

# VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA RESIDUA DELLE ARMATURE ESPOSTE AL FUOCO

R. Felicetti

DIS Politecnico di Milano - Piazza Leonardo da Vinci 32 - 20133 Milano  
tel: 02 23994388 - fax: 02 23994220 - email: roberto.felicetti@polimi.it

Keywords: armature, danno da incendio, durezza dinamica, perforazione  
dynamic hardness, drilling, fire damage, rebars

## SOMMARIO

È noto che le strutture in calcestruzzo armato hanno buone probabilità di sopravvivere all'incendio, grazie alla bassa diffusività termica del materiale, all'iperstaticità dello schema statico ed alla ridotta intensità dei carichi che in genere accompagnano questo evento eccezionale. Con riferimento alle armature metalliche, queste sono poi in grado di recuperare parte delle loro proprietà meccaniche durante il raffreddamento, sebbene ciò dipenda sensibilmente dalle loro proprietà metallurgiche. Di fatto, le caratteristiche originarie di resistenza e duttilità richieste al materiale possono essere ottenute sia con l'aggiunta di elementi leganti che con opportuni trattamenti termici e meccanici in fase di laminazione, il cui effetto però si perde a fronte del processo di normalizzazione indotto dall'esposizione al fuoco. Al fine di valutare la sicurezza residua della struttura incendiata diventa quindi importante disporre di strumenti non distruttivi per la stima del decadimento delle proprietà meccaniche delle barre d'armatura, che possibilmente non siano influenzati dalle loro caratteristiche iniziali e dal processo produttivo.

Nel presente lavoro vengono indagate due differenti tecniche di indagine. La prima è la prova di durezza dinamica (prova Leeb), che si basa sull'impatto di una piccola massa battente dotata di un indentatore sferico, e sulla conseguente attenuazione della sua velocità di rimbalzo. Il metodo ha dimostrato una buona sensibilità al decadimento termico dell'acciaio, ma richiede alcuni accorgimenti per la sua implementazione sul campo, ed in particolare una accurata preparazione della superficie di prova. La seconda tecnica è basata sulla resistenza alla perforazione, rappresentata dalla spinta che è necessario esercitare sull'utensile per mantenere una velocità di avanzamento prefissata. Questo principio pone vincoli meno stringenti per la preparazione del campione, ma le misure ottenute sono di più difficile interpretazione, soprattutto a causa dell'addolcimento dell'acciaio indotto dall'alta temperatura, che ne aumenta la tenacità e la capacità di deformazione, e quindi la resistenza all'asportazione dei trucioli.

Nell'articolo vengono verificate le potenzialità dei due metodi, mettendoli a confronto con una serie di acciai di vecchia o recente produzione sottoposti a cicli termici di temperatura massima crescente, rappresentativi di un'ampia casistica di scenari di incendio.

## Introduzione

Le strutture in calcestruzzo spesso mostrano una buona resistenza all'incendio, grazie ad una serie di fattori favorevoli. Da un lato, la bassa diffusività termica del materiale garantisce una propagazione relativamente lenta del calore nelle membrature e quindi un ridotto decadimento della resistenza di ciascuna sezione (purché di adeguato spessore). D'altro canto, nel caso delle strutture gettate in opera, l'iperstaticità dello schema statico richiede il coinvolgimento di più sezioni, diversamente esposte e sollecitate, in un eventuale collasso. Infine, i carichi statici che agiscono durante un incendio sono in genere ben inferiori a quelli massimi di progetto, e questa riserva di capacità portante compensa il deterioramento dei materiali e contribuisce significativamente alla resistenza al fuoco della struttura.

Occorre dire che il danno subito dallo strato superficiale di calcestruzzo è praticamente irreversibile e spesso si rende necessaria la sua sostituzione per soddisfare i requisiti di sicurezza e durabilità. Viceversa, ci si può attendere che le armature d'acciaio riacquistino una quota consistente della loro resistenza durante il raffreddamento. L'entità di questo recupero è un aspetto di notevole importanza, dal momento che spesso le armature rappresentano il punto debole delle sezioni (si pensi agli elementi inflessi) e la struttura sopravvissuta all'incendio sarà in ogni caso tenuta a resistere alle azioni massime associate allo Stato Limite Ultimo, in accordo con le vigenti normative.

Le proprietà iniziali delle armature per calcestruzzo dipendono dalla microstruttura dell'acciaio [1], che viene modificata durante il processo produttivo mediante l'aggiunta di elementi leganti o con opportuni trattamenti termici e meccanici, in modo da conferire le caratteristiche di resistenza, duttilità e saldabilità necessarie per le applicazioni strutturali. Tuttavia, da questi aspetti dipende anche la loro sensibilità al ciclo termico di riscaldamento e raffreddamento causato da un incendio, che in particolare è influenzata da a) la dimensione media delle regioni con orientamento omogeneo del reticolo cristallino (grani); b) il numero dei difetti su scala atomica (dislocazioni); c) la presenza di eventuali elementi leganti e d) il processo di produzione (per es. acciai laminati a caldo o a freddo). In un recente lavoro [2] si è visto che le moderne barre trattate con tempra e rinvenimento alla fine della laminazione (processo Tempcore o Thermex) si dimostrano più sensibili delle vecchie barre al carbonio, se esposte a temperature superiori a 550°C. Un discorso a parte merita l'acciaio inossidabile, che mostra un ottimo comportamento al fuoco se laminato a caldo, mentre è vero il contrario nel caso di laminazione a freddo [2].

Considerato il vasto assortimento dei tipi d'acciaio che è possibile incontrare nelle strutture esistenti e la forte variabilità delle condizioni di riscaldamento riconducibili agli scenari di incendio reali, si rendono necessari dei metodi di indagine rapidi ed efficaci, che non richiedano una preventiva conoscenza delle caratteristiche metallurgiche delle barre in esame. A tal fine, in questo studio sono stati indagate due tecniche distinte: la misura dinamica della durezza con un apposito strumento portatile (metodo Leeb) e la valutazione della resistenza alla perforazione mediante un trapano opportunamente strumentato.

Nei paragrafi che seguono vengono discusse le problematiche legate all'implementazione dei due metodi, la loro sensibilità al danno termico subito dalle barre d'armatura e le possibili interpretazioni dei risultati.

## Tipi di acciaio e programma sperimentale

Nel presente lavoro sono state considerate sia le barre per armature attualmente più diffuse sul mercato che le tradizionali barre ad aderenza migliorata di acciaio al carbonio. In dettaglio, sono stati messi a confronto i seguenti tipi d'armatura (Tabella 1):

*Barre temprate e rinvenute (Quenched and Self-Tempered - QST,  $\varnothing = 10$  e  $16$  mm).*

È attualmente il tipo di armatura più diffuso in Europa. La superficie del tondino viene raffreddata con un getto d'acqua in pressione all'uscita dal laminatoio. In tal modo si produce una corona esterna temprata e rinvenuta con struttura martensitica ed elevata resistenza, mentre il nucleo è soggetto ad un raffreddamento più graduale e presenta una struttura duttile di ferrite-perlite. Ciò consente di elevare la tensione di snervamento pur mantenendo basso il tenore di carbonio, a vantaggio della duttilità e della saldabilità.

*Barre in acciaio micro-legato (Micro-Alloyed - MA,  $\varnothing = 10$  mm).*

Le proprietà meccaniche vengono migliorate introducendo elementi leganti nella fusione (ad es. Niobio e Vanadio), con un aumento del costo ma ottenendo una sezione del tondino omogenea in termini di microstruttura, resistenza ed elevata duttilità.

*Barre in acciaio inossidabile laminato a freddo*

*(acciaio austenitico AISI 304L - Stainless Steel - SS,  $\varnothing = 12$  mm).*

La resistenza alla corrosione viene ottenuta con un contenuto di cromo superiore al 10.5% ed un tenore di carbonio inferiore allo 0.07% (EN 10088-1). Nonostante il costo elevato (da 4 a 8 volte più delle barre ordinarie), l'impiego dell'acciaio inossidabile è strategico per il miglioramento della durabilità di ponti, viadotti e strutture in ambiente marino. Come anticipato, mentre le barre inossidabili laminate a caldo in pratica riacquistano le proprietà iniziali dopo il raffreddamento [2], quelle lavorate a freddo sono particolarmente sensibili al danno termico, e rappresentano sicuramente un caso di maggior interesse ai fini del presente studio.

*Barre in acciaio al carbonio di sezione quadrata (Carbon Steel - CS, lato = 12 e 20 mm).*

Prodotte correntemente nel nostro Paese negli anni 1950-70, queste barre mostrano una elevata resistenza iniziale, ma sono anche più sensibili all'incendio delle vecchie barre tonde lisce laminate a caldo [2].

Per ciascun tipo di barra sono stati ricavati dei campioni di lunghezza 0.6 m, da sottoporre alle prove di trazione e dei campioni da 0.2 m per l'implementazione delle prove non distruttive. Tutti i provini sono stati scaldati a  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$  fino a  $T_{\text{max}} = 500, 600, 700, 800$  e  $1000^{\circ}\text{C}$ . La temperatura massima è stata mantenuta per un'ora e si è quindi proceduto al raffreddamento con la stessa velocità fino a temperatura ambiente.

tipo di barra	QST 10	QST 16	MA 10	SS 12	CS 12/20
tensione di snervamento $f_y$ (MPa)	524	529	453	701	463
resistenza a trazione $f_t$ (MPa)	642	624	614	812	710
durezza dinamica (indice Leeb)	477	481	474	562	476
resistenza alla perforazione (N)	46.1	-	33.4	61.9	40.3

Tabella 1 - Valori di riferimento per le barre indagate non soggette a ciclo termico

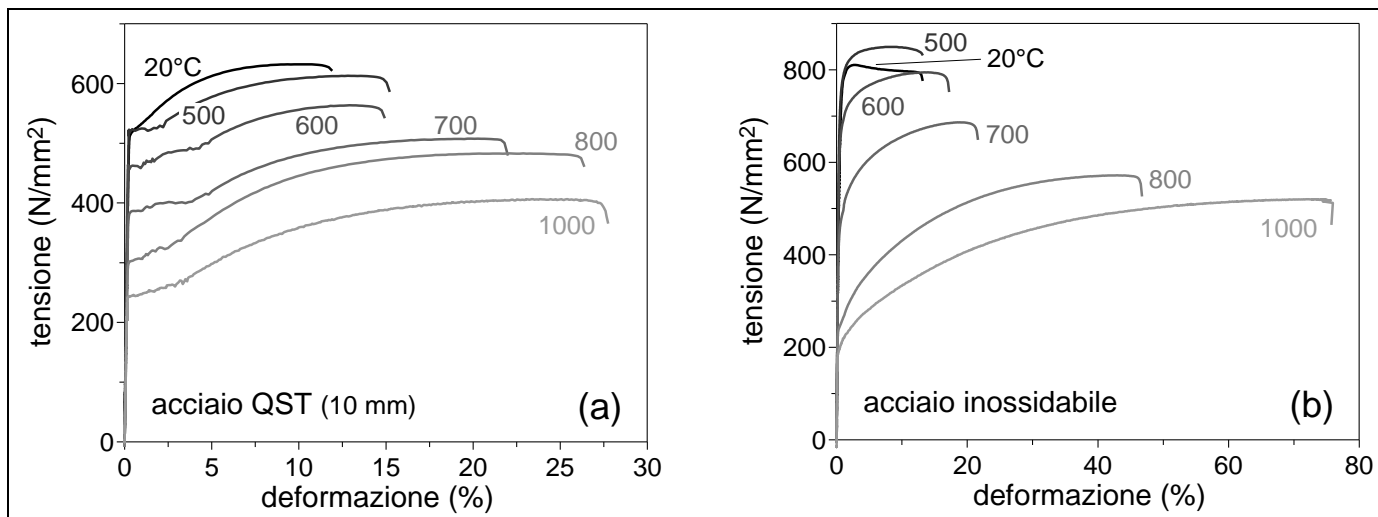


Figura 1 - Curve residue tensione-deformazione per due degli acciai indagati

Per quanto riguarda la risposta a trazione (Fig. 1), sono state svolte due prove identiche per ciascun acciaio e per ogni temperatura, con un'ottima ripetibilità dei risultati. Tutti i campioni non hanno mostrato variazioni apprezzabili della resistenza residua o della duttilità per un'esposizione a 500°C (Fig. 2). Oltre questa soglia, sono stati osservati diversi livelli di decadimento a seconda del tipo d'acciaio.

Le barre in acciaio al carbonio e micro-legato hanno mostrato la miglior tenuta, mentre le barre in acciaio inossidabile laminato a freddo hanno confermato la loro considerevole sensibilità all'alta temperatura, sia in termini di riduzione della tensione di snervamento che di aumento della deformazione ultima (Fig. 1b). Questi andamenti sono evidenziati dalla tensione di snervamento residua (Fig. 2a), mentre un decadimento meno marcato è stato osservato per la resistenza a trazione, con conseguente un aumento del rapporto di incrudimento  $f_t/f_y$  (fig. 2b).

Occorre osservare che a tutte le temperature gli acciai al carbonio hanno mostrato un punto di snervamento ben riconoscibile, seguito da un plateau fino alla deformazione dell'1% circa (Fig. 1a). Al contrario, l'acciaio inossidabile ha richiesto la definizione di un punto di snervamento convenzionale (allungamento non proporzionale = 0.2%). Questo parametro ha delle evidenti limitazioni nel rappresentare la risposta del materiale nel campo delle deformazioni significativamente più elevate prodotte dai metodi di indagine qui proposti.

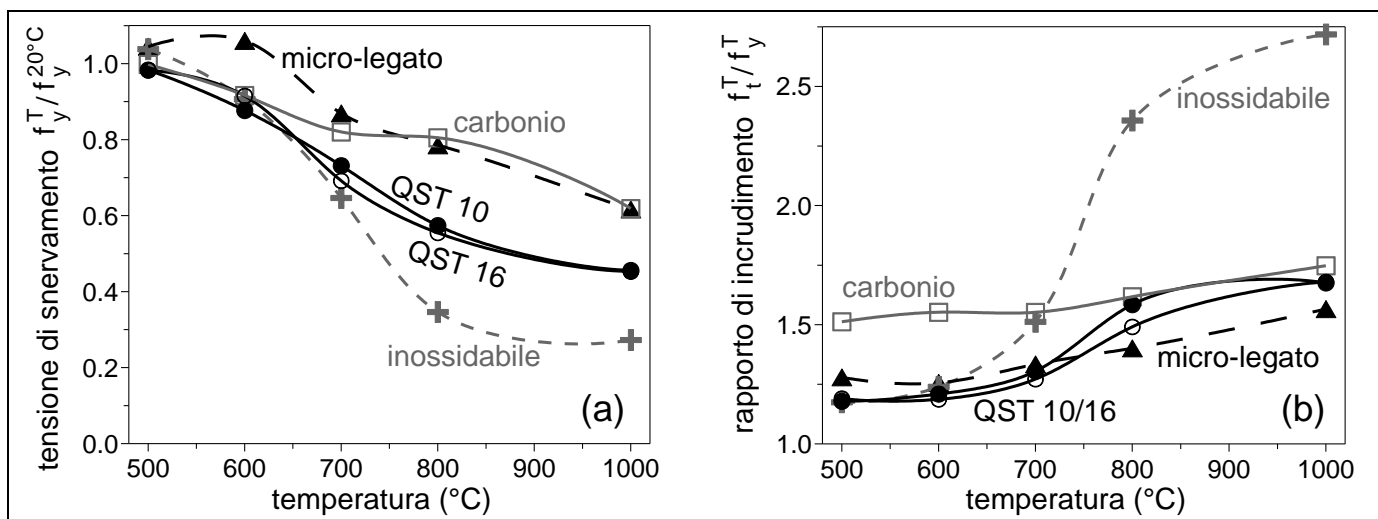


Figura 2 - Evoluzione della tensione di snervamento e del rapporto di incrudimento

## Prove di durezza dinamica

Le prove di durezza sono un metodo consolidato per la valutazione della qualità dei metalli (resistenza meccanica e all'usura). Il principio consiste nell'indentare la superficie del campione applicando gradualmente un carico prefissato ad una punta di forma sferica, conica o piramidale. Viene quindi misurata la dimensione dell'impronta che si è venuta a creare. Sfortunatamente, i metodi statici classici (Brinell, Rockwell, Vickers) sono poco adatti per le applicazioni in situ, dal momento che richiedono un'accurata preparazione della superficie (rugosità  $< 0.1-0.3 \mu\text{m}$ ) e vengono implementati mediante strumentazioni da banco dotate di un sistema ottico per la misura dell'impronta.

Un'alternativa interessante è rappresentata dalla prova di durezza dinamica (metodo Leeb), nella quale una piccola massa munita di punta sferica in carburo di tungsteno o diamante ( $\varnothing = 3 \text{ mm}$ ) impatta contro la superficie del campione con una velocità assegnata, impressa da una molla precaricata [3]. Le velocità precedente e successiva all'impatto sono misurate a circa 1 mm dalla posizione di battuta, attraverso i picchi del potenziale elettrico indotto in una bobina da un magnete permanente montato sulla massa mobile (Fig. 2a). Il rapporto tra queste velocità, moltiplicato per 1000, viene definito come indice di durezza Leeb. Dal momento che non è necessario imprimere una spinta all'indentatore né misurare la dimensione dell'impronta, il metodo consente di sviluppare strumenti molto compatti, che possono essere facilmente posizionati sulla superficie di una barra d'armatura in opera (Fig. 2b). In ogni caso è richiesta la preparazione di una superficie piana e liscia, anche se con tolleranze meno stringenti (rugosità media  $< 2 \mu\text{m}$ ). Inoltre, il campione deve essere vincolato saldamente, per evitare possibili vibrazioni che potrebbero ridurre la velocità di rimbalzo, portando a una sottostima della durezza. Questo requisito potrebbe non essere soddisfatto nel caso di una membratura danneggiata dal fuoco, a causa del distacco delle barre dal conglomerato per effetto delle diverse deformazioni termiche.

Al fine di accertare la sensibilità di questo metodo alla perdita di resistenza mostrata dagli acciai sottoposti a ciclo termico, i campioni di lunghezza 0.2 m delle barre elencate in Tabella 1 sono stati vincolati in una morsa per macchina utensile. La superficie superiore di ciascun campione è stata fresata e quindi levigata con dischi di tela abrasiva. Per ciascuna combinazione di materiale e temperatura massima di riscaldamento sono state condotte circa 30 misure, distribuite su due campioni identici, riscontrando una buona

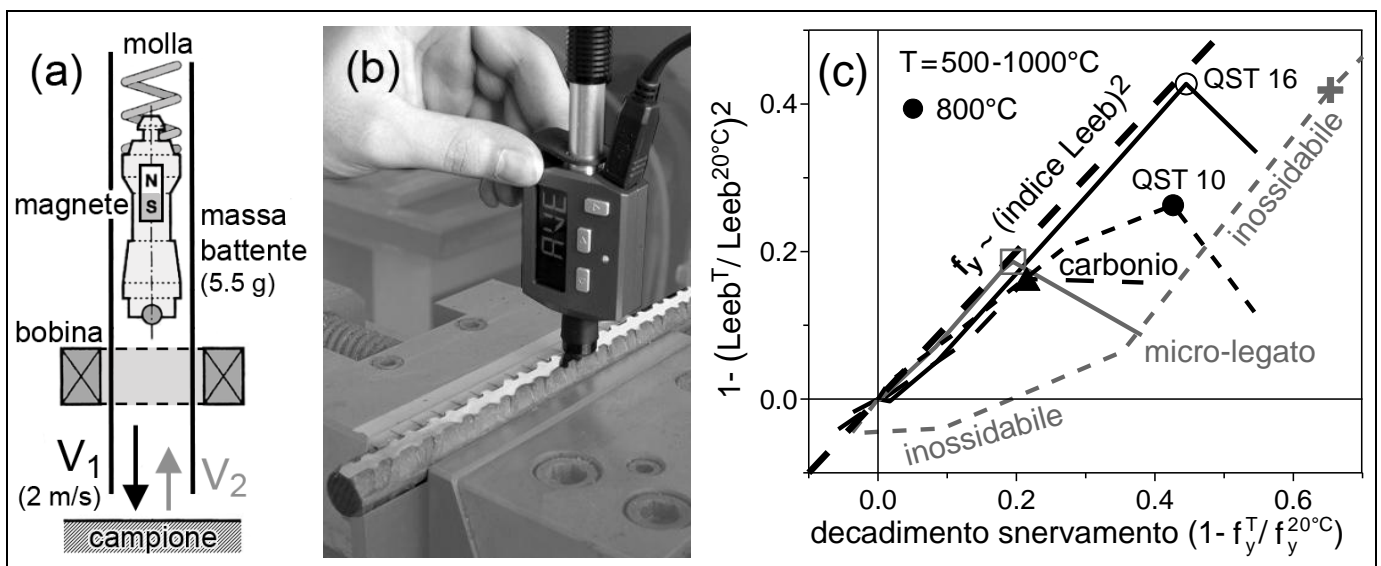


Figura 3 - a, b) Durometro di Leeb e c) decadimento di snervamento e durezza

ripetibilità (coefficiente di variazione < 5%).

Per quanto riguarda l'interpretazione dei risultati, diversi studi sono disponibili in letteratura, che presentano correlazioni empiriche, numeriche o in forma chiusa con la tensione di snervamento. Tra queste, la relazione lineare con l'energia cinetica (indice di Leeb al quadrato) proposta da Stilwell e Tabor per l'indentatore conico [4] è in buon accordo con i risultati sperimentali relativi a barre di acciaio esposte fino a 800°C (Fig. 3c). Dopo un ciclo termico a 1000°C si registrano invece un aumento della durezza e una maggiore dispersione dei risultati, probabilmente a causa dell'ingrossamento dei grani nella microstruttura del materiale. Un comportamento notevolmente diverso caratterizza invece l'acciaio inox laminato a freddo, probabilmente per la scarsa rappresentatività del punto di snervamento convenzionale, il considerevole incrudimento e l'elevata deformazione ultima mostrati dalle barre danneggiate termicamente (si veda la Fig. 1b).

### Prove di resistenza alla perforazione

La misura della resistenza alla perforazione è una tecnica di crescente interesse per la valutazione dei fenomeni di degrado in diversi materiali da costruzione (legno, malta, calcestruzzo, pietra, ecc.) [5]. Con riferimento ai metalli, il principio si basa sul taglio di un truciolo di spessore costante, ottenuto imponendo un rapporto fisso tra le velocità di rotazione e di avanzamento della punta. Durante la prova viene registrata in continuo la spinta che è necessario imprimere all'utensile, parametro che ha mostrato una buona correlazione con la durezza Vickers nell'intervallo 200-900 HV [6] ed è stato applicato con successo per verificare lo spessore dello strato indurito in acciai trattati superficialmente. In accordo col riferimento citato, è stato messo a punto un dispositivo di prova basato su un comune trapano fissato a un banco (Fig. 4a). L'avanzamento del campione (0.01 mm per giro della punta, profondità del foro ~ 4 mm) è impresso da una guida lineare azionata da un motore a passi e dotata di cella di carico. Per garantire una buona ripetibilità delle

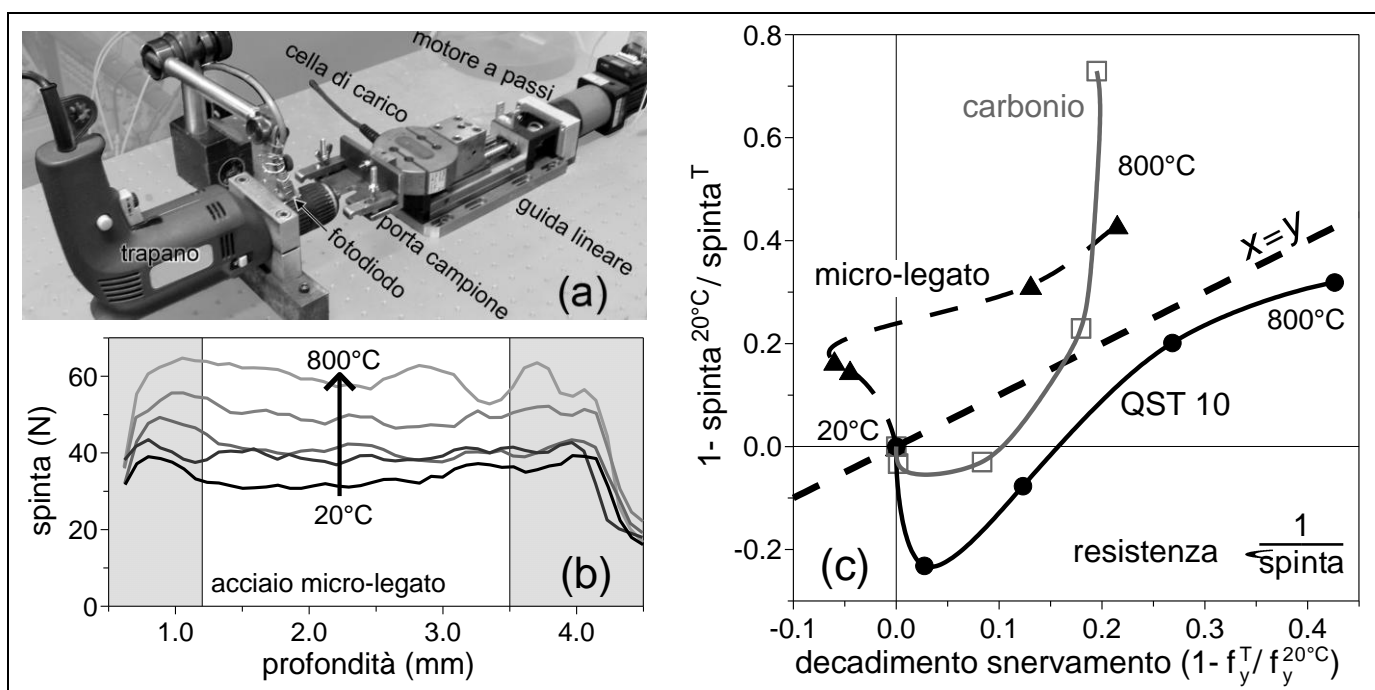


Figura 4 - a) Banco per prove di perforazione, b) tipiche curve di risposta e c) confronto con la tensione di snervamento residua

condizioni di prova sono state utilizzate punte con rivestimento in titanio carbo-nitrato ( $\varnothing = 2 \text{ mm}$ ), che hanno dimostrato di fornire risultati uniformi per più di 50 fori nelle barre QST vergini.

Sorprendentemente, gli acciai sottoposti a danneggiamento termico si sono dimostrati più difficili da forare (Fig. 4b), probabilmente a causa della loro maggiore capacità deformativa e del marcato incrudimento. Per una data tensione di snervamento, queste trasformazioni comportano una più difficile separazione del truciolo, al punto da condurre alla rottura della punta e rendere impossibile condurre le prove sui campioni esposti a  $1000^\circ\text{C}$  e, nel caso delle barre di acciaio inossidabile, già a partire da temperature superiori a  $500^\circ\text{C}$ . Sebbene la spinta esercitata si sia dimostrata un parametro molto sensibile alle trasformazioni subite dagli acciai esposti all'alta temperatura, al momento non è stata riconosciuta una relazione chiara con la tensione di snervamento (Fig. 4c) e il metodo nella sua veste attuale non può essere utilizzato se non dopo una specifica calibrazione per il materiale in esame.

## **Conclusioni**

Nel presente studio sperimentale sono stati indagati due possibili metodi per la valutazione del danno da incendio subito dalle barre d'armatura delle strutture in calcestruzzo: la misura della durezza dinamica e della resistenza alla perforazione. Le principali conclusioni possono essere riassunte come segue.

La prova di durezza dinamica (metodo Leeb) ha dimostrato di essere una tecnica relativamente semplice da applicare e con una buona sensibilità al decadimento termico del materiale. È stata inoltre trovata una semplice correlazione con la tensione di snervamento, valida per diversi tipi di acciaio esposti fino a  $800^\circ\text{C}$ , e quindi nell'intervallo di maggiore interesse per le applicazioni pratiche. La necessità di predisporre una superficie piana e liscia e di limitare le vibrazioni della barra durante l'impatto sono le maggiori limitazioni da tenere presenti nell'applicazione del metodo. Queste restrizioni non condizionano invece il metodo basato sulla misura della resistenza alla perforazione, anche se è necessario utilizzare un dispositivo idoneo per le applicazioni in situ. Al momento, non è stato possibile trovare una chiara correlazione con la resistenza meccanica del materiale, poiché l'asportazione dei trucioli è influenzata anche da altre proprietà (allungamento a rottura e incrudimento) che risentono sensibilmente dell'esposizione all'alta temperatura.

I risultati citati non possono essere estesi alle barre di acciaio inossidabile laminato a freddo, probabilmente a causa delle particolarità del legame costitutivo di questo materiale, che non presenta un punto di snervamento ben definito e mostra un elevato aumento della capacità di deformazione al crescere del danno termico.

## **Ringraziamenti**

L'autore desidera ringraziare gli Ing. Arianna Colmegna e Matteo Racioppo, per l'attiva collaborazione nello svolgimento delle prove sperimentali durante il lavoro di Tesi presso il Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano. Si ringraziano inoltre le ditte Pittini Ferriere Nord S.p.A. e Cogne Acciai Speciali per la fornitura delle barre d'armatura e la ditta Proceq SA (Zurigo, Svizzera) per aver messo a disposizione il durometro Leeb.

## **Riferimenti**

- [1] Avner, S.H. (1974) Introduction to Physical Metallurgy, McGraw-Hill.
- [2] Felicetti, R., Gambarova, P.G. and Meda, A. (2009), Residual behavior of steel rebars and R/C sections after a fire, Construction and Building Materials, vol. 23, n. 12, p 3546.
- [3] ASTM 956 (2006), Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products, ASTM Int, Philadelphia.
- [4] Kohlhöfer, W. and Penny, R.K. (1995), Dynamic hardness testing of metals, Int. Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 61, p. 65.
- [5] Felicetti, R. (2006), The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete, Cement and Concrete Composites, vol. 28, p. 321.
- [6] Mauvoisin, G. and Chagneau, F. (1999), Quantitative measurement of the hardness profile on carbo-nitriding steel by the hole drilling method, Measurement, vol. 25, p. 291.