



## Mode I Stress Intensity Factors for triangular corner crack nearby intersecting of cylindrical holes

### Fattori di intensificazione delle tensioni per cricche ad angolo triangolari in corrispondenza di intersezione di fori sollecitate a modo I

E. Salvati, P. Livieri, R. Tovo

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Ferrara, via Saragat 1, 44122, Ferrara*  
*enrico.salvati@unife.it, paolo.livieri@unife.it, roberto.tovo@unife.it*

**ABSTRACT.** The paper deals with the Stress Intensity Factor assessment of cracks at the intersection of holes loaded by internal pressure.

Triangular flaws are considered at the intersection of two holes inside a specific specimen. The research examines the influence of hole diameter ratio  $D_1/D_2$  and the angle between their axes  $\alpha$ . Numerical analysis is performed to determine the Stress Intensity Factors (SIF) of mode I in many different geometric configurations.

The actual shape of a real crack nucleated at the intersection of two cylindrical holes is subject to variable internal pressure and is usually geometrically complex. The Stress Intensity Factor changes along the crack contour and the crack shape development is controlled by its local value, e.g. during a fatigue loading. In general, the estimation of the Stress Intensity Factors of cracks with a complex shape is made by means of numerical methods since closed form solutions in literature are limited. However, in order to solve the problem of crack propagation more quickly, in the case of a crack corner at the intersection between two cylindrical holes, we can assume, in agreement with scientific literature, a symmetrical triangular crack shape and the Stress Intensity Factor are only calculated at the middle of the crack. Obviously, this is a strong approximation, but this allows a reduction in the computation effort for crack growth rate assessments and safety evaluation.

In this paper, the weight function technique is used by integrating the actual stress field evaluated in the uncracked model. The method of the weight function is of general validity and the weight function is related to the displacement components close to the crack front, as proposed by Bueckner and Rice. From a computational point of view, the use of the three-dimensional weight function is complex and in scientific literature a weight function of general validity is not available. Nevertheless, thanks to the work conducted by Petroski and Achenbach, Shen and Glinka, an efficient generalised weight function has been adopted and then developed by Sha and Yang [9], which considers a series expansion of non-singular terms. In this way, the integration of the weight function, multiplied by a nominal stress, is made along a line and not in a two-dimensional domain.

In this preliminary work, according to Herz et al., we consider a weight function with three terms by assuming a priori the coefficients of the second and third non-singular terms. This contribution is essentially an extension of a previous paper by Herz et al. They only considered the case of  $D_1/D_2=1$  and  $\alpha=90^\circ$  ( $D_i$  are the diameters of the two cylindrical holes and  $\alpha$  is the angle between their axis). Here, we extend the analysis to  $D_1/D_2$  equal to 2, 4 and 8 with an  $\alpha$  of 60 and 45 degrees.



With the aid of three-dimensional modelling, an accurate FE model of a triangular corner crack at different crack depths has been made. Subsequently, by using ANSYS finite element software, it is possible to employ the command KCAL that evaluates the Stress Intensity Factors in the middle of the crack. Subsequently, a comparison between numerical FE results and the analytical results, giving the values of the unknown coefficients of the weight function (the unknown coefficient is indicated in the paper as  $M_1$ ).

As reported in the tables, the accuracy of the weight functions in SIF predictions is about 5% despite the strong simplification previously introduced in the model. This result is considerable because it is possible to determine the Stress Intensity Factor of a triangular shaped crack by a line integral of a stress profile in a model without considering the crack.

**SOMMARIO.** Nel presente lavoro si affronta il problema del calcolo dello Stress Intensity Factors (SIF) di cricche di forma triangolare che nucleano in prossimità dell'intersezione di fori cilindrici ad assi complanari. Modelli FEM tridimensionali sono utilizzati per valutare, nel punto mediano, lo SIF di cricche triangolari per poi calcolare la weight function relativa a sollecitazioni di modo I. Sono presi in esame il rapporto fra i diametri dei due fori cilindrici e l'angolo formato dai loro assi. La verifica della precisione della weight function nel calcolare lo SIF è mostrata in diversi esempi. Infine, lo SIF di una cricca triangolare è messo a confronto con quello calcolato per una cricca avente forma simile ad una cricca reale riscontrata in un componente sollecitato a fatica.

**KEYWORDS.** Weight Function; Stress Intensity Factors; Intersecting Holes; Finite Element Method; Fracture Mechanics.

## INTRODUZIONE

L'intersezione di fori in pressione all'interno di componenti meccanici dà luogo ad una intensificazione delle tensioni. Questa tipologia di dettaglio strutturale è molto diffusa nell'ambito della moto propulsione dove la necessità di contenere fluidi aventi pressioni sempre più elevate è in continuo aumento.

Nei collettori che distribuiscono fluido ad elevate pressioni l'innescò di cricche in corrispondenza dell'intersezione di due condotti, è un fenomeno comune [1]. La successiva propagazione può essere arrestata o rallentata qualora fossero presenti tensioni residue derivanti da trattamento di autofrettaggio. Test sperimentali a fatica, eseguiti con pressioni pulsanti su dettagli strutturali con due condotti cilindrici intersecanti, hanno dimostrato come l'autofrettaggio può incrementare il limite a fatica di un fattore di circa 2 qualora i fori abbiano ugual diametro e l'angolo  $\alpha$  fra gli assi dei cilindri sia di  $90^\circ$  [2]. Tale processo di autofrettaggio induce uno stato di tensione residua di compressione che può essere quantificato con analisi FEM [3], o in alcuni casi anche per via analitica [4 e 5]. Per poter studiare la propagazione per fatica è necessaria la conoscenza del fattore di intensificazione delle tensioni effettivo  $K_{eff}$  che racchiude in sé le varie componenti di sollecitazione. La forma della cricca che nuclea in corrispondenza di due fori intersecanti soggetti ad una pressione interna variabile non è immediata da calcolare e necessita di una schematizzazione bidimensionale. In generale, i problemi di cricche piane di forma qualunque sono alquanto complessi e per avere soluzioni in forma chiusa direttamente applicabili senza la necessità di dover sviluppare particolari algoritmi di calcolo, è necessario limitare l'analisi ai termini del primo ordine [6 e 7]. Tuttavia, per risolvere ingegneristicamente, il problema di una cricca d'angolo nucleata all'incrocio fra due condotti cilindrici, è possibile assumere, in accordo con quanto fatto nel riferimento bibliografico [3], che la cricca abbia una forma triangolare simmetrica concentrando l'attenzione sul valore dello Stress Intensity Factor (SIF) in mezzzeria della cricca. Questo modo di procedere è sicuramente una approssimazione del problema, ma consente di stimare in modo rapido, se il range dello SIF imposto dai carichi esterni pulsanti è superiore al relativo valore di soglia del materiale portando ad un aumento della dimensione della cricca.

L'obiettivo del seguente contributo, è quello di mettere a disposizione del progettista, una weight function che faciliti il calcolo dello SIF noto il rapporto fra i due diametri dei condotti e l'angolo formato dai loro assi. Saranno calcolati i coefficienti della weight function proposta da Shen e Glinka [8] considerando uno sviluppo in serie di tre termini [9]. La weight function proposta sarà confrontata, nel calcolo dello SIF, con i risultati ottenuti da elaborazioni numeriche di



analisi FEM che vedranno condizioni di carico derivanti da una pressione interna. Infine, verrà mostrato il confronto, nella previsione dello SIF, fra cricche d'angolo triangolari e quelle aventi forma simile a quella di cricche reali nucleate in corrispondenza di fori cilindrici sollecitati a fatica.

### IL PROBLEMA DELLA INTENSIFICAZIONE DELLE TENSIONI NELL'INCROCIO DI DUE CONDOTTI IN PRESSIONE

L'intersezione di fori cilindrici comporta una concentrazione delle tensioni tangenziali nella zona di intersezione qualora siano sollecitati da una pressione interna. La Fig. 1 riporta una tipica configurazione di due fori complanari con differente diametro e con gli assi di simmetria inclinati di un angolo  $\alpha$  ricavati da una matrice di materiale cilindrica che rappresenta in modo schematico il componente meccanico. Muovendosi lungo una generatrice, la tensione tangenziale incrementa in modo sensibile fino ad arrivare ad un valore massimo in corrispondenza della zona di intersezione. Le Fig. 2 e 3 evidenziano il problema della concentrazione delle tensioni qualora i due condotti siano sollecitati da un fluido in pressione. La tensione  $\sigma_z$ , sul piano di taglio, coincide con la tensione tangenziale lungo la generatrice ed incrementa di circa un fattore 6 nel passare da una zona indisturbata al punto di incrocio.

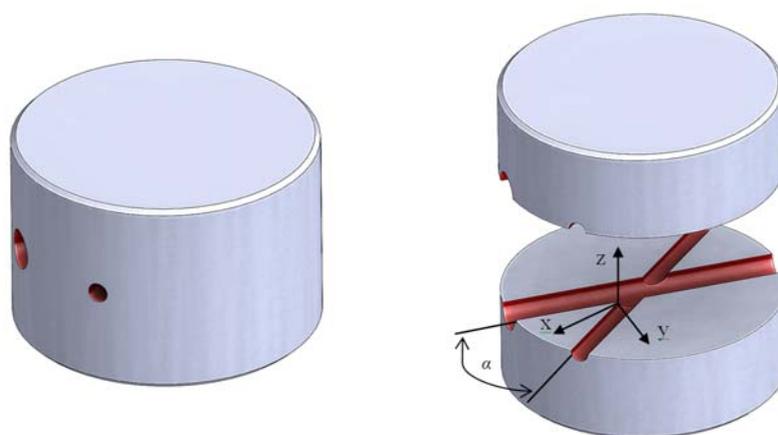


Figura 1: Esempio di una intersezione di due condotti cilindrici.  
Figure 1: Example of intersection of two cylindrical hole.

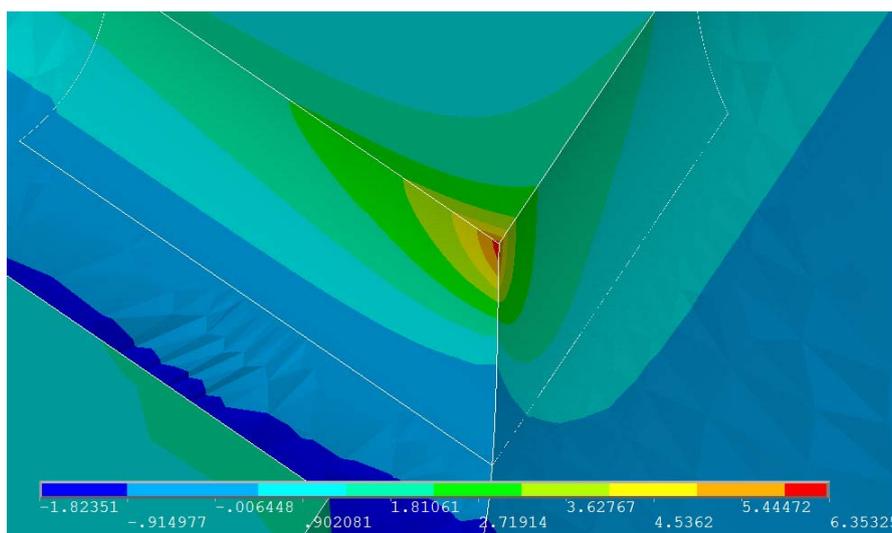


Figura 2: Contour tensione  $\sigma_{\xi}$  ( $p=1$  MPa,  $D_1/D_2=2$ ,  $\alpha=45^\circ$ ).  
Figure 2:  $\sigma_{\xi}$  contour ( $p=1$  MPa,  $D_1/D_2=2$ ,  $\alpha=45^\circ$ ).

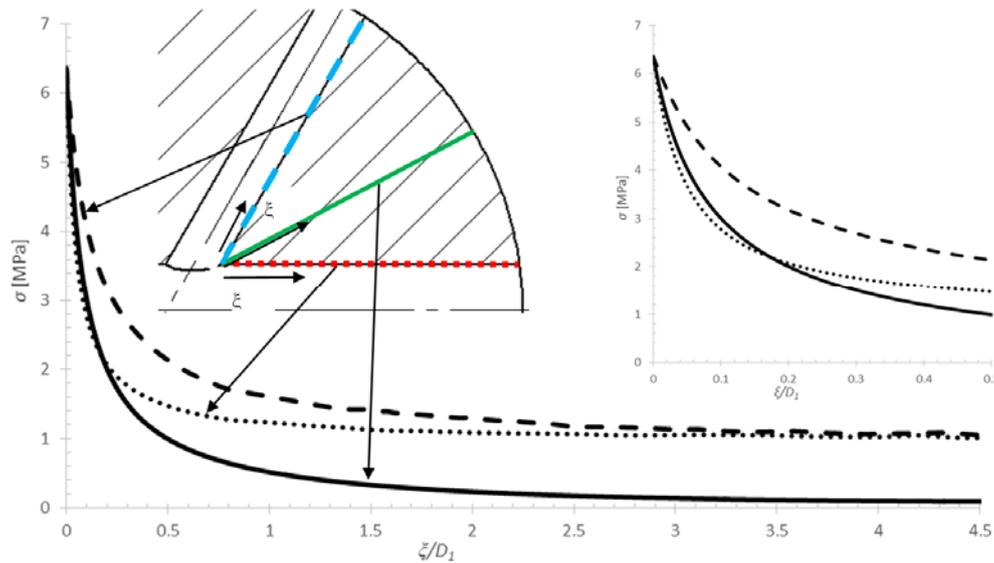


Figura 3: Andamento tensione tangenziale ( $p=1$  MPa,  $D_1/D_2=2$ ,  $\alpha=45^\circ$ )  
 Figure 3: Hoop stress ( $p=1$  MPa,  $D_1/D_2=2$ ,  $\alpha=45^\circ$ )

### IL METODO DELLE FUNZIONI PESO PER IL CALCOLO DELLO SIF

**N**ei componenti meccanici contenenti dei difetti assimilabili a cricche, il calcolo della loro capacità di carico statica o la possibilità di valutare la velocità di crescita del difetto, legata ad un carico variabile nel tempo, è legata al calcolo dello Stress Intensity Factor (SIF) della cricca. Noto lo SIF, il progettista ha modo di garantire la vita di servizio del componente oppure valutare se è raggiunto un certo livello di sicurezza. Questi tipi di analisi vengono sviluppati utilizzando modelli di meccanica della frattura e nonostante siano reperibili in vari manuali i valori degli SIF [10 e 11] è ancora difficile trovare soluzioni adeguate per molti problemi pratici.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di valutare lo SIF di cricche d'angolo che nucleano in prossimità di un incrocio di due fori cilindrici. In questo lavoro preliminare, si assume che la forma della cricca sia triangolare (Fig. 1c) disposta simmetricamente rispetto alla bisettrice dell'angolo  $\alpha$  formato dall'incrocio dei due assi dei fori. Questa assunzione è in accordo con quanto fatto in [12] dove, oltre ad aver monitorato a posteriori la vera forma della cricca nucleata nel punto di intersezione, è stata proposta tale esemplificazione lineare per agevolare il calcolo dell'allungamento della cricca sotto un carico pulsante.

Per rendere di validità generale il calcolo dello SIF e non legato ad uno specifico tipo di carico, si è deciso di utilizzare il metodo delle weight function [13 e 14] assumendo lo sviluppo in serie di Sha e Yang [9] troncato al terzo ordine. Il modello geometrico di riferimento per la valutazione della weight function è riportato in Fig. 4.

Con il metodo delle weight function il  $K_I$  è calcolato mediante l'integrazione del prodotto fra la funzione peso  $m(x,a)$  e la tensione  $\sigma_z(x)$ , quest'ultima valutata sul componente non criccato in direzione ortogonale al piano nel quale si svilupperà la cricca:

$$K_I(a) = \int_0^a \sigma_z(x) \cdot m(x,a) dx \quad (1)$$

Nella (1)  $a$  rappresenta la dimensione della cricca misurata lungo la bisettrice. Ovviamente, con riferimento alla Fig. 4c, con la (1) si è in grado di valutare correttamente il valore dello SIF nel punto mediano A della cricca, mentre, se è di interesse un altro punto del bordo della cricca, si dovrà modificare la weight function adeguandola di volta in volta. In questo modo si sostituiscono degli integrali di superficie con una serie di funzioni peso ad una sola variabile [15].

Il metodo delle weight function è di validità generale e la funzione peso è legata alle componenti di spostamento in prossimità del fronte di cricca come proposto da Bueckner [13] e Rice [14] nel seguente modo:



$$m(x, a) = \frac{E'}{K_{Ir}} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial a} \quad (2)$$

In cui  $E'$  è il modulo di elasticità per stati piani di tensione, mentre, diventa  $E' = E / (1 - \nu^2)$  per stati piani di deformazione ( $\nu$  modulo di Poisson),  $K_{Ir}$  è lo SIF di un caso preso a riferimento ed  $u_r$  è il relativo *crack opening displacement*.

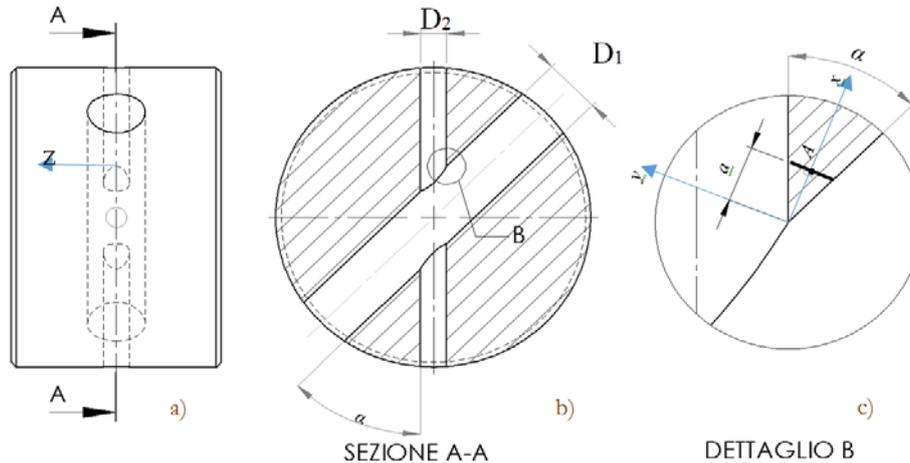


Figura 4: Geometria di riferimento.  
Figure 4: Reference model.

La (2) richiede la conoscenza dell'intero campo degli spostamenti sopra la cricca oltre che la conoscenza di un  $K_{Ir}$  di riferimento. Grazie al lavoro condotto da Petroski e Achenbach [16], Shen e Glinka [8] formularono la scrittura di una efficiente funzione peso scritta generalizzata da Sha e Yang [9], che considera uno sviluppo in serie di termini non singolari pesati dai parametri  $M_i$ :

$$m(x, a) = \frac{2}{\sqrt{[2\pi(a-x)]}} \left[ 1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_2 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} + \dots + M_n \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{n/2} \right] \quad (3)$$

In letteratura è stato ampiamente verificato che l'Eq. (3) è applicabile ad una vasta gamma di casi di interesse ingegneristico anche per cricche aventi una forma bidimensionale di tipo ellittico [15]. Inoltre, in diversi lavori proposti da Glinka e Shen [17] è stato mostrato che la formulazione con tre termini è sufficientemente accurata comportando errori inferiori all'1%.

Il problema del calcolo della funzione peso viene perciò spostato alla valutazione dei parametri  $M_i$  che possono essere calcolati in vari modi. Per esempio, se si conoscono tre casi di riferimento relativi a tre differenti distribuzioni di carico agente sopra la cricca, noti i tre SIF  $K_{Iri}$ , è possibile impostare il seguente sistema lineare nelle incognite  $M_i$ :

$$K_{Ir1} = \int_0^a \sigma_{\zeta1}(x) \frac{2}{\sqrt{[2\pi(a-x)]}} \left[ 1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_2 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] dx \quad (4)$$

$$K_{Ir2} = \int_0^a \sigma_{\zeta2}(x) \frac{2}{\sqrt{[2\pi(a-x)]}} \left[ 1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_2 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] dx \quad (5)$$

$$K_{Ir3} = \int_0^a \sigma_{\zeta3}(x) \frac{2}{\sqrt{[2\pi(a-x)]}} \left[ 1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_2 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] dx \quad (6)$$



Nel presente lavoro i  $K_{I,II}$  saranno calcolati in funzione della geometria con l'ausilio degli elementi finiti costruendo, di volta in volta, dei modelli numerici tridimensionali adeguati alla geometria di Fig. 4.

### CALCOLO NUMERICO DELLO SIF DI CRICCHE BIDIMENSIONALI

Grazie a simulazioni di tipo numerico è possibile ottenere i fattori di intensificazione delle tensioni sul bordo di una cricca piana bidimensionale posta nel punto di interesse applicando il principio di sovrapposizione di Bueckner. Sfruttando le potenzialità del software di calcolo agli elementi finiti ANSYS [18] è possibile utilizzare il comando KCAL che permette di ricavare, in modo rapido ed efficiente, i fattori di intensificazione delle tensioni. Il modello numerico è stato realizzato infittendo gli elementi in prossimità dell'apice della cricca come mostrato in Fig. 5. In ogni porzione di cricca è stato applicato un carico uniforme, mentre sulla rimanente parte di superficie si è imposto una condizione di spostamento nullo in direzione ortogonale al piano di simmetria.

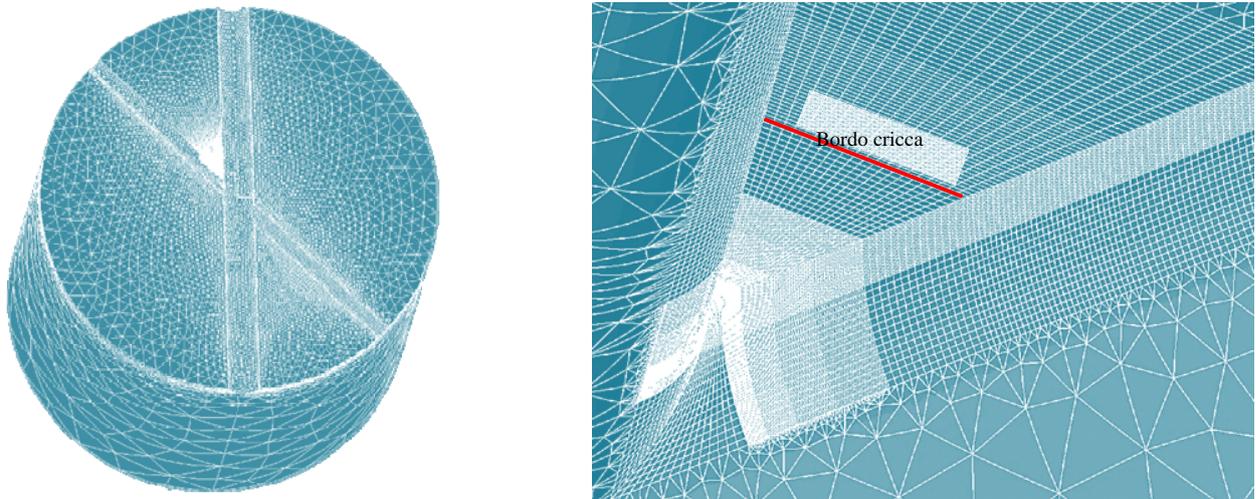


Figura 5: Modello agli elementi finiti usato per il calcolo dello SIF del punto A.

Figure 5: FE model used for SIF calculation in point A.

Il modello solido è suddiviso in diversi sottodomini che facilitano la modifica delle condizioni al contorno al fine di calcolare gli SIF per diverse dimensioni  $a$  della di cricca. Inoltre, viene sfruttata la condizione di simmetria rispetto al piano dove la cricca propaga. Il modello è caricato da una pressione unitaria di 1 MPa agente sulla superficie di frattura per le varie profondità considerate. In Fig. 6 è possibile notare la zona deformata che coincide, di fatto, con l'area dove è applicato il carico.

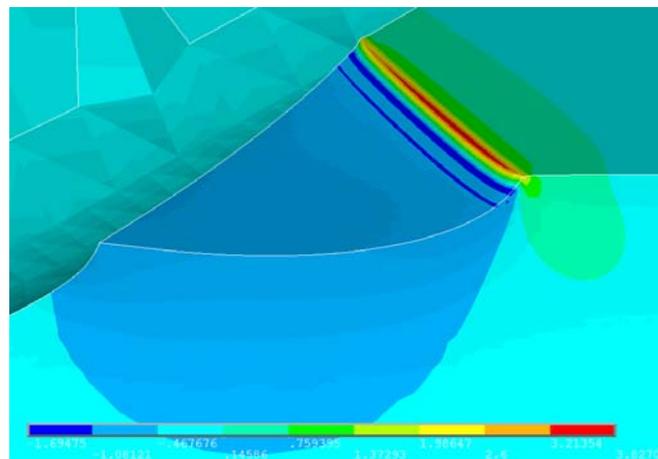


Figura 6: Deformata e contour della tensione principale massima per un carico unitario applicato alla superficie della cricca (1 MPa).

Figure 6: Deformed shape and first principal stress for a uniform surface load over the crack (1 MPa).



## CALCOLO DELLA FUNZIONE PESO

Per la cricca triangolare di Fig. 4, in virtù di quanto descritto sopra, si decide di utilizzare una funzione di forma avente tre parametri:

$$m(x, a) = \frac{2}{\sqrt{[2\pi(a-x)]}} \left[ 1 + M_1 \left( 1 - \frac{x}{a} \right)^{1/2} + M_2 \left( 1 - \frac{x}{a} \right) + M_3 \left( 1 - \frac{x}{a} \right)^{3/2} \right] \quad (7)$$

Con l'obiettivo di risolvere il sistema di Eq. (4-6) risulta necessario avere a disposizione i fattori di intensificazione delle tensioni per una cricca di profondità stabilita e tre differenti condizioni di carico. Recenti lavori eseguiti da Herz et al. [12] hanno evidenziato che, per  $D_1/D_2=1$  e  $\alpha=90^\circ$ , l'andamento dei parametri  $M_2$  ed  $M_3$  è stato assunto costante lungo la direzione di propagazione della cricca e pari rispettivamente a 3 e -3. In questo preliminare lavoro, si adatterà tale ipotesi esemplificativa, mantenendo costanti  $M_2$  ed  $M_3$  relegando così la variabilità dei parametri  $M_i$  solo su  $M_1$ . A posteriori, sulla base di un confronto fra risultati numerici FEM e i relativi valori calcolati con la (7), sarà verificata la correttezza di tale assunzione al variare delle condizioni di carico. La ricerca della funzione peso dunque si riconduce alla sola determinazione dell'andamento del parametro  $M_1$  al variare dalla profondità della cricca.

Con l'ausilio di un modellatore 3D sono state schematizzate cricche aventi profondità  $a$  variabile. Successivamente, dal post-processamento di analisi FEM sono stati stimati gli  $M_i$  in funzione della geometria dei condotti e della dimensione  $a$  della cricca.

Le configurazioni geometriche analizzate sono riassunte nelle Tabelle 1 e 2.

Per un prefissato rapporto geometrico di diametri, si sono considerate sette differenti profondità di cricca per le quali sono stati calcolati, dai risultati FEM, gli SIF nel punto mediano. Nelle Fig. 7-9 sono riassunti gli andamenti di  $K_I$  per tutte le geometrie analizzate.

La risoluzione numerica della (7) permette di ottenere l'andamento del parametro  $M_1$ . In questo modo, interpolando i valori ottenuti per ogni singola geometria, si ottiene l'andamento del  $K_I$  in funzione della profondità della cricca.

Nelle Fig. 10-12 è messa in evidenza la variabilità di  $M_1$ . Inoltre, per una fissata dimensione della cricca, la Fig. 13 mostra come sia possibile interpolare il valore di  $M_1$  per angoli  $\alpha$  compresi fra  $45$  e  $90^\circ$ .

N°	$\alpha$ [°]	$D_1/D_2$
1	90	1
2	90	2
3	90	4
4	90	8
5	60	1
6	60	2
7	60	4
8	60	8
9	45	1
10	45	2
11	45	4
12	45	8

Tabella 1: Configurazioni geometriche analizzate.

Table 1: Analysed cases.



$a$ [mm]
0.1
0.3
0.6
1.0
1.5
2.5
4.0

Tabella 2: Profondità di cricca analizzate.  
Table 2: Crack deep.

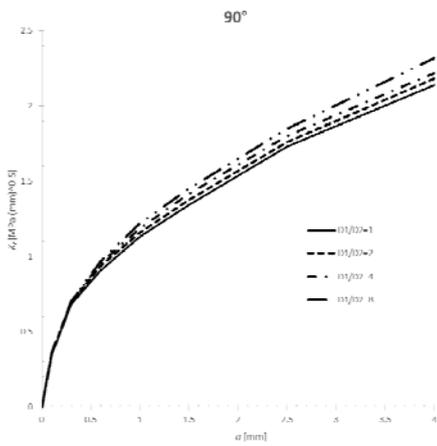


Figura 7: SIF per geometria  $\alpha=90^\circ$ .  
Figure 7: SIF for models with  $\alpha=90^\circ$ .

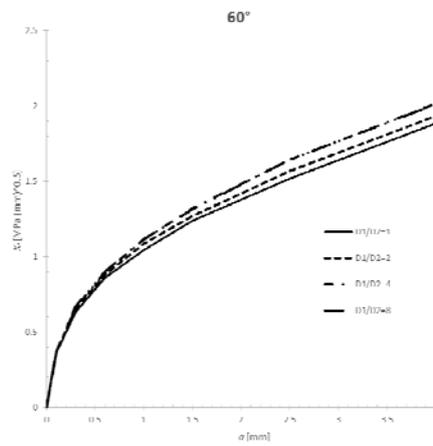


Figura 8: SIF per geometria  $\alpha=60^\circ$ .  
Figure 8: SIF for models with  $\alpha=60^\circ$ .

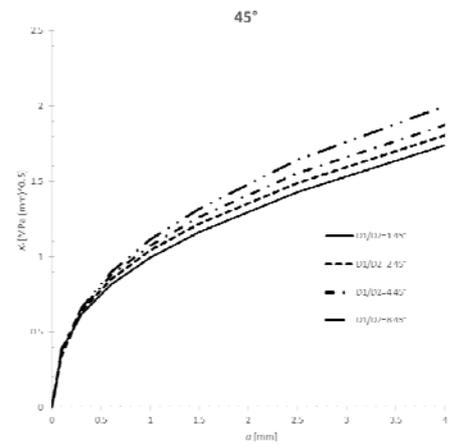


Figura 9: SIF per geometria  $\alpha=45^\circ$ .  
Figure 9: SIF for models with  $\alpha=45^\circ$ .

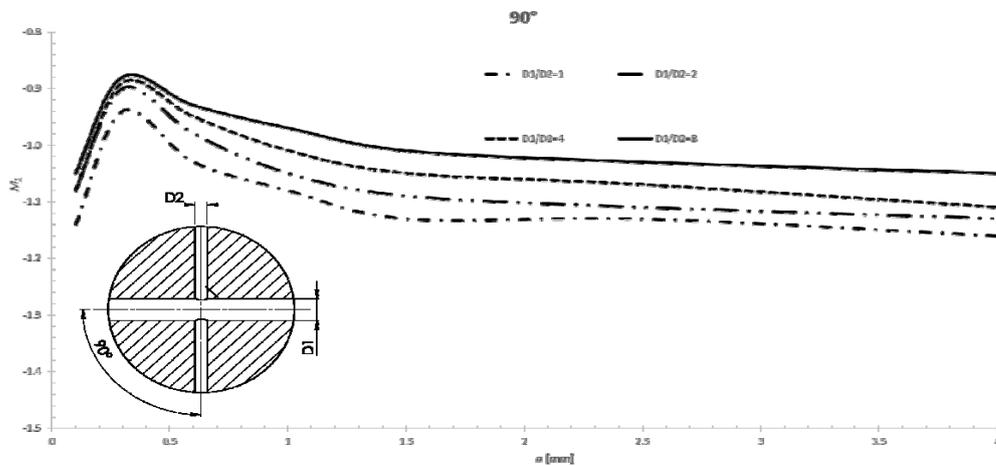


Figura 10: Andamento parametro  $M_I$ , geometria  $\alpha=90^\circ$ .  
Figure 10:  $M_I$  parameter for models with  $\alpha=90^\circ$ .

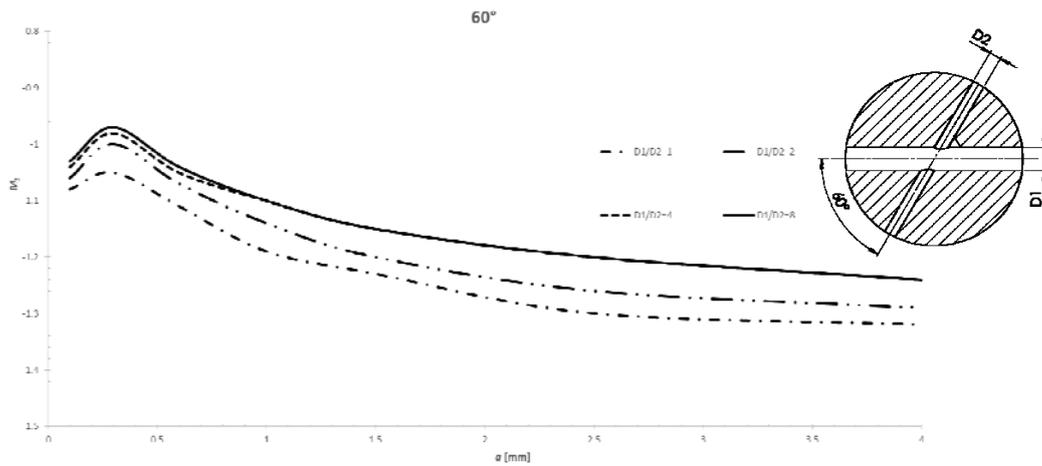


Figura 11: Andamento parametro  $M_I$  geometria  $\alpha=60^\circ$ .  
 Figure 11:  $M_I$  parameter for models with  $\alpha=60^\circ$ .

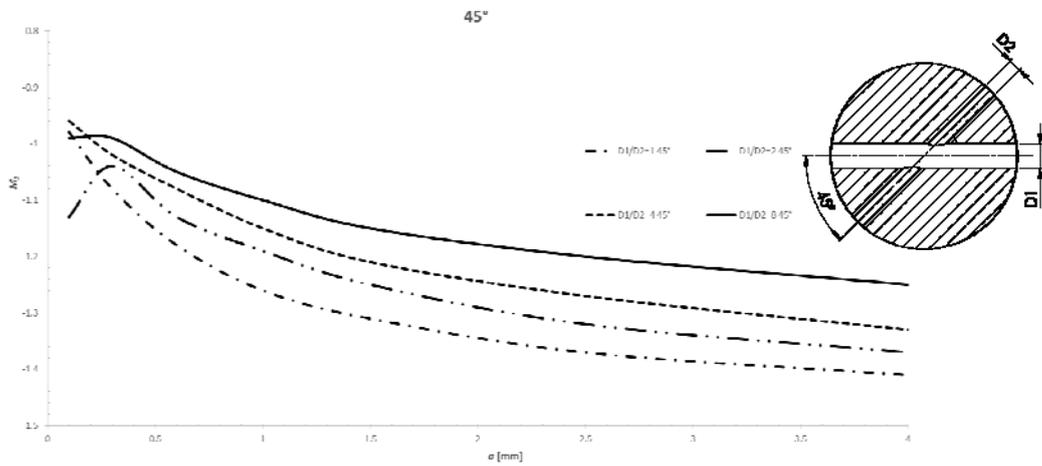


Figura 12: Andamento parametro  $M_I$  geometria  $\alpha=45^\circ$ .  
 Figure 12:  $M_I$  parameter for models with  $\alpha=45^\circ$ .

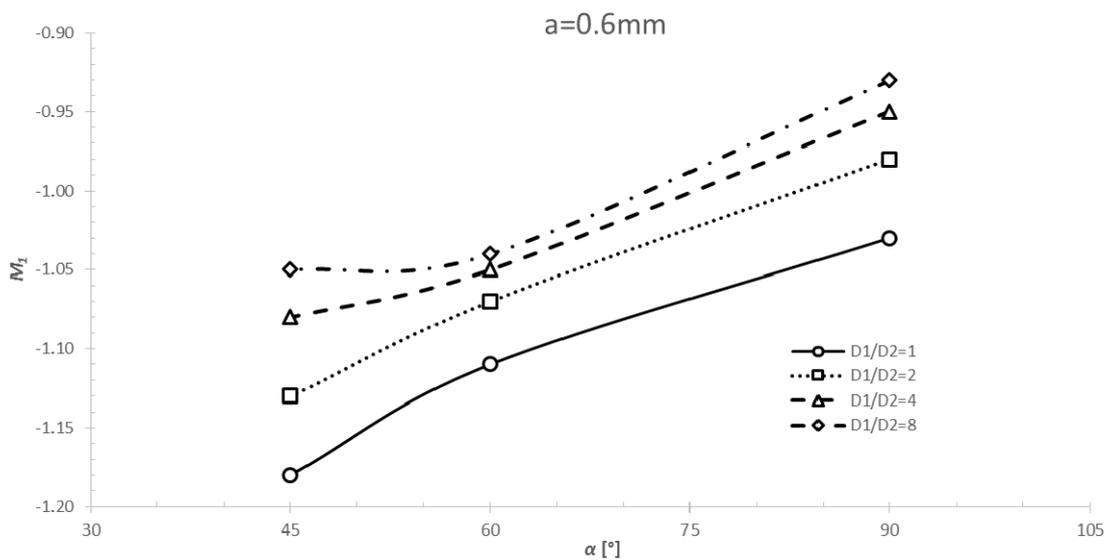


Figura 13: Variabilità di  $M_I$  per una prefissata dimensione della cricca.  
 Figure 13:  $M_I$  parameter for a deep crack of 0.6 mm.

## VERIFICA DELLA WEIGHT FUNCTION

Al fine di verificare la correttezza dell'ipotesi della costanza dei parametri  $M_2$  ed  $M_3$  della funzione peso nonché i valori di  $M_1$  calcolati, risulta necessario prendere in esame differenti tipologie di carico applicate al modello. La modalità di carico utilizzata prevede l'applicazione di una pressione agente unicamente sulle superfici dei condotti cilindrici (non si considera la pressione agente sulla superficie di cricca). Tale condizione di carico viene applicata per tutte le configurazioni di  $\alpha$  considerate, rapporto fra i diametri dei fori  $D_1/D_2$  pari a 2 e profondità di cricca  $a=1.5$  mm. La pressione applicata è unitaria (1 MPa). In aggiunta, si considera una condizione di carico mista, limitata ad una sola geometria. Tale condizione di carico simula la presenza di un calettamento con interferenza in uno dei due condotti; nell'esempio numerico la pressione nei condotti viene imposta rispettivamente pari ad 1 ed 1.5 MPa. Il calcolo numerico mediante il metodo agli elementi finiti, come visto in precedenza, permette di stimare con precisione lo SIF ( $K_{I,FEM}$ ) per le varie cicche posizionate come in Fig. 4. I valori calcolati, sono stati successivamente confrontati con quelli determinati con la weight function proposta:

$$K_{I,w} = \int_0^a \frac{2\sigma_z(x)}{\sqrt{[2\pi(a-x)]}} \left[ 1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} - 3 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + 3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] dx \quad (8)$$

Nella (8) il valore di  $M_1$  sarà letto nei grafici 10-12. La tensione  $\sigma_z$ , relativa ai vari esempi trattati, è riportata in Tab. 3. Tale tensione fa riferimento alla geometria senza cricca ed ad un materiale lineare elastico. Gli errori in percentuale sono risultati nell'ordine del 5% e sicuramente accettabili a fronte delle esemplificazioni introdotte nella weight function. Inoltre, è stato verificato che per  $D_1/D_2$  pari a 4 e con una pressione costante sulla superficie della cricca, è possibile ottenere dalla (2) l'andamento numerico della weight function (angolo  $\alpha$  di  $60^\circ$ , dimensione cricca  $a$  di 4 mm). Tale calcolo è stato possibile grazie alla determinazione, con gli elementi finiti, del *crack opening displacement* ottenuto senza infittire la mesh rispetto alle analisi viste in precedenza. Nella zona in cui la mesh era sufficientemente accurata, la weight function (7), calcolata con i coefficienti numerici delle Fig. 10-12, coincideva con la funzione definita dalla (2).

## CALCOLO DELLO STRESS INTENSITY FACTORS PER UNA CRICCA AVENTE FORMA COMPLESSA

Prendendo in considerazione i rilievi sperimentali riportati in [12] e [19], si è costruito un modello tridimensionale in cui la cricca assume forma simile a quella rilevata sperimentalmente qualora i due condotti cilindrici siano sollecitati da una pressione variabile nel tempo (vedere Fig. 14). Le dimensioni assolute della cricca considerate nell'esempio sono diverse rispetto a quelle riportate nei riferimenti bibliografici [12 e 19] ma rispettano in proporzione la forma del difetto. La geometria di riferimento del modello è quella di Fig. 4 con un rapporto fra i diametri dei fori  $D_1/D_2=1$  e ad un angolo  $\alpha$  di  $90^\circ$ .

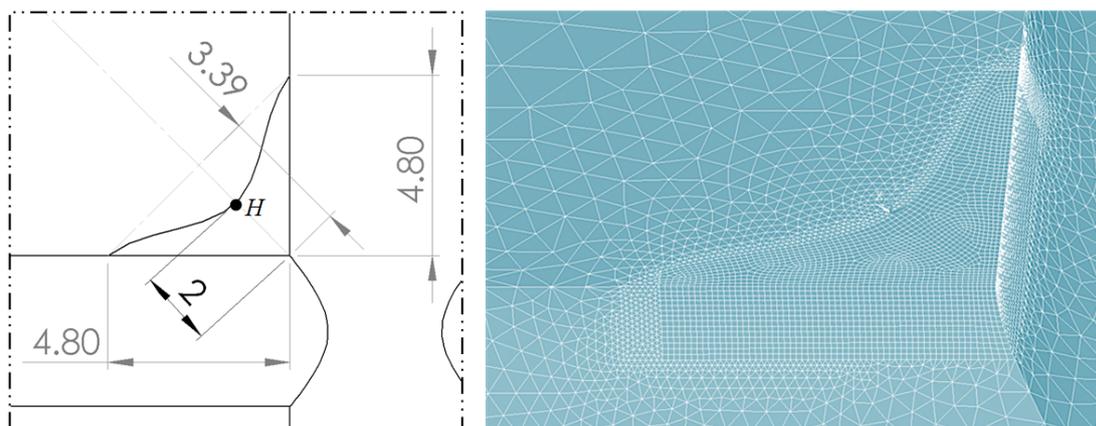


Figura 14: Rappresentazione di una cricca reale nucleata all'intersezione di due condotti cilindrici e relativo modello FEM tridimensionale.

Figure 14: Actual crack shape at the bore intersection and three-dimensional FE model.

Descrizione problema	Risultati	Errore		
	$D_1/D_2=1$ $p_1=1\text{ MPa}$ $\alpha=90^\circ$		$K_{I,FEM} = 1.71$ $K_{I,w} = 1.60$	6%
	$D_1/D_2=2$ $p_1=1\text{ MPa}$ $\alpha=90^\circ$		$K_{I,FEM} = 2.12$ $K_{I,w} = 2.04$	4%
	$D_1/D_2=2$ $p_1=1\text{ MPa}$ $\alpha=60^\circ$		$K_{I,FEM} = 3.46$ $K_{I,w} = 3.27$	5%
	$D_1/D_2=2$ $p_1=1\text{ MPa}$ $\alpha=45^\circ$		$K_{I,FEM} = 3.11$ $K_{I,w} = 2.98$	4%
	$D_1/D_2=2$ $p_1=1\text{ MPa}$ $p_2=1.5\text{ MPa}$ $\alpha=60^\circ$		$K_{I,FEM} = 3.46$ $K_{I,w} = 3.27$	5%

Tabella 3: Verifiche con condizione di carico di pressione nei condotti.  
 Table 3: check for different pressure inside the bore.

Allo scopo di verificare l'approssimazione nel calcolare dello SIF nel punto H, al variare della dimensione della cricca di forma triangolare, si è costruito il modello FEM tridimensionale riportato in Fig. 14. Successivamente, imponendo una pressione unitaria sulla superficie del difetto, è stato calcolato numericamente lo SIF nel punto di controllo H. Il



confronto fra i valori ottenuti dello SIF per la cricca sagomata di Fig. 14 e quello di cricche aventi forma triangolare viene riportato in Tab. 4. L'uguaglianza dello SIF si ha per un valore di  $a$  pari a circa 2.5 mm. In questo caso le aree delle due tipologie di cricca sono di poco discosti fra loro.

$a$ [mm]	area [mm <sup>2</sup> ] cricca triangolare	area [mm <sup>2</sup> ] cricca reale	$K_I$ [MPa $\sqrt{mm}$ ] cricca triangolare Eq. (8)	$K_I$ [MPa $\sqrt{mm}$ ] cricca triangolare FEM	$K_I$ [MPa $\sqrt{mm}$ ] cricca sagomata FEM
2.00	4	6.65	1.53	1.54	1.73
2.50	6.3	-	1.73	1.73	-
3.39	12.5	-	2.05	1.97	-

Tabella 4: Confronto fra lo SIF di cricche di forma triangolare o sagomata (pressione costante sulla superficie della cricca pari ad 1 MPa).

Table 4: Comparison between the SIF of a triangular crack and that of a crack with an actual shape (constant pressure on the surface crack equal to 1 MPa).

## CONCLUSIONI

**N**el presente lavoro, dopo aver assunto una forma esemplificata di una cricca nucleata nel punto di intersezione di due condotti cilindrici in pressione, si è proposta una weight function per il calcolo dello Stress Intensity Factor (SIF) di modo I. Il confronto con i dati FEM ottenuto mettendo in pressione i due condotti, ha evidenziato errori, in media, del 5 %. La weight function proposta permette di valutare lo SIF di una cricca d'angolo in modo estremamente rapido mostrandosi uno strumento di calcolo particolarmente utile per valutare l'influenza delle tensioni residue indotte da un processo di autofrettaggio.

## RINGRAZIAMENTI

**S**i ringrazia la O.M.T. di Torino per il supporto alle attività di ricerca.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Herz, E., Hertel, O., Vormwald, M., Thumser, R., Bergmann J.W. , Fatigue life of high pressure diesel injection components under variable amplitude loading, In: Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading, 2 (2009) 1265-1274.
- [2] Seeger, T., Schon, M., Bergmann, J., Vormwald, M., Autofrettage I-Dauer – festigkeitssteigerung durch Autofrettage, Abschluß bericht Heft. 550, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), Frankfurt, Vorhaben 478, (1994).
- [3] Thumser, R., Bergmann, J.W., Vormwald, M., Residual stress field and fatigue analysis of Autofrettaged parts, Int Journal of Pressure Vessels and Piping, 79 (2002) 113-117.
- [4] Livieri, P., Lazzarin P., Autofrettaged cylindrical vessels and Bauschinger effect: an analytical frame for evaluating residual stress distributions, ASME- Journal of Pressure Vessel Technology, 124 (2002) 38-46.
- [5] Adibi-Asl, R., Livieri, P., Analytical Approach in Autofrettaged Spherical Pressure Vessels Considering the Bauschinger Effect, ASME- Journal of Pressure Vessel Technology, 129 (2007) 411-419.
- [6] Livieri, P., Segala, F., First Order Oore-Burns integral for nearly circular cracks under uniform tensile loading, International Journal of Solids and Structures, 47(9) (2010) 1167-1176.
- [7] Livieri, P. Segala, F., An analysis of three-dimensional planar embedded cracks subjected to uniform tensile stress, Engineering Fracture Mechanics, 77 (2010) 1656-1664.
- [8] Shen, G., Glinka, G., Weight function for a surface semi-elliptical crack in a finite thickness plates, Theoretical Applied Fracture Mechanics, 15 (1991) 247-255.



- [9] Sha, G. T., Yang, C. T., Weight function of radial cracks emanating from a circular hole in a plate, ASTM. – Philadelphia, (1986) 573-600.
- [10] Tada, H., Paris, P., Irwin, G., The Stress Analysis of Cracks handbook, 2nd edition, Paris Productions Incorporated, St. Luis, Missouri, 8.3 (1985).
- [11] Murakami Y., Stress Intensity Factor handbook, Pergamon press, Oxford (1987).
- [12] Herz, E., Hertel, O., Vormwald M., Numerical simulation of plasticity induced fatigue crack opening and closure for autofrettaged intersecting holes, Engineering Fracture Mechanics, 78 (2011) 559-572.
- [13] H.F. Bueckner, A novel principle for the computation of Stress Intensity Factors, Zeitschrift Angewandte Mathematik und Mechanik, 50 (1970) 529-546.
- [14] Rice J., Some remarks on elastic crack-tip stress field, Int. J. of Solids Struct., 8 (1972) 751-758.
- [15] Niu, X., Glinka G., Weight function for edge and surface semi-elliptical cracks in flat plates and plates with corners. Engng Fracture Mech., 36 (1990) 459-476.
- [16] Petroski, H. Y., Achenbach F.D., Computation of the weight function from a stress intensity factor, Engng. Fracture Mech., 10 (1978) 257-266.
- [17] Glinka, G. Shen G., Universal features of weight functions for cracks in mode I, Department of Mechanics Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada N2L3G1, Engng Fracture Mech., 40(6) (1991) 1135-1146.
- [18] ANSYS Online Manuals Release 5.5, Structural, Chapter 10: Fracture Mechanics (UP19980818) - [http://mostreal.sk/html/guide\\_55/g-str/GSTR10.htm](http://mostreal.sk/html/guide_55/g-str/GSTR10.htm) (2013).
- [19] Thumser, R., Numerical Stability of Plane Crack Paths under Mode I Loading, Crack Paths, In: CP2012, Gaeta, Italy (2012) 943-950.