

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
Sede Amministrativa del Dottorato di Ricerca



Electrolux Italia S.p.a. - C.T.I. (Cross Technology and Innovation)

DOTTORATO DI RICERCA

INGEGNERIA E SCIENZA DEI MATERIALI

XXI CICLO

***A NOVEL APPROACH TO THE EXPERIMENTAL
STUDY OF THERMOPLASTIC COMPOSITES FATIGUE
BEHAVIOUR***

(Settore Scientifico Disciplinare Ing – Ind / 22)

DOTTORANDO

Dott. Ing. ANDREA CREVATIN

**COORDINATORE COLLEGIO
DOCENTI E RELATORE**

Prof. SERGIO MERIANI

TUTORE

Dott. Ing. FABIO SPIZZO

CORRELATORE

Dott. Ing. MONICA CELOTTO

ANNO ACCADEMICO 2007 - 2008

Extended abstract

Oggigiorno molte realtà industriali stanno compiendo grandi sforzi nella direzione della riduzione costi, incremento della produttività e miglioramento della qualità dei prodotti. In modo particolare abbiamo focalizzato la nostra attenzione nel ramo del design di componenti strutturali termoplastici, includendo sia l'ottimizzazione delle strutture esistenti, sia il design di nuove strutture. Dal punto di vista dei materiali, questo si traduce nell'esigenza di avere determinate proprietà meccaniche, di porre attenzione ai margini di sicurezza e nella necessità di un controllo dei parametri chiave del design. Per ottenere questi risultati è necessario un nuovo approccio nel design di materiali plastici e componenti che incontrino le richieste di durata e performance.

L'obiettivo del presente progetto è quello di trovare strumenti utili alla previsione della durata in vita e dell'evoluzione del danneggiamento di materiali plastici e componenti, sottoposti a carichi meccanici/termici in condizioni di servizio, in modo da supportare lo sviluppo di nuovi materiali con diverse formulazioni ed il design e l'ottimizzazione di componenti strutturali.

In modo particolare abbiamo incentrato il nostro lavoro sulla caratterizzazione e modellazione della durata in vita e dei meccanismi di danneggiamento dei materiali.

Uno dei principali problemi legati alla durata dei materiali è dato dal cedimento per fatica. Il processo di fatica è un progressivo indebolimento di un componente nel tempo dovuto ad applicazioni ripetute del carico. Il cedimento per fatica non deve essere visto solo come una rottura del provino in due pezzi separati, ma piuttosto come un progressivo accumulo del danneggiamento. Il danneggiamento di un materiale sollecitato a fatica si manifesta come una progressiva riduzione di stiffness e sotto forma di creep.

Dal momento che i test di fatica standard sono dispendiosi in termini di tempo e denaro, è essenziale sviluppare nuovi approcci che siano rapidi e di facile implementazione. Uno dei risultati più importanti raggiunti nel presente lavoro, è il setting di un metodo di analisi, (test di fatica accelerato) estremamente semplice da implementare ed in grado di differenziare le performance di diversi materiali e formulazioni in termini di accumulo del danneggiamento e di durata, in tempi brevi.

Inoltre si è voluto cercare una metodologia utile per la simulazione dei risultati ottenuti con il metodo AFT. Per perseguire tale obiettivo, sono stati seguiti due approcci completamente differenti, uno meccanico, per mezzo dello sviluppo di un modello matematico costitutivo, ed uno sistemico, basato sull'utilizzo delle reti neurali.

Lo step finale del presente lavoro è costituito dalla correlazione dei dati provenienti dall'AFT con le performance di un componente strutturale in condizioni di servizio, in particolare della vasca contenete il cesto di una lavatrice. La mappatura degli stress agenti è stata effettuata per mezzo della tecnica dell'estensimetria elettrica.

1. Test di Fatica Accelerato

Il Test di Fatica Accelerato è un nuovo e rapido metodo di analisi atto a ottenere informazioni riguardo al progressivo danneggiamento di un materiale in seguito all'applicazione di un carico oligociclico di trazione. Il metodo prevede l'applicazione di diversi livelli di carico in termini di percentuale dello sforzo di snervamento. Lo strumento di misura impiegato è un dinamometro universale della Instron.

Allo scopo di calcolare i parametri caratteristici necessari al confronto tra diversi materiali, è stato sviluppato un programma MatLab dedicato. In particolare sono stati scelti come indicatori dell'accumulo del danneggiamento per i campioni in prova, i seguenti parametri:

- L'area del ciclo deformazione-stress.
- L'evoluzione del modulo elastico (calcolato come modulo secante del ciclo).
- Il trend della deformazione residua.

Il metodo AFT è stato applicato su diverse tipologie di materiali compositi a base polipropilenica, con lo scopo di valutare le loro proprietà a fatica e l'accumulo di danneggiamento indotto.

1.1 Parametri operativi

L' AFT si basa sull'applicazione di un livello di carico di ampiezza e velocità costanti, di fatto la curva di carico è di tipo triangolare. Dal momento che lo strumento utilizzato permette solamente il controllo della velocità di spostamento della traversa ed il settaggio del livello di carico massimo, la frequenza di applicazione non può essere mantenuta costante durante la prova. Come accennato in precedenza, lo sforzo massimo è selezionato sulla base delle proprietà meccaniche di ciascun materiale (sforzo di snervamento o carico massimo), mentre il livello minimo è zero. Ciascuna prova è costituita da un massimo di 6000 cicli, mentre la velocità della traversa scelta è pari al massimo consentito dallo strumento (50 mm/min). La deformazione è stata misurata per mezzo di un video estensometro Instron, mentre lo stress è stato calcolato con il software Instron MERLIN, dividendo il carico per l'area del provino. I dati sono stati campionati ad una frequenza di 10 Hz.

Il principale vantaggio dell' AFT è quello di superare il limite dei tempi lunghi richiesti dal test di fatica convenzionale, che peraltro richiede una strumentazione *ad hoc*. Il metodo messo a punto durante il periodo di ricerca, è studiato appositamente per essere implementato su strumenti più semplici e probabilmente di uso più comune come il dinamometro. Per contro, le maggiori restrizioni sono rappresentate dal fatto che usando uno strumento di tipo statico, non è possibile controllare la frequenza di applicazione del carico. A conti fatti è ovviamente impossibile ottenere con un approccio sperimentale di questo tipo informazioni complete come quelle provenienti da un test convenzionale. In particolare è quasi impossibile costruire la curva di Wöler, dal momento che generalmente il campione non raggiunge condizioni di rottura. Pertanto diventa importante prefissare un livello di carico massimo elevato in modo da enfatizzare i trend dei diversi parametri.

Riassumendo quanto detto al riguardo dell'AFT, possiamo dire che il metodo fornisce informazioni sulla tendenza di un campione a raggiungere condizioni di danneggiamento in poco tempo.

1.2 Materiali

Sono stati considerati diversi gruppi di materiali, in modo da verificare l'utilità dell'AFT nel testare un ampio range di compositi. Comunque tutti i materiali considerati sono a base polipropilenica, ma rinforzati con diversi tipi di fillers o preparati in diverse formulazioni o ancora basati su diverse matrici di polipropilene.

Il primo gruppo che abbiamo considerato è costituito da tre microcompositi rinforzati con carbonato di calcio e preparati con tre diverse matrici di polipropilene (EC1, EC2, EC3). Ciò che si vuole ottenere da questo confronto, è vedere come l'AFT sia in grado di differenziare tre matrici provenienti da tre diversi fornitori. Un problema di questo genere è quantomai frequente in ambito aziendale ed avere uno strumento di valutazione molto rapido può essere un vantaggio non indifferente.

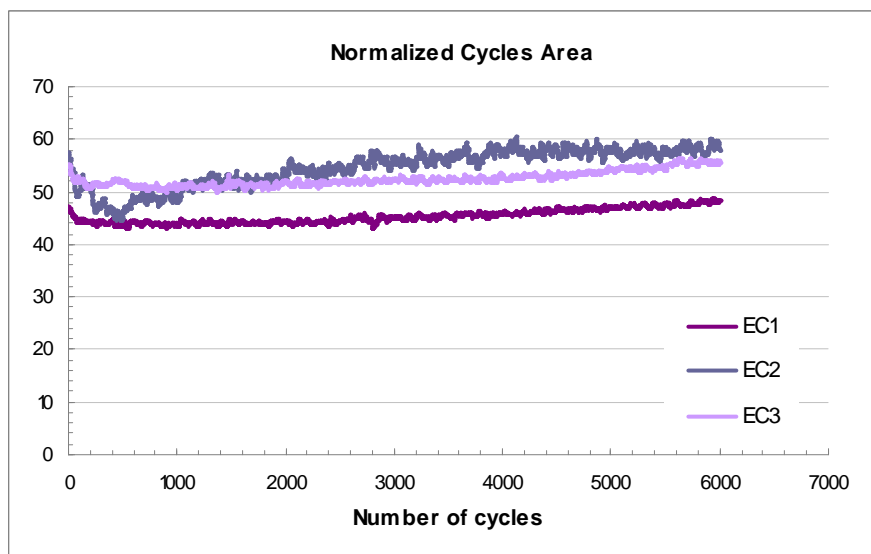
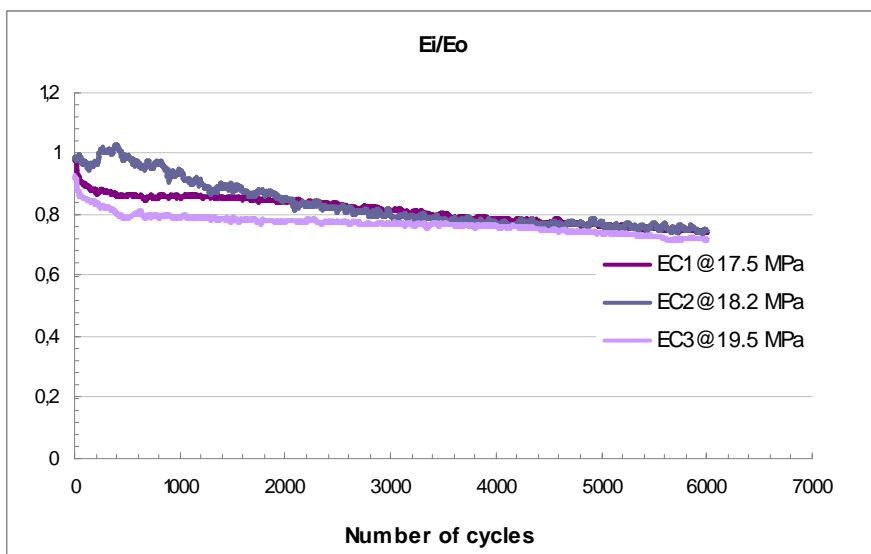
Il secondo gruppo esaminato è costituito da due compositi rinforzati con carbonato di calcio e fibre di vetro (ECH1, ECH2). La principale differenza tra i due è data dagli step di preparazione. In buona sostanza i provini ECH1 sono stati stampati dopo il processo di estrusione e pellettizzazione; a seguito di ciò le fibre di vetro hanno subito un processo di sminuzzamento prima dello stampaggio a iniezione. Per contro ECH2 è stato stampato direttamente dal dry blend.

Il terzo gruppo è costituito da due compositi rinforzati con carbonato di calcio e addizionati con due diversi espandenti (EX1, EX2). Questa tipologia di formulazioni ha il doppio scopo di riduzione di peso e costo, grazie ad una minore percentuale di PP nella formulazione.

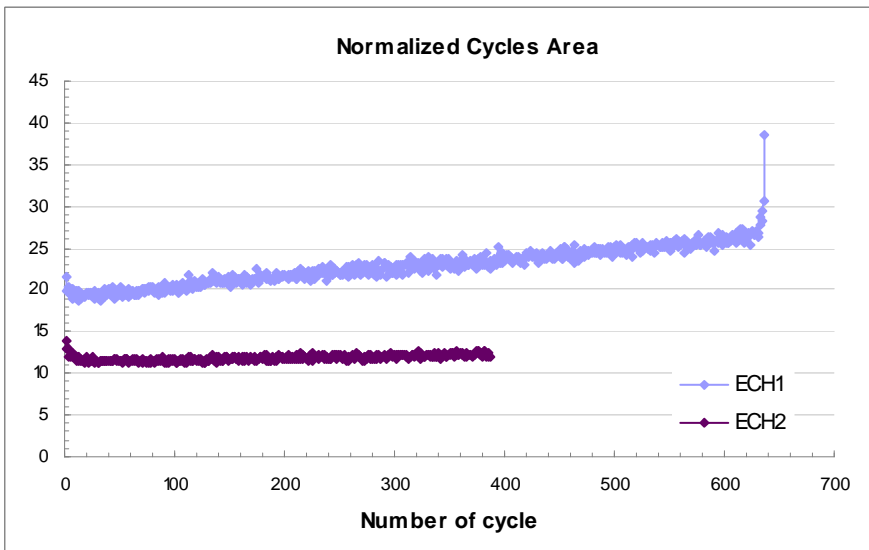
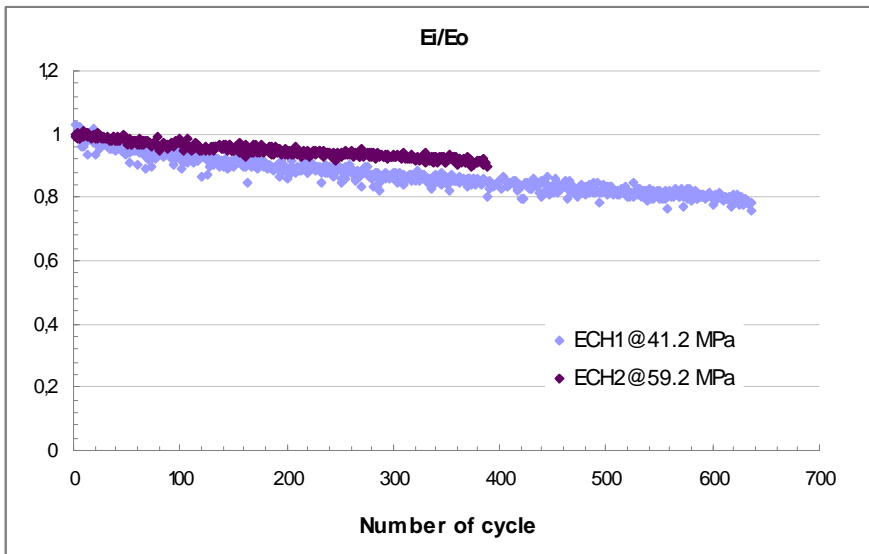
1.3 Risultati ottenuti

Il metodo si è dimostrato in grado di differenziare materiali, simili per proprietà meccaniche, da un punto di vista della resistenza a fatica. Nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti del modulo elastico relativo (E_i/E_0) e dell'area dei cicli. È opportuno segnalare che i confronti sono stati fatti partendo da una scala normalizzata. In pratica ogni materiale è stato testato a valori differenti di carico massimo, essendo stato scelto come valore massimo di stress l'80% dello sforzo di snervamento. Pertanto è sembrato più efficace confrontare i materiali su una scala comune, ottenuta moltiplicando i valori di stress e deformazione per un fattore A così definito:

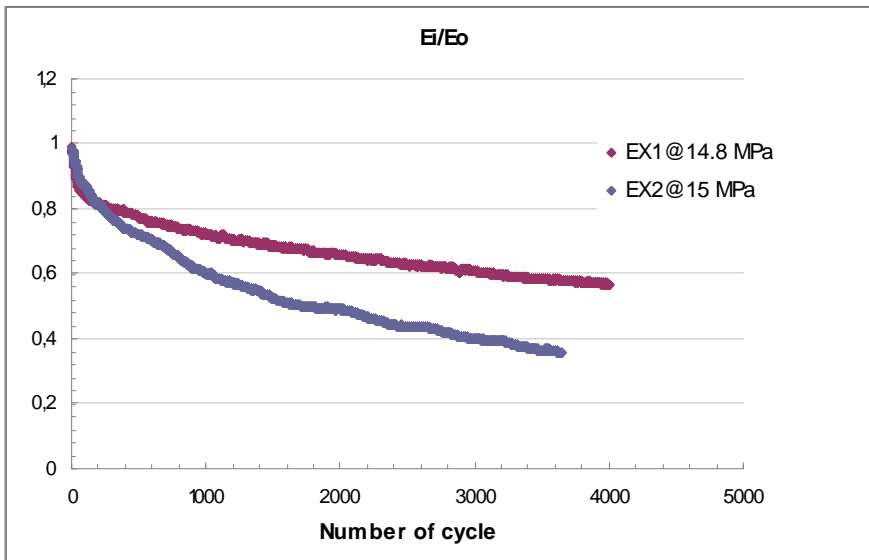
$$A = 80 / \text{max stress value}$$



Per quanto riguarda il primo gruppo, il test evidenzia una sostanziale equivalenza per EC1 ed EC3, mentre EC2 mostra una maggiore velocità di decadimento del modulo e di aumento dell'area dei cicli. In definitiva il metodo utilizzato si dimostra in grado di differenziare rapidamente tre materiali di analoga formulazione e permette eventualmente all'azienda di operare una scelta sulla matrice più opportuna da considerare.

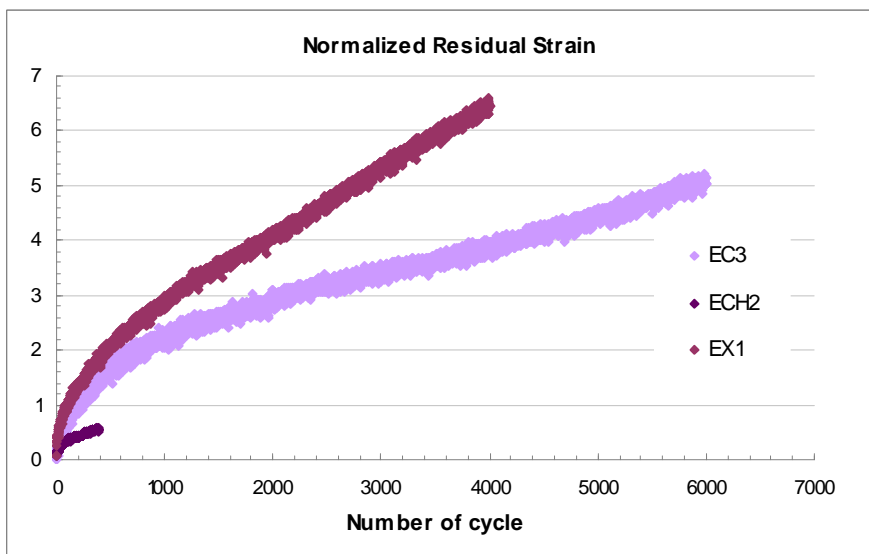


Per quanto concerne il secondo gruppo, come atteso, il materiale denominato ECH2, oltre a possedere caratteristiche meccaniche notevolmente migliori, mostra una minore velocità di decadimento quando sottoposto a fatica.



Interessante anche quanto è emerso per i materiali caricati con il blowing agent. Pur avendo proprietà meccaniche assolutamente comparabili, EX2 nella prova a fatica si dimostra molto meno resistente: infatti il grafico mette in luce una caduta drammatica del modulo elastico relativo (diminuzione di quasi il 70% nell'arco di circa 4000 cicli).

Il grafico seguente confronta un materiale per ciascun gruppo in base allo strain residuo.



Ciò che evidenzia un grafico di questo tipo, è la tendenza al creep per i diversi materiali, fattore che può essere interpretato come una tendenza al cedimento del materiale quando sottoposto ad applicazioni cicliche del carico.

2. Modellazione matematica

Come anticipato, sono stati considerati due approcci dalle filosofie diametralmente opposte per la simulazione dei dati sperimentali. Il primo è un approccio di tipo specialistico ovvero l'identificazione della struttura delle leggi di correlazione basata sulla conoscenza dei meccanismi fisici e/o per analogia di meccanismi di processo. Il secondo è un approccio di tipo sistemico, che prevede lo sviluppo di correlazioni codificabili in opportune strutture matematiche (ad es. reti neurali), sulla base di sequenze di dati sperimentali.

2.1 Modello costitutivo

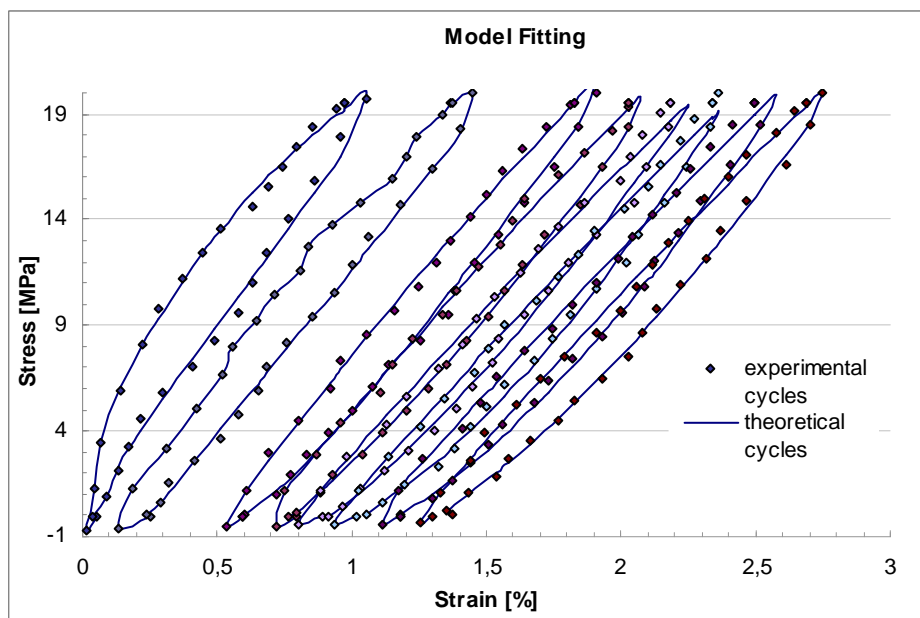
L'approccio specialistico ha avuto come obiettivo lo sviluppo di un modello matematico costitutivo in grado di descrivere l'evoluzione del danneggiamento partendo dalla descrizione dei cicli sforzo-deformazione. Quanto trovato in letteratura, non ha soddisfatto le nostre esigenze, poiché i modelli in grado di descrivere l'evoluzione dei cicli si fondano su considerazioni riguardanti la viscoelasticità dei materiali. Dal nostro punto di vista questo rappresentava un limite nella descrizione di classi differenti di materiali. Inoltre sarebbero stati di difficile implementazione nel nostro caso, perché pensati per cicli ottenuti da prove sperimentali condotte in regime dinamico. La strada da seguire era pertanto quella di un modello che partisse dalla descrizione del ciclo, per poi simulare il danneggiamento (diminuzione di modulo elastico e aumento dell'area) attraverso l'evoluzione dei suoi parametri.

Il modello, le cui equazioni sono riportate di seguito, è una legge in grado di simulare le diverse fasi della curva strain-stress per mezzo di una sommatoria di termini esponenziali. In buona sostanza, per una evoluzione dello stress confinata nel campo elastico, il primo termine è sufficiente al fitting dei dati sperimentali, mentre la progressiva uscita dal campo lineare richiede l'utilizzo di più termini di sommatoria, in quanto pensati per la descrizione della deformazione in campo plastico.

$$\sigma_{theor} = \sigma_y - \sum_i \left(\sigma_i * e^{(\varepsilon_r - \varepsilon) / \varepsilon_i} \right) \quad \text{Loading phase}$$

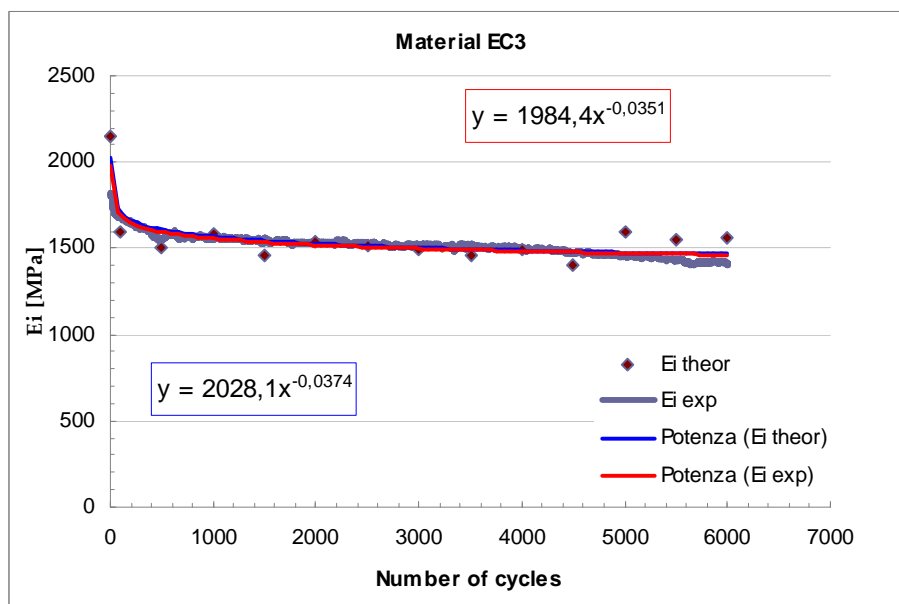
$$\sigma_{theor} = -\sigma_m + \sum_i \left(\sigma_i * e^{(\varepsilon - \varepsilon_r) / \varepsilon_i} \right) \quad \text{Unloading phase}$$

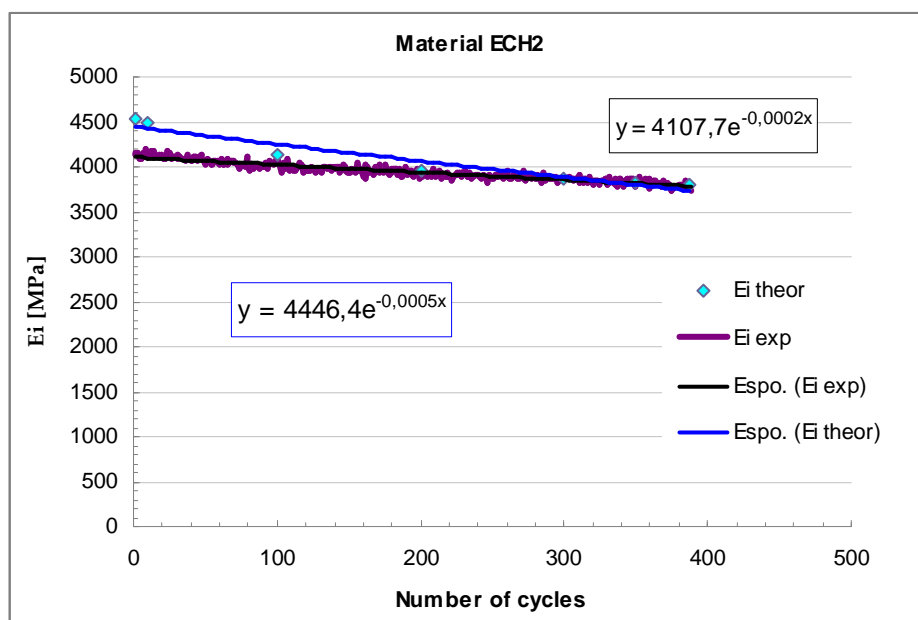
Il modello è diviso in due parti per poter distinguere la fase di carico da quella di scarico. Il parametro ε_r è la parte di deformazione non recuperata a fine ciclo e quindi dà una misura dell'accumulo di strain nel provino. Nella figura seguente, l'efficacia del fitting ottenuto con il nostro modello è messa in evidenza.



In questo caso il materiale considerato è EC3, ma la bontà del fitting è analoga per tutti i materiali investigati.

Tuttavia il risultato più rilevante si ricava dall'analisi dell'andamento dei parametri del modello. In particolare abbiamo dimostrato l'esistenza di una correlazione tra $\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}$ (ovvero del valore medio tra fase di carico e di scarico, definito come E_i teorico) ed il modulo secante del materiale. Nei grafici seguenti il significato di questa correlazione viene sottolineato.





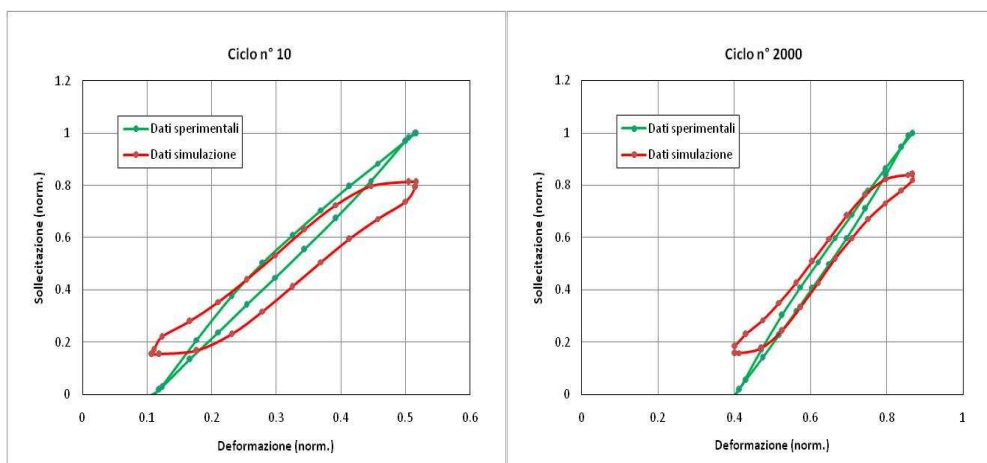
Questi risultati confortano le ipotesi iniziali sul significato fisico dei parametri del modello. Un fatto rilevante è dato dalle diverse leggi di decadimento del modulo elastico in grado di descrivere il fenomeno. Dai dati a nostra disposizione, possiamo affermare che, nel caso in cui il provino raggiunga condizioni di rottura, come accade ai provini rinforzati con fibra di vetro, il decadimento è ben descritto da una legge esponenziale piuttosto che da una legge di potenza. La linea di confine è rappresentata da provini che raggiungono condizioni di snervamento (EX2 nel nostro caso), dove, da un punto di vista matematico, le due leggi descrivono in maniera parimenti efficace il fenomeno. Per quanto riguarda il modello, possiamo affermare che sostanzialmente riesce a seguire il caso sperimentale anche da questo punto di vista, sebbene la sovrastima nella valutazione di E_i teorico rilevata nei primi cicli, porti ad uno scostamento nella pendenza della legge esponenziale.

2.2 Reti neurali

L'approccio sistemico alla simulazione dei risultati sperimentali, prevede l'utilizzo delle reti neurali. Tale parte del lavoro è in realtà ancora un work in progress, ma è sembrato rilevante farne un cenno in questo lavoro, viste soprattutto le ampie prospettive future di applicazione di tale tecnica nella descrizione dei processi industriali.

Per non appesantire questa sezione con una descrizione delle reti neurali, si rimanda alla sezione dedicata del lavoro completo ed ai relativi riferimenti bibliografici. In questa sede ci limiteremo a citare alcuni risultati ripresi dal workshop Electrolux CTI "Reti Neurali per la Modellazione di Materiali e Componenti Industriali".

Va citato che in questo lavoro sono state utilizzate reti neurali dinamiche, che si differenziano dalle reti feed-forward per la possibilità che hanno di apprendere una mappatura I/O non stazionaria.



In figura sono riportati i dati ottenuti con una rete neurale di Hopfield a 15 neuroni, per la quale il valore dell' errore di stima è pari a 0.036, mentre risulta essere di 0.11 quello di previsione.

Sono state testate anche altre reti (ad es. rete radiale), ma la rete di Hopfield ha fornito i risultati migliori sia per l'errore di stima che di previsione.

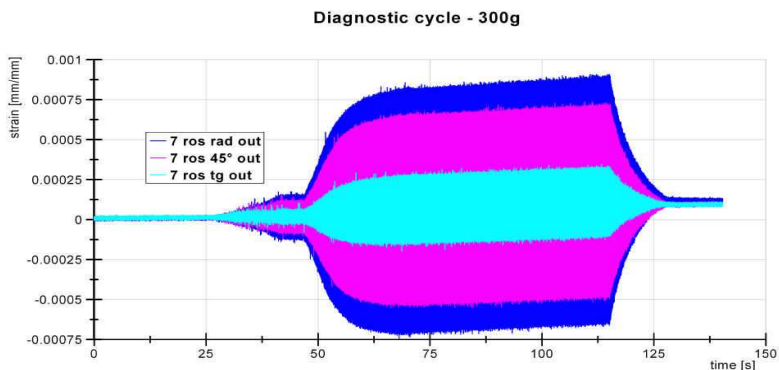
Il problema di più difficile soluzione nell'implementazione delle reti neurali al caso specifico, consiste nella determinazione di un metodo efficace per la determinazione della configurazione parametrica della rete, in modo da minimizzare lo scarto fra dati sperimentali e calcolati. Questo si traduce in un sistema di equazioni non lineari di dimensioni elevate. Per la soluzione si ricorre in genere a metodi computazionali tipo il simulated annealing.

3. Analisi delle deformazioni su componenti

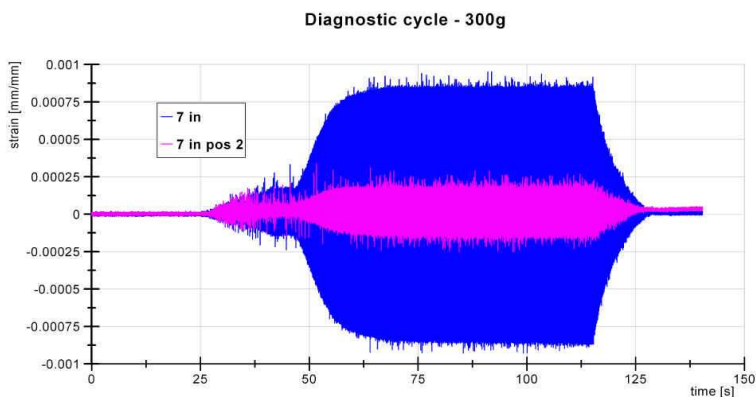
In questa sezione saranno presentati alcuni risultati ottenuti da misure sperimentali su un componente in condizioni operative. La struttura in questione è una vasca di contenimento per il cesto di una lavatrice, costituita da un materiale sostanzialmente analogo a EC1. La vasca, pur essendo una parte statica, è soggetta a processi di fatica, ove il carico viene da una parte indotto dalle vibrazioni generate dal movimento dell'albero motore, dall'altra dall'acqua ad alta temperatura (stress termico). È nostro interesse vedere se, attraverso i test meccanici tradizionali e le prove AFT, sia possibile fornire al progettista indicazioni utili per ottimizzare il dimensionamento dopo la valutazione dei carichi agenti sulla struttura.

La misurazione delle deformazioni è stata eseguita utilizzando la tecnica dell'estensimetria elettrica, applicata alla vasca quando sottoposta ad un ciclo di centrifuga.

I risultati più rilevanti sono riportati di seguito.

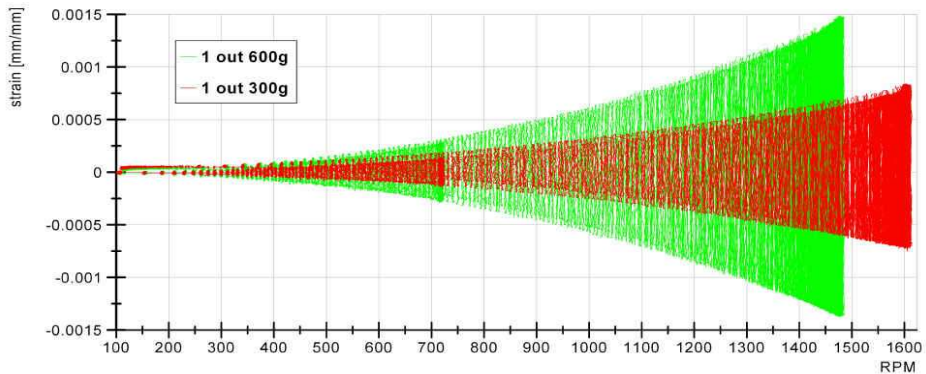


La figura sopra riportata, illustra la deformazione ottenuta in un punto della vasca prossimo alla zona dell'albero motore in tre diverse direzioni (radiale, tangenziale e a 45°). La figura sottostante invece mostra un confronto fra la zona prossima all'albero motore ed una lontana da essa. I due grafici evidenziano che lo stress si sviluppa principalmente nella zona dell'albero motore ed in direzione radiale.



Dalla figura seguente, dove la deformazione è funzione del numero di giri del motore, si evince l'effetto del carico all'interno del cesto ed il fatto che, vista la forma parabolica di crescita dello strain con l'aumentare della velocità di rotazione, non vi siano modi critici per la struttura (come ha evidenziato anche l'analisi della trasformata di Fourier).

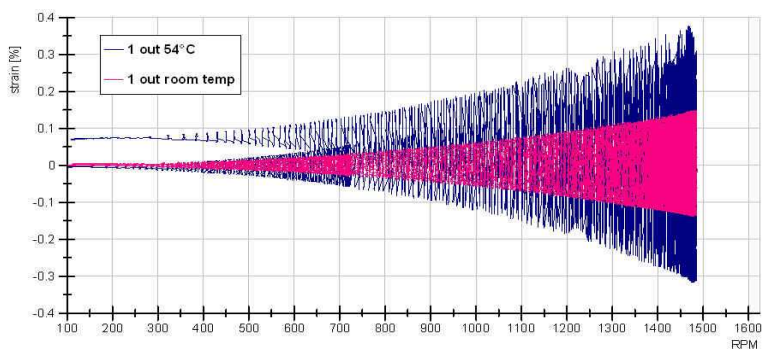
Diagnostic cycle - 300g Vs 600g - A



Ad ogni modo i test condotti senza presenza di acqua calda all'interno della lavatrice, hanno messo in luce come la struttura non sia sottoposta a deformazioni (e conseguentemente a stress) elevate. I valori di stress (non riportati nel presente lavoro), sono stati stimati dalla curva stress-strain del materiale impiegato.

A seguito di un ciclo di lavaggio a 90°, è stata misurata una temperatura sulla vasca di 54°C ed in queste condizioni è stato eseguito il ciclo di centrifuga, che ha fornito i seguenti risultati.

Diagnostic cycle
600g at room temp Vs 600g at 54°C



La temperatura non ha solo l'effetto di indurre una maggiore deformazione nella struttura (dallo 0.15% allo 0.4%), ma l'andamento dello strain mostra anche una tendenza all'accumulo,

infatti la fase di ritorno nella curva blu non è sovrapposta alla parte di andata, ma evidenzia un chiaro spostamento verso valori più elevati.

In definitiva il componente denota una tendenza al creep in condizioni di temperatura elevata, unitamente ad una deformazione che, in considerazione della diminuzione di modulo elastico del materiale all'aumentare della temperatura, deve essere valutata con attenzione per verificare l'eventuale uscita dai limiti di sicurezza. Fatte queste considerazioni sulle condizioni operative del materiale, il metodo AFT è in grado di fornire indicazioni sia riguardo all'eventualità o meno di variare la formulazione tenendo conto dell'effetto di creep, sia riguardo alla possibilità di ottimizzare la struttura in funzione dei carichi cui è sottoposta.

4. Conclusioni

La presente trattazione ripercorre i principali risultati ottenuti in un progetto di ricerca volto alla messa a punto di strumenti innovativi, per affrontare efficacemente il problema della valutazione della durata in vita di materiali e componenti, quando sottoposti a processi di fatica.

Il cuore del progetto è rappresentato dallo sviluppo del metodo di fatica accelerato, ovvero una metodologia di analisi, che, pur con limiti oggettivi, è in grado di sostituire in prima battuta i test di fatica convenzionale nella valutazione di materiali plastici compositi. Tale metodo è, ad esempio, in grado di svolgere una prima selezione nel caso di formulazioni che si differenziano per fornitore della matrice o filler, fornendo indicazioni riguardo alla tendenza a subire un processo di danneggiamento.

Con l'obiettivo di generalizzare i risultati delle prove sperimentali, è stato sviluppato un modello costitutivo in grado di interpretare, attraverso l'andamento dei parametri, il comportamento dei diversi materiali. Accanto a questo approccio, è stato iniziato un lavoro di ampio respiro che prevede lo sviluppo di reti neurali dinamiche. Tale strumento, che si sta dimostrando efficace nel trattamento dei dati sperimentali, potrebbe essere estremamente potente nella descrizione di processi più complessi, a partire dal comportamento di componenti strutturali in condizioni operative (ad esempio la vasca della lavatrice) fino alla simulazione di processi di produzione industriale.

Nell'ultima parte sono stati riportati i risultati di misure di deformazione condotte su una struttura in condizioni operative per mezzo degli strain gauges. Questa parte ha lo scopo di evidenziare un possibile *modus operandi* implementabile su scala aziendale, nella fase di progettazione o verifica di strutture e materiali.