

TENACITA' IN REGIME FRAGILE-DUTTILE: ANALISI DI UNA PROPOSTA ASTM DI CURVA UNIVERSALE

V. Bicego, A. Elli
CISE spa, Segrate, Milano - I

SOMMARIO Viene analizzata l'applicabilità di una relazione di tipo universale, in via di considerazione da parte ASTM (norma allo stato di tentativo) per descrivere l'andamento della tenacità degli acciai ferritici (di ogni tipo) nella zona della transizione fragile-duttile. In questo lavoro vengono riportati confronti con andamenti reali (tenacità in funzione della temperatura). In due dei tre casi esaminati l'andamento previsto dalla curva universale costituisce un'ottima approssimazione delle curve sperimentali, mentre nel terzo caso il concetto di curva universale è causa di decisa non-conservatività.

INTRODUZIONE

E' in fase di preparazione in ambito ASTM una nuova normativa per prove di meccanica della frattura in regime di transizione fragile - duttile /1/. In aggiunta ai classici aspetti legati alle procedure sperimentali adatte ad assicurare l'ottenimento di buoni dati, sono considerati anche aspetti dell'elaborazione statistica dei dati, arrivando a definire linee guida per la derivazione, dai dati delle singole prove, di curve medie e curve con qualsivoglia livello definito di probabilità di frattura. Si tratta di elaborazioni ovviamente di grande importanza per l'utilizzatore finale di quelle misure. In particolare viene anche indicato il modo di derivare una curva (mediana) di tenacità, funzione della temperatura (viene utilizzato il concetto della "Excess Temperature" /2/,/3/), che si intende rappresentativa del comportamento in transizione degli acciai ferritici. In sostanza, pur con l'avvertenza (poco enfatizzata per la verità) che talora il metodo proposto potrebbe non funzionare, viene suggerita l'esistenza di un comportamento simile per tutti questi acciai, appartenenti a colate diverse e addirittura di diverso tipo. Per valutare la bontà di quell'approccio generalizzato, in questo lavoro gli autori hanno cercato di eseguire dei confronti fra curve mediane rappresentative di reali andamenti sperimentali tenacità - temperatura, ricavati mediante best fit dei dati di prove a diverse temperature nella regione della transizione, e la curva universale proposta nella bozza di norma ASTM.

GENERALITA' SULLA TRANSIZIONE FRAGILE-DUTTILE DEGLI ACCIAI

Caratteristica saliente del comportamento (tenacità alla frattura) degli acciai

ferritici di componenti d'impianti per alta temperatura è la presenza di un campo di temperatura nel quale si manifesta la transizione fragile-duttile. La fenomenologia tipica consiste in rotture per clivaggio che possono avvenire durante la fase di blunting (in regime LEFM o EPFM), o durante la fase di tearing duttile (cioè dopo una fase di più o meno limitata crescita sottocritica della cricca). In regime di transizione i dati di tenacità dalle prove effettuate nei laboratori sono sempre molto dispersi. Prescindendo dalle questioni relative a differenze nelle procedure e dotazioni strumentali, la dispersione è dovuta a:

- diverso grado di triassialità (vincolo, "constraint"), se si usano campioni diversi,
- diversità accentuata di comportamento fra lotti diversi di uno stesso acciaio,
- dispersione intrinseca.

I primi due aspetti sono di tipo deterministico e sono oggetto di specifici metodi di trattazione: non si parlerà di tali aspetti in questo lavoro. Chi fa prove vede invece soprattutto l'ultimo aspetto: riceve un certo lotto di materiale e deve, da una serie di prove standard, ricavare dei dati. Le prove pur uguali danno luogo a valori scatterati. Il laboratorio deve fornire valori per il comportamento medio e deve quantificare la dispersione. Spesso deve anche fornire delle curve di lower bound, con probabilità definita di frattura. Nasce il problema di quale sia il modello probabilistico corretto da usare. Su questo la letteratura è molto impegnata. ASTM in particolare, occupandosi di chi esegue le prove, ha in sviluppo una procedura per l'esecuzione di prove di tenacità in transizione e anche linee per ricavare valori mediani e a qualunque altro livello di probabilità. Sono previsti campioni Compact Tension (non viene trattato il modo come tali dati debbano essere convertiti, quando il progettista si trova a dovere usare quei dati per trattare una generica struttura con uno stato di carico (constraint) diverso). Il modello statistico considerato da ASTM è del tipo di Weibull, derivabile dalla teoria Weakest Link /4/. Diversamente da molti studi europei sulla transizione, non viene esplicitamente trattato il ruolo del tearing duttile (per l'entità del quale viene comunque posto un limite, oltre il quale i dati non sono trattabili con questa norma). Infine le sopravvivenze dei campioni (non-rotture entro il campo di validità delle prove, o "run out") vengono trattate come prove non fatte (ci sarebbe molto da discutere sulla correttezza di quest'ultimo criterio, ma per ragioni di spazio, e anche perchè questa particolarità non ha un peso determinante nelle analisi che seguono, non si tratterà qui di questo pur interessantissimo aspetto). In tali ipotesi, ASTM indica come derivare una "Master curve" (curva universale):

- si determina dapprima il valore K_0 della distribuzione di Weibull su un insieme di pochi (almeno sei) dati di K_{J_0} , per campioni con spessore $B = B_0$, provati ad una temperatura T_p prossima a quella di transizione;
- si calcola un valore "mediano", $K_{J_{med}}$ (MPa \sqrt{m}), corrispondente ad una probabilità cumulativa di frattura $P_f = 0.5$, con la formula:

$$K_{J_{med}} = 20 + (K_0 - 20) (\ln 2)^{(1/4)} \quad (1)$$

dove 20 è un valore minimo di tenacità.

- Si calcola una temperatura di transizione T_0 dalla formula:

$$T_0 = T_p - \frac{1}{0.019} \ln \left(\frac{K_{J_{med}} - 30}{70} \right) \quad (2)$$

- La Master curve è quindi data dall'espressione:

$$K_{Jmed}(T) = 30 + 70 \exp [0.019 (T - T_0)] \quad (3)$$

- Per altri spessori B_x , i singoli valori K_{Jmed} possono essere ricavati dalla seguente legge:

$$K_{Jmed_x} = 20 + (K_{Jmed} - 20) \left(\frac{B_0}{B_x} \right)^{1/4} \quad (4)$$

La diversità per i vari tipi di acciaio, così come la variabilità fra colata e colata, sono tenute in conto dalla temperatura di transizione T_0 , che è una caratteristica del materiale; ma a parte questo fattore "di shift", la curva ha poi una forma universale. E' evidente che se è vero che esiste un tale andamento universale, risulta allora superfluo caratterizzare sperimentalmente tutta la regione della transizione (cioè eseguire diverse prove di tenacità a varie temperature), per ricavare sperimentalmente l'andamento della tenacità con la temperatura: basta eseguire invece poche prove a una sola temperatura, ragionevolmente vicina a T_0 (così è spiegato nella norma), per ricavare T_0 e avere così tutta l'informazione che serve.

Il presente lavoro si propone di indagare, con riferimento a dati di talune prove già eseguite in passato al CISE, quanto un simile concetto di relazione universale sia effettivamente verificato. In sostanza si tratta di confrontare la Master curve ASTM con andamenti desunti da prove reali.

DATI SPERIMENTALI

Quali dati sperimentali si sono utilizzati i risultati di prove su due tipi di acciaio: un acciaio da rotore 1CrMoV e un acciaio da vessel SA533 gr.B cl.1.

L'attività sperimentale sull'acciaio 1CrMoV è consistita in prove nel campo delle temperature di transizione, su provini compact tension, C(T), di tre diversi spessori (da 10 a 100 mm), tutti con side grooves (20%) e con $a_0/W = 0.5$. Le prove di tenacità a frattura sono state condotte in parte dal CISE e in parte da GKSS (Forschungszentrum Geestacht GMBH), in Germania, seguendo le procedure stabilite da ESIS (ESIS P1-90).

I dati di tenacità a frattura dell'acciaio SA533B sono stati invece ottenuti da una campagna di caratterizzazione di lastre di tale acciaio svoltasi al CISE nel corso degli anni '80. In questo caso tutti i provini C(T) erano senza side grooves, tranne quelli provati a temperatura ambiente (20% side grooves). Le procedure seguite durante le prove sono state la ASTM E 813-89 e la ASTM E 1152-87 (rispettivamente per la determinazione del J_{IC} e delle curve J-R).

La composizione chimica e le principali proprietà meccaniche dei due acciai sono riportate in /5/.

CRITERI DELL'ANALISI PRESENTE

La Master curve ASTM è definita come curva mediana (corrispondente cioè ad una probabilità cumulativa di frattura del 50%) ed è dunque utile confrontare tale curva teorica con curve mediane ottenute best-fittando andamenti sperimentali. Parlare di curva mediana implica avere già in mente un qualche modello prescelto per descrivere la distribuzione di probabilità. In Europa da tempo si studiano diversi metodi per trattare l'andamento $K(T)$, e fornire curve probabilistiche. Il CISE in particolare ha sviluppato, partendo da uno di questi modelli proposto da Wallin /6/, un suo metodo /8/. Lo scopo è predittivo: si parte cioè da prove su piccoli campioni, per prevedere il comportamento di grandi spessori nei componenti. Nel presente lavoro non interessa tanto discutere della bontà o meno del metodo CISE; esso viene usato soprattutto in quanto fornisce uno strumento matematico per tracciare curve che best-fittano degli andamenti sperimentali della tenacità al crescere della temperatura. Particolare priorità verrà dunque data a questo aspetto: confronti fra curve universali ASTM e curve mediane ottenute best-fittando dati a varie temperature col modello CISE. Tuttavia i dati reali sono disponibili in numero significativo (come si dirà anche più avanti) solo per una certa dimensione dei campioni (per ognuno dei due acciai considerati). Quando i dati per un certo spessore dei campioni sono invece pochi, e non è dunque possibile ricavare delle buone curve mediane né con la procedura ASTM né con quella CISE, si opereranno confronti fra curve calibrate sulla dimensione più popolata, modificate per descrivere la nuova dimensione.

In conclusione, si opera nel seguente modo:

- Si considerano dati di prove su campioni Compact Tension su due acciai, 1CrMoV e SA533B, (per quest'ultimo, di due lastre distinte: X e W).
- I valori di T_0 , che è tutto ciò che definisce la curva universale ASTM, vengono ricavati per ciascun materiale da prove su campioni di un'unica dimensione, a una sola temperatura, quella per la quale i dati sono più numerosi: prove su campioni con $B = 10\text{mm}$ e $T = 80^\circ\text{C}$ per 1CrMoV, e prove con $B = 25.4\text{mm}$ e $T = -60^\circ\text{C}$ per SA533B (solo lastra X).
- Va rilevato che la proposta di norma ASTM qui considerata è ovviamente posteriore all'epoca di esecuzione di queste prove. Il piano di prove non risulta dunque ottimizzato rispetto all'esigenza di stimare dei buoni valori di T_0 . Il problema riguarda soprattutto i dati per SA533B, poco numerosi e non centrati nel mezzo della transizione come vorrebbe la norma. Di conseguenza, le stime di T_0 che si ottengono hanno un margine di possibile errore non trascurabile e difficilmente quantificabile (non comunque superiore, in base ai dati sperimentali, ai $20\text{-}25^\circ\text{C}$). E' importante tuttavia sottolineare che un diverso valore di T_0 significa solo una traslazione orizzontale della curva tenacità - temperatura, senza cambiarne l'andamento (ossia la forma della curva in transizione).
- Come detto, nel caso di SA533B i dati sono particolarmente limitati (per la lastra W, in particolare, si hanno solo alcuni dati allo spessore minimo di 25.4mm) e non ben centrati sulla transizione; il valore di T_0 risulta perciò scarsamente affidabile, a detta del draft ASTM. In tal caso si è quindi deciso di considerare nell'analisi anche il valore di T_0 ottenuto best-fittando con curve mediane i dati a tutte le temperature, e prendendo il valore in corrispondenza

- di $K_{J_{med}} = 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (via alternativa derivata considerando l' eq.3).
- Per ciascun materiale la curva ASTM è confrontata coi dati sperimentali alle varie temperature e con le curve mediane ottenute best-fittando i dati reali col modello CISE.
- A partire da tali curve calibrate sui dati con gli spessori sopra definiti, si ricavano poi anche le curve per gli altri spessori (per la Master curve ASTM mediante l'eq. 4; per il modello CISE dal modello stesso), che sono anche confrontate coi dati reali.
- Infine, scelto un valore unico dello spessore B, si graficano su un unico diagramma riassuntivo la curva universale ASTM e le tre curve che descrivono, secondo il modello CISE, le reali dipendenze dalla temperatura delle prove (per 1CrMoV e per le due lastre di SA533B).

BREVE DESCRIZIONE DEL MODELLO CISE

Presso il CISE è stato messo a punto un modello per la descrizione della variabilità intrinseca di dati di tenacità per acciai ferritici in transizione fragile-duttile. Esso è basato sulla combinazione di un metodo in letteratura (modello statistico di Weibull, opportunamente modificato per includere gli effetti della crescita duttile) e di un'accurata espressione per la curva J-R del materiale determinata da analisi frattografiche. Qui di seguito viene presentata una sommaria descrizione del modello, mentre per i dettagli si rimanda a /5/, /8/ e /9/.

Partendo dal semplice modello weakest link, per includere la perturbazione indotta dalla crescita duttile della cricca nel campo di sforzi che governa le probabilità di frattura in regime di transizione Wallin /6/ ha proposto la seguente semplice espressione:

$$P(K) = 1 - \exp \left[-\frac{B}{B_0} \left(\frac{K - K_{min}}{K_0 - K_{min}} \right)^4 \left(1 + \frac{2\Delta a \sigma_0^2}{\beta K^2} \right) \right] \quad (5)$$

dove σ_0 è il cosiddetto *flow stress* (valore medio tra σ_y e σ_{uts}) e β è una misura della distanza (normalizzata) del punto di sforzo massimo dall'apice della cricca /7/.

Poiché il termine Δa , lunghezza della cricca duttile, non è ovviamente noto prima dell'esecuzione della prova, l'eq. (5) non può fornire da sola previsioni di valori di tenacità. È necessario infatti poter disporre di una seconda equazione, che correli Δa con la tenacità. A tal scopo, il CISE ha sviluppato delle correlazioni tra i valori di J all'instabilità e i valori di talune caratteristiche, misurate frattograficamente sui provini rotti in transizione. In base a tali dati, la curva J-R può essere espressa in funzione della larghezza della *stretch zone*, misurata durante il blunting (SZW) o nel punto critico di inizio della cricca duttile (SZW_c), e di Δa :

$$\text{per } J/C_1 < \text{SZW}_c : \quad J = C_1 \cdot \text{SZW} \quad \text{e} \quad \Delta a = 0 \quad (6a)$$

$$\text{per } J/C_1 \geq \text{SZW}_c : \quad J = C_1 \cdot \text{SZW}_c + C_2 \cdot \Delta a^{c3} \quad (6b)$$

L' eq. (6a) si applica a provini rotti durante il blunting e l'eq. (6b) a provini

rotti dopo un certo tearing duttile.

Le eqq. (6) possono essere risolte per fornire valori di Δa in funzione di J o di K (Principio di Equivalenza della Meccanica della Frattura), valori che entrano poi nell'eq. (5), che fornisce la densità di probabilità di clivaggio. In tal modo, per ogni valore di temperatura è possibile ottenere le probabilità di clivaggio per provini di diversi spessori, purché a quelle date temperature siano noti i parametri del modello.

ANALISI

Il confronto fra Master curve e risultati sperimentali è stato dapprima effettuato per l'acciaio da rotore 1CrMoV. Si sono considerati 11 dati sperimentali alla temperatura di 80°C, su provini di spessore 10mm: si è così calcolata una temperatura di transizione T_0 di 56°C. Il confronto tra le curve ASTM (estrapolate anche per altri spessori) e corrispondenti curve mediane ottenute col modello CISE (calibrato sempre sui dati con $B = 10\text{mm}$ e poi estrapolato anche agli altri spessori) è riportato in Fig.1 per i tre spessori considerati (rispettivamente 10, 25 e 100 mm).

Analoghi andamenti per l'acciaio SA533B, lastra X, sono riportati nelle Figg. 2 e 3. L'analisi in questo caso considera curve calibrate su dati con $B = 25.4\text{mm}$ (i più numerosi) ed estrapolate anche agli altri spessori. Comunque a causa della scarsità di dati sperimentali disponibili, per l'ottenimento della Master curve si sono seguite due strade. La prima è consistita nel calcolare la temperatura di transizione T_0 interpolando tra i valori di $K_{J_{med}}$ ottenuti, per uno spessore di 25.4 mm, alle varie temperature: T_0 corrisponde alla temperatura per la quale $K_{J_{med}}$ è pari a $100\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (vedi eq. 3). Si è ottenuto per T_0 un valore di -118°C. I confronti tra gli andamenti teorici e sperimentali sono riportati in Fig. 2. In seconda istanza, T_0 è stata calcolata con il procedimento utilizzato per l'acciaio 1CrMoV (quello considerato canonico nella bozza di norma ASTM), utilizzando i sei dati sperimentali disponibili per la temperatura di -60°C relativamente ai provini di spessore 25.4mm. Il valore ottenuto per T_0 è di -94°C. Il confronto coi dati sperimentali è riportato in Fig. 3. Secondo il parere degli autori, il primo metodo di stima di T_0 è quello che probabilmente dà luogo al valore più affidabile, stante la scarsa numerosità dei dati considerati nella seconda procedura, e la "lontananza" della temperatura di quei dati dal centro della transizione (ASTM raccomanda appunto di usare dati il più possibile baricentrici).

La Fig. 4 riporta infine il confronto generale tra la Master curve ASTM e gli andamenti delle curve mediane, ottenute applicando il modello CISE (per l'acciaio SA533B si è considerato il valore T_0 di -118°C, anche per la seconda lastra W, dove i dati sarebbero insufficienti per ottenere una stima personalizzata di T_0). Si noti che per rappresentare tutte le curve su di un unico diagramma, si è dovuto uniformare il valore dello spessore. In questo caso si sono dunque calcolate delle ipotetiche curve per $B = 20\text{mm}$. Si tratta di un valore di compromesso fra 1CrMoV e SA533B, per il quale non esistono prove effettive disponibili; il valore è però prossimo (intermedio) alle dimensioni dei campioni sui quali sono state calibrate le curve mediane coi due modelli (ASTM e CISE) applicati a 1CrMoV (10mm) e SA533B (25.4mm). Si tratta quindi di un grado di estrapolazione molto ridotto, che

non può inficiare le conclusioni che si possono trarre dall'analisi della Fig. 4.

CONCLUSIONI

Tale analisi mostra che in due casi su tre il concetto di curva universale per la tenacità degli acciai in via di proposta da parte ASTM è ben rappresentativo degli andamenti effettivi.

In particolare per l'acciaio da rotore 1CrMoV le analisi comparative qui svolte indicano che l'esecuzione di poche prove a una sola temperatura, nel campo della transizione, può essere sufficiente, perchè una volta centrata su tali pochi dati la curva ASTM, poi risulta compiutamente definito (con buona approssimazione) il comportamento anche a ogni altra temperatura della transizione. Se rappresentativo di tutta la famiglia degli acciai da rotore 1CrMoV (magari anche nello stato infragilito dopo lunga esposizione in servizio) questo risultato non sarebbe una buona notizia per i laboratori che eseguono misure di tenacità.

I dati per SA533B indicano chiaramente che una delle due lastre ha una zona di transizione (in termini di intervallo di temperatura) più estesa e dunque i due andamenti non possono essere descritti dalla stessa curva universale. In un caso comunque l'andamento è ragionevolmente identico a quello dell'acciaio 1CrMoV, e dunque descrivibile bene dalla curva universale, mentre per la seconda lastra la curva universale risulta decisamente non conservativa.

Il fatto che in un caso su tre il concetto di curva universale risulti inapplicabile, e anzi sia fonte di non-conservatività, implica che sarebbe importante arricchire ulteriormente il quadro di simili confronti. Potrebbe risultare che per certi acciai per i quali si scoprirà che la curva universale è adeguata, la normativa potrà prevedere obbligatoriamente sufficienti solo poche prove (a un'unica temperatura) di "posizionamento" della curva, mentre per altri acciai che si scoprirà essere non conformi al concetto di curva universale si dovrà prevedere una sperimentazione più completa, a varie temperature.

Bibliografia

- /1/ Confidenziale.
- /2/ T.Iwadata, T.Karaushi, J.Watanabe: *Fracture toughness of 2 1/4 Cr1Mo and 3.5NiCrMoV steels*, Fracture Mechanics of ductile and tough materials and its application to energy related structures, Martinus Nijhoff Publ., Dordrecht, 1981, 241-250.
- /3/ D.P.Timo, R.M.Curran, R.J.Placek: *Workshop Proceedings; Rotor Forging for Turbine Generators*, WS79-235, EPRI, 1981, 3/115 - 3/128.
- /4/ J.D.Landes, D.H.Schaffer: *Statistical characterization of fracture in the transition region*, Fracture Mechanics: 12th Conf., ASTM STP 700, 1980, 368-382.
- /5/ V.Bicego, A.Elli, C.Rinaldi: *Modello di frattura per clivaggio per acciai ferritici in transizione fragile-duttile*, IGF9 - IX Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura; Roma, 2-3-4 giugno 1993

- 16/ K.Wallin: *Statistical Modelling of Fracture in the Ductile-to-Brittle Transition Region, Defects Assessment in Components - Fundamentals and Applications*, ESIS/EGF9, Blauel and Schwalbe Eds., MEP Publ. London, 1991, 415-445.
- 17/ T.Lin, A.G.Evans, R.O.Ritchie: *A Statistical Model of Brittle Fracture by Transgranular Cleavage, J. Mech. Phys. of solids*, vol. 34, N° %, 1986, 447-497.
- 18/ V.Bicego, A.Elli, C.Rinaldi: *A Predictive Approach to Cleavage Fracture Events in the Transition Region, Engng. Fracture Mechanics*, vol. 45, 1993, 587-598.
- 19/ V.Bicego, A.Elli, C.Rinaldi: *Prediction of Cleavage Fracture Probability for Ferritic Steels in the Transition Region, Fracture Mechanics*, Vol. 25, ASTM STP 1220, F.Erdogan and Ronald J.Hartranft, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994 (in pubbl.)

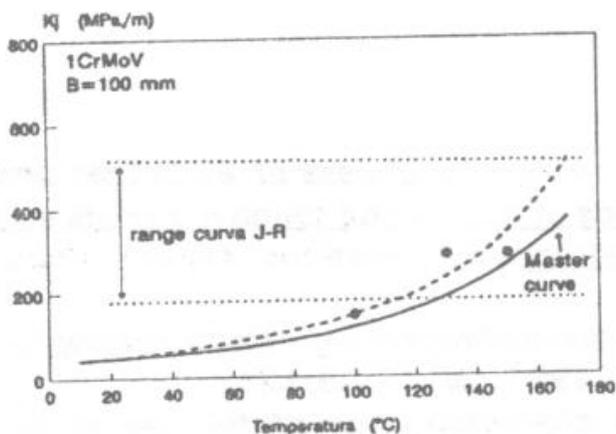
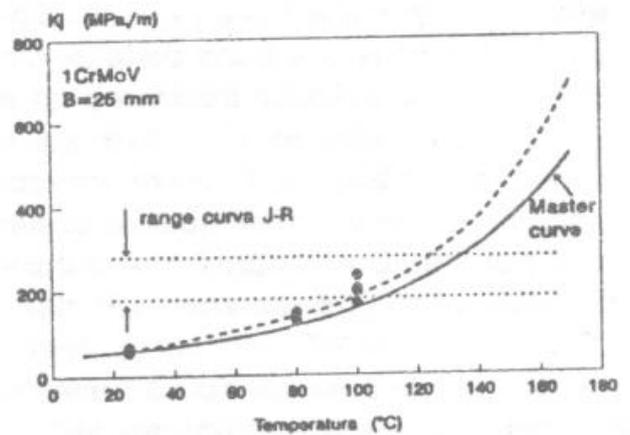
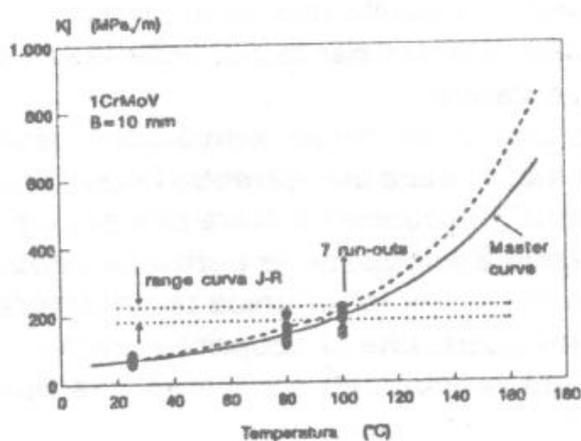


Fig.1 : Confronto tra il modello CISE e la Master curve ASTM per 1CrMoV (● : dato sperimentale).

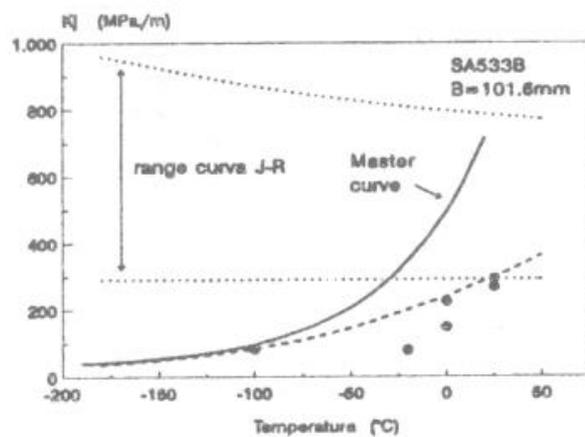
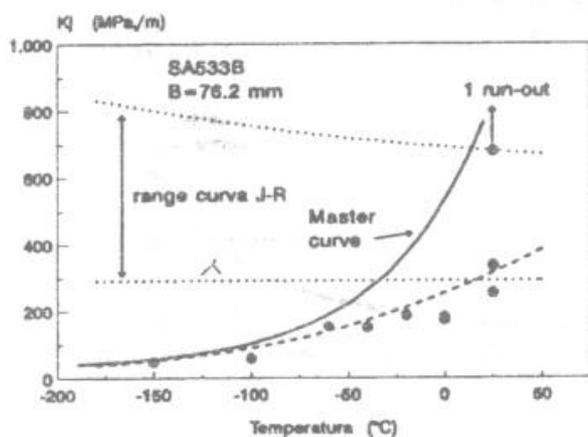
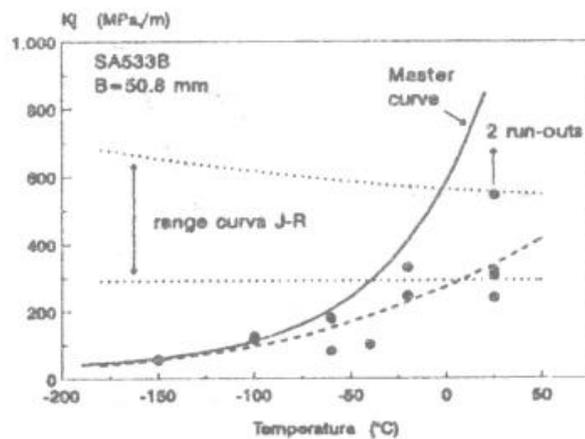
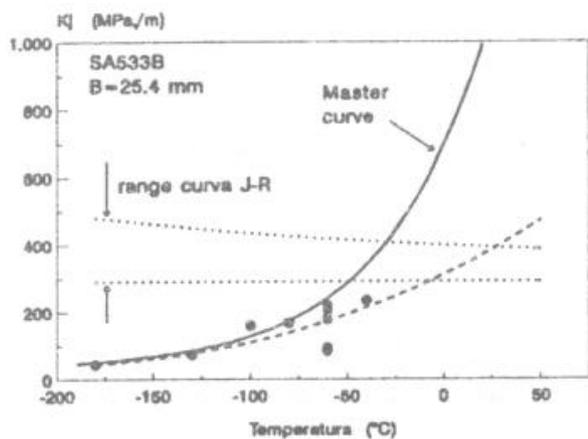


Fig.2 Confronto tra il modello CISE e la Master curve ASTM per SA533B, lastra X. Temperatura di transizione: -118°C (● : dato sperimentale).

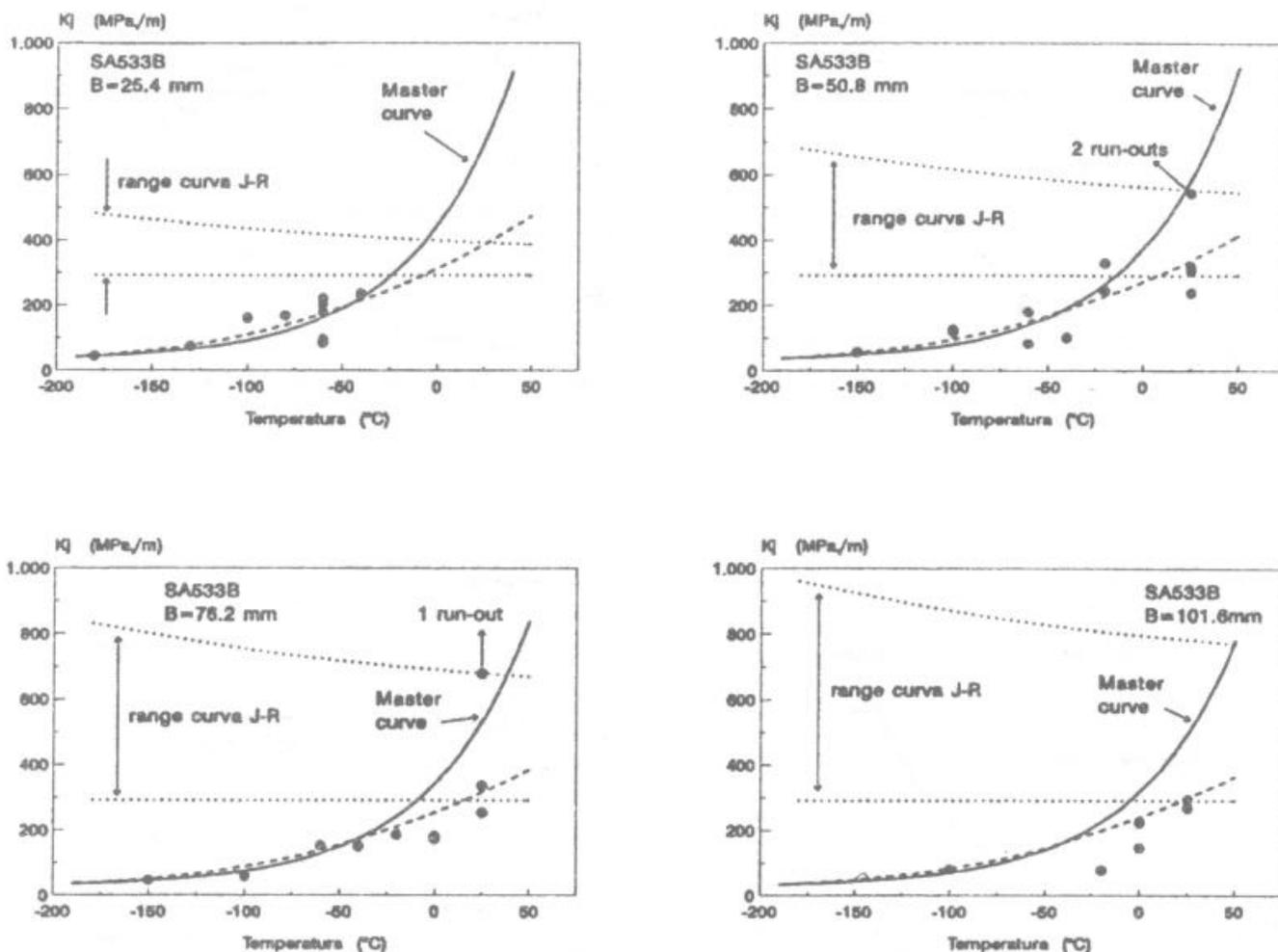


Fig.3 Confronto tra il modello CISE e la Master curve ASTM per SA533B, lastra X. Temperatura di transizione: -94°C (● : dato sperimentale).

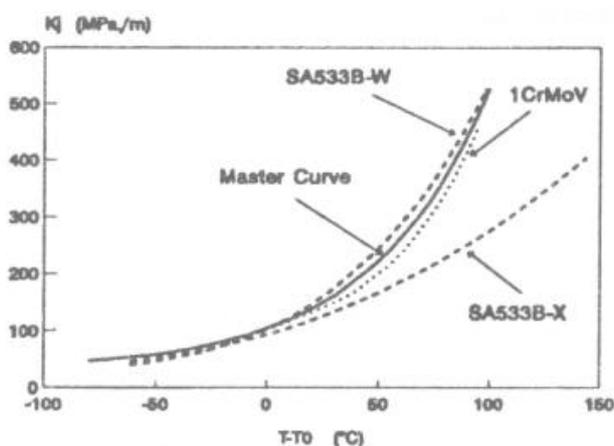


Fig.4 Confronto tra la Master curve ASTM e le curve ottenute dal modello CISE, per uno spessore di 20 mm.