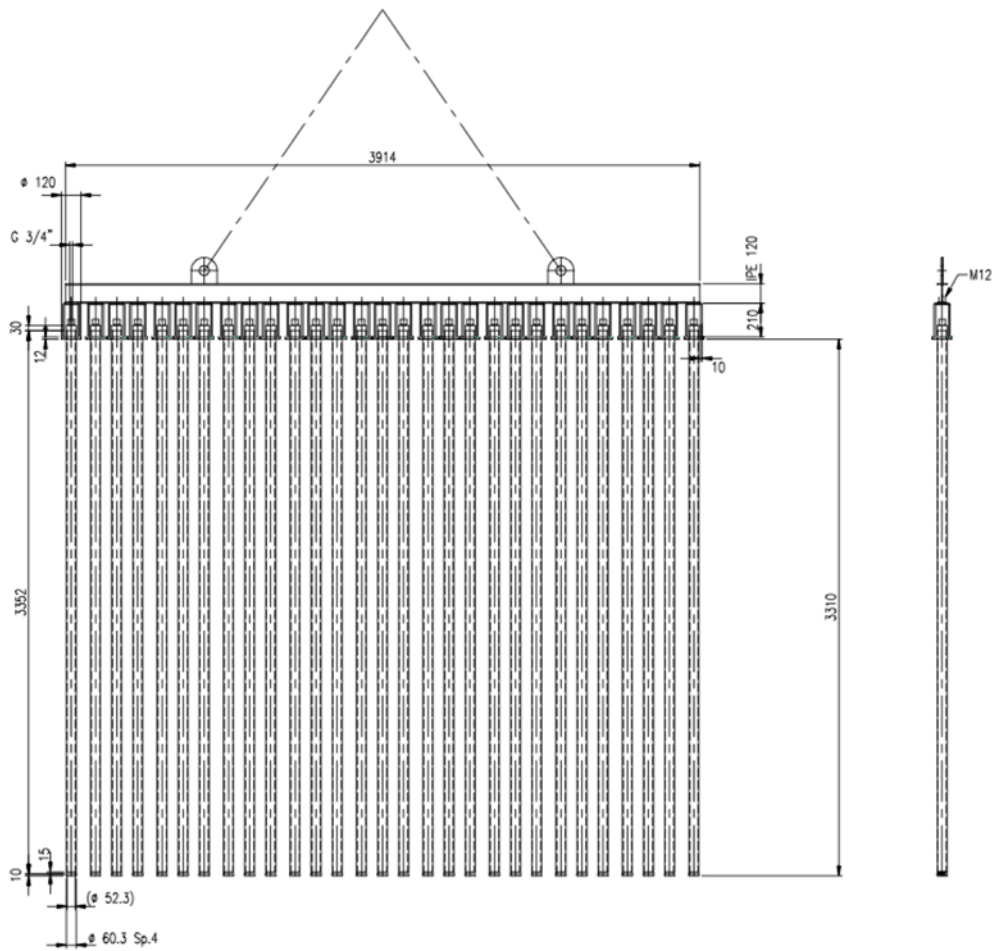


Figura 174 - Sollevamento dei tubi.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### ***11.3.3 Struttura di supporto tubi***

La struttura di supporto Figura 175 è costituita da una piastra forata di acciaio di spessore 20 mm e dimensioni 4340x4340 mm che poggia su quattro travi IPE 300 di lunghezza 4490 mm. La piastra costituisce la sede dei tubi contenenti il PCM che vengono inseriti negli appositi fori. Nella parte inferiore della piastra sono saldati dei tubi di altezza 300 mm che costituiscono la sede dei tubi contenenti l'alluminio. È opportuno che ci sia un certo gioco tra le sedi e i tubi stessi per permettere eventuali dilatazioni e per garantire sempre la corretta estrazione degli stessi.

Gli spazi tra le sedi dei tubi vengono riempiti con del materiale refrattario in modo tale che la piastra forata non sia a diretto contatto con i fumi: in questo modo si preserva la piastra dalle alte temperature e dall'azione corrosiva dei fumi. Il materiale refrattario ha un'ulteriore funzione, quella di proteggere la parte vuota dei tubi dai fumi. I tubi, infatti, vengono appoggiati sulla piastra forata: la parte contenente l'alluminio di altezza pari a 3 m è a diretto contatto con i fumi per l'assorbimento e la cessione di calore, la parte vuota invece è protetta dal materiale refrattario. In questo modo si evitano eventuali fusioni della parte superiore dei tubi stessi. Per evitare possibili inflessioni della struttura e garantirne la tenuta, sulla parte superiore della piastra forata vengono saldate delle piastre sia nella direzione longitudinale che in quella trasversale.

Le nervature di tenuta presentano uno spessore di 20 mm e un'altezza di 120 mm e vengono posizionate ogni tre tubi ad una distanza di 150 mm l'una dall'altra.

L'intera struttura è progettata in modo da garantire la massima semplicità costruttiva e di inserimento nella settling chamber. Le quattro travi IPE, su cui poggia la piastra forata, vengono appoggiate direttamente sul tetto della camera di sedimentazione, unica parte a dover essere opportunamente modificata per l'inserimento dell'apparato.

Allegato 3

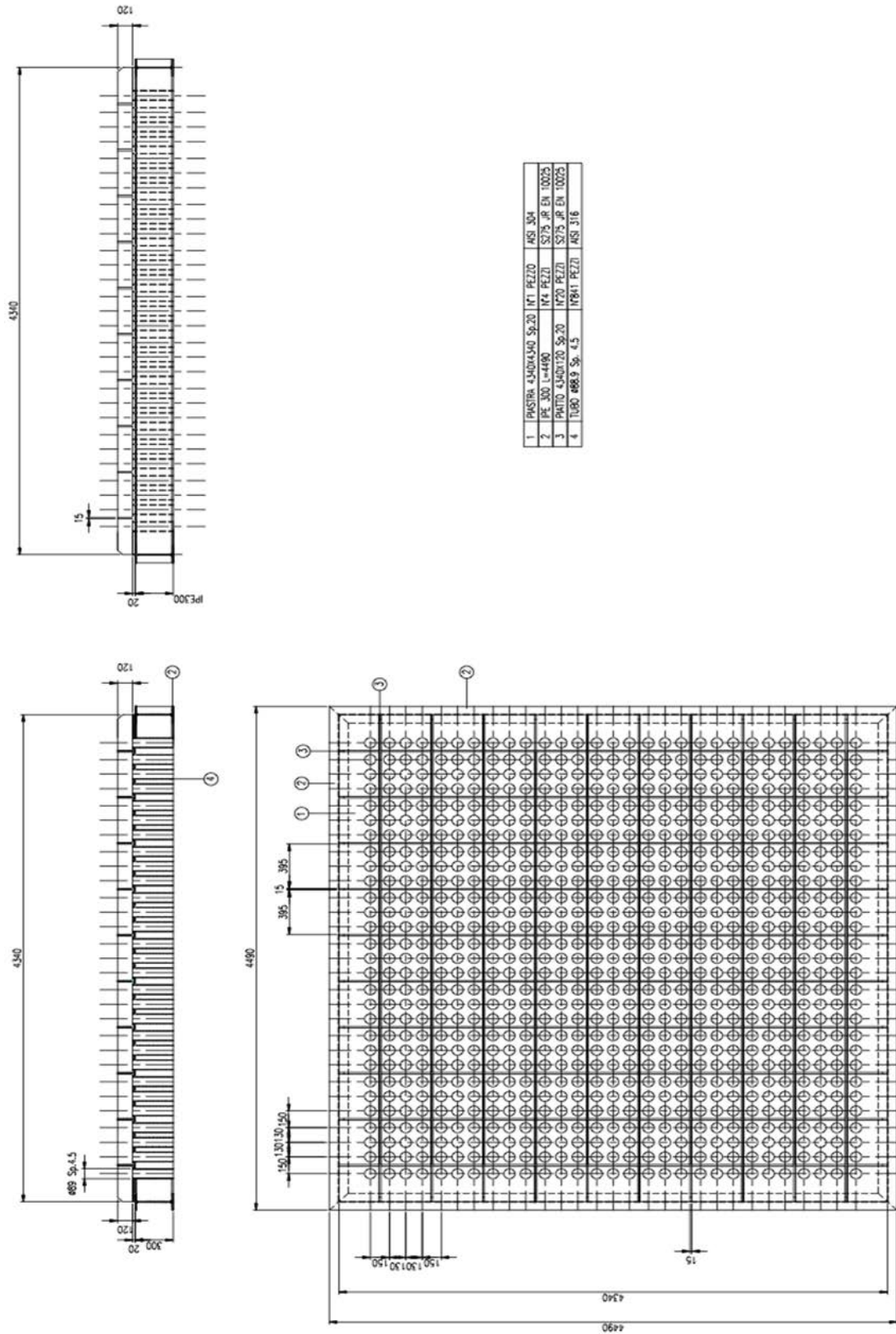


Figura 175 - Possibile struttura di supporto tubi.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

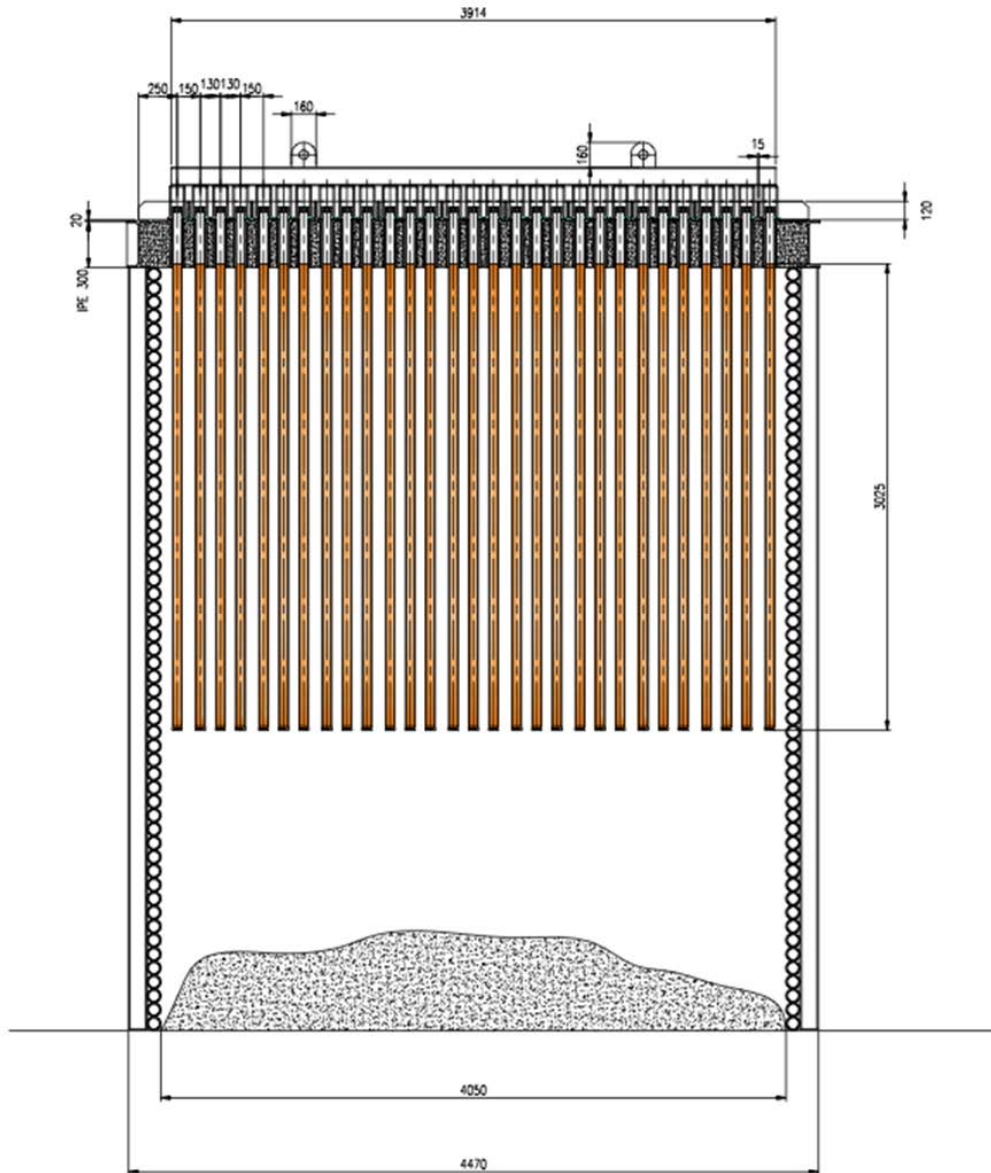


Figura 176 - Vista laterale dei tubi all'interno della settling chamber e dimensioni della struttura di supporto.

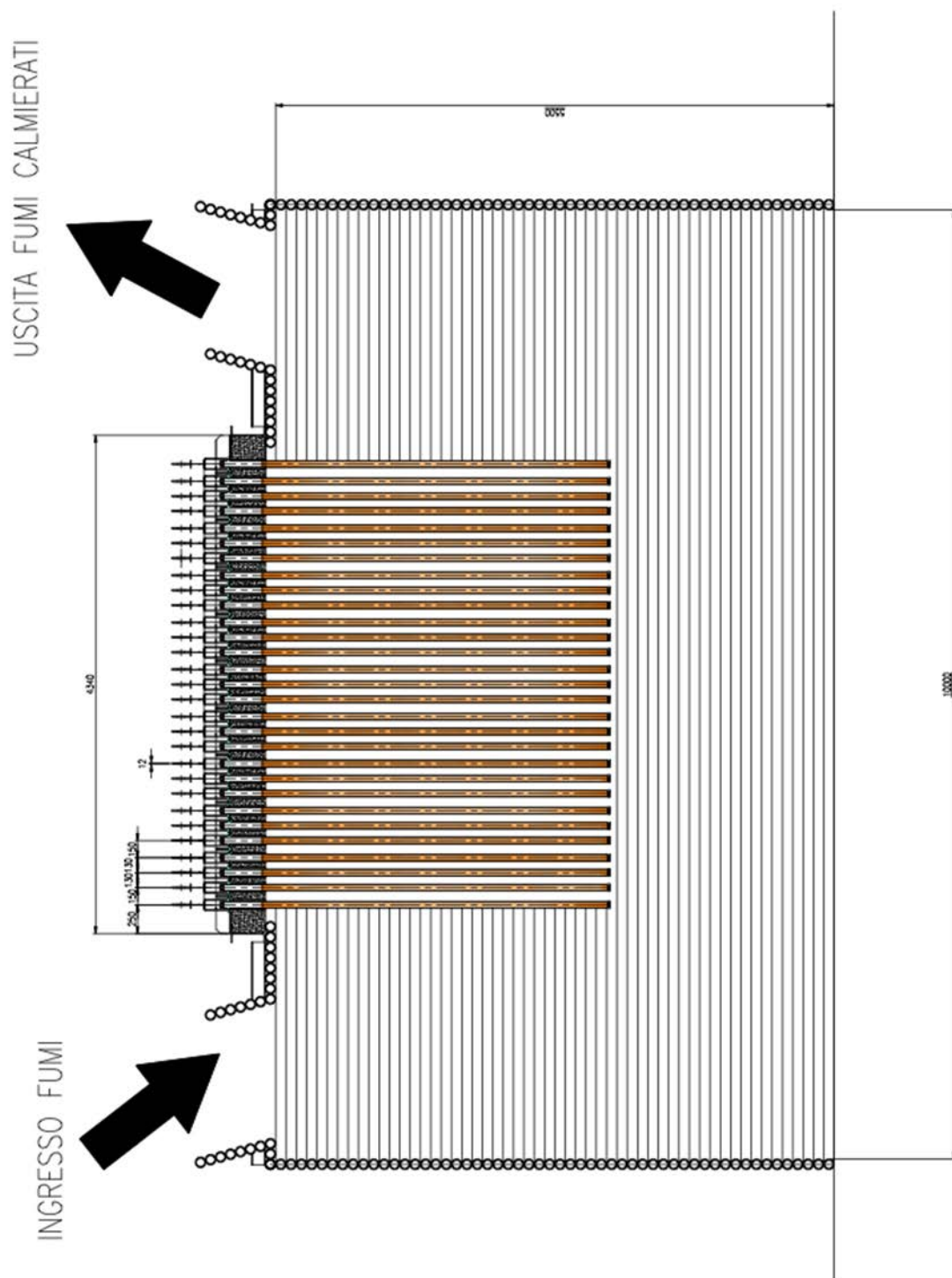


Figura 177 - Vista frontale dei tubi all'interno della settling chamber e dimensioni della struttura di supporto.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

#### 11.3.3.1 Analisi della struttura di supporto

La struttura di supporto tubi viene analizzata mediante simulazione grazie al programma Autodesk Inventor 2010. Viene definita la geometria Figura 178 e viene effettuata l'analisi statica.

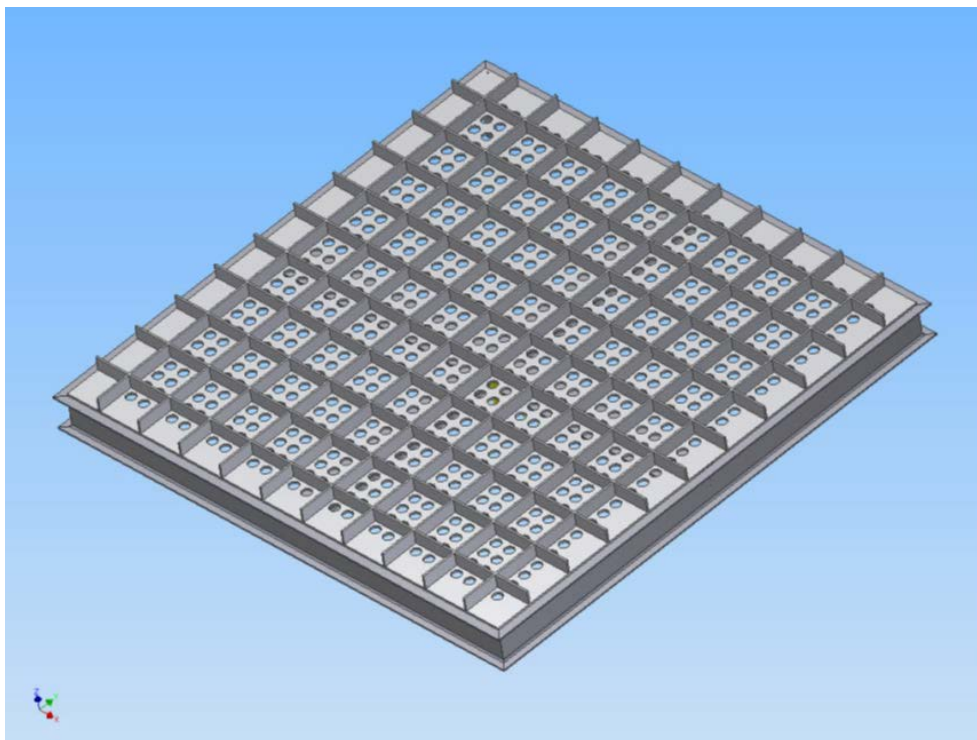


Figura 178 - Definizione geometrica struttura di supporto tubi.

Si riassumono la procedura e i risultati ottenuti mediante le simulazioni.

#### **Obiettivo generale e impostazioni**

Obiettivo di progetto	Punto singolo
Tipo simulazione	Analisi statica
Dimensione media elemento (frazione del diametro modello)	0,1
Dimensione minima elemento (frazione della dimensione media)	0,2
Fattore di gradazione	1,5
Angolo di rotazione	massimo 60 gr

Allegato 3

**Materiale/i**

Nome	Acciaio	
Generale	Densità della massa	7,85 g/cm <sup>3</sup>
	Resistenza allo snervamento	207 MPa
	Resistenza massima a trazione	345 MPa
Sollecitazione	Modulo di Young	210 GPa
	Coefficiente di Poisson	0,3
	Modulo a taglio	0 GPa
Sollecitazione termica	Coefficiente di espansione	0,0000000012 su/°C
	Conducibilità termica	56 W/( m K )
	Calore specifico	460 J/( kg °C )
Nome/i parte	PIATTO Skeleton0001 DIN IPE 300 0000001 DIN IPE 300 0000002 DIN IPE 300 0000003 DIN IPE 300 0000004	
Nome	Acciaio dolce	
Generale	Densità della massa 248,264 MPa	7,86 g/cm <sup>3</sup>
	Resistenza allo snervamento	207 MPa
	Resistenza massima a trazione	345 MPa
Sollecitazione	Modulo di Young	220 GPa
	Coefficiente di Poisson	0,275 su
	Modulo a taglio	86,2745 GPa
Sollecitazione termica	Coefficiente di espansione	0,0000000012 su/°C
	Conducibilità termica	56 W/( m K )
	Calore specifico	460 J/( kg °C )
Nome/i parte	DIN IPE 300 00000005 DIN IPE 300 00000006	
Nome	Default	
Generale	Densità della massa	1 g/cm <sup>3</sup>
	Resistenza allo snervamento	0 MPa
	Resistenza massima a trazione	0 MPa
Sollecitazione	Modulo di Young	0 GPa
	Coefficiente di Poisson	0 su
	Modulo a taglio	0 GPa
Sollecitazione termica	Coefficiente di espansione	0 su/°C
	Conducibilità termica	0 W/( m K )
	Calore specifico	0 J/( kg °C )
Nome/i parte	rinforzo.ipt	

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

**Pressione (Figura 179):**

Tipo carico	Pressione
Intensità	-0.028 MPa

**Vincolo di fissaggio (Figura 179):**

Tipo vincolo	Vincolo di fissaggio
--------------	----------------------

**Risultati**

- Forza di reazione e momento su vincoli:

Nome vincolo	Forza di reazione		Momento di reazione	
	Intensità	Componente (X,Y,Z)	Intensità	Componente (X,Y,Z)
Vincolo di fissaggio	395520 N	11,6629 N	112,706 N m	-8,4359 N m
		-38,959 N		47,6077 N m
		395520 N		101,808 N m

	Minimo	Massimo
Volume	565392000 mm <sup>3</sup>	
Massa	4645,49 kg	
Sollecitazione di Von Mises	0,000820859 MPa	421,921 MPa
Prima sollecitazione principale	-128,522 MPa	258,034 MPa
Terza sollecitazione principale	-467,912 MPa	90,8314 MPa
Spostamento	0 mm	1,04283 mm
Fattore di sicurezza	0,490613 su	15 su
Sollecitazione XX	-156,532 MPa	123,649 MPa
Sollecitazione XY	-168,476 MPa	97,188 MPa
Sollecitazione XZ	-190,905 MPa	178,833 MPa
Sollecitazione YY	-253,249 MPa	132,915 MPa
Sollecitazione YZ	-211,852 MPa	183,37 MPa
Sollecitazione ZZ	-248,264 MPa	198,711 MPa
Spostamento X	-0,139389 mm	0,137005 mm
Spostamento Y	-0,124361 mm	0,154305 mm
Spostamento Z	-1,04271 mm	0,074951 mm
Deformazione equivalente	0,00000000392743 su	0,00174287 su
Prima deformazione principale	-0,00000570231 su	0,00123559 su
Terza deformazione principale	-0,0019124 su	0,0000107208 su
Deformazione XX	-0,00054524 su	0,000401675 su
Deformazione XY	-0,000976397 su	0,000563249 su
Deformazione XZ	-0,00118179 su	0,00110706 su
Deformazione YY	-0,000668331 su	0,000383846 su
Deformazione YZ	-0,00122778 su	0,00113515 su
Deformazione ZZ	-0,000737219 su	0,000630916 su



Allegato 3

	<b>Minimo</b>	<b>Massimo</b>
Pressione di contatto	0 MPa	1661,77 MPa
Pressione di contatto X	-814,995 MPa	1268,44 MPa
Pressione di contatto Y	-340,165 MPa	1070,42 MPa
Pressione di contatto Z	-175,083 MPa	155,581 MPa

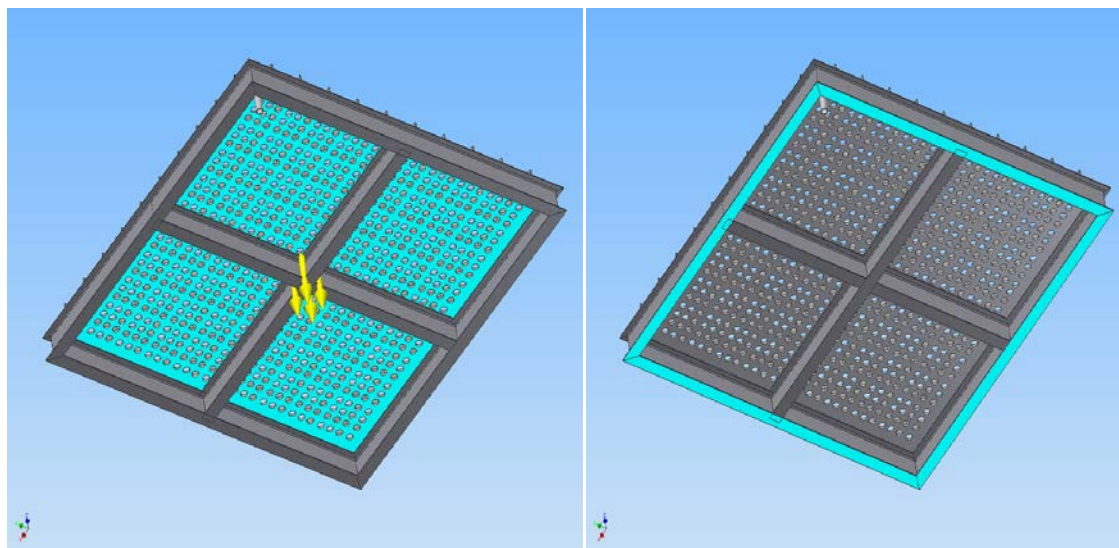


Figura 179 - Imposizione carico (figura a sinistra); Imposizione vincolo (figura a destra).

Si riportano i risultati delle simulazioni effettuate per quanto riguarda il fattore di sicurezza, lo spostamento [mm] e la sollecitazione di Von Mises [MPa] nella Figura 180, Figura 181 e Figura 182.

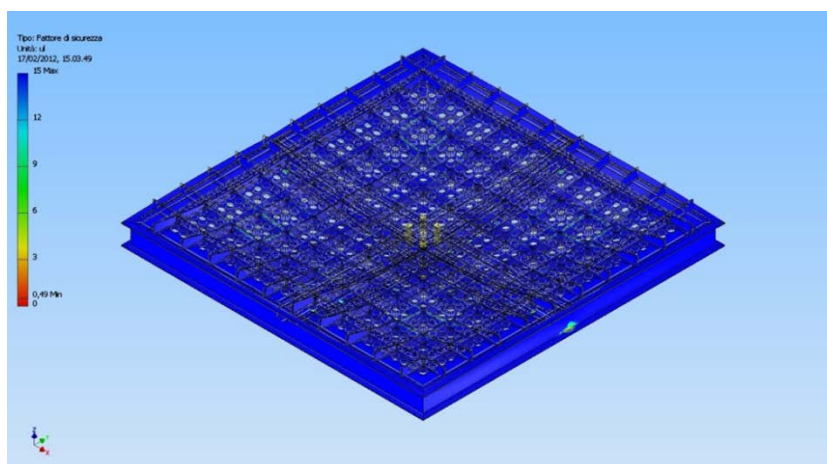


Figura 180 - Fattore di sicurezza.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

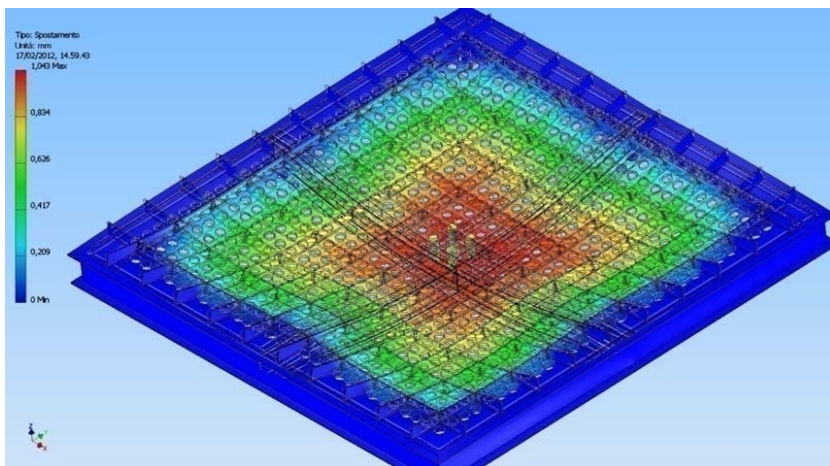


Figura 181 - Spostamento.

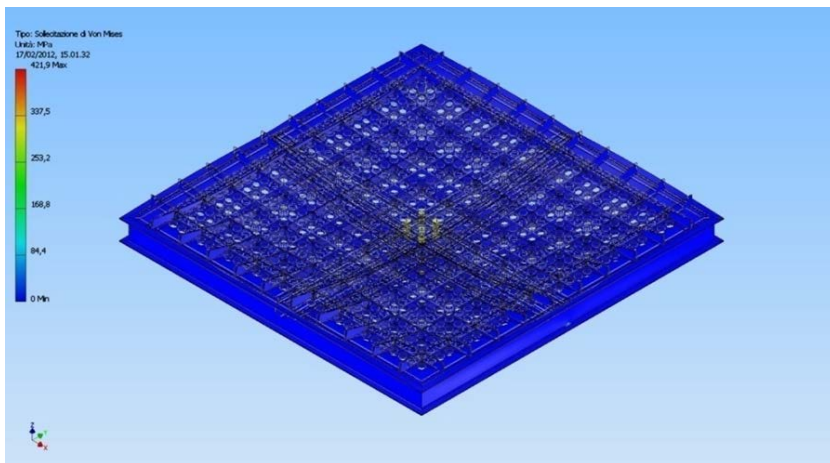


Figura 182 - Sollecitazione Von Mises.

## 11.4 ALLEGATO 4 - ANALISI DELLE TENSIONI E DELLE DEFORMAZIONI IN UN TUBO DI ACCIAIO CONTENENTE UN NUCLEO DI ALLUMINIO E SOGGETTO A VARIAZIONI TERMICHE

Si analizza l'andamento delle sollecitazioni nel sistema costituito da un tubo in acciaio contenente un nucleo cilindrico di alluminio, soggetto a variazioni di temperatura che portano a fusione il nucleo d'alluminio (Figura 183).

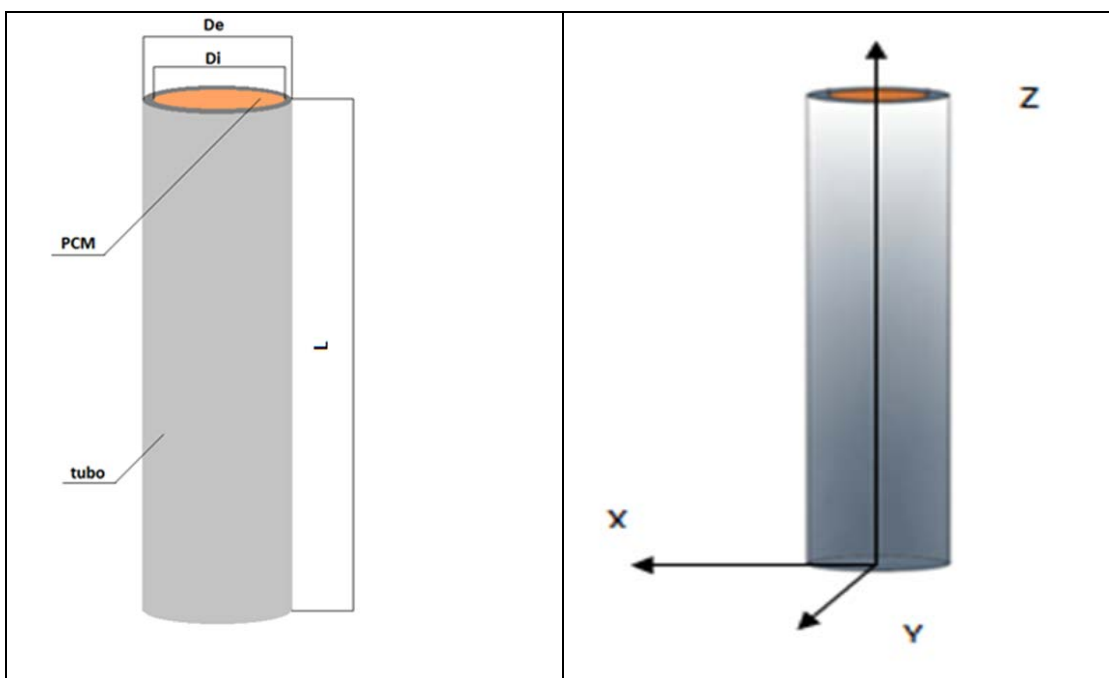


Figura 183 - Tubo di acciaio contenente nucleo cilindrico di alluminio e con sistema di riferimento  $\{X, Y, Z\}$  (a destra).

Si indicano con  $R_i$  e  $R_e$  i raggi interno ed esterno del tubo in acciaio a temperatura ambiente  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ , e con  $h = R_e - R_i$  lo spessore del tubo. Si assume che la lunghezza  $L$  del tubo sia molto maggiore del diametro  $D_e = 2 R_e$ .

Si introduce un sistema di riferimento ortogonale  $\{X, Y, Z\}$  con l'asse  $Z$  (direzione longitudinale) coincidente con l'asse del cilindro in modo che la sezione del cilindro giaccia sul piano trasversale  $X$ - $Y$ ; l'origine viene fissata nel centro della sezione (Figura 183, a destra).

Si introduce inoltre un sistema di coordinate cilindriche  $\{r, \varphi, z\}$  tale che:

$$\begin{aligned}
 X &= r \cos(\varphi) \\
 Y &= r \sin(\varphi) \\
 z &= Z
 \end{aligned}
 \tag{140}$$

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Gli spostamenti, espressi rispetto ai versori del sistema di coordinate cilindriche, verranno indicati con:

- $u_r$ : spostamento radiale,
- $u_c$ : spostamento circonferenziale,
- $u_z$ : spostamento assiale (o longitudinale).

Si ipotizza che:

- Il cilindro sia infinitamente lungo;
- Le azioni esterne siano limitate a una variazione uniforme di temperatura;
- Il materiale abbia comportamento elasto-plastico isotropo dipendente dalla temperatura.

### a) CINEMATICA

Sotto tali ipotesi, ogni piano trasversale è piano di simmetria rispetto alla coordinata  $Z$  e pertanto tensioni e deformazioni non dipendono da tale coordinata. Gli spostamenti longitudinali dipendono solo da  $Z$  e le sezioni del cilindro rimangono piane. Inoltre, essendo il problema assialsimmetrico, gli spostamenti circonferenziali sono nulli e gli spostamenti radiali dipendono solo dalla coordinata radiale  $r$ .

In definitiva:

$$(141) \quad \begin{aligned} u_r &= \hat{u}_r(r) \\ u_c &= 0 \\ u_z &= \hat{u}_z(z) \end{aligned}$$

Di conseguenza, le deformazioni rispetto ai versori del sistema di coordinate cilindriche hanno la forma:

$$(142) \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_r(r) & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_c(r) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

dove:

$$(143) \quad \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du_r}{dr} \equiv u_r' \\ \varepsilon_c &= \frac{u_r}{r} \\ \varepsilon_z &= \frac{du_z}{dz} = cost \end{aligned}$$

Si precisa che ciò vale a distanza opportuna, stimabile in un diametro, dagli estremi del cilindro, non essendo in realtà il cilindro infinitamente lungo.

**b) MECCANICA**

Il tensore degli sforzi, rispetto ai versori delle coordinate cilindriche, avrà necessariamente la struttura:

$$(144) \quad \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_r(r) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_c(r) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z(z) \end{bmatrix}$$

e le equazione indefinite di equilibrio non banalmente soddisfatte sono:

$$(145) \quad \frac{d(r\sigma_r)}{dr} - \sigma_c = 0 \rightarrow r\sigma_r' + \sigma_r - \sigma_c = 0$$

e:

$$(146) \quad \frac{d}{dz} \sigma_z = 0$$

Si osservi che, per quanto riguarda la tensione assiale  $\sigma_z$ , affinché l'equazione di equilibrio sia soddisfatta è sufficiente che  $\sigma_z$  sia costante rispetto a  $z$ . Il fatto che  $\sigma_z$  non dipenda da  $r$ , eccezione fatta per la discontinuità nell'interfaccia alluminio acciaio, discende dalle condizioni di simmetria assiale. Se non sono applicate forze esterne longitudinali agli estremi del cilindro, la risultante  $\int_{sez} \sigma_z dA$  sull'intera sezione sarà nulla. Indicato con  $\sigma_{az}$  il valore di  $\sigma_z$  nel nucleo in alluminio e con  $\sigma_{sz}$  quello nel tubo in acciaio, la condizione diventa:

$$(147) \quad \sigma_{az} S_a + \sigma_{sz} S_s = 0$$

essendo  $S_a = \pi R_i^2$  e  $S_s = \pi(R_e^2 - R_i^2)$  le aree della sezione di alluminio ed acciaio rispettivamente.

**c) MATERIALI**

In generale, i materiali metallici manifestano un comportamento essenzialmente elasto-plastico fino alla temperatura di  $0,5 T_m$ , con  $T_m$  la temperatura di fusione in Kelvin. Ovviamente anche per temperature inferiori a  $0,5 T_m$  le caratteristiche meccaniche, quali ad esempio il modulo elastico  $E$ , il coefficiente di espansione termica lineare  $\alpha$  e la tensione di snervamento  $\sigma_y$  variano con la temperatura.

Per temperature superiori il comportamento è elastico-plastico-viscoso, con la componente viscosa sempre più importante all'avvicinarsi della temperatura di fusione, raggiunta la quale il metallo diventa un fluido viscoso.

- Acciaio

Per l'acciaio  $T_m \sim 273 + 1500 = 1773$  K e pertanto si può assumere un comportamento elasto-plastico fino a circa  $700$  °C. In questo lavoro estenderemo il comportamento elasto-plastico dell'acciaio in tutto l'intervallo di lavoro ignorando gli effetti differiti nel tempo della viscosità. Per un acciaio inox austenitico tipo AISI 316, la dipendenza delle caratteristiche materiali dalla temperatura  $T$  è riportata nella Tabella 69 [79].

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Tabella 69 - Proprietà termiche e strutturali dell'acciaio inox AISI 316. Fonte: [79].

T [K]	E [GPa]	$\nu$	$\sigma_y$ [MPa]	$\alpha \times 10^6$ K <sup>-1</sup>
300	194.18	0.27	206.85	15.156
400	188.49		167.49	16.051
500	182.02		143.38	16.933
600	174.29		128.64	17.511
700	166.17		121.36	17.946
800	157.96		117.62	18.297
900	148.63		112.52	18.592
1000	136.50		102.99	18.847

Si noti che il rapporto di Poisson  $\nu$  rimane costante. La tensione di snervamento a temperatura ambiente,  $\sigma_y \approx 207$  MPa sembra eccessivamente bassa, rispetto a quanto indicato da altre fonti. Ad esempio il sito *MatWeb* fornisce il valore di 290 MPa. Esistono comunque alcune migliaia di acciai inox con tensioni di snervamento a temperatura ambiente che vanno dai 140 ai 1800 MPa [80]. A partire dai dati in tabella si assumono le seguenti correlazioni analitiche:

$$(148) \quad E = 205,91 - 2,6913 \cdot 10^{-2}T - 4,1876 \cdot 10^{-5}T^2$$

$$(149) \quad \sigma_y = 448,69 - 1,193T + 1,4787 \cdot 10^{-3}T^2 - 6,3134 \cdot 10^{-7}T^3$$

$$(150) \quad \alpha = 11,813 + 1,3106 \cdot 10^{-2}T - 6,1375 \cdot 10^{-6}T^2.$$

- Alluminio

Per l'alluminio  $T_m \sim 273 + 600 = 900$  K pertanto si può assumere che fino a 450 K  $\equiv 177$  °C il comportamento sia elasto-plastico. Per quanto riguarda il modulo elastico E, che incidentalmente per l'alluminio coincide con il modulo elastico di volume  $\kappa$  in quanto il rapporto di Poisson vale circa 1/3, si assume  $E = 73$  GPa costante in tutto il range di temperature. In effetti, i risultati sperimentali [81] indicano che il modulo  $\kappa$  alla temperatura di 300 K vale 75 GPa mentre a 850 K vale 72 GPa. Nell'articolo citato sono riportati anche i valori del coefficiente di espansione termica volumetrico che aumenta in modo sensibilmente lineare con la temperatura. In particolare,  $\alpha_v = 6,978 \cdot 10^{-5} K^{-1}$  a 300 K e  $\alpha_v = 10,77 \cdot 10^{-5} K^{-1}$  a 850 K, assumeremo per il coefficiente di espansione termica lineare  $\alpha$  (che vale un terzo di quello volumetrico) la correlazione

$$(151) \quad \alpha = \frac{1}{3} \left( 6,978 + (10,77 - 6,978) \frac{T - 300}{850 - 300} \right) \cdot 10^{-5}$$

Per un alluminio della serie 2000,2011-T3 la tensione di snervamento, calcolata per una deformazione permanente convenzionale dello 0,2%, al variare della temperatura viene riportato in Tabella 70.

Tabella 70 - Tensione di snervamento per alluminio serie 2000,2011-T3. Fonte: [81].

T [°C]	$\sigma_y$ [MPa]
24	296
100	234
149	131
204	76
260	26
316	12
371	10

Le tensioni di rottura sono di 310 MPa a 20 °C e 16 MPa a 371 °C e i relativi allungamenti sono del 15% e del 125% rispettivamente.

**d) ANALISI IN FASE ELASTICA**

- Equazioni costitutive

Assumendo un comportamento elastico, isotropo e lineare del materiale, la tensione e la parte elastica della deformazione sono legati dall'equazione:

$$(152) \quad \boldsymbol{\varepsilon}^{el} = \frac{1 + \nu}{E} \boldsymbol{\sigma} - \frac{\nu}{E} (\boldsymbol{\sigma} : \mathbf{I}) \mathbf{I}$$

dove  $\mathbf{I}$  è il tensore identità, E il modulo di Young e  $\nu$  il rapporto di Poisson, diversi per l'alluminio e l'acciaio. In componenti cilindriche:

$$(153) \quad \begin{aligned} \varepsilon_r^{el} &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_c + \sigma_z)] \\ \varepsilon_c^{el} &= \frac{1}{E} [\sigma_c - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z^{el} &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_c)] \end{aligned}$$

La deformazione totale in termoelasticità lineare è la somma della deformazione elastica e di quella termica:

$$(154) \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{el} + \alpha \Delta T \mathbf{I}$$

essendo  $\alpha$  il coefficiente di dilatazione termica lineare e  $\Delta T$  la variazione di temperatura rispetto alla configurazione di riferimento. In componenti:

$$(155) \quad \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_c + \sigma_z)] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_c &= \frac{1}{E} [\sigma_c - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_c)] + \alpha \Delta T \end{aligned}$$

Invertendo si ottiene:

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

$$(156) \quad \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{(1+\nu)(1+2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_r + \nu\varepsilon_c + \nu\varepsilon_z - \alpha(1-\nu)\Delta T] \\ \sigma_r &= \frac{E}{(1+\nu)(1+2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_r + \nu\varepsilon_c + \nu\varepsilon_z - \alpha(1-\nu)\Delta T] \\ \sigma_r &= \frac{E}{(1+\nu)(1+2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_r + \nu\varepsilon_c + \nu\varepsilon_z - \alpha(1-\nu)\Delta T] \end{aligned}$$

Inoltre dalla 4.13 essendo  $\varepsilon_z$ ,  $\sigma_z$  e  $\Delta T$  costanti rispetto ad  $r$ , eccezion fatta per la discontinuità attraverso l'interfaccia alluminio-acciaio, si deduce che la quantità  $\sigma_r + \sigma_c$  è costante rispetto a  $r$ .

- Equazioni di equilibrio elastico

Inserendo le equazioni costitutive (156) nell'equazione indefinita di equilibrio (145),

$$(157) \quad r\sigma_r' + \sigma_r - \sigma_c = 0$$

e utilizzando le equazioni di congruenza (143) si ottiene l'equazione differenziale dell'equilibrio elastico (eq. di Cauchy):

$$(158) \quad \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (ru_r) \right] = 0$$

nell'unica incognita  $u_r(r)$ , che ha soluzione generale:

$$(159) \quad u_{ar} = Ar + \frac{B}{r}$$

essendo A, B due costanti da determinarsi mediante l'imposizione delle condizioni al contorno. interessante osservare che l'equazione dell'equilibrio elastico è la stessa che si ottiene nel caso di tubi soggetti a pressione interna e/o esterna senza variazioni termiche.

Siccome i materiali coinvolti sono due, alluminio (a) e acciaio (s), e per ognuno di questi vale l'equazione (4.18), si avranno due soluzioni differenti:

$$(160) \quad u_{ar} = A_a r + \frac{B_a}{r}$$

per il nucleo in alluminio, e:

$$(161) \quad u_{sr} = A_s r + \frac{B_s}{r}$$

per il tubo in acciaio. Le 4 costanti si determinano imponendo le 2 condizioni di raccordo:

$$(162) \quad \begin{aligned} u_{ar}(R_i) &= u_{sr}(R_i) \\ \sigma_{ar}(R_i) &= \sigma_{sr}(R_i) \end{aligned}$$

all'interfaccia alluminio-acciaio e le 2 condizioni al contorno:

$$(163) \quad \sigma_{sr}(R_e) = 0$$



#### Allegato 4

$$u_{ar}(0) = 0$$

Dalla due condizioni cinematiche (4.22 e 4.23) si ricava:

$$(164) \quad \begin{aligned} B_a &= 0 \\ A_a &= A_s + \frac{B_s}{R_i^2} \end{aligned}$$

e dalla (163):

$$(165) \quad (1 - \nu_s) \left( A_s - \frac{B_s}{R_e^2} \right) + \nu \cdot \left( A_s + \frac{B_s}{R_e^2} \right) + \nu_s \cdot \varepsilon_z - \alpha_s \cdot (1 + \nu_s) \cdot \Delta T = 0$$

si ottiene:

$$(166) \quad \frac{B_s}{R_e^2} = -\alpha_s \cdot \frac{(1 + \nu_s)}{2\nu_s} \cdot \Delta T - \frac{\varepsilon_z}{2} - \frac{A_s}{2\nu_s}$$

Si osservi che la linearità dello spostamento radiale nel nucleo di alluminio implica che:

$$(167) \quad \epsilon_{ar} = \epsilon_{ac} = A_s + \frac{B_s}{R_i^2}$$

e, di conseguenza

$$(168) \quad \sigma_{ar} = \sigma_{ac} = \frac{E_a}{(1 + \nu_a)(1 - 2\nu_a)} \left[ A_s + \frac{B_s}{R_i^2} + \nu_a \varepsilon_z - \alpha_a \cdot (1 + \nu_a) \cdot \Delta T \right]$$

In definitiva rimangono da soddisfare 3 equazioni:

$$(169) \quad \begin{aligned} \sigma_{sr}(R_e) &= 0 \\ \sigma_{ar}(R_i) - \sigma_{sr}(R_i) &= 0 \\ \sigma_{az}S_a - \sigma_{sz}S_s &= 0 \end{aligned}$$

nelle tre incognite  $A_s$ ,  $B_s$  ed  $\varepsilon_z$  le cui soluzioni hanno espressione simbolica troppo lunga (o non siamo riusciti a semplificarle opportunamente) per essere qui riportate. Riportiamo invece i coefficienti di tali equazioni poste nella forma  $K_{ij}x_j = b_i$ , avendo posto  $x_1 = A_s$ ,  $x_2 = B_s$ ,  $x_3 = \varepsilon_z$ .

$$(170) \quad K_{11} = 1$$

$$K_{12} = -\frac{1 - 2\nu_s}{R_e^2}$$

$$K_{13} = \nu_s$$

$$K_{21} = \frac{E_s}{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)} - \frac{E_a}{(1 + \nu_a)(1 - 2\nu_a)}$$

$$K_{22} = -\frac{1}{R_i^2} \left( \frac{E_s}{(1 + \nu_s)} - \frac{E_a}{(1 + \nu_a)(1 - 2\nu_a)} \right)$$

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

$$K_{23} = \left( \frac{E_s v_s}{(1 + v_s)(1 - 2v_s)} - \frac{E_a v_a}{(1 + v_a)(1 - 2v_a)} \right)$$

$$K_{31} = 2 \cdot \left( \frac{E_s (R_e^2 - R_i^2) v_s}{(1 + v_s)(1 - 2v_s)} - \frac{E_a R_i^2 v_a}{(1 + v_a)(1 - 2v_a)} \right)$$

$$K_{32} = 2 \cdot \frac{E_a v_a}{(1 + v_a)(1 - 2v_a)}$$

$$K_{33} = \frac{E_s (R_e^2 - R_i^2)(1 - v_s)}{(1 + v_s)(1 - 2v_s)} + \frac{E_a (1 - v_a) R_i^2}{(1 + v_a)(1 - 2v_a)}$$

$$b_1 = E_s \alpha_s (1 + v_s) \cdot \Delta T$$

$$b_2 = \frac{E_s \alpha_s (1 - 2v_a) - E_a \alpha_a (1 - 2v_s)}{(1 - 2v_a)(1 - 2v_s)} \cdot \Delta T$$

$$b_2 = \frac{E_s \alpha_s (R_e^2 - R_i^2)}{(1 - 2v_s)} + \frac{E_a \alpha_a R_i^2}{(1 - 2v_a)} \cdot \Delta T$$

- Sperimentazione numerica

Indichiamo con  $\sigma_{s,id} = |\sigma_{sc}(R_i) - \sigma_{sr}(R_i)|$  la tensione ideale secondo Tresca sulla superficie interna del tubo in acciaio e con  $\sigma_{a,id} = |\sigma_{ac} - \sigma_{az}|$  la tensione ideale nel nucleo in alluminio (uniforme).

Assumendo un tubo in acciaio con diametro esterno  $D_e = 60$  mm e spessore  $h = 4$  mm, al variare della temperatura, e nell'ipotesi che i materiali rimangano in campo elastico, si ottengono i valori di stress ideale riportati in Tabella 71.

Tabella 71- Valori di stress ideali per tubo acciaio ( $D_e$  60 mm, spessore = 4 mm) in funzione della temperatura.

T [°C]	$\sigma_{a,id}$ [MPa]	$\sigma_{s,id}$ [MPa]
50	4.7	54.5
100	14.8	170.5
150	26.4	301
200	39.5	447
250	54	607
300	70	782

Si osservi che alla temperatura di 250 °C lo stress ideale nell'alluminio vale 54 MPa, valore ben superiore a quello di snervamento che a 250 °C è circa 35 MPa. Pertanto a una temperatura compresa tra i 200 e 250 °C si ha la plasticizzazione del nucleo in alluminio. Alla stessa temperatura l'acciaio è soggetto ad una tensione ideale di 607 MPa superiore a quella di snervamento di gran parte degli inossidabili. Utilizzando un inox 316, già a 150 °C viene abbondantemente superata la tensione di

snervamento. Cambiando le dimensioni geometriche del tubo, i risultati cambiano poco e in particolare le variazioni di tensione nell'acciaio sono irrilevanti.

**e) ANALISI CON IL NUCLEO DI ALLUMINIO IN FASE PLASTICA**

A temperature superiori ai 250 °C circa l'alluminio, pur essendo ancora abbondantemente nello stato solido, ha una tensione di snervamento  $\sigma_{ay}$  drasticamente ridotta rispetto a quella iniziale e pertanto, considerate le tensioni in gioco si trova sicuramente nello stato plastico. Inoltre la parte idrostatica dello stress (alla quale si suppone l'alluminio resista indefinitamente) è nettamente prevalente rispetto alla parte deviatorica. In altri termini:

$$(171) \quad \sigma_a = \begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p + \Delta\sigma_z \end{bmatrix}$$

dove  $p$  è la pressione idrostatica nell'alluminio, e  $\Delta\sigma_z = \sigma_z - p$ . A 400 °C, dovendo essere  $|\Delta\sigma_z| \leq \sigma_{ya} < 10$  MPa, mentre la pressione  $p$  già in fase elastica aveva raggiunto i 100 MPa, la parte del tensore degli sforzi si può ritenere trascurabile rispetto alla parte idrostatica.

Si determina pertanto la soluzione del problema nell'ipotesi che lo stress nell'alluminio sia idrostatico, e che l'alluminio risponda elasticamente alle compressioni idrostatiche secondo la legge:

$$(172) \quad \frac{\Delta V}{V} = -\frac{p}{k_a} + 3\alpha_a \cdot \Delta T$$

dove:

$$(173) \quad k_a = \frac{E_a}{3 \cdot (1 - 2\nu_a)}$$

è il modulo di elasticità di volume (bulk modulus) e  $3\alpha_a \cdot \Delta T$  è la variazione relativa di volume dovuta all'aumento di temperatura  $\Delta T$ . Il volume in configurazione deformata di uno spezzone del cilindro interno di alluminio di lunghezza iniziale unitaria, risulta:

$$(174) \quad v = (1 + \varepsilon_z)\pi(R_i + u_r(R_i))^2 = \pi R_i^2(1 + \varepsilon_z) \left(1 + \frac{u_r(R_i)}{R_i}\right)^2 \approx V(1 + \varepsilon_z + 2\varepsilon_{ic})$$

ovvero:

$$(175) \quad \frac{\Delta V}{V} = -\frac{v - V}{V} = \varepsilon_z + 2\varepsilon_{ic}$$

essendo:

$$(176) \quad \varepsilon_{ic} = -\frac{u_{sr}(R_i)}{R_i}$$

la deformazione circonferenziale del tubo in acciaio sulla superficie interna. Eguagliando la variazione relativa di volume del nucleo in alluminio con l'espressione si ottiene:

$$(177) \quad \varepsilon_z + 2\varepsilon_{ic} = -\frac{p}{k_a} + 3\alpha_a \cdot \Delta T$$

La soluzione generale nei termini dello spostamento radiale del tubo in acciaio è ancora del tipo:

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

$$(178) \quad u_{sr} = A_s r + \frac{B_s}{r}$$

Calcolando da questi le deformazioni e quindi tramite le equazioni costitutive (assumendo che l'acciaio sia ancora in fase elastica) lo stress radiale e circonferenziale nel tubo e imponendo le condizioni:

$$(179) \quad \begin{aligned} \sigma_r(R_e) &= 0 \\ \sigma_r(R_i) &= -p \end{aligned}$$

si ottiene:

$$(180) \quad \begin{aligned} \sigma_{sr} &= -p R_i^2 \frac{r^2 - R_e^2}{r^2 (R_e^2 - R_i^2)} \\ \sigma_{sc} &= +p R_i^2 \frac{r^2 + R_e^2}{r^2 (R_e^2 - R_i^2)} \\ \sigma_{sz} &= E_s (\varepsilon_z - \alpha_s \cdot \Delta T) + 2p \nu_s \frac{R_i^2}{(R_e^2 - R_i^2)} \end{aligned}$$

Esplicitando  $\varepsilon_z$  rispetto a  $p$  dalla (177) e sostituendo tale espressione in (180) si ottiene  $\sigma_{sz}$  in funzione della sola pressione nel nucleo di alluminio. Inserendo tale espressione nell'equazione di equilibrio longitudinale:

$$(181) \quad \sigma_{sz} \pi (R_e^2 - R_i^2) = p \pi R_i^2$$

Si ottiene infine la pressione nel nucleo in alluminio in funzione della variazione di temperatura, della geometria e delle caratteristiche materiali

$$(182) \quad p = \frac{3k_a(\alpha_a - \alpha_s)\Delta T}{1 + \frac{k_a}{E_s(R_e^2 - R_i^2)}(3R_i^2(1 - 2\nu_s) + 2R_e^2(1 - \nu_s))}$$

Una volta calcolata la pressione nel nucleo, le tensioni circonferenziali sulla superficie interna  $\sigma_{sc}^-$  e su quella esterna ( $\sigma_{sc}^+$ ) e la tensione longitudinale  $\sigma_{sz}$  del tubo in acciaio risultano:

$$(183) \quad \begin{aligned} \sigma_{sc}^- &= p \frac{(R_e^2 + R_i^2)}{(R_e^2 - R_i^2)} \\ \sigma_{sc}^+ &= p \frac{(2R_i^2)}{(R_e^2 - R_i^2)} < \sigma_{sc}^- \\ \sigma_{sz} &= p \frac{(R_i^2)}{(R_e^2 - R_i^2)} = \frac{\sigma_{sc}^+}{2} \end{aligned}$$

tutte di trazione.

La tensione massima ideale nell'acciaio, valutata secondo il criterio di Tresca, risulta pertanto:

$$(184) \quad \sigma_{id} = \sigma_{sc}^- + p = 2p \left( 1 - \left( \frac{R_i}{R_e} \right)^2 \right)^{-1}$$

In particolare con  $R_e = 30$  mm,  $R_i = 26$  mm si ottiene:

$$(185) \quad \sigma_{sc}^- \approx 7p$$

## Allegato 4

$$\sigma_{sc}^+ \approx 6p$$

$$\sigma_{sz} \approx 3p$$

$$\sigma_{id} \approx 8p$$

- Sperimentazione numerica

Il punto del tubo in acciaio più sollecitato è sulla parete interna. Qui agisce la pressione idrostatica del nucleo in alluminio, la tensione circonferenziale massima di trazione  $\sigma_{sc} = \sigma_{sc}(R_i)$  e la tensione longitudinale  $\sigma_{sz}$ . La tensione ideale secondo il criterio di Tresca è uguale alla la somma aritmetica di  $\sigma_{sc}$  e  $p$ , ed è sempre maggiore di  $\sigma_{sc}$ .

Per un tubo in acciaio con diametro esterno  $D_e = 60$  mm e spessore  $h = 4$  mm, al variare della temperatura, e nell'ipotesi che l'alluminio sia in campo plastico e l'acciaio in campo elastico, si ottengono i valori riportati in Tabella 72.

Tabella 72 - Valori di stress per tubo acciaio ( $D_e = 60$  mm, spessore = 4 mm) in funzione della temperatura.

T [°C]	p [MPa]	$\sigma_{sc}$ [MPa]	$\sigma_{sz}$ [MPa]
150	42	296	127
200	62	436	187
250	84	590	253
300	108	758	325
400	161	1131	485

Si osservi che l'acciaio, a meno che non sia di varietà speciali con tensioni di snervamento molto elevate, già a 250 °C è probabilmente plasticizzato. Per l'acciaio AISI 316 considerato lo snervamento avviene a temperature inferiori a 150 °C, come già evidenziato dall'analisi elastica.

### **f) ANALISI CON IL NUCLEO DI ALLUMINIO E TUBO IN ACCIAIO INTERAMENTE PLASTICIZZATI**

Indicata con  $\bar{\sigma}_c$  la tensione media circonferenziale, l'equilibrio in direzione radiale richiede che:

$$(186) \quad \bar{\sigma}_c h = p R_i \rightarrow \bar{\sigma}_c = \frac{p R_i}{h}$$

mentre l'equilibrio in direzione trasversale richiede che:

$$(187) \quad \bar{\sigma}_{zy}(R_e^2 - R_i^2) = p R_i^2 \rightarrow \bar{\sigma}_{zy} \approx \frac{p R_i}{2h} = \frac{\bar{\sigma}_c}{2}$$

Pertanto lo stress in componenti cilindriche sulla parete interna del tubo risulta:

$$(188) \quad \bar{\sigma} = p \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_i}{h} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_i}{2h} \end{bmatrix}$$

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

e la corrispondente tensione ideale secondo Tresca:

$$(189) \quad \sigma_{id} = p \left( 1 + \frac{R_i}{h} \right)$$

Eguagliando la tensione ideale con la tensione di snervamento  $\sigma_y(T)$  dell'acciaio a temperatura T si ottiene la pressione nel nucleo di alluminio che produce lo snervamento dell'acciaio:

$$(190) \quad p_y = \frac{\sigma_y(T)}{\left( 1 + \frac{R_i}{h} \right)}$$

Ad esempio per l'acciaio 316 alla temperatura di 250 °C la tensione di snervamento vale 139 MPa e pertanto  $p_y = 18.53$  MPa.

Una volta plasticizzato l'acciaio, se il comportamento fosse perfettamente plastico, la pressione nel nucleo in alluminio rimarrebbe costante e l'unico effetto sarebbe quello dello scorrimento plastico circonferenziale e longitudinale nel tubo di acciaio. In realtà gli acciai inox hanno comportamento marcatamente incrudente fino ad alte temperature per cui la pressione continuerà ad aumentare anche in fase plastica, ma sempre meno. In fase plastica, la resistenza o meno del tubo in acciaio è determinata esclusivamente dalla deformazione. Tra gli acciai inox vi sono materiali estremamente duttili con deformazioni di rottura a temperatura ambiente superiori al 15-20%. All'aumentare della temperatura le deformazioni ultime tendono ad aumentare.

La deformazione circonferenziale  $\bar{\epsilon}_c$  media nel tubo al netto dell'effetto dovuto all'espansione termica dell'acciaio è maggiorata dalla deformazione relativa all'espansione libera del nucleo di alluminio:

$$(191) \quad \bar{\epsilon}_c < (\alpha_a - \alpha_s) \cdot \Delta T$$

assumendo:

$$(192) \quad (\alpha_a - \alpha_s) = 7 \times 10^{-6}$$

Per una variazione di 500 °C, risulta:

$$(193) \quad \bar{\epsilon}_c < 3,5 \cdot 10^{-3} = 0,35\%$$

valore estremamente modesto, che un qualsiasi acciaio inox è in grado di sopportare senza problemi, specialmente a temperature superiori a quella ambiente.

## **11.5 ALLEGATO 5 - STIMA COSTO APPARATO A PCM DI TIPO PASSIVO**

Il modello realizzativo proposto del differitore termico passivo a PCM (come esposto in Allegato 3) viene analizzato dal punto di vista economico: viene fatto un preventivo dell'apparato considerando sia la struttura di supporto, sia quella di sollevamento tubi. In questo modo si può quantificare l'investimento che un'acciaieria debba effettuare per la calmierazione dei fumi. I conti non includono i dischi di ceramica posizionati all'estremità inferiore dei tubi, il materiale refrattario di isolamento tubi, il trasporto, l'installazione dell'apparato e il collaudo finale. Viene invece presa in considerazione la manodopera necessaria alla realizzazione dell'apparato.

La stima del costo di un impianto simile risulta piuttosto complessa sia per le dinamiche chimico-fisiche cui è soggetto e che potrebbero dar luogo a delle difficoltà pratiche nella costruzione, sia per la natura aleatoria a cui sono soggetti i prezzi della materia prima da sempre e soprattutto in questo particolare momento storico caratterizzato da una costante variazione dei prezzi.

Il preventivo dell'apparato a PCM può essere fatto in base a diverse modalità. Si può considerare il cliente finale dotato di una struttura che gli permetta di approvvigionarsi dei componenti necessari e di eseguire tutte le lavorazioni e le installazioni richieste; oppure si considera che il cliente si appoggi a un fornitore esterno che realizzi le varie parti dell'impianto a esclusione del montaggio finale, effettuato dalla produzione interna del cliente o da squadre esterne specializzate. In ogni caso la realizzazione dell'apparato richiede un'alta professionalità dell'esecutore. In particolare la saldatura dell'acciaio inox e la saldatura a tenuta necessitano che il ciclo sia controllato in ogni sua fase e che siano fatti i controlli necessari per garantire la tenuta stagna, come prove radiografiche, liquidi penetranti etc. Di conseguenza l'azienda che realizza tale apparato deve essere in possesso di strumentazione idonea per effettuare tali operazioni. L'azienda esecutrice deve anche garantire la piena tracciabilità dei materiali. E' naturale quindi che anche dal punto di vista economico l'impatto sia diverso tra un'azienda che abbia tali requisiti rispetto a una che ne è priva o che comunque li abbia solo in parte. La scelta della modalità di preventivazione è stata fatta quindi pensando a un terzista specializzato che realizzi le varie parti dell'apparato, mentre il montaggio e il collaudo finale vengono realizzati dal cliente finale o da una squadra specializzata.

La preventivazione dell'apparato è stata inoltre realizzata nell'ottica di contenere il più possibile i costi.

Le considerazioni sulla realizzazione impiantistica dell'apparato e i valori per stimare la spesa dell'apparato sono stati forniti dall'ing. S. Canta di *Mangiarotti S.p.A.* in provincia di Udine [67].

La tabella 1 riporta dettagliatamente i particolari costruttivi, il peso e i costi dei singoli componenti dell'apparato.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

### 11.5.1 COSTO MATERIALI

TUBO																								
Pos	Descrizione	Materiale	Dimensioni [mm]	kg/pz	kg	€/kg	pz	€/pz	€															
1	Tondo per fondo	AISI 316	60,3*10	0,22	187	3,2	841		597															
2	Tubo	AISI 316	60,3*3,9 l=3300	17,10	14381	3,2	841		46020															
3	Anello di appoggio	AISI 316	120*120*12	1,10	925	3,2	841		2960															
4	Tondo per tappo	AISI 316	60*30	0,67	560	3,2	841		1792															
5	Piatto	AISI 316	500*40*10	1,57	1322	3,2	841		4231															
<b>Costo materiale tubo</b>									<b>55600</b>															
<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>TONDO PER FONDO #60 Sp.10</td> <td>AISI 316</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>TUBO #60 Sp.4 l=3352</td> <td>AISI 316</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>ANELLO DI APPOGGIO 120x120 Sp.12</td> <td>AISI 316</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>TONDO PER TAPPO #60 Sp.30</td> <td>AISI 316</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>PIATTO 500x40 Sp.10</td> <td>AISI 316</td> </tr> </table> <p>The drawing shows a vertical tube assembly. Component 1 is the bottom flange with a diameter of 60 mm and a thickness of 10 mm. Component 2 is the main tube with an outer diameter of 60.3 mm, a wall thickness of 3.9 mm, and a length of 3352 mm. Component 3 is a support ring with a diameter of 120 mm and a thickness of 12 mm. Component 4 is a stopper ring with a diameter of 60 mm and a thickness of 30 mm. Component 5 is a top plate with a diameter of 500 mm, a thickness of 40 mm, and a length of 10 mm. The drawing also shows a detail of the top plate with a hole of diameter 12 mm and a distance of 40 mm from the edge.</p>										1	TONDO PER FONDO #60 Sp.10	AISI 316	2	TUBO #60 Sp.4 l=3352	AISI 316	3	ANELLO DI APPOGGIO 120x120 Sp.12	AISI 316	4	TONDO PER TAPPO #60 Sp.30	AISI 316	5	PIATTO 500x40 Sp.10	AISI 316
1	TONDO PER FONDO #60 Sp.10	AISI 316																						
2	TUBO #60 Sp.4 l=3352	AISI 316																						
3	ANELLO DI APPOGGIO 120x120 Sp.12	AISI 316																						
4	TONDO PER TAPPO #60 Sp.30	AISI 316																						
5	PIATTO 500x40 Sp.10	AISI 316																						

DISCO DI MATERIALE ISOLANTE INTERNO AL TUBO									
Pos	Descrizione	Materiale	Dimensioni [mm]	kg/pz	kg	€/kg	pz	€/pz	€
1	Tondo		52*15					841	
<p>The drawing shows a circular insulating disc with a diameter of 52 mm and a thickness of 15 mm.</p>									



Allegato 5

LAMA DI SOLLEVAMENTO									
Pos	Descrizione	Materiale	Dimensioni [mm]	kg/pz	kg	€/kg	pz	€/pz	€
1	pie 120	S275JR	3914	43,83	1271	0,93	29		1182
2	Piatto	S275JR	160*160*12	2,41	140	0,93	58		130
<b>Costo materiale lama di sollevamento</b>									<b>1312</b>

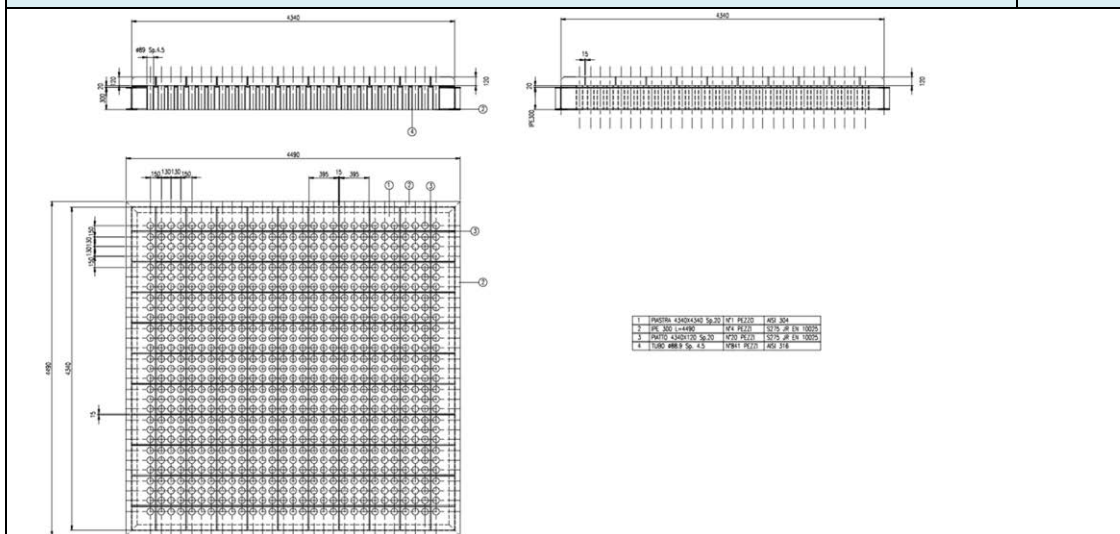
  

1	IPE 120 L=3914	N°29 PEZZI	S275 JR EN 10025
2	PIATTO 160X160 Sp. 12	N°58 PEZZI	S275 JR EN 10025

MATERIALE REFRATTARIO									
Pos	Descrizione	Materiale	Dimensioni [mm]	kg/pz	kg	€/kg	pz	€/pz	€

STRUTTURA DI SUPPORTO									
Pos	Descrizione	Materiale	Dimensioni [mm]	kg/pz	kg	€/kg	pz	€/pz	€
1	Piastra	AISI 304	4340*4340*20	2961,00	2961	4,8	1		14213
2	Ipe 300	S275JR	4490	243,00	972	0,93	4		904
3	Piatto	S275JR	4340*120*20	112,80	2256	0,93	20		2098
4	Tube	AISI 316	d.88,9*4	2,52	2119	3,4	841		7206
<b>Costo materiale struttura di supporto</b>									<b>24421</b>



Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

DISPOSITIVI DI FISSAGGIO PER SOLLEVAMENTO TUBI									
Pos	Descrizione	Materiale	Dimensioni [mm]	kg/pz	kg	€/kg	pz	€/pz	€
1	bullone classe 10.9 UNI 5587	M10*40							
	vite	M10*40				1682	0,2	336	
	dado	M10				1682	0,2	336	
<b>Costo viteria</b>									<b>672</b>

MATERIALE PER ABBATTIMENTO FUMI									
Pos	Descrizione	Materiale	Dimensioni [mm]	kg/pz	kg	€/kg	pz	€/pz	€
1	Tondo non tollerato	Al (anticorodal)	3000*50	17,00			841	74	62234
<b>Costo tondo non tollerato</b>									<b>62234</b>

### 11.5.2 COSTO MANODOPERA

MANODOPERA					
	pz	tempo stimato		€/ora	€
		min	ore		
<b>TUBO COMPLETO</b>	841	25	350	37	<b>12965</b>
<b>LAMA DI SOLLEVAMENTO</b> Ipe+piatti			150	37	<b>5550</b>
<b>STRUTTURA DI SUPPORTO</b> piastra+ipe+piatto+tubo			205	37	<b>7585</b>
<b>COSTO TOTALE MANODOPERA</b>				<b>€</b>	<b>26100</b>

**11.5.3 Costo complessivo di realizzazione dell'apparato**

Molto probabilmente lo spessore del tondo per tappo del tubo dovrà essere aumentato per favorire l'invito per la saldatura.

Si precisa che la saldatura dei piatti di rinforzo potrebbe essere un serio problema dato che potrebbe deformare la piastra di sostegno. Bisognerà quindi provvedere in sede di progettazione e realizzazione ad aumentare lo spessore della piastra di sostegno.

Il prezzo della lama di sollevamento viene stimato pensando all'esecuzione del foro filettato sul piatto e a IPE asolata. Eseguire il foro filettato su entrambi i componenti in accoppiamento richiederebbe la lavorazione meccanica in alesatrice che aumenterebbe notevolmente i costi.

Il materiale utilizzato per le sedi dei tubi è l'acciaio AISI 316, tuttavia potrebbe essere impiegato l'acciaio tipo S355JO date le buone caratteristiche alle alte temperature e il basso costo.

Il riempimento dei tubi mediante alluminio può essere realizzato in vari modi: riempimento con alluminio fuso, riempimento a gocce. La soluzione migliore e meno costosa è però quella di ordinare alluminio puro al 98% in barre, che verranno poi opportunamente tagliate e inserite all'interno dei tubi. Questa soluzione riduce notevolmente i costi di approvvigionamento dell'alluminio e allo stesso tempo permette un facile ed economico inserimento dello stesso nei tubi.

In tabella viene riassunto il costo totale di realizzazione dell'apparato relativo comprensivo anche di margine aziendale (posto pari al 20%).

<b>Totale 1 - Costo Materiale e Manodopera</b>	<b>€</b>	<b>170.340</b>
<b>Totale 2 - Costo complessivo di margine aziendale del 20%</b>	<b>€</b>	<b>212.925</b>



## 11.6 ALLEGATO 6 - PREVENTIVO IMPIANTO DI RECUPERO E PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

### 11.6.1 Costo caldaia di recupero

La caldaia di recupero è del tipo 11.026/GVR - W.H.R.B. - 49 t/h - 400 °C - 40 bar.

Il preventivo è stato fornito da R. Galleri di *Neoterm S.r.l.* di Varese [68].

11.026/GVR - W.H.R.B. - 49 t/h - 400 °C - 40 bar		
POS.	DESCRIZIONE	NETTO [€]
1	Recuperatore (Parti in pressione & Casing) e Piping intercollegamento	INCLUSO
2	Camera Radiante (Pareti Water wall % Liner Sic 90) per ca 100 m2	INCLUSO
3	Ingegneria & Documentazione (progetto) Legge 1086	INCLUSO
4	Tramogge raccolta polveri	INCLUSO
5	Condotti IN/OUT	ESCLUSI
6	Rivestiment Isol-Refrattari	INCLUSO
7	Giunti tessili Ingresso / Uscita	ESCLUSO
8	Scale e passerelle di servizio, struttura di supporto caldaia	INCLUSO
9	Strumentazione	INCLUSO
10	Montaggio pari in pressione presso luogo di installazione	INCLUSO
11	Montaggi elettrostrumentali	INCLUSO
12	Coibentazioni e Rivestimento Caldaia	INCLUSO
13	Tracciature elettriche strumenti in campo	INCLUSO
14	Valvole a doppio clapet scarico polveri	INCLUSO
15	Impianto di pulizia Superfici ad aria compressa e percussori	INCLUSO
16	Trasporti e mezzi sollevamento per posa su fondazioni e montaggi	INCLUSO
17	Commissioning & Start Up Recuperatore	INCLUSO
<b>PREZZO TOTALE (I.V.A. Esclusa)</b>		<b>7.800.000</b>

Sono inclusi: inspection & test (ped); le opere civili; i trasporti; i limiti di fornitura.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

Sono invece esclusi: il ciclo termico (Degasatore, pompe alimento, Turbo-alternatore, ecc); il sistema di controllo (d.c.s. o altro).

#### **11.6.2 Costo turbogeneratore, condensatore, torri evaporative, degasatore, demineralizzatore**

Lo studio e l'offerta sono state fatte in collaborazione con il sig. Maieron di *Gemini Industriale* (PN) [69].

<b>TURBO-GRUPPO</b>		
<b>POS.</b>	<b>DESCRIZIONE</b>	<b>PREZZO</b>
1	TURBINA DE PRETTO MANN (potenza nominale 11,5 MWe)	INCLUSO
2	CONDENSATORE ACQUA (27-35°C a 0,08 bar)	INCLUSO
3	DEGASATORE	INCLUSO
4	TORRI EVAPORATIVE	INCLUSO
5	DEMINERALIZZATORE (2 t/h)	INCLUSO
6	MONTAGGIO	INCLUSO
<b>PREZZO TOTALE</b>		<b>5.000.000</b>

<b>VARIE (Costi aggiuntivi)</b>		
<b>POS.</b>	<b>DESCRIZIONE</b>	<b>PREZZO [€]</b>
1	ACCESSORI	INCLUSO
2	QUADRISTICA ELETTRICA	INCLUSO
3	OPERE EDILI	INCLUSO
<b>PREZZO TOTALE</b>		<b>1.000.000</b>

**11.6.3 Costo totale impianto di recupero e produzione energia**

La spesa complessiva per l'impianto di recupero e produzione di energia elettrica è:

<b>PREZZO TOTALE [€]</b>	<b>13.800.000</b>
--------------------------	-------------------

Si riporta in figura il turbogeneratore indagato.

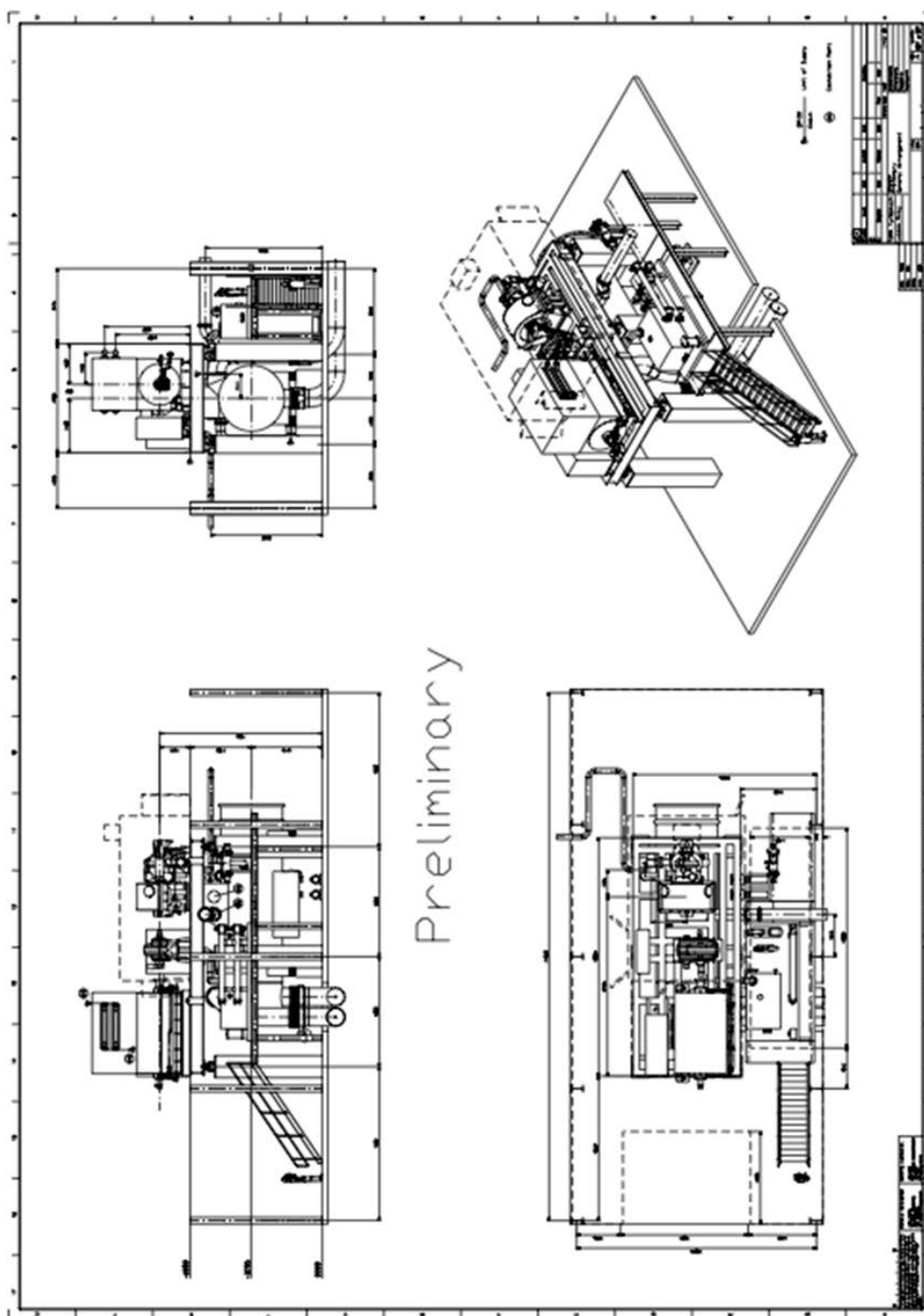


Figura 184 - Turbogeneratore. Fonte: [69].





## 11.7 ALLEGATO 7 - CARATTERISTICHE TECNICHE E PREVENTIVO DI SPESA DEL FILTRO A MANICHE

Nei paragrafi 8.4÷8.7 viene affrontato il tema dei filtri a maniche per mettere a confronto tipologie e costi ei casi di un impianto a linee separate (stato B1) o a circuito unico (stato B2).

Di seguito si riportano i dettagli descrittivi e le valutazioni economiche effettuate grazie alla collaborazione del sig. Marco Mittone di *Progetto Carpenteria Manzanese S.r.l.* [70].

### 11.7.1 Filtri a maniche

La tabella 1 riporta le principali caratteristiche tecniche dei filtri a maniche per diverse lunghezze delle singole maniche, in particolare per L=7000 mm, L=5000 mm e L=3000 mm.

Tabella 73 - Caratteristiche tecniche filtri a maniche. Fonte: [70].

DESCRIZIONE	U.M.	Filtro maniche L=7000 mm	Filtro maniche L=5000 mm	Filtro maniche L=3000 mm
Lunghezza	mm	12600	12600	12600
Larghezza	mm	2500	2500	2500
Altezza (comprensiva di parapetti superiori)	mm	13500	11400	9300
Numero maniche e cestelli	-	720	720	720
Diametro singola manica	mm	160	160	160
Lunghezza singola manica	mm	7000	5000	3000
Superficie filtrante totale	m <sup>2</sup>	2532	1808	1085
Velocità di filtrazione teorica* (da costruttore)	m/s	0,0167÷0,0416	0,0167÷0,0416	0,0167÷0,0416
Portata teorica	m <sup>3</sup> /h	152224÷379192	108697÷270766	65230÷162490
<b>Portata nominale con v=0,022 m/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>	<b>200534</b>	<b>143193</b>	<b>85932</b>
Portata nominale con v=0,027 m/s	m <sup>3</sup> /h	-	175738	105462
Portata nominale con v=0,035 m/s	m <sup>3</sup> /h	-	-	136710

\* velocità teorica di filtrazione assunta sia per il tessuto in NOMEX che per il poliestere.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

La Tabella 73 riporta il preventivo di spesa per un filtro a maniche composto da 5 moduli per un totale di 720 maniche. Il preventivo viene fatto per le tre lunghezze delle maniche come sopra descritte e per due diversi tipi di materiali, CORTEN e acciaio zincato. Il CORTEN è senza dubbio più costoso dell'acciaio zincato, ma è anche il materiale maggiormente utilizzato per questi tipi di filtri.

Tabella 74 - Preventivo di spesa filtri a maniche. Fonte: [70].

DESCRIZIONE	MATERIALE	
	CORTEN	Acciaio zincato
Filtro a maniche composto da 5 moduli per un totale di 720 maniche, pannellature e profili strutturali verniciati, cestelli di sostegno maniche con dispositivo venturi, sistema di pulizia ad aria compressa, coclea di estrazione materiale completa e valvola rotante con relative motorizzazioni, condotte a sezione scalare di entrata/uscita e accessori vari		
Prezzo n°1 filtro con maniche L=7000 mm	145.000 €	133.900 €
<b>Prezzo n°1 filtro con maniche L=5000 mm</b>	<b>132.000 €</b>	<b>121.050 €</b>
Prezzo n°1 filtro con maniche L=3000 mm	119.850 €	109.300 €

La Tabella 75 riporta il preventivo di spesa per il tessuto del filtro composto sempre da 5 moduli e 720 maniche. Anche in questo caso vengono considerate le tre diverse lunghezze delle maniche e due tipi di tessuto, il NOMEX e il poliestere. Il poliestere risulta molto economico rispetto al NOMEX, ma presenta una minore efficienza di captazione; viene quindi utilizzato per fumi con bassa polverosità.

Tabella 75 - Preventivo di spesa per tessuto filtri a maniche. Fonte: [70].

DESCRIZIONE	TESSUTO	
	NOMEX	Poliestere
<b>Maniche filtranti Ø160</b>		
Prezzo n°720 maniche L=7000 mm	524.00 €	149.50 €
<b>Prezzo n°720 maniche L=5000 mm</b>	<b>388.00 €</b>	<b>116.00 €</b>
Prezzo n°720 maniche L=3000 mm	252.00 €	8.600 €

In Tabella 76 viene riportata la spesa per il montaggio e per l'eventuale trasporto del filtro a maniche per le tre lunghezze considerate. Risulta chiaro che la spesa di montaggio aumenta all'aumentare della lunghezza delle maniche.

Tabella 76 - Spesa per trasporto e montaggio. Fonte: [70].

DESCRIZIONE	Trasporto e Montaggio
Trasporto** e montaggio filtro maniche L=7000 mm	18.700 €
<b>Montaggio filtro maniche L=5000 mm</b>	<b>17.500 €</b>
Montaggio filtro maniche L=3000 mm	16.300 €

**11.7.2 Scelta filtri nello stato A**

L'impianto tradizionale prevede un filtro composto da 5 moduli per un totale di 720 maniche caratterizzato da lunghezza della singola manica pari a 5000 mm e velocità di attraversamento di 0,022 m/s. La portata nominale  $Q_n$  risulta quindi pari a 143193 m<sup>3</sup>/h.

Tabella 77 - Scelta filtro a maniche - STATO A.

DESCRIZIONE	Filtro maniche L=5000mm	
	Lunghezza	12600
Larghezza	2500	mm
Altezza (comprensiva di parapetti superiori)	11400	mm
Numero maniche e cestelli	720	-
Diametro singola manica	160	mm
Lunghezza singola manica	5000	mm
Superficie filtrante totale	1808	m <sup>2</sup>
Velocità di filtrazione teorica* (da costruttore)	0,0167÷0,0416	m/s
Portata teorica	108697÷270766	m <sup>3</sup> /h
Portata nominale con v=0,022 m/s	143193	m <sup>3</sup> /h

Si tratta di un filtro in CORTEN con tessuto NOMEX. Il preventivo di spesa, che comprende il materiale, il tessuto e il montaggio del filtro, viene riportato in Tabella 78. Vengono riportati anche i prezzi a modulo installato.

Tabella 78 - Scelta del filtro e preventivo per moduli - STATO A.

MATERIALE - CORTEN	
Prezzo n°1 filtro con maniche L=5000 mm	132.000 €
Prezzo n°1 filtro al modulo	26.400 €
TESSUTO - NOMEX Maniche filtranti Ø160	
Prezzo n°720 maniche L=5000 mm	38.800 €
Prezzo maniche al modulo	7.760 €
VARIE	
Montaggio filtro maniche L=5000 mm	17.500 €
Montaggio filtro al modulo	3.500 €

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
 Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

La massima portata reale dell'impianto tradizionale all'ingresso del filtro  $Q_4$  (punto 4 di Figura 135) è pari a 2000000 m<sup>3</sup>/h. Quindi il numero di moduli  $M$  risulta (per arrotondamento)::

$$(194) \quad M = \frac{Q_4}{Q_n} \cdot 5 = 70$$

con 5 il numero di moduli del filtro. Il numero totale di maniche  $N$  sarà pari a:

$$(195) \quad N = M \cdot 144 = 10080$$

dove 144 è il numero di maniche per modulo.

La spesa per il filtro quindi viene riportata in tabella 7:

Tabella 79 - Preventivo totale di spesa del filtro - STATO A.

<b>MATERIALE CORTEN</b>	
Prezzo n°1 filtro con maniche L=5000 mm	1.848.000 €
<b>TESSUTO NOMEX Maniche filtranti Ø160</b>	
Prezzo n°10080 maniche, L=5000 mm	543.200 €
<b>MONTAGGIO</b>	
Montaggio filtro maniche L=5000 mm	245.000 €
<b>TOTALE DI SPESA FILTRO</b>	<b>2.636.200 €</b>

### 11.7.3 Stato B1

#### 11.7.3.1 Linea primaria

Per quanto riguarda il nuovo impianto a linee separate si decide di mantenere sulla linea primaria un filtro in CORTEN con tessuto NOMEX data l'elevata polverosità dei fumi. Il filtro scelto è sempre caratterizzato da lunghezza della singola manica di 5000 mm, velocità di attraversamento di 0,022 m/s e portata nominale  $Q_n$  di 143193 m<sup>3</sup>/h. Si calcola il numero di moduli  $M$  e il numero totale di maniche del filtro del primario. La massima portata reale dell'impianto all'ingresso del filtro  $Q_2$  (punto 4 di Figura 162) è pari a 289000 m<sup>3</sup>/h. Quindi il numero di moduli  $M$  risulta (per arrotondamento):

$$(196) \quad M = \frac{Q_2}{Q_n} \cdot 5 = 10$$

con 5 il numero di moduli del filtro. Il numero totale di maniche  $N$  sarà pari a:

$$(197) \quad N = M \cdot 144 = 1440$$

con 144 il numero di maniche per modulo. La spesa per il filtro quindi viene riportata in Tabella 80.

Tabella 80 - Preventivo spesa filtro linea primaria - STATO B1

<b>MATERIALE - CORTEN</b>	
Prezzo n°1 filtro con maniche L=5000 mm al	264.000 €
<b>TESSUTO - NOMEX Maniche filtranti Ø160</b>	
Prezzo n°1440 maniche L=5000 mm	77.600 €
<b>VARIE</b>	
Montaggio filtro maniche L=5000 mm	35.000 €
<b>TOTALE DI SPESA FILTRO linea primaria- B1</b>	<b>376.600 €</b>

### 11.7.3.2 Linea secondaria

Per quanto invece riguarda la linea secondaria, essendo la polverosità notevolmente minore rispetto al primario ed essendo le temperature attorno ai 100 °C, si sceglie di inserire un filtro in CORTEN con tessuto in poliestere.

Tabella 81 - Scelta del filtro e preventivo per moduli nella linea secondaria - STATO B1

<b>MATERIALE - CORTEN</b>	
Prezzo n°1 filtro con maniche L=5000 mm	132.000 €
Prezzo n°1 filtro al modulo	26.400 €
<b>TESSUTO - Poliestere Maniche filtranti Ø160</b>	
Prezzo n°720 maniche L=5000 mm	11.600 €
Prezzo maniche al modulo	2.320 €
<b>VARIE</b>	
Montaggio filtro maniche L=5000 mm	17.500 €
Montaggio filtro al modulo	3.500 €

Il filtro scelto è sempre caratterizzato da lunghezza della singola manica di 5000 mm, velocità di attraversamento di 0,022 m/s e portata nominale  $Q_n$  di 143193 m<sup>3</sup>/h.

Si calcola il numero di moduli M ed il numero totale di maniche del filtro del secondario. La massima portata reale dell'impianto all'ingresso del filtro  $Q_3$  (punto 3 di Figura 162) è pari a 1850000 m<sup>3</sup>/h. Quindi il numero di moduli M risulta (per arrotondamento):

$$(198) \quad M = \frac{Q_2}{Q_n} \cdot 5 = 65$$

con 5 il numero di moduli del filtro. Il numero totale di maniche N sarà pari a:

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

$$(199) \quad N = M \cdot 144 = 9360$$

con 144 il numero di maniche per modulo. La spesa per il filtro quindi viene riportata in Tabella 82.

Tabella 82 - Preventivo spesa filtro linea secondaria - STATO B1

<b>MATERIALE - CORTEN</b>	
Prezzo n°1 filtro con maniche L=5000 mm al	1.716.000€
<b>TESSUTO - Poliestere</b> Maniche filtranti Ø160	
Prezzo n°9360 maniche L=5000 mm	150.800 €
<b>VARIE</b>	
Montaggio filtro maniche L=5000 mm	227.500 €
<b>TOTALE DI SPESA FILTRO linea secondaria - B1</b>	<b>2.094.300 €</b>

#### 11.7.3.3 Preventivo totale di spesa del filtro nello STATO B1

La spesa totale che si ha per i due filtri della linea primaria e secondaria separate è di:

<b>TOTALE DI SPESA FILTRO - B1</b>	<b>2.470.900 €</b>
------------------------------------	--------------------

#### 11.7.4 Stato B2

Il nuovo impianto di trattamento fumi a ciclo unico prevede un filtro composto da 5 moduli per un totale di 720 maniche caratterizzato da lunghezza della singola manica pari a 5000 mm e velocità di attraversamento di 0,022 m/s. La portata nominale  $Q_n$  risulta quindi pari a 143193 m<sup>3</sup>/h. Come per l'impianto tradizionale si tratta di un filtro in CORTEN con tessuto NOMEX. Il preventivo di spesa, che comprende il materiale, il tessuto e il montaggio del filtro viene riportato in Tabella 78. Vengono riportati anche i prezzi a modulo installato.

La massima portata reale dell'impianto all'ingresso del filtro  $Q_4$  (punto 4 di Figura 163) è pari a 2000000 m<sup>3</sup>/h. Quindi il numero di moduli M risulta:

$$(200) \quad M = \frac{Q_4}{Q_n} \cdot 5 = 70$$

con 5 il numero di moduli del filtro. Il numero totale di maniche N sarà pari a:

$$(201) \quad N = M \cdot 144 = 10080$$

con 144 il numero di maniche per modulo.

Il filtro e la spesa risultano gli stessi dell'impianto tradizionale.

Allegato 7

Tabella 83 - Preventivo totale spesa filtro - STATO B2

<b>MATERIALE CORTEN</b>	
Prezzo n°1 filtro con maniche L=5000 mm	1.848.000 €
<b>TESSUTO NOMEX Maniche filtranti Ø160</b>	
Prezzo n°10080 maniche, L=5000 mm	543.200 €
<b>MONTAGGIO</b>	
Montaggio filtro maniche L=5000 mm	245.000 €
<b>TOTALE DI SPESA FILTRO</b>	<b>2.636.200 €</b>





## ACRONIMI

AC	Alternating Current
BAT	Best Available Technologies
BAT-AEL	BAT Associated Emission Level
BF	Blast Furnace
BOF	Basic Oxygen Furnace
BOP	Basic Oxygen Process
BOS	Basic Oxygen Steelmaking
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO	Monossido di carbonio
CO <sub>2</sub>	Anidride carbonica
COSS	Continuous Optimized Shaft
DC	Direct Current
DR	Direct Reduction
DRI	Direct Reduction Iron
EAF	Electric Arc Furnace
EBT	Eccentric Bottom Tapping
EII	Energy Intensive Industries
EPA	Environmental Protection Agency
ESP	Electrostatic precipitator
FDD	Forced Draught Cooler
H <sub>2</sub>	Idrogeno
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
Iron ores	Minerale di ferro
LD	Linz-Donawitz
LF	Ladle Furnace
LS	Liquid Steel
NCD	Natural Draught Cooler
Off-gas	Fumi di scarto dal forno elettrico ad a arco
OHF	Open Heart Furnace
ORC	Organic Rankine Cycle
PAH	Polycyclic aromatic hydrocarbon
PCB	Polychlorinated biphenyls
PCDD	Polychlorinated dibenzo-p-dioxins
PCDF	Polychlorinated dibenzo furans
PCM	Phase Change Material
PTFE	Polytetrafluoroethylene Felt
QT	Quenching Tower
Scrap	Rottame di ferro
Sponge Iron	Spugna di ferro (DRI)
SR	Smelting Reduction
TEE	Titoli di Efficienza Energetica
TTT	Tap-To-Tap
UE	Unione Europea
VOC	Volatile Organic Compounds
WCD	Water Cooled Duct
WHB	Waste Heat Boiler
WJ	Water Jacket
WSA	World Steel Association



## BIBLIOGRAFIA

- [1] I. Taranto, «L'acciaio». Available: <http://www.ilvataranto.com/acciaio.aspx>. [Consultato il giorno 2012].
- [2] M. Fumagalli, «Dall'impiego di materiali meteorici alle odierne tecnologie. Il ruolo dell'acciaio nel progresso economico dell'umanità» La Metallurgia Italiana, vol. 1, pp. 60-61, 2005.
- [3] E. Basson, «The steel industry in a sustainable society» Worlsteel association, 19 April 2012.
- [4] Federacciai, «Rapporto Ambientale 2011», 2011.
- [5] S. Bellomo, «Crollano in Europa i consumi di acciaio: quest'anno -5,6%» IL SOLE 24ORE, 12 Ottobre 2012.
- [6] «Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production», 2012.
- [7] World Steel Association, «Steel Statistic Yearbook 2012» Brussels, 2012.
- [8] ArcelorMittal, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), «Global Technology Roadmap for CCS in Industry: Steel Sectoral Report» 09 Settembre 2010.
- [9] F. Bonollo, «Produzione dell'acciaio al Forno Elettrico», Università di Padova, 2011.
- [10] «Steel production». Available: [http://www.carbonandgraphite.org/pdf/steel\\_production.pdf](http://www.carbonandgraphite.org/pdf/steel_production.pdf) [Consultato il giorno 2012].
- [11] «Induction furnace», Wikipedia. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Induction\\_furnace](http://en.wikipedia.org/wiki/Induction_furnace) [Consultato il giorno 2012].
- [12] W. Nicodemi, «Siderurgia, Processi e Impianti», Associazione Italiana di Metallurgia, Ottobre 1994.
- [13] Sime. S.r.l., Udine.
- [14] Jeremy A.T. Jones, Nupro Corporation, «Electric Arc Furnace Steelmaking». Available: <http://www.steel.org/en/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Processes/Processes%20Info/Electric%20Arc%20Furnace%20Steelmaking.aspx> [Consultato il giorno 1 Marzo 2012].
- [15] L. H. Chul, «Energy Recovery in Mini-Mills», 25 Agosto 2010. Available: [http://www.steeldaily.co.kr/data/20108/53201043258201S2-04\\_%EC%9D%B4%ED%98%95%EC%B2%A0\(%EC%98%81\).pdf](http://www.steeldaily.co.kr/data/20108/53201043258201S2-04_%EC%9D%B4%ED%98%95%EC%B2%A0(%EC%98%81).pdf)
- [16] «Steel manufacture». Available: [http://www.steelconstruction.info/Steel\\_manufacture](http://www.steelconstruction.info/Steel_manufacture) [Consultato il giorno 2012].
- [17] [http://www.ispesl.it/Buonepratiche/metallurgia/acciaieria/3\\_3.pdf](http://www.ispesl.it/Buonepratiche/metallurgia/acciaieria/3_3.pdf)
- [18] R. Cecchini, «Riciclaggio e smaltimento delle polveri da forno elettrico», Terni, Istituto per la cultura e la storia d'impresa "Franco Momigliano", 2006.
- [19] R.J. Fruehan, O. Fortini, H.W. Paxton, R. Brindle, «Theoretical Minimum Energies to Produce Steel for Selected Conditions», Settembre 2000.
- [20] «Electric arc furnace», The Institute for Industrial Productivity, 1 Dicembre 2012. Available: <http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace>.

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

- [21] «Electric Arc Furnace: Energy Consumption». Available: [http://www.heat treat consortium.com/MetalsAdvisor/iron\\_and\\_steel/process\\_descriptions/raw\\_metals\\_preparation/steelmaking/electric\\_arc\\_furnace/electric\\_arc\\_furnace\\_energy\\_consumption.htm](http://www.heat treat consortium.com/MetalsAdvisor/iron_and_steel/process_descriptions/raw_metals_preparation/steelmaking/electric_arc_furnace/electric_arc_furnace_energy_consumption.htm) [Consultato il giorno 2012].
- [22] M. Kirschen, V. Risonarta, H. Pfeifer, «Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry» *Energy*, vol. 34, n. Issue 9, pp. 1065-1072, Settembre 2009.
- [23] APAT, «Il ciclo industriale dell'acciaio da forno elettrico in Italia» Rapporto 38/2003.
- [24] H. Pfeifer, M. Kirschen, «Thermodynamic analysis of eaf energy efficiency and comparison with a statistical model of electric energy demand», Institute of Industrial Furnaces and Heat Engineering in Metallurgy, RWTH Aachen, Germany.
- [25] A. Stefana, S. Tenini, «Considerazioni sulle emissioni originate dal ciclo produttivo dell'acciaio attraverso l'utilizzo di impianti dotati di forno ad arco» *Brescia Ricerche*, vol. 42, 2003.
- [26] G. Mauer, O. Paterac Ecarot, «Captage sans combustion des fumees emises par le four a arc et possibilite de tri des poussieres recueillies» 1982.
- [27] X. Tang, M. Kirshen, M. Abel, H. Pfeifer, «Modeling of EAF off-gas post combustion in dedusting system using CFD methods» *Steel Research* 74 n°4, 2003.
- [28] F. Januard, S. Bockel-Macal, J.C. Vuillermoz, J. Laurent, C. Leburn, «Dynamic control of fossil fuel injections in EAF through continuous fumes monitoring», Les Loges en Josas, France, 2003.
- [29] M.C Grant, Air Liquid America Corporation, «Principles and strategy of EAF post-combustion», 58° Electric Furnace Conference, Orlando, USA, 12-15 Novembre 2000.
- [30] M. Kirshen et al., «Off-gas measurements at EAF primary dedusting system» EEC 2005.
- [31] G. Nardin, D. Pozzetto, S. Tommasi, C. Vecile, «Impiego di modelli fisici e del metodo degli elementi finiti per la captazione e depurazione delle emissioni secondarie termoconvettive inquinanti da forno elettrico ad arco, ai fini del risanamento dell'ambiente di lavoro», Congresso Internazionale Energia, Ambiente e Innovazione Tecnologica, Caracas, Venezuela, 22-26 ottobre 1989.
- [32] L. d'Onofrio, «Il progetto degli impianti di captazione fumi emessi da EAF», Padova, 1994.
- [33] P. Nyssen et al., «On line EAF control with a dynamic metallurgical model», Technical paper from Arcelor Group - CRM, 2001.
- [34] IPPC, «Chapter 4: Metal Industry Emissions», 2006 IPPC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol.3: Industrial Processes and Product Use, pp. 4.1-4-85, 2006.
- [35] G. Pansera, N. Griffini, «Sviluppi tecnologici negli impianti di abbattimento fumi per forni elettrici» *La metallurgia italiana*, 2004.
- [36] A. Toffolon, «Criteri di progettazione della linea di trattamento e depurazione fumi a servizio dei forni elettrici ad arco per la produzione di acciaio», Università degli studi di Udine, 2006-2007.

## Bibliografia

- [37] «Iron and Steel», The Institute for Industrial Productivity. Available: <http://ietd.iipnetwork.org/content/iron-and-steel#technology-resources> [Consultato il giorno 1 Dicembre 2012].
- [38] Ünal Çamdali, Murat Tunç, «Exergy analysis and efficiency in an industrial AC electric ARC furnace» *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 2257-2267, 2003.
- [39] ECO-D Environmental Systems S.r.l., Udine.
- [40] «Delibera EEN 3/08 - Aggiornamento del fattore di conversione dei kWh in tonnellate equivalenti di petrolio connesso al meccanismo dei titoli di efficienza energetica» 28 Marzo 2008. Available: <http://www.autorita.energia.it/it/docs/08/003-08een.htm>
- [41] R.J. Schmitt, J.E. Goodwill, «Electric Arc Furnace Scrap Preheating», CMP/EPRI, Pittsburgh, 1997.
- [42] W. Ballardino, G. Nardin, D. Pozzetto, S. Tommasi, «Ricerca sperimentale sulla fattibilità del recupero energetico e sul controllo antinquinamento nel forno elettrico ad arco durante le fasi di fusione e di affinazione, Prima Parte», Secondo Congresso Europeo sull'Acciaio Elettrico, Firenze, 29 Settembre -1 Ottobre 1986.
- [43] W. Ballardino, G. Nardin, D. Pozzetto, S. Tommasi, «Ricerca sperimentale sulla fattibilità del recupero energetico e sul controllo antinquinamento nel forno elettrico ad arco durante le fasi di fusione e di affinazione, Seconda Parte», Secondo Congresso Europeo sull'Acciaio Elettrico, Firenze - Italia, 29 Settembre - 1 Ottobre 1986.
- [44] F. Memoli, M. Bianchi Ferri, «New track record for Consteel® due to new environment-friendly features», *MPT International*, pp. 58-65, May 2007.
- [45] Tenova, «The benefits of CONSTEEL® EVOLUTION™ - The new scrap charge reheating system realizes the full potential of Consteel® thanks to use of the chemical energy from the furnace off-gas and recovery of the heat lost during the process» *Tenova News*, vol. 4, pp. 5-7, Giugno 2011.
- [46] T. Jiemin, W. Xuefeng, M. Bianchi Ferri, P. Argenta, «Charging hot metal to the EAF using Consteel» *Millennium Steel 2006 - Steelmaking*, pp. 79-86, 2006.
- [47] Lawrence Berkeley National Laboratory, «The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook (2nd Edition)», Berkeley, California, December 2010.
- [48] «New Energy Saving Electric Arc Furnace Designs» Available: <http://www.kevinkennedyassociates.com/new-energy-saving-electric-arc-furnace-designs> [Consultato il giorno 2012].
- [49] Knut Rummeler, Akif Tunaboğlu, Dogan Ertas, «New Generation in Preheating Technology for Electric Arc Furnaces Steelmaking» *Iron&Steel Technology*, pp. 90-98, January 2013.
- [50] «ECOARC™®», J.P. Steel Plantech. Available: <http://www.steelplantech.co.jp/english/products/steelmaking/eaf/ecoarc>

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

- [51] N. Maruoka, T. Mizuochi, H. Purwanto, T. Akiyama, «Feasibility Study for Recovering Waste Heat in the Steelmaking Industry Using a Chemical Recuperator», ISIJ International, vol. 44, pp. 257-262, 2004.
- [52] H. Ester, SMS SIEMAG AG, «Improving over-all energy efficiency of the EAF process by generation and usage of steam», International convention on clean, green and sustainable technologies in iron and steelmaking, Bhubaneswar, 15-17 Luglio, 2009.
- [53] M. Abel, M. Dorndorf, F. Zauner, «New benchmark for energy efficient steelmaking» Working paper.
- [54] C. Born, R. Granderath, Tenova Re Energy GmbH, «Technical and economic potential for heat recovery in steel plants» in AISTech conference, Atlanta, USA, 2012.
- [55] Tenova, «iRECOVERY® and EFSOP® technologies that care for the environment - The optimization of the overall energy balance of the EAF reduces energy consumption and greenhouse emissions, without limiting the productive performances» Tenova News, vol. 4, pp. 8-11, 2011.
- [56] J.P. Steel Plantech., «Waste Heat Recovery for EAF». Available: <http://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/sector.html> [Consultato il giorno 2012].
- [57] M. Baresi, «H-REII - Osservatorio - Layman report: Progetto H-REII», 2012. Available: <http://www.hreii.eu/it/documents.php>
- [58] M. Baresi, «Recupero di calore da processi industriali ad alta intensità energetica. I case study del progetto HREII». Available: <http://www.hreii.eu/public/italcogen%2024%20novembre%20-%20verona.pdf> [Consultato il giorno Aprile 2012].
- [59] «HREII DEMO sbarca in Germania», HREII Demo, 22 Dicembre 2012. Available: <http://www.hreii.eu/demo/it/news.php>
- [60] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications», Renewable and sustainable energy reviews, vol. 13, pp. 318-345, 2009.
- [61] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H. Mehling, «Review on thermal energy storage with phase change materials: heat transfer and analysis applications», Applied Thermal Engineering, vol. 23, pp. 251-283, 2003.
- [62] G. Nardin, A. Meneghetti, M. E. Fabiani, «Technological Apparatus for the Moderation of Meltshop Off-Gas», AISTech 2012, Atlanta, GE, USA, 2012.
- [63] London Metal Exchange. Available: <http://www.lme.com> [Consultato il giorno 2012].
- [64] <http://www.cogne.com/it/concrinox5.asp> [Consultato il giorno 2012].
- [65] «Capitolo 5 - Acciai inossidabili». Available: [http://bomet.fci.unibo.it/pal/Doc\\_6.pdf](http://bomet.fci.unibo.it/pal/Doc_6.pdf)
- [66] F. Magris, «Utilizzo dei materiali PCM nel recupero energetico da forno ad arco elettrico», Università degli studi di Udine, 2010-2011.
- [67] Mangiarotti S.p.A., Udine.
- [68] Neoterm S.r.l., Varese.

## Bibliografia

- [69] Gemini Industriale S.r.l., Pordenone.
- [70] Progetto Carpenteria Manzanese S.r.l., Udine.
- [71] Eteam S.r.l., Udine.
- [72] Sidertech Italia. S.r.l., Udine.
- [73] «Deliberazione 24 novembre 2011 - EEN 12/11», AEEG, 24 Novembre 2011. Available: <http://www.autorita.energia.it/allegati/docs/11/012-11een.pdf>
- [74] «Il meccanismo dei Titoli di Efficienza Energetica (certificati bianchi) dal 1° gennaio al 31 maggio 2012», AEEG, 25 Ottobre 2012. Available: <http://www.autorita.energia.it/allegati/docs/12/434-12.pdf>
- [75] «I fattori di emissione». Available: [http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/technical\\_annex\\_it.pdf](http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/technical_annex_it.pdf)
- [76] B. Gollini, «2011, anno del record di emissioni di CO<sub>2</sub>», 15 Novembre 2012. Available: <http://www.circuitiverdi.it/blog/2012/11/15/2011-anno-del-record-di-emissioni-di-co2>
- [77] E. Zandegiacomo, «Appunti di trasmissione del calore», Università degli studi di Trieste, 2009-2010.
- [78] G. Cornetti, «Macchine termiche», Edizioni Il Capitello, 1989.
- [79] «Austenitic stainless steel (316)». Available: <http://aries.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/ss.html>
- [80] «Overview of materials for T 300 Series Stainless Steel». Available: <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=7a87941825a3463eaba7979c4333721f>
- [81] S Rajua, K.Sivasubramaniam, E. Mohandas, «The high temperature bulk modulus of aluminium: an assessment using experimental enthalpy and thermal expansion data», Solid State Communications, vol. 122, n. 12, pp. 671-676, June 2012.
- [82] «Programma LIFE+», Unione europea, 07 Dicembre 2010. Available: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/agriculture/environment/l28021\\_it.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28021_it.htm)
- [83] «Final Draft BAT Guidance Note on Best Available Techniques for the Initial Melting and Production of Iron & Steel Sector», EPA - Environmental Protection Agency, Ireland, 2010.
- [84] «Industrial Emissions». Available: <http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/stationary/index.htm> [Consultato il giorno 2012].
- [85] «Attuazione delle direttive CEE numeri 80/779, 82/884, 84/360 e 85/203 concernenti norme in materia di qualità dell'aria, relativamente a specifici agenti inquinanti, e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali». Available: <http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/99351dl.htm> [Consultato il giorno 2011].
- [86] «F. Martin-Siemens», 08 Settembre 2010. Available: <http://luirig.altervista.org/enciclopedia-online/index.php?lemma=Forno%20Martin-Siemens>
- [87] Hot Briquetted Iron Association (HBIA) Ltd., «Hot Briquetted Iron (HBI). Guide for Handling, Maritime Carriage, and Storage», 2009.
- [88] «Environmental Protection Agency - EPA». Available: <http://www.epa.gov>

Recupero energetico dagli off-gas dei forni elettrici ad arco tradizionali.  
Applicazione di un procedimento innovativo con materiali a cambiamento di fase.

[89] «Kyoto Protocol». Available: [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php) [Consultato il giorno 2012].

[90] «International Emission Trading».

Available:[http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/mechanisms/emissions\\_trading/items/2731.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/emissions_trading/items/2731.php).

[Consultato il giorno 2012].

[91] «Certificati bianchi». Available: <http://www.gse.it/it/CertificatiBianchi/Pages/default.aspx>

[Consultato il giorno 2012].