

■ Grzegorz Lesiuk \*, Grzegorz Pekalski \*, Mieczysław Szata \*, Cristiano Fragassa\*\*

\* Institute of Material Science and Applied Mechanics, Wrocław University of Technology (Polonia)

\*\* Università di Bologna

# Monitorando la resistenza delle infrastrutture in acciaio

**L'acciaio è soggetto a un lento ma inesorabile degrado, che riduce prestazioni e solidità delle strutture. Per prevenire conseguenze anche molto gravi, occorrono adeguate protezione e manutenzione. Come identificare e studiare i processi di degrado dell'acciaio dallo studio di lamierini sottili estratti da ponti in acciaio del Novecento**

**L'**acciaio, materiale molto diffuso nelle costruzioni meccaniche e civili, è soggetto ad un lento ma inesorabile degrado, che ne riduce le prestazioni e minaccia la solidità delle strutture. Per prevenire conseguenze anche molto gravi quando con l'acciaio sono realizzate infrastrutture importanti, è necessario prevedere un'adeguata protezione e una giusta manutenzione. Questa ricerca ha l'obiettivo di identificare e studiare i processi di degrado dell'acciaio a partire dallo studio di alcuni sottili lamierini estratti da ponti in acciaio del XIX secolo.

### Una città nata tra i ponti

Il teatro del nostro studio è la splendida città polacca di Wrocław, spesso conosciuta in Italia con il vecchio nome tedesco di Breslavia, ma descritta su tutte le guide come "la

Venezia della Bassa Silesia" per i suoi 112 ponti che collegano le 12 isole che ne danno la straordinaria forma. Fino al XIX secolo i ponti della città erano costruiti in legno e mattoni, materiali che ne limitavano la funzionalità e la resistenza nel tempo. Una vera rivoluzione avvenne all'inizio del XIX secolo quando l'evoluzione delle tecniche metallurgiche rese disponibile (e non solo per i ponti) enormi quantitativi di ottimo acciaio. Allo stesso tempo, la città viveva un periodo di pace e di prosperità che movimentò gli investimenti pubblici verso il rafforzamento della rete viaria. E le maggiori opportunità garantite dall'utilizzo dell'acciaio non furono ignorate da architetti ed ingegneri che preferirono questo "nuovo" materiale in moltissime occasioni.

L'effetto complessivo fu che, sul finire del secolo, vennero eretti numerosi ponti in acciaio, che andarono a



Fig. 1 Scorcio della città di Wrocław con il sistema di ponti e dighe realizzato dal Pomorski Bridge.



Fig. 2 Immagini del Pomorski Bridge: a) tratto a sud, in pietra; b) tratto a nord, in acciaio.

costituire una parte fondamentale dell'infrastruttura viaria della città e della regione. Quasi tutti questi ponti di metallo hanno resistito fino ai nostri giorni e sostengono ancora oggi il peso del traffico moderno. L'opportuna cura rivolta verso questi antichi ponti resta una gravosa priorità per la municipalità, ma anche una occasione unica per i ricercatori di tutto il mondo di osservare sul campo fenomeni di degrado delle infrastrutture.

In particolare, le tematiche di ricerca in corso ed i programmi di studio internazionali [1, 2] indicano l'interesse crescente della comunità scientifica verso la comprensione delle condizioni di funzionamento dei ponti e verso lo sviluppo della capacità di rilevare in anticipo tutti i guasti potenziali dell'infrastruttura. Questa condizione diventa particolarmente apprezzata quando ci si trova di fronte a strutture in acciaio come queste, molto antiche e di grandissima importanza storica.

### La nascita della rivoluzione industriale

Nel finire del Novecento esistevano solo due processi metallurgici in grado di procurare un acciaio in quantità tale da utilizzarlo come materiale da

costruzione per strutture complesse come ponti: la fusione e il pudellaggio. Il pudellaggio è un metodo efficiente per trasformare il ferro grezzo fuso col coke in ferro lavorabile superando alcuni dei limiti del processo di fusione. Questa "nuova" tecnica permetteva inoltre di ottenere del vero e proprio acciaio, con appropriato contenuto di carbonio.

Nello specifico, il pudellaggio (o puddellaggio, dall'inglese "to puddle", rimestare) è il trattamento siderurgico di ossigenazione di carbonio, manganese, silicio e fosforo (presenti nel metallo) e rimescolamento (puddling) a cui viene sottoposta la ghisa per ottenere una maggiore

duttilità e malleabilità del metallo. Il procedimento del puddellaggio era noto fin dall'antichità in India; la tecnica consisteva nel mettere in un crogiolo sigillato del minerale di ferro o del ferro battuto, aggiungendo una determinata quantità di carbonio sotto forma di ghisa o carbone di legna. Fondendo il tutto si otteneva acciaio. Il processo è stato esteso a livello industriale nel 1784 dall'inglese Henry Cort, nell'ambito della rivoluzione industriale in Inghilterra, e brevettato dallo stesso Henry Cort nel 1804. Il puddellaggio si praticava in appositi forni, detti a riverbero, nei quali la fiamma è separata dalla camera di cottura da un setto che

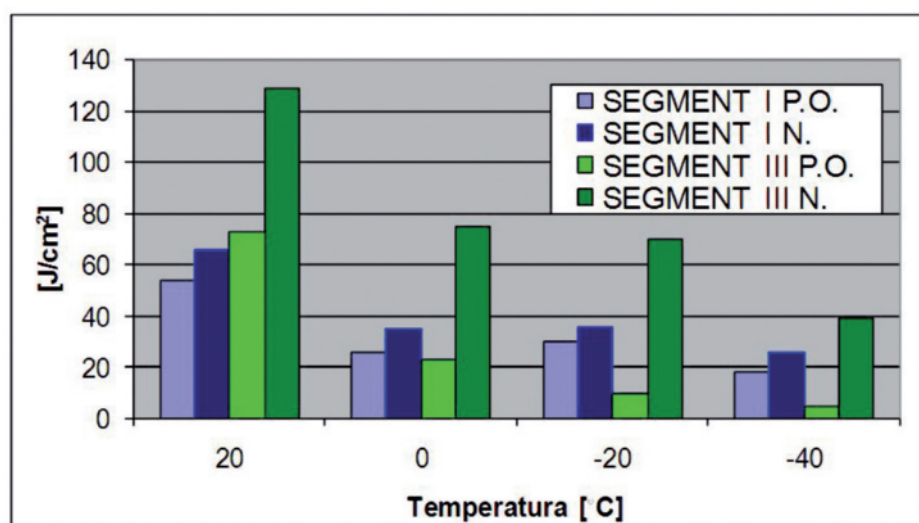


Fig. 3 Resistenza all'impatto al variare della temperatura di prova (per i solo segmenti I e III): da queste informazioni è possibile costruire un diagramma di transizione duttile-fragile del materiale come funzione della temperatura.



**Fig. 4** Micrografie di un acciaio da puddellaggio del 1885 (segmento I), sono evidenti: a) una area ad elevata densità di discontinuità, inclusioni non metalliche e delaminazioni (zoom 100X); b) grani di ferrite con alto numero di carburi e di nitrati, separazioni dentro i grani e carburi di ferro, sviluppati intorno ai bordi di grano (zoom 1000X).

lasciava passare la cima delle fiamme, che appunto si riverberano sul soffitto e inviano calore al piano; una volta che questo sia caldo a sufficienza, lo si "bagnava" con ossidi di ferro e si introduce la ghisa.

Questo processo di purificazione del ferro fuso in forni a costruzione speciale, ha causato un ingrandimento enorme degli altiforni e l'applicazione di apparecchi sempre più complessi per l'apporto di aria calda. Ma, più importante, ha portato ad un aumento tale dei mezzi di lavoro e delle materie prime messe in opera da una medesima quantità di lavoro, che il ferro ben presto fu fornito con tanta abbondanza e a un prezzo abbastanza basso per soppiantare la pietra e il legno in tantissime applicazioni, quali appunto i ponti.

## Acciaio antico e acciaio moderno

Strutture in acciaio come i ponti, soggetti a lunghi periodi

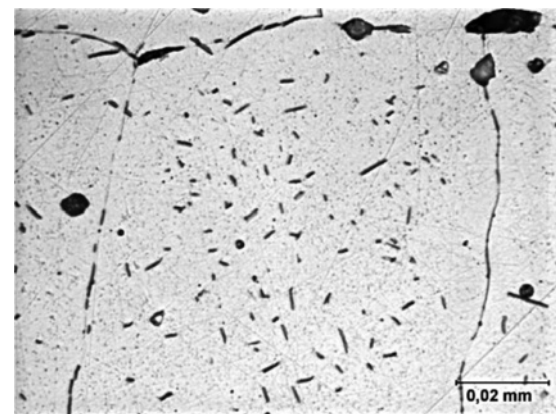
operativi ed esposti ad ogni sorta di sollecitazione, mostrano segni progressivi di degrado delle proprietà meccaniche dei materiali costituenti.

In generale questo degrado si manifesta attraverso l'aumento della durezza e della resistenza del materiale che lo rendono più fragile, diminuendo la duttilità, la resistenza all'impatto e alla frattura. Questi sintomi macroscopici sono strettamente correlati a modifiche nella microstruttura del materiale quali, tra le altre, il progredire della decomposizione che porta la perlite e la bainite a trasformarsi in ferrite o in carburi, ma anche il progredire dei processi di separazione dei nitrati e dei carburi [3].

Per identificare e comprendere questi cambiamenti sono state condotte alcune sessioni comparate di prove sperimentali prendendo acciai in due diversi stadi della loro "vita", quello post-operativo e quello post-normalizzato.

Il termine post-operativo si riferisce ad un campione di acciaio (da pudellaggio o da fusione) proveniente da uno dei ponti ottocenteschi in esame e così sottoposto ad un processo di progressivo invecchiamento ambientale.

Il termine post-normalizzato si riferisce ad un campione di acciaio del ponte che è stato trattato con un processo di ricottura ad una temperatura di 950 °C per 2 ore per poi essere raffreddato in aria. Questo particolare trattamento termico ha l'obiettivo di ricreare sul campione di acciaio uno stato pre-operativo simile a quello che aveva nel XIX secolo quando fu utilizzato per innalzare il ponte. L'accesso a campioni non degradati di acciai utilizzati in quegli anni è praticamente impossibile e si ritiene che questo processo di normalizzazione corrisponde al migliore equilibrio della microstruttura verso le forme che la metallurgia del XIX secolo era in grado di realizzare. Questa convinzione deriva dalle considerazioni sulla "Teoria

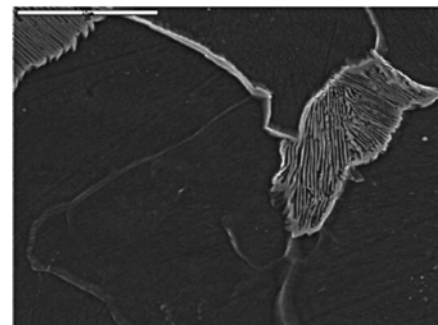
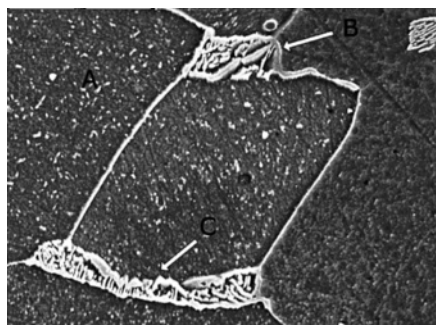


**Fig. 5** Micrografia dello stesso acciaio (segmento I) normalizzato: nonostante il trattamento termico restano visibili i grani di ferrite, con separazioni interne, segno evidente dello stato di degrado avanzato (zoom 1000X).

del Degrado" sviluppate dal prof. Dionizy Dudek [4], ma anche dalle successive verifiche sperimentali [4]. Si confida quindi che l'acciaio dei campioni post-normalizzati evidenzi una microstruttura simile a quella che aveva all'origine, almeno tanto da giustificare i risultati di questa analisi comparativa.

## Metodologie sperimentali

Durante tutto lo studio di invecchiamento ambientale degli acciai le assunzioni classiche della teoria del degrado sono state verificate ed accompagnate da analisi al microscopio ottico ed elettronico, da prove di resistenza statica, da misura di durezza attraverso metodi Vickers. Parti importanti della ricerca hanno riguardato le misurazioni di resistenza all'impatto, dalle quali sono state determinate le curve di transizione plastico-fragile, e i test di resistenza



**Fig. 6** Micrografie di acciai fusi in stato operativo dal 1930 con confronto tra a) una situazione degradata (segmento II) e b) non degradata (segmento III). Nella struttura degradata si osservano grani di ferrite con separazioni multiple di cementite e nitriti, lo sviluppo di Fe<sub>3</sub>C e segni di perlite parzialmente degradata (zoom 4300X).

alla frattura. Sfortunatamente, queste ultime prove non sono sempre possibili. Le esigenze stringenti dettate dagli standard [5] riguardo allo spessore minimo del campione in grado di assicurare uno stato piano di deformazione devono essere valutate con particolare attenzione: nel caso in questione il rispetto delle corrette condizioni di prova è stato assicurato mantenendo lo spessore medio delle parti tra 8 e 15 mm. Anche i test frattografici, realizzati con l'ausilio di un microscopio ottico stereoscopico, possono portare a utili informazioni aggiuntive.

## Campagna sperimentale sul Pomorski Bridge

Il Pomorski Bridge è un ponte composto da tre diverse parti erette in momenti differenti tra il 1885 e il 1930, che creano un unico sistema di comunicazione (**fig. 1**). La parte a sud, è realizzata in pietra e, quindi, di nessun interesse per questo studio (**fig. 2a**). Il tratto centrale e quello a nord del Pomorski Bridge sono invece realizzati in acciaio. Dei due, la parte più antica è il Pomorski Central Bridge che fu eretto in parte nel 1885 e completato nel 1930 (**fig. 1** a sinistra); mentre il North

**Tab. 1** Misurazione sperimentale delle principali proprietà meccaniche degli acciai e confronto con i valori di letteratura

Pos.	segmento ----- tipo di acciaio	composizione chimica					Rm [MPa]	Re[MPa]	A5[%]	HV10	KCV÷20°C [J/cm <sup>2</sup> ]	KCV- 40°C [J/cm <sup>2</sup> ]
		C%	Mn%	Si%	P%	S%						
1	primo	0.02	0.05	0.03	0.24	0,048	361	239	18,9	139	54,0	18,0
2	secondo	0,10	0,46	0,03	0,028	0,05	423	298	35,0	105	105,0	4,6
3	terzo	0,170	0,52	0,03	0,05	0,05	417	258	36,9	117	73,0	5,2
4	acciaio Puddling	0,013 ÷ 0,35	max 0,33	max 0,33	max 0,347	max 0,056	280 ÷ 450	145 ÷ 340	2,3 ÷ 29,0	-----	-----	-----
5	acciaio fuso a basso carbonio	0,05 ÷ 0,20	0,35 ÷ 0,50	0,01 ÷ 0,05	0,06 ÷ 0,10	0,03 ÷ 0,04	370 ÷ 450	180 ÷ 240	-----	-----	-----	-----

Pomorski (**fig. 2b**) fu realizzato tutto nel 1930.

Da ciascun ponte sono stati asportati campioni in acciaio, nella forma di lamierini dello spessore medio di 17 mm. È stato considerato un totale di 6 lamierini, due presi dal più antico del Pomorski Central Bridge (segmento I), due provenienti dalla parte più moderna (segmento II) e gli ultimi due dal North Pomorski (segmento III). Di ogni coppia di campioni, uno è stato analizzato nel suo stato originale (detto "post-operativo"), l'altro è stato sottoposto al trattamento di normalizzazione (detto "post-normalizzato") descritto in precedenza.

Come era da attendersi, i frammenti provenienti dalla parte più antica del Pomorski Central Bridge sono quelli che mostrano i segni di un maggiore degrado strutturale. Inoltre, la composizione chimica dei campioni (**tab. 1**) indica chiaramente che ci troviamo di fronte ad un ponte realizzato in acciaio da pudellaggio. Questo acciaio, come evidenziato negli articoli di bibliografia e confermato dalla nostra esperienza, mostra una maggiore tendenza a degradarsi rispetto all'acciaio fuso a basso contenuto di carbonio, con cui è realizzato il terzo ponte.

Le principali proprietà meccaniche dei frammenti riscontrate durante gli esperimenti sono riportate nella **tab. 1** e poste a confronto con i valori di letteratura per l'acciaio da pudellaggio e da fusione.

## Evidenze sperimentali di degrado

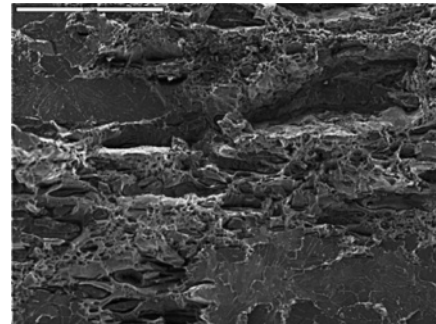
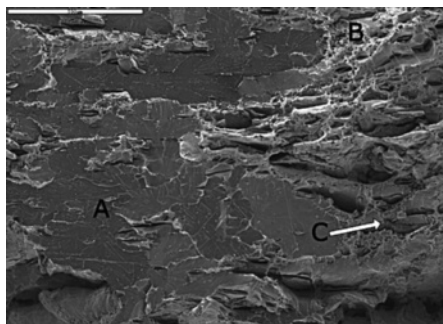
La lunga campagna sperimentale ha portato ad una enorme quantità di dati di comparazione che restano disponibili in [7]. In questo articolo, tuttavia, si entrerà nel dettaglio dei soli risultati ottenuti dai test di impatto sui campioni dei segmenti I e III che rappresentano, rispettivamente, un acciaio fortemente degradato nella microstruttura ed un acciaio con sintomi trascurabili di degrado. Anche solo attraverso la comparazione di questi risultati parziali risulta chiaramente evidente il progredire del processo di degrado e possono essere individuati alcuni dei suoi più importanti meccanismi. L'intensificazione dei processi di degrado influenzano i risultati dei test di impatto realizzati sia sugli stati post-operativi che normalizzati. I cambiamenti sono evidenti in **fig. 3** dove sono riportate le resistenze all'impatto dei materiali al variare della temperatura ambientale. In particolare si può osservare una differenza significativa tra la resistenza dello stato post-operativo e

normalizzato soprattutto nel caso del segmento III (acciaio fuso).

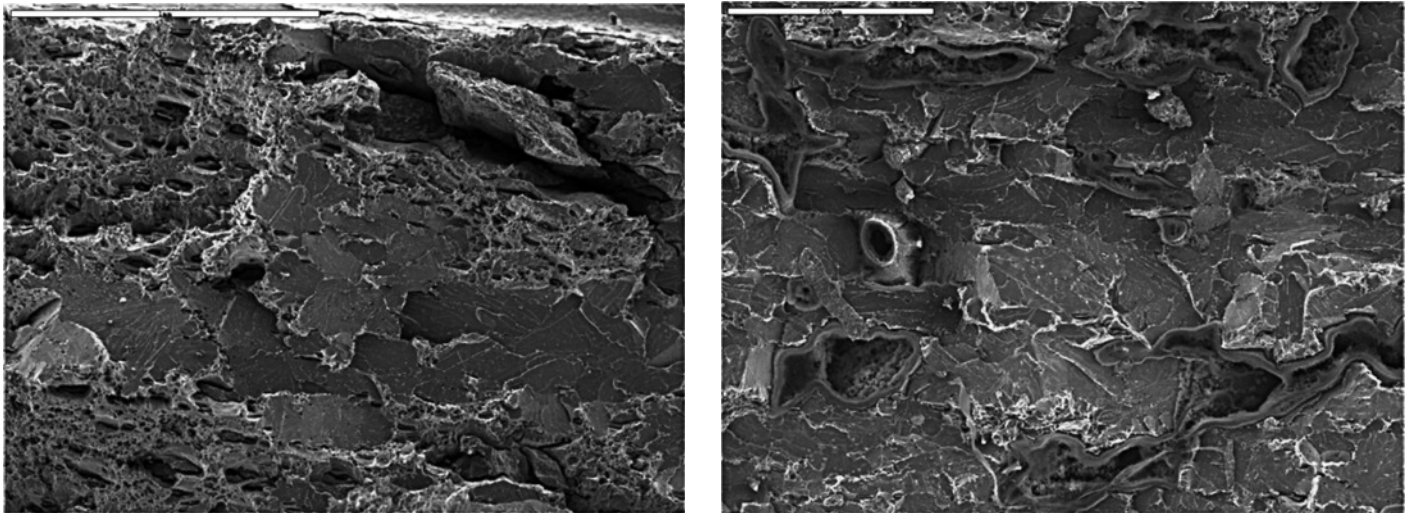
## Uno sguardo alle prove metallografiche

Come già anticipato, il degrado delle proprietà meccaniche degli acciai va di pari passo con le modifiche chimico-fisiche che avvengono a livello microstrutturale.

Esempi di queste strutture degradate e non degradate sono evidenziati nelle vari immagini. La **fig. 4a** riporta un frammento di acciaio (da pudellaggio) proveniente dal segmento I nello stato post-operativo dove è chiaramente visibile una area ad elevata densità di discontinuità, inclusioni non metalliche e delaminazioni. La **fig. 4b** indica un'altro frammento dello stesso materiale dove sono evidenti grani di ferrite con alto numero di carburi e di nitrati, separazioni dentro i grani e carburi di ferro, sviluppati intorno ai bordi di grano. In **fig. 5** su un'altra particella dello stesso acciaio, ma normalizzato, sono comunque evidenti grani di ferrite, con separazioni interne, non dissolte durante il trattamento di normalizzazione,



**Fig. 7** Frattografie della zona di impatto per un acciaio da pudellaggio del 1885 (segmento I) sottoposto a prove di impatto per differenti temperature ambientali: a) +20 °C, b) -40 °C. Si osservano (zoom 80X), in particolare il carattere plastico (A) e fragile (B) della frattura e le inclusioni non metalliche (C).



**Fig. 8** Frattografie della zona di impatto per l'acciaio del 1885 (segmento I) trattato termicamente (post-normalizzato) sottoposto a prove di impatto per differenti temperature ambientali: a) +20 °C, b) -40 °C. In entrambe i casi si osserva una combinazione di frattura plastica-fragile (zoom 80X).

segno evidente dello stato di degrado avanzato. Si tenga in conto infatti che, come verificato dalla nostra lunga esperienza, il trattamento di normalizzazione qui utilizzato sarebbe in grado di rimuovere tutti i carburi e i nitrati da dentro i grani di ferro. La presenza di queste separazioni su campioni trattati, lascia così intuire un materiale estremamente degradato. Un altro esempio interessante di degrado dell'acciaio può essere osservato in **fig. 6** dove sono poste affiancate immagini del segmento II e III, entrambi di acciaio fuso, in stato operativo dal 1930 e non trattati termicamente, ma con situazione di degrado molto diverse tra loro. Nel segmento II (**fig. 6a**) si osservano grani di ferrite con separazioni multiple di cementite e nitriti, lo sviluppo di  $Fe_3C$  e segni di perlite parzialmente degradata. La micrografia del segmento III (**fig. 6b**) invece non evidenzia sintomi di degrado apprezzabili.

Le prove microscopiche hanno mostrato una chiara differenza nello stato di degrado dei provini presi dai vari segmenti del Pomorski Bridge. La valutazione dello stato di

conservazione per i materiali messi in prova può essere riassunta come [7]:  
 – segmento I, eretto nel 1885, è stato realizzato in acciaio da pudellaggio. Il materiale mostra un basso contenuto di carbonio (0.02%), un livello di silicio corrispondente ad un moderno acciaio effervescente (0.03%), un contenuto di fosforo molto alto (0.24%). Questi fattori hanno portato a ritenere che dopo 122 anni di utilizzo, il materiale strutturale di questo ponte può essere considerato completamente degradato. La presenza di numerose inclusioni non metalliche, i segni di delaminazione e la diversificazione strutturale nel materiale (tipico per gli acciai da pudellaggio) devono essere riconosciuti come fattori addizionali di rischio che suggeriscono di non procedere oltre all'utilizzo delle parti in acciaio del ponte;  
 – segmento II, costruito nel 1930, mostra una struttura coerente di ferrite-perlite con una presenza minima di inclusioni non metalliche. Tuttavia, in maniera analoga al caso del segmento I, l'elevato numero di separazioni dure e fragili dentro ai grani di ferrite e la parziale decomposizione della perlite, sono

indicatori che lasciano intuire uno stato degradato;  
 – segmento III, anch'esso costruito nel 1930, non mostra segni di degrado strutturale. L'acciaio ha una struttura granulare regolare di ferrite con la corretta dispersione di perlite.

## Le indicazioni della frattografia

Anche le osservazioni frattografiche hanno fornito informazioni interessanti che confermano sostanzialmente le conclusioni già descritte. Inoltre, utilizzando la frattografia parallelamente ai risultati delle prove di resistenza all'impatto, è stato possibile osservare microscopicamente le fratture alle varie temperature e costruire un diagramma di transizione duttile-fragile come funzione della temperatura.

Anche qui, nell'espore i risultati, ci limiteremo solo a sottolineare la netta differenza tra lo stato degradato e non degradato dei segmenti I e III. Partendo dall'osservazione del segmento I, in **fig. 7a** è evidente la presenza della frattura in prossimità dell'impronta di impatto per un materiale in stato post-operativo alla temperatura di +20 °C. Sulla

parte destra, in particolare, si nota il carattere plastico della frattura e sulla sinistra la parte fragile. La presenza di una zona con comportamento plastico vicina ad una fragile resta una costante per i vari campioni del segmento. Nella figura si osservano anche inclusioni non metalliche. Una situazione analoga si osserva quando il materiale è portato alla temperatura di  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  come nella **fig. 7b**.

Sempre per il segmento I, ma con materiale normalizzato e provato per impatto alla temperatura di  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ : nella **fig. 8a** si osserva una evidenza di frattura plastica-fragile. Nella **fig. 8b**, analogamente al caso precedente ma per  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  si osserva una frattura fragile con una parte di frattura plastica.

Passando all'osservazione del segmento III, in **fig. 9a** è evidente come in prossimità dell'impronta di impatto in uno stato post-operativo dell'acciaio, portato alla temperatura

di  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la frattura assuma un carattere plastico, mentre raffreddato a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , come si osserva in **fig. 9b**, la frattura diventa fragile e attraversa tutta la sezione del campione. Volendo riepilogare, le osservazioni microscopiche delle fratture mostrano che, per quanto riguarda il segmento I, nella vicinanza dell'impronta, il comportamento fragile e plastico della frattura è resta simile sia per gli stati post-operativi e normalizzati del materiale posto a  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Questa osservazione si correla bene con i risultati della resistenza all'impatto. Nello stesso segmento, le immagini frattografiche del campione a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  mostrano un cambiamento essenziale nella tipologia di frattura che si riflette idealmente anche nei test di resistenza all'impatto. Si può anche osservare una incrementata porzione percentuale di frattura duttile nei campioni provenienti dai tre segmenti.

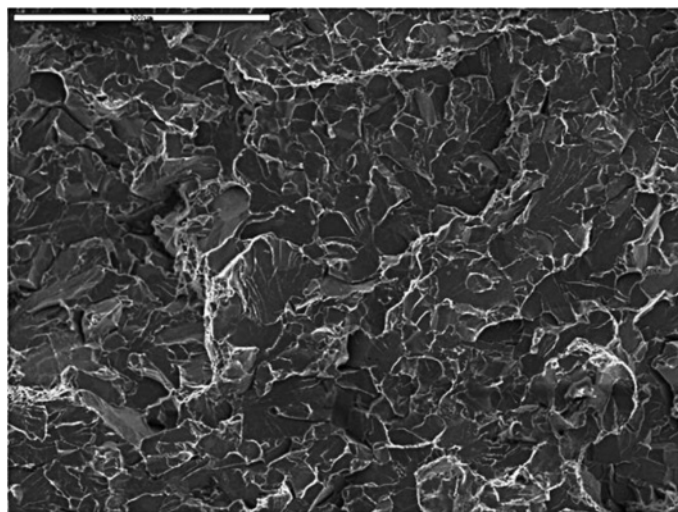
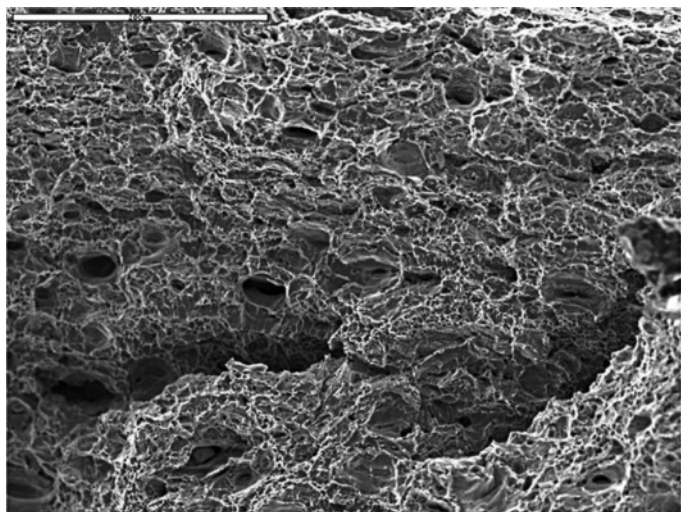
## Una nuova visione della "Teoria del Degrado"

Il degrado strutturale si manifesta nel degrado progressivo delle proprietà meccaniche degli acciai. Sfortunatamente, i metodi di indagine utilizzati finora rendono possibile solo analisi di tipo qualitativo.

In questo contesto diventa particolarmente interessante sviluppare ed applicare modelli in grado di valutare (anche quantitativamente) la resistenza del materiale alla propagazione per fatica della frattura sviluppando "teorie di degrado".

In questo particolare studio si mette alla prova la validità del modello di Szata [8] che descrive la cinetica della propagazione per fatica della frattura linearmente e invariante rispetto alla tensione.

Questa semplificazione, che appare idonea per il nostro scopo,



**Fig. 9** Frattografie della zona di impatto per l'acciaio fuso del 1930 (segmento III) sottoposto a prove di impatto per differenti temperature ambientali: a) a  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  la frattura assume un carattere plastico; b) a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  la frattura diventa fragile e attraversa tutta la sezione del campione.



**Fig. 10 Golden Gate Bridge, il celebre colosso d'acciaio e bulloni sospeso tra cielo e mare che sovrasta il Golden Gate, lo stretto che collega l'Oceano Pacifico con la baia di San Francisco per 2,7 km. Una lunghezza incredibile se si considera che la costruzione risale al 1937.**

è rappresentata dalla relazione

$$\frac{da}{dN} = \frac{\alpha \Delta H}{\sigma_{plf} \epsilon_{fc}}$$

dove  $\sigma_{plf}$  ed  $\epsilon_{fc}$  indicano rispettivamente la tensione di snervamento ed il valore di deformazione critica;  $\alpha$  è una costante adimensionale e  $\Delta H$  rappresenta la porzione di energia dissipata in ogni ciclo di carico (collegata all'area di isteresi). Il vantaggio di questo modello è che conduce ad una invarianza del diagramma in relazione alla tensione applicata.

Deve comunque essere menzionato che l'applicazione di un modello come quello di Szata è solo il primo passo diretto verso la descrizione quantitativa delle modifiche macrostrutturali legate al degrado. Date le buone conferme sperimentali ottenute durante lo studio dell'acciaio utilizzato per i ponti (sia quello degradato che non degradato), si potrebbe pensare di passare ad una estensione del modello di crescita della frattura per fatica.

In tal caso, qualsiasi nuovo modello dovrebbe tener in conto della

possibilità di modificare l'ampiezza dei carichi, con particolare attenzione a come considerazione gli effetti di sovraccarico, specifico per questo tipo di strutture.

Un altro ulteriore ed importante passo dovrebbe riguardare la simulazione dello sviluppo della frattura per fatica per quegli acciai che si trovano a operare in condizioni corrosive (es. ponti posti su baie marine).

Ma finora, già solo l'applicazione di questo modello semplificato ha potuto fornire risposte valide a molte importanti domande.

Come il parametro di energia è responsabile della velocità di degrado della struttura? Come si modifica questo valore nei vari stadi di degrado delle strutture? Quale quantità dovrebbe essere assunta come valore critico dell'energia dissipata? Come le quantità ( $K_{th}$ ,  $K_{fc}$ ,  $K^*$  e così via) che rappresentano la cinetica della frattura per fatica si comportano nelle strutture degradate? Il problema è ancora aperto, ma i numerosi studi già conclusi e le varie ricerche tuttora in corso stanno già fornendo le giuste risposte per queste domande.

## Bibliografia

- [1] AASHTO "Bridging the Gap" (www.transportation.org.), reporto finale, USA, 2008.
- [2] B. Kühn, M. Lukic', A. Nussbaumer, H.-P. Günther, R. Helmerich, S. Herion, M.H. Kolstein, S. Walbridge, B. Androic, O. Dijkstra, Ö. Bucak, Assessment of Existing Steel Structures Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life, Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, Luxembourg 2008.
- [3] G. Pȩkalski, Material aspects of surface mining machines degrading and theories of the involved processes, Report of the series SPR nr 14/99, I-19, PWR, Wrocław 1999 (in polacco).
- [4] D. Dudek, S. Oziemski, W. Sobczykiewicz, Components of the machines degrading theory, "Problems of the Working Machines" n.4, Warszawa 1994 (in polacco).
- [5] ASTM Standards E 399-1, Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Material.
- [6] Riepilogo risultati sperimentali al 26-05-2009: <http://wroclaw.hydral.com.pl/test.php?obiekt=1027&start=104&tend=112>.
- [7] J. Rabiega, G. Pȩkalski, Material studies of Pomorski Bridges at the Odra River in Wrocław town: South, Central and North, Report of the series SPR 9/2007, I-19, PWR, Wrocław 2007 (in polacco).
- [8] M. Szata, G. Lesiuk, Algorithms for the estimation of fatigue crack growth using energy method, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Wrocław 2009.