

TECNICA DI PROVA "SMALL PUNCH" PER VALUTAZIONI NON DISTRUTTIVE DELLA TENACITÀ DI MATERIALI DI COMPONENTI ESERCITI

Valerio Bicego¹, Enrico Lucon¹, Claudio Sampietri¹,
Alfredo Squilloni¹ e Fiorenzo Bregani²

¹CISE SpA, Via Reggio Emilia 39 - 20090 Segrate (MI)

²ENEL CRAM, Via Padova 224, 20100 Milano

SOMMARIO: La tecnica di prova *Small Punch* (SP) utilizza mini-provini a forma di dischetto per misure di FATT₅₀ (*Fracture Appearance Transition Temperature*, temperatura di transizione fragile/duttile misurata in prove di resilienza), di K_{Ic} (tenacità a frattura) e stime dei parametri tensili (carichi unitari di snervamento e rottura). Essa è adatta ad applicazioni su componenti per i quali il prelievo deve essere di tipo non distruttivo. CISE e ENEL hanno acquisito da alcuni anni tale metodica sperimentale, in particolare preliminarmente validando la tecnica mediante studi comparativi fra valori (FATT₅₀, tenacità e parametri tensili) determinati per via SP e i dati di riferimento, ottenuti da prove convenzionali effettuate su provini standard. L'affidabilità delle correlazioni semiempiriche proposte dalla letteratura per l'ottenimento dei parametri meccanici risulta più o meno soddisfacente, a seconda dei materiali e delle proprietà considerate. Viene infine illustrata una metodologia innovativa, basata su un criterio di rottura per superamento di un valore di energia critica nel provino SP, che prescinde dall'uso di correlazioni empiriche.

PAROLE CHIAVE: *Small Punch*, FATT₅₀, tenacità a frattura, parametri tensili, fragilità, misure non-distruttive.

INTRODUZIONE

La tecnica di prova *Small Punch* (SP), che utilizza mini-provini a forma di dischetto (diametro tipico 3,10 mm, spessore »0.5 mm) per stime dei valori di FATT₅₀ (temperatura di transizione fragile-duttile misurata in prove di resilienza), parametri tensili e K_{Ic} (tenacità a frattura), è adatta ad applicazioni su componenti per i quali il prelievo deve essere di tipo non distruttivo: la miniaturizzazione così spinta consente un campionamento a minima invasività, non bisognoso di riparazione post-prelievo, e interamente contenuto nella profondità tipica dei sovrassessori presenti in molti componenti. La prova SP è da alcuni anni impiegata da americani e giapponesi su acciai di rotor (1CrMoV) e vessel (SA533B) (Mao e Takahashi, 1987; Foulds e Jewett, 1991; Kameda e Mao, 1992). Il CISE ha acquisito da alcuni anni tale metodica sperimentale, in particolare eseguendo analisi di validazione della tecnica mediante studi comparativi fra i dati di FATT₅₀ e K_{Ic} determinati per via SP e i dati di riferimento, ottenuti da prove convenzionali su provini standardizzati. In tali analisi si è operato ovviamente su pezzi di materiale disponibile in quantità sufficiente per l'ottenimento di provette massive: acciai di rotor (CrMoV, NiCrMo), scatole ugelli (12Cr), tubi (2¼Cr1Mo) e corpi cilindrici (CuNi52Mo) di centrali termoelettriche, ritirati dal servizio.

LA TECNICA DI PROVA

La tecnica di prova SP consiste essenzialmente nell'applicare un carico nel centro di un provino a basso spessore, registrando il diagramma carico/deflessione. Il punzone ha superficie di contatto sferica. Si tratta di una prova di tipo statico, condotta in controllo di spostamento dell'attuatore; tipicamente una prova dura un paio di minuti. Esistono nel mondo diverse soluzioni per la geometria del provino (a forma di dischetto o a sezione quadrata) e del punzone; la versione adottata al CISE riprende sostanzialmente un disegno dell'EPRI (*Electric Power Research Institute*) (Foulds e Jewett, 1991) e prevede raggio del punzone di 1.25 mm, dischetto con diametro 8 mm e spessore 0.5 mm. La configurazione sperimentale è mostrata in Fig. 1.

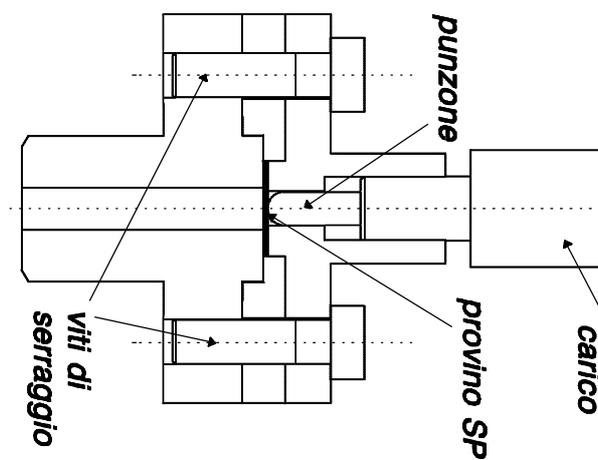


Figura 1: configurazione della tecnica di prova SP "convenzionale".

Esistono fondamentalmente due versioni della tecnica di prova SP:

- una prima versione, in uso nel mondo da una decina di anni, prevede l'esecuzione di una serie di prove SP a varie temperature, e dal diagramma energia di rottura vs. temperatura si ricava una stima della $FATT_{50}$ del materiale; inoltre, mediante alcune relazioni empiriche esistenti in letteratura, si ottengono anche stime della tenacità a frattura e delle caratteristiche tensili;
- più di recente (Foulds *et alii*, 1995; Foulds *et alii*, 1997) è stata proposta una versione innovativa, che combina dati sperimentali e analisi agli elementi finiti per la determinazione, in modo rigoroso, della tenacità a frattura e della curva tensile sforzo/deformazione del materiale.

La versione "consolidata" della tecnica di prova SP

Il sistema sviluppato al CISE prevede l'impiego di una macchina servocontrollata, ad asse di carico verticale, con cella di carico e punzone posti superiormente e provino SP che durante la prova si muove verso l'alto fino al contatto con il punzone. Una tipica registrazione carico/spostamento per una prova SP eseguita a temperatura ambiente è riportata nella Fig. 2.

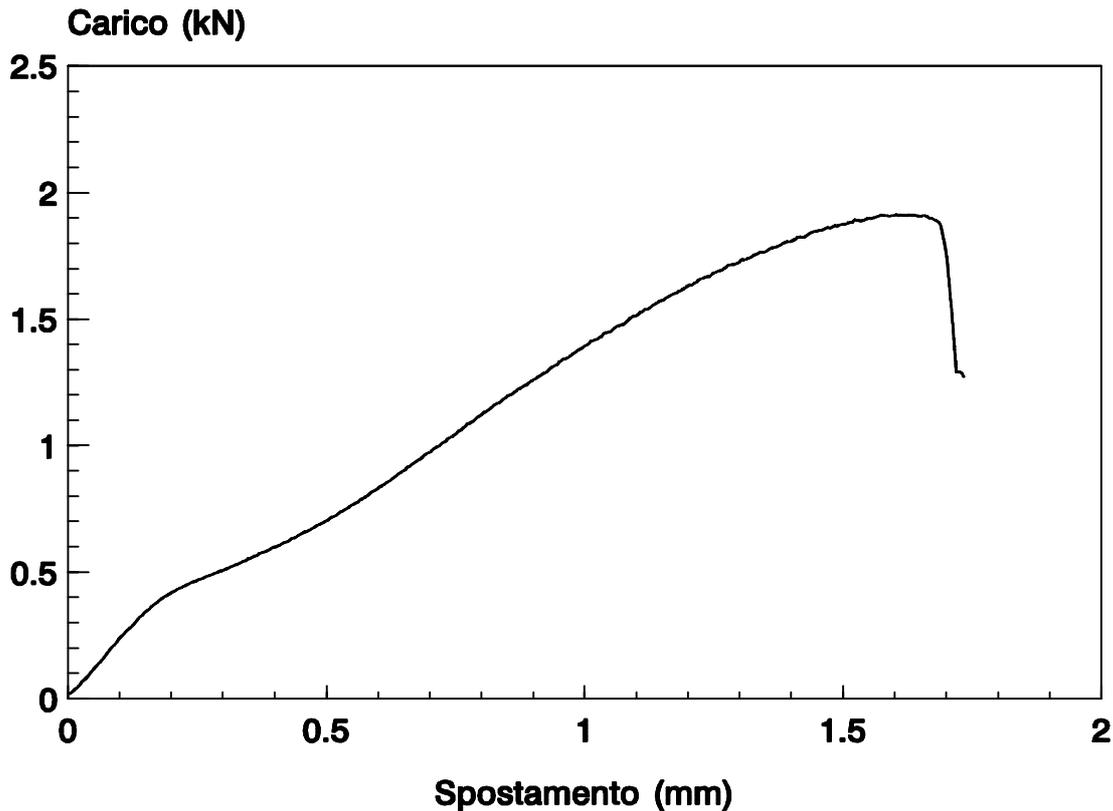


Figura 2: tipico diagramma carico/spostamento per una prova SP a T.A.

L'area sottesa da tale diagramma fino al carico massimo rappresenta l'energia di frattura. Eseguendo prove SP a diverse temperature, sperimentalmente si riscontra, come per le prove di resilienza, l'ottenimento di una curva sigmoideale. La temperatura corrispondente al suo punto di flesso, che rappresenta la transizione fra comportamento fragile e comportamento duttile, viene denominato T_{SP} ; tale temperatura è correlabile (tramite formule largamente empiriche, con coefficienti specifici per le diverse classi di acciai) al valore della $FATT_{50}$ determinabile mediante normali prove di resilienza. Generalmente, il valore di T_{SP} cade a temperature molto inferiori al valore della $FATT_{50}$, e dunque le prove SP per determinare la $FATT_{50}$ devono essere condotte a temperature sempre inferiori alla temperatura ambiente. Si usa allo scopo un sistema di immersione del provino SP in vapori di azoto. Inoltre, sempre per via empirica, sul diagramma carico/spostamento registrato in una prova SP (tipicamente una prova a temperatura ambiente) si identificano, con opportuni criteri operativi, alcuni punti associati al superamento del limite elastico e al raggiungimento del carico di rottura, dai quali, tramite opportuni algoritmi semi-empirici, vengono stimati i valori di R_y e R_m (carico unitario di snervamento e resistenza a trazione).

Il problema di tutti questi metodi empirici per stimare $FATT_{50}$, K_{Ic} , R_y e R_m è che si devono utilizzare correlazioni che contengono coefficienti calibrati su determinati materiali, tipicamente americani e giapponesi. Spesso, anche quando non si tratta di acciai di ambito nucleare (di nessun uso in Italia), si tratta pur sempre di acciai poco rappresentativi (o per lo meno di dubbia rappresentatività) del panorama componentistico nostrano. Dunque occorre prevedere attività specifiche preliminari, per validare l'impiego di certe correlazioni di letteratura per i materiali che interessano, o eventualmente per ricalibrare opportunamente le correlazioni stesse. Si tratta dunque di eseguire studi comparativi, fra grandezze desunte da prove SP e grandezze determinate con metodologie standardizzate. Queste ultime prove sono

ovviamente possibili solo su campioni prelevati distruttivamente da componenti dismessi definitivamente dal servizio. Una volta validati (ridefiniti) i metodi, risulta poi possibile passare alle applicazioni routinarie e non distruttive delle prove SP, per componenti in servizio oggetto di campionamenti SP durante alcune fermate d'impianto. Il CISE ha effettivamente svolto attività per le due fasi della sperimentazione SP: quella delle analisi comparative a scopo di validazione, e quella degli studi di integrità dei componenti in servizio.

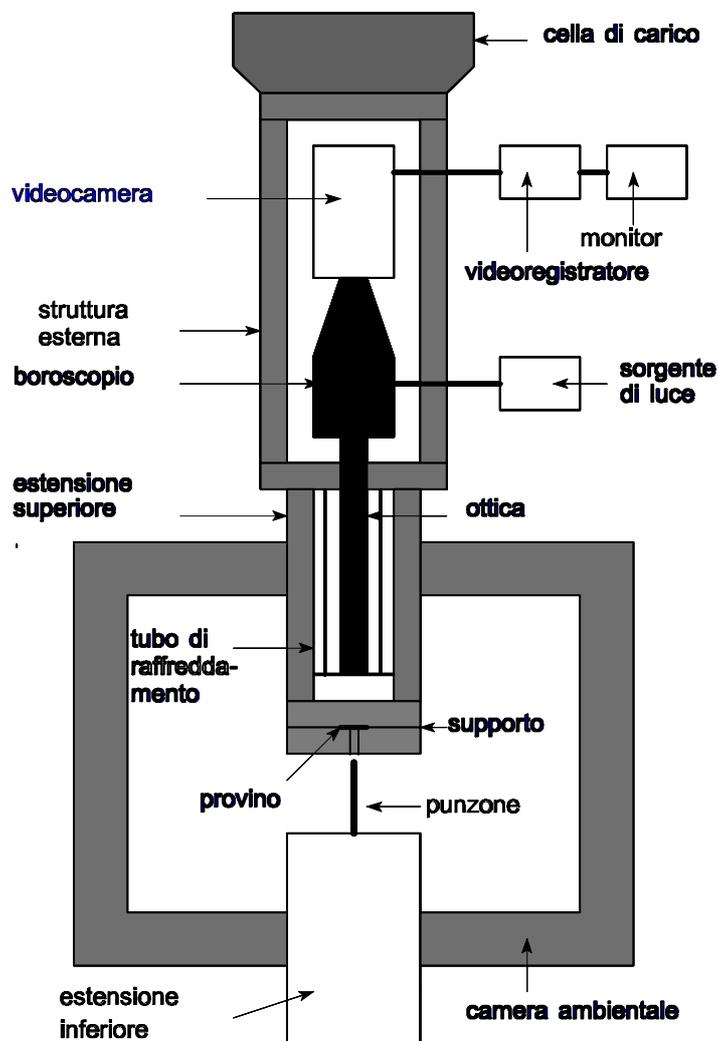


Figura 3: dispositivo sperimentale realizzato per il metodo SP "innovativo".

La tecnica "innovativa" per prove SP

Per ovviare alle approssimazioni precedentemente descritte, che obbligano a onerose verifiche e ricalibrizioni empiriche, da qualche anno FAA (*Failure Analysis Associates*) ha proposto l'impiego di una particolare versione della prova SP (Foulds *et alii*, 1995; Foulds *et alii*, 1997). Questa versione innovativa del metodo SP consiste nell'eseguire la prova su una macchina equipaggiata con un estensimetro, posto in prossimità del provino, e una videocamera ingrandente che registra il momento di prima comparsa della cricca durante la prova. Il metodo prevede un'analisi agli elementi finiti del campione SP, ricavando per iterazioni di tentativo i parametri di Ramberg-Osgood (K e n) della curva tensile

sforzo/deformazione ($\epsilon_p = K \times s^n$). Inoltre, in base a un criterio teorico di frattura, in corrispondenza del raggiungimento di un valore critico di densità di energia nel materiale (dunque indipendente dalla configurazione geometrica, e in particolare identico per provino SP e C(T)), il metodo consente di determinare il valore di K_{Ic} prescindendo da aggiustamenti e calibrazioni empiriche.

Il sistema sperimentale realizzato al CISE secondo questa versione innovativa del metodo SP è schematizzato nella Fig. 3. Nella Fig. 4 è mostrato lo schema concettuale di lavoro, per la determinazione della tenacità e delle caratteristiche tensili.

Le prime verifiche con tale sistema sono consistite in analisi comparative, eseguite di recente e solo su acciai del tipo CuNi52Mo, in particolare verificando i risultati ottenuti col nuovo metodo SP rispetto al metodo tradizionale e rispetto ovviamente ai valori dei parametri tensili e della tenacità ottenuti con i metodi standard (prove tensili tradizionali e prove di tenacità su provini C(T)).

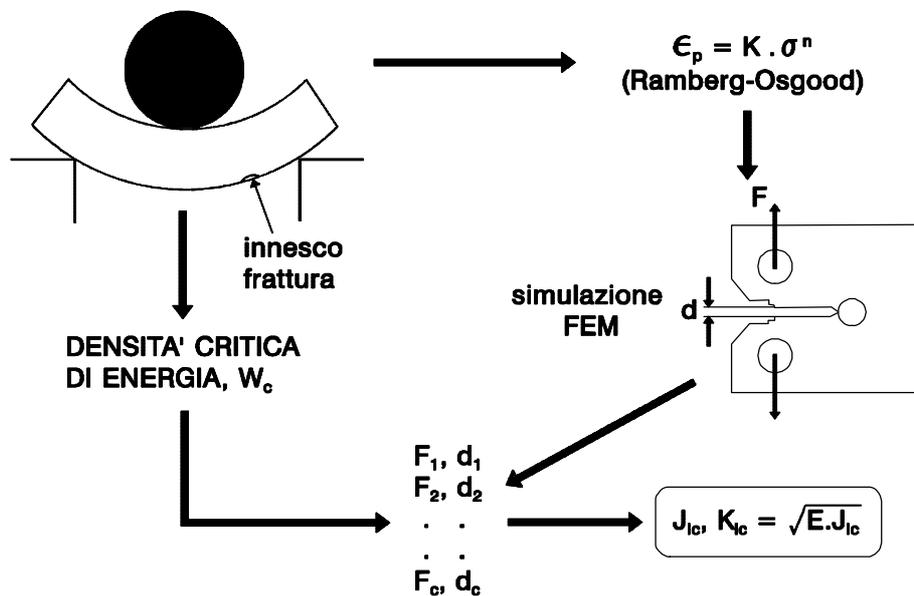


Figura 4: schema di lavoro del metodo SP innovativo.

RISULTATI

Le Figg. 5 , 7 riportano, per taluni acciai oggetto di sperimentazioni comparative svolte al CISE (misure ottenute con tecnica SP e con le tecniche tradizionali: provini Charpy-V, tensili a sezione circolare, Compact Tension), le bande di errore delle varie grandezze determinate mediante la tecnica SP, considerata in entrambe le versioni (tradizionale e innovativa); le valutazioni di tenacità con il metodo innovativo, su acciai tipo CuNi52Mo, sono attualmente in corso e i dati non sono per ora disponibili. Per quanto riguarda il metodo innovativo per la stima delle caratteristiche tensili, occorre aggiungere che il metodo SP innovativo si è finora rivelato particolarmente efficace nello stimare con buona accuratezza (errori entro il 3%) i due parametri della relazione analitica di Ramberg-Osgood (K e n). Inoltre, si rileva che il metodo innovativo, attraverso la determinazione della curva di Ramberg-Osgood, fornisce un criterio per stimare il carico unitario di snervamento (riferito al 0.2% di deformazione plastica), mentre nulla può dire circa il carico di rottura.

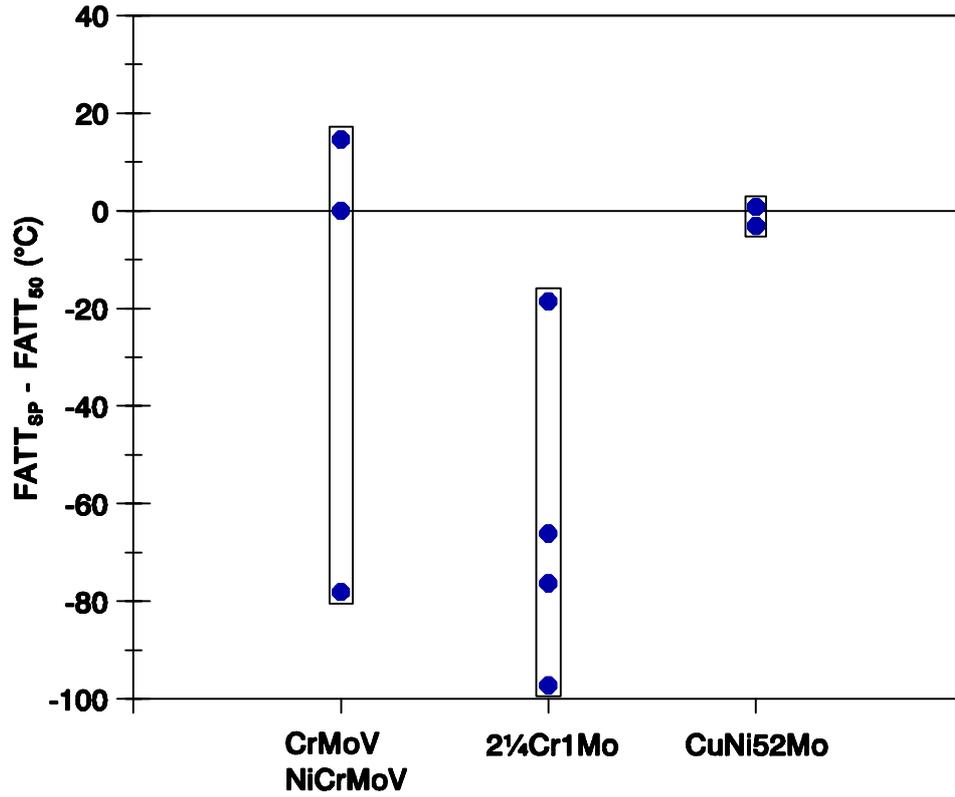


Figura 5: entità degli errori ottenuti su tre classi di acciai applicando il metodo SP per la determinazione della FATT₅₀.

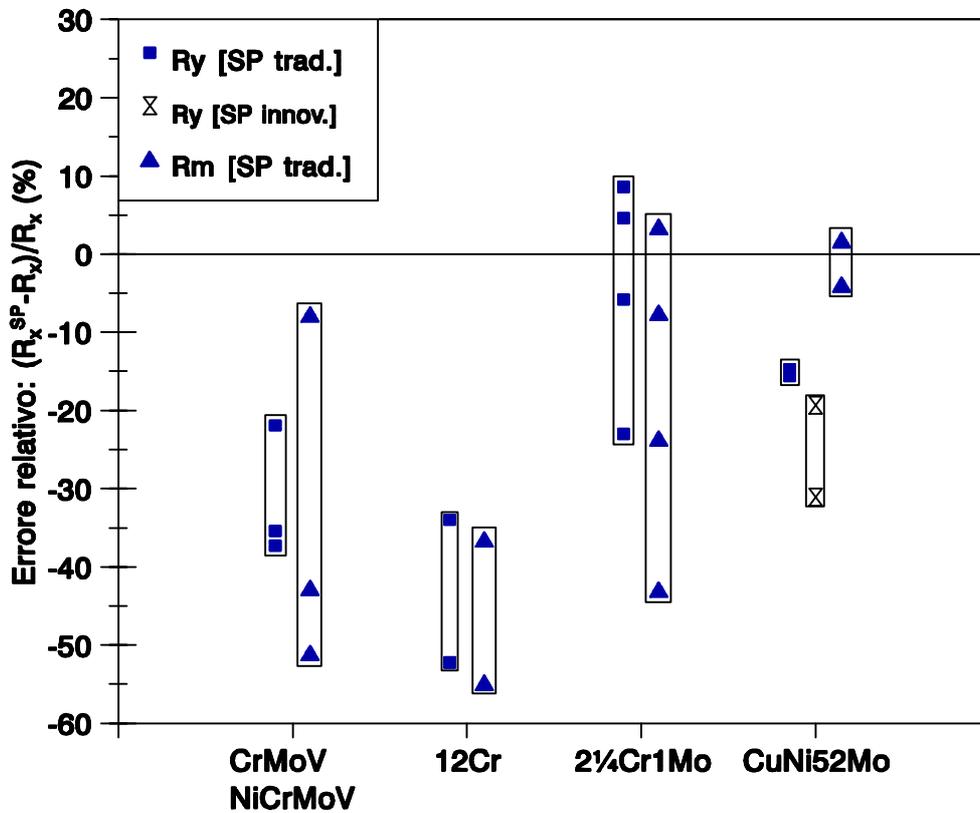


Figura 6: entità degli errori relativi ottenuti in prove SP per la stima dei parametri tensili su quattro classi di acciai.

Per ciò che concerne la stima della tenacità a frattura, comunque, il metodo SP "tradizionale", descritto precedentemente, offre un'ulteriore possibilità: qualora la $FATT_{50}$ del materiale risulti ben approssimata dalla correlazione fondata su T_{SP} , come nel caso degli acciai CuNi52Mo (vedi Fig. 5), è possibile utilizzare metodologie empiriche di letteratura basate sul valore di $FATT_{50}$ per stimare con buona approssimazione la tenacità a frattura del materiale (Bicego *et alii*, 1997); si vedano, a tale proposito, i confortanti risultati mostrati in Fig. 7 per alcuni acciai.

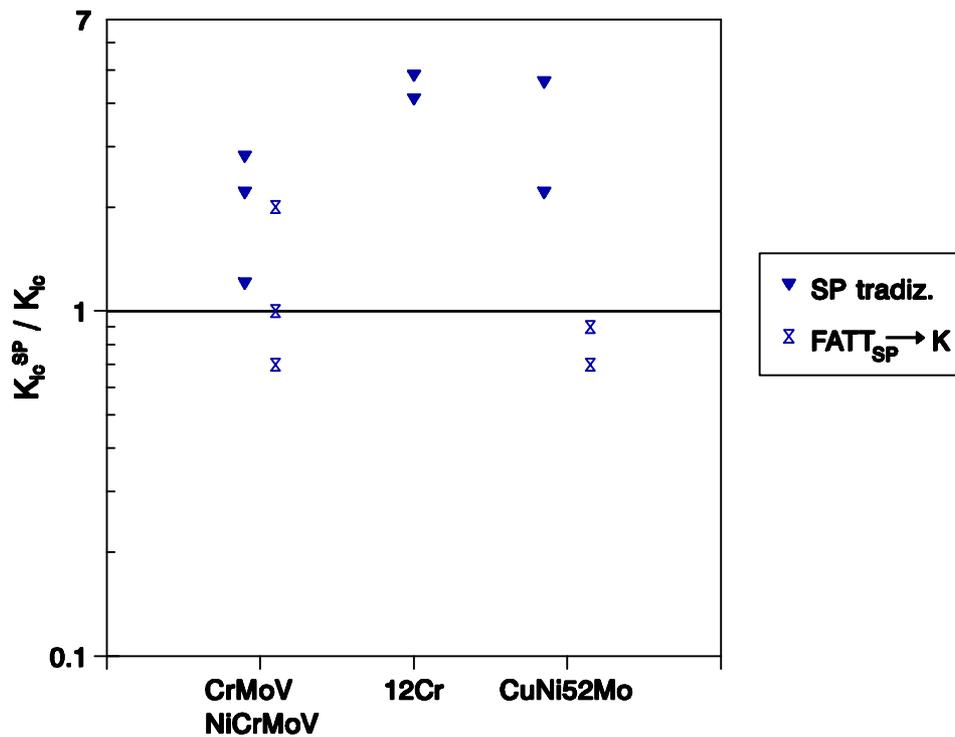


Figura 7: errori nei valori di tenacità ottenuti in prove SP, secondo diversi approcci.

CONCLUSIONI

E' stato descritto un sistema di prova meccanica che consente una miniaturizzazione dei provini così spinta da consentire caratterizzazioni non distruttive dei materiali di componenti in servizio. Tipicamente il campionamento, che viene effettuato durante una tipica fermata programmata dell'impianto, utilizza il sovraspessore di costruzione.

Sono state effettuate con tale sistema diverse prove, su quattro classi di acciai, allo scopo di:

- collaudare e verificare il dispositivo sperimentale realizzato;
- valutare l'applicabilità di certe correlazioni empiriche proposte in letteratura per risalire, dai dati delle prove SP, alle effettive caratteristiche meccaniche del materiale quali dovrebbero essere fornite dalle prove standard (che sono inapplicabili per componenti destinati a riprendere il servizio, dato che il campionamento per provini standard sarebbe distruttivo);
- esaminare la convenienza di un metodo SP di tipo più avanzato, basato su un approccio meglio definito a livello teorico.

I risultati ottenuti nelle analisi comparative finora svolte hanno permesso di evidenziare quanto segue.

- (1) I valori stimati per la $FATT_{50}$ con tecnica SP (oggetto della metodica SP tradizionale) sono in ragionevole accordo coi dati delle prove standard di resilienza per alcune classi di materiali, mentre per altre occorre probabilmente ridefinire i coefficienti delle correlazioni empiriche.
- (2) Secondo la versione SP tradizionale, le stime dei parametri tensili (carico unitario di snervamento e resistenza a trazione) sono da ritenersi insoddisfacenti, essendo la previsione SP generalmente inferiore rispetto ai valori di riferimento (ottenuti nelle prove di trazione standard). Tuttavia, vale la pena di approfondire se tale sottostima si possa ragionevolmente ritenere costante, a parità di classe di acciaio investigata; se così fosse, risulterebbe facile tenere conto di un simile errore sistematico, e si potrebbe concludere che il metodo SP è utilmente impiegabile per stimare tali parametri tensili. Un'osservazione analoga si può formulare per la stima del carico unitario di snervamento ottenuta mediante i parametri di Ramberg-Osgood, determinati attraverso il metodo SP innovativo.
- (3) La tenacità a frattura determinata dalle prove SP in versione tradizionale è di solito ben lontana del valore effettivo di tenacità critica del materiale. Tuttavia, effettuando delle stime di tenacità con metodologie empiriche basate sul dato di $FATT_{50}$, che risulta in alcuni casi ben stimato dalle prove SP, i risultati diventano abbastanza promettenti (si veda, ad esempio, il caso degli acciai tipo CrMoV, NiCrMoV e CuNi52Mo).
- (4) Le prime verifiche del metodo SP in versione innovativa per stimare i parametri di Ramberg-Osgood del materiale forniscono risultati in buon accordo con quelli delle prove tensili standard, almeno per il caso degli acciai tipo CuNi52Mo.
- (5) I valori di tenacità ottenuti col metodo SP innovativo evidenziano invece un quadro più incerto (si tratta, peraltro, di sperimentazioni di portata per il momento ancora limitata).

BIBLIOGRAFIA

- Bicego, V., Lucon, E. and Crudeli, R., 1997, "Integrated Technologies for Life Assessment of Primary Power Plant Components", in pubblicazione su Nucl. Eng. and Des.
- Foulds, J.R. and Jewett, C.W., 1991, "Miniature Specimen Test Technique for Estimating Toughness", EPRI GS-7526, Project 1957-10, Final Report.
- Foulds, J.R., Woytowitz, P.J., Parnell, T.K. and Jewett, C.W., 1995, "Fracture Toughness by Small Punch Testing", J. of Testing and Evaluation, Vol.23, No.1, pp.3-10.
- Foulds, J.R., Wu, M., Srivastav, S. and Jewett, C.W., 1997, "Fracture and Tensile Properties of ASTM Cross-Comparison Exercise A533B Steel by Small Punch Testing", ASTM STP 1329, di prossima pubblicazione.
- Kameda, J. and Mao, X., 1992, "Small-Punch and TEM-Disc Testing Techniques and Their Application to Characterization of Radiation Damage", J. of Mat. Sci., Vol.27, pp.983-989.
- Mao, X. and Takahashi, H., 1987, "Development of a Further-Miniaturized Specimen of 3 mm Diameter for TEM Disk (f 3 mm) Small Punch Tests", J. of Nucl. Mat., Vol.150, pp.42-52.