

PROGETTO E MESSA A PUNTO DI UNA MACCHINA PROVA MATERIALI A FATICA A FLESSIONE PIANA PER PROVINI IN COMPOSITO.

G. Marannano^a, A. Pasta^b, G. Virzi Mariotti^c

Dipartimento di Meccanica, Università degli Studi di Palermo, Viale Delle Scienze – 90128 Palermo Italy.

^a e-mail : marannano@dima.unipa.it

^b e-mail: pasta@dima.unipa.it

^c e-mail: virzi@dima.unipa.it

Parole chiave: Fatigue Test Machine; compositi quasi isotropi; compositi rinforzati;

Sommario

Nel lavoro è descritta la progettazione, l'ottimizzazione e la messa a punto di un'attrezzatura FTM per prove di flessione piana su campioni in materiale composito. È descritta inoltre la progettazione, l'ottimizzazione e la messa a punto delle celle di carico impiegate nelle prove; il modello solido è stato realizzato in forma parametrica in Solid Edge, quindi si è eseguita l'ottimizzazione per specifici carichi di lavoro (50 e 200 N) in ambiente Ansys, passando alla loro realizzazione e al posizionamento dei quattro estensimetri elettrici a resistenza. Dalle differenti prove eseguite si è notato come, a differenza del composito quasi isotropo, il glare, dopo un danneggiamento iniziale più marcato, riesca a mantenere per molto più tempo un determinato valore di carico, sempre maggiore di quello sopportabile dal composito.

Abstract

This paper describes the design, the optimization and the set of Fatigue Test Machine (FTM) for bending test on specimens in composite material. Besides describes the optimization and the set of a load cell to execute the tests. The solid model is implemented in Solid Edge in parametric form, then the optimization for specific work load is executed in Ansys room. The best configurations for two load values (50 and 200 N) is obtained and the construction is executed with the positioning of four strain gauges. The several test executed show that the glare, after an initial more marked damage, maintains for more long time a fixed load value, always greater than one reached by quasi isotropic composite.

1. Introduzione

I materiali polimerici e compositi sono sempre più coinvolti nell'industria come parti strutturali; sono pertanto sempre più richieste informazioni specifiche sulle proprietà meccaniche "a lungo termine" (creep, rilassamento, fatica).

In questo lavoro si presenta una macchina prova materiali FTM (Fatigue Test Machine) per lo studio del comportamento dei compositi sottoposti a fatica in flessione piana; le prove di fatica possono essere eseguite sotto diverse condizioni, quali frequenza della sollecitazione, modulo della stessa, ecc. [1]. Sono altresì presentati nonché i risultati dei relativi test di fatica.

Valutate le proprietà dei compositi in condizioni statiche, si sono ottenute le curve di resistenza a fatica per le diverse condizioni di carico analizzate. Le curve di Wöhler sono state ottenute utilizzando il criterio N_{10} , corrispondente alla perdita del 10% della rigidità iniziale. Si è adottato il modello della resistenza residua quale strumento per descrivere il comportamento a fatica dei compositi.

Gli studi di fatica necessitano solitamente tempi piuttosto lunghi di sollecitazioni cicliche per ottenere un danneggiamento apprezzabile. Inoltre, le prove conducono a risultati più o meno disomogenei, in modo tale da richiedere la ripetizione delle prove in modo da consentire la stima del limite di durata con metodi affidabilistici. Tutto ciò è economicamente incompatibile con l'uso di macchine idrauliche particolarmente costose, diventa, quindi, particolarmente importante sviluppare un approccio specifico alle prove di fatica basato sull'impiego di specifiche macchine prove materiali FTM. Alcune caratteristiche ideali di tali macchine sono [1]: l'adattabilità alle varie geometrie e rigidità dei provini, la facilità di eseguire diverse condizioni di sollecitazioni (carico alternato o pulsatorio), la possibilità di sviluppare studi di fatica mediante la registrazione dei dati ottenuti dai diversi campioni di differenti materiali analizzati, a cui può essere applicato qualunque criterio di previsione della vita a fatica, la possibilità di eseguire prove controllando l'entità della deformazione, il basso costo della strumentazione per poter eseguire diverse prove contemporaneamente, l'adattabilità della frequenza di carico.

2. La macchina prova materiali

La macchina prova materiali per sollecitazioni dinamiche di flessione piana alternata, è costituita da tre moduli:

- (1) il primo modulo (o modulo di comando) genera il movimento sinusoidale;
- (2) il secondo modulo serve per modificare le condizioni di carico;
- (3) il terzo modulo (o modulo acquisizione dati) misura la sollecitazione (forza) e analizza i dati, tramite il computer, per calcolare le tensioni e plottarle in funzione del tempo o dei cicli.

2.1 Primo modulo (o modulo di comando).

La fig. 1 mostra la struttura realizzata ed utilizzata per eseguire le prove di fatica a flessione. La forza è trasmessa da una cinghia (con gola z) dall'albero motore ad un secondo albero, con rapporto di trasmissione unitario. Tale valore è stato verificato tramite l'impiego di un tachimetro ottico monitorando il numero di giri dell'albero motore e la corrispondente velocità dell'albero di trasmissione.

La trasmissione della potenza mediante la cinghia assicura l'isolamento elettrico del provino dal motore, con particolare vantaggio se i provini sono metallici o in carbonio. Un sistema a camma eccentrico permette di trasformare in maniera continua il movimento circolare, ottenuto per mezzo di un motore elettrico, in un moto puramente simmetrico ed oscillatorio dell'albero. Un inverter nel motore permette di regolare la frequenza del carico da 0.04 a 23 Hz.

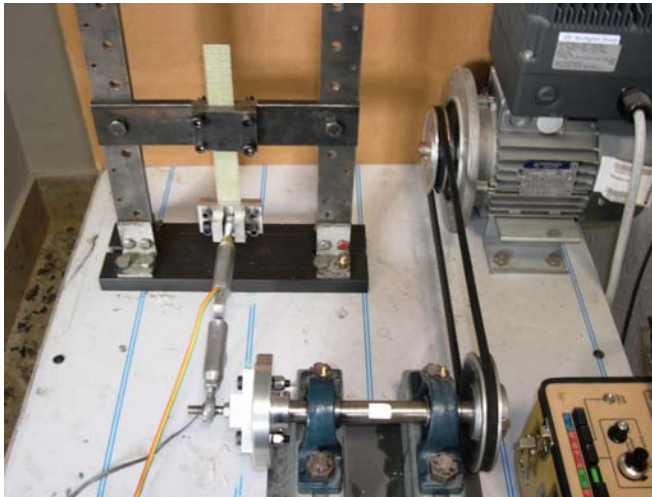


Fig. 1: *Immagine della macchina prova materiali.*

La fig. 2 mostra una rappresentazione schematica del macchinario [4]. L'ampiezza della sollecitazione è determinata dalla distanza del punto P (mobile) dal punto Q (fisso). A seconda dell'eccentricità in gioco e della lunghezza della biella (variabile) è possibile modificare la natura della sollecitazione subita dal provino, passando da una sollecitazione di natura alternata ad una di natura pulsatoria e viceversa. Fissata l'ampiezza della deformazione subita dal provino, si monitorizza, ad intervalli di tempo regolari, l'andamento del carico in funzione dei cicli (o del tempo).

2.2 Secondo modulo.

Il secondo modulo (fig. 3) è costituito dalla biella e dalla sua capacità di estendersi permettendo così di regolare l'ampiezza dello spostamento imposto e il tipo di sollecitazione (pulsatoria o alternata). In tal modo la deflessione del provino può variare da zero fino ad un valore massimo indipendentemente dalla natura del carico.

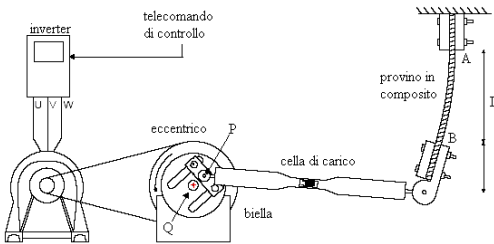


Fig. 2: *Rappresentazione schematica della macchina prova materiali.*

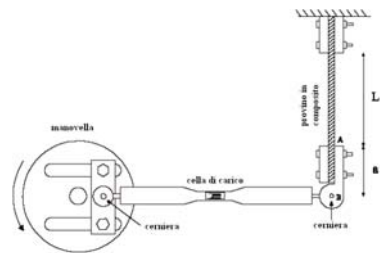


Fig. 3: *Rappresentazione schematica del secondo modulo [5].*

2.3 Terzo modulo (o modulo acquisizione dati).

Durante le prove si monitorizzano i valori di tensione indotti, tramite un apposito sistema di acquisizione. Questo sistema è costituito da un sensore di deformazione (cella di carico), uno "strain indicator", un connettore analogico-digitale ed un computer. Il programma, realizzato e sviluppato con il software Labview, permette di registrare e visualizzare i valori di "resistenza" del composito, ottenendo così, in tempo reale, il degrado del provino in funzione del tempo o dei cicli. È possibile usare qualunque tipo di criterio (per la vita a fatica del composito). È stato qui usato il criterio N_{10} , che identifica il 10% dal carico iniziale come valore identificativo del cedimento del materiale. Con esso si quantifica il numero di cicli necessario perché la tensione scenda al 90% del valore iniziale.

2.4 Regolazione della Macchina

Il dispositivo consente di eseguire prove con carico di natura sia pulsatorio sia alternato, grazie alla “flessibilità” di alcuni suoi organi. In particolare, come mostrato nella figura 4 nel riquadro in rosso, per mezzo della modifica della posizione della traversa orizzontale (che permette l’afferraggio superiore del provino) si può incrementare lo spostamento massimo imponibile al campione da testare ammorstando la traversa nel retro dei due ritti.

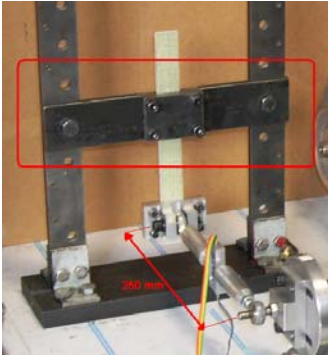


Fig. 4: *Sistema di regolazione mediante traversa orizzontale*

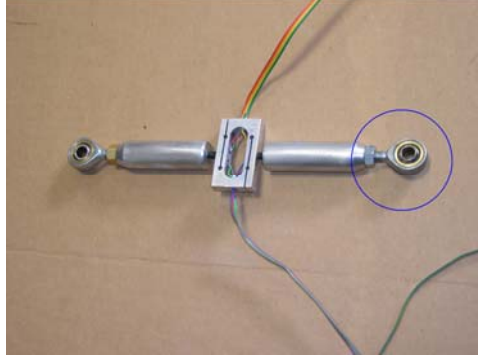


Fig. 5: *Sistema di regolazione mediante snodo.*

Un altro espediente utilizzabile per modificare lo spostamento imposto al provino è fornito dallo snodo (evidenziato col cerchietto blu in figura 5). Avvitando o svitando uno o entrambi gli snodi è possibile modificare la distanza tra l’eccentrico ed il provino, variando così lo spostamento minimo (u_{\min}) e massimo (u_{\max}) imposto. In figura 4 è mostrata anche la distanza tra l’eccentrico ed il sistema di afferraggio inferiore del provino, distanza pari a ca. 250 mm. Il valore limite di deformazione teoricamente possibile ($u_{\max} - u_{\min}$) è di ca. 150 mm, pari alla somma del doppio della distanza PQ, raggio della manovella costituita dall’eccentrico con l’allungamento che può essere imposto agli snodi.

3. La cella di carico.

La cella di carico è costituita da un corpo in metallo, che assume varie forme in funzione dell’entità del carico da misurare, della tipologia delle applicazioni, e delle condizioni ambientali. Dopo una ricerca bibliografica, dedicata allo studio ed alla valutazione delle attrezzature esistenti, si è arrivati alla stesura del progetto definitivo, gradualmente e per approssimazioni successive. Il modellatore solido 3D è stato Solid Edge, dal quale si è passati al programma ad elementi finiti Ansys, con il quale si è giunti alla configurazione definitiva ottimizzata. La cella di carico presenta approssimativamente la forma di una “esse” (fig. 6). Sono state realizzate due celle di carico per due differenti entità di carichi. La prima, per misure di sollecitazioni non superiori a 50 N; è stata ricavata da una piastra di alluminio, opportunamente lavorata alle macchine utensili. Grazie alle proprietà caratteristiche dell’alluminio, essa presenta un peso di appena 25 g e si presta per il monitoraggio di carichi esigui, con una risoluzione di 0,42 g. La cella di carico presenta, al suo interno, una zona cava ove sono stati posizionati quattro estensimetri elettrici a resistenza da 350 Ω , base di misura 3 mm. Il trasduttore presenta inoltre due fori M5 (fori superiore ed inferiore) per il collegamento del trasduttore con la macchina prova materiali e due fori di 4 mm (quelli laterali) per il passaggio dei cavi di collegamento degli estensimetri. La cella di carico per sollecitazioni fino a 200 N è stata realizzata in acciaio, con una geometria prossima a quella in alluminio. Anche in questo caso sono stati impiegati quattro estensimetri elettrici a resistenza da 350 Ω e base di misura 3 mm; il peso è di appena 59,9 g. In figura 7 è mostrata la mappa delle tensioni di Von Mises, ottenuta con Ansys, quando la cella di carico

in acciaio è sottoposta ad un carico di 200 N con le deformazioni longitudinali, interessanti i quattro estensimetri. La fig. 7 mostra che il massimo della deformazione si ottiene in prossimità dei raccordi, in corrispondenza dei quali sono stati posizionati gli estensimetri. Dallo studio in Ansys del trasduttore si è ottenuto, nelle già specificate condizioni di sollecitazione, un coefficiente di sicurezza statico di 6.3 per la cella di carico in alluminio ed un coefficiente di sicurezza statico di 3.5 per quella in acciaio.

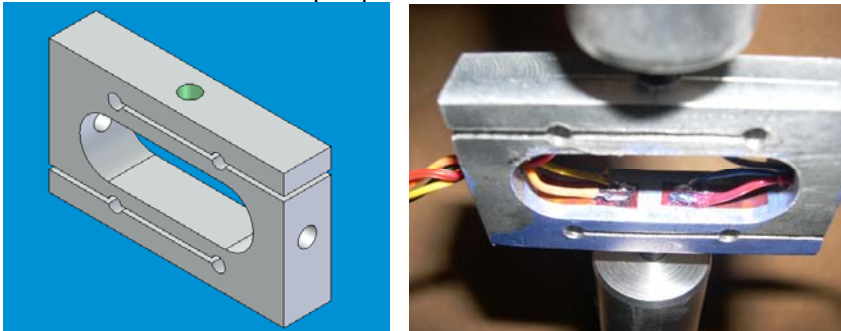


Fig. 6: *Modello 3D della cella di carico eseguito con Solid Edge e posizionamento degli estensimetri.*

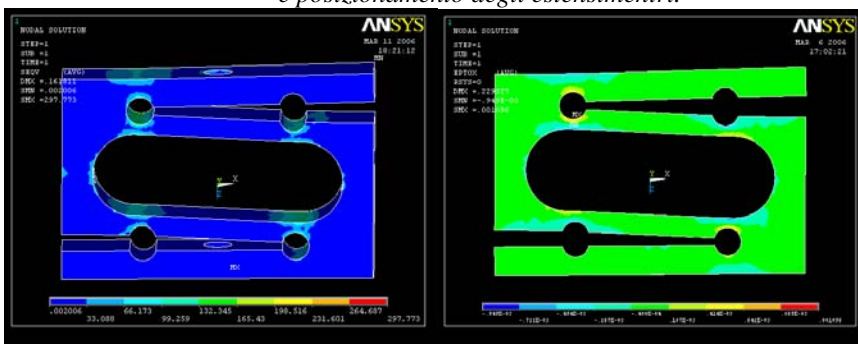


Fig. 7: *Mappa delle tensioni di Von Mises (a sinistra) e delle deformazioni longitudinali (a destra).*

3.1 Taratura della cella di carico.

La taratura prevede la registrazione del segnale in uscita dalle celle di carico, quando sull'attrezzatura gravano carichi di entità nota. Lo scopo è quello di ricavare la curva di taratura, che permette di correggere il segnale in uscita dalle celle in modo da poter leggere direttamente il valore corretto del carico agente in ogni direzione. È stata prevista l'applicazione di un carico variabile da un minimo ed un massimo, con intervalli di variazione prestabiliti; la taratura è stata eseguita almeno due volte per verificare la ripetibilità delle misure: se i dati delle prove concordano si traccia il diagramma di taratura, altrimenti si interpolano i dati con il metodo dei minimi quadrati e si esegue un'ulteriore prova a conferma dei risultati ottenuti. La metodologia di taratura dei trasduttori di forza è quella illustrata nelle norme UNI-EN 10002/3 ed ISO 376, che sono le norme nazionali ed internazionali di riferimento.

4. Laminato quasi isotropo.

La tabella 1 riassume le caratteristiche dei laminati prodotti per eseguire le prove sperimentali. Essa mostra il calcolo eseguito in Excel per la determinazione della percentuale in volume di fibre. Il valore di 69.21% è stato raggiunto grazie all'utilizzo della tecnica del sacco a vuoto [8], altrimenti non ottenibile con il normale lay-up a temperatura ambiente.

Tabella 1: Caratteristiche dei laminati in composito prodotti.

Caratteristiche laminati compositi quasi isotropo		
Dimensione laminato	N° lamine	12
	Spessore [mm]	3
	Lunghezza [mm]	150,6
	Larghezza [mm]	259
Peso	Peso laminato [gr]	202,9
	Peso specifico fibre [g/m ²]	300
	Peso fibre [grammi]	140,41944
%	% peso fibre	69,21
	% peso resina	30,79

Una classe di laminati particolari è costituita dai cosiddetti laminati quasi isotropi, nei quali la rigidità estensionale è indipendente dal particolare orientamento considerato. Un laminato quasi isotropo deve avere: un numero totale n di lamine maggiore o uguale a 3; lamine della stessa costituzione e spessore; l'angolo $\Delta\theta$ tra le due lamine deve essere costante (lamine angolarmente equispaziate). La denominazione non è legata al fatto che tali laminati possono avere piccole variazioni della rigidità estensionale con la direzione, ma piuttosto al fatto che essi hanno comportamento isotropo solo rispetto alla trazione – compressione e non rispetto a flessione e torsione. Un laminato simmetrico quasi isotropo può essere ottenuto con opportuno orientamento delle lamine; per esempio è tale un laminato simmetrico costituito da 12 lamine disposte secondo lo schema $[\pm 30/\pm 90/\pm 30]_s$. La metà del laminato è costituita infatti da 6 lamine angolarmente equispaziate di 60° [6].

Tabella 2: Proprietà dei costituenti del glare.

	Preimp. Unidir. Fibre S ₂ ($v_f=60\%$)	2024-T3
Modulo di Young E ₁ [GPa]	54,0	72,2
Modulo di Young E ₂ [GPa]	9,4	72,2
Tensione di rottura σ_r [MPa]	2640	455
Deformazione di rottura ε_r [%]	4,7	19
Coefficiente di Poisson ν_{12}	0,33	0,33
Coefficiente di Poisson ν_{21}	0,0575	0,33
Modulo di taglio [GPa]	5,55	27,6
Densità ρ [kg/m ³]	1980	2770

5. Il glare.

Il glare è un Laminato Fibra-Metallo costituito da sottili lamine di alluminio con spessore compreso tra 0.2 e 0.5 mm alternate a strati di fibre di vetro annegate in una matrice epossidica con uno spessore di 0.125 mm e un *fibre volume fraction* nominale del 59%. La direzione delle fibre è riferita al senso di laminazione dei fogli di alluminio; 0° o *Longitudinal rolling direction* (L) indica che le fibre sono poste nel verso di laminazione del metallo, mentre 90° o *Longitudinal-Transverse rolling direction* (T) indica che le fibre sono orientate in maniera trasversale. Il materiale subisce un processo di cura in autoclave a elevata pressione e temperatura. Le caratteristiche meccaniche del glare sono legate a quelle dei suoi costituenti: l'alluminio e le fibre, le cui più importanti proprietà sono state riportate in tab. 2. Le proprietà meccaniche dell'adesivo sono trascurabili, se confrontate con quelle

delle fibre in esso annegate, ma il contributo del collante caratterizza fortemente le prestazioni del laminato. Esso infatti determina la forza con cui gli strati di metallo e di fibra sono ancorati e proprio il distacco dell'adesivo all'interfaccia metallo/strato di fibra è uno dei modi più frequenti di cedimento del laminato. L'uso di lamine sottili di alluminio (0.3 - 0.6 mm) permette di non tenere in considerazione gli effetti dello spessore, sia per quanto riguarda i singoli strati di alluminio, sia per quanto riguarda il laminato nella sua totalità. Il metodo denominato "Metal Volume Fraction" (MVF) o "Teoria delle miscele", consente di determinare le proprietà del glare [9].

6. Procedure sperimentali

La conduzione delle prove ha richiesto l'implementazione di un adeguato sistema di acquisizione per monitorare i parametri di danneggiamento del materiale. Durante le prove si monitorizzano i valori di tensione indotti tramite un apposito sistema di acquisizione. Questo sistema è costituito da una cella di carico, da uno "strain indicator", da un connettore analogico-digitale e da un computer. Il software di acquisizione (Labview) registra il segnale, ad intervalli regolari, mediante il connettore National Instruments CB-68LP, e mostra l'andamento dell'ampiezza del segnale in funzione del numero di cicli, permettendo così di valutare l'andamento della cedevolezza in funzione dei cicli (o del tempo), indicatore importante per la progressione del danneggiamento.

6.1 Le prove.

I provini (fig. 8) sono realizzati in fibra di vetro nella configurazione "quasi isotropa" $[\pm 30/\pm 90/\pm 30]_s$ e provini rinforzati con lamina di alluminio 6061-T6 di configurazione tipo $[+30/-30/+90/\text{alluminio}/+90/-30/+30]$ (glare). Nel primo caso si è ottenuto uno spessore del laminato di 3 mm, nel secondo di 3,1 mm. Per la realizzazione di entrambe le tipologie di provini si è impiegata la resina epossidica, in quanto tali resine sono molto usate per il loro basso costo. Il provino in puro composito è costituito da dodici lamine di fibra di vetro mentre il glare ne presenta sei con interposti, in mezzeria, la lamina di alluminio.

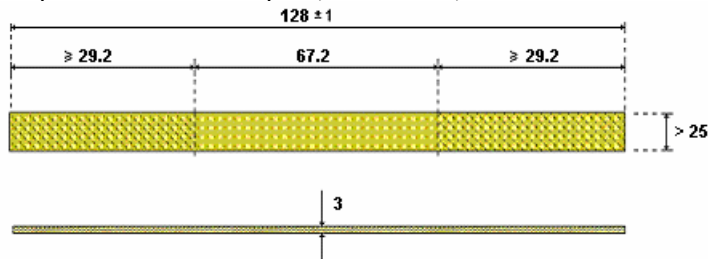


Figura 8: Geometria del provino.

Al fine di ridurre al minimo lo spessore dei provini si è impiegato il metodo del "sacco a vuoto" per la loro realizzazione. Nella conduzione delle prove sperimentali entrambi i provini presentavano le caratteristiche geometriche riportate in tab. 3.

Le prove sono state eseguite con diversi valori di deformazione imposta. Per caratterizzare ogni prova si utilizza il "rapporto di spostamento", definito come.

$$R_d = \frac{u_{\min}}{u_{\max}} \quad (1)$$

analogo del rapporto di tensione. Con la conoscenza del valore della deformazione massima u_{\max} e della lunghezza L tra i due attacchi, sono noti tutti i parametri sperimentali.

6.1.1 Prova di trazione.

Per determinare le caratteristiche meccaniche, quali modulo di elasticità longitudinale e tensione di rottura, dei due materiali si sono eseguite le prove di trazione mediante

l'utilizzo della macchina prova materiali *Hounsfield*, attrezzata con gli appositi afferraggi per le prove di trazione. Sul provino è stato installato un estensometro per rilevare le deformazioni, mentre il valore del carico è fornito dalla cella di carico di 20000 N della stessa macchina.

Tabella 3: Caratteristiche geometriche dei provini impiegati.

	Composito	Glare
Spessore [mm]	3.00	3.10
Larghezza [mm]	25.60	25.30
Altezza [mm]	129.1	127
Braccio [mm]	67.2	67.2
Numero lamine	12	7
Peso provino [g]	17.2	22.6

Tabella 4: Proprietà dei materiali utilizzati nello studio.

Caratteristiche del materiale	Composito quasi isotropo	Glare
Fibra/Resina	Vetro/poliestere	Vetro/poliestere
Direzione fibra	Equidirezionale (60°)	Equidirezionale (60°)
Frazione di volume della fibra	69.21	-
MVF (Metal Volume Fraction)	-	51.6
Spessore [mm]	3,0	3.1
Modulo longitudinale [MPa]	16357	38401
Tensione di rottura [MPa]	303	≅ 200

6.1.2 Prova di fatica a flessione.

Sono state eseguite prove statiche e di fatica sui diversi tipi di compositi. Tutti i tipi di materiali analizzati sono stati realizzati con resina poliestere e fibra di vetro, impiegando il procedimento del sacco a vuoto. La tab. 4 riassume le caratteristiche dei materiali utilizzati.

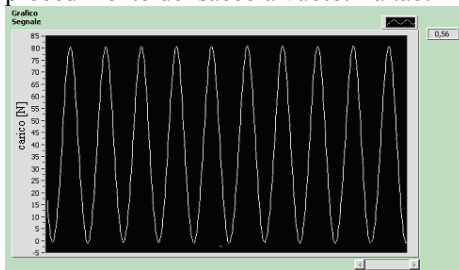


Fig. 9: Segnale filtrato.

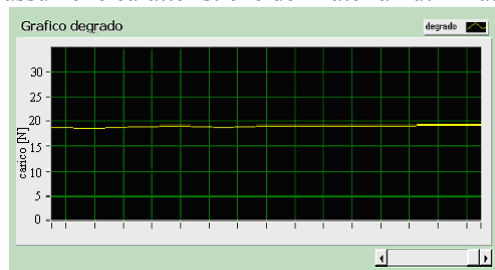


Fig. 10: Monitoraggio del carico.

Tutti i provini sono stati sollecitati con un carico sinusoidale generato dalla macchina. Si è operati ad una frequenza di 3 Hz, mantenuta sempre costante per tutte le prove eseguite. Al fine di minimizzare l'influenza di eventuali segnali spuri sono state monitorate, per ogni acquisizione, dieci cicli di carico. Per ognuno di questi è stato calcolata l'ampiezza della sollecitazione e successivamente ne è stata fatta la media, eliminando eventuali punti anomali. Immediatamente a valle dell'acquisizione del segnale, ne è stato effettuato il filtraggio mediante un filtro passa basso, per annullare l'influenza del rumore, sempre presente anche se di valore trascurabile, ottenendo il segnale in figura 9. Infine il programma permette di visualizzare l'ampiezza di ciascun ciclo di carico (fig. 10), fatto di non trascurabile importanza nei primi cicli di lavoro, nei quali è possibile avere un rapido degrado del materiale fortemente sollecitato.

7. Risultati

Le prove di fatica sono state eseguite con diversi valori di deformazione imposta, tutte caratterizzate da flessione piana pulsatoria. Per caratterizzare ogni prova, il “rapporto di spostamento” definito dalla (1) risulta pari a zero, dato che si è posto pari a zero lo spostamento minimo, di modo che la posizione della macchina a spostamento minimo è rappresentata in fig. 3. La figura 11 mostra l’andamento del carico al variare dei cicli per i provini in composito quasi isotropo (a sinistra) ed in glare (a destra), soggetti a carico pulsatorio con deformazione massima (u_{max}) variabile da 10 a 27 mm.

Il comportamento di entrambi i provini dipende fortemente dal carico. Infatti, per carichi di partenza modesti si nota una diminuzione iniziale della rigidità del provino, e quindi del carico sopportabile, che successivamente si mantiene costante. Per tutta la durata della prova (ovvero per 500000 cicli, sebbene ne siano mostrati solo la metà) il provino in glare mantiene un carico superiore a quello del composito quasi isotropo, con un andamento piuttosto simile. Imponendo spostamenti maggiori, l’andamento del carico sopportato dal glare è altalenante rispetto a quello sopportato dal composito; per carichi superiori ad un valore soglia (ca. 60 N) nei provini in composito si ha un andamento del danneggiamento a gradino, indice di una rottura graduale delle lamine; mentre il glare, dopo un danneggiamento iniziale, riesce a mantenere per molto tempo un determinato valore di carico, di entità maggiore di quello sopportabile dal composito. Ciò è imputabile alla presenza dell’alluminio, che assorbe buona parte del carico, lasciando scariche le fibre di vetro, permettendo così al provino di mantenere una non trascurabile rigidezza.

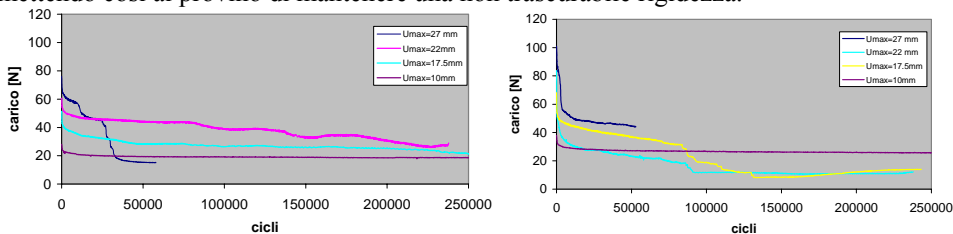


Fig. 11: *Degrado nei provini: a sinistra composito quasi isotropo, a destra il glare.*

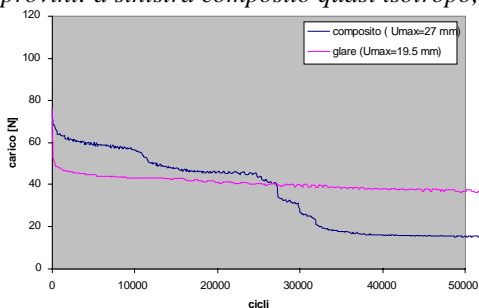


Fig. 12: *Degrado dei due materiali per stesso valore di carico iniziale.*

La figura 12 mostra il degrado dei provini quando essi sono sottoposti allo stesso carico iniziale. Essa evidenzia come il glare presenti un rilevante ed unico cedimento del carico, con variazioni poco significative fino alla rottura; nel composito, invece, si ha la rottura sequenziale delle fibre compresse, con conseguente variazione a gradino del carico sopportabile dal materiale. In tutte le prove eseguite e in tutti i provini analizzati si è sempre verificato un danneggiamento localizzato interessante esclusivamente le fibre compresse.

8. Conclusioni

In fase di progetto si è cercato di rendere la macchina il più possibile flessibile, scegliendo il tipo di sollecitazione, la sua entità, la sua frequenza, ecc., in modo che le prove di fatica sui compositi possano essere eseguite in condizioni operative prossime a quelle del componente nella sua funzione. L'ottimizzazione della macchina può essere eseguita sostituendo il basamento con uno più rigido e più ampio in modo da poter prevedere la presenza di un secondo motore, di maggior potenza, per l'esecuzione di prove che richiedano carichi più elevati, con una cella di carico adeguata. È inoltre opportuna la realizzazione di una cella di carico per carichi inferiori ai 10 N, mentre la regolazione dell'eccentricità può essere eseguita con vite di comando micrometrica. Infine è auspicabile un ulteriore studio del glare, diversificando la realizzazione dei provini, in modo da ottenere un materiale che minimizzando i costi di costruzione, rispondendo alle caratteristiche richieste. In definitiva i risultati ottenuti mostrano che la macchina FTM messa a punto è in grado di assolvere il proprio compito, a costi di sperimentazione abbastanza contenuti.

Bibliografia

- [1] J. P. Trotignon (1995), "A New Universal Fatigue Machine for Plastics and Composites", Polymer Testing Volume: 14, Issue: 2, pp. 129-147.
- [2] M. Asif Iqbal (1997): "Fatigue life of pultruded and hand lay-up GFRP exposed to different environmental conditions", tesi di laurea, B.S. Winona State University, Minnesota.
- [3] V. Natarajan (2003): "Fatigue response of fabric reinforced polymeric composites" Journal of Composite Materials.2005; 39: 1541-1559.
- [4] Van Paeppegem, W. and Degrieck, J. (2001). *Fatigue Degradation Modelling of Plain Woven Glass/epoxy Composites*. **Composites Part A**, 32(10), 1433-1441 (SCI-IF: 1.131).
- [5] Van Paeppegem, W. and Degrieck, J. (2001). Experimental Setup for and Numerical Modelling of Bending Fatigue Experiments on Plain Woven Glass/epoxy Composites. *Composite Structures*, 51(1), 1-8 (SCI-IF: 0.659).
- [6] Vasek A., Polák J., Kozák V.: "Fatigue crack initiation in fibre-metal laminate GLARE 2", *Materials Science and Engineering. A – Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing.*, **A234-236**, [-] 621-624 (1997). International Conference on the Strength of Materials (ICSMA-11). Praha (CZ), 97.08.25-97.08.29]
- [7] Caligiana, G., Minak, G., Ghezzi, F., Cicchetti, M., (2003), "Dispositivo per prove di fatica su materiali compositi: progetto, messa a punto e risultati sperimentali", Atti su CD Rom del XXXII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, Salerno 3-6 Settembre 2003, AIAS 2003
- [8] G. Marannano, G. Virzi Mariotti (2006) - *Structural optimisation and experimental analysis of composite material panels for naval use* - XXXV Convegno Nazionale AIAS, 13-16 Settembre 2006, Università Politecnica delle Marche, Ancona.
- [9] <http://www.dseurope.it/pdf/ManCELLita.pdf>
- [10] [:http://www.sit-italia.it/SIT/Documenti/Documenti_Tecnici/SIT_Tec_013_05.pdf](http://www.sit-italia.it/SIT/Documenti/Documenti_Tecnici/SIT_Tec_013_05.pdf)