

## 6 STUDIO DI UNA CRICCA BIDIMENSIONALE SEMIELLITTICA

### 6.1 INTRODUZIONE

Come si è visto nel capitolo 3 le pubblicazioni dell'IAEA relative all'analisi di PTS su impianti WWER-1000 [5] prevedono di effettuare lo studio di cricche semiellittiche o ellittiche con appropriato rapporto di aspetto, tramite le tecniche della meccanica della frattura.

In particolare per *vessel* “nudo” (senza *cladding*) le “*Guidelines*” postulano un difetto superficiale semiellittico, con profondità fino a 1/4 dello spessore della parete e con rapporto di aspetto ( $a/c$ , dove  $a$  è il semiasse minore e  $c$  è il semiasse maggiore dell'ellisse, figura 6.1) variabile da 0.3 a 0.7.

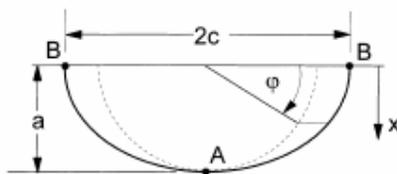


Fig. 6.1 schema della cricca semiellittica

Sulla base di tali considerazioni, al fine di avere una ulteriore conferma sulla “conservatività” dei risultati ottenuti con l'analisi della cricca monodimensionale (capitolo 5), si è proceduto allo studio di un difetto bidimensionale semiellittico assiale (disposto cioè col suo asse maggiore parallelo all'asse del *vessel* e sollecitato quindi nel suo modo di apertura dalle sole tensioni circonferenziali). Si è scelta una cricca con semiasse minore ( $a$ ) pari a 7 - 16 - 73 mm e rapporto di aspetto ( $a/c$ ) di 0.5 - 0.3 - 0.5 rispettivamente.

L'analisi non ha preso in esame la presenza del *cladding*, mentre è stato tenuto in considerazione il contributo della pressione del fluido primario all'apertura dei lembi della cricca.

### 6.2 METODO DI CALCOLO

Il metodo di calcolo è analogo a quello utilizzato per la cricca monodimensionale (Relap → Ansys → Mathcad, capitolo 5) con però l'utilizzo di una appropriata funzione di forma per determinare il valore dello *Stress Intensification Factor* [2].

Visto l'elevato spessore e l'ampio raggio di curvatura della parete del *vessel* (in relazione alla profondità del difetto) si è applicata la teoria relativa a cricca bidimensionale su piastra piana. Il KI è calcolato suddividendo la distribuzione di tensione circonferenziale in prossimità della cricca in una componente costante membranale più una componente flessionale variabile linearmente nello spessore; in tale ottica sono possibili 3 diverse approssimazioni della curva di tensione, schematicamente riportati nella figura 6.2.

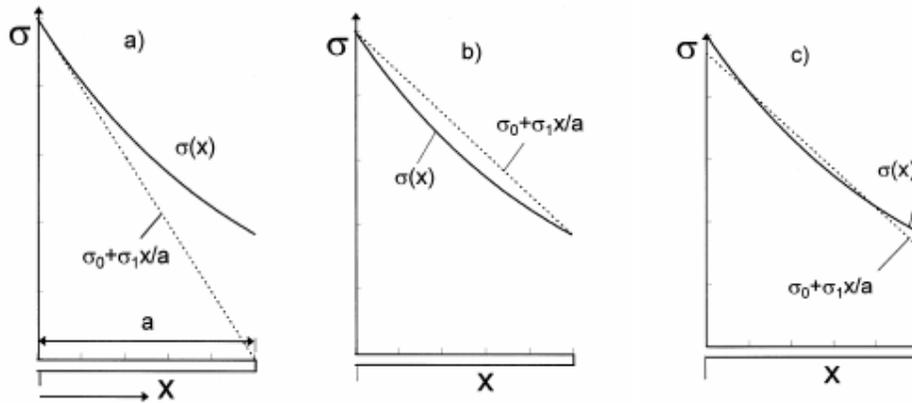


Fig. 6.2 a) lower bound b) upper bound c) miglior approssimazione

Nel presente lavoro si è utilizzata una stima dell'andamento delle tensioni basata sulla costruzione della retta dei minimi quadrati, ottenendo così risultati intermedi fra una approssimazione di tipo "lower bound" e una di tipo "upper bound". La struttura della funzione di forma è riportata di seguito.

Vengono definiti i seguenti parametri ausiliari:

$$\beta(a, c) := \frac{a}{c}$$

$$\alpha(a, w) := \frac{a}{w}$$

$$b(w) := \frac{w}{2}$$

dove  $\beta$  è il rapporto di aspetto e  $w$  è lo spessore del vessel.

Vengono poi introdotte le seguenti funzioni:

$$k(a, c) := \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2}$$

$$E(a, c) := \left(1 + 1.4637k(a, c)^{1.6507}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$M1(a, c) := 1.13 - 0.09\beta(a, c)$$

$$M2(a, c) := -0.54 + \frac{0.89}{(0.2 + \beta(a, c))}$$

$$M3(a, c) := 14(1 - \beta(a, c))^{24} + 0.5 - \frac{1}{(0.65 + \beta(a, c))}$$

$$f(\phi, a, c) := \left[\beta(a, c)^2 \cdot (\cos(\phi))^2 + (\sin(\phi))^2\right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{dove } \phi \text{ è l'angolo indicato in fig. 6.1}$$

$$g(\phi, a, w) := 1 + (0.1 + 0.35\alpha(a, w)^2) \cdot (1 - \sin(\phi))^2$$

$$fw(a, c, w) := \left( \sec \left( \frac{\pi c \cdot \sqrt{\alpha(a, w)}}{2 \cdot b(w)} \right) \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$p(a, c, w) := 0.2 + \beta(a, c) + 0.6 \alpha(a, w)$$

$$G1(a, c) := -1.22 - 0.12 \beta(a, c)$$

$$G2(a, c) := 0.55 - 1.05 \beta(a, c)^{\frac{3}{4}} + 0.47 \beta(a, c)^{\frac{3}{2}}$$

$$H1(a, w, c) := 1 - 0.34 \alpha(a, w) - 0.11 \alpha(a, w) \cdot \beta(a, c)$$

$$H2(a, w, c) := 1 + G1(a, c) \cdot \alpha(a, w) + G2(a, c) \cdot \alpha(a, w)^2$$

$$H(a, w, c, \phi) := H1(a, w, c) + (H2(a, w, c) - H1(a, w, c)) \cdot (\sin(\phi))^{p(a, c, w)}$$

$$F(a, w, c, \phi) := (M1(a, c) + M2(a, c) \cdot \alpha(a, w)^2 + M3(a, c) \cdot \alpha(a, w)^4) \cdot f(\phi, a, w) \cdot g(\phi, a, w) \cdot fw(a, c, w)$$

approssimata quindi la tensione circonferenziale con la retta dei minimi quadrati, e scomposta quest'ultima in una componente costante  $\sigma_0$  e in una componente variabile linearmente nello spessore di intensità massima  $\sigma_1$ , il KI viene determinato con la seguente relazione:

$$KI(\sigma_0, \sigma_1, a, w, c, \phi) := \left[ (\sigma_0 + H(a, w, c, \phi) \cdot \sigma_1) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \right] \cdot \frac{F(a, w, c, \phi)}{E(a, c)} \quad (1)$$

La (1), variando opportunamente l'angolo  $\Phi$ , consente di determinare il SIF in ogni punto del fronte della cricca. L'analisi in particolare è stata condotta considerando i punti corrispondenti all'apice della cricca (punto A di figura 6.1 ottenibile dalla (1) per  $\Phi = \pi/2$ ) e al bordo di intersezione fra cricca e parete (punto B di figura 6.1 ottenibile dalla (1) per  $\Phi = 0$ ).

Il punto A, nonostante sia situato nella zona del materiale in cui la tenacità è più elevata (cfr. par. 1.2, capitolo 1), può essere sede di propagazione instabile del difetto dal momento che in tale zona il valore del KI, proporzionale a  $\sqrt{\pi \cdot a}$ , è sufficientemente elevato.

Anche il punto B può essere sede di propagazione instabile dal momento che in tale zona la tenacità è bassa per l'effetto combinato dell'irraggiamento neutronico e del gradiente di temperatura sfavorevole.

Occorre osservare che nella relazione che fornisce il KI critico di riferimento

$$K_{IC} = \min \{ 26 + 36e^{0.02(T-T_K)}, 200 \} \quad (2)$$

il valore di T viene opportunamente calcolato; ciò vuol dire che se prendiamo in considerazione la propagazione instabile della cricca nel punto A introduciamo nella (2) i valori della temperatura all'apice della cricca, mentre se analizziamo il comportamento nel punto B introduciamo i valori della temperatura corrispondente alla superficie del *vessel*. Visto l'elevato gradiente termico fra zona superficiale della parete e zona interna (fig. 6.3) avremo, a parità di RNDT, valori più bassi del KI critico calcolato per il punto B rispetto al KI critico calcolato per l'apice della cricca. Ciò implica che la condizione di propagazione instabile nel punto B si raggiunge per RNDT inferiori rispetto alla RNDT corrispondente alla propagazione instabile all'apice; il fenomeno è particolarmente evidente per la cricca da 73 mm (cfr. par. 6.33).

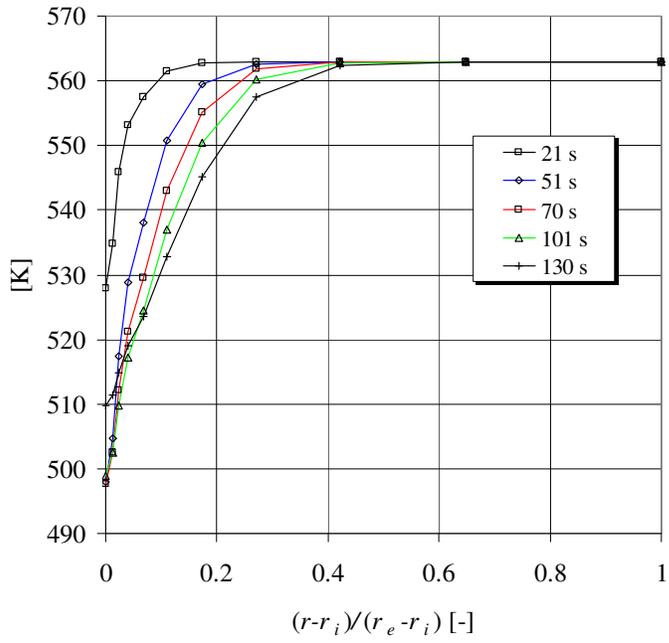


Fig. 6.3 andamento della distribuzione di temperatura nel vessel a vari istanti

## 6.3 RISULTATI

Nel presente paragrafo vengono riportati prima i grafici relativi al KI effettivo e successivamente i grafici relativi al KI calcolato secondo le “IAEA Guidelines”, ovvero tenendo in considerazione gli appositi fattori di sicurezza per piccoli difetti (nel nostro caso i fattori correttivi sono stati applicati alla cricca da 7 e da 16 mm). L’andamento del KI relativo all’apice della cricca (punto A di fig. 6.1) e alla zona superficiale (punto B di fig. 6.1) sono riportati per chiarezza in grafici separati.

Per la cricca da 16 mm si è verificato, conformemente alle raccomandazioni dell’IAEA (cfr. par. 6.3.2), che la condizione più cautelativa si verifica calcolando il SIF come se la cricca avesse semiasse minore raddoppiato ( $a = 32$  mm). Si è comunque scelto in via cautelativa di introdurre nella (2) la temperatura corrispondente all’apice della cricca originaria ( $a = 16$  mm), dal momento che nella zona più superficiale del *vessel* il gradiente termico determina una tenacità del materiale inferiore.

### 6.3.1 cricca bidimensionale da 7 mm

Le figure seguenti (fig. 6.4 e 6.5 ) riportano l’andamento del SIF per una cricca bidimensionale avente  $a = 7$  mm e  $a/c = 0.5$  (fig.6.1). Si è riportato il KI critico corrispondente a  $RNDT = 280^{\circ}\text{C}$ , valore che assicura la tangenza per il KI valutato all’apice.

Il valore massimo del KI, pari a circa  $42.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , si raggiunge all’apice della cricca (punto A) dopo 50 secondi dall’inizio del transitorio (fig. 6.4); nel punto B il valore più elevato vale circa  $7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (fig.6.5).

La figura 6.6 riporta il confronto fra gli andamenti del KI per la cricca bidimensionale e per la cricca monodimensionale da 7 mm (cfr. par. 5.7.4, capitolo 5). Si può osservare che lo *Stress Intensification Factor* per la cricca bidimensionale assume valori inferiori rispetto al SIF della corrispondente cricca monodimensionale. Il SIF massimo per la cricca bidimensionale (all’apice) assume difatti un valore inferiore di circa il 35% rispetto al valore di picco dell’analoga cricca monodimensionale da 7 mm ( $57.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  dopo 81 secondi dall’inizio del transitorio).

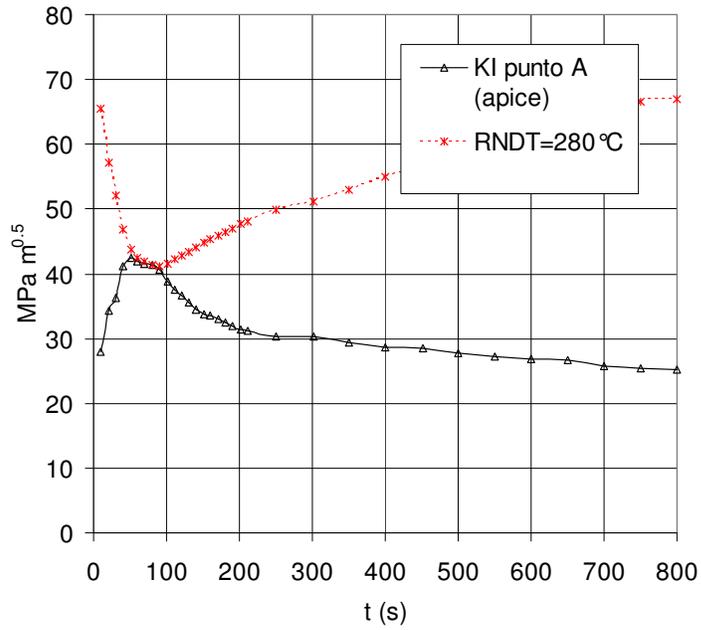


Fig.6.4 andamento del SIF all'apice per la cricca bidimensionale da 7 mm

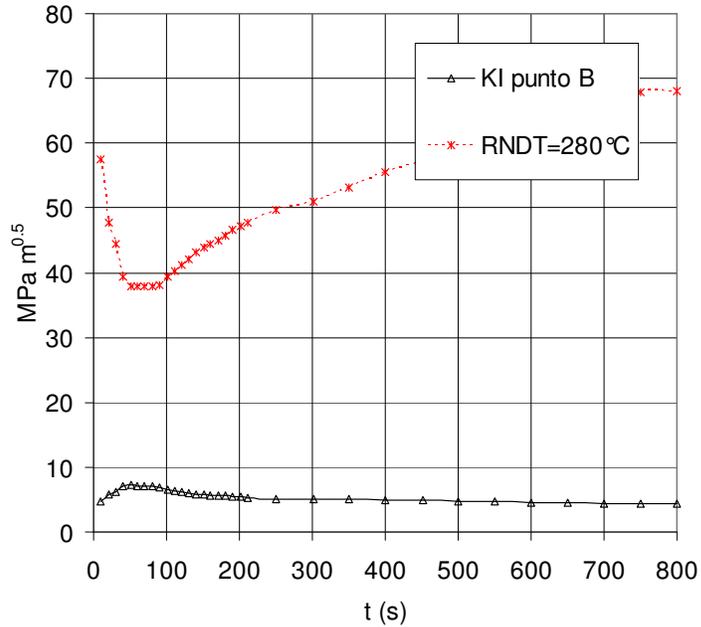


Fig.6.5 andamento del SIF nel punto B per la cricca bidimensionale da 7 mm

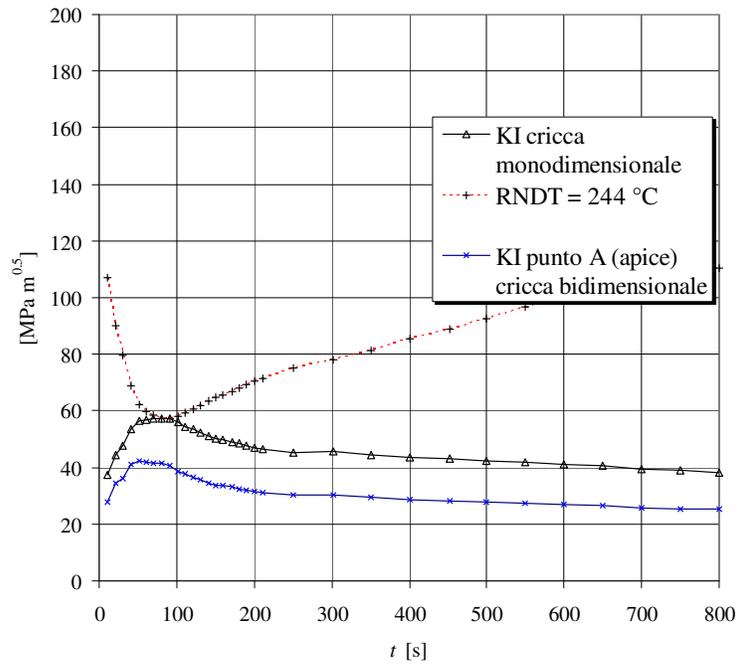


Fig. 6.6 confronto fra il KI all'apice della cricca bidimensionale da 7 mm e la cricca monodimensionale da 7 mm

Secondo le “IAEA Guidelines” (cfr. par. 3.4, capitolo 3) per difetti poco profondi ( $< 1/4$  dello spessore del *vessel*) è necessario tener conto delle incertezze nell’analisi di PTS tramite appositi fattori di sicurezza che, nel caso di un incidente di progetto come il MSLB, oltre ad una riduzione della RNDT di un fattore  $\Delta T$  prevedono o il raddoppio delle dimensioni della cricca o l’aumento del SIF di una certa quantità. Prove effettuate hanno dimostrato che la situazione più cautelativa (ovvero quella che fornisce i valori più elevati del SIF) per la cricca da 7 mm prevede di considerare un coefficiente di sicurezza pari a  $\sqrt{2}$  per valutare il KI in corrispondenza dell’apice e di considerare una cricca virtualmente raddoppiata per valutare il KI nel punto B. Le figure 6.7 e 6.8 mostrano l’andamento del SIF per la cricca bidimensionale da 7 mm, all’apice e nel punto B, considerando appunto i fattori di sicurezza. Il valore massimo del SIF vale  $58 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  all’apice e  $14 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  nel punto B. La RNDT, pari a  $232^\circ\text{C}$  per il punto A, è stata calcolata tenendo in considerazione il fattore  $\Delta T$  pari a  $10^\circ\text{C}$ . Il punto B mostra dei valori del SIF molto basso, per cui il difetto non propaga in direzione del semiasse maggiore.

Riportando l’andamento del SIF nel punto A in funzione della temperatura (fig 6.9) si può osservare anche per il difetto semiellittico il particolare andamento circolare determinato dal transitorio termoidraulico considerato (cfr. par. 5.7.5).

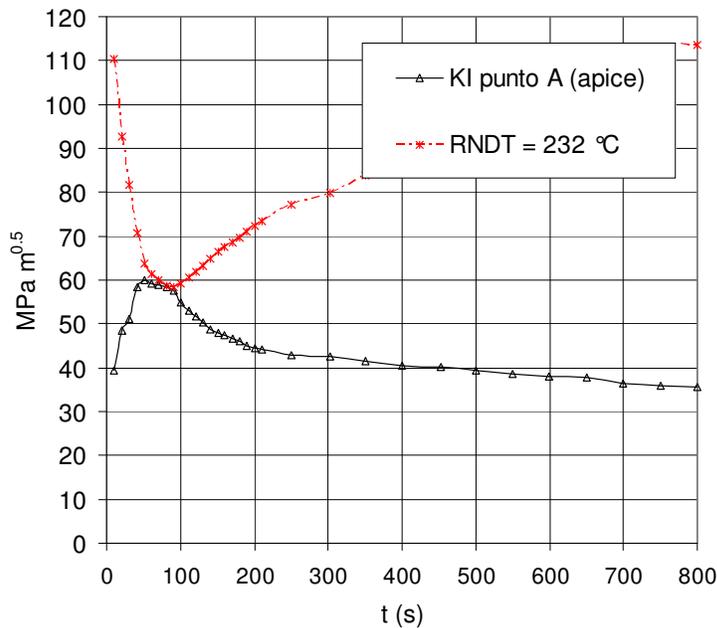


Fig. 6.7 andamento del SIF all’apice per la cricca bidimensionale da 7 mm secondo le IAEA Guidelines

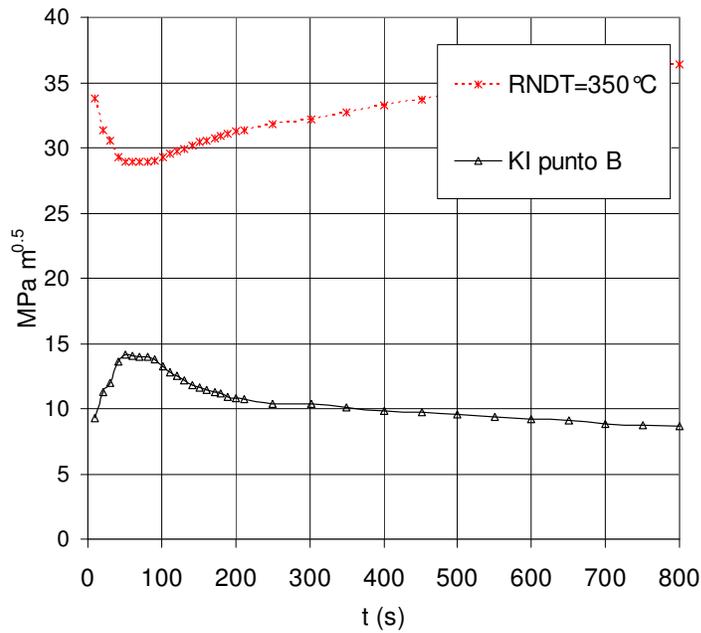


Fig.6.8 andamento del SIF nel punto B per la cricca bidimensionale da 7 mm secondo le IAEA Guidelines

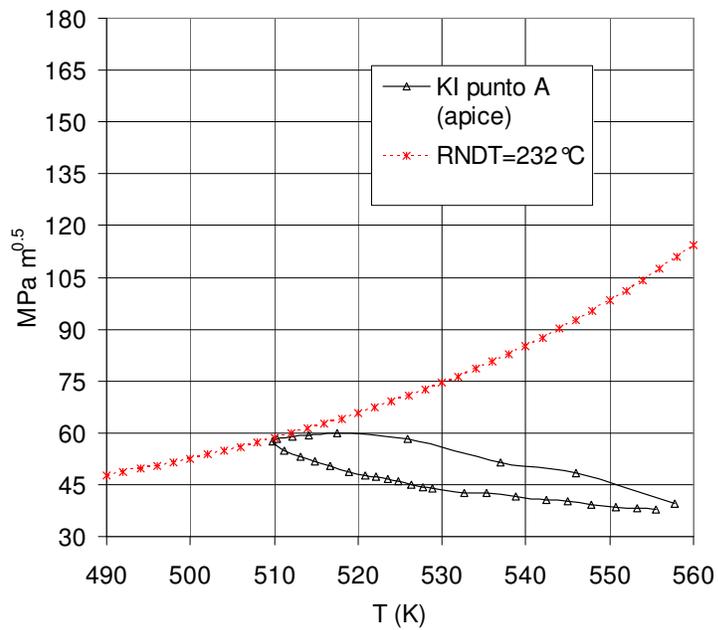


Fig. 6.9 andamento del SIF nel punto A (apice) per la cricca da 7 mm in funzione della temperatura

### 6.3.2 cricca bidimensionale da 16 mm

I grafici seguenti (da fig. 6.10 a fig 6.13) riportano l'andamento del SIF per una cricca bidimensionale avente  $a = 16 \text{ mm}$  e  $a/c = 0.3$ . Verifiche effettuate hanno mostrato che la condizioni più cautelativa, secondo le IAEA, prevede di considerare il KI relativo ad una cricca con semiasse minore raddoppiato. In tal caso il SIF raggiunge il valore massimo di  $85 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  in corrispondenza dell'apice della cricca (fig. 6.10), mentre nel punto B si raggiunge il valore massimo di  $32 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (fig. 6.11). La propagazione instabile avviene prima in direzione del semiasse minore (apice) per  $\text{RNDT}=214^\circ\text{C}$  (considerando il fattore di sicurezza  $\Delta T=10^\circ\text{C}$ ). Le figure 6.10 e 6.12 riportano rispettivamente l'andamento del KI all'apice e nel punto B in funzione della temperatura.

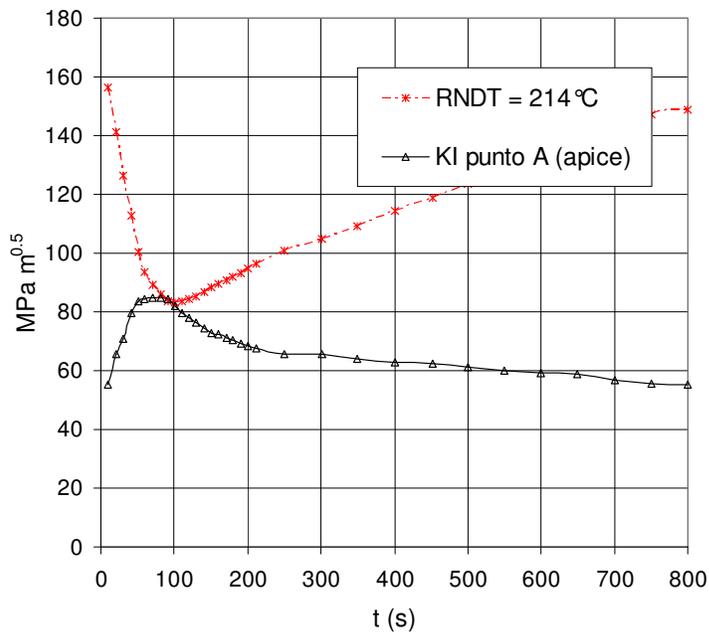


Fig.6.10 andamento del SIF all'apice per la cricca bidimensionale da 16 mm secondo le IAEA Guidelines

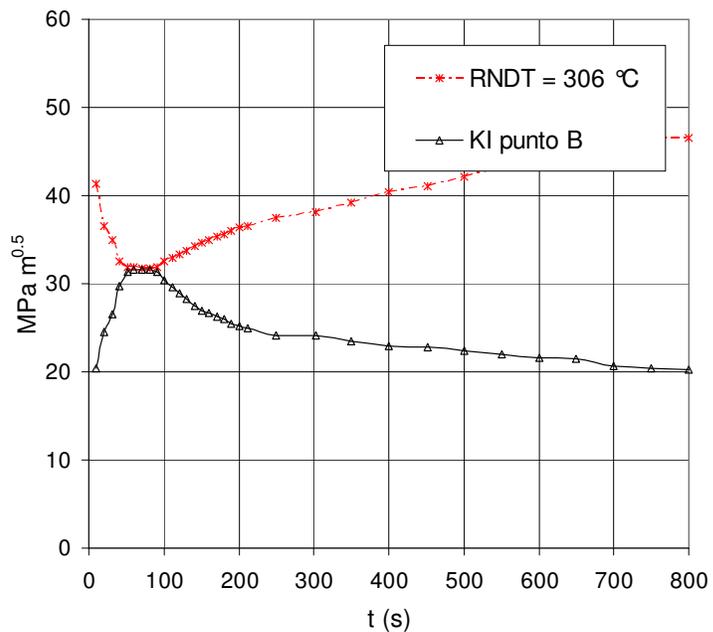


Fig. 6.11 andamento del SIF nel punto B per la cricca bidimensionale da 16 mm secondo le IAEA Guidelines

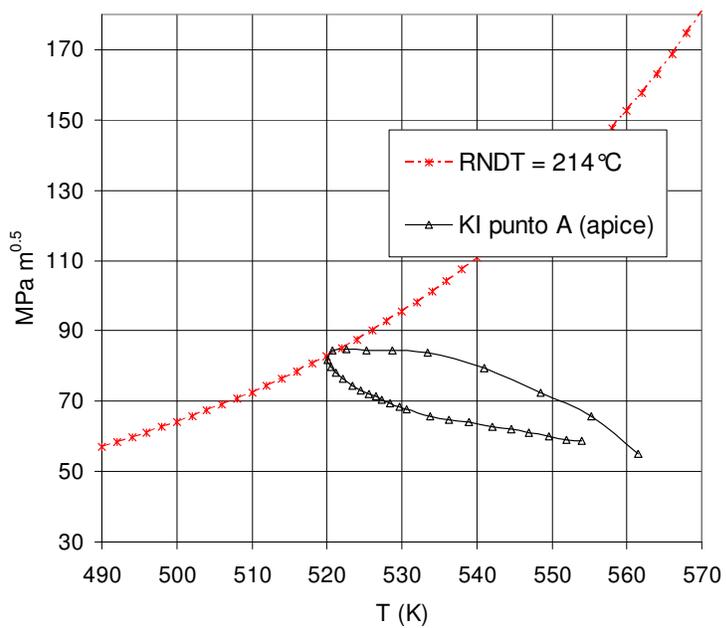


Fig. 6.12 andamento del SIF nel punto A (apice) per la cricca da 16 mm in funzione della temperatura

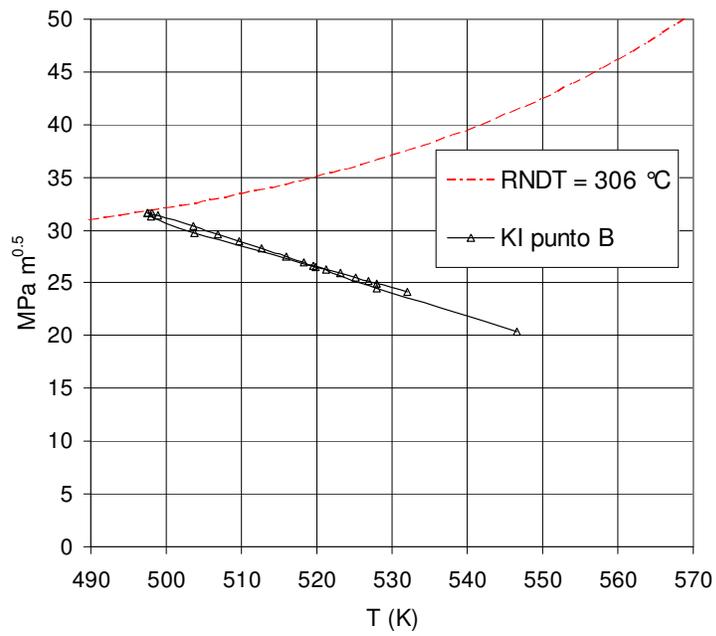


Fig. 6.13 andamento del SIF nel punto B per la cricca da 16 mm in funzione della temperatura

### 6.3.3 cricca bidimensionale da 73 mm

I grafici seguenti riportano l'andamento del SIF per una cricca bidimensionale avente  $a = 73 \text{ mm}$  e  $a/c = 0.5$ . Per la suddetta cricca le IAEA impongono di considerare un fattore correttivo pari a 1 e un  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ , ovvero di calcolare il KI e la RNDT effettiva (cfr. par. 3.4, capitolo 3). Come si può osservare dalle figure 6.14 e 6.15 si raggiunge la condizione di propagazione instabile quando  $RNDT = 228^\circ\text{C}$  per il punto A (apice) e quando  $RNDT = 204^\circ\text{C}$  per il punto B. I valori massimi del SIF sono  $134$  e  $81 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  per l'apice e per il punto B rispettivamente. L'analisi di figura 6.16, riportante in uno stesso grafico il KI e il KI critico per il punto A e per il punto B, mostra che a parità di RNDT la cricca tende a propagare instabilmente prima in direzione del semiasse maggiore (punto B) e successivamente in direzione del semiasse minore (apice).

Le figure 6.17 e 6.18 riportano l'andamento del KI in funzione della temperatura.

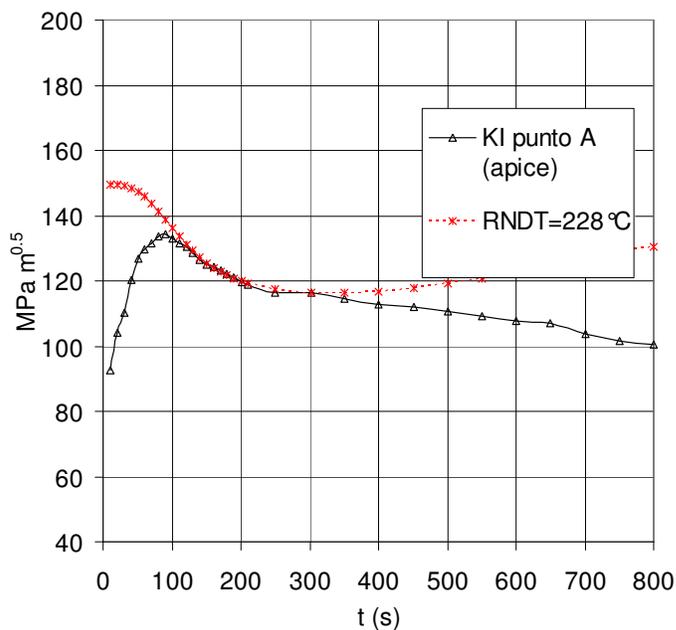


Fig. 6.14 andamento del SIF all'apice per la cricca bidimensionale da 73 mm

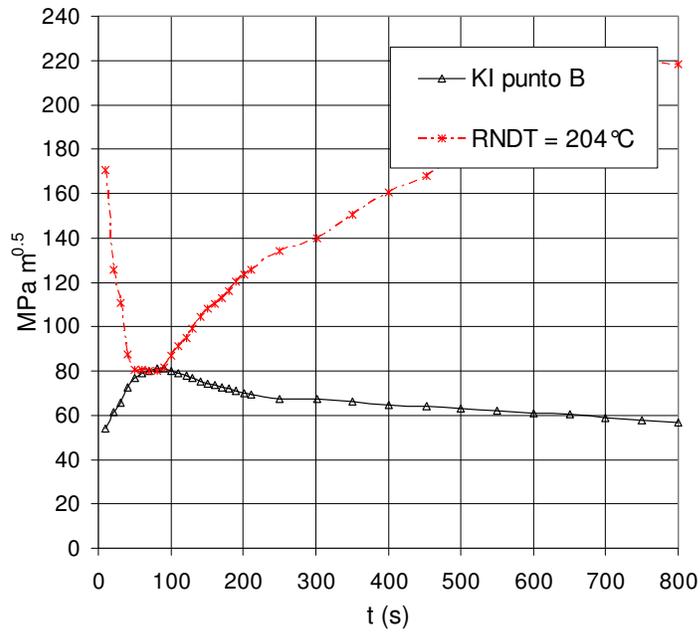


Fig. 6.15 andamento del SIF nel punto B per la cricca bidimensionale da 73 mm

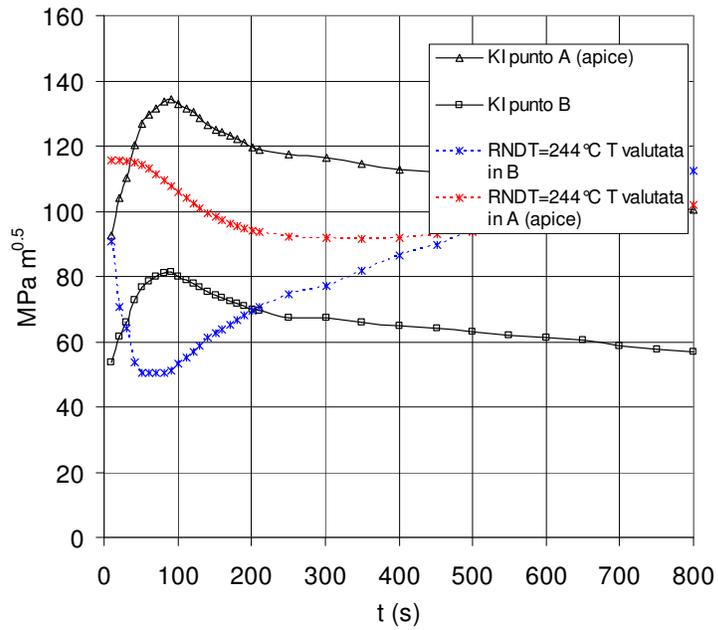


Fig. 6.16 confronto fra i KI nei punti A e B per la cricca da 73 mm a parità di RNDT

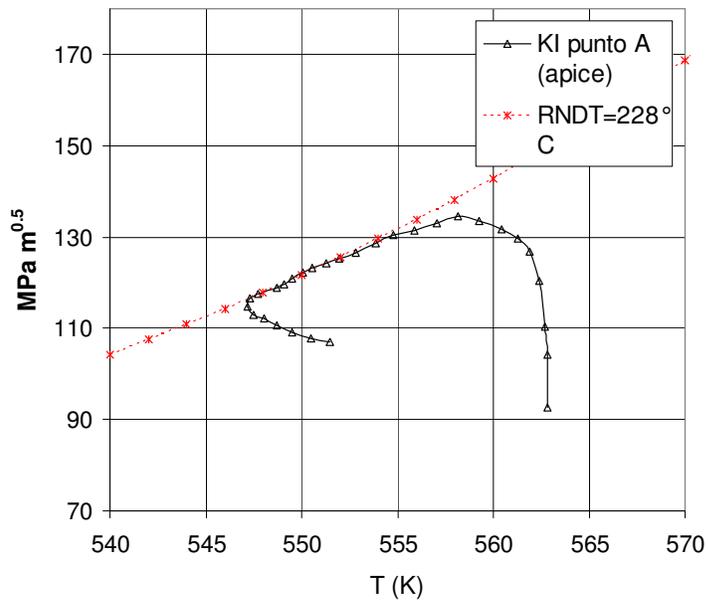


Fig. 6.17 andamento del SIF nel punto A (apice) per la cricca da 73 mm in funzione della temperatura

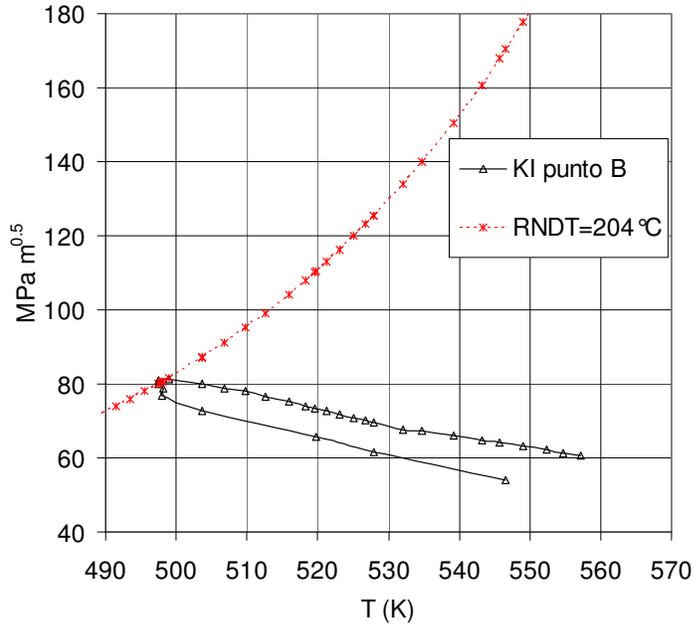


Fig. 6.18 andamento del SIF nel punto B per la cricca da 73 mm in funzione della temperatura