

Analisi sperimentale del comportamento a fatica oligociclica, con cicli di ampiezza variabile, di nodi trave-colonna saldati

Variable amplitude, low-cycle fatigue testing of welded steel beam-to-column joints

L'articolo presenta i risultati di quattro prove a fatica oligociclica effettuate, presso il Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano, su nodi saldati trave (IPE450)-colonna (HEB300). Le prove sono state eseguite adottando differenti storie di carico con cicli ad ampiezza variabile, alternando cicli di piccola ampiezza (± 30 mm) a cicli di grande ampiezza (± 125 mm) al fine di valutare l'effetto della sequenza di carico sulla risposta dei collegamenti.

Gli esiti di tali prove sono stati rielaborati in termini di duttilità, energia assorbita e danno accumulato. Confrontando i risultati di questo studio con quelli ottenuti in precedenza, su campioni simili sottoposti a cicli di ampiezza costante, si è potuto verificare che la presenza, nella storia di carico, di cicli di grande ampiezza comporta un aumento della vita a fatica del campione.

Se i cicli di grande ampiezza risultano essere ravvicinati tra loro, l'effetto benefico risulta essere più ridotto che non nel caso in cui essi siano distanziati e inframmezzati da serie di cicli di piccola ampiezza.

The paper presents the results of four low-cycle fatigue tests performed on welded beam (IPE450)-to-column (HEB300) joints at the Materials Testing Laboratory of the Structural Engineering Department at the Politecnico di Milano. These tests were carried out adopting different displacement histories with variable amplitude cycles, alternating small amplitude (± 30 mm) and large amplitude (± 125 mm) cycles to assess the effect of the loading sequence on the cyclic behaviour of the joints.

The response of the various specimens is analysed in terms of ductility, energy absorption capacity and accumulated damage.

A comparison with the results of tests carried out on similar specimens under constant amplitude loading leads us to conclude that large amplitude cycles have a beneficial effect on the joint response by extending its fatigue life.

When large cycles are clustered together, however, this beneficial effect is limited if compared with that obtained in the case of isolated large amplitude cycles, in alternation with series of small amplitude cycles.

Prof. ing. Carlo A. Castiglioni, dr. arch. Jassira C. Brescianini, dr. ing. Nicola Panzeri

Dip. di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

1. INTRODUZIONE

Una struttura sottoposta ad azioni sismiche fornisce risposte differenti in funzione della sua duttilità, cioè della sua attitudine a sopportare elevate deformazioni plastiche ed a dissipare energia senza che insorgano meccanismi di collasso di tipo fragile.

La duttilità della struttura è in stretto rapporto con quella delle singole membrature che la compongono e dei loro collegamenti, ed è essenzialmente collegata alla duttilità del materiale e, nel caso dell'acciaio, influenzata da fenomeni di fatica e di instabilità, sia locali che globali, che possono portare ad un collasso prematuro della struttura o del particolare costruttivo.

L'importanza della duttilità è evidenziata dall'elevato numero di ricerche sperimentali ed analitico-sperimentali svolte sull'argomento, in vari paesi negli ultimi decenni [1-3].

Tali ricerche hanno portato alla stesura di nuove normative ed allo sviluppo di nuovi approcci progettuali e di valutazione della sicurezza, nell'ambito della progettazione in zona sismica [4-17].

Un altro aspetto da tenere in considerazione quando si studia il comportamento delle strutture metalliche in zona sismica risulta essere la resistenza a fatica oligociclica, fenomeno che influenza negativamente la risposta della struttura e/o dei particolari costruttivi, in quanto può portare al collasso in situazioni in cui la duttilità ha potuto giocare solo un ruolo di secondaria importanza a causa delle limitate deformazioni plastiche subite dagli elementi strutturali. [18-20]

In generale la vita a fatica di un dettaglio strutturale in acciaio dipende da due fattori:

- 1) L'ampiezza dei cicli imposti, all'aumentare della quale si nota una diminuzione della vita utile della struttura;
- 2) La resistenza dell'elemento strutturale nei confronti dei fenomeni di fatica, caratteristica che dipende sostanzialmente dalle proprietà geometriche e meccaniche ed è sintetizzabile con una costante numerica K. E' noto che, per un dato dettaglio strutturale, la relazione tra la vita a fatica attesa (N) e l'escursione di tensione ($\Delta\sigma$) può essere espressa come:

$$N\Delta\sigma^m = K \quad (1)$$

con m e K parametri da determinare sperimentalmente.

Questa legge è stata proposta da Wöhler [21] nel caso di fenomeni di fatica ad alto numero di cicli ed è usualmente adottata nella corrente pratica, per valutare la vita a fatica di dettagli costruttivi essendo i valori della costante K e dell'esponente m tabulati nelle varie normative [22-25].

Nel caso di cicli di ampiezza variabile le stesse normative per il calcolo e la verifica delle strutture metalliche, propongono di ricorrere ad un metodo di accumulazione lineare del danno (regola di Miner [26]).

Ballio e Castiglioni hanno mostrato la possibilità di estendere tale approccio al caso della fatica oligociclica [19].

Ciò è possibile sulla base dell'ipotesi che valga la seguente eguaglianza tra rapporti di parametri di deformazione locale (ϵ) e componenti globali di spostamento (s) :

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_y} = \frac{\Delta s}{s_y} \tag{2}$$

essendo ϵ_y la deformazione al limite elastico del materiale e s_y il valore assunto al limite elastico dalla componente generalizzata di spostamento, considerata (rotazione ϕ , spostamento trasversale v , ecc.).

La validità di tale ipotesi è stata confermata sia da studi numerici [27] sia da una serie di prove sperimentali. [20, 28-30]

Ricordando che, per la legge di Hooke, in elasticità lineare vale $\sigma = E\epsilon$, e quindi al limite elastico $f_y = E\epsilon_y$, la (2) può essere riscritta come:

$$\Delta \sigma^* = \frac{\Delta s}{s_y} f_y \tag{3}$$

in cui $\Delta \sigma^*$ è un delta di tensione equivalente, associato all'effettivo delta di deformazione ($\Delta \epsilon$), in un materiale ideale indefinitamente elastico lineare [19] (Fig. 1).

Se l'escursione di deformazione $\Delta \epsilon$ risulta essere in campo elastico, $\Delta \sigma^*$ coincide con l'escursione reale di tensione $\Delta \sigma$; al contrario, in campo plastico, i due valori dell'escursione di tensione reale ($\Delta \sigma$) ed equivalente ($\Delta \sigma^*$) risultano differenti (Fig.1).

In particolare, alcune ricerche condotte a partire dal 1990 presso il Politecnico di Milano, in collaborazione anche con l'Istituto Superiore Tecnico di Lisbona ed altre università europee, sono state mirate a definire il legame tra vita utile a fatica oligociclica (N) ed ampiezza dei cicli imposti, nel caso di elementi inflessi, pressoinflessi e di nodi trave-colonna. [18-20, 28-34].

Sono stati ricavati, per i collegamenti e gli elementi strutturali esaminati, i valori della costante K che, associati ad un esponente $m=3$ [22,24,25] ed introdotti nella (1), consentono di definire compiutamente il legame tra ampiezza dei cicli e vita a fatica [20,30].

Sulla base dei risultati ottenuti, e dell'esperienza acquisita, nell'ambito di un programma di ricerca finanziato dalla UE sul comportamento sismico di collegamenti in acciaio in strutture intelaiate tipo "Moment Resisting" è stato possibile concludere che gli elementi strutturali sottoposti a cicli di ampiezza costante si comportano in modo differente, con fenomeni di rottura di tipo improvviso ("fragile" [20,34,37]) se sottoposti a cicli di piccola ampiezza e fenomeni di rottura di tipo progressivo ("duttile" [20,34,37]), nel caso di cicli di grande ampiezza. E' stata inoltre messa in luce l'esistenza di un valore di soglia Δs_{th} dell'ampiezza dei cicli (espresso in termini di componente generalizzata di spostamento s), che delimita questi comportamenti [34,37]:

$$\Delta s_{th} = \frac{2000s_y}{\lambda_r \lambda_w \eta}$$

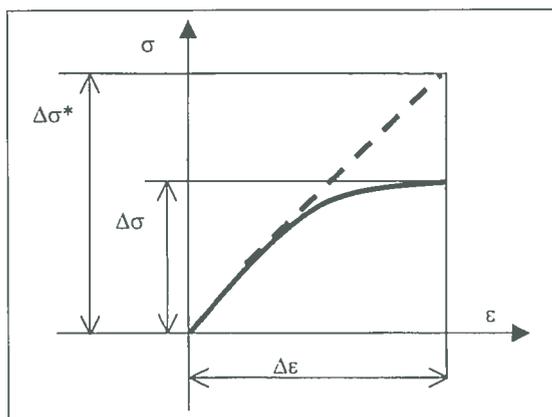
essendo λ_r e λ_w le snellezze dell'ala e dell'anima, e $\eta \leq 1.0$ un coefficiente che permette di tenere in conto la qualità delle saldature.

Rimane ancora un'incognita, per mostrare la validità dell'applicazione della regola di Miner al caso di fatica oligociclica. Ballio e Castiglioni [18], infatti, hanno già eseguito alcune prove con cicli di ampiezza variabile mostrando che, al collasso, gli indici di danno alla Miner ottenuti sono ragionevolmente distribuiti attorno al valore unitario. La maggior parte delle prove ad ampiezza variabile eseguite in precedenza erano però caratterizzate da storie di carico di tipo casuale essendo imposti sperimentalmente, ai campioni, in modo ciclico

quasi statico, storie di spostamento ottenute mediante simulazioni numeriche del loro comportamento in campo dinamico. L'applicazione della regola di Miner, di accumulazione lineare del danno, implica che vi sia indipendenza fra la sequenza di applicazione dei carichi e la vita a fatica.

Quanto evidenziato nell'ambito delle precedenti ricerche [34,37] potrebbe invece far pensare che il comportamento di un elemento strutturale, che sottoposto a cicli di piccola ampiezza ($\Delta s < \Delta s_{TH}$) collassa in modo improvviso ("fragile"), possa cambiare nel caso in cui, all'interno della storia di carico sempre caratterizzata da cicli di piccola ampiezza, vengano inseriti uno o più cicli di grande ampiezza ($\Delta s > \Delta s_{TH}$).

Figura 1.
Definizione di $\Delta \sigma^*$
secondo [19].



Questo fatto è peraltro tipico delle storie di carico di tipo sismico, nelle quali si alternano cicli di ampiezza differente, in generale con un numero di cicli di grande ampiezza molto limitato; in questo ambito di studio si inquadra la presente ricerca.

Sono stati impiegati quattro campioni di nodo, sottoposti a quattro diverse storie di spostamento, nelle quali sono stati differenzialmente alternati cicli di piccola ampiezza (± 30 mm) a cicli di grande ampiezza (± 125 mm).

L'analisi dei risultati delle prove sperimentali è stata condotta sia in termini di parametri di risposta globale (energia assorbita, resistenza e rigidità) sia in termini di vita a fatica.

Si mostra come la sequenza di carico influenzi notevolmente il comportamento dei campioni e la loro modalità di collasso e come la regola di Miner porti a stime abbastanza verosimili e comunque conservative del danno accumulato.

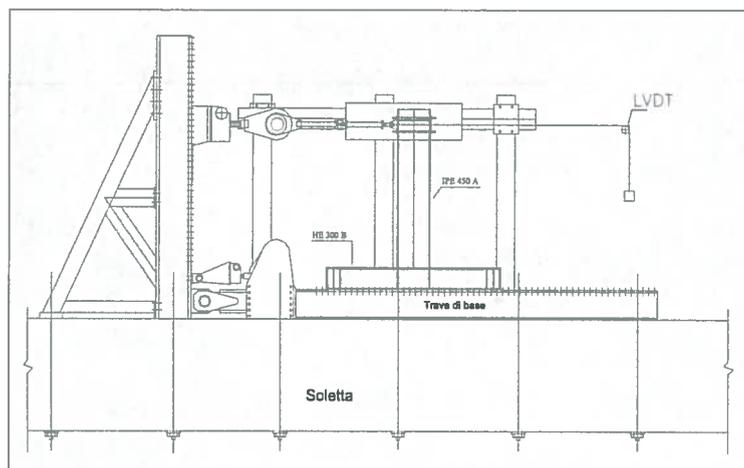


Figura 2.
Apparato di prova.

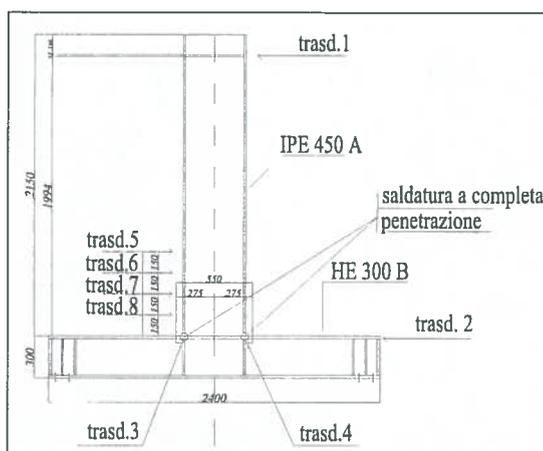


Figura 3.
Geometria dei
campioni e
strumentazione
(misure in mm).

2. PROGRAMMA SPERIMENTALE

2.1 Attrezzature di prova

Le prove sono state eseguite presso il Laboratorio Prove e Materiali del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano, impiegando un'apparecchiatura di prova in grado di applicare, in modo quasi-statico, spostamenti orizzontali ciclici [35]. L'attrezzatura è costituita da un martinetto a vite, azionato da un motore elettrico, con una corsa massima pari a 600 mm ed una velocità costante pari a 21 mm/min, ed in grado di sviluppare una forza massima pari a 1000 kN.

Tale martinetto è collegato, in posizione orizzontale, ad un telaio verticale che ne consente il posizionamento a vari livelli per essere adattato a campioni aventi un'altezza massima pari a 3.0 m (Fig. 2).

Per ragioni legate alla geometria della macchina di prova, i campioni di nodo trave-colonna ad una via sono stati provati con la trave disposta in verticale e la colonna disposta in orizzontale, imponendo i cicli di spostamento in sommità del campione, all'estremo libero della trave.

Le misure sono state effettuate mediante otto trasduttori lineari di spostamento, di cui quattro posizionati, egualmente spazati tra loro, sull'ala della trave, in prossimità del collegamento con la colonna, per consentire una valutazione degli spostamenti, delle rotazioni e delle curvature nella zona della cerniera plastica. (Fig.3) Altri due trasduttori sono stati posizionati sull'ala della colonna, in corrispondenza dei punti di collegamento con le ali della trave, onde valutare la rotazione della colonna nella zona del collegamento.

Un trasduttore è stato posizionato ad un estremo della colonna, onde valutare i possibili scorrimenti del campione sulla base d'appoggio.

Sono stati inoltre rilevati lo spostamento e la forza applicati dal martinetto in sommità del campione.(Fig. 3)

2.2 Campioni

Nella presente ricerca sono stati impiegati quattro campioni di nodi trave-colonna saldati a completa penetrazione. Ogni singolo campione si compone di un profilo tipo HE 300B di lunghezza 2400 mm che simula la colonna, che nella prova viene fissato in posizione orizzontale al banco di prova tramite bullonatura e di un profilo IPE 450 A di lunghezza 2150 mm che simula la trave. Quest'ultima, che durante la prova si trova in posizione verticale, è connessa al martinetto che imprime gli spostamenti, ad un'altezza di 1994 mm, misurata dal bordo dell'ala della colonna a cui è saldata.(Fig.3)

2.3 Storie di carico

Ad ognuno dei quattro campioni è stata assegnata una differente storia di carico, composta da blocchi di cicli aventi ampiezza costante all'interno del blocco stesso, ma differente da blocco a blocco (Tab.1).

Si sono considerate due ampiezze dei cicli: cicli piccoli con $\Delta v \pm 30$ mm e cicli di grande ampiezza

Tab. 1.
Dettagli delle
storie di carico.

CAMPIONE	BLOCCO	N° CICLI	AMPIEZZA (mm.)
C3-V01	1	36	± 30
	2	Fino a rottura	± 125
C3-V02	1	3	± 125
	2	Fino a rottura	± 30
C3-V03	1	30	± 30
	2	1	± 125
	3	30	± 30
	4	1	± 125
	5	30	± 30
	6	1	-145 +125
	7	Fino a rottura	± 30
C3-V04	1	30	± 30
	2	3	± 125
	3	Fino a rottura	± 30

Figura 4. Rottura del campione C3-V01.

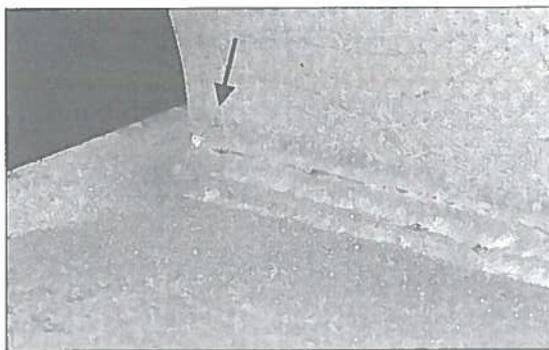


Figura 5a. Storia di spostamento.

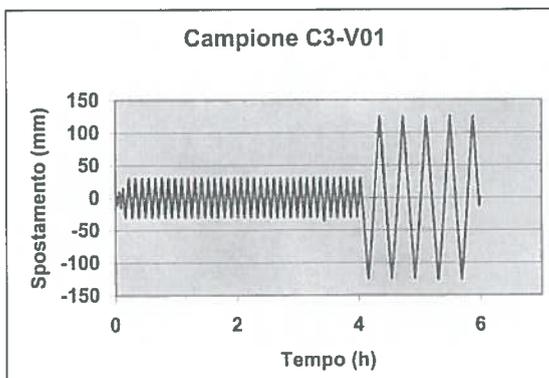


Figura 5b. Cicli di isteresi Forza-Spostamento.

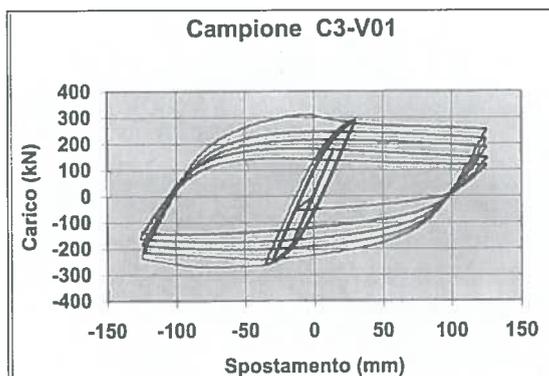


Figura 5c. Comportamento sperimentale del campione.

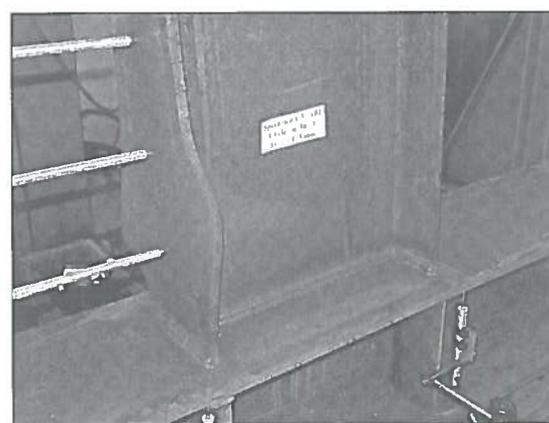
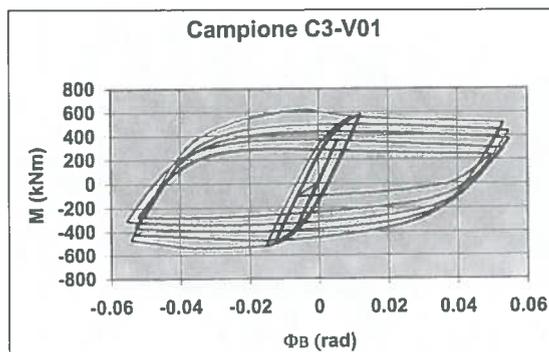


Figura 5d. Cicli di isteresi Momento-Rotazione.



con $\Delta v \pm 125$ mm. Tutti i cicli risultano simmetrici rispetto all'origine. Solo nel caso del campione C3-V03 si è eseguito anche un ciclo asimmetrico, di ampiezza $\Delta v=270$ mm tra -145 mm e $+125$ mm. Il campione C3-V01 è stato sottoposto ad un primo blocco di cicli di piccola ampiezza (± 30 mm), e successivamente ad un secondo blocco di cicli di grande ampiezza (± 125 mm) fino al collasso. I cicli di piccola ampiezza (± 30 mm) sono stati ripetuti finché (al trentaseiesimo ciclo) non si è evidenziata una cricca in corrispondenza della saldatura tra l'ala della trave e la colonna (fig. 4).

L'applicazione del primo ciclo di grande ampiezza (± 125 mm) ha portato all'immediata formazione di una cerniera plastica, al di sopra della zona di connessione trave-colonna, che ha evidentemente "scaricato" la zona della saldatura, cambiando le modalità di collasso.

Infatti, malgrado la presenza della cricca nella zona del collegamento saldato, il campione C3-V01 è stato ancora in grado di sopportare 4 cicli di grande ampiezza, collassando per formazione di una ampia cricca passante nell'ala e nell'anima, in corrispondenza degli imbozzamenti generatisi in seguito alla formazione della cerniera plastica.

Sulla base di quanto evidenziato, per i successivi campioni si è scelto di limitare a 30 il numero di cicli di piccola ampiezza per ciascun blocco, onde evitare possibili collassi prematuri, indesiderati.

Il campione C3-V02 è stato sottoposto a 3 cicli di grande ampiezza, seguiti da cicli di piccola ampiezza fino a collasso.

Sul campione C3-V03 sono stati eseguiti tre blocchi di 30 cicli di piccola ampiezza, intervallati da un ciclo di grande ampiezza, seguiti da cicli di piccola ampiezza fino a collasso.

Infine al campione C3-V04 è stato assegnato un blocco iniziale di 30 cicli di piccola ampiezza, seguito da un blocco di tre cicli di grande ampiezza. Il campione è poi stato portato al collasso con cicli di piccola ampiezza.

3 RISULTATI SPERIMENTALI

3.1 Campione C3-V01

La figura 5 a mostra la storia di spostamento imposta al campione C3-V01, mentre la figura 5 b riporta i cicli di isteresi in termini di spostamento imposto e carico applicato.

Si può notare come la risposta del campione rimanga pressoché invariata durante tutto il primo blocco di cicli di piccola ampiezza.

Al trentaseiesimo ciclo compare una cricca al bordo dell'ala della trave in corrispondenza della saldatura alla colonna (fig. 4). Tale cricca indica l'instaurarsi di un meccanismo di rottura del campione di tipo improvviso ("fragile") in analogia con quanto già osservato in prove analoghe [20, 34, 37].

Durante il primo semiciclo, con inversione a -125 mm, si nota un lieve incrudimento, mentre nel successivo semiciclo, con inversione a $+125$ mm, si nota una perdita di carico legata alla comparsa di instabilità locale nelle ali con imbozzamento dei piatti (Fig.5 c).

Nei successivi cicli, con $\Delta v = \pm 125$ mm, si può osservare una graduale perdita di carico con compar-

sa di lesioni superficiali sulle ali, in corrispondenza degli imbozzamenti.

La figura 5 d riporta i cicli di isteresi in termini di momento M applicato alla trave (valutato rispetto al punto di giunzione con la colonna) e rotazione della trave Φ_B , (valutata rispetto allo stesso punto), calcolata come differenza tra la rotazione globale della trave Φ_T e la rotazione della colonna Φ_C (figura 5 e).

$$\Phi_B = \Phi_T - \Phi_C \quad (4)$$

Essendo:

$$\Phi_T = \frac{v_1 - v_2}{L_1} \quad (5)$$

e

$$\Phi_C = \frac{v_3 - v_4}{B} \quad (6)$$

La risposta del campione in termini di resistenza alle inversioni è evidenziata nella figura 5 f; dal cui esame si possono osservare: sia una certa dissimmetria nella risposta (le forze alle inversioni positive sono, in valore assoluto, differenti dalle forze alle inversioni negative), sia la stabilità della risposta durante il blocco di cicli iniziale ed il rapido decadimento della resistenza associato ai cicli di grande ampiezza.

Analoghe considerazioni possono essere tratte sulla base dell'esame della figura 5 g, in cui si riporta in termini adimensionali l'energia (W^*) accumulata ai vari cicli.

Al ciclo i -esimo risulta

$$W_i^* = \frac{W_i}{W_{epp,i}} = \frac{W_{epp,i}}{W_1} \quad (7)$$

Dove: W_i è l'energia accumulata nel ciclo i -esimo;

$W_{epp,i}$ è l'energia accumulata nel ciclo i -esimo da un materiale elastico perfettamente plastico;

W_1 è l'energia accumulata al primo ciclo in campo plastico;

$W_{epp,1}$ è l'energia che verrebbe accumulata al primo ciclo (in campo plastico) da un materiale elastico perfettamente plastico.

Il collasso del campione avviene per completo cedimento dell'ala della trave, in corrispondenza del quinto ciclo a ± 125 mm come mostrato in Fig. 5 h, e può essere classificato come "misto" secondo il criterio presentato in [34,37]. Infatti, sebbene la rottura non sia avvenuta in modo improvviso, la perdita di carico mostrata in Fig. 5 f e l'analogo riduzione di capacità di assorbire energia (Fig. 5 g) hanno avuto luogo negli ultimi cinque cicli (quelli di grande ampiezza) in modo pressochè uniforme, senza che si possa osservare un cambiamento di pendenza nei diagrammi, indice di una brusca riduzione dei parametri di rigidità e resistenza associata all'incipiente collasso, come usualmente accade nel caso di collasso progressivo ("duttile") [34, 37, 38].

Per questa ragione, questo tipo di collasso viene definito "misto": manca infatti un chiaro segnale dell'inizio della fase di "collasso" anche se la perdita di carico è chiaramente evidente, e non avviene in modo inatteso, come nel caso del collasso definito "improvviso" ("fragile") [20, 34,37].

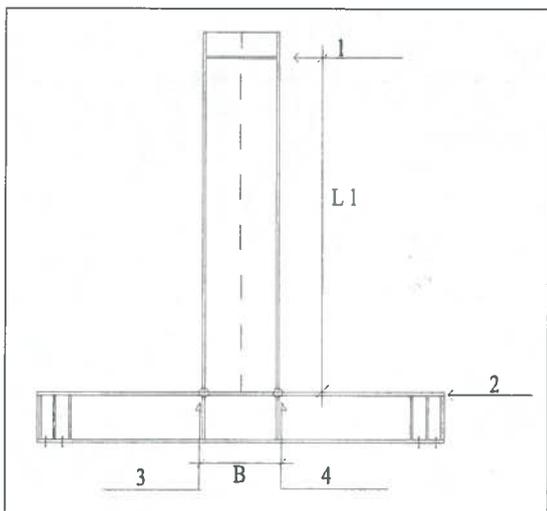


Figura 5e. Schema di Calcolo dei Momenti.

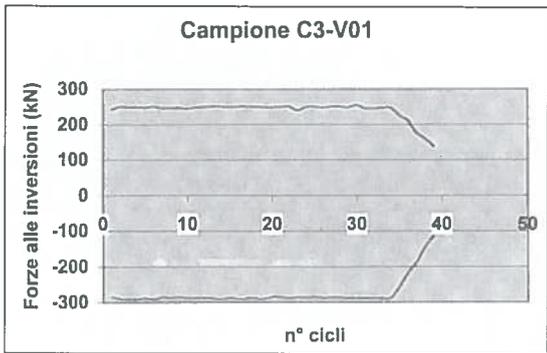


Figura 5f. Andamento delle forze alle inversioni.

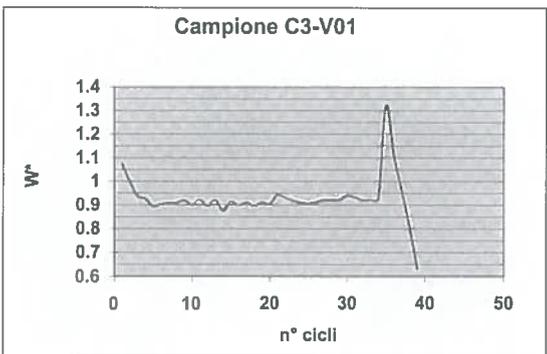


Figura 5g. Andamento delle energie adimensionali accumulate.



Figura 5h. Rottura del campione C3-V01.

3.2 Campione C3-V02

La figura 6a mostra la storia di spostamento imposta durante la prova, mentre la figura 6b ne presenta i cicli di isteresi in termini di spostamento imposto e carico applicato.

Rispetto al campione C3-V01 si nota come, già durante il primo semiciclo (con inversione a -125 mm) il materiale subisca un lieve incrudimento e nel successivo semiciclo (con inversione a $+125$ mm) il carico inizi a diminuire a causa della comparsa di instabilità locale nelle ali della trave, con relativo imbozzamento dei piatti.

La formazione della cerniera plastica avviene in corrispondenza del primo ciclo imposto.

Dopo i primi tre cicli di grande ampiezza, durante i quali si osserva una graduale perdita di carico, ed un considerevole spostamento fuori piano che interessa la zona della cerniera plastica formatasi dopo il primo ciclo di grande ampiezza, la risposta del campione tende a stabilizzarsi ed a rimanere pressoché invariata nell'arco di tutto il secondo blocco.

Nella figura 6c vengono proposti i cicli di isteresi in termini di momento applicato alla trave e rotazione della stessa nel nodo valutata, analogamente a quanto fatto per il campione C3-V01, secondo la (4).

Anche per questo campione la risposta in termini di resistenza alle inversioni, mostrata in figura 6d, mette in evidenza una certa dissimmetria di comportamento.

Si noti come il campione subisca inizialmente un rapido decadimento della resistenza alle inversioni, associato al primo blocco di cicli e come, in seguito, (secondo blocco di cicli) evidenzi una risposta stabile fino a rottura.

Analoghe considerazioni possono essere tratte in merito alla figura 6e che mostra, in termini adimensionali, l'energia accumulata nei vari cicli (W^*).

Si osserva che nei primi cicli si verifichi una drastica riduzione dell'energia accumulata nel ciclo, mentre, durante la seconda fase della prova, il valore del parametro W^* risulti assolutamente stabile, presentando una lieve riduzione verso la fine della prova, quando anche la resistenza diminuisce (Fig. 6d) a causa della comparsa di lesioni sulle ali e nell'anima del campione.

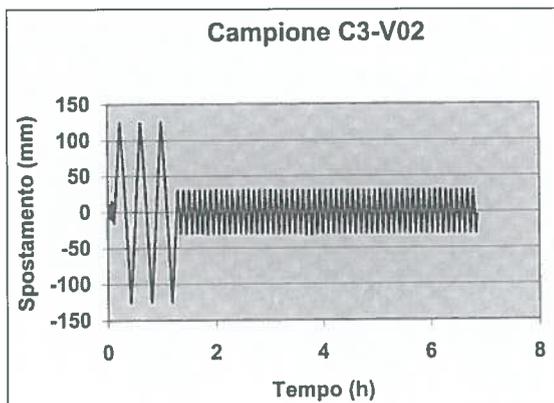


Figura 6a. Storia di spostamento.

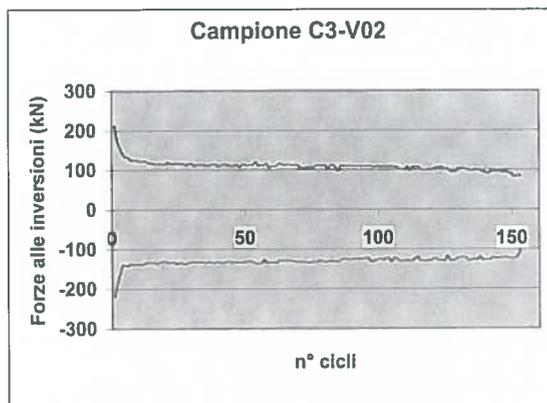


Figura 6d. Andamento delle forze alle inversioni.

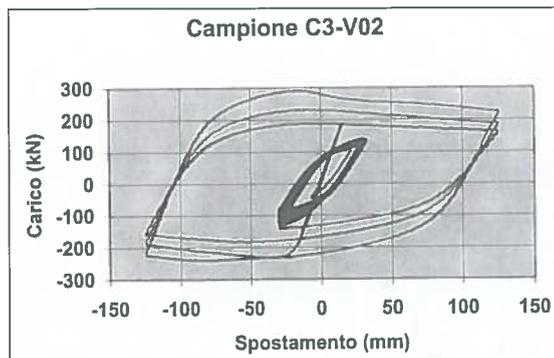


Figura 6b. Cicli di isteresi Forza-Spostamento.

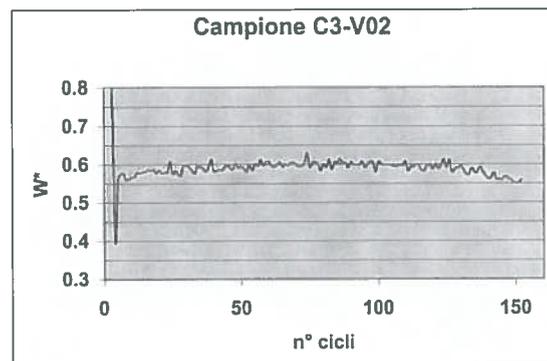


Figura 6e. Andamento delle energie adimensionali accumulate.

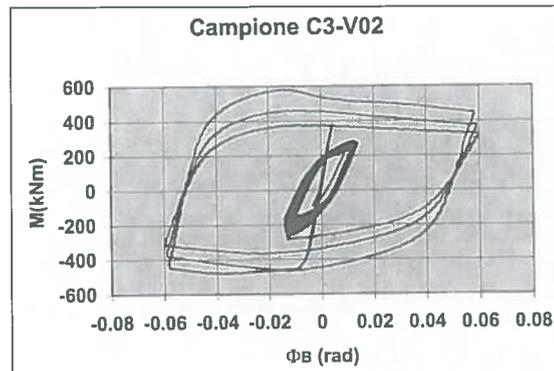


Figura 6c. Cicli di isteresi Momento-Rotazione.

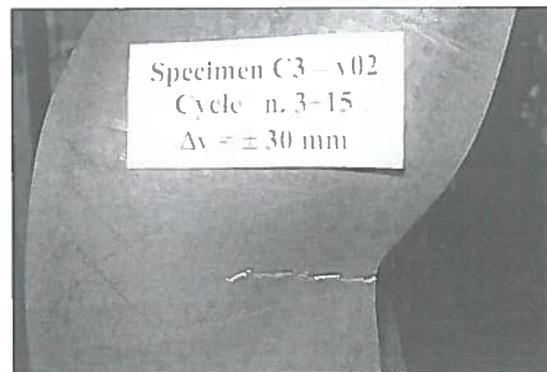


Figura 6f. Rottura del campione C3-V02.

Il collasso avviene in seguito alla rottura dell'ala della trave in corrispondenza del centocinquantunesimo ciclo di ampiezza ± 30 mm, come mostrato in figura 6 f e risulta essere di tipo misto secondo quanto proposto in [34,37] infatti la perdita di capacità portante si evidenzia in modo estremamente graduale, durante tutta la fase di applicazione dei cicli di piccola ampiezza (Fig. 6d) fino al cedimento dell'ala, avvenuto negli ultimi cicli, a cui è associata una brusca perdita di carico.

3.3 Campione C3-V03

La storia di carico assegnata al campione C3-V03 alterna a blocchi di 30 cicli di piccola ampiezza ($\Delta v \pm 30$ mm), un ciclo di grande ampiezza ($\Delta v \pm 125$ mm).

Durante l'esecuzione dell'ultimo ciclo di grande ampiezza, l'inversione negativa è stata effettuata a -145 mm, come evidente nelle figure presentate, in quanto si è cercato di "forzare" il comportamento del campione che durante i precedenti cicli aveva mostrato una deformata trasversale molto inferiore a quella dei campioni C3-V01 e C3-V02. Non avendo notato alcuna variazione della risposta del modello in seguito all'applicazione del semiciclo di ampiezza superiore, si è deciso di eseguire l'inversione positiva a $+125$ mm; in questo modo risulta essere stato applicato un ciclo asimmetrico, di ampiezza $\Delta v=270$ mm e spostamento medio $v_{med} = -10$ mm.

La figura 7a illustra la storia di spostamento imposta, mentre la figura 7b presenta i cicli di isteresi in termini di spostamento imposto e carico applicato.

L'incrudimento si manifesta in corrispondenza del primo ciclo di grande ampiezza, sia alla prima inversione a -125 mm, sia in corrispondenza del ramo di ricarico a $+125$ mm, con una lieve perdita di carico evidente solo verso la fine di tale semiciclo.

Durante tutta la storia di carico si nota una graduale perdita di capacità portante che risulta più marcata e concentrata in corrispondenza dei cicli di grande ampiezza, mentre è costante e graduale sotto l'effetto dei cicli di piccola ampiezza (Fig. 7d).

Nella figura 7c è riportato il diagramma momento (M) - rotazione della trave (Φ_B) valutato analogamente a

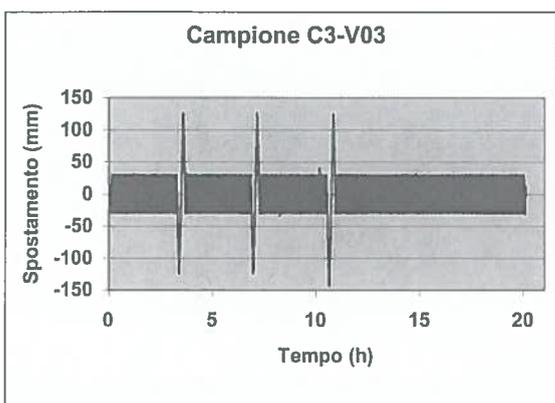


Figura 7a. Storia di spostamento.

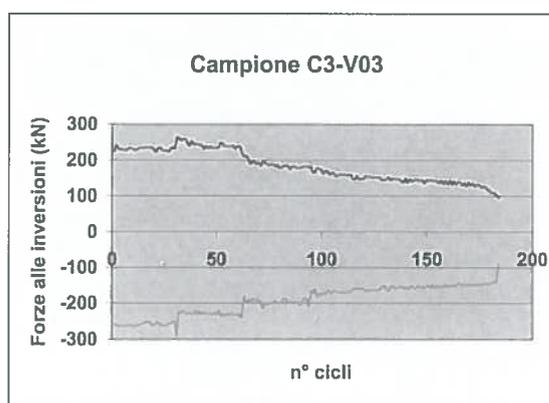


Figura 7d. Andamento delle forze alle inversioni.

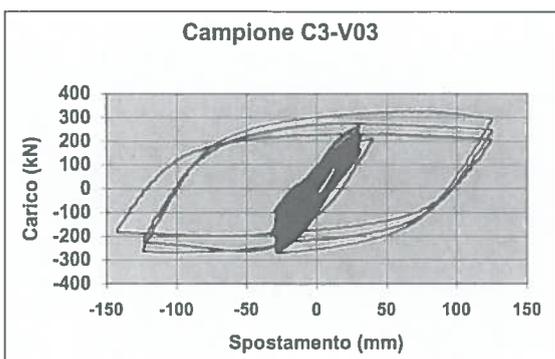


Figura 7b. Cicli di isteresi Momento-Rotazione.

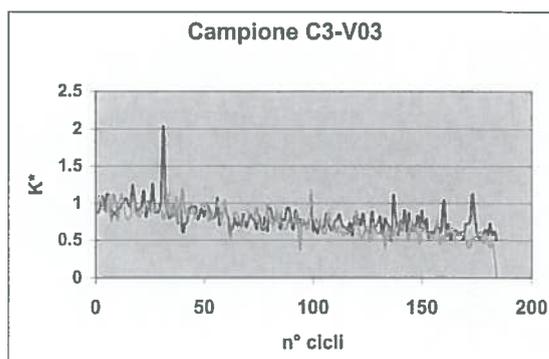


Figura 7e. Andamento delle rigidezze.

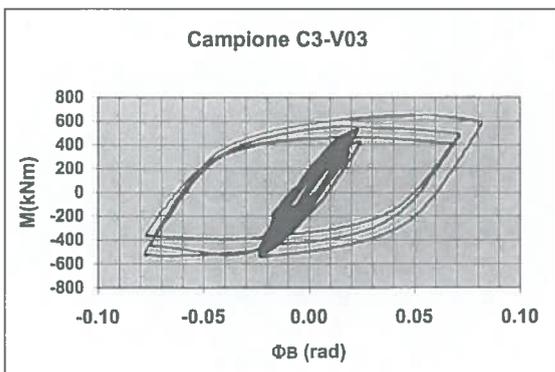


Figura 7c. Cicli di isteresi Momento-Rotazione.

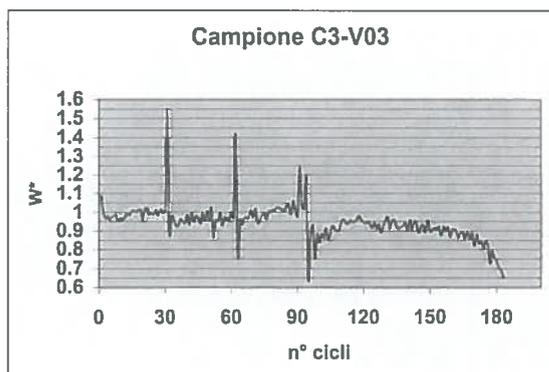


Figura 7f. Andamento delle energie adimensionali accumulate.

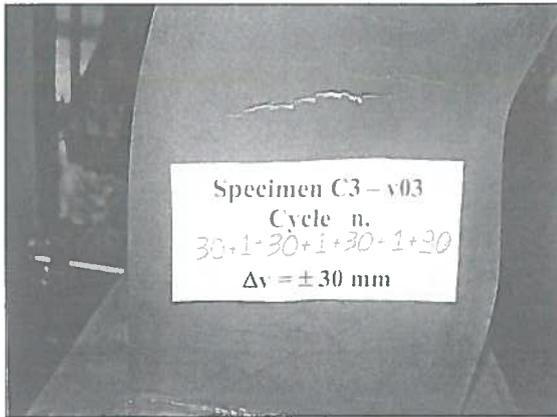


Figura 7g.
Rottura del
campione C3-
V03.

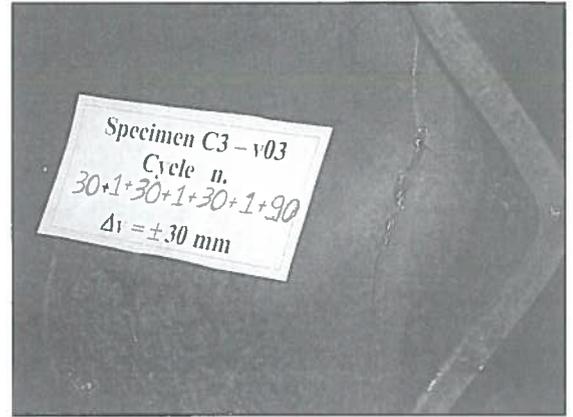


Figura 7h.
Rottura del
campione C3-V03.

quanto fatto per i campioni precedenti, secondo l'equazione (4).

Si nota, in questo caso, come la rotazione aumenti per effetto della formazione della cerniera plastica nella trave, in prossimità del collegamento della trave alla colonna.

Essendo lo spostamento imposto in sommità costante, tale aumento della rotazione relativa fra la trave e la colonna, non può che essere legato alla perdita di rigidità nella zona della cerniera plastica, fenomeno che risulta ben evidente nella figura 7e, che riporta i rapporti di rigidità (K^*) ai vari cicli, definiti come rapporto tra la rigidità del campione (K_p) e quella elastica (K_e). [36]

La figura 7f mostra il diagramma dell'energia adimensionale W^* assorbita nei vari cicli. Si può osservare come i cicli di grande ampiezza lascino pressoché inalterata la capacità di assorbire energia del campione, che comincia lentamente a diminuire solo dopo il centocinquantunesimo ciclo.

Le figure 7g e 7h mostrano come il collasso sia avvenuto per cedimento dell'anima e di parte dell'ala della trave, in corrispondenza del centoottantunesimo ciclo di ampiezza ± 30 mm. Il collasso è risultato di tipo misto, secondo [34,37]. Infatti, sebbene il diagramma della capacità portante (Fig. 7d) mostri una graduale riduzione della resistenza durante tutto l'arco della prova, con variazioni significative in corrispondenza dell'esecuzione dei cicli di grande ampiezza, il collasso si innesca solo negli ultimi cicli, come evidenziato anche in figura 7f dove si nota che la capacità di dissipare energia, si riduce notevolmente a partire dal centosettantesimo ciclo.

3.4 Campione C3-V04

Al campione C3-V04 è stata assegnata una storia di carico definita da due blocchi di cicli di piccola ampiezza, intervallati da un blocco di tre cicli di grande ampiezza.

La figura 8a mostra gli spostamenti in funzione del tempo, mentre la figura 8 b riporta i cicli di isteresi in termini di spostamenti assegnati e carico applicato.

Si nota come, anche in questo caso, il campione inizi a perdere parte della capacità portante dopo il primo ciclo di grande ampiezza, durante il quale avviene un parziale incrudimento.

Nei successivi due cicli, della medesima ampiezza, si registra una perdita costante della capacità portante, fino ad arrivare ai valori registrati al primo ciclo piccolo del terzo blocco ($\Delta v \pm 30$ mm).

Durante i successivi cicli con ampiezza ± 30 mm, la perdita di carico, sebbene ridotta, continua in modo costante sino alla rottura del campione.

I cicli di isteresi mostrati in figura 8c descrivono il comportamento del campione analizzato in termini di momento (M) e rotazione della trave (Φ_B), valutata come per i campioni precedenti secondo la (4).

In questo caso, durante i cicli di piccola ampiezza successivi al blocco di cicli di grande ampiezza, si registra una riduzione della rigidità del nodo, chiaramente da attribuirsi alla formazione della cerniera plastica nella trave (figura 8d).

La figura 8e descrive le forze alle inversioni in funzione dei cicli imposti.

Durante il primo blocco di cicli la forza si mantiene costante, mentre si rileva una notevole perdita durante il blocco di cicli di grande ampiezza.

Il comportamento del campione durante il terzo blocco di cicli, diviene nuovamente stabile sino alla rottura. L'andamento dell'energia adimensionale W^* , assorbita nei vari cicli, è descritta in figura 8f, dove si osser-

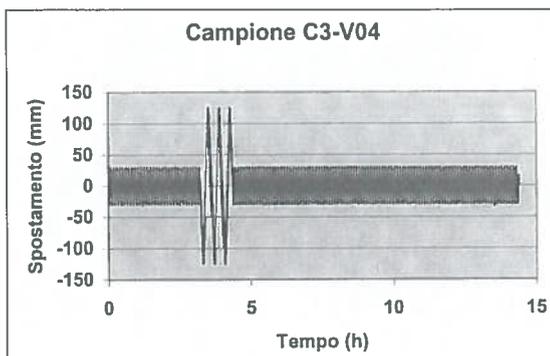


Figura 8a. Storia
di spostamento.

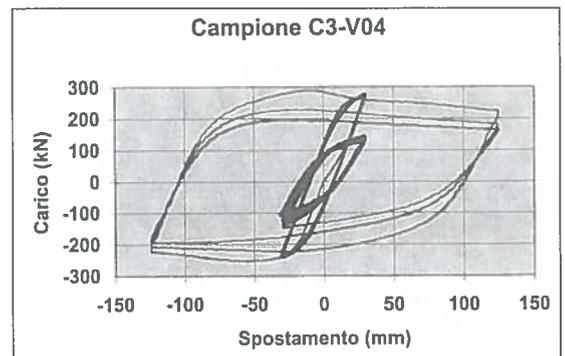


Figura 8b. Cicli
di isteresi Forza-
Spostamento.

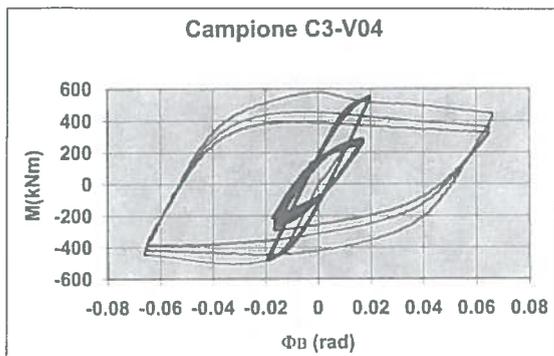


Figura 8c. Cicli di isteresi Momento-Rotazione.

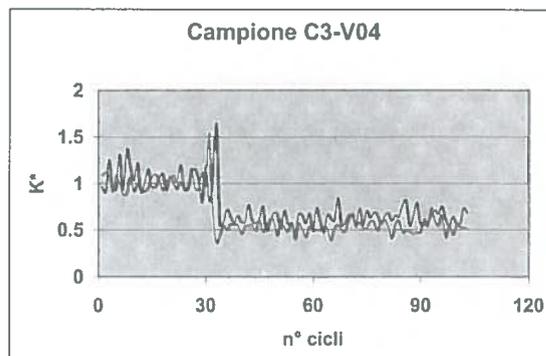


Figura 8d. Andamento delle rigidezze.

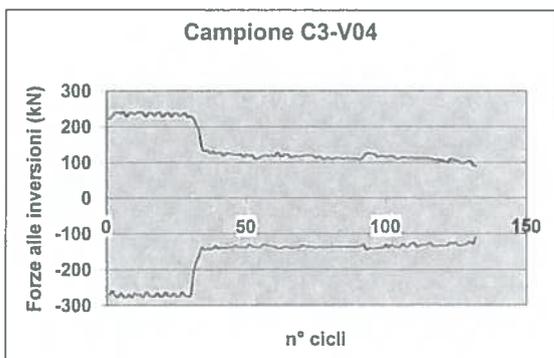


Figura 8e. Andamento delle forze alle inversioni.

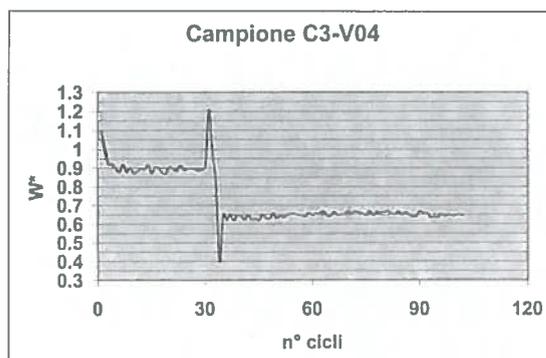


Figura 8f. Andamento delle energie accumulate.

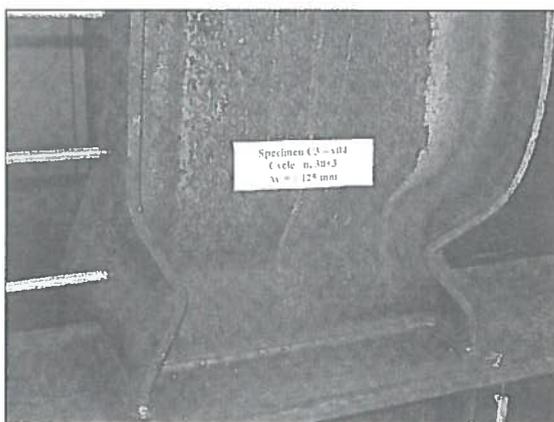


Figura 8g. Rottura del campione C3-V04.

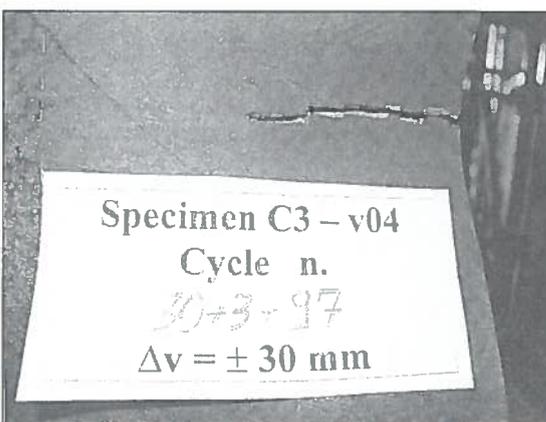


Figura 8h. Rottura del campione C3-V04.

va che la capacità di assorbire energia rimane pressoché costante durante tutto il primo blocco di cicli. L'intervento del blocco di cicli di grande ampiezza è sottolineato da un'impennata di tale valore, che segnala la formazione della cerniera plastica e che indica un notevole aumento della capacità di assorbire energia del campione, successivamente si registra una diminuzione di tale capacità che si assesta attorno ad un valore, inferiore a quello iniziale, che si mantiene invariato fino alla rottura del campione stesso.

Il collasso del campione è avvenuto a seguito della rottura dell'ala della trave, al centoventisettesimo ciclo di ampiezza ± 30 mm, come mostrato in figura 8g ed 8h e risulta di tipo misto, secondo la classificazione di [34,37], con una graduale perdita di resistenza durante tutto l'ultimo blocco di cicli di piccola ampiezza, anche se il collasso si evidenzia solo negli ultimissimi cicli (Fig. 8e).

4. ANALISI DEI RISULTATI

La tabella 2, in cui sono riportati per i vari campioni i valori della tensione di snervamento media delle ali (f_y), della forza (F_y) e dello spostamento (v_y) al limite elastico, della rigidezza elastica iniziale (K_e) nonché il rapporto tra la massima ampiezza dei cicli imposti ed il valore dello spostamento al limite elastico ($\Delta v_{max}/v_y$), mostra come vi siano similitudini rispettivamente tra i campioni C3-v01 e C3-v03, ed i campioni C3-v02 e C3-v04. In particolare, i campioni C3-v02 e C3-v04 sono caratterizzati dalla stessa forza al limite elastico e da valori pressoché simili dello spostamento al limite elastico e della tensione di snervamento. I campioni C3-v01 e C3-v03 sono caratterizzati da spostamenti al limite elastico e da valori sia della tensione di snervamento sia della forza al limite elastico abbastanza simili, e superiori rispetto a quelli dei campioni C3-v02 e C3-v04, anche se la rigidezza elastica del campione C3-v03 risulta essere

CAMPIONE	f_y [Mpa]	F_y [kN]	v_y [mm]	K_e [kN/mm]	$\Delta v_{max}/v_y$
C3-V01	367	234	20.2	11.6	12.38
C3-V02	318	219	18.6	11.8	13.44
C3-V03	357	227	20.3	11.2	12.32
C3-V04	322	219	18.5	11.8	13.51

Tabella 2. Principali caratteristiche meccaniche dei campioni.

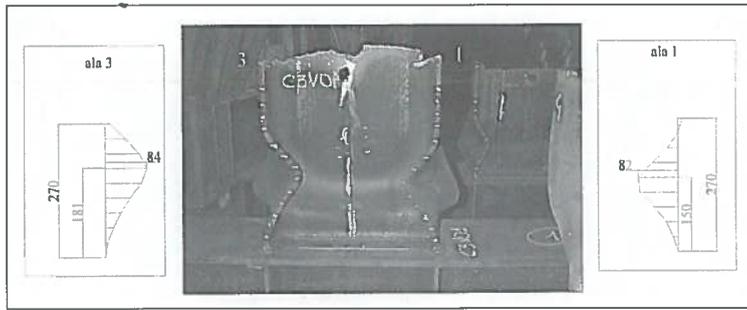


Figura 9a-1. Deformate delle ali 1 e 3 del campione C3-V01 (misure in mm).

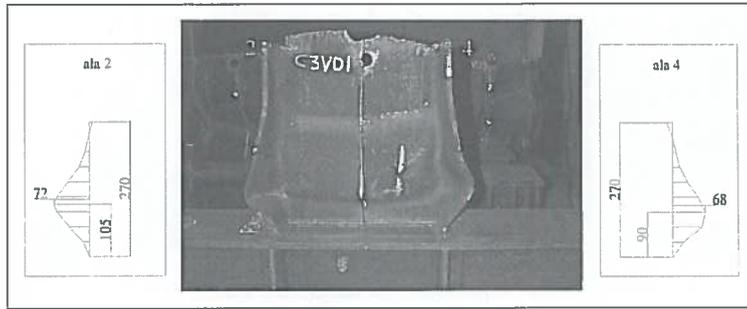


Figura 9a-2. Deformate delle ali 2 e 4 del campione C3-V01 (misure in mm).

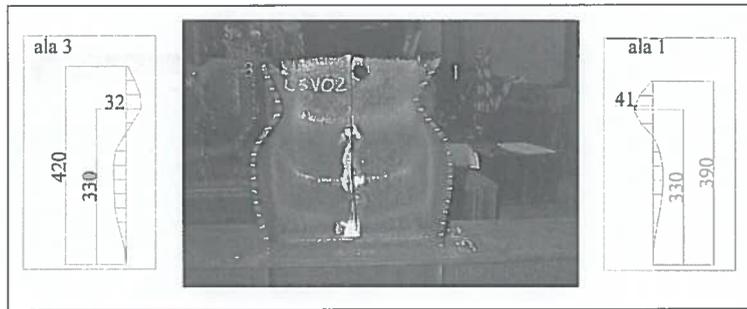


Figura 9b-1. Deformate delle ali 1 e 3 del campione C3-V02 (misure in mm).

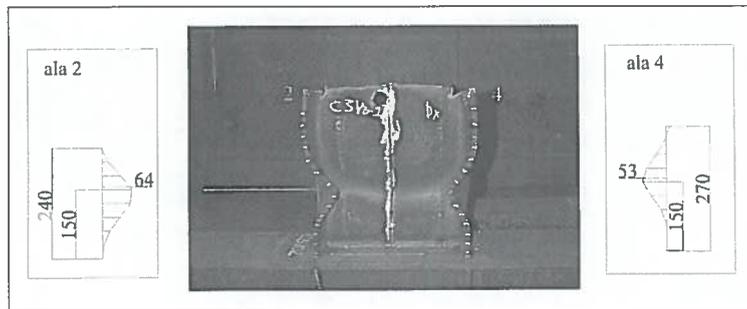


Figura 9b-2. Deformate delle ali 2 e 4 del campione C3-V02 (misure in mm).

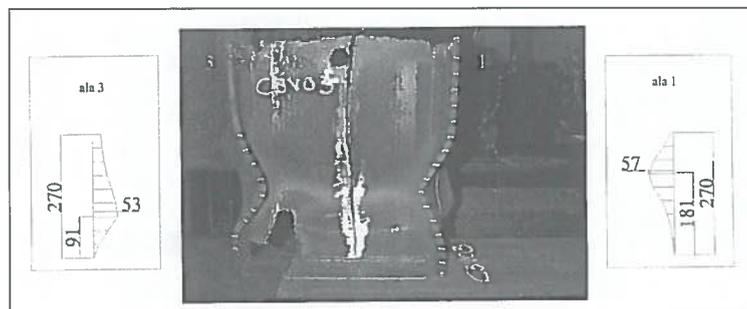


Figura 9c-1. Deformate delle ali 1 e 3 del campione C3-V03 (misure in mm).

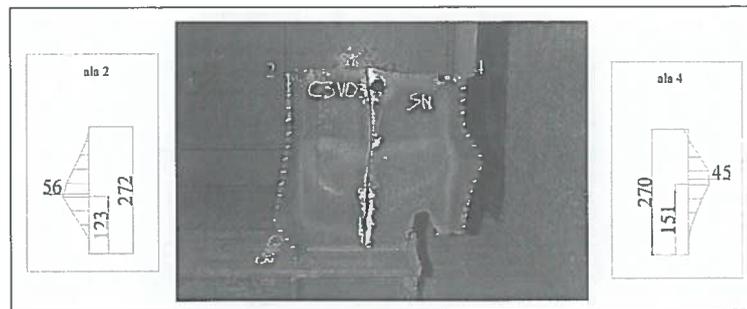


Figura 9c-2. Deformate delle ali 2 e 4 del campione C3-V03 (misure in mm).

inferiore di circa il 4% rispetto a quella del campione C3-V01, la quale risulta a sua volta minore di circa il 2% rispetto a quella dei campioni C3-v02 e C3-v04.

Le analogie evidenziate dall'esame delle caratteristiche meccaniche dei campioni sono confermate dall'analisi delle loro deformate.

Le figure 9 a-d, mostrano le deformate dei vari campioni al termine delle prove. In particolare, le foto riportano per ciascun campione le due viste laterali, nonché le misure più significative degli spostamenti trasversali delle estremità delle ali della trave.

Si può notare come i campioni C3-v01 e C3-v03 evidenzino deformate quasi simmetriche con imbozzamenti circa alla stessa distanza dalla colonna su tutte le quattro ali (denominate 1, 2, 3 e 4 come in fig. 9a), mentre i campioni C3-v02 e C3-v04 mostrano imbozzamenti ad altezze differenti sulle viste di sinistra (ali 1 e 3 Fig. 9b-1 e 9d-1) e su quelle di destra (ali 2 e 4 Fig. 9b-2 e 9d-2). La particolare sagoma delle ali deformate 1 e 3 del campione C3-v02 (Fig. 9b-1) e dell'ala 2 del campione C3-v04 (Fig. 9d-2) è chiaro indice di una pronunciata inflessione laterale nei due campioni. La non simmetria della deformata del campione C3-v04 sembra inoltre essere legata ad un fenomeno di deformazione flessio-torsionale.

Ciò è confermato sia dall'esame delle sezioni trasversali delle travi, ad una distanza di circa 400 mm dall'attacco con la colonna (Fig. 10 a-d), sia dalle deformate delle anime delle travi (Fig. 11 a-d). Infatti, alle differenti sagome di imbozzamento delle ali corrispondono due differenti forme della deformata dell'anima. Le anime dei campioni C3-v01 e C3-v03 presentano infatti una deformata con una sola semi-onda (Fig. 11a e 11c), mentre lo sbandamento delle anime dei campioni C3-v02 e C3-v04 è avvenuto secondo un'onda di sinusoide completa (Fig. 11b e 11d). Le tabelle 3-6 riportano i valori degli spessori delle ali e dell'anima delle travi misurate per i vari campioni al crescere della distanza dall'attacco con la colonna. Si può osservare una grande variabilità degli spessori sia nelle ali

sia nell'anima, lungo l'asse longitudinale della trave. Nelle tabelle sono inoltre evidenziati (in grassetto) i valori in corrispondenza degli imbozzamenti. Si vede come questi, nella maggior parte dei casi, si verificano in corrispondenza dei punti in cui lo spessore delle ali è minore.

Nelle stesse tabelle 3-6 si mostrano inoltre, per ogni estremità delle ali (1-4) e, limitatamente ai campioni C3-V03 e C3-V04 anche per l'anima, il valore medio, la deviazione standard ed il coefficiente di variazione (c.o.v.) degli spessori misurati, si evidenziano i valori minimi e massimi rilevati nonché le differenze tra questi valori e lo spessore nominale.

Si nota la grande variabilità degli spessori rispetto ai valori nominali, con scostamenti significativi mediamente compresi, per le ali tra -6% e -8%. Per quanto riguarda l'anima, il campione C3-V04 presenta uno spessore mediamente superiore di circa il 4% rispetto a quello nominale mentre quella del campione C3-V03 risulta sovradimensionata, mediamente del 10%.

Ovviamente, l'accoppiamento tra il sottodimensionamento delle ali ed il sovradimensionamento dell'anima è una delle cause delle differenze di comportamento già osservate tra i vari campioni; in particolare, i valori riportati in tabella 5 consentono di spiegare il comportamento del campione C3-V03, che avendo l'anima più spessa ha evidenziato una maggior rigidità allo sbandamento laterale.

Dall'analisi di tutti questi fattori, tenuto conto delle sequenze dei cicli di carico imposte ai vari campioni, si può concludere che l'effetto della presenza nella storia di carico di una sequenza di cicli consecutivi di grande ampiezza è quello di ridurre la capacità portante del campione, provocando l'insorgere di deformazioni laterali e/o flessio-torsionali. La tipologia di tali deformazioni (semplice instabilità laterale oppure instabilità flessio-torsionale) dipende da vari fattori quali, ad esempio, i vincoli imposti allo sbandamento laterale dei campioni e le possibili imperfezioni geometriche presenti (quali quelle iniziali del campione o quelle accidentalmente introdotte

Figura 9d-1.
Deformate delle ali 1 e 3 del campione C3-V04 (misure in mm).

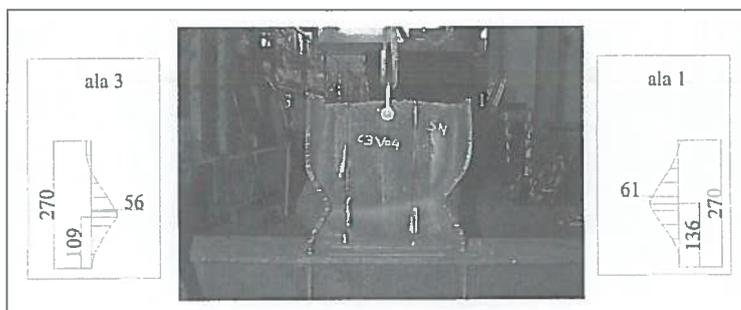


Figura 9d-2.
Deformate delle ali 2 e 4 del campione C3-V04 (misure in mm).

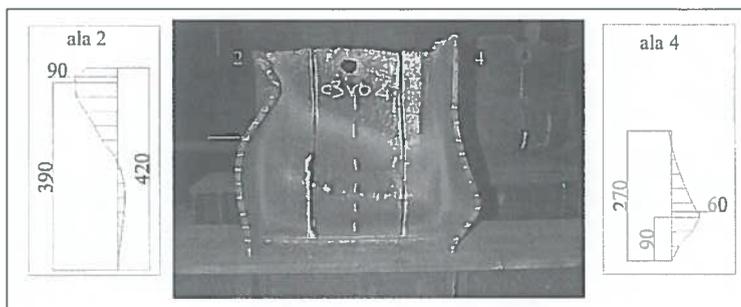


Figura 10a.
Sezione trasversale del campione C3-V01 a fine prova.

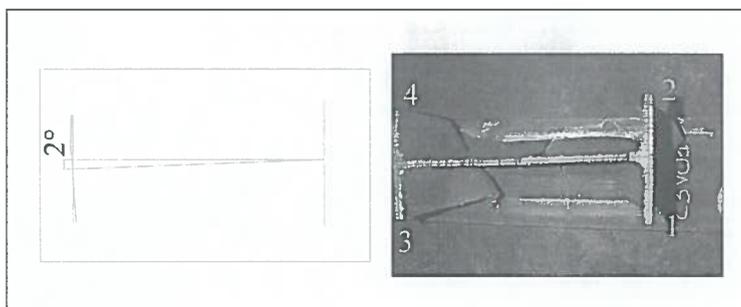


Figura 10b.
Sezione trasversale del campione C3-V02 a fine prova.

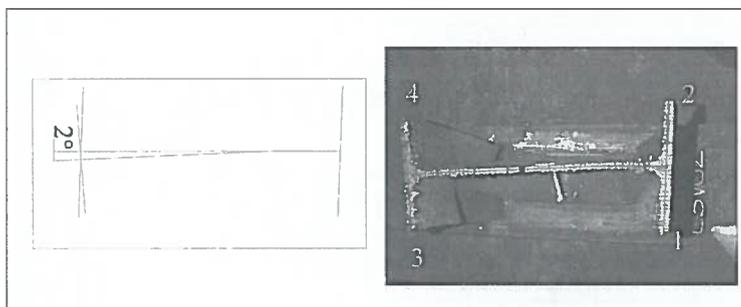


Figura 10c.
Sezione trasversale del campione C3-V03 a fine prova.

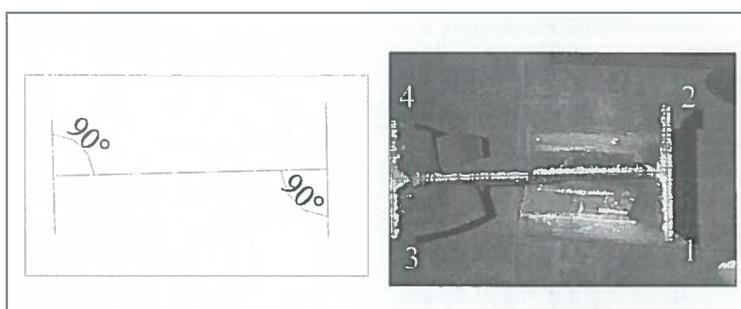
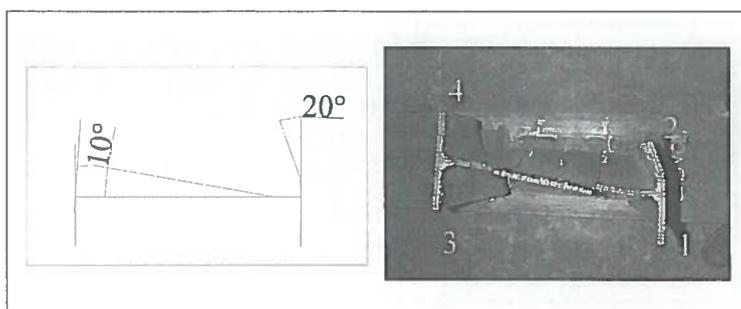


Figura 10d.
Sezione trasversale del campione C3-V04 a fine prova.



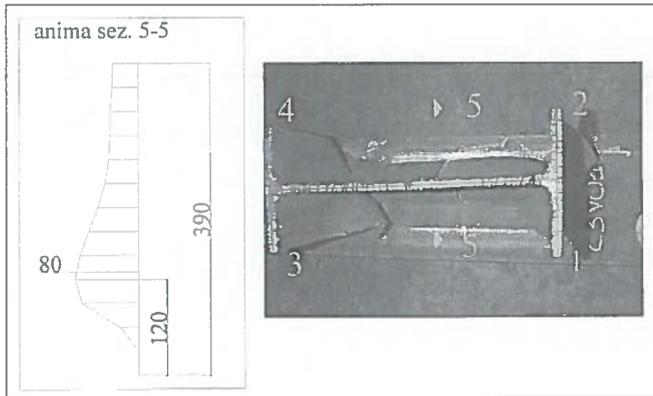


Figura 11a. Deformata dell'anima del campione C3-V01 (misure in mm).

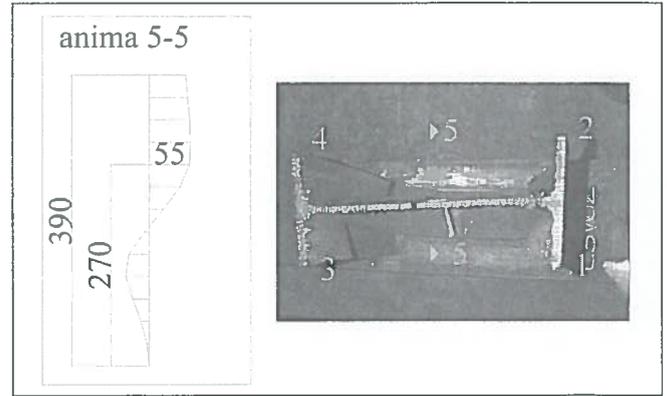


Figura 11b. Deformata dell'anima del campione C3-V02 (misure in mm).

CAMPIONE C3-V01										
Distanza	ALI					ALI				
dalla	1	2	3	4		1	2	3	4	media
colonna	Spessore [mm]									
[mm]										
30	10.99	13.85	12.40	12.10	spess. medio	11.43	13.09	12.55	11.84	12.23
60	10.54	13.74	12.26	12.02	st. dev	0.49	0.38	0.23	0.13	0.31
90	10.98	12.81	12.05	11.73	c.o.v. %	4.26	2.88	1.86	1.08	2.52
120	11.26	12.88	12.38	11.90	spess. min	10.54	12.45	12.05	11.59	11.66
150	11.42	12.45	12.77	11.93	spess. max	12.31	13.85	12.78	12.10	12.76
180	11.25	12.62	12.37	11.59	spess. nom	13.10	13.10	13.10	13.10	13.10
210	11.26	12.91	12.77	11.75	spess. med-nom	-1.67	-0.01	-0.55	-1.26	-0.87
240	11.58	12.85	12.78	11.74	differenza %	-12.75	-0.08	-4.20	-9.65	-6.67
270	11.32	13.20	12.63	11.78	spess. min-nom	-2.56	-0.65	-1.05	-1.51	-1.44
300	12.06	13.14	12.61	11.78	differenza %	-19.54	-4.96	-8.02	-11.53	-11.01
330	12.31	13.15	12.65	11.84	spess. max-nom	-0.79	0.75	-0.32	-1.00	-0.34
360	12.00	13.05	12.73	11.86	differenza %	-6.03	5.73	-2.44	-7.63	-2.60
390	11.62	13.17	12.74	11.86						
420		13.09		11.82						
450		13.44								

Tabella 3. Spessori del campione C3-V01.

CAMPIONE C3-V02										
Distanza	ALI					ALI				
dalla	1	2	3	4		1	2	3	4	media
colonna	Spessore [mm]									
[mm]										
30	11.85	12.07	11.67	13.08	spess. medio	12.01	11.85	11.63	12.74	12.06
60	12.17	12.12	11.87	12.84	st. dev	0.21	0.18	0.11	0.18	0.17
90	12.06	11.67	11.60	12.63	c.o.v. %	1.75	1.55	0.94	1.38	1.40
120	12.05	11.85	11.72	12.85	spess. min	11.69	11.59	11.45	12.50	11.81
150	11.85	12.03	11.45	12.90	spess. max	12.38	12.12	11.87	13.08	12.36
180	11.69	11.59	11.67	12.50	spess. nom	13.10	13.10	13.10	13.10	13.10
210	11.75	11.88	11.50	12.88	spess. med-nom	-1.09	-1.25	-1.47	-0.36	-1.04
240	11.90	11.88	11.60	12.86	differenza %	-8.34	-9.57	-11.21	-2.75	-7.97
270	11.86	12.09	11.63	12.62	spess. min-nom	-1.41	-1.51	-1.65	-0.60	-1.29
300	12.06	11.75	11.78	12.67	differenza %	-10.76	-11.53	-12.60	-4.58	-9.87
330	12.22	11.66	11.61	12.50	spess. max-nom	-0.72	-0.98	-1.23	-0.02	-0.74
360	12.26	11.73	11.53	12.70	differenza %	-5.50	-7.48	-9.39	-0.15	-5.63
390	11.80	11.68	11.59	12.58						
420	12.21		11.62							
450	12.38									

Tabella 4. Spessori del campione C3-V02.

in fase di montaggio o durante l'applicazione del carico).

D'altra parte, una sequenza di cicli consecutivi di grande ampiezza, provoca un notevole accumulo di deformata trasversale nei campioni, come chiaramente evidenziato in figura 12 che riporta il diagramma della deformazione trasversale dell'anima nella zona della cerniera plastica (u) in funzione del momento flettente (M) applicato, per un campione di nodo simile a quelli considerati in questo studio, sottoposto a cicli di ampiezza costante pari a ± 125 mm [33, 34].

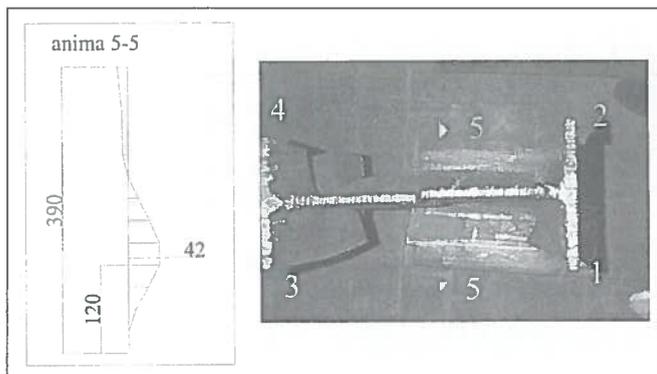


Figura 11c. Deformata dell'anima del campione C3-V03 (misure in mm).

CAMPIONE C3-V03					
Distanza dalla colonna [mm]	ALI				ANIMA
	1	2	3	4	5
	Spessore [mm]				
30	12.63	11.74	12.83	12.66	8.25
60	12.54	11.62	12.92	12.48	8.74
90	12.48	11.25	12.23	12.33	8.60
120	12.80	11.32	11.86	12.69	8.20
150	12.98	11.13	11.85	12.69	8.20
180	13.01	11.34	11.68	12.71	8.50
210	13.11	11.07	11.66	12.73	8.44
240	13.31	11.11	11.62	12.82	8.45
300	13.15		11.62	12.88	8.33
330	13.05		11.76	12.55	8.30
360	13.10		11.73	12.37	8.25
390			11.77	12.52	8.25
420			11.99	12.55	
450			11.98	12.54	

Tabella 5a. Spessori del campione C3-V03 (statistiche).

CAMPIONE C3-V04						
Distanza dalla colonna [mm]	ALI				ANIMA	
	1	2	3	4	5	6
	Spessore [mm]					
30	12.28	12.57	12.71	11.61	7.80	7.98
60	12.57	12.73	12.68	11.79	7.77	7.94
90	12.58	12.59	12.76	11.65	7.75	7.90
120	12.20	12.20	12.73	11.46	8.05	7.95
150	12.06	12.15	12.80	11.40	7.85	7.95
180	12.10	12.37	13.09	11.32	7.80	8.00
210	12.20	12.18	13.18	11.58	8.25	7.99
240	12.05	12.28	12.96	11.52	7.90	7.99
270	12.17	12.31	13.01	11.58	7.82	7.93
300	12.08	12.46	12.74	11.48	7.90	7.95
330	12.10	12.23			7.90	7.85
360		12.28			7.85	7.75
390		12.61			7.83	7.77
420						
450						

Tabella 6a. Spessori del campione C3-V04.

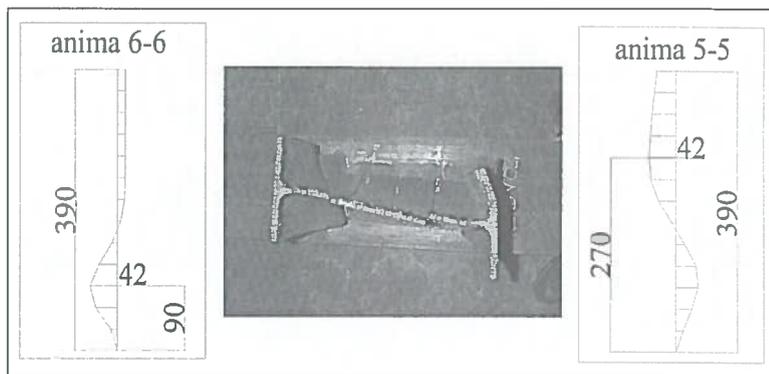


Figura 11d. Deformata dell'anima del campione C3-V04 (misure in mm).

CAMPIONE C3-V03						
	ALI					ANIMA
	1	2	3	4	media	5
spess. medio	12.94	11.30	11.95	12.61	12.20	8.37
st. dev	0.26	0.23	0.41	0.15	0.26	0.17
c.o.v. %	2.04	2.07	3.42	1.22	2.19	2.02
spess. min	12.48	11.07	11.62	12.33	11.88	8.20
spess. max	13.31	11.74	12.92	12.88	12.71	8.74
spess. nom	13.10	13.10	13.10	13.10	13.10	7.60
spess. med-nom	-0.16	-1.80	-1.15	-0.49	-0.90	0.77
differenza %	-1.24	-13.71	-8.77	-3.76	-6.87	10.07
spess. min-nom	-0.62	-2.03	-1.48	-0.77	-1.23	0.60
differenza %	-4.73	-15.50	-11.30	-5.88	-9.35	7.89
spess. max-nom	0.21	-1.36	-0.18	-0.22	-0.39	1.14
differenza %	1.60	-10.38	-1.37	-1.68	-2.96	15.00

Tabella 5b. Spessori del campione C3-V03 (statistiche).

CAMPIONE C3-V04							
	ALI				ANIMA		
	1	2	3	4	media	5	6
spess. medio	12.22	12.38	12.87	11.54	12.25	7.88	7.92
st. dev	0.19	0.19	0.18	0.13	0.17	0.13	0.08
c.o.v. %	1.56	1.54	1.39	1.16	1.41	1.70	1.03
spess. min	12.05	12.15	12.68	11.32	12.05	7.75	7.75
spess. max	12.58	12.73	13.18	11.79	12.57	8.25	8.13
spess. nom	13.10	13.10	13.10	13.10	13.10	7.60	7.60
spess. med-nom	-0.88	-0.72	-0.23	-1.56	-0.85	0.28	0.32
differenza %	-6.74	-5.48	-1.79	-11.92	-6.48	3.71	4.20
spess. min-nom	-1.05	-0.95	-0.42	-1.78	-1.05	0.15	0.15
differenza %	-8.02	-7.25	-3.21	-13.59	-8.02	1.97	1.97
spess. max-nom	-0.52	-0.37	0.08	-1.31	-0.53	0.65	0.40
differenza %	-3.97	-2.82	0.61	-10.00	-4.05	8.55	5.26

Tabella 6b. Spessori del campione C3-V04 (statistiche).

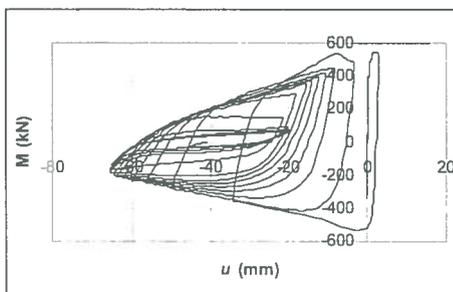


Figura 12. Accumulo della deformata laterale (u) sotto cicli di ampiezza costante.

E' chiaramente evidente l'accumularsi della deformata laterale al crescere del numero di cicli applicati, anche se dopo i primi tre o quattro cicli è già stato raggiunto un valore pari a circa il 90% del valore massimo raggiunto a collasso.

Al contrario, al termine del primo ciclo, si può notare come la deformata trasversale risulti ancora abbastanza limitata, ed inferiore al 50% di quella massima; inoltre, si osserva che all'inversione del carico, durante il secondo ciclo, la deformata rientra fino a valori dell'ordine del 5-10% di quella massima.

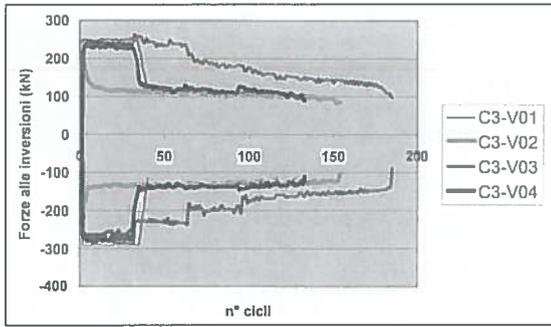


Figura 13a. Andamento delle forze alle inversioni nei 4 campioni.

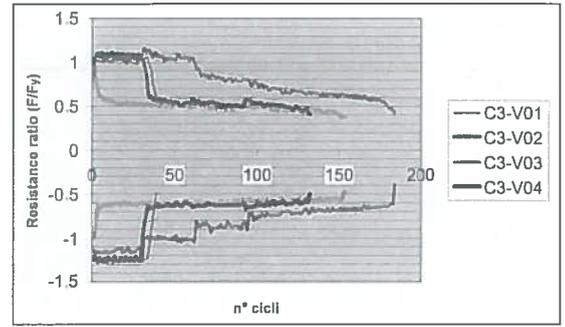


Figura 13b. Andamento della capacità portante adimensionale dei 4 campioni.

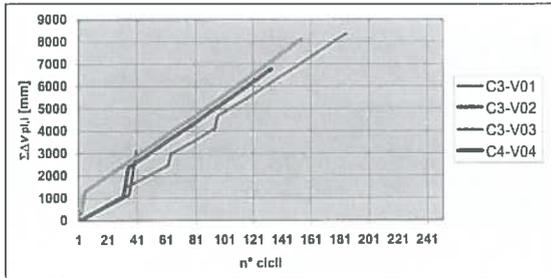


Figura 14a. Accumulata delle deformazioni plastiche nei 4 campioni.

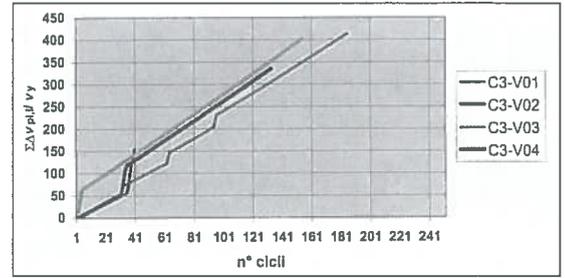


Figura 14b. Richiesta di duttilità nei 4 campioni.

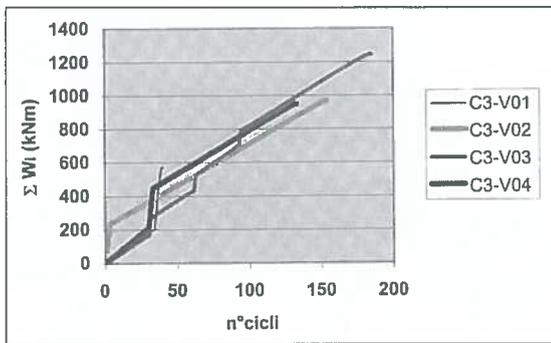


Figura 15. Energia accumulata nei 4 campioni.

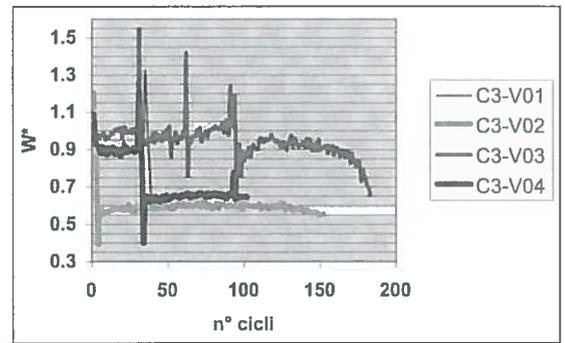


Figura 16. Energia adimensionale dissipata nei vari cicli dai 4 campioni.

Ciò spiega il motivo per cui il campione C3-v03, che ha subito una storia di carico con cicli di grande ampiezza distanziati tra loro, abbia sopportato un numero di cicli molto superiore agli altri campioni, e la sua deformata trasversale a collasso sia risultata sostanzialmente contenuta.

L'analisi della risposta globale dei campioni, in termini di forze alle inversioni (Fig. 13), accumulazione di deformazione plastica (cioè richiesta di duttilità, Fig. 14), e di energia accumulata (Fig. 15), e (Fig. 16), conferma quanto sopra affermato.

Nella figura 13 si mettono a confronto le risposte dei 4 campioni in termini di resistenza alle inversioni, in termini dimensionali (Fig. 13 a) ed adimensionalizzati sul valore della forza al limite elastico F_y ("Resistance ratio" [36]).

Si può notare che il collasso dei vari campioni avviene in corrispondenza della stessa perdita di carico, pari a circa il 50% della resistenza iniziale del campione integro.

Si osserva inoltre che tale perdita di carico è pressoché influenzata dai soli cicli di grande ampiezza.

Nei campioni in cui l'applicazione dei cicli da ± 125 mm è stata concentrata in un unico blocco, la perdita di carico è molto marcata ed evidente, al contrario, nel caso del campione C3-V03, in cui i cicli da ± 125 mm sono stati applicati isolati, intervallati da cicli da ± 30 mm, la perdita di carico è molto più graduale.

E' inoltre evidente che il comportamento del campione C3-V01, sottoposto ad una serie iniziale di cicli da ± 30 mm e portato a collasso con cicli da ± 125 mm, è differente da quello degli altri campioni. Il collasso avviene, infatti, dopo un numero di cicli molto ridotto.

Tale differenza di comportamento è evidenziata anche nella figura 14, che mostra l'accumulo di deformazione plastica nel campione, in termini di escursione in campo plastico Δv_p (essendo v lo spostamento in sommità del campione), durante i vari cicli. Come si può notare il campione C3-V01 è caratterizzato da una duttilità notevolmente inferiore a quella degli altri campioni. Si osserva inoltre che anche in questo caso, i campioni C3-V02 e C3-V03 evidenziano comportamenti analoghi, mentre il campione C3-V04, che ha subito 3 cicli da ± 125 mm "concentrati" all'interno della storia di carico mostra una duttilità leggermente inferiore a quella degli altri due campioni, seppur notevolmente superiore a quella del campione C3-V01.

Le successive figure 15 e 16 consentono un confronto tra le risposte dei vari campioni rispettivamente in termini di energia accumulata (ΣW) e di energia adimensionale dissipata nei vari cicli W^* .

Si può notare come i campioni C3-V01, C3-V02 e C3-V04, dopo la prima serie di cicli da ± 30 mm e dopo i 3 cicli da ± 125 mm hanno subito la stessa escursione in campo plastico (Fig. 14), ma sono caratterizzati da differenti assorbimenti di energia.

I campioni C3-V01 e C3-V02, infatti, accumulano meno energia rispetto al campione C3-V04 (Fig. 15). Tale considerazione vale anche operando in termini di energia dissipata ai vari cicli (Fig. 16).

Si nota, infatti, che il campione C3-V02, che subisce i 3 cicli a ± 125 mm all'inizio della storia di carico, mostra immediatamente una perdita della capacità di dissipare energia. Tale perdita è leggermente superiore a quella evidenziata dal campione C3-V04, dopo che questo è stato anch'esso sottoposto ai 3 cicli da ± 125 mm. Si osserva come il campione C3-V01 subisca una analoga perdita della capacità di dissipare energia in corrispondenza del collasso, che avviene però in corrispondenza di un numero di cicli molto più basso.

Da quanto precede si evince chiaramente come l'effetto della presenza, all'interno della storia di carico, di più cicli di grande ampiezza ravvicinati risulti negativo in quanto provoca una notevole riduzione della capacità portante del campione. D'altra parte, bisogna osservare che la presenza anche di un solo ciclo di grande ampiezza cambia totalmente le modalità di collasso e consente di estendere la vita a fatica del campione.

Ciò risulta evidente, ad esempio, dall'esame del comportamento del campione C3-V01 che, dopo aver subito subito 36 cicli di ampiezza $\Delta v = \pm 30$ mm ed evidenziando già una cricca in corrispondenza della saldatura tra l'ala della trave e la colonna, è stato in grado di sopportare in aggiunta 4 cicli con $\Delta v = \pm 125$ mm, collassando poi per frattura dell'ala e dell'anima in corrispondenza degli imbozzamenti insorti nella zona della cerniera plastica.

Anche gli altri campioni (C3-V03 e C3-V04) mostrano come, dopo aver subito 30 cicli con $\Delta v = \pm 30$ mm, un volta sottoposti ad almeno un ciclo di grande ampiezza ($\Delta v = \pm 125$ mm), siano in grado di sopportare un grande numero aggiuntivo di cicli piccoli con $\Delta v = \pm 30$ mm (148 e 95 rispettivamente) senza evidenziare alcun fenomeno di collasso improvviso (fragile).

Addirittura, il campione C3-V02, dopo aver sopportato 3 cicli con $\Delta v = \pm 125$ mm collassa dopo aver subito 147 cicli con $\Delta v = \pm 30$ mm.

Risulta quindi interessante analizzare il fenomeno e l'influenza dei cicli di grande ampiezza anche dal punto di vista dell'accumulazione del danno e della stima delle modalità di collasso.

In tabella 7 sono messi a confronto i valori massimi (Δv_{max}) ed il valore equivalente:

$$(\Delta v_{eq} = 3 \sqrt{\frac{\sum n_i \Delta v_i^3}{\sum n_i}}) \quad (8)$$

dell'ampiezza dei cicli imposti ai vari campioni con il valore di soglia (Δv_{th}) proposto in [34,37], con riferimento a prove con cicli di ampiezza costante, come quel valore dell'ampiezza dei cicli tale per cui:

se $\Delta v < 0.85 \Delta v_{th}$ è da attendersi un collasso del campione di tipo improvviso (fragile)

se $\Delta v > 1.15 \Delta v_{th}$ è da attendersi un collasso del campione di tipo graduale (duttile)

se $0.85 \Delta v_{th} < \Delta v < 1.15 \Delta v_{th}$ è da attendersi un collasso del campione di tipo misto.

Si può osservare che, se si facesse riferimento al valore Δv_{max} dell'ampiezza dei cicli per tutti i campioni, sarebbe da attendersi un collasso di tipo graduale, mentre sulla base del valore dell'ampiezza equivalente Δv_{eq} dei cicli, per i campioni C3-V01, C3-V02 e C3-V04 è da attendersi una modalità di collasso di tipo misto. Per il campione C3-V03, invece, sembrerebbe doversi attendere un collasso di tipo repentino in quanto $\Delta v_{eq} / \Delta v_{th} = 0.78 < 0.85$. Ciò è però dovuto al particolare comportamento del campione C3-V03, già evidenziato in precedenza, che ha sostenuto un numero estremamente elevato (178) di cicli con $\Delta v = \pm 30$ mm. Di ciò risente ovviamente la valutazione di Δv_{eq} , riducendosi di fatto il peso dei cicli con $\Delta v = \pm 125$ mm.

Tenuto conto di questo fatto, si può notare come la proposta [34,37] consenta effettivamente di valutare in modo corretto e comunque conservativo la modalità di collasso dei vari campioni, se nel caso di prove ad ampiezza variabile si fa riferimento al valore equivalente Δv_{eq} .

Alla stessa conclusione si giunge (tabella 8) valutando il danno accumulato, sempre sulla base del valore di Δv_{eq} , applicando la regola di Miner facendo riferimento ai valori proposti in [34,37] per la definizione della curva S-N (eq. (1)) associata al collasso di tipo misto di nodi uguali a quelli di questa ricerca:

$$N \Delta \sigma^3 = 10^{11.53} \quad (9)$$

Come si vede, a collasso il valore dell'indice di danno alla Miner è sempre superiore all'unità, con un valore medio per i 4 campioni pari a 1.25. Si nota inoltre sempre l'anomalia di comportamento del campione C3-V03, per cui il modello utilizzato fornisce un valore dell'indice di danno I_D pari a 1.43.

Si ha conferma del fatto che il comportamento dei campioni cambia in modo significativo una volta che questi sono sottoposti ad uno o più cicli di grande ampiezza se si analizzano i risultati in termini di accumulazione del danno, sulla base della effettiva storia di carico invece che sulla base del Δv_{eq} .

CAMPIONE	[mm]	v_y [mm]	$\Delta v_{max} / v_y$	Δv_{th} [mm]	$\Delta v_{max} / \Delta v_{th}$	Δv_{eq} [mm]	$\Delta v_{eq} / \Delta v_{th}$	$\Delta v_{eq} / v_y$
C3-V01	250	20.2	12.38	111	2.25	120.7	1.12	5.98
C3-V02	250	18.6	13.44	102	2.45	80.6	0.85	4.33
C3-V03	270	20.3	13.30	112	2.65	79.0	0.78	3.91
C3-V04	250	18.5	13.51	102	2.45	83.3	0.87	4.50

Tabella 7.
Parametri di spostamento caratteristici delle storie imposte ai campioni.

CAMPIONE	Δv_{eq} [mm]	$\Delta \sigma^*_{eq}$ [MPa]	N_{TOT}	N_{LIM}	I_D
C3-V01	120.7	2193	40	32	1.24
C3-V02	80.6	1378	150	129	1.16
C3-V03	79.0	1389	181	126	1.43
C3-V04	83.3	1450	128	111	1.15
				media	1.25

Tabella 8. Valutazione dell'indice di danno alla Miner sulla base di Δv_{eq} .

In questo caso, infatti, sempre facendo riferimento alla linee S-N presentate in [34,37]:

$N\Delta\sigma^{*3} = 10^{11.74}$ nel caso di collasso di tipo progressivo (duttile)

$N\Delta\sigma^{*3} = 10^{11.53}$ nel caso di collasso di tipo misto

$N\Delta\sigma^{*3} = 10^{10.70}$ nel caso di collasso di tipo improvviso (fragile)

si è ritenuto di valutare il danno accumulato sotto i cicli di piccola ampiezza ($\Delta v = \pm 30 \text{ mm} < \Delta v_{th}$) precedenti i cicli di grande ampiezza ($\Delta v = \pm 125 \text{ mm} > \Delta v_{th}$) sulla base della linea S-N per collasso di tipo improvviso, il danno accumulato sotto i cicli di grande ampiezza ($\Delta v = \pm 125 \text{ mm} > \Delta v_{th}$) sulla base della linea S-N per collasso di tipo progressivo ed il danno accumulato sotto i cicli di piccola ampiezza successivi all'applicazione del primo ciclo di grande ampiezza sulla base della linea S-N per collasso di tipo misto.

La tabella 9 mostra i risultati ottenuti.

Si può osservare come per il campione C3-V03 risulti l'indice di danno più elevato, pari a $1.72 > 1.0$, e per il campione C3-V02 un indice di danno = $0.84 < 1.0$. Mentre il valore elevato ottenuto per il campione C3-V03 dipende dalle già discusse particolarità di comportamento del campione stesso, ed è fortemente conservativo, la valutazione per il campione C3-V02 è a sfavore di sicurezza, anche se il valore ottenuto risulta comunque compatibile con la variabilità da attendersi per l'indice di danno alla Miner [39].

Bisogna però osservare che la valutazione fin qui effettuata è stata basata sulle linee S-N derivate come interpolazione dei valori medi dei risultati sperimentali [34,37]. Se si facesse riferimento, invece che alle linee "medie", alle linee S-N di progetto [20, 30], ottenute dai valori medi delle interpolazioni sottraendo una deviazione standard, e cioè:

$N\Delta\sigma^{*3} = 10^{11.65}$ nel caso di collasso di tipo progressivo (duttile)

$N\Delta\sigma^{*3} = 10^{11.48}$ nel caso di collasso di tipo misto

$N\Delta\sigma^{*3} = 10^{10.38}$ nel caso di collasso di tipo improvviso (fragile)

si otterrebbero i valori dell'indice di danno riportati in tabella 10, in cui si mostra che anche il danno accumulato dal campione C3-V02 viene stimato in modo conservativo.

5. CONCLUSIONI

Sono state eseguite alcune prove su nodi trave-colonna in acciaio sottoposti a cicli di spostamento di ampiezza variabile.

I risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti su campioni simili, sottoposti a storie di spostamento con cicli di ampiezza costante.

Lo studio, sebbene molto limitato per il piccolo numero di campioni provati, consente di trarre considerazioni di carattere generale sulla base dei risultati acquisiti in precedenza su nodi uguali, disponibili in letteratura, e di confermare quanto ipotizzato in [34,37] a proposito della dipendenza del comportamento dei campioni dall'ampiezza dei cicli di spostamento imposti e dell'applicabilità di un modello di accumulazione lineare del danno.

Si è evidenziato come:

- Più cicli di spostamento di grande ampiezza ($\Delta v > \Delta v_{th}$) ravvicinati riducano notevolmente la capacità portante del campione
- La presenza all'interno della storia di carico di anche un solo ciclo di grande ampiezza ($\Delta v / \Delta v_{th}$) cambi completamente il comportamento del campione e la sua modalità di collasso.
- Una valutazione del danno accumulato in termini di Δv_{eq} , basata sulla regola di Miner e sulle linee S-N [20,34,37] porti a risultati sostanzialmente corretti ed a favore di sicurezza se la modalità di collasso è stimata confrontando il valore di Δv_{eq} con quello di soglia Δv_{th} come proposto in [34,37].
- I cicli di piccola ampiezza ($\Delta v < \Delta v_{th}$) successivi al primo ciclo di grande ampiezza ($\Delta v > \Delta v_{th}$) possano essere considerati contribuire ad un collasso di tipo misto, mentre i cicli con $\Delta v > \Delta v_{th}$ contribuiscono ad un collasso di tipo progressivo ("duttile") e quelli con $\Delta v < \Delta v_{th}$ precedenti il primo ciclo con $\Delta v > \Delta v_{th}$ contribuiscono ad un collasso di tipo improvviso ("fragile").

CAMPIONE	I_D
C3-V01	1.61
C3-V02	0.89
C3-V03	1.72
C3-V04	1.45
media	1.42

Tabella 9. Valutazione dell'indice di danno alla Miner sulla base della storia di carico.

CAMPIONE	I_D
C3-V01	2.78
C3-V02	1.05
C3-V03	2.67
C3-V04	2.34
media	2.21

Tabella 10. Valutazione dell'indice di danno alla Miner sulla base delle linee S-N di progetto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gioncu V., Mazzolani F. "Ductility of seismic resistant steel structures", SPON Press, London, 2002.
- [2] Krawinkler, H., Gupta, A. (1997): Deformation and ductility demands in steel moment framed structures. In *Stability and Ductility of Steel Structures, SDSS 97*, (ed.T.Usami), Nogoya, 29-31 July 1997, Vol. I, 57-68.
- [3] Bertero, V.V. (1988): Ductility structural design. State-of-the-art report. In *9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, 2-9 August 1988, Vol. VIII, 673-686.
- [4] Bertero, V.V. (1992): Major issues and future directions in earthquake-resistant design. In *10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, 19-24 July 1992, Balkema, Rotterdam, 6407-6444.
- [5] Bertero, V.V. (1996): State-of-the-art report on design criteria. In *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, 23-28 June 1996, CD-ROM Paper 2005.
- [6] Bertero, V.V. (1997): Codification, design and application. General report. In *Behavior of Steel Structures in Seismic Areas, STESSA 97*, (eds. F.M. Mazzolani, H. Akiyama), Kyoto, 3-8 August 1997, 189-206.
- [7] Bertero, R.D., Bertero, V.V., Teran-Gilmone, A. (1996): Performance-based earthquake-resistant design based on comprehensive design philosophy and energy concepts. In *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, 23-28 June 1996, CD-ROM Paper 611.
- [8] Krawinkler, H. (1995): New trends in seismic design methodology. In *10th European Conference on Earthquake Engineering*, (ed.G.Duma), Vienna, 28 August-2 September 1994, Balkema, Rotterdam, 821-830.
- [9] Popov, E.P. (1994): Development of U.S Codes. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 29, 191-207.
- [10] SAC (1996): Interim guide lines. Advisory No 1: Evaluation, repair, modification and design of welded steel moment frame structures. Report 96-03.
- [11] Calvi, G.M. (1998): Performance-based approaches for seismic assessment of existing structures. In *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, 6-11 September 1998, Balkema, Rotterdam, Invited Lectures, 3-19.
- [12] Fajfar, P. (1998): Trends in seismic design and performance evaluation approaches. In *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, 6-11 September 1998, Balkema, Rotterdam, Invited Lectures, 237-249.
- [13] Tassios, T.P. (1998): The seismic design: State of practice. In *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, 6-11 September 1998, Balkema, Rotterdam, Invited Lectures, 255-267.
- [14] Bertero, R.D., Bertero, V.V. (2000): Application of a comprehensive approach for the performance-based earthquake-resistant design of buildings. In *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, 30 January- 4 February 2000, CD-ROM 0847.
- [15] Priestley, M.J.N. (2000): Performance based seismic design. In *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, 30 January- 4 February 2000, CD-ROM 2831.
- [16] Eurocode 8, EC8 (1994): Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures. Part 1.3. Specific Rules for Various Material and Elements. ENV 1998, 1-3 November.
- [17] Kato, B. (1995): Development and design of seismic-resistant steel structures in Japan. In *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, STESSA 94*, (eds. F.M. Mazzolani and V.Gioncu), Timisoara, 26 June-1 July 1994, E&FN Spon, London, 28-42.
- [18] Ballio G., Castiglioni C.A., "Seismic behaviour of steel sections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 29, 1994, p. 21-54.
- [19] Ballio G., Castiglioni C.A., "A unified approach for the design of steel structures under low/or high cycle fatigue", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 43, 1995, p. 75-101.
- [20] Ballio G., Calado L., Castiglioni C.A., "Low cycle fatigue and fracture of structural steel members and connections", 1997, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 20, n.8, pp. 1129-1146.
- [21] Wöhler, A., *Zeitschrift für Bauwesen*, 10, 1860.
- [22] Eurocode-3, Design of steel structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings, ENV 1993-1-1. 1992 E, CEN, April 1992.
- [23] BS 5400, Steel concrete and composite bridges, Part 10: Code of practice for fatigue. British Standards Institute, London, 1980.
- [24] ECCS, Recommendations for the fatigue design of structures. Committee TC6 'Fatigue', 1st end, 1985.
- [25] International Institute of Welding, IIW, JWG XIII-XV, 1994, "Fatigue Recommendations", Doc. XIII-1539-94 / XV-845-94, September.
- [26] Miner M.A. (1945): Cumulative damage in fatigue. *Trans. ASME, J. Applied Mech.* 67, A159-A164.
- [27] Feldmann, M. (1994): Zur Rotationskapazität von I-Profilen statisch und dynamisch Belastung Träger. Ph Thesis, RWTH Universität, Aachen.
- [28] Plumier A., Agatino M.R., Castellani A., Castiglioni C.A., Chesi C., "Resistance of steel connection to low-cycle fatigue", *Proceedings of the XI ECEE*, Paris, September 1998.
- [29] Calado L., Castiglioni C.A., Bernuzzi C., "Behaviour of steel beam-to-column joints under cyclic reversal loading: an experimental study", *Stability and Ductility of Steel Structures*, Edited by T.Usami & Y.Itoh, Elsevier Science Ltd, 1998, pp. 279-292.
- [30] Bernuzzi C., Calado L., Castiglioni C.A., "Low cycle fatigue of structural steel components: a method for re-analysis of test data and a design approach based on ductility", *Indian Society of Earthquake Technology (ISET), Special Issue on Experimental Techniques*, December 2000, pag. 47-63.
- [31] Castiglioni C.A., Losa P.L., "Local buckling and structural damage in steel members under cyclic loading", *X World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, 1992, pag. 2891-2896.
- [32] Calado L., Castiglioni C.A. "Análise experimental do comportamento ciclico de ligações metálicas viga-pilar" ("Experimental Analysis of Cyclic Behaviour of Steel Beam-to-Column Connections"), *Mecânica Experimental*, n.1, 1996, p. 61-72 (in Portuguese).
- [33] Castellani A., Castiglioni C.A., Chesi C., Plumier A., "A European research program on the cyclic behaviour of welded beam-to-column connections", *Proc. of the Northridge Earthquake Research Conference*, Los Angeles, August 1997, pag. 510-517.
- [34] Castiglioni C.A., Bernuzzi C., Calado L., Agatino M.R., "Experimental study on steel beam-to-column joints under cyclic reversal loading", *Proc. of the Northridge Earthquake Research Conference*, Los Angeles, August 1997, pag. 526-533.
- [35] Ballio G., Zandonini R., "An experimental equipment to test steel structural members and subassemblages subject to cyclic loads". *Ingegneria sismica*, 2 (May-June 1985) 25-44.
- [36] ECCS, T.C.1, T.W.G. 1.3, Recommended testing procedure of assessing the behaviour of structural steel elements under cyclic loads. Publication no. 45, 1986.
- [37] Calado L., Castiglioni C.A., Barbaglia P., Bernuzzi C., "Seismic design criteria based on cumulative damage concepts", *Proceedings of the XI ECCE*, Paris, September, 1998.
- [38] Krawinkler H., Zohrei M. et al. "Recommendations for Experimental Studies on the Seismic Behavior of Steel Components and Materials", *The John Blume Earthquake Research Center*, Rept. 61, 1983
- [39] Gurney T., "Some variable amplitude fatigue tests on fillet welded joints", *Proc. of the International Conference on Fatigue of Welded Constructions*, Brighton, April 1987