



Previsione della vita a fatica di componenti in materiale composito

C. Colombo, L. Vergani

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, via La Masa 34 – 20156 Milano;
chiara.colombo@mecc.polimi.it; laura.vergani@polimi.it*

RIASSUNTO. Scopo del Progetto Europeo “Litebus” è la costruzione di un prototipo di bus in materiale composito, le cui caratteristiche principali siano la leggerezza, legata ad un ridotto consumo di carburante, la resistenza alla corrosione ambientale e ridotti tempi di assemblaggio. Per garantire l’affidabilità del componente da un punto di vista strutturale è necessario, però, caratterizzare meccanicamente il materiale. In questo lavoro è stato considerato un componente pultruso in resina e fibra di vetro, che sarà utilizzato come elemento di rinforzo della cabina del bus. Sono stati tagliati numerosi provini secondo diverse direzioni rispetto alle fibre di rinforzo e sono state condotte prove statiche e a fatica. In particolare da queste ultime prove si è cercato di determinare dei parametri utili a caratterizzare il danneggiamento del materiale: la resistenza residua e il modulo di elasticità longitudinale, misurati tramite prove di fatica interrotte. Da letteratura sono state poi utilizzate alcune leggi di danneggiamento per effettuare delle previsioni della vita a fatica del componente. I valori degli sforzi necessari per effettuare questa previsione sono stati calcolati con un modello numerico ad elementi finiti. I risultati ottenuti da prove di fatica sperimentali eseguiti sull’elemento sono stati utilizzati per la convalida del modello.

ABSTRACT. Aim of the European Project “Litebus” is to build a bus prototype in composite materials, whose main characteristics are lightness related to a reduced fuel consuming, resistance to environment corrosion and reduced assembly times. To ensure the structural reliability of the component, it is however required to mechanically characterize the material. In this work, a pultruded component in resin and glass fibre, which will be used as a reinforce beam to the bus cabin. Numerous specimens were extracted in different directions with respect to the reinforcement fibres, on which static and fatigue tests were performed. In particular, these tests were performed in order to determine useful parameters to characterize the material damaging: the residual strength and the longitudinal elastic modulus, measured from interrupted fatigue tests. Some prevision laws in literature were taken into consideration to predict fatigue life of the component. The values of the stresses, required in the prevision laws, were calculated by a numerical FE model. Obtained results from fatigue tests on the beam were used to validate the model.

PAROLE CHIAVE. Materiale composito; Vita a fatica; Danneggiamento.

INTRODUZIONE

Benché l'utilizzo di materiali compositi plastici fibro-rinforzati si sia ormai largamente diffuso negli ultimi anni a diverse applicazioni strutturali, questi materiali presentano un comportamento a fatica ancora non completamente definito. La progettazione, con tali materiali, di componenti soggetti a carichi variabili, è quindi spesso effettuata applicando alti coefficienti di sicurezza che ne diminuiscono, se non vanificano, le potenzialità. Al fine di affrontare una



fase di progettazione più oculata, occorre quindi uno studio approfondito per caratterizzare il comportamento a fatica di tali materiali. La vita a fatica e le proprietà meccaniche dei materiali compositi dipendono infatti da vari fattori, tra i quali il materiale della matrice e delle fibre utilizzate, la frazione volumica e l'orientazione delle fibre, la porosità, nonché la sollecitazione applicata e l'ampiezza di sforzo, il rapporto di ciclo R [1] e la frequenza f [2].

Per progettare al meglio strutture e componenti che debbano essere soggetti a carichi ciclici e programmare controlli non distruttivi, è quindi importante disporre di modelli teorici per prevedere la vita a fatica. Vari modelli sono stati proposti in letteratura per prevedere l'evoluzione del danneggiamento nei compositi soggetti a cicli di carico ad ampiezza costante. Questi si distinguono in [3]:

1. modelli basati sulla determinazione delle curve σ - N ;
2. modelli che considerano la rigidità e la resistenza residua del componente;
3. modelli basati sul danneggiamento interno durante la vita del componente;
4. modelli energetici.

Tutti questi modelli si basano su prove sperimentali per valutare le grandezze indice del pericolo; i primi modelli si propongono di determinare la curva di σ in funzione del numero di cicli N .

La seconda classe comprende modelli previsionali che descrivono il graduale decadimento delle proprietà di rigidità e di resistenza residua durante la fatica; sono quindi riferiti alle proprietà macroscopiche del materiale. Di norma, come parametro di danneggiamento D viene usato il rapporto tra il modulo elastico E durante la vita a fatica e il valore E_0 determinato all'inizio della prova stessa:

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

I modelli a resistenza residua si dividono in due tipologie, "sudden death" e "wearout". I modelli "sudden death" interpretano il comportamento a fatica di materiali per i quali la resistenza residua rimane inizialmente costante, per poi decrescere drasticamente quando viene raggiunto il numero di cicli corrispondente al collasso del provino o del componente. Questi modelli sono specialmente utilizzati per materiali compositi unidirezionali ad elevata resistenza.

Quando invece i livelli di carico sono inferiori e la resistenza residua decresce in modo più graduale, i modelli "wearout" risultano più adeguati.

La terza classe di modelli, spesso indicati come "meccanici", descrivono il deterioramento del materiale composito correlandolo direttamente al danneggiamento specifico interno, come ad esempio cricche che propagano trasversalmente nella matrice e dimensione dell'area di delaminazione.

Infine, l'ultima classe di modelli si basa su criteri energetici, i quali considerano sia lo sforzo che la deformazione presente nel materiale. Tali criteri risultano quindi indipendenti dalle modalità di applicazione del carico e dalle geometrie considerate.

Oggetto di questo lavoro è un longherone angolare di rinforzo della cabina di un bus, posizionato parallelamente alla direzione di marcia del veicolo. L'elemento funge da collegamento tra il pavimento e i piloni montanti che reggono la cabina del bus. La trave è costituita di materiale composito in fibra di vetro E-glass e matrice in resina epossidica termoindurente, ottenuta attraverso la tecnica della pultrusione.

La sezione di questo elemento è abbastanza complessa e per effettuare una verifica a fatica è necessario utilizzare dei criteri di previsione. In una fase preliminare della progettazione del bus sono state eseguite delle prove sperimentali su una sezione con una forma più semplice, indicata in Fig. 1.a. Tale sezione è stata ottenuta con lo stesso materiale e con la stessa tecnica con i quali è costruita la sezione definitiva da utilizzare nella costruzione del bus, la cui geometria è mostrata in Fig. 1.b.

Su questa sezione trapezoidale si sono condotte delle prove sperimentali statiche e dinamiche per provvedere ad un'adeguata caratterizzazione meccanica del materiale in esame. Dei provini sono stati estratti direttamente dalla sezione per identificare il comportamento in direzione longitudinale, con contributo delle fibre, e trasversale, legato in pratica alla sola matrice. Le zone di estrazione dei provini sono indicate in Fig. 1.a: per quanto riguarda i provini trasversali, tali zone sono infatti le più lunghe della sezione.

Scopo del lavoro è la caratterizzazione meccanica, statica ma soprattutto a fatica, per provvedere ad una fase di progettazione della sezione finale il più adeguata possibile e per sfruttare al meglio le caratteristiche del materiale pultruso. Alcune leggi di previsione della vita a fatica del materiale sono state inoltre prese in considerazione, ricavando i parametri richiesti nei modelli dalle prove sperimentali sui provini, per poi verificare quanto ottenuto con una prova di fatica sul componente.

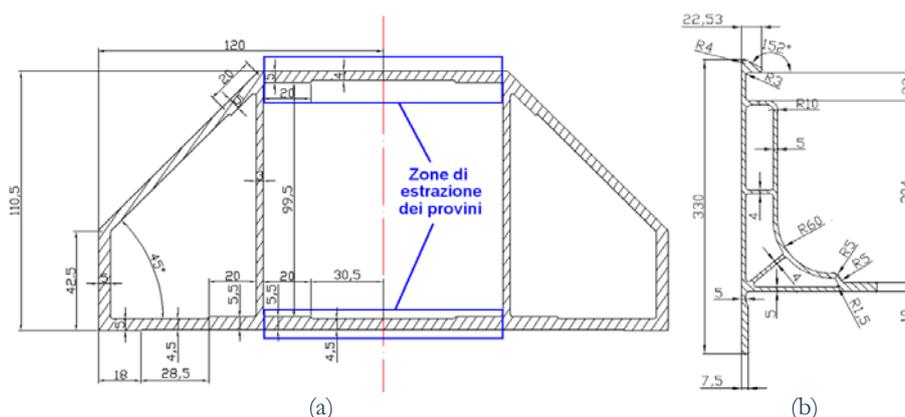


Figura 1: La sezione testata (a.) e la versione definitiva da utilizzare per il bus (b.); dimensioni in mm.

PROVE SPERIMENTALI DI CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE

La sezione in esame ha geometria trapezoidale con due paratie di supporto, come indicato in Fig.1.a. Lo spessore delle paratie della sezione non è uniforme, ma varia dai 3 ai 5,5 mm. I provini utilizzati per le prove sperimentali sono stati estratti direttamente dal componente, mentre dal rimanente materiale si sono ottenuti i talloni da applicare agli afferraggi dei provini. Il provini estratti hanno forma rettangolare: i longitudinali presentano spessore uniforme, larghezza 25 mm e lunghezza 150 mm; i trasversali hanno spessore variabile agli afferraggi, larghezza 30 mm e lunghezza 100 mm. Le dimensioni dei provini e dei talloni sono ricavati dalla norma ASTM D3039/D3039M-08; i provini trasversali non soddisfano tuttavia i requisiti, perché la zona utile di estrazione dal componente non risulta sufficientemente grande nella dimensione della lunghezza del provino. Un provino per ogni tipo è mostrato in Fig. 2. In Tab. 1 è inoltre mostrato un prospetto con il numero dei provini utilizzati nelle prove effettuate per caratterizzare il materiale nelle due direzioni. Nei successivi sottoparagrafi sono mostrati e discussi i risultati di tali prove.

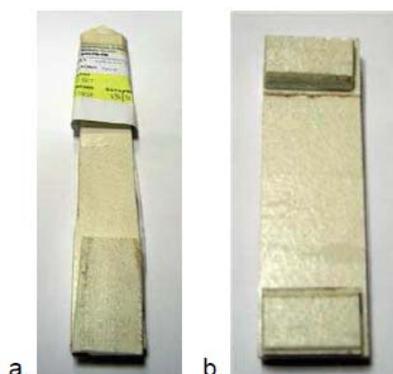


Figura 2: Provini longitudinali (a.) e trasversali (b.).

Tipo di prova	Longitudinali	Trasversali
Statica	10	7
Fatica, determinazione limite	8	8
Fatica, tratto a termine	10	12
Fatica, interrotte	7	5
Totale	31	29

Tabella 1: Prospetto del numero di provini testati per ogni prova.

Prove statiche

Si sono inizialmente condotte prove di caratterizzazione statica del materiale pultruso sulla macchina di trazione MTS Alliance RF/150, montando l'estensometro MTS 634.12F-54 con base 25 mm, ed imponendo una velocità di spostamento della traversa di 1 mm/min.

10 provini sono stati utilizzati per la direzione longitudinale indicata con pedice 1, ottenendo modulo elastico $E_1 = 17642 \pm 964$ MPa e $R_{m,1} = 254.1 \pm 13.4$ MPa. Da 7 provini trasversali si sono invece ottenuti $E_2 = 7492 \pm 711$ MPa e $R_{m,2} = 47.1 \pm 14.6$ MPa. Come indicato dagli intervalli di confidenza (calcolati con la statistica *t-student*, per una probabilità del 95%), i provini trasversali hanno mostrato una dispersione dei valori molto maggiore rispetto a quelli longitudinali, proprio perché le caratteristiche meccaniche sono affidate alla sola matrice, che non sempre è risultata uniforme nella sezione. In Fig. 3 sono mostrati alcuni provini rotti durante le prove. In parallelo alla prove di trazione sono poi stati ricavati i valori del modulo di Poisson nelle due direzioni, da due ulteriori provini, ai quali sono stati applicati degli estensimetri. I valori ricavati sono: $\nu_{12} = 0,31$ e $\nu_{21} = 0,13$.

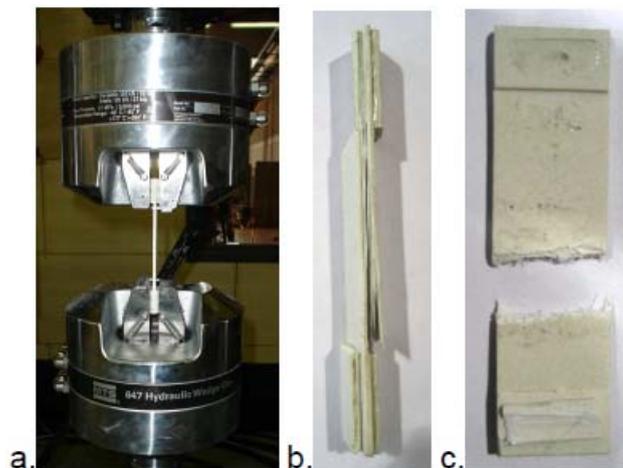


Figura 3: a) Prove statiche sui provini: modalità di cedimento; b) provini longitudinali; c) provini trasversali.

Prove dinamiche

Per caratterizzare il composito dal punto di vista dinamico, si sono condotte delle prove per determinare il limite a fatica σ_{lim} ; si è fissato in 10^7 cicli il termine delle prove per considerare run-out il test. Le prove sono state condotte sulla macchina di prova MTS 810 a frequenza 20 Hz, con $R=0,1$. Sono stati testati 8 provini per entrambe le direzioni, ottenendo con il metodo di Dixon i seguenti valori del limite a fatica rispettivamente nelle due direzioni:

- $\sigma_{alt,lim,1} = 30,8$ MPa;
- $\sigma_{alt,lim,2} = 6,3$ MPa;

Dalle prove è risultato evidente l'ampio divario tra le due direzioni in termini di resistenza a fatica.

Per completare la caratterizzazione, si sono effettuate delle prove di fatica per tracciare il grafico σ -N di Wöhler. 10 provini sono stati utilizzati per la direzione longitudinale e 12 per quella trasversale, per tracciare il tratto a termine della curva: i risultati delle prove su tali provini sono mostrati in Tab. 2, dove N_f indica il numero di cicli ai quali i provini si sono rotti. Il numero maggiore di provini utilizzati per la direzione trasversale è imputabile all'alta variabilità nei risultati. I risultati ottenuti sono mostrati in seguito, in Fig. 11, in quanto il diagramma di Wöhler corrisponde al primo dei criteri utilizzati per stimare la vita a fatica del materiale. Sarà quindi comparato con le altre leggi di previsione della vita a fatica proposte.

LEGGI DI PREVISIONE DELLA VITA A FATICA

Per considerare il cedimento legato al degrado delle proprietà meccaniche della matrice, si sono utilizzate delle leggi di previsione della vita a fatica presenti in letteratura, ed applicate quindi ai provini riportati in Tab. 2. Dei vari criteri presenti in letteratura, due sono risultati applicabili ai risultati delle prove di fatica: il primo modello applicato è stato proposto da [4] e basato sulle equazioni proposte da [5]. Esso descrive il danneggiamento del materiale composito fibro-rinforzato soggetto a carico ciclico costante in modulo e frequenza, in termini di resistenza residua.



Provino	σ_{\max} [MPa]	N_f [cicli]
L1	140	3964
L2	140	5169
L3	120	21600
L4	100	85755
L5	100	234933
L6	90	359161
L7	80	745932
L8	80	1935957
L9	70	5265178
L10	70	7828621
T1	26	69
T2	26	8899
T3	20	32
T4	20	2811
T5	20	5269
T6	20	26351
T7	18	16351
T8	18	42113
T9	18	177384
T10	15	2981
T11	15	8242
T12	10	9994561

Tabella 2: Prove di fatica sui provini longitudinali e trasversali ($R=0,1$).

L'equazione proposta nel criterio è:

$$\sigma_u - \sigma_{\max} = \alpha_1 \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_u} \right)^{0,6-\psi|\sin\theta|} \left[\sigma_{\max} (1-\psi)^{1,6-\psi|\sin\theta|} \right] \frac{1}{f^{\beta_1}} (N^{\beta_1-1}) \quad (2)$$

dove σ_u è R_m media dalle prove statiche e nella direzione 1 o 2 a secondo che si considerino i provini longitudinali o trasversali, σ_{\max} è la massima sollecitazione applicata durante il ciclo, ψ coincide con R per le prove di fatica assiale, f è la frequenza e θ è l'angolo tra le fibre e il carico applicato (0° per i provini longitudinali e 90° per i provini trasversali). Dall'Eq. 2, e definendo il parametro di danneggiamento D come:

$$D = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{\max}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{\max}} \right)^{0,6-\psi|\sin\theta|} \frac{1}{(1-\psi)^{1,6-\psi|\sin\theta|}} f^{\beta_1} \quad (3)$$

si può ottenere la legge di danneggiamento:

$$D / \alpha_1 = (N^{\beta_1} - 1) \quad (4)$$

I parametri α_1 e β_1 del modello sono stati stimati tramite regressione e verifica statistica dei residui dai dati sperimentali delle prove di fatica assiale nelle due direzioni. In questo modo si può stimare il numero di cicli della vita a fatica come:

$$N = \beta_1 \sqrt{\frac{D}{\alpha_1}} + 1 \quad (5)$$

Il secondo criterio applicabile ai dati sperimentali ottenuti dalle prove è un criterio energetico proposto da [6]. In questo criterio, l'energia elastica W , calcolabile come:



$$W = \frac{1}{2}(\sigma^{\max} \varepsilon^{\max} - \sigma^{\min} \varepsilon^{\min}) = \frac{1}{2}(1-R^2)\sigma^{\max} \varepsilon^{\max} = \frac{1}{2}(1-R^2)\frac{(\sigma^{\max})^2}{E} \quad (6)$$

viene considerata il parametro di danneggiamento.

$$\text{Log}W = \alpha_2 \text{Log}(N_f) + \beta_2 \quad (7)$$

Stimando con una regressione statistica i parametri α_2 e β_2 del modello dalle prove sperimentali, similmente al caso precedente, e dalle Eq. 6 e 7, si può trovare una stima della vita a fatica:

$$N = \sqrt[\alpha_2]{\frac{(1-R^2) \cdot (\sigma^{\max})^2 10^{-\beta_2}}{2 \cdot E}} \quad (8)$$

I due criteri descritti sono risultati applicabili ai dati delle prove di fatica effettuate sui provini riportati in Tab. 2. I parametri stimati con una regressione dai dati sperimentali sono riportati in Tab. 3.

Per considerare tuttavia un criterio di previsione della vita a fatica in cui si indichi il danneggiamento interno del provino, si è fatto riferimento anche a [7]. Tale criterio considera il numero di cricche presenti e la loro propagazione nel materiale. Tuttavia, questo criterio, come ogni altro che consideri il danneggiamento interno, non è risultato applicabile al materiale in questione.

Si è infatti analizzata la sezione dei provini run-out e di alcuni delle prove interrotte al microscopio elettronico a scansione previa doratura superficiale, per valutare la presenza di cricche propagate durante le prove. Dal confronto però con immagini di provini non precedentemente sottoposti a carichi di fatica, è apparso evidente come il materiale presenti difetti nella sezione paragonabili in entrambi i casi analizzati. Un confronto di questo tipo è mostrato in Fig. 4. Da questa figura, inoltre, si può osservare la disposizione delle fibre nella matrice, e come le fibre, corrispondenti alla zona più chiara dell'immagine, siano concentrate nella zona centrale dello spessore dei provini.

	α_1	β_1	α_2	β_2
Provini longitudinali	0,638	0,182	-0,191	0,428
Provini trasversali	3,767	0,076	-0,106	-1,234

Tabella 3: Riassunto dei parametri stimati dalle prove sperimentali per i criteri di previsione della vita a fatica.

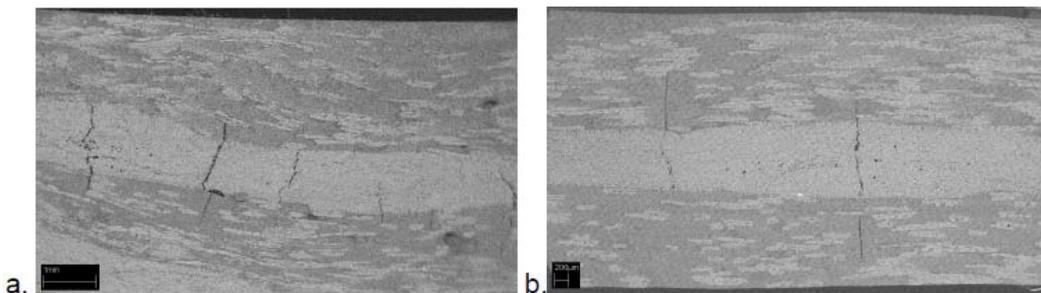


Figura 4: Confronto fra provini non sottoposti a carico di fatica (a.) e run-out (b.): immagini da microscopio elettronico a scansione.

DECADIMENTO DEL MODULO ELASTICO

Per poter valutare il danneggiamento legato alla fatica, in parallelo ai criteri proposti, si è inoltre pensato di valutare il decadimento del modulo elastico, quindi di valutare la rigidezza residua.

A tal proposito, due serie di 7 provini longitudinali e 5 trasversali sono state testate con prove di fatica interrotte, a $R=0.1$ e frequenza 10 Hz. Per stimare i carichi da applicare e il numero di cicli ai quali interrompere le prove, si è utilizzato il diagramma di Wöhler. L'andamento del modulo elastico in funzione del numero di cicli è stato monitorato da un estensometro applicato nel tratto utile dei provini. Le prove sono quindi state interrotte al numero di cicli indicati in Tab.



4: al termine della prova di fatica, i provini sono stati rotti con una prova di trazione finale, per valutare il modulo elastico E_r e la resistenza $R_{m,r}$ residui. In Tab. 4 sono riassunte le prove condotte sui provini longitudinali. E_r , che dovrebbe corrispondere a E_f a meno di errori di misura, risulta paragonabile e in quasi in tutti i casi leggermente superiore a E_f .

Come si può inoltre osservare dai dati riportati in tabella, alcuni dei provini hanno effettivamente resistito al carico imposto, ma altri si sono rotti prima della vita utile stimata con Wöhler.

Come si può osservare dalla Tab. 4 e dal grafico in Fig. 5, i provini che presentano una marcata riduzione del modulo elastico già nei primi cicli, hanno ceduto durante le prove senza raggiungere il numero di cicli previsti dal diagramma di Wöhler. Un unico provino, denominato L13, ha mostrato un decadimento del modulo elastico dell'11% rispetto il valore iniziale, pur arrivando ai 200.000 cicli prefissati. In questo caso, però, la prova di trazione finale ha mostrato valori di E_r e $R_{m,r}$ residui molto inferiori alla media sia delle prove statiche che degli altri provini di Tab. 4.

Dal grafico proposto in Fig. 5, inoltre, si può osservare che, in termini di variazione del modulo elastico rispetto ad E_0 durante le prove di fatica, ad un decadimento del inferiore al 5% corrisponde una bassa variazione delle proprietà meccaniche, ma una variazione di E/E_0 maggiore del 5% è sintomo di un degrado del materiale che porta rapidamente alla rottura del provino.

Si è cercato di ottenere gli stessi grafici E-N anche per i provini trasversali, ma un'alta variabilità nelle risposte non ha permesso di ottenere risultati analoghi a quelli dei provini longitudinali. Pur applicando gli stessi valori del carico durante le prove di fatica, infatti, i valori di E misurati risultavano poco riproducibili.

Provino	σ_{max} [MPa]	N_f previsti [Cicli]	Esito [Cicli]	E_0 [MPa]	E_f [MPa]	Riduzione E_0-E_f [%]	E_r [MPa]	$R_{m,r}$ [MPa]
L11	70	4.335.000	200.000 (I)	19.761	18.930	4,39	17.937	219
L12	90	542.000	200.000 (I)	19.210	18.742	2,50	18.243	252
L13	90	542.000	200.000 (I)	14.208	12.810	10,91	13.338	174
L14	90	542.000	70.658 (R)	18.319	16.985	7,86	-	-
L15	90	542.000	359.161 (R)	18.455	16.341	12,94	-	-
L16	90	542.000	300.000 (I)	16.564	16.168	2,45	15.965	226
L17	70	4.335.000	400.000 (I)	20.194	19.250	4,91	18.741	252

Tabella 4: Prove interrotte e decadimento del modulo elastico per i provini longitudinali.

Esito: I = interrotto, R = rotto durante la prova.

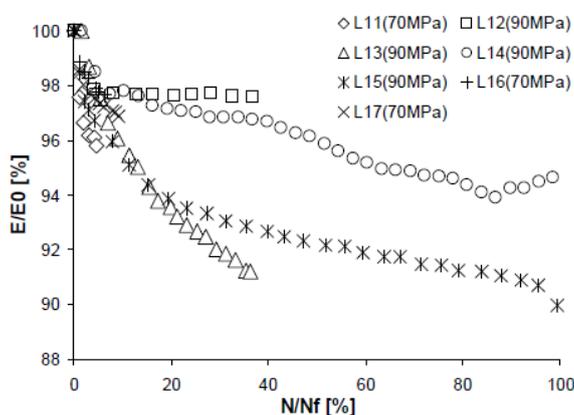


Figura 5: Prove di fatica interrotte per provini longitudinali (N_f delle prove interrotte è stimato dal diagramma di Wöhler).

PROVA DI FATICA SUL COMPONENTE

Al fine di convalidare le leggi di previsione ottenute con una verifica sul componente, si è effettuata una prova di fatica sulla sezione, incastrandola ad una estremità e caricandola ciclicamente dall'altra, come mostrato in Fig. 6.a. La lunghezza della sezione è di 150 mm. Il carico, applicato da un attuatore idraulico, è stato fatto variare da 2 a 70 N, con frequenza 1 Hz. La prova è stata interrotta dopo 1.115.482 cicli, evidenziando la presenza di una cricca superficiale all'incastro come mostrato in Fig. 6.b.

Durante la prova si sono monitorati gli spostamenti del pistone e si è potuto osservare come questi abbiano avuto un

incremento nel tempo, più marcato nella fase iniziale della prova, come mostrato in Fig. 7. Si è verificato, sia durante che al termine della prova, che il componente fosse ben vincolato all'incastro: lo spostamento evidenziato risulta quindi imputabile al progressivo danneggiamento della sezione.

Al termine della prova, l'angolo corrispondente alla zona di propagazione della cricca è stato tagliato ed osservato al SEM. Alcune delle immagini sono mostrate in Fig. 8. In particolare, in Fig. 8.a si può osservare la disposizione delle fibre (più chiare) nella matrice in corrispondenza dell'angolo, e come la cricca che si vede in superficie sia molto più piccola di quelle che si sono propagate all'interno della matrice, nell'angolo interno della sezione.

MODELLO NUMERICO

In parallelo alle prove sperimentali sui provini e sul componente, si è sviluppato un modello numerico con la tecnica degli elementi finiti per visualizzare l'andamento delle sollecitazioni e delle deformazioni nella sezione. Le caratteristiche meccaniche del materiale sono quelle ottenute dalle prove sperimentali di trazione. L'analisi che è stata eseguita riproduce come carichi e vincoli quelli della prova sperimentale che è stata condotta sulla sezione e descritta nel paragrafo *Prove di fatica sul componente*.

Per convalidare il modello FE sono stati confrontati i valori numerici dello spostamento con quelli sperimentali misurati dal pistone idraulico prima della prova. I valori di confronto sono riportati in Fig. 9.a. In tale grafico sono anche riportati i valori di spostamento del pistone al termine della prova: si può osservare che lo spostamento risulta globalmente maggiore, pur mantenendo la stessa pendenza, come risulta dai grafici riportati in Fig. 7 durante la prova di fatica.

La convalida del modello FE ha previsto un confronto anche in termini di deformazioni, poiché nella zona dell'incastro sono stati posizionati 4 estensimetri esternamente, su entrambi i lati del componente. Tali estensimetri, perpendicolari fra loro e due dei quali visibili in Fig. 6.b, hanno misurato le deformazioni longitudinali sulla superficie del componente. Le misure sono state effettuate all'inizio e al termine della prova di fatica. In Fig. 9.b sono mostrati alcuni confronti delle deformazioni per la convalida del modello FE, mentre in Fig. 10.a,b si possono osservare gli spostamenti della sezione e le deformazioni nella direzione longitudinali superficiali nel modello numerico.

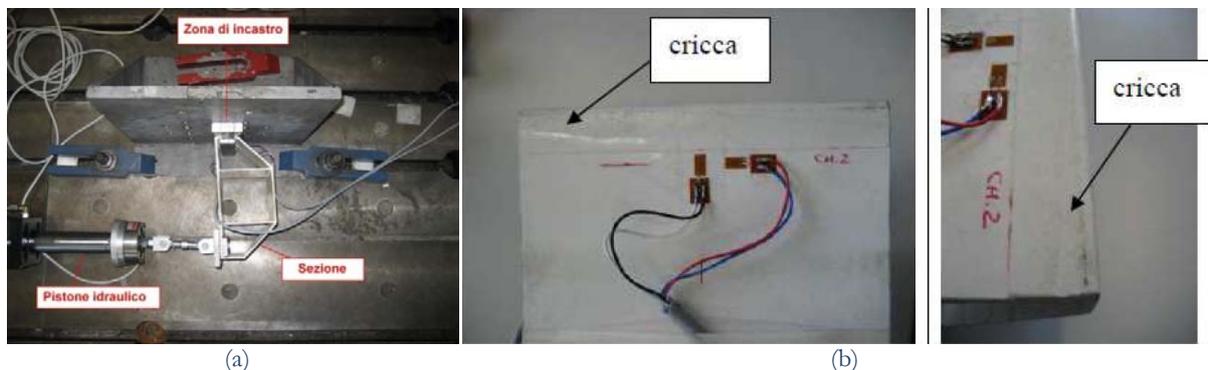


Figura 6: Attrezzatura per le prove sperimentali di fatica sul componente (a) e cricca superficiale propagatasi durante la prova (b).

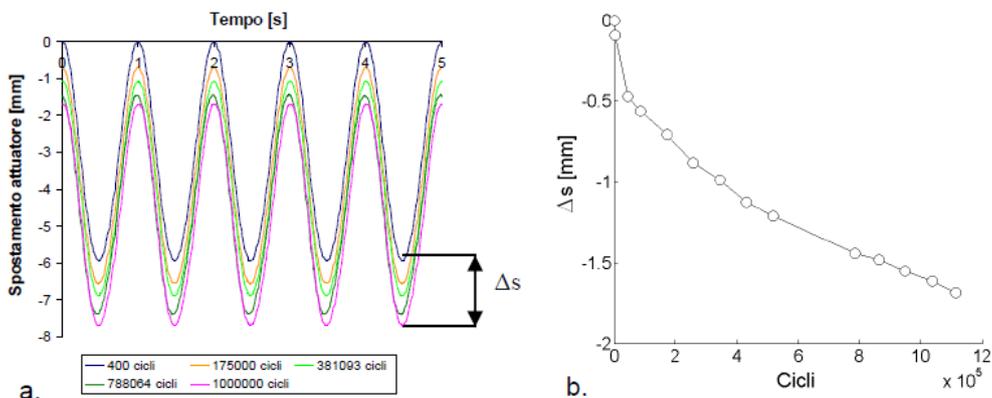


Figura 7: Andamento degli spostamenti del pistone nel tempo per diversi cicli (a.) e loro variazione durante la prova di fatica (b.).

CONVALIDA DELLE LEGGI DI PREVISIONE E DISCUSSIONE

Dalle Eq. 5 e 8 si è visto come sia possibile ricavare il valore del numero di cicli previsti per la prova di fatica sul materiale pultruso dai due criteri proposti. E' quindi possibile proporre un grafico σ_{max} -N con i dati interpolati dai provini. Sul medesimo grafico, mostrata in Fig. 11, è inoltre possibile posizionare la curva di Wöhler, poiché anch'essa utile per valutare la vita a fatica del componente. In Fig. 11 sono riassunti le previsioni di vita a fatica dei criteri utilizzati nell'interpolazione dei dati sperimentali, nelle due direzioni.

Nel grafico relativo ai provini della direzione trasversale (Fig. 11.b), si è inoltre aggiunto il valore relativo alla prova sperimentale sulla sezione, descritta nel Par. 5. Il valore del numero di cicli è quello alla quale la prova è stata interrotta, mentre il valore di σ_{max} è stato ricavato dal modello FE nella direzione della matrice, pari a 12,0 MPa. Incrociando questi due dati, per quanto riguarda la prova sul componente, è quindi possibile identificare un valore nel piano σ_{max} -N della direzione trasversale. Questo valore, pur se non sufficiente per la convalida sperimentale delle leggi di previsione, permette di effettuare considerazioni sulla vita a fatica del componente.

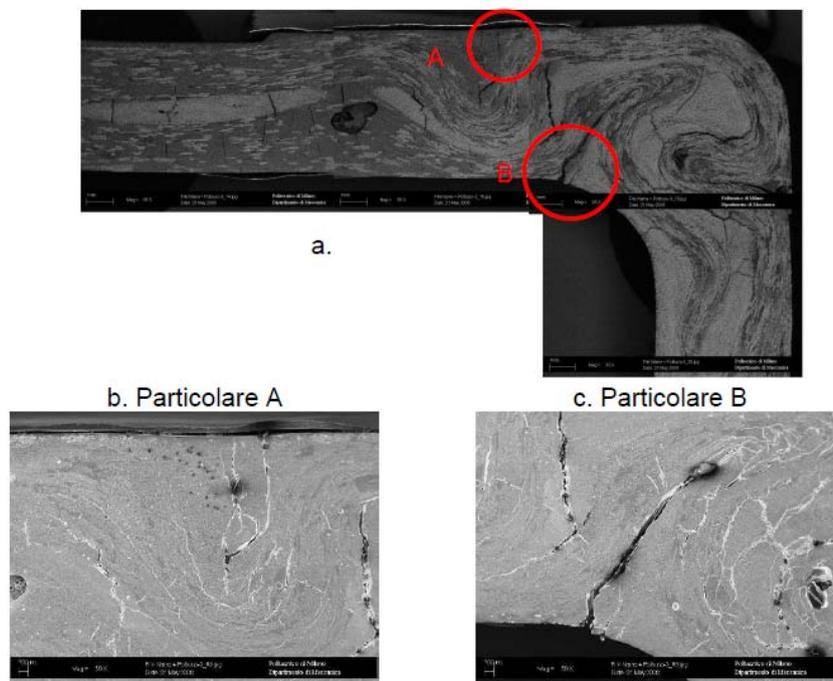


Figura 8: Particolari al microscopio elettronico a scansione della zona di propagazione della cricca nella sezione, al termine della prova di fatica.

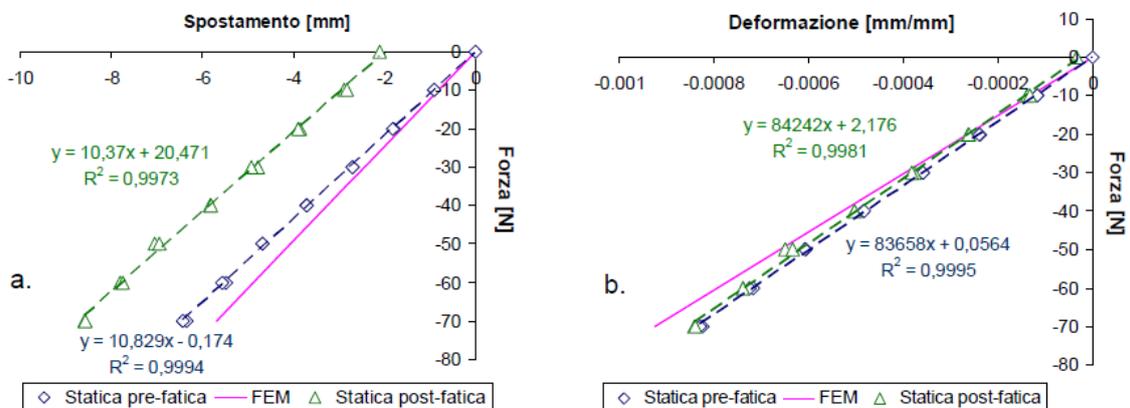


Figura 9: Convalida del modello FEM: confronto spostamenti (a) e deformazioni in direzione della matrice sul lato obliquo (b).

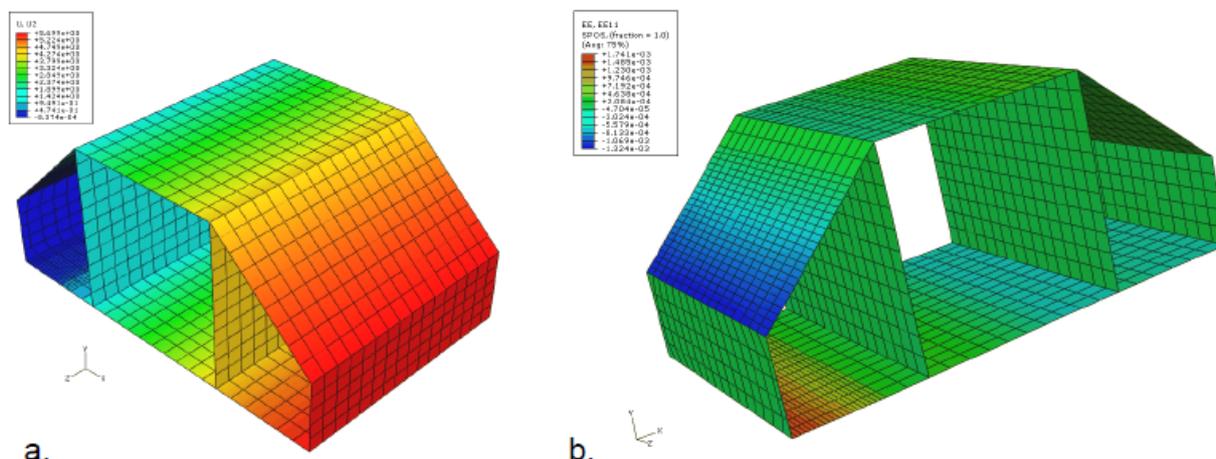


Figura 10: Spostamenti (a.) e deformazioni nella direzione della matrice (b.) nel modello numerico.

Dai dati riportati in Fig. 11 si può osservare come:

- i provini longitudinali presentano una variabilità inferiore a quella dei provini trasversali, in coerenza con quanto rivelato dalle prove statiche;
- i provini longitudinali presentano una pendenza della curva interpolante nel piano σ_{max} -N maggiore che quella dei provini trasversali. In questo secondo caso, infatti, la curva si mantiene pressoché piatta, a parte un brusco decadimento iniziale;
- i due criteri di previsione della vita a fatica concordano con quanto predetto dalla teoria di Wöhler. Le tre curve proposte sono praticamente sovrapposte nel tratto corrispondente ai dati delle prove sperimentali, mentre si differenziano a basso numero di cicli per la statistica legata alla regressione utilizzata. Per il criterio di [4], infatti, viene interpolata anche il valore della resistenza statica, mentre per gli altri due criteri non viene considerata;
- il punto che identifica la prova sperimentale sulla sezione si posiziona con buona approssimazione in prossimità delle curve di previsione della vita a fatica predette dai modelli.

Dai dati presentati è quindi possibile affermare che le leggi di previsione della vita a fatica ricavate dai provini descrivono bene il comportamento del materiale composito della prova sulla sezione a geometria più complessa.

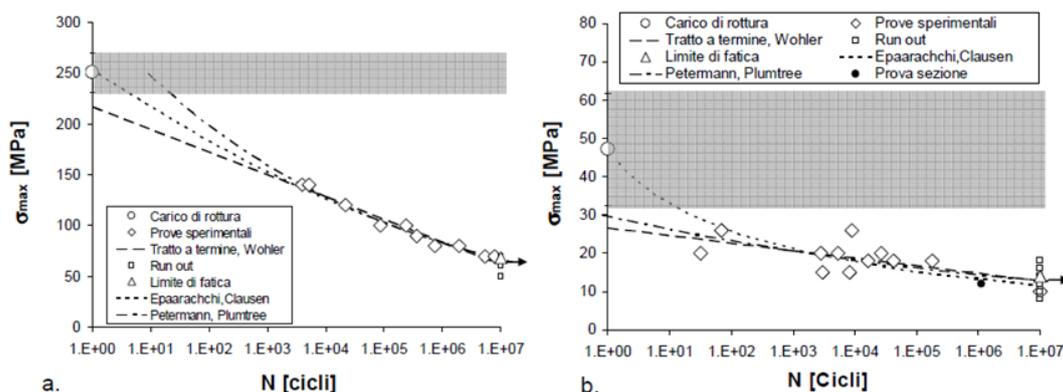


Figura 11: Modelli di previsione della vita a fatica nella direzioni longitudinale (a.) e trasversale (b.); scala semi-logaritmica.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Una serie di prove sperimentali è stata proposta in questo lavoro per un componente di pre-design in materiale pultruso a fibra di vetro e matrice in resina epossidica. In particolare, si sono proposte:

- prove statiche e di fatica sui provini ricavati dal materiale, nella direzione delle fibre e



perpendicolarmente;

- una valutazione del danneggiamento da prove di fatica interrotte in termini di modulo elastico e resistenza residua;
- leggi di previsione della vita a fatica del materiale ricavate dai provini;
- una validazione di tali leggi con una prova di fatica sul componente, in parallelo ad un modello numerico.

Tutti i dati ottenuti dalla sperimentazione descritta in questo lavoro sono un valido mezzo per lo sviluppo futuro e l'ottimizzazione della sezione nella sua forma definitiva per progetto "Litebus".

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Elyn, H. El-Kadi, *Compos. Struct.*, 15 (1990) 61.
- [2] J.F. Mandell, U. Maier, *ASTM STP*, 813 (1982) 55.
- [3] J. Degrieck, W. Van Parpegem, *Appl. Mech. Reviews*, 54 (2001) 279
- [4] J.A. Epaarachchi, P.D. Clausen, *Composites - Part A*, 34 (2003) 313.
- [5] G. Caprino, A. D'Amore, *Compos. Sci. Technol.*, 58 (1998) 957.
- [6] J. Petermann, A. Plumtree, *Composites - Part A*, 32 (2001) 107.
- [7] A. Plumtree, G. Shen, *Polymers & Polymer Composites*, 2 (1994) 83.