



SVILUPPO DI UN CODICE PER LA PREVISIONE DELLA VITA A FATICA DI LAMINATI IN COPOSITO IN CONDIZIONI DI CARICO MONO- ASSIALE

Committente:

DALLARA S.p.A.

Responsabile scientifico: Prof. Marino Quaresimin

GIUGNO 2016

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	2
2. DESCRIZIONE DEI MODELLI UTILIZZATI.....	4
3. ISTRUZIONE DEL CODICE.....	8

BOLZA



1. INTRODUZIONE

Il software è uno strumento utile alla progettazione di componenti in materiale composito sottoposti a carico ciclico, sia ad ampiezza costante che di tipo spettro. Esso, sulla base del modello proposto da modello *Quaresimin et al. (2004)* è in grado di fornire il valore del danno (secondo Miner) di un componente, una volta forniti in input le proprietà statiche del materiale e la storia di carico.

Il flow-chart presente in figura 1.1 mostra il flusso dei dati all'interno del software. Come da prassi, nei parallelogrammi sono indicati i dati in input. La procedura si può schematizzare nei seguenti punti:

- 1) Lettura dello spettro di carico in input;
- 2) Conteggio dei cicli (è possibile scegliere il metodo) e individuazione dei blocchi di carico in base alla tensione massima e al rapporto di ciclo (R);
- 3) Lettura dei dati in input relativi al materiale: lay-up (fibre-dominated o matrix dominated), tipo di fibra e matrice, architettura e tensione di rottura;
- 4) Tramite il database di Quaresimin et al., individuazione dei gruppi relativi alla tipologia di materiale, lay-up e architettura del materiale in uso;
- 5) Analisi del blocco di carico i-esimo (caratterizzato da $\sigma_{\max,i}$ e R_i) tramite il modello di Quaresimin et al.;
- 6) Se il valore R_i è già presente nei gruppi individuati, viene calcolato il rapporto di fatica corrispondente ($\phi_{50\%}$ o $\phi_{90\%}$, a seconda della probabilità di sopravvivenza scelta);
- 7) Se R_i non è presente nei gruppi individuati si calcola $\phi_{50\%}$ o $\phi_{90\%}$ sulla base di un'interpolazione dei dati per i valori di R disponibili;
- 8) Calcolo della curva di fatica semplificata secondo il modello di Quaresimin et al.;
- 9) Calcolo del valore del danno D_i del blocco i-esimo secondo la regole di Miner;
- 10) Ripetizione degli step 5)-9) fino ad esaurimento dei blocchi di carico individuati;
- 11) Calcolo del valore del danno dovuto all'intero spettro di carico in input, e del numero di ripetizioni dello stesso fino a rottura del componente;

Nel paragrafo successivo saranno analizzati nel dettaglio i vari passaggi e i modelli utilizzati.

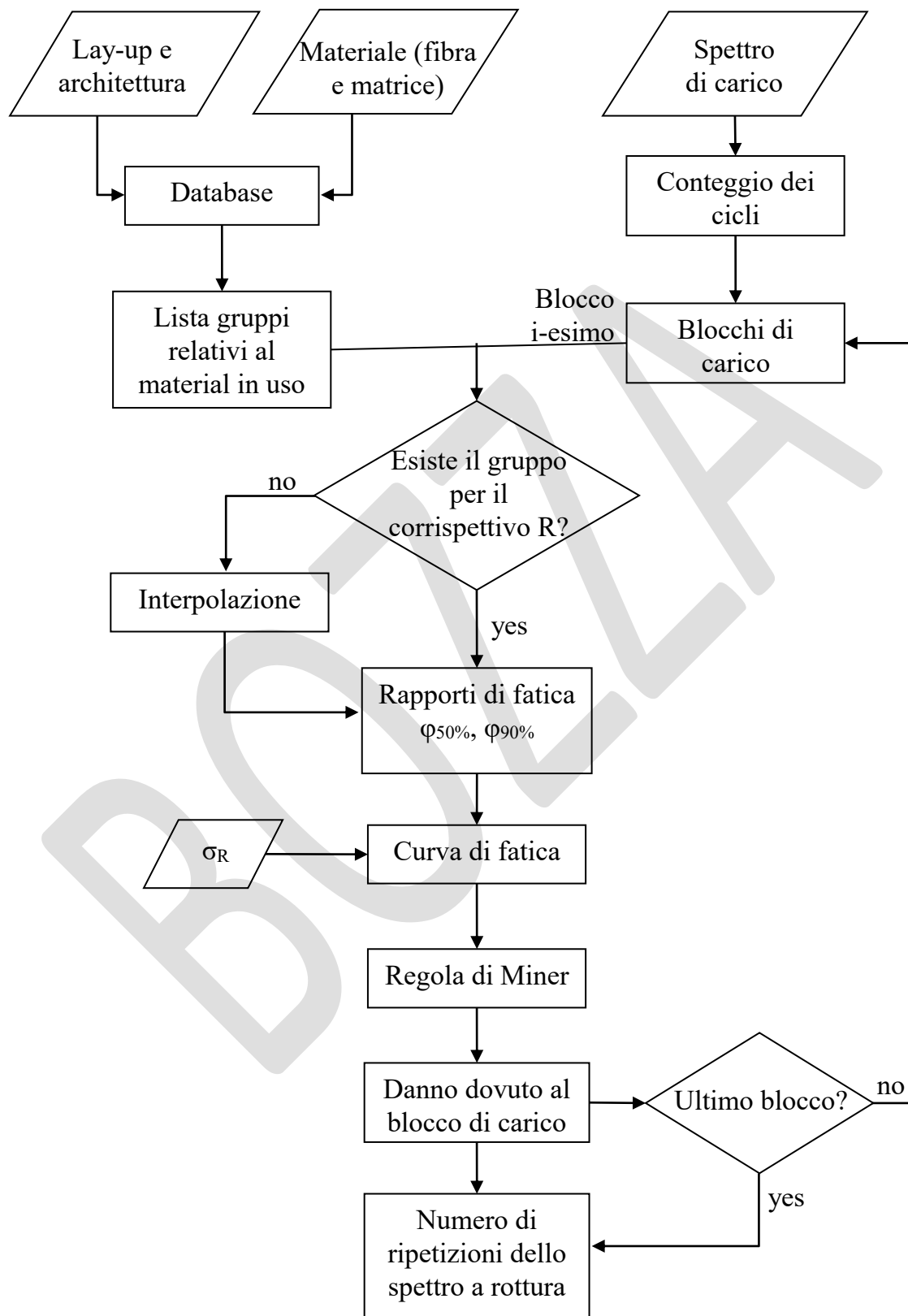


Fig.1: Flow chart del software

Il database è scritto in linguaggio SQL(lite) e quindi modificabile con un qualsiasi software in grado di leggere i file *.db con questo linguaggio. COMPFAT presenta comunque alcuni tools per la gestione dei dati. Al suo interno stono stipati i 29 gruppi originali presenti nell'articolo di Quaresimin et al. (Fig. 2).

Group	R	Fibre	Matrix	Behav.	Fibre archit.	$\Phi_{,50\%}$	$\Phi_{,90\%}$	T σ	N° data	N° series
1	0	Carbon	TP	FD	UD	0.611	0.563	1.177	47	9
2	0	Carbon	TP	MD	UD	0.394	0.324	1.480	106	13
3	0	Glass	TS	FD	UD	0.365	0.287	1.620	29	3
4	0	Glass	TS	MD	UD	0.267	0.199	1.927	86	13
5	0	Glass	TS	MD	W	0.311	0.228	1.870	186	16
6	0	carbon	TS	FD	W	0.680	0.584	1.356	73	11
7	0	carbon	TP	FD	W	0.811	0.781	1.067	7	1
8	0	glass	TP	FD	W	0.507	0.446	1.296	23	2
9	0.1	carbon	TS	FD	UD	0.679	0.570	1.417	217	11
10	0.1	carbon	TS	MD	UD	0.418	0.292	2.037	97	10
11	0	glass	TS	FD	W	0.266	0.198	1.808	108	5
12	0.5	carbon	TS	FD	UD	0.698	0.553	1.593	32	3
13	0.5	carbon	TS	MD	UD	0.714	0.580	1.516	13	1
14	>1	carbon	TP	FD	UD	0.557	0.533	1.235	6	1
15	>1	carbon	TP	MD	UD	0.404	0.319	1.603	16	3
16	>1	glass	TS	FD	UD	0.510	0.406	1.572	28	2
17	>1	glass	TS	MD	UD	0.394	0.300	1.720	44	3
18	-0.5<R<0	carbon	TS	FD	UD	0.489	0.375	1.705	57	3
19	-1<R<-0.5	carbon	TS	FD	UD	0.379	0.329	1.324	21	2
20	-1	carbon	TS	FD	UD	0.372	0.284	1.704	50	4
21	-1	glass	TS	FD	UD	0.316	0.270	1.374	27	2
22	-1	glass	TS	MD	UD	0.300	0.242	1.540	29	2
23	-1	carbon	TS	FD	W	0.455	0.358	1.547	29	2
24	-1	carbon	TS	MD	W	0.246	0.211	1.359	14	1
25	-1	glass	TS	FD	W	0.237	0.218	1.185	13	2
26	-1	glass	TS	MD	W	0.187	0.157	1.424	14	1
27	<-1	carbon	TS	FD	UD	0.242	0.182	1.783	35	3
28	-∞	carbon	TP	FD	UD	0.530	0.487	1.185	16	2
29	-∞	carbon	TP	MD	UD	0.316	0.225	1.973	48	7

Fig2: Lista dei gruppi presenti in COMPFAT

2. DESCRIZIONE DEI MODELLI UTILIZZATI

Metodi di conteggio

Per passare da uno spettro di carico alla storia a blocchi c'è la possibilità di utilizzare tre differenti metodi di conteggio, in ordine dal più semplice:

- Simple Range
- Peak & Valley
- Rainflow

Prima di utilizzare i metodi di conteggio il software 'pulisce' lo spettro salvando solo i valori relativi agli estremanti ed eliminando quindi tutti i dati intermedi. Tutti i metodi implementati forniscono in output l'elenco dei singoli blocchi di carico, specificandone i valori di tensione massima, media, ampiezza e rapporto di ciclo (R).

Simple range

Si tratta della soluzione più semplice: partendo dal primo punto assume come alternanza (mezzo ciclo) il percorso tra due successivi estremanti. La media viene di conseguenza assunta come il valore medio tra i due estremi di ogni alternanza.

Peak & valley

Questo metodo è molto semplice come il precedente, ma il conteggio avviene con un maggior vantaggio di sicurezza:

1. Calcolo della media degli estremanti dello spettro
2. Identificazione dei massimi e minimi locali
3. Eliminazione dei massimi sotto al valore medio e i minimi al di sopra di esso
4. Calcolo del primo ciclo come differenza tra il massimo maggiore e il minimo minore ed eliminazione dei due punti
5. Ripetizione del punto 4 fino ad esaurimento degli estremanti

Il valore medio di ogni ciclo è dato ovviamente dalla media dei valori degli estremanti che identificano il ciclo stesso.

Rainflow

Si tratta del metodo maggiormente utilizzato in letteratura, fornisce lo stesso output del metodo dei serbatoi. L'algoritmo procede come segue:

1. Legge il valore di estremanti successivi fino ad averne almeno tre, se lo spettro è composto da meno di tre valori si passa al punto 6
2. Una volta ottenuti almeno tre valori si indica con $Y=|S-A|$ la prima alternanza, con $X=|A-B|$ la seconda
3. Se Y è maggiore si riparte dal punto 1, leggendo un altro estremante, altrimenti si passa al punto 4
4. Se Y contiene l'estremante iniziale dello spettro si considera mezzo ciclo con range Y e si elimina il primo estremante S (si indicherà con S il primo estremante rimanente)
5. Se Y non contiene S allora si considera un ciclo intero con range Y e si riparte da 1
6. I range non considerati vanno conteggiati come mezzo ciclo. La tensione media viene conteggiata, ovviamente, come il valore medio tra picco e valle, il rapporto di ciclo e ogni altro parametro sono di conseguenza univocamente determinati

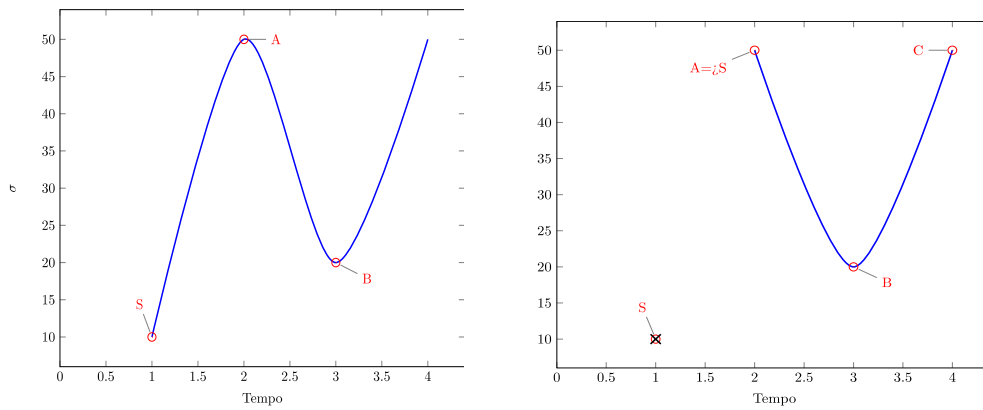


Fig. 3: Metodo Rainflow

Modello Quaresimin et al.

Come già menzionato, alla base del software c'è il modello *Quaresimin-Ricotta-Susmel* (2004). Esso si basa sull'individuazione di gruppi omogenei in termini di materiali, architettura, tipo di lay-up (fibre-dominated o matrix-dominated) e rapporto di ciclo (R). Ciascun gruppo è caratterizzato da un valore del rapporto di fatica definito come

$$\varphi_{PS\%, 2 \cdot 10^6} = \frac{\sigma_{max, 2 \cdot 10^6, PS\%}}{\sigma_R}$$

Il termine $\sigma_{max, 2 \cdot 10^6, PS\%}$ indica il valore massimo di ciclo in corrispondenza ad una vita di $2 \cdot 10^6$ cicli con una probabilità di sopravvivenza PS% (nel database sono presenti i valori per PS = 50% e 90%). Con σ_R è indicata la resistenza statica; a seconda che la tensione media sia positiva o negativa sarà utilizzata la resistenza in trazione piuttosto che in compressione.

Noto il rapporto di fatica e la resistenza statica del materiale da utilizzare, è possibile tracciare una curva di fatica semplificata che mette in relazione la tensione massima di ciclo con il numero di cicli a rottura, tramite un'equazione tipo Wohler

$$\sigma_{max}^k \cdot N_f = C$$

Il procedimento, illustrato in fig. 4, è il seguente.

- 1) Calcolo della tensione massima a $2 \cdot 10^6$ cicli con PS = 50%, identificando così un primo punto per cui passa la curva relativa al 50% PS

$$\sigma_{max, 2 \cdot 10^6, 50\%} = \sigma_R \cdot \varphi_{50\%}$$

- 2) Il secondo punto della curva è rappresentato da $N = 1$ ciclo e una tensione pari alla resistenza statica, σ_R .

- 3) Calcolo della pendenza inversa della curva k

4) Per il calcolo della curva relativa al 90% PS, si calcola la tensione a $2 \cdot 10^6$ cicli

$$\sigma_{\max, 2 \cdot 10^6, 90\%} = \sigma_R \cdot \Phi_{90\%}$$

e si traccia (in un diagramma doppio-logaritmico) la parallela alla curva del 50% PS, passante per il nuovo punto trovato

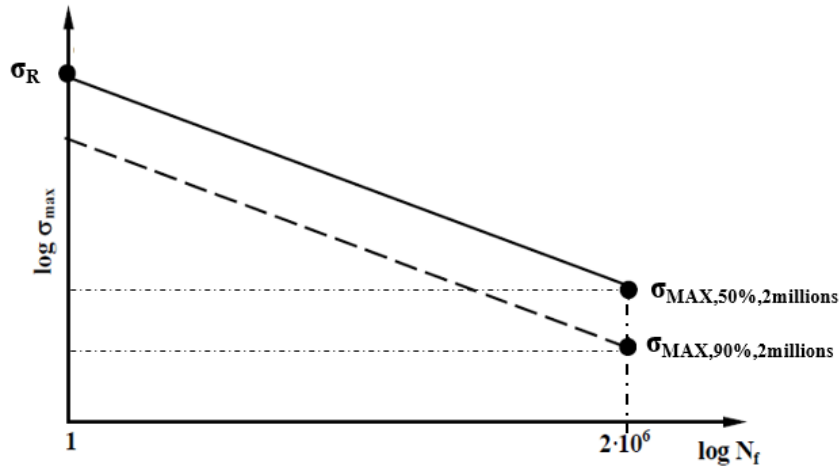


Fig.4 Curva di fatica semplificata

Il vantaggio del modello è che richiede in input solo la resistenza statica del materiale (facilmente misurabile) e la tipologia di materiale. In particolare i parametri necessari sono:

- Materiale della fibra: vetro (G) o carbonio (C)
- Tipologia di resina: termoplastica (TP) o termoindurente (TS)
- Architettura: Unidirezionale (UD) o tessuto (W)
- Comportamento: Fibre dominated (FD) o Matrix dominated (MD)

Rapporto di fatica al variare di R

Come si vede in fig.2, i gruppi presentano solo dei valori discreti di R. È molto probabile che il valore di R relativo ad un determinato blocco di carico non sia quindi presente nei gruppi nel database. In tal caso, si procede con un'interpolazione lineare dei dati per i valori di R noti, come spiegato di seguito.

Si consideri R_i il valore di R per il blocco di carico i-esimo. Innanzitutto si traccia una sorta di diagramma tipo Haigh (tensione media-ampiezza) relativo a $2 \cdot 10^6$ cicli utilizzando i valori di R noti dai gruppi del database. Immaginiamo, per esempio, di avere i gruppi relativi a due valori di R (R_1 , R_2 e R_3). Si traccia un diagramma semplificato unendo con dei segmenti i punti noti (fig. 5). Si considerano noti anche i punti sull'asse delle ascisse (σ_{Rc} , 0) e (σ_{Rt} , 0), dove σ_{Rc} e σ_{Rt} sono le resistenze statiche a compressione e a trazione. La tensione media e l'ampiezza relative al valore di R_i corrispondono quindi all'intersezione tra uno dei segmenti tracciati e la

retta passante per l'origine, avente pendenza $(1-R_i)/(1+R_i)$. Di conseguenza, dalla somma di questi due valori è possibile calcolare il valore della tensione massima a $2 \cdot 10^6$ cicli per il valore di R in questione.

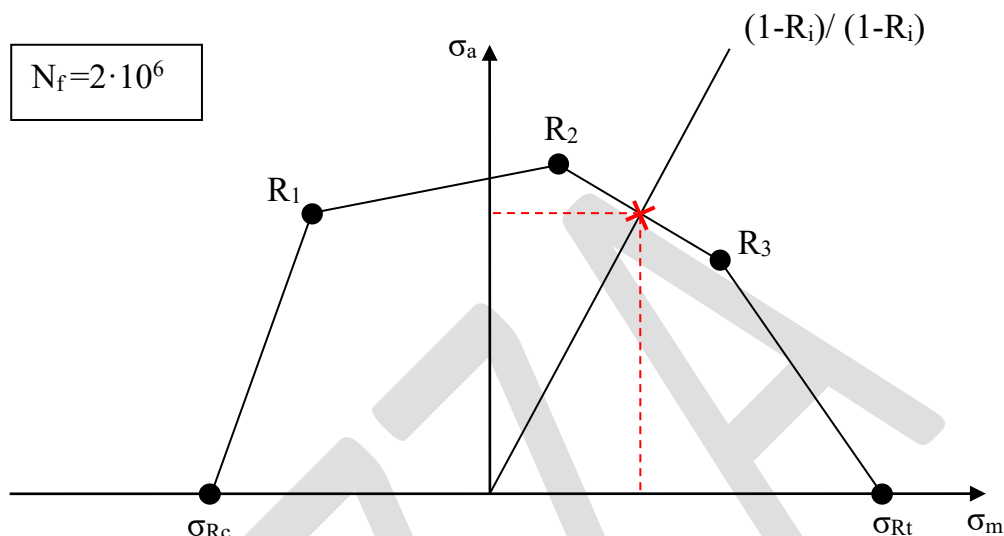


Fig. 5 Metodo di interpolazione per valutare l'influenza di R

Calcolo del danno secondo Miner

Nota la curva di fatica semplificata per un dato materiale e valore di R (R_i), è possibile, tramite l'equazione della curva, calcolare il numero di cicli a rottura ($N_{f,i}$) per la tensione massima del blocco di carico in questione. Il valore del danno si può quindi calcolare tramite la regole di Miner $D_i = n_i / N_{f,i}$, dove n_i è il numero di cicli corrispondenti al blocco i-esimo.

Una volta ripetute queste operazioni per tutti i blocchi di carico, si calcola il danno totale dello spettro come somma dei D_i dei vari blocchi. Infine il numero di ripetizioni dello spettro a rottura è pari all'inverso del danno totale calcolato.

3. ISTRUZIONI DEL CODICE

Apertura del programma

Per aprire il file COMPFAT.exe è necessario entrare nella cartella COMPFAT/main e quindi cliccare due volte sull'eseguibile. Per questione di comodità e sicurezza, si consiglia di creare un collegamento all'eseguibile (tasto destro su di esso - crea collegamento) e spostare il file creato all'interno della cartella COMPFAT (o eventualmente nel desktop o altrove a seconda dell'organizzazione personale), questo per evitare il rischio di spostare alcuni file presenti nella cartella principale del programma.

Suddivisione dell'interfaccia

L'interfaccia grafica è composta da due zone principali (Fig. 6): la pagina attiva e il Log monitor. Nella prima parte si possono fornire gli input mentre il log monitor

fornisce output o eventuali avvertimenti ed errori. Per scorrere tra le varie pagine attive si utilizzano i tre pulsanti evidenziati nello schema. Le immagini indicate possono differire nello stile dell'interfaccia a seconda del sistema operativo utilizzato e della sua versione, in ogni caso tutto ciò che è indicato è presente. Le pagine sono tre:

- Load data: dove si gestisce tutto ciò che ha a che fare coi carichi
- Material data: dove si gestisce il materiale
- Analysis: dove si procede a scegliere lo spettro e il materiale da usare e avviare l'analisi

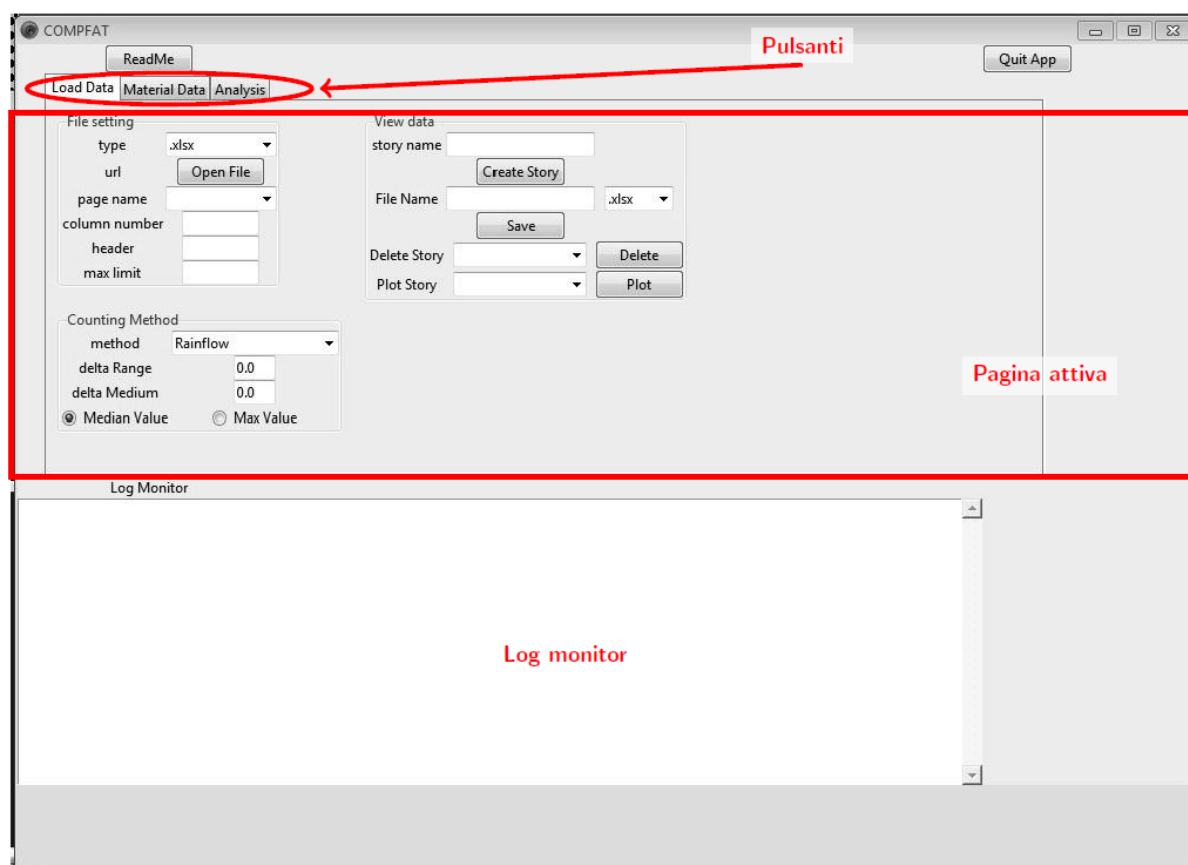


Fig. 6: Schema generale dell'interfaccia

Load Data

La prima pagina è suddivisa in tre sezioni:

- File setting: dove si seleziona il file e gli estremi per leggere i dati della storia di carico
- Counting Method: dove si seleziona il metodo di conteggio e gli eventuali parametri per raggruppare i blocchi
- View data: dove sono presenti gli strumenti per processare i dati

Nel primo settore (in alto a sinistra), scorrendo i campi dall'alto in basso, si può scegliere il tipo di file (al momento solo excel), la posizione del file (si apre una finestra di navigazione). A questo punto bisogna scegliere il nome della pagina del

file excel, quindi il numero della colonna in cui si trovano i dati (la prima colonna a sinistra è la numero 1, su excel A=1), quindi viene richiesto il numero di righe di intestazione che non verranno lette, si può usare questo campo anche per dire di trascurare alcuni valori a inizio spettro. Se si dovessero inserire un certo numero di celle vuote o con testo verrà visualizzato nel log. Infine viene indicato il numero massimo di dati da leggere.

Il settore numero 2 (in basso a sinistra) permette di scegliere tra i diversi metodi di conteggio. È possibile raggruppare i blocchi che hanno una range e una media all'interno di un certo intervallo (delta) da specificare. Il consiglio è comunque quello di mantenere pari a zero i valori nei campi relativi, in modo da avere una previsione più precisa.

Infine la terza sezione (a destra) richiede di inserire il nome alla storia di carico (nome che servirà poi per poterla recuperare nelle successive fasi) e di creare il cumulativo. Volendo si può salvare (attualmente solo in file excel) la storia suddivisa in blocchi su un file indicato nell'apposita sezione. Il file verrà posizionato nella cartella data all'interno della directory in cui è presente l'eseguibile. Gli ultimi due menu a tendina permettono di selezionare una storia di carico già creata (non necessariamente salvata su file) e cancellarla o visualizzarla graficamente (opzione al momento sospesa).

Fig. 7: Pagina Load Data

Material Data

Nella pagina per la gestione dei materiali (Figura 8), il menu a tendina sulla sinistra permette di selezionare il tipo di fibra, a quel punto, dopo aver cliccato su Search verranno visualizzati nella tabella tutti i materiali eventualmente già salvati con la fibra selezionata. Altrimenti è possibile indicare un nuovo materiale temporaneo utilizzando il tasto New Material che aprirà una finestra di dialogo in cui inserirne le proprietà (Figura 9). sRt e sRc rappresentano le tensioni di rottura del materiale a trazione e compressione. Una volta compilati tutti i campi premere il tasto insert per inserire il materiale. Sarà possibile anche salvare il materiale in un database da cui

recuperarlo in futuro, tramite il tasto Save in DB, non ancora attivo in questa versione. Per chiudere la finestra, utilizzare il tasto Quit, NON cliccare sulla X.

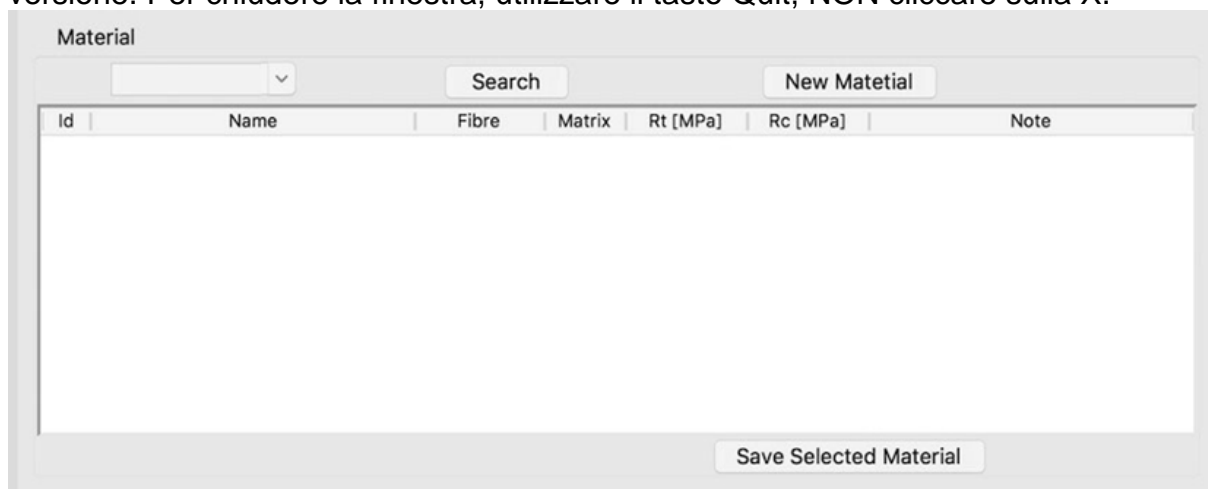


Fig. 8 : Pagina Material Data

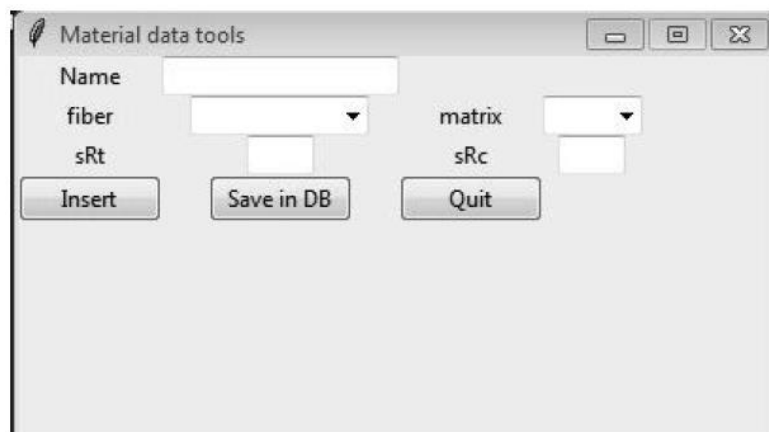


Figura 9: Finestra per l'inserimento di un nuovo materiale

Una volta chiusa la finestra il materiale compare nella lista più in basso. Questo selezionato col mouse all'interno della tabella e salvato con il pulsante in basso "Save Selected Material".

Analysis

L'ultima fase è quella di analisi. La terza pagina (Figura 10) presenta una serie di opzioni da scegliere sulla prima riga: il materiale tra la lista di quelli salvati, il comportamento (FD/MD), l'architettura (UD/W) e la percentuale statistica con cui eseguire l'analisi (50/90%). IL tipo di comportamento (FD o MD) va scelto dall'utente in base al lay-up. Secondo il modello di Quaresimin et al., si ha comportamento FD se il laminato presenta almeno il 50% di strati orientati a 0° (per UD) o a 0° e 90° (per woven). Cliccando su Extract Group verranno visualizzati i gruppi corrispondenti alle caratteristiche scelte. Ogni volta che si vuole modificare una delle scelte

precedenti va ri-cliccato il pulsante Extract Group altrimenti l'analisi verrà effettuata coi parametri precedenti.

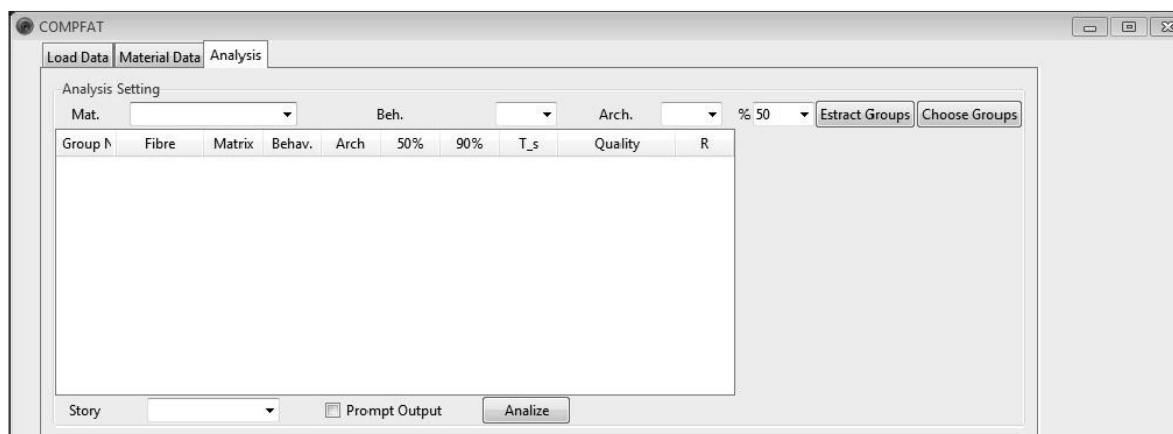


Fig. 10: Pagina Analysis

Il pulsante Choose Group apre una finestra in cui compare ancora la lista dei gruppi con diverse opzioni (Fig. 11).

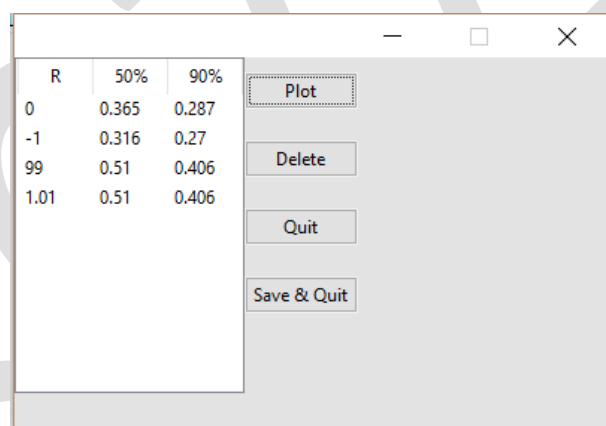


Fig. 11: Finestra "Choose groups"

È possibile innanzitutto visualizzare un grafico in cui vengono plottati i gruppi su un piano σ_a - σ_m (tipo Haigh) normalizzato al valore di resistenza statica del materiale; al di sopra di ogni punto c'è l'indicazione del valore di R relativo (Figura 12). Se si identificano dei gruppi che si vogliono eliminare dall'analisi, perché ritenuti fuori trend ad esempio, è possibile chiudere il suddetto grafico, selezionare il gruppo nella finestra "choose groups" e premere "delete". Cliccando "save and quit" si salva la modifica (solo per l'analisi corrente), e si chiude la finestra. ATTENZIONE: Non chiudere la finestra tramite la X, ma solo tramite "quit" o "save and quit".

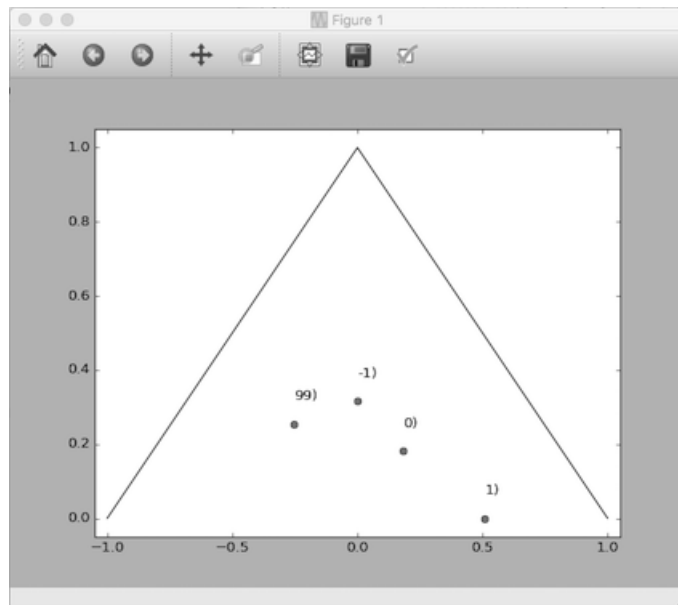


Fig. 12: Diagramma tipo Haigh normalizzato

Una volta selezionato il materiale e i gruppi, in basso si seleziona la storia a blocchi tra quelle salvate e si avvia l'analisi. Nella finestra di dialogo apparirà il danno totale e il numero di ripetizioni possibile dello spettro.