

VALUTAZIONE DELLA TENACITA' DI INNESCO E DI ARRESTO IN LAMIERE DI ELEVATO SPESSORE MEDIANTE PROVE DI 'SHOCK' TERMICO.

M. Beghini, E. Vitale.

Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari
Università di Pisa.

--- 0 ---

INTRODUZIONE

Dalla metà degli anni '80 è in corso presso il Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari di Pisa [1÷6] una attività di ricerca teorica e sperimentale avente lo scopo di analizzare il comportamento a frattura di strutture sottoposte a sollecitazioni di origine termica e meccanica.

E' stata finora condotta una serie di cinque esperimenti di Thermal Shock (TS), su provini di acciaio ferritico di forma parallelepipedica (base 1400 X 500 e spessore 140 mm), precriccati in corrispondenza del centro di una delle pareti corte mediante una fessura a fronte rettilineo (cfr. Fig. 1). Durante l'esperimento, si riscalda uniformemente il provino fino a una temperatura di circa 100 °C e successivamente si raffredda rapidamente la superficie fessurata mediante l'impiego di azoto liquido (-196 °C). In queste condizioni, in corrispondenza della parete fessurata, si manifestano elevate tensioni termiche di trazione e un ripido gradiente di tenacità che possono indurre condizioni tali da promuovere eventi di innesco-arresto del difetto preesistente.

Questa configurazione è stata utilizzata allo scopo di riprodurre, mediante esperimenti di costo relativamente contenuto, le condizioni che si verificano in un recipiente cilindrico o in una tubazione con fessure longitudinali estese (virtualmente infinite) o con fessure circonferenziali interne.

REALIZZAZIONE DEI PROVINI

Le dimensioni dei provini (Fig. 1) sono state fissate allo scopo di ottenere i seguenti obiettivi:

- la lunghezza ($L=1400$ mm) è tale che lo stato di sollecitazione nella zona centrale del provino pari a circa $1/3$ della lunghezza totale non risulta influenzata da effetti di bordo; in tal modo il provino può essere schematizzato come una lastra di lunghezza infinita;
- la larghezza ($W=500$ mm) è stata scelta in modo da indurre, durante l'intera durata delle prova (10÷15 min), adeguati profili di temperatura e di tensione;
- lo spessore ($T=140$ mm) è essenzialmente legato alla disponibilità di lamiera di acciaio con proprietà meccaniche adeguatamente qualificate (il valore dello spessore consente peraltro di misurare valori di tenacità di oltre 100 MPa \sqrt{m} , nel rispetto delle condizioni di 'plane strain' previste dalla norma ASTM E339).

Il materiale delle lastre, un acciaio ferritico al manganese (A533-B) bonificato, di produzione Giapponese, è stato qualificato a frattura mediante prove Charpy-V e prove di meccanica della frattura (ASTM-K_{IC}) con provini Three Point Bending (TPB) e Compact Tension (CT) di spessore

pari a 1" [3]. Considerando come temperatura di transizione la RT_{NDT} (definita come la temperatura corrispondente a una energia Charpy di 68 J, T_{68J} , meno 33°C), le prove indicano un valore di circa -45°C.

In relazione a questa elevata tenacità del materiale nello stato di fornitura, è stata sperimentata una serie di trattamenti termici, al fine di alzare la temperatura di transizione fino a valori più adatti alla realizzazione degli esperimenti. I trattamenti termici sono stati effettuati mantenendo il provino a temperature di austenitizzazione (tra 900°C e 1100°C) per periodi di tempo di 1÷3 ore. Il trattamento, oltre a realizzare una maggiore uniformità nelle proprietà meccaniche (eliminando i gradienti di struttura e le anisotropie della laminazione), produce un incremento della dimensione media del grano ferritico ed un conseguente aumento della temperatura di transizione. In relazione alla intensità del trattamento effettuato è pertanto possibile ottenere una gamma di temperature di transizione [6] (come si vede nella Tabella 1) mentre i valori di Energia in campo duttile rimangono quasi invariati.

Le dimensioni del provino rendono praticamente inapplicabile il procedimento standard di prefessurazione mediante fatica ed è stato pertanto necessario mettere a punto un metodo non convenzionale [5,6]. In una prima fase, viene effettuata una saldatura mediante Laser di potenza (12 KW) con parametri tali da realizzare una zona fusa stretta e profonda che, dopo la solidificazione, risulta interessata da elevate tensioni residue di trazione. Il cordone viene successivamente sottoposto a caricamento di idrogeno mediante un processo elettrochimico che in poche ore causa la frattura del cordone stesso lungo il suo piano di simmetria longitudinale.

Una coppia di 'side-grooves' viene ricavata sulle faccie maggiori del provino (Fig. 2) al fine di ridurre i fenomeni locali di plasticità che si manifestano nei pressi delle estremità del fronte di fessura e che tendono ad ostacolare localmente la propagazione ('crack tunneling'). Sulle superfici di raffreddamento viene realizzata una alettatura mediante fresatura; le alette, opportunamente ricoperte con alcuni strati di mastice resinoso, consentono di aumentare il coefficiente globale di scambio termico fino a valori di circa 4000 W/m²°C [6].

APPARATO SPERIMENTALE

Le prove di Thermal Shock sono effettuate scaldando preventivamente i provini fino a raggiungere una temperatura uniforme entro il campo compreso tra 80 e 120 °C e successivamente raffreddando mediante azoto liquido, in modo da produrre distribuzioni di temperatura e di tensione sensibilmente non lineari lungo il piano della fessura. Durante l'esperimento, i provini sono semplicemente appoggiati in modo che qualsiasi reazione esterna si può considerare virtualmente nulla.

Il raffreddamento può essere effettuato sia solamente sulla faccia fessurata (superficie 'A' in Fig. 1) sia in modo simmetrico, sulla faccia fessurata e sull'opposta (superfici 'A' e 'B'). Con il raffreddamento sulle due faccie si realizzano condizioni di vincolo simmetrico che aumentano le tensioni termiche di circa il 20÷30%, e, considerando le distribuzioni di tensione che in tal modo si manifestano, si verifica che questa configurazione sperimentale riproduce con notevole approssimazione la condizione di un recipiente cilindrico con una lunga fessura longitudinale soggetto a un rapido raffreddamento interno [6]. Per i transitori termici di pratico interesse ai fini della realizzazione degli esperimenti, la variazione della temperatura nella zona centrale del provino può essere trascurata (nella durata utile della prova la temperatura nel centro si abbassa non

più di 20°C, rispetto ad una diminuzione di oltre 250°C vicino alla superficie fessurata), pertanto il profilo di tenacità lungo il piano della fessura è lo stesso per entrambe le configurazioni di raffreddamento.

L'azoto liquido viene raccolto poco prima dell'inizio del raffreddamento in un apposito recipiente, avente un volume di circa 1 m³, dal quale defluisce per gravità. Il transitorio di raffreddamento è ottenuto mediante l'apertura di una valvola a comando pneumatico, disposta sul fondo del contenitore (Fig. 3), che produce il riempimento di due vasche disposte in corrispondenza delle superfici di raffreddamento del provino. A riempimento effettuato, il deflusso del refrigerante è controllato in modo da compensare la quantità di fluido che evapora e mantenere costante il livello nelle vasche.

Durante gli esperimenti, temperature, deformazioni e COD vengono misurati e registrati per mezzo di un sistema di acquisizione dati computerizzato che consente inoltre una prima elaborazione 'on-line' e una visualizzazione grafica dell'andamento delle principali grandezze della prova (valori correnti del coefficiente di scambio termico, K_T e K_{Tc} valutati in base alla distribuzione di temperatura, valore della lunghezza di fessura corrente valutata sulla base del segnale del COD) [5,6]. Un registratore magnetico assicura la necessaria ridondanza nell'acquisizione dei dati fondamentali.

ANALISI TERMO-MECCANICA E DI FRATTURA

L'interpretazione delle prove è stata effettuata sulla base di una analisi termo-meccanica statica e in ipotesi di validità della meccanica della frattura lineare elastica [4÷7]. La scelta è motivata da ragioni economiche ed è giustificata dai risultati di una analisi preliminare del problema che ha mostrato chiaramente l'assenza di significativi effetti dovuti alla plasticità o a fenomeni dinamici. Peraltro, le dimensioni del provino sono tali che le tensioni nella zona della fessura, dati gli elevati gradienti termici, non possono essere adeguatamente valutate sulla base di semplici modelli bidimensionali, e quindi non sono disponibili soluzioni in forma chiusa per la valutazione del fattore di intensificazione degli sforzi e del suo profilo lungo il fronte della fessura.

Un primo livello di approssimazione è stato ottenuto sviluppando un modello semplificato di trave, accoppiato con una soluzione alle differenze finite del problema termico, che approssima gli effetti di multiassialità dello stato di tensione nel centro dello spessore e quindi valuta il K_T applicando il principio di sovrapposizione. Tale modello è stato impiegato sia in fase di pre-analisi degli esperimenti sia durante l'elaborazione 'on-line' dei dati delle prove.

Un secondo livello di approssimazione è stato ottenuto ricorrendo ad una analisi tridimensionale mediante Elementi Finiti del provino non fessurato (effettuabile mediante un mesh con un numero relativamente contenuto di gradi di libertà) per determinare le tensioni 'nominali'. Lo stato di tensione 'nominale' è stato successivamente utilizzato per ottenere il profilo di K_T sfruttando il principio di sovrapposizione e una formulazione tridimensionale delle funzioni di Green. Questo metodo è stato impiegato in fase di post-analisi per verificare nelle situazioni di particolare interesse (condizioni di innesco e di arresto) le previsioni del modello semplificato.

Un terzo e più completo modello agli Elementi Finiti è stato infine messo a punto realizzando una analisi tridimensionale del provino fessurato. Data l'onerosità di tale calcolo, esso è stato impiegato solamente nello studio di pochi casi di riferimento come verifica dei

metodi approssimati prima descritti [4].

RISULTATI DEGLI ESPERIMENTI DI SHOCK TERMICO

Fino a oggi sono stati condotti cinque esperimenti di shock termico: TSP-01÷TSP-05. I primi due sono stati realizzati impiegando il materiale allo stato di fornitura ($T_{\text{esg}} = -12^{\circ}\text{C}$), mentre negli ultimi è stato adottato il trattamento R4 (cfr. Tab. 1) e quindi un materiale con $T_{\text{esg}} = +33^{\circ}\text{C}$. La curva di tenacità all'inesco (K_{Ic} in funzione della temperatura) per il materiale allo stato di fornitura è stata ricavata adattando la curva di riferimento dell'ASME sect. III ai dati sperimentali ottenuti mediante provini CT e TPB nel campo di temperatura compreso tra -150°C e -70°C (Fig. 4); per il materiale trattato la curva di tenacità è stata derivata considerando uno spostamento verso l'alto della temperatura di transizione, equivalente a quello riscontrato per le curve di transizione Charpy (45°C). Le curve di arresto (K_{Ia} in funzione della temperatura) sono state assunte in accordo con la curva di riferimento ASME K_{Ia} e la posizione delle corrispondenti curve di K_{Ic} .

Nel seguito sono presentati e discussi i risultati degli esperimenti TSP-02, TSP-03 e TSP-04 e sono fornite alcune informazioni generali sulla TSP-05 (i cui risultati al momento attuale non sono stati ancora completamente analizzati); mentre per la TSP-01, che è da considerarsi una prova preliminare, si può far riferimento a [1,2].

Prova TSP-02

I risultati della prova TSP-01 [1,6] suggerirono l'introduzione di alcuni possibili miglioramenti nella metodologia di prova, riguardanti: l'ottimizzazione della configurazione delle superfici di raffreddamento, la tecnica di preparazione della fessura iniziale e l'uso dei 'side-grooves' per ridurre la tendenza al 'crack tunneling' durante la propagazione. La prova TSP-02 è stata progettata per ottenere una significativa dimostrazione del fenomeno di propagazione e arresto sotto condizioni di shock termico. Sfortunatamente, a causa di problemi di ordine sperimentale connessi con la preparazione del difetto, durante la prova è stato riscontrato un basso coefficiente locale di scambio termico in corrispondenza della zona fessurata e pertanto si è verificato un sensibile ritardo nel raffreddamento dell'apice del difetto. A causa di ciò, la prova ha avuto una evoluzione diversa da quella prevista in fase di pre-analisi e, durante il primo minuto di raffreddamento, il K_{I} applicato ha subito un aumento senza una apprezzabile variazione della temperatura dell'apice (Fig. 5). Questa circostanza ha avuto come conseguenza che il difetto raggiungesse le condizioni critiche con un valore di dK_{I}/dt virtualmente uguale a zero e quindi in una condizione di Warm Pre-stressing (WPS). Il risultato della prova consiste pertanto essenzialmente in una dimostrazione dell'efficacia del WPS nel prevenire la propagazione, essendo stato misurato un livello di sovrasollecitazione massimo (massimo valore di $K_{\text{I}}/K_{\text{Ic}}$) approssimativamente pari a 1.7.

Prova TSP-03

Questa prova è stata una ripetizione della TSP-02 su un materiale trattato e più fragile (R4). La pre-analisi della prova mostrava la possibilità di ottenere fino a 3÷4 eventi di innesco-arresto, ma un solo evento di propagazione è stato riscontrato durante l'esperimento. La post-analisi dell'esperimento ha mostrato che l'inesco si era verificato ad un valore di K_{I} pari approssimativamente a 2 volte il valore previsto del K_{Ic} , spiegando la notevole entità della propagazione

riscontrata (da 20 a 48 mm) e il successivo insorgere del fenomeno di WPS (Fig. 6). Questo comportamento è stato attribuito al fatto che nella prova era stato impiegato lo stesso provino, con la medesima fessura iniziale, della prova TSP-02: il precedente WPS e il trattamento termico potevano aver influenzato la geometria dell'apice e di conseguenza il valore della tenacità apparente. L'esperimento ha quindi fornito un singolo significativo valore di tenacità all'arresto e una ulteriore dimostrazione dell'effetto di WPS (massimo rapporto K_{Ic}/K_{Ia} circa pari a 2.7).

Prova TSP-04

L'esperimento TSP-04 è stato progettato con parametri simili (stesso trattamento termico) a quelli della prova TSP-03 ma con una fessura iniziale leggermente più corta (14 invece che 20 mm), allo scopo di incrementare la probabilità di avere eventi multipli di innesco-arresto. Sotto queste condizioni sperimentali più controllate, l'esperimento si è svolto in sensibile buon accordo con le previsioni della pre-analisi e sono stati riscontrati tre eventi di innesco-arresto (cfr. Fig. 7). Questi risultati hanno finalmente resa disponibile una significativa quantità di informazioni per una prima generale discussione del programma sperimentale.

Prova TSP-05

L'esperimento è stato progettato per realizzare un innesco da una fessura precedentemente sottoposta a WPS ed è stato condotto in due fasi. Durante la prima fase, è stato applicato uno shock termico di limitata durata (240 sec) ad una fessura il cui raffreddamento è stato ritardato mediante un isolamento termico locale; questo accorgimento ha prodotto un andamento del K_{Ic} simile a quello riscontrato nella TSP-02, con il valore massimo superiore a $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ e nessuna propagazione. Nella fase successiva, una piccola porzione di materiale attorno alla fessura è stata raffreddata per circa 120 secondi prima che fosse avviato il raffreddamento globale, in modo tale che le condizioni critiche fossero raggiunte in un campo di sicuro comportamento fragile (Lower Shelf) del materiale. L'innesco è stato prodotto, con un rapporto di WPS stimabile attorno a 2, dopo che il valore di K_{Ic} aveva superato il livello raggiunto durante la fase 1. Nel seguito della prova un ulteriore evento di innesco-arresto è stato registrato prima del definitivo raggiungimento delle condizioni di WPS.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

I dati di innesco della prova TSP-04 sono in buon accordo con il comportamento previsto per il materiale sulla base di dati ottenuti da provini di piccole dimensioni. D'altro canto, i dati di arresto delle prove TSP-03 e TSP-04 si collocano significativamente più in basso rispetto alla curva di pre-analisi, fornendo indicazioni per l'esistenza di una maggiore differenza in temperatura tra le curve K_{Ic} e K_{Ia} previste dalle ASME (Fig. 8). Tale fatto implicherebbe una non conservatività della curva ASME K_{Ia} , nel caso di un materiale con valori di K_{Ic} prossimi al limite inferiore costituito dalla curva di tenacità dell'ASME. Si deve tuttavia sottolineare il fatto che, sia per il materiale allo stato di fornitura che per il materiale trattato, le curve ASME, definite in base al valore misurato di RT_{NDT} , si collocano sicuramente al di sotto dei valori di tenacità sperimentali.

Una più completa valutazione dei risultati ottenuti può essere effettuata mediante il confronto con i risultati di altri esperimenti simili condotti in USA e in Francia [8,9] (Fig. 9). Si può osservare

che, tanto per i valori di K_{Ic} che per quelli di K_{Ia} , una generale soddisfacente correlazione può essere ottenuta se essi sono confrontati in termini di $T-RT_{NDT}$, con la tendenza per i presenti risultati a mostrare un comportamento meno disperso. Questo può essere attribuito alla concorrenza di almeno due fattori: l'impiego di materiale ricotto, altamente omogeneo a livello microstrutturale; la geometria relativamente semplice del provino e l'attenzione posta nell'ottenere fessure con fronte rettilineo, eliminando così i problemi di interpretazione connessi con forme complesse di fessura (come ad esempio accadeva in alcuni esperimenti americani).

E' infine necessario sottolineare che gli esperimenti, nel complesso, rappresentano una significativa conferma dell'efficacia del WPS per assicurare un consistente margine nei confronti della propagazione in condizioni di K_I decrescente nel tempo.

A valutazione generale del lavoro esposto nella seguente memoria, merita di essere sottolineato il fatto che, grazie ai continui miglioramenti delle tecniche sperimentali e di analisi operati nel corso di un programma di ricerca durato 5 anni, si dispone oggi di una serie di strumenti che consentono la corretta esecuzione e interpretazione di esperimenti di Meccanica della Frattura piuttosto complessi. Le possibilità sperimentali dell'apparato messo a punto non sono ancora completamente sfruttate e i parametri di prova possono essere ulteriormente variati allo scopo di ottenere altri tipi di risultati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.Beghini, E.Vitale, P.P.Milella "Thermal Shock Experiments on Large Size Plates with Surface Flaws: Test TSP-01 and TSP-02", memoria presentata a: IAEA Specialist's Meeting on 'Fracture Mechanics Verification by Large Scale Testing', Stoccarda, Maggio 25÷27, 1988, di prossima pubblicazione su Nuclear Eng. & Design.
- [2] M.Beghini, P.P.Milella, E.Vitale "Esperienze di Shock termico su piastre fessurate di grosso spessore", XIV Convegno Nazionale AIAS, Catania, 23÷27 Settembre 1986.
- [3] M.Beghini, E.Vitale "Infragilimento e caratterizzazione del materiale per prove di Shock termico: risultati preliminari", RL228(86), Dip. Costruzioni Meccaniche e Nucleari, Pisa, 1986.
- [4] M.Beghini, E.Vitale "Analisi di lastre fessurate sottoposte ad intensi transitori termici", IX Convegno Nazionale AIMETA, Bari, 4÷7 Ottobre 1988.
- [5] M.Beghini, C.Carmignani, E.Vitale "Esperienze di Shock termico su lamiere di A533-B: relazione conclusiva", RL358(88), Dip. Costruzioni Meccaniche e Nucleari, Pisa, 1988.
- [6] M.Beghini "Propagazione ed arresto di fessure per sollecitazione di origine termica" Tesi di Dottorato di Ricerca in 'Meccanica dei Materiali' II Ciclo, Dip. Costruzioni Meccaniche e Nucleari, Pisa, 1988.
- [7] D.J.Cartwright "Stress Intensity Factor Determination" in 'Developments in Fracture Mechanics - I', ed. G.G.Chell, Appl.Sci.Publ.,Londra, 1979, pp. 29÷66.
- [8] R.D.Cheverton et alii "Pressure Vessel Fracture Studies Pertaining to the PWR Thermal-Shock Issue: Experiments TSE-5, TSE-5A and TSE-6", NUREG/CR-4249, ORNL-6163, 1985, Oak Ridge National Laboratories, Tennessee (USA).
- [9] A.Pellisier-Tanon et alii "Crack Initiation and Arrest in a SA 508 cl. 3 Cylinder Under Liquid Nitrogen Thermal Shock Experiments", VII SMIRT Conference, Chicago (USA), Agosto 22÷26, 1983.

Tipo di trattamento	Temperatura e tempo	Diametro grano ⁽¹⁾ (μm)	T_{68J} ⁽²⁾ ($^{\circ}\text{C}$)	E_{US} ⁽³⁾ (J)
B	-----	-----	-12	120
R1	900 $^{\circ}\text{C}$ - 1.5h	6.4	-8	110
R2	1000 $^{\circ}\text{C}$ - 1.5h	10.1	12	104
R3	1100 $^{\circ}\text{C}$ - 1.5h	19.4	48	96
R4	1000 $^{\circ}\text{C}$ - 3h	12.5	33	104
R5	1100 $^{\circ}\text{C}$ - 3h	24.4	72	97
R6	1150 $^{\circ}\text{C}$ - 3h	32.7	109	92

(1) Deviazione standard: 0.7 μm

(2) Deviazione standard: 10 $^{\circ}\text{C}$

(3) Energia in 'Upper Shelf', deviazione standard: 7J.

Tab. 1 - Risultati delle prove Charpy sul materiale base e su materiali con diverse intensità di trattamento.

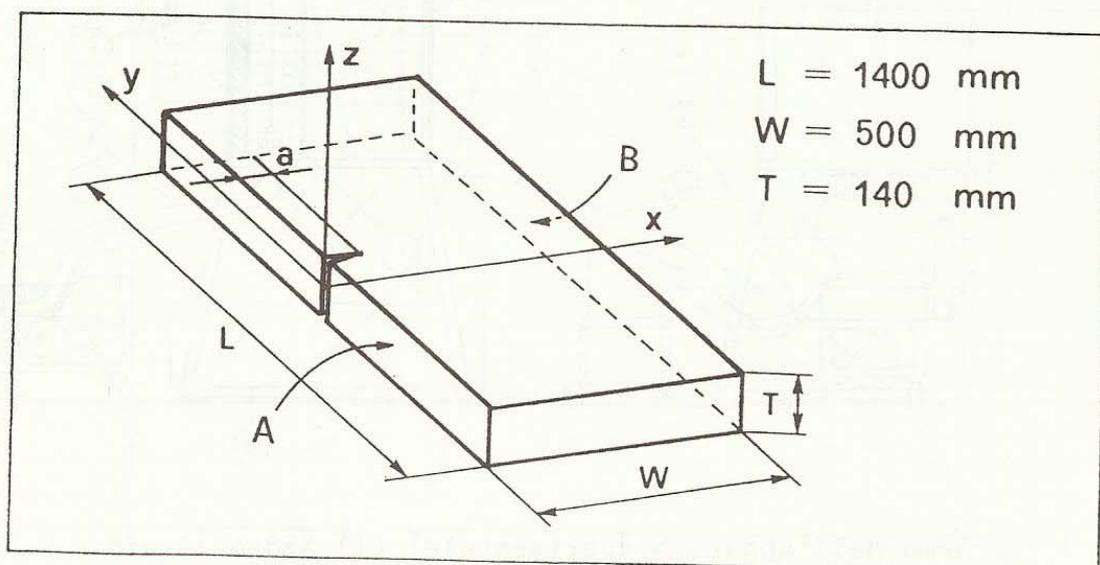


Fig. 1 - Schema del provino per prove di Thermal Shock.

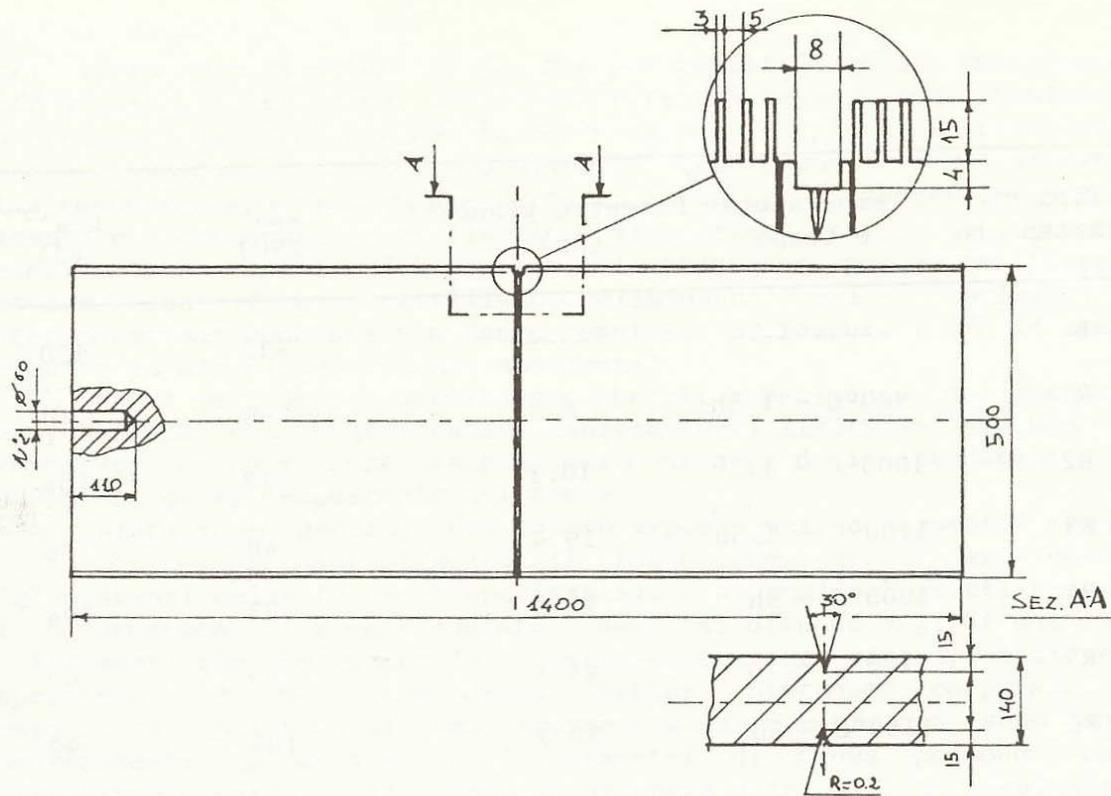


Fig. 2 - Disegno meccanico del provino per prove di Thermal Shock.

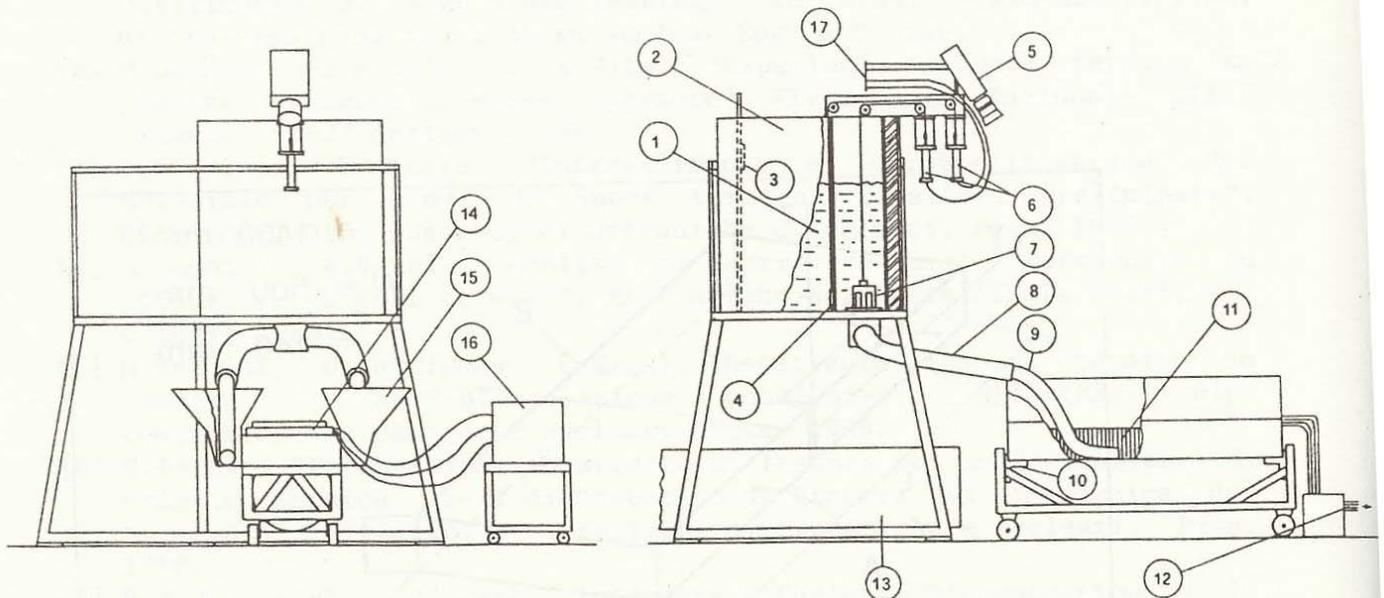


Fig. 3 - Schema dell'apparato sperimentale: (1) Azoto liquido; (2) Recipiente criogenico; (3) Misuratore di livello; (4) Saracinesca; (5) Telecamera; (6) Attuatori delle valvole; (7) Valvola principale dell'azoto; (8) Isolamento termico; (9) Tubi di adduzione dell'azoto; (10) Supporti del provino; (11) Superfici di raffreddamento; (12) Segnali al sistema di acquisizione; (13) Aspirazione dei vapori di azoto; (14) Piastre di riscaldamento; (15) Vasca di raffreddamento; (16) Sistema di controllo del riscaldamento; (17) Controlli remoti.

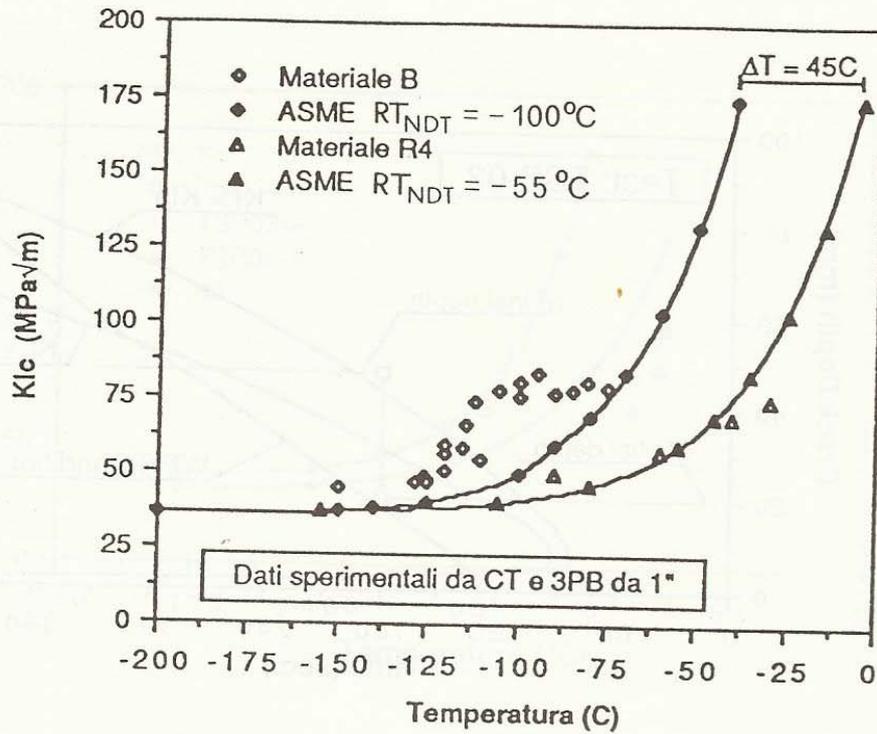


Fig. 4 - Derivazione delle curve di tenacità all'inesco per il materiale base (B) e per il materiale trattato (R4).

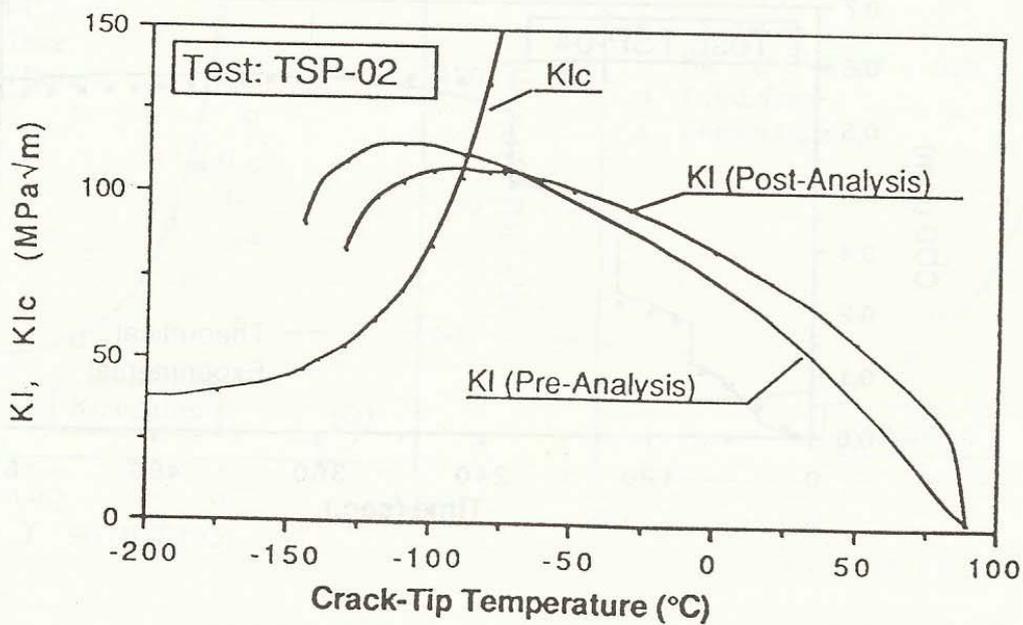


Fig. 5 - Confronto tra andamenti previsti e misurati del K_{Ic} durante la prova TSP-02.

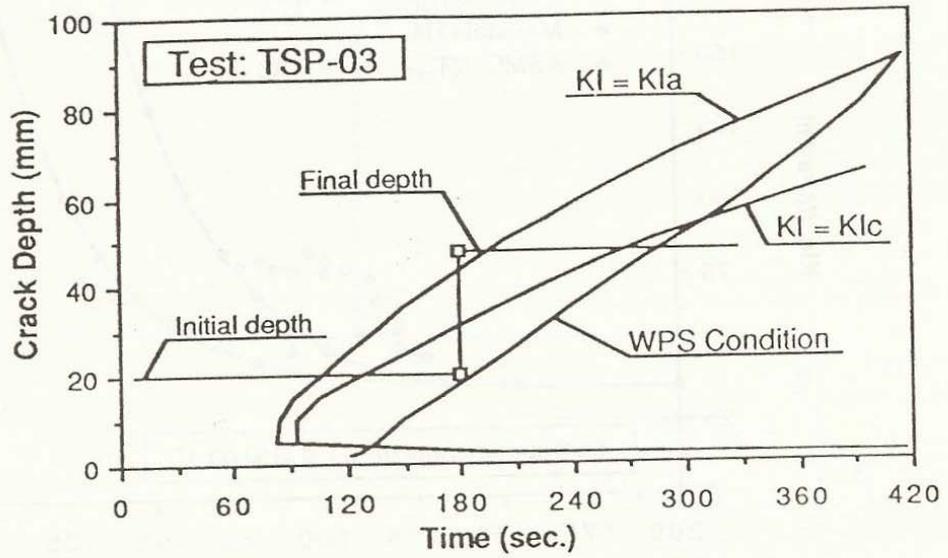


Fig. 6 - Confronto tra dati sperimentali e curve di pre-analisi per la prova TSP-03.

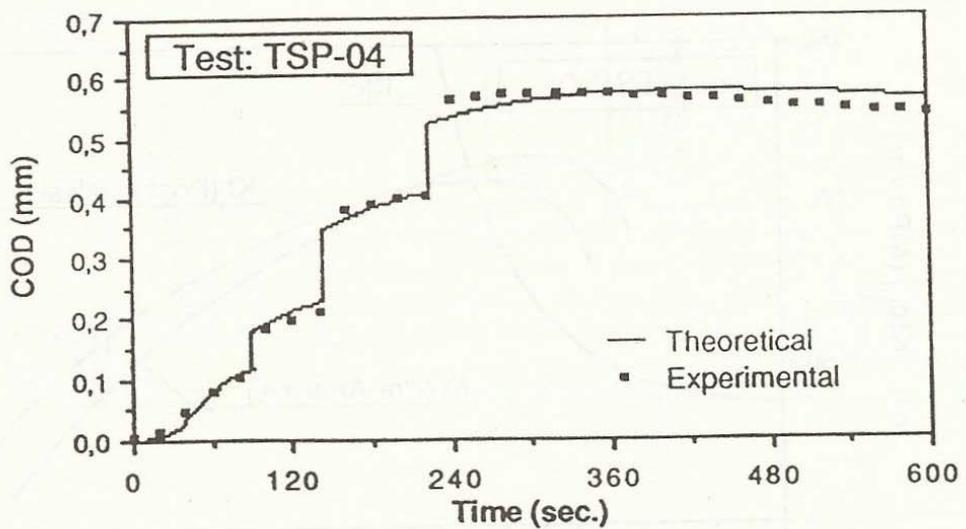


Fig. 7 - Confronto tra l'andamento calcolato e i valori misurati del COD nella prova TSP-04: i salti corrispondono agli eventi di propagazione.

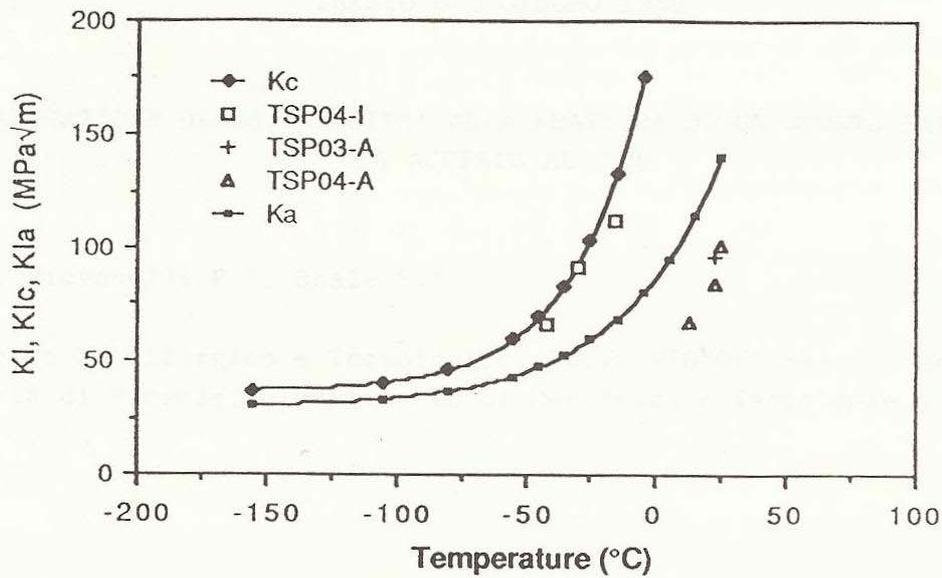


Fig. 8 - Dati di innesco (I) e di arresto (A) ottenuti dalle prove TSP confrontati con le curve di tenacità di pre-analisi.

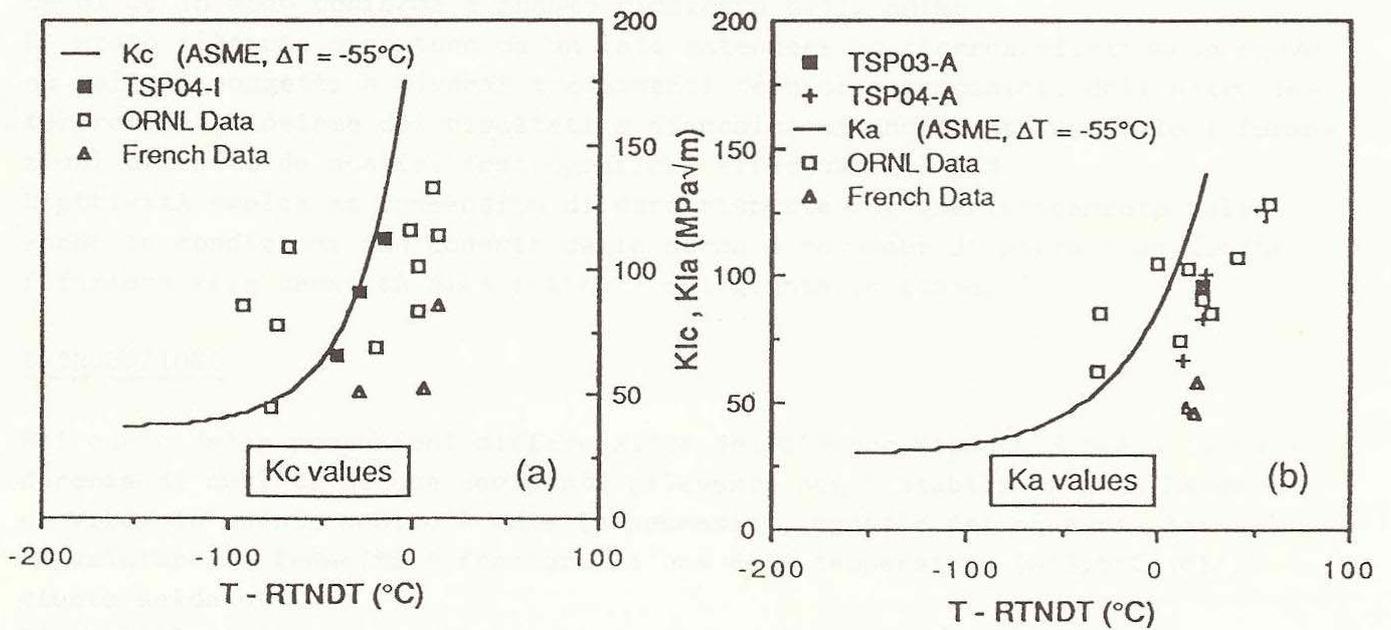


Fig. 9 - Raccolta dei dati di innesco (a) e di arresto (b) e confronto con i dati di altri esperimenti simili.