

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica Dipartimento Energia

ANALISI A FATICA ISOTERMA A BASSO NUMERO DI CICLI E A FATICA TERMO-MECCANICA

Relatori:

Prof. Cristiana Delprete

Prof. Raffaella Sesana

Prof. Eugenio Brusa

Tesi di Laurea di: Alberto Bocchiardi, matricola 244256

Anno Accademico 2018-2019

RINGRAZIAMENTI

Oggi, a poco più di una settimana dalla laurea, non posso fare a meno di fermarmi un attimo, pensare al traguardo che sto per raggiungere e ricordare tutto ciò che ho vissuto all'università: la felicità che ho provato nel superare il mio primo esame e la delusione provata quando ne fallivo uno, la fortuna di conoscere nuove persone fantastiche e ovviamente il piacere di studiare argomenti che mi hanno reso ciò che sono, un ingegnere.

Questo percorso non è tuttavia sempre stato facile da seguire ed è mio dovere ringraziare diverse persone che mi hanno aiutato e sostenuto in questi anni.

Innanzitutto voglio ringraziare la professoressa Cristiana Delprete e la professoressa Raffaella Sesana per avermi proposto una tesi molto interessante e per la loro disponibilità ad aiutarmi nel risolvere i problemi riscontrati in questi mesi. Vorrei ringraziare la mia ragazza Sonia per avermi supportato con amore, costanza e pazienza.

Secondo, ma non meno importante, è necessario sottolineare l'aiuto offertomi dalla mia famiglia. Ringrazio pertanto i miei genitori Maurizia e Silvano, grazie al loro esempio ho scelto la carriera universitaria e sempre grazie a loro sono riuscito a portarla a termine.

Ringrazio la mia nonna Giorgina per avermi aiutato molto a casa.

Ringrazio mia sorella Stefania per essere semplicemente la miglior sorella del mondo.

Infine ringrazio anche la mia cugina Clara ed i suoi genitori per avermi accompagnato con affetto durante tutti questi anni.

SOMMARIO

Lo studio della vita a fatica isoterma, è il soggetto di un considerevole numero di pubblicazioni in ambito scientifico e molteplici modelli di danneggiamento sono stati proposti nel corso degli anni; tuttavia il numero di dati per calibrare questi modelli è ancora adesso esiguo e disponibile in diversi formati. Gli obbiettivi della seguente tesi sono pertanto molteplici: 1) analizzare pregi e difetti di diversi modelli di danneggiamento uniassiali e fornire indicazioni su quale modello sia appropriato usare in diverse condizioni di prova. 2) fornire diversi metodi di calibrazione dei coefficienti presenti nella legge costitutiva per permettere, in base ai dati raccolti, di implementare i vari modelli. 3) presentare un codice Matlab (Fast Life) in cui sono sviluppati i modelli e i processi di calibrazione studiati. 4) studiare, a seguito di prove sperimentali a fatica termomeccanica, quale modello sia in grado di fornire stime migliori del numero di cicli a rottura del materiale. Il quarto obbiettivo della tesi tuttavia è risultato impossibile da portare a termine a causa della mancanza di un'adeguata strumentazione. I modelli studiati sono sette: Basquin-Manson-Coffin, Morrow, Smith-Watson-Topper, Skelton, Taira, Gocmez-Awarke-Pischinger ed un Nuovo modello di danneggiamento sviluppato dalle ingegnere Delprete e Sesana. Nelle conclusioni sono spiegate le difficoltà incontrate durante le prove sperimentali ed è proposto un possibile piano di prove sperimentali termo-meccaniche da effettuare per valutare la precisione dei modelli.

Indice

1	Mo	delli di	i danneggiamento	4
	1.1	Model	llo di Basquin-Manson-Coffin	6
	1.2	Model	llo di Morrow	7
	1.3	Model	llo di Smith-Watson-Topper	7
	1.4	Model	llo di Skelton	8
	1.5	Model	llo di Taira	9
	1.6	Model	llo di Gocmez-Awarke-Pischinger	10
	1.7	Nuovo	o modello di danneggiamento	11
		1.7.1	Effetto della tensione media e della deformazione media	11
		1.7.2	Effetto della temperatura	12
2	Pro	gramn	na Fast Life	15
	2.1	Diagra	amma di flusso di Fast Life	15
	2.2	Fast I	ife	29
		2.2.1	Basquin-Manson-Coffin/Morrow	29
		2.2.2	Smith-Watson-Topper	32
		2.2.3	Skelton	37
		2.2.4	Gocmez-Awarke-Pischinger	39
		2.2.5	Taira	48
		2.2.6	Nuovo modello di danneggiamento	53
3	Cor	nclusio	ni	63
Bi	iblios	rafia		67

Elenco delle figure

2.1	"BMC_tit1"	29
2.2	"BMC_tar1"	30
2.3	"BMC_tar2" \dots	30
2.4	"BMC1"	31
2.5	"BMC"	31
2.6	"BMC6"	31
2.7	"BMC16"	32
2.8	"SWT_tit1"	32
2.9	"SWT1"	33
2.10	"SWT2"	33
2.11	"SWT3"	34
		35
2.13	"SWT_tar2"	35
2.14	analisi di regressione deformazione plastica	36
2.15	analisi di regressione deformazione elastica	37
2.16	Skelton_tip2	38
2.17	Skelton11	39
2.18	Skelton_results	40
2.19	Gocmez_tit1	41
2.20	Gocmez_1	41
		42
2.22	Gocmez_results	42
2.23	Gocmez_tar1	43
2.24	Gocmez_tarla	44
2.25	Gocmez_tar2	45
2.26	Gocmez_tar2a	45
2.27	Gocmez_tar3	46
2.28		

2.29	Gocmez_tar5	47
2.30	Taira_start	49
2.31	Taira_1	49
2.32	Taira_2	50
2.33	Taira_tar1	50
2.34	Taira_tar2	51
2.35	Taira_tar3	52
2.36	Taira_tar4	52
2.37	Taira_tar5	53
2.38	New_damage_model_tit2	53
2.39	New_damage_model_tit3	54
2.40	New_damage_model2	55
2.41	New_damage_model4	56
2.42	New_damage_model7	57
2.43	Curva di regressione per la tensione media	57
2.44	Curva di regressione per la deformazione media	58
2.45	New_damage_model10	59
2.46	New_damage_model10a	59
2.47	New_damage_model14	60
2.48	Curva di regressione coefficiente termico	61
2.49	New_damage_ model15	62
2.50	New_damage_ model5	62

Capitolo 1

Modelli di danneggiamento

Nell'ambito dello studio della vita a fatica a basso numero di cicli sono stati sviluppati diversi modelli di danneggiamento che differiscono l'uno dall'altro per complessità, per metodologia dello studio della vita a fatica del materiale (modelli generali e empirici), per tipi di meccanismi di danneggiamento considerati. I modelli che considerano pochi meccanismi di danneggiamento, o che trascurano l'effetto della temperatura e della tensione media (ad esempio quello sviluppato da Basquin, Manson e Coffin) sono facili da implementare in quanto hanno un numero esiguo di coefficienti empirici da calibrare, ma hanno lo svantaggio di produrre stime accettabili del numero di cicli che portano a rottura il materiale solo per specifiche condizioni di svolgimento delle prove a fatica. I pregi e i difetti sono esattamente opposti per i modelli più complessi. Da ciò si può dedurre che la scelta del criterio di danneggiamento ottimale non sia scontata, ma anzi sia necessario studiare con attenzione in base al materiale, alle condizioni di carico e alla disponibiltà di macchinari necessari allo studio delle proprietà del materiale quale modello di danneggiamento sia il più appropiato.

Gli obbiettivi della seguente tesi sono molteplici:

- spiegare pregi e difetti di diversi modelli di danneggiamento e indicare quale modello sia più appropriato usare in diverse condizioni.
- fornire diversi metodi di calibrazione dei coefficienti presenti nella legge costitutiva per permettere, in base ai dati raccolti, di implementare i vari modelli.
- presentare un codice matlab (Fast Life) in cui sono sviluppati i modelli e i processi di calibrazione studiati.

• studiare, a seguito di prove sperimentali a fatica termomeccanica, quale modello sia in grado di fornire stime migliori del numero di cicli a rottura del materiale.

1.1 Modello di Basquin-Manson-Coffin

Il modello formulato da Basquin, Manson e Coffin (BMC) è uno dei primi modelli di danneggiamento esistenti ed è anche di facile implementazione e taratura. Il modello di BMC è un modello empirico, cioè derivato dall'analisi dei dati sperimentali: l'aumento della deformazione imposta è inversamente proporzionale al numero di cicli che portano a rottura il materiale.

L'equazione formulata da Basquin-Manson-Coffin e caratteristica del loro modello è:

$$\epsilon_{\rm a} = \frac{\sigma_{\rm f}'}{E} \times (2N_{\rm f})^b + \epsilon_{\rm f}' \times (2N_{\rm f})^c \tag{1.1}$$

dove $\Delta \epsilon_{\rm a}$ è la deformazione totale, $\sigma_{\rm f}'$ è il coefficiente di resistenza a fatica del materiale, E è il modulo elastico, b è l'esponente di resistenza a fatica, $N_{\rm f}$ è il numero di cicli necessari per rompere il provino, $\epsilon_{\rm f}'$ è il coefficiente di duttilità a fatica e c è l'esponente di duttilità a fatica. La deformazione totale si può scomporre in due componenti: deformazione elastica($\Delta \epsilon_{\rm el}$) e deformazione plastica($\Delta \epsilon_{\rm pl}$).

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_{\rm el} + \Delta \epsilon_{\rm pl} \tag{1.2}$$

$$\Delta \epsilon_{\rm el} = \frac{\sigma_{\rm f}'}{E} \times (2N_{\rm f})^b \tag{1.3}$$

$$\Delta \epsilon_{\rm pl} = \epsilon_{\rm f}^{'} \times (2N_{\rm f})^{c} \tag{1.4}$$

Uno dei limiti del modello di BMC è la dipendenza dei parametri dell'equazione dalla temperatura: le curve di Basquin sono caratteristiche solo della temperatura a cui sono stati tarati i parametri. Inoltre il danno aggiuntivo generato dalla tensione media positiva (cioè di tensione) è trascurato, così come l'effetto benefico generato se la tensione media è negativa (cioè di compressione).

1.2 Modello di Morrow

Al fine di non trascurare l'effetto della tensione media sul numero di cicli a rottura di un materiale il modello BMC è stato modificato da Morrow introducendo un'ampiezza di sollecitazione equivalente calcolata secondo la formula sottostante:

$$\sigma_{\rm ar} = \frac{\sigma_{\rm a}}{1 - \frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm f}'}} = \frac{\sigma_{\rm a}\sigma_{\rm f}'}{\sigma_{\rm f}' - \sigma_{\rm m}} \tag{1.5}$$

Dove σ_{ar} è la tensione alternata equivalente e i restanti coefficienti ed esponenti sono i medesimi del modello BMC. Sostituendo la precedente equazione nella formula 1.1 si ottiene la formulazione del modello di Morrrow.

$$\epsilon_{\mathbf{a}} = \frac{\sigma_{\mathbf{f}}' - \sigma_{\mathbf{m}}}{E} (2N_{\mathbf{f}})^b + \epsilon_{\mathbf{f}}' (\frac{\sigma_{\mathbf{f}}' - \sigma_{\mathbf{m}}}{\sigma_{\mathbf{f}}'})^{\frac{c}{b}} (2N_{\mathbf{f}})^c$$

$$(1.6)$$

È giusto notare che i parametri dell'equazione sono i medesimi del modello BMC pertanto il processo di calibrazione sarà lo stesso usato per il modello BMC. Dato che per il modello di Morrow il processo di calibrazione è equivalente a quello del modello BMC esso si può inserire nell'elenco dei modelli la cui implementazione prevede l'uso di poche prove sperimentali; tuttavia esso è fortemente legato alla temperatura a cui sono sottoposte le prove in quanto nella formulazione del modello la temperatura non è presente.

1.3 Modello di Smith-Watson-Topper

Un altro modello nel quale è considerato l'effetto sulla vita a fatica generato dalla tensione media è il modello empirico proposto nel 1970 da Smith, Watson e Topper[4]. La tensione media è inclusa nella loro formulazione tramite l'inserimento della variabile tensione massima (σ_{max}):

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{m}} + \sigma_{\text{a}} \tag{1.7}$$

Dove σ_m è la tensione media e σ_a è la tensione alternata. Ispirandosi alla formulazione di Neuber,ma includendo la tensione massima nella loro formulazione Swith Watson e Topper hanno proposto il seguente modello:

$$\sigma_{\max} \epsilon_{a} = \frac{(\sigma_{f}^{'})^{2}}{E} (2N_{f})^{2b} + \sigma_{f}^{'} \epsilon_{f}^{'} (2N_{f})^{b+c}$$
(1.8)

Questo modello, come quello proposto da Morrow e quello di Basquin, Manson e Coffin non considera il danno aggiuntivo generato all'aumentare della temperatura.

1.4 Modello di Skelton

Il modello di danneggiamento di Skelton [5] è un modello di danneggiamento energetico, cioè sfrutta la dipendenza della propagazione delle cricche dall' energia dissipata dal materiale. Skelton infatti ha dimostrato che, l' energia totale disspata da un materiale prima di giungere a rottura è costante ed indipendente sia dal carico che dalla deformazione imposti. Noto il valore dell'energia totale dissipata e calcolata l'area del ciclo di isteresi stabilizzato, è possibile ottenere il numero di cicli a rottura del materiale.

Il modello di Skelton può essere pertanto sintetizzato dalle due seguenti formule:

$$U_{\rm i} = \int \!\! \sigma d\epsilon \tag{1.9}$$

$$N_{\rm f} = K_{\rm s}/U_{\rm i} \tag{1.10}$$

Dove K_s è l'energia totale dissipata dal materiale fino alla rottura del provino e U_i è l'energia dissipata dal ciclo stabilizzato.

Skelton ha inoltre ideato una formulazione analitica del modello:

$$U_{\rm i} = \frac{\Delta \sigma \Delta \epsilon_{\rm p}}{1+\beta} \tag{1.11}$$

Partendo dai valori di tensione e deformazione ottenuti da un' unica serie di prove (cioè imponendo un unico valore di tensione o deformazione) a fatica isoterma, il software Fast Life è in grado di calcolare l'energia totale dissipata da quel particolare materiale. Fast Life inoltre è dotato di un'opzione alternativa per la stima dell' energia dissipata. Tale modello tuttavia non tiene conto del meccanismo di danneggiamento dovuto al creep, e quindi è accurato solo quando la temperatura di esercizio è sufficientemente bassa (il creep diventa rilevante quando la temperatura è maggiore di 1/3 della temperatura di fusione). L'effetto dovuto al valore medio della tensione è anch'esso trascurato e pertanto tale modello risulta preciso quando la sollecitazione è alternata simmetrica. Per risolvere questi due difetti le ingegnere Sesana e Delprete hanno proposto un nuovo modello di danneggiamento[2].

1.5 Modello di Taira

Tra i modelli di danneggiamento per la fatica a basso numero di cicli e, soprattutto, per la fatica termomeccanica una menzione particolare va fatta per il modello proposto da Taira[6]. Tale modello è particolare in quanto, partendo dall'analisi della struttura dei materiali durante le prove a fatica sia termomeccanica che isoterma a differenti livelli di temperatura, propone una formula per prove a fatica termomeccanica trattandole come prove a fatica isoterma ad una temperatura equivalente. Nelle prove effettuate da Taira i danni riportati dal materiale variavano nettamente se la prova a fatica o a fatica termomeccanica superava un valore soglia della temperatura: oltre i 300° C nel materiale si generava un nuovo meccanismo di danneggiamento con conseguente formazione di sotto-grani che riducevano notevolmente la durata del materiale. La soglia di temperatura in cui iniziano a formarsi i grani dipende dal materiale. Per tener conto dell'aumento del danneggiamento nella formula del modello sviluppato da Taira l'esponente n assume due valori:

- pari a 2 quando la temperatura è minore della temperatura di soglia
- pari a 1 quando la temperatura è superiore alla temperatura di soglia.

La formula generale è la seguente:

$$\lambda(T)(\Delta\epsilon_{\rm p})^n N_{\rm f} = C_1 \tag{1.12}$$

Dove λ è il fattore di danneggiamneto dipendente dalla temperatura, $\Delta \epsilon_{\rm p}$ è la deformazione plastica per ogni ciclo,n è l'esponente dipendente dalla temperatura, $N_{\rm f}$ è il numero di cicli a rottura, $C_{\rm 1}$ è una costante caratteristica del materiale e indipendente dalla temperatura.

Il modello di Taira è di conseguenza molto utile per lo studio di prove a fatica termomeccanica, tuttavia, a causa della mancanza di prove a deformazione plastica costante e a vari livelli di temperatura, la sua calibrazione è risultata inattuabile.

1.6 Modello di Gocmez-Awarke-Pischinger

Il modello sviluppato da Gocmez, Awarke e Pischinger nel 2009 [7] è un modello empirico che utilizza come principale termine di danneggiamento la dissipazione di energia dovuta alla deformazione plastica nel ciclo stabilizzato. A questo termine sono aggiunti due fattori correttivi che tengono conto dell'effetto della tensione media e della temperatura massima raggiunta durante la prova a fatica.

Gocmez, Awarke e Pischinger hanno scoperto che il solo termine energetico è sufficiente a descrivere la vita a fatica se la temperatura massima della prova è inferiore a 200 °C e se la tensione media è nulla. Al fine di aumentare l'intervallo di condizioni di prova in cui si può applicare il modello la seguente formulazione del modello è stata presentata:

$$N_{\rm f} = A \times \left(\frac{\Delta W_{\rm p}}{W_{\rm p,u}} \times SCF + ADI_{\rm T}\right)^c \tag{1.13}$$

Dove $\Delta W_{\rm p}$ è l'energia dissipata nel ciclo stabilizzato dovuta alla deformazione plastica, $W_{\rm p,u}$ è l'energia dissipata dovuta alla deformazione plastica durante una prova di tensione monotona, SCF è il fattore di correzione dipendente dalla tensione media ("stress correction factor"), $ADI_{\rm T}$ è il fattore di correzione dipendente dalla temperatura, A e c sono rispettivamene il cofficiente del materiale e l'esponente del materiale.

Dalla legge costitutiva del modello si può notare che parte dell'effetto dell'aumento del danno dovuto all'aumentare della temperatura è implicitamente considerato dal termine $W_{p,u}$ il cui valore diminuisce all'aumentare della temperatura. La formulazione per il calcolo di SCF proposta è la seguente:

$$SCF = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{UTS}} - m \times \sigma_{\text{mean}}}$$
 (1.14)

Dove $\sigma_{\rm max}$ è la tensione massima raggiunta nel ciclo stabilizzato, $\sigma_{\rm UTS}$ è il carico di rottura, m è la sensibilità del materiale all'effetto della tensione media e $\sigma_{\rm mean}$ è la tensione media del ciclo stabilizzato. Oltre il 35-50 % della temperatura di fusione in °K la descrizione della vita a fatica tramite la sola componente energetica diventa imprecisa a causa del fenomeno del creep. Gocmez, Awarke e Pischinger hanno proposto la seguente formulazione del coefficiente $ADI_{\rm T}$ dipendente dalla temperatura:

$$ADI_{\rm T} = \Delta W_{\rm p} \times \left[\frac{exp\left(\frac{-T_{\rm act}}{-T_{\rm max}}\right)}{exp\left(\frac{-T_{\rm act}}{-T_{\rm rest}}\right)}\right]^n \tag{1.15}$$

Dove $T_{\rm act}$ è la temperatura di attivazione, $T_{\rm max}$ è la massima temperatura raggiunta durante la prova, $T_{\rm melt}$ è la temperatura di fusione del materiale e n è l'esponente che tiene conto della sensibilità del materiale al variare della temperatura. La formulazione completa del modello pertanto è la seguente:

$$N_{\rm f} = A \left(\frac{\Delta W_{\rm p}}{W_{\rm p,u}} \frac{\sigma_{\rm max}}{\sigma_{\rm UTS} - m\sigma_{\rm mean}} + \frac{\Delta W_{\rm p}}{1MPa} \left[\frac{exp\left(\frac{-T_{\rm act}}{-T_{\rm max}}\right)}{exp\left(\frac{-T_{\rm act}}{-T_{\rm melt}}\right)}\right]^n\right)^c$$
(1.16)

Nella legge costitutiva è stato inserito il termine 1MPa per rendere adimensionale la componente termica della formulazione.

1.7 Nuovo modello di danneggiamento

Nel nuovo modello di danneggiamento proposto dalle ingegnere Sesana e Delprete per tener conto dell'effetto dovuto al creep (dipendente dalla temperatura) e degli effetti dovuti alla tensione e alla deformazione media, alla formula di Skelton sono stati aggiunti due coefficienti correttivi:

$$N_{\rm f} = \frac{K_{\rm s}}{U_{\rm i}} \times f_{\rm ms} \times f_{\rm ht} \tag{1.17}$$

Dove K_s è l'energia totale necessaria a rompere il provino a temperatura ambiente (cioè la somma delle aree di tutti i cicli di isteresi fino alla rottura del materiale), U_i è l'area del ciclo stabilizzato nelle condizioni di prova, $f_{\rm ms}$ è il coefficiente della tensione-deformazione media, $f_{\rm ht}$ è il coefficiente che tiene conto dell'effetto della temperatura.

1.7.1 Effetto della tensione media e della deformazione media

Nella letteratura è ormai noto l'effetto della tensione media: se di valore positivo, cioè di trazione, la tensione media ha un effetto negativo sulla vita a fatica; se di valore negativo, cioè di compressione, la tensione ha un effetto positivo sulla vita a fatica. Questo fenomeno si spiega studiando le chricche generate nel materiale: tendono ad ingrandirsi ulteriormente se il carico medio è di trazione e a sviluppare un ulteriore resistenza all'apertura se il carico medio è di compressione. Fang e Berkovits furono tra i primi a studiare l'effetto generato dalla tensione media

sulla vita a fatica a basso numero di cicli. Nei loro studi (effettuati su Incoloy 901) viene evidenziato come la tensione media diventi influente solo quando il range della deformazione rimane sotto il valore di 0.006. Se, infatti, si effettuano esperimenti con valori di deformazione superiori al 0.006 la tensione del materiale subisce un rilassamento, che diventa tanto più rapido tanto più aumenta il range di deformazione. Sopra il valore di 0.01 di deformazione l'effetto dovuto alla tensione media diventa trascurabile.

Kujawski e Ellyin nel 1995 proposero un modello per descrivere l'effetto del valore medio della tensione:

$$f(\frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm a}}) = (1 + \alpha \frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm a}})^{2m} \tag{1.18}$$

Dove $\sigma_{\rm m}$ è la tensione media, $\sigma_{\rm a}$ è la tensione alternata, m è un parametro del materiale ed α è la sensibilità del materiale. Con questa formula, variando α e m, gli autori sono riusciti a riassumere diversi modelli formulati in precedenza.

I due autori della formula la modificarono poichè forniva risultati non conservativi quando la tensione media era negativa e proposero la seguente nuova formulazione del modello:

$$f^2 - \frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm a}} f - 1 = 0 \tag{1.19}$$

Nel modello proposto da Sesana e Delprete il fattore di danneggiamento assume la seguente formula:

$$f_{\rm ms} = f((\frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm a}}), (\frac{\epsilon_{\rm m}}{\epsilon_{\rm a}})) = [(1 + \eta \frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm a}})^h \times (1 + \xi \frac{\epsilon_{\rm m}}{\epsilon_{\rm a}})^k]^{-1}$$
 (1.20)

Dove η, h, ξ e k sono dei parametri del materiale.

1.7.2 Effetto della temperatura

Uno dei meccanismi di danneggiamento dei materiali è il creep, definito da Vercelli [3] come: "proggressiva deformazione plastica dipendente dal tempo a temperatura e tensione costanti".

Sempre Vercelli nel suo elaborato da una spiegazione più approfondita del fenomeno del creep che io ho riassiunto nelle seguenti due pagine. Il creep è composto da tre fasi, di cui la seconda è la più duratura e importante da studiare. Come si evince dalla definizione sopra riportata il creep dipende da tre variabili:

- temperatura
- tensione

• tempo

Le formulazioni per descrivere il danno da creep seguono pertanto il seguente formato:

$$f = f_2(t) \times f_1(\sigma) \times f_3(T) \tag{1.21}$$

Dove t è il tempo di carico, σ è la tensione applicata e T è la temperatura a cui è effettuata la prova a fatica. Il creep è un fenomeno strettamente legato alla temperatura, in quanto lo scorrimento non si attiva al di sotto di una data temperatura chiamata Temperatura di attivazione ($T_{\rm act}$). Sebbene tale temperatura sia misurabile, in letteratura essa viene spesso assunta pari ad un terzo della temperatura di fusione del materiale. Oltre questa temperatura si attiva, oltre a quelli già presenti, l'ulteriore meccanismo di danneggiamento del creep che riduce la durata del materiale in modo sensibile. Per descrivere al meglio questo fenomeno Dorn ha suggerito una formulazione simile alla legge di Arrhenius:

$$f_3(T) = exp(-Q/(R \times T)) \tag{1.22}$$

Dove Q è l'energia di attivazione e R è la costante di Boltzmann. La formulazione seguente è stata ripresa nel nuovo modello, ma come variabili si è preferito usare le temperature medie massime, di fusione e di attivazione:

$$f_3(T) = \frac{exp(-\frac{T_{\text{att}} - T_{\text{mean}}}{T_{\text{max}}})}{exp(\frac{-T_{\text{max}}}{T_{\text{melt}}})}$$
(1.23)

Dove $T_{\rm att}$ è la temperatura di attivazione, $T_{\rm mean}$ è la temperatura media della prova a fatica, $T_{\rm max}$ è la temperatura massima raggiunta nella prova a fatica e $T_{\rm melt}$ è la temperatura di fusione del materiale. Questa formulazione permette di considerare al meglio il fenomeno del creep in quanto al di sotto della temperatura di attivazione il fattore della temperatura è pari ad uno.

La formulazione più accettata per descrivere la dipendenza del creep dalla tensione è quella proposta da Norton, la cui validità è però limitata ai casi in cui la tensione è bassa. La formulazione proposta da Norton è la seguente:

$$f_1(\sigma) = K \times (\sigma)^m \tag{1.24}$$

Dove K e m sono due costanti caratteristiche del materiale.

Nel nuovo modello di danneggiamento tuttavia il fattore di danneggiamento è adimensionale pertanto la formula di Norton è stata modificata nel modo seguente:

$$f_1(\sigma) = \left(\frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{UTS}}}\right)^n \tag{1.25}$$

Dove σ_{max} è la tensione massima raggiunta nel ciclo stabilizzato, σ_{UTS} è il carico a rottura ed n è il parametro carartteristico del materiale.

La dipendenza del fenomeno del creep nel tempo è stata studiata in modo approfondito nel corso degli anni ed esistono diverse formulazioni per descrivere la correlazione tra creep e tempo, tuttavia per non complicare troppo il modello tale dipendenza è stata trascurata.

Nel nuovo modello di danneggiamento proposto la formulazione del danno da creep è quindi la seguente:

$$f_{\rm ht} = \left(1 + \left[\left(\frac{\sigma_{\rm max}}{UTS}^n\right) \times \frac{exp\left(-\frac{T_{\rm att} - T_{\rm mean}}{T_{\rm max}}\right)}{exp\left(\frac{-T_{\rm max}}{T_{\rm melt}}\right)} \right]^b)^{-1}$$
(1.26)

Dove b è uno dei parametri caratteristici del materiale.

Concludendo l'equazione caratteristica del nuovo modello di danneggiamento è la seguente:

$$N_{\rm f} = \left[\left(1 + \eta \frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm a}} \right)^h \times \left(1 + \xi \frac{\epsilon_{\rm m}}{\epsilon_{\rm a}} \right)^k \right]^{-1} \times \left(1 + \left[\left(\frac{\sigma_{\rm max}}{UTS}^n \right) \times \frac{exp\left(-\frac{T_{\rm att} - T_{\rm mean}}{T_{\rm max}} \right)}{exp\left(-\frac{T_{\rm max}}{T_{\rm melt}} \right)} \right]^b \right)^{-1}$$
 (1.27)

Capitolo 2

Programma Fast Life

Nel capitolo seguente viene spiegato come utilizzare il programma Fast Life per calcolare la vita a fatica e calibrare i vari modelli di danneggiamento del capitolo precedente: dopo aver mostrato come è strutturato il programma tramite un diagramma di flusso verranno spiegati, per ogni sezione del programma, i vari metodi di taratura e in generale le varie vie per calcolare la vita a fatica.

Nei grafici e nelle figure mostrate nel capitolo seguente i dati utilizzati sono stati ottenuti da prove sperimentali su una ghisa commerciale la cui composizione chimica è riportata in [3]. Tutti i modelli sono stati calibrati per questo materiale, tranne il modello di Taira per il quale i dati disponibili non erano sufficienti.

2.1 Diagramma di flusso di Fast Life

Al fine di poter ulteriormente implementare il programma "Fast Life" è necessaria la conoscenza nel dettaglio dell'attuale versione, pertanto sotto si è riportato il diagramma di flusso di "Fast Life". Nei diagrammi di flusso seguenti le pagine del programma sono raffigurate da caselle rettangolari e i pulsanti che è necessario premere per passare ad un'altra pagina di programma sono rappresentati da caselle ovali.

Il primo diagramma di flusso del programma è rappresentato nella figura sottostante.La prima pagina del programma è denominata "Run". In questa pagina è proposta la prima suddivisione dei criteri di danneggiamento: uniassiali e multiassiali.

Per quanto riguarda il ramo dei criteri multiassiali esso non è stato modificato dalla precedente versione del programma sviluppata da Vercelli, pertanto il suo

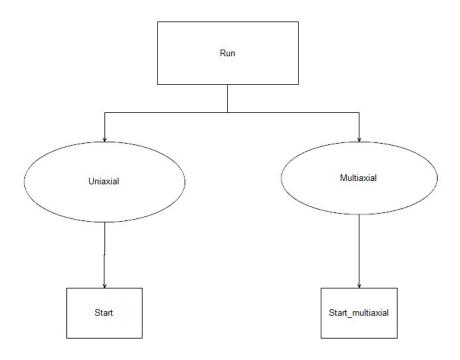
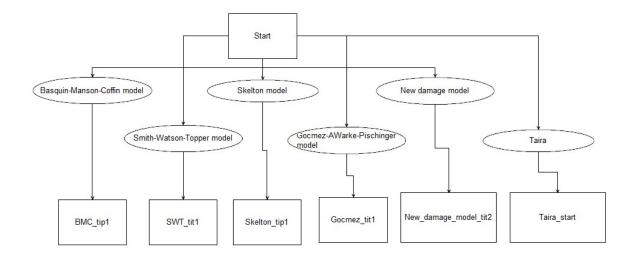
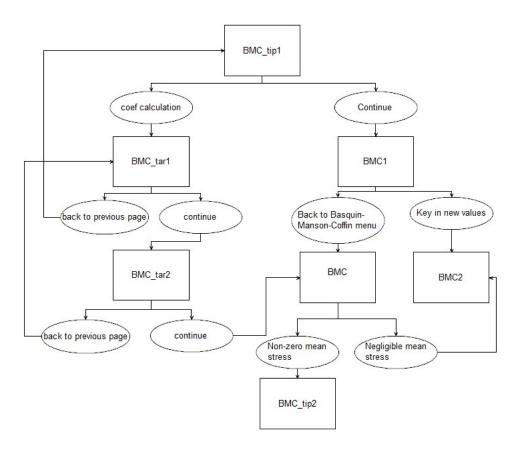
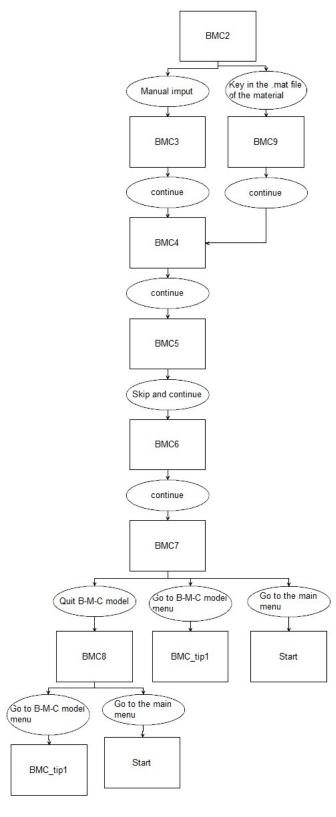


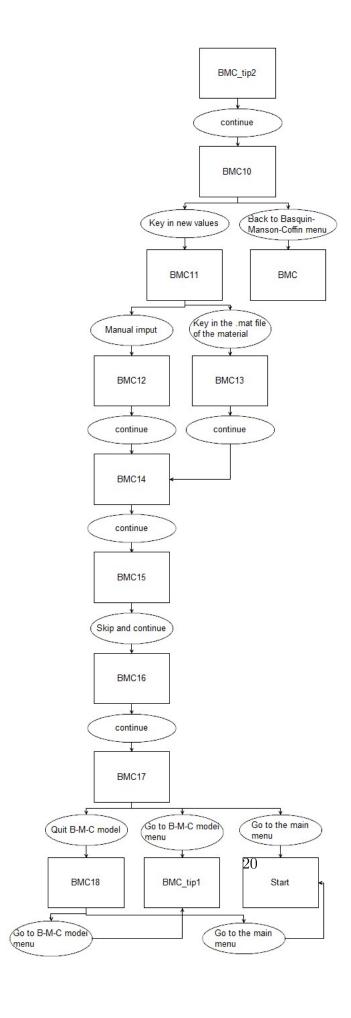
diagramma non è stato riportato. La pagina "Start" riportata nell'immagine sottostante permette all'utente di scegliere tra i criteri uniassiali sviluppati.

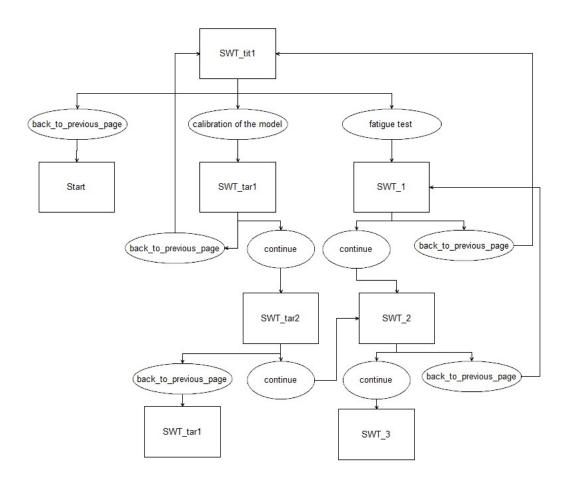


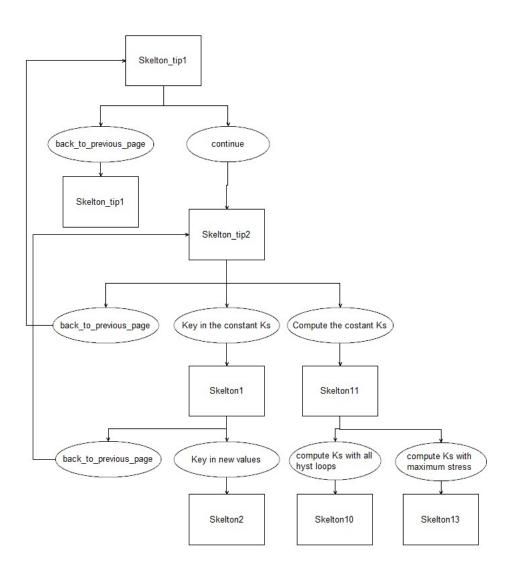
Di seguito sono riportati i diagrammi di flusso dei singoli modelli.

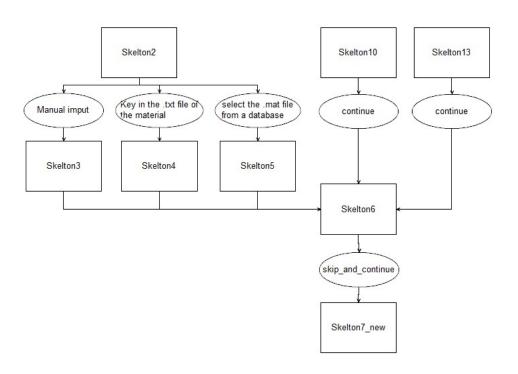


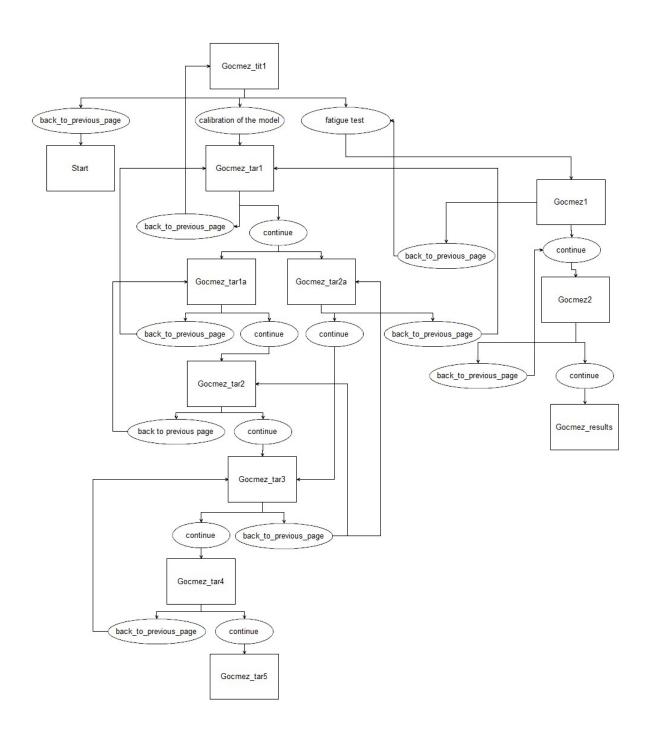


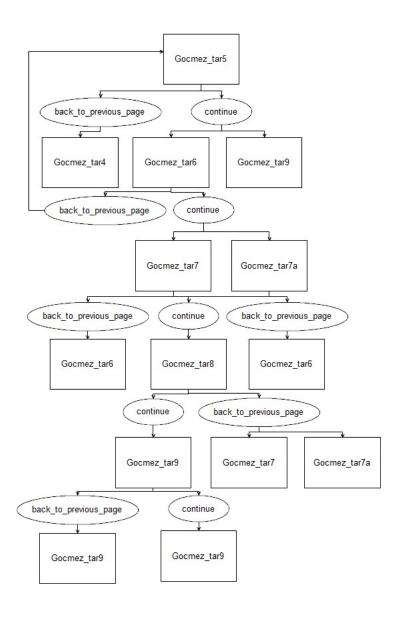


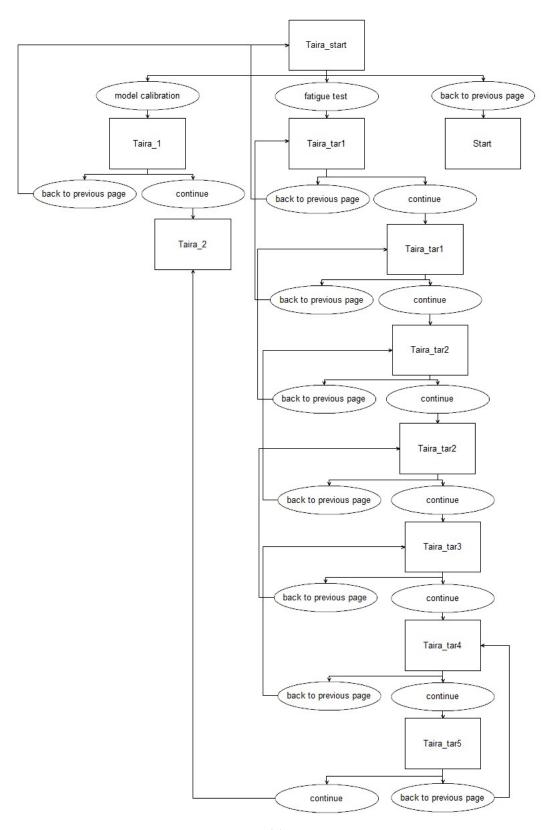


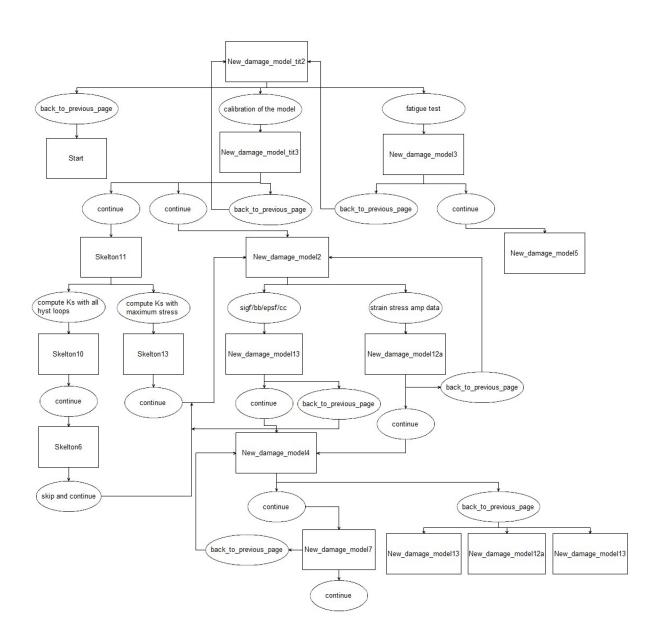


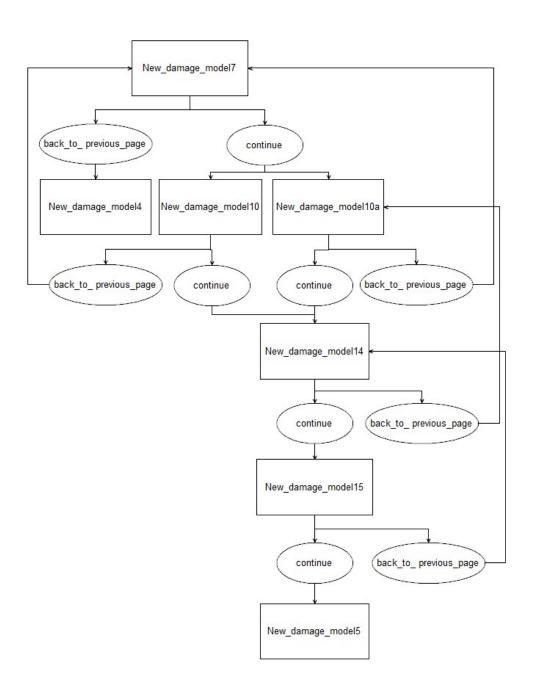












2.2 Fast Life

2.2.1 Basquin-Manson-Coffin/Morrow

Tra i modelli disponibili nel codice di "Fast Life" è presente il modello proposto da Basquin, Manson e Coffin. Selezionando l'apposita casella dalla schermata "Start" si apre la pagina del programma mostrata in Figura 2.1.

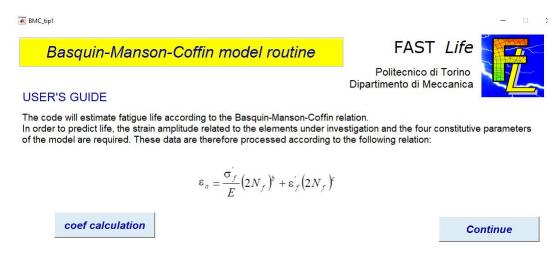


Figura 2.1: "BMC_tit1"

Nella schermata "BMC-tip1" è possibile scegliere se proseguire alla calibrazione dei coefficienti (premendo il tasto "coef calculation"") oppure, se i coefficienti sono già noti, proseguire verso il calcolo del numero di cicli a rottura di quello specifico materiale (premendo il tasto "Continue").

Ipotizzando di aver selezionato la prima delle due opzioni dovrebbe aprirsi la schermata mostrata nella Figura 2.2. Per calibrare il modello bisogna fornire, per almeno due prove differenti, le due componenti della deformazione: elastica e plastica.È inoltre necessario fornire il numero di cicli che portano a rottura il materiale nelle varie prove. Nella schermata successiva (mostrata nella Figura 2.3) si procede alla calibrazione dei coefficienti tramite un'analisi di regressione lineare (metodo dei minimi quadrati) con i dati forniti precedentemente. Ipotizzando invece di aver selezionato il tasto "Continue" nella schermata "BMC-tip1" dovrebbe aprirsi la schermata "BMC1" mostrata in Figure 2.4. In "BMC1" è possibile scegliere se proseguire con il modello di Basquin, Manson e Coffin oppure se passare al modello di Morrow se la tensione media nella prova è diversa dal valore nullo. Come si può vedere dal diagramma di flusso selezionando il pulsante "Key in new values" si prosegue all'inserimento dei parametri caratteristici del modello ($\epsilon_{\rm f}', \sigma_{\rm f}'$, ecc) e ai

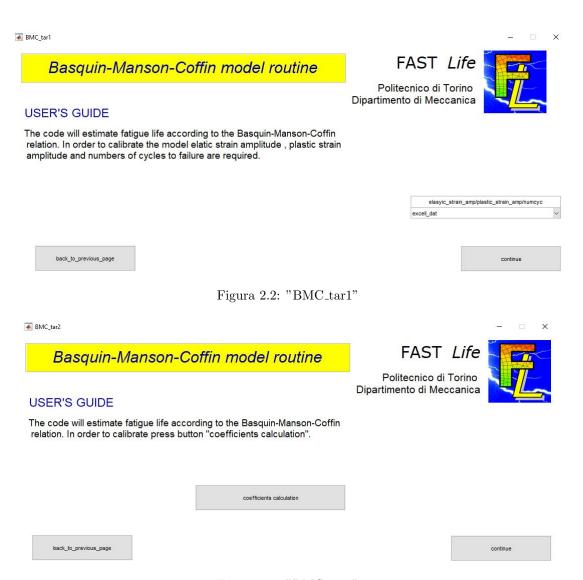


Figura 2.3: "BMC_tar2"

valori di deformazione (ϵ_a)(oppure se i parametri sono già stati ottenuti tramite calibrazione si prosegue direttamente all'inserimento dei valori di deformazione). Selezionando invece il pulsante "Back to Basquin-Manson-Coffin menu" si passa alla pagina mostrata nella Figura 2.5.

Nella pagina "BMC" è possibile tornare al modello di Basquin, Manson Coffin premendo il pulsante "Negligible mean stress" oppure premere il pulsante "Nonzero mean stress" e passare al modello di Morrow (pagina "BMC-tip2") dove è possibile inserire il valore della tensione media e calcolare la vita a fatica secondo questo modello di danneggiamento. Le pagine dove avviene il calcolo della vita a



Figura 2.5: "BMC"

fatica sono rispettivamente "BMC6" per il modello BMC e "BMC16" per il modello di Morrow.le due pagine sono mostrate nelle figure 2.6 e 2.7.
2.5.

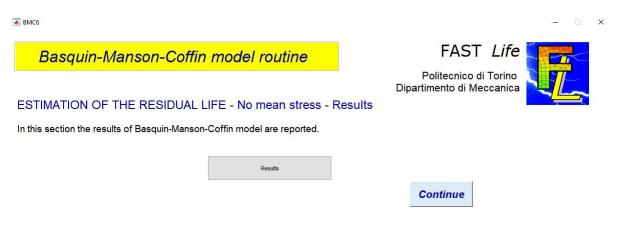


Figura 2.6: "BMC6"

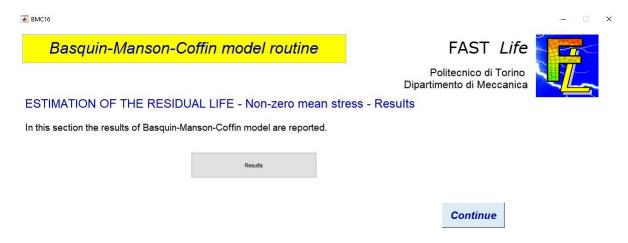


Figura 2.7: "BMC16"

2.2.2 Smith-Watson-Topper

Premendo il pulsante "Smith-Watson-Topper" nella pagina "Start" la seguente schermata (mostrata nella Figura 2.8) si apre.

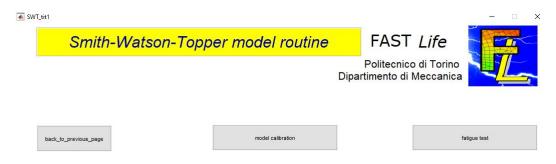


Figura 2.8: "SWT_tit1"

L'utente ha a disposizione due opzioni:

- Se i parametri del modello sono già noti è possibile, premendo il tasto "fatigue test", proseguire al calcolo del numero di cicli a rottura secondo determinate condizioni di prova .
- premendo il puslante "model calibration" si procede verso pagine del programma che permettono la calibrazione del modello. Il processo di calibrazione è equivalente a quello del modello BMC.

Se si è scelta la prima opzione la pagina del programma "SWT_1" mostrata in Figura 2.9 si apre. In questa pagina è necessario inserire i coefficienti ed esponenti

del modello SWT.

SWT_1						=
	Smith-W	<mark>′atson-Topper model</mark>	routine	FAST	Life	
	USER'S GUIDE			Politecnico d Dipartimento di Mo		
		e fatigue life according to the Smith, , the Basquin-Manson-Coffin coeffic				
		sigma_f'				
		bb esponent				
		epsilon_f				
		cc esponent				
	back_to_previous_page					continue

Figura 2.9: "SWT1"

Premendo il tasto "continue" si passa alla pagina "SWT_2" (Figura 2.10) dove è necessario inserire i dati caratteristici delle nuove condizioni di prova.

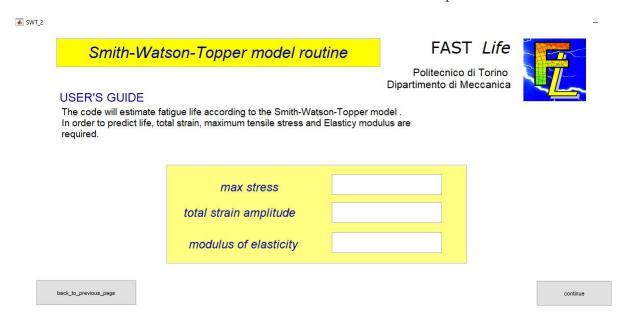


Figura 2.10: "SWT2"

Premendo nuovamente "continue" si arriva alla schermata dei risultati "SWT_3"

(Figura 2.11) dove avviene il calcolo del numero di cicli a fatica necessari a rompere il materiale secondo il modello di Smith, Watson e Topper.

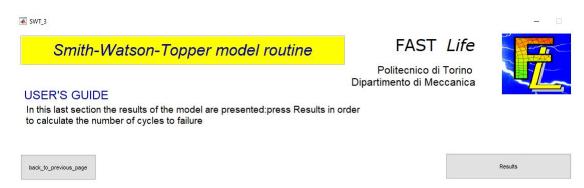


Figura 2.11: "SWT3"

Calibrazione del modello

Nel caso in cui si sia premuto il pulsante "model calibration" la pagina "SWT-tar1" (mostrata nella Figura 2.12) si apre. In questa pagina si inseriscono i parametri necessari per calibrare il modello, cioè i dati di tensione, deformazione plastica e numero di cicli a rottura. Questi dati vanno divisi in due file in modo tale da dividere la componente elstica da quella plastica: i valori di tensione applicata e i rispettivi numeri di cicli a rottura vanno inseriti nel menù "stressamplitude/numcycles-data", i valori di deformazione plastica e numero di cicli a rottura nel menù "plastic-strain-amplitude/number of cycles data".

Inseriti i dati e premuto il tasto continue si procede alla calibrazione del modello nella pagina "SWT-tar2" (mostrata in Figura 2.13).

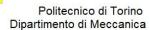
Premendo i due tasti (uno per i dati di deformazione plastica e uno per quelli di deformazione elastica) presenti sulla pagina si procede alla taratura dei coefficienti ed esponenti del modello SWT tramite l'applicazione di matlab "curve fitting toolbox". Per quanto riguarda la calibrazione della componente plastica della deformazione matlab non è in grado di fornire una stima sufficientemente accurata della curva di regressione esponenziale in quanto i valori di deformazione plastica sono prossimi allo zero. Pertanto su Fast Life si applica un logaritmo alla legge necessaria al calcolo della deformazione plastica e su "curve fitting toolbox" si riduce la regressione da esponenziale a lineare.

Per quanto riguarda i coefficienti della componente elstica è necessario inserire in



Smith-Watson-Topper model routine

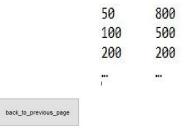
FAST Life





USER'S GUIDE

The code will estimate fatigue life according to the Smith-Watson-Topper model . In order to calibrate the model stress amplitude, number of cycles to failure and strain amplitude are required. Data must be included following the format of the example shown under this Guide. User can select the data format:txt format or xlsx format.





continue

Figura 2.12: "SWT_tar1"

Smith-Watson-Topper model routine

FAST Life





continue

USER'S GUIDE

■ SWT_tar2

Presss button "calculation of sigma_f'/b/epsilon_f'/c" to calibrate SWT parameters.

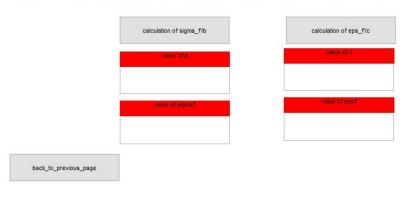


Figura 2.13: "SWT_tar2"

"curve fitting toolbox", nella sezione "Custom equation", l'equazione sottostante.

$$y = a \times (x)^b \tag{2.1}$$

dove a e b non sono altro che il coefficiente $\sigma_{\rm f}^{'}$ e l'esponente b. x e y sono dati dal programma "Fast LIfe":

$$x = 2 \times (Nf) \tag{2.2}$$

$$y = \epsilon_{\rm el}; \tag{2.3}$$

Nelle Figure 2.14 e 2.15 sottostante si possono vedere le curve ottenute dalle analisi di regressione.

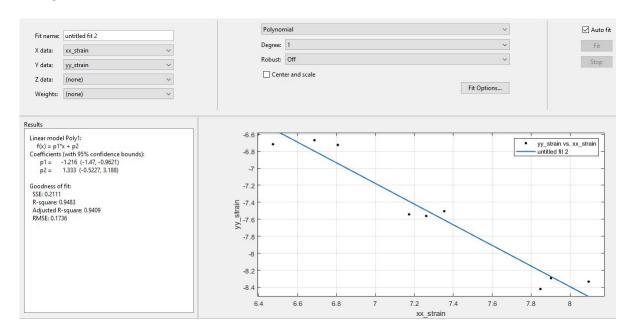


Figura 2.14: analisi di regressione deformazione plastica

I coefficienti ottenuti su "curve fitting toolbox" vanno quindi inseriti nelle apposite caselle della pagina "SWT-tar2". Notare che il valore ottenuto del coefficiente $\epsilon_{\rm f}$ da inserire nelle caselle non è in realtà il suo reale valore, ma è invece il suo logaritmo. In Fast Life avviene la sua conversione al corretto valore.

Come considerazione finale è importante sottolineare i valori elevati dei coefficienti R^2 e $R^2_{\rm adj}$ prova di un alto grado di correlazione tra le variabili e della buona approssimazione fornita dalle curve. Calibrato il modello si passa alla pagina "SWT_2" dove si inseriscono i dati delle nuove condizioni di prova e si segue lo stesso percorso spiegato in precedenza.

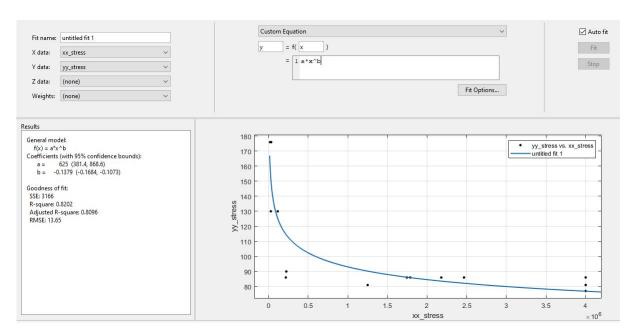


Figura 2.15: analisi di regressione deformazione elastica

2.2.3 Skelton

Come già indicato nel diagramma di flusso mostrato nella sezione precedente di questo capitolo dopo la pagina "Start" e una schermata riassuntiva del modello si arriva alla schermata del programma mostrata nella Figura 2.16.

In questa schermata l'utente ha la possibilità di selezionare la modalità di calcolo della vita a fatica:

- premendo il puslante "Compute the constant Ks" si procede verso pagine del programma che permettono il calolo dell'energia totale necessaria a portare a rottura il materiale "Ks" e il calcolo dell'energia dissipata dal ciclo stabilizzato "Ui".
- premendo il puslante "Key in the constant Ks" si procede verso pagine del programma in cui si può digitare il valore dell'energia totale necessaria a portare a rottura il materiale "Ks" e calcolare il valore dell'energia dissipata dal ciclo stabilizzato "Ui".

Se il valore di "Ks" è noto il programma permette di calcolare il valore di "Ui" e quindi procedere al calcolo della vita fatica. È possibile immettere il valore di "Ks"

Skelton model routine



USER'S GUIDE

The material constant Ks can be specified by the user or computed by the code.

Key in the constant Ks

If the material constant Ks is known, in the following windows user must specify its value and the stress-strain histories corresponding to the stabilized hysteresis cycles of the elements under investigation.

Compute the constant Ks

If the material constant Ks is unknown, in the following windows user must specify the complete stress-strain history corresponding to each element under investigation and the stress-strain history of the stabilized cycle. The code will calculate Ks from the analysis of the complete stress-strain data and it'll predict life dividing Ks by the area of the specified stabilized hysteresis cycle.

back to previous page

Figura 2.16: Skelton_tip2

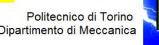
in due modi differenti: digitando il valore in un'apposita cella oppure immettrerlo tramite un file di formato .txt. Se il valore di "Ks" non è noto invece le opzioni proposte per il calcolo di tale valore sono due e sono mostrate nella Figura 2.17 che rappresenta la schermata "Skelton11":

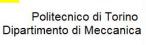
- premendo il puslante "Compute Ks with all hyst loop" si procede verso pagine del programma che permettono il calolo dell'energia totale necessaria a portare a rottura il materiale "Ks" tramite la somma di tutte le aree dei cicli di isteresi fino alla rottura del provino. Pertanto è necessario possedere l'intera storia tensione-deformazione del provino.
- premendo il puslante "Compute Ks with maximum stress" si procede verso pagine del programma che permettono una stima dell'energia totale necessaria a portare a rottura il materiale "Ks" tramite i dati di tensione e deformazione del ciclo di isteresi e i dati della tensione massima raggiunta in ogni ciclo fino alla rottura del materiale.

Il procedimento utilizzato nel caso in cui si prema il pulsante "Compute Ks with maximum stress" è il seguente:

Skelton/Giuditta routine model

FAST Life







in this section user can select how to calculate the total expended energy(Ks): press button "compute Ks with all hysteresys group" if stress and strain data of all hysteresys loops untill faiure are known. press button "compute Ks with maximum stress" if only maximum stress data. strain amplitude and stress-strain data of the stabilized loop are known

compute Ks with all hyst loop

compute Ks with maximum stress

Figura 2.17: Skelton11

• Calcolo di una costante chiamata "HH":

$$HH = \frac{Area}{\sigma_{\text{max}}} \tag{2.4}$$

dove Area è l'area del ciclo stabilizzato e σ_{max} è la tensione massima raggiunta nel ciclo stabilizzato.

• Utilizzo della costante per la stima del valore di " $K_{\rm s}$ ":

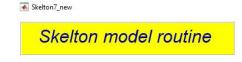
$$Ks = HH \times \sigma_{\text{max}}$$
 (2.5)

Bisogna sottolineare ancora una volta come quest'ultima procedura porti al calcolo di una stima del valore di "Ks" in quanto il calcolo esatto del suo valore si ottiene solamente sommando le aree di tutti i cicli di isteresi fino alla rottura del materiale, cioè utilizzando il primo metodo. Concluso il calcolo di "Ks" nella schermata successiva è possibile immettere nuovi dati di tensione e deformazione del ciclo stabilizzato e procedere al calcolo della vita a fatica del materiale.

I risultati verrano mostrati nella schermata "Skelton_results" rappresentata in Figura 2.18.

Gocmez-Awarke-Pischinger 2.2.4

Per stimare il numero di cicli necessari a portare a rottura il materiale secondo il Gocmez-Awarke-Pischinger è necessario premere il puslante "Gocmez-Awarke-Pischinger". Premuto tale pulsante si raggiunge la pagina mostrata sotto.



FAST Life Politecnico di Torino Dipartimento di Meccanica

ESTIMATION OF THE RESIDUAL LIFE - Results

In this section the results of Skelton model routine are reported.



Figura 2.18: Skelton_results

In "Gocmez-tit1" si può scegliere se proseguire alla calibrazione del modello premendo il tasto "calibration of the model"; oppure se proseguire verso un test a fatica premendo il tasto "fatigue test". Per la seconda opzione è necessario possedere i parametri del modello di danneggiamento.

Se si hanno già a disposizione i parametri del modello per il materiale considerato e si è quindi scelta l'opzione "fatigue test" la pagina "Gocmez_1" (mostrata in Figura 2.20) si apre. Come si può vedere in Figura 2.20 in "Gocmez_1" è necessario inserire i parametri del modello. Inseriti i parametri e premuto "continue" si apre la pagina "Gocmez_2" (mostrata in Figura 2.21) dove è necessario inserire i dati della successiva prova a fatica.

Infine, premuto nuovamente "continue", la pagina "Gocmez_results" (mostrata in Figura 2.22), si apre e premendo il tasto "results" è possibile calcolare il numero di cicli che portano a rottura il materiale secondo il modello di Gocmez, Awarke e Pischinger.

Calibrazione del modello

La calibrazione di questo modello è stata suddivisa in 3 fasi:

• calibrazione del coefficiente A e dell'esponente c tramite prove a fatica a tensione media nulla e alla temperatura di 160 °C dove l'effetto generato dovuto alla temperatura è trascurabile.

Gocmez-Awarke-Pischinger routine model



Dipartimento di Meccanic

USER'S GUIDE

back_to_previous_page

The code will estimate fatigue life according to the Gocmez model . In order to calibrate the model press button "model calibration", in order to "fatigue test" .

back_to_previous_page	model calibration	fatigue test

Figura 2.19: Gocmez_tit1

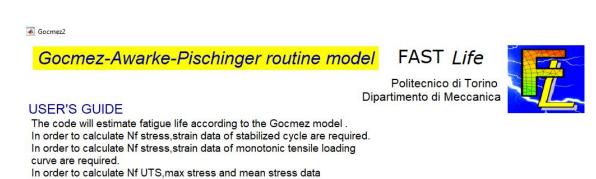
Gocmez-Awarke-Pischinger routine model

coefficient A
exponent c
exponent n
coefficient m
maxTemperature [°K]
activationTemperature
melting Temperature

FAST Life

Politecnico di Torino
Dipartimento di Meccanica

Figura 2.20: Gocmez_1



curve are required.
User can select data format:txt format or xlsx format.



Figura 2.21: Gocmez_2

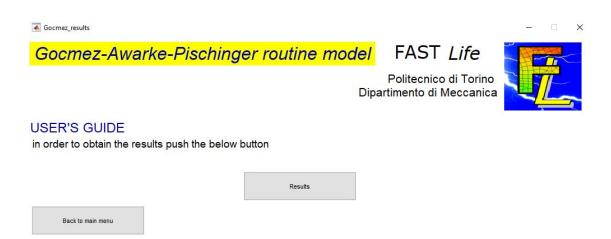


Figura 2.22: Gocmez_results

- calibrazione del coefficiente m tramite prove a fatica a tensione media non nulla e alla temperatura di 160 °C.
- calibrazione del coefficiente n tramite prove a fatica a differenti temperature e a tensione media nulla

Selezionata l'opzione di calibrazione si apre la seguente pagina del programma (Figura 2.23): Per l'inserimento dei dati necessari al completamento della prima fase di

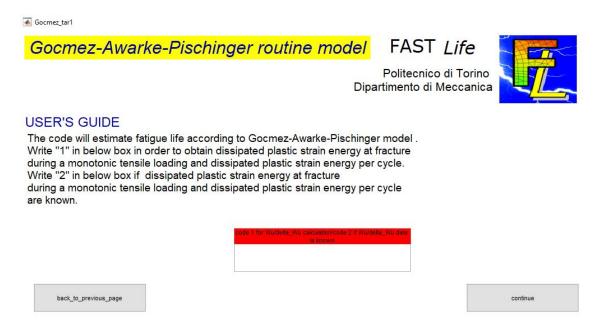


Figura 2.23: Gocmez_tar1

calibrazione si forniscono due opzioni:

- digitando "1" nella casella rossa si procede verso pagine del programma che permettono il calolo dell'energia dissipata nel ciclo stabilizzato dovuta alla deformazione plastica " $\Delta W_{\rm p}$ " e il calcolo dell'energia dissipata dovuta alla deformazione plastica durante una prova di tensione monotona " $W_{\rm u}$ ".
- digitando "2" nella casella rossa si procede verso pagine del programma in cui è possibile scrivere il valore dell'energia dissipata nel ciclo stabilizzato dovuta alla deformazione plastica " $\Delta W_{\rm p}$ " e il valore dell'energia dissipata dovuta alla deformazione plastica durante una prova di tensione monotona " $W_{\rm u}$ ".

Selezionando la prima opzione si aprono prima la pagina "Gocmez-tar1a" dove è necessario inserire i dati di tensione e deformazione e poi (premendo il tasto "continue") la pagina "Gocmez-tar2" dove è richiesto di inserire le ampiezze di sollecitazione, la tensione a rottura del materiale e il numero di cicli necessario a rompere i provini per ogni prova effettuata. Selezionando la seconda opzione si

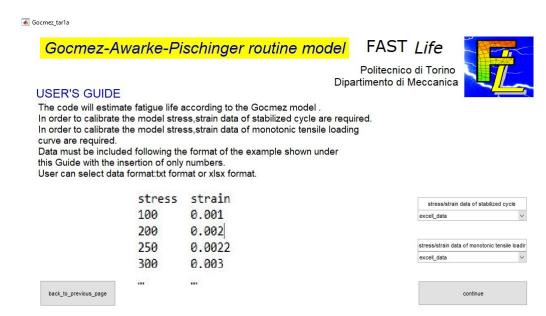


Figura 2.24: Gocmez_tar1a

apre la pagina "Gocmez-tar2a" dove è necessario inserire i medesimi dati del procedimento precedente ad eccezione dei valori di tensione e deformazione utilizzati per il calcolo delle energie che vengono sostituiti dai valori delle energie stesse. Qualsiasi sia l'opzione selezionata per l'inserimento dei dati alla fine della prima fase di calibrazione si arriva alla pagina "Gocmez-tar3" mostrata in Figura 2.27 . In "Gocmez-tar3" si calibrano i parametri A e c utilizzando la legge costitutiva del modello considerando nulla la componente termica:

$$N_{\rm f} = A(\frac{\Delta W_{\rm p}}{W_{\rm p,u}} \times SCF)^c \tag{2.6}$$

Premendo il tasto "A and c calibration" il programma calcola le due variabili "xx" e "yy" e si apre la schermata principale di "Curve fitting toolbox".

$$yy = log(N_{\rm f}) \tag{2.7}$$

$$xx = log(\frac{\Delta W_{\rm p}}{W_{\rm p,u}} \times SCF)$$
 (2.8)

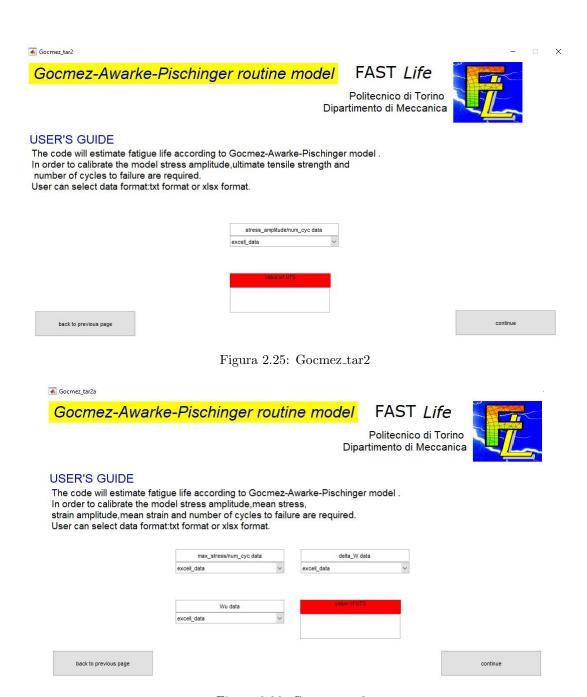


Figura 2.26: Gocmez_tar2a

All'utente è richiesto di inserire i valori ottenuti dalla regressione lineare nell'apposita casella della pagina "Gocmez-tar3". È importante sottolineare che il valore di A (da scrivere nella casella del programma) mostrato nella pagina di "Curve fitting toolbox" in realtà corrisponde al valore log(A): la conversione viene effettuata dal

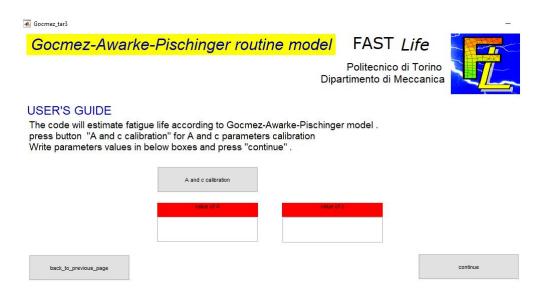


Figura 2.27: Gocmez_tar3

programma dopo che si è premuto il pulsante "continue".

La pagina seguente ("Gocmez-tar4") è la prima della seconda fase di calibrazione. In "Gocmez-tar4" vengono richiesti all'utente la tensione massima, la tensione media, i valori della tensione e della deformazione del ciclo stabilizzato e il numero di cicli necessari a portare a rottura il provino per prove effettuate a valori di tensione media differenti.

Questi dati consentono, nella pagina del programma seguente ("Gocmez-tar5") (Figura 2.29), di calcolare il coefficiente "m" utilizzando come prima la legge costitutiva del modello.

Premendo il tasto "m calculation" il programma effettua i calcoli delle equazioni riportate sotto e poi apre l'applicazione "Curve fitting toolbox".

$$SCF = \left(\frac{N_{\rm f}}{A}\right)^{(1/c)} \times \frac{Wu}{\Delta Wu} \tag{2.9}$$

$$xx = SCF \times \sigma_{\text{mean}} \tag{2.10}$$

$$yy = SCF \times UTS - \sigma_{\text{max}} \tag{2.11}$$

Invece l'equzione da inserire nella sezione "Custom equation" di "Curve fitting toolbox" è la seguente:

$$y = m \times x \tag{2.12}$$

Calcolato il valore di m è digitato nell'apposita casella è possibile scegliere se inserire manualmente il valore del coefficiente n (digitando nella casella a destra

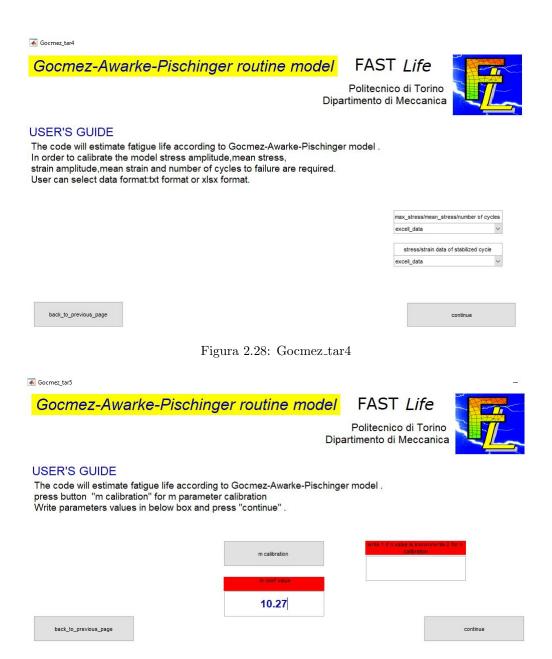


Figura 2.29: Gocmez_tar5

"1" e premendo il tasto "continue") oppure se proseguire verso il calcolo del valore di n(digitando "2" e premendo "continue").

Al fine di calcolare l'esponente n il programma "Fast life" applica un processo di ottimizzazione suddiviso nelle seguenti fasi:

• scelta di un intervallo in cui ricercare il valore di n.

- generazione di un vettore n(composto da un numero scelto di punti) all'interno dell'intervallo citato sopra.
- calcolo di 3 vettori xx,yy e y_stim pari a:

$$xx = \left[\frac{exp\left(\frac{-T_{\text{act}}}{-T_{\text{max}}}\right)}{exp\left(\frac{-T_{\text{act}}}{-T_{\text{melt}}}\right)}\right]$$
(2.13)

$$yy = \frac{\left[\left(\frac{N_{\rm f}}{A}\right)^{\left(\frac{1}{c}\right)} - \left(\frac{\Delta W}{Wu}\right) \times SCF\right]}{\Delta W}$$

$$y_stim = xx^{n}$$
(2.14)

$$y_stim = xx^n (2.15)$$

- calcolo del valore assoluto degli scarti tra yy e yy_stim.
- calcolo della somma dei valori assoluti degli scarti.

Dopo tutte queste fasi il programma apre l'applicazione "Curve fitting toolbox" dove l'utente deve selezionare l'analisi di regressione polinomiale di secondo grado. In seguito l'utente digita i valori dei coefficienti p1 e p2 del polinomio trovato nella pagina di "Fast Life" "Gocmez_tar8" ed il programma troverà il valore di n che genera il minimo della curva. Grazie a questo procedimento il programma trova il valore di n che minimizza gli scarti.

Conclusa la calibrazione si possono inserire i dati della nuova prova in "Gocmez_tar9" e passare quindi alla schermata dei risultati "Gocmez_results".

2.2.5Taira

Selezionato il modello Taira si apre la pagina "Taira_start" mostrata nella Figura 2.30. Qui sono disponibili due scelte:

- Avendo già tarato il modello in precedenza, procedere al calcolo della vita a fatica in nuove condizioni di prova (premendo il tasto "fatigue test").
- Proseguire alla calibrazione del modello (premendo il tasto "model calibration").

Se si è scelta la prima opzione si apre la seguente pagina del programma "Fast Life". In Figura 2.31 viene richiesto di inserire tutti i dati necessari (ampiezza di deformazione plastica, le costanti C e λ e le temperature massime, minime e di attivazione) al calcolo della vita a fatica. Tale calcolo viene effettuato nella pagina seguente chiamata "Taira_2" mostrata in Figura 2.32.

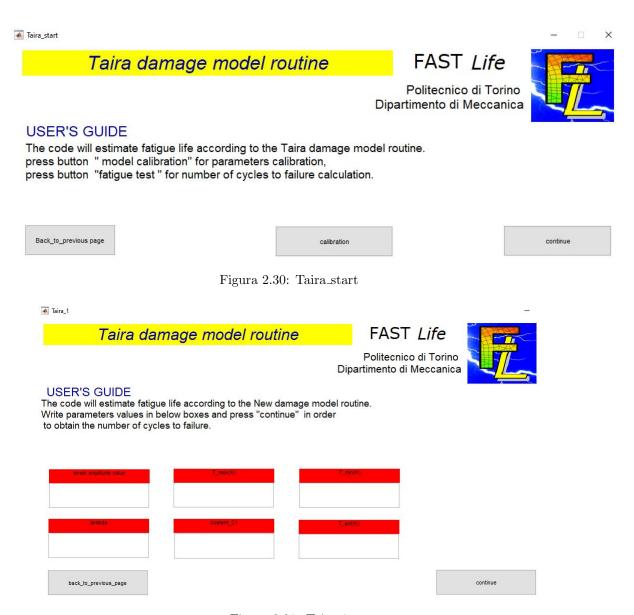


Figura 2.31: Taira_1

Calibrazione del modello

Se si seleziona l'opzione "model calibration" si apre la pagina del programma chiamata "Taira_tar1" mostrata nella figura 2.33. In tale pagina del programma si inseriscono i dati necessari al calcolo della costante C1 della legge costitutiva del modello. Per calibrare questa costante è necessario un test ad elevata temperatura per il quale viene imposto il valore del coefficiente λ pari ad 1. La formula utilizzata per ottenere il coefficiente C1 (calcolo effettuato in "Taira_tar2" 2.34) è pertanto



Figura 2.33: Taira_tar1

la seguente:

$$C1 = \Delta \epsilon_{\rm p} \times N_{\rm f} \tag{2.16}$$

È importante notare che il coefficiente n è stato imposto pari ad 1, poichè la temperatura del test deve essere maggiore di quella di attivazione della formazione dei sottograni. Il secondo e ultimo passo per la calibrazione del modello consiste nel trovare i coefficienti di un polinomio di terzo grado in grado di approssimare l'andamento del coefficiente λ all'aumentare della temperatura dei test. Per ottenere questa curva saranno pertanto necessari diversi test a deformazione plastica costante e a diversi livelli di temperatura.

I dati necessari (inseriti nella schermata "Taira_tar3" mostrata in Figura 2.35) sono i seguenti:

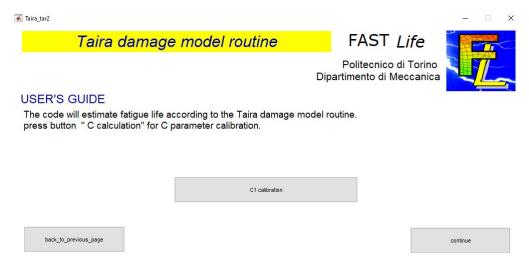


Figura 2.34: Taira_tar2

- deformazione platica dei test
- numero di cicli necessari a portare a rottura il materiale
- temperature dei test
- temperatura di attivazione del meccanismo di danneggiamento aggiuntivo.

La formula utilizzata nel programma è la seguente:

$$\lambda = \frac{C1}{(\Delta \epsilon_{\rm p})^n \times N_{\rm f}} \tag{2.17}$$

Dove n è posto pari ad 1 se la temperatura del test è maggiore della temperatura di attivazione, 2 nel caso contrario. Il calcolo dei coefficienti P0, P1, P2, P3 viene effettuato nella pagina "Taira_tar4" mostrara in Figura 2.36 .

In "Taira_tar4" si sfrutta nuovamente l'applicazione "Curve fitting toolbox" di Matlab per calcolare i valori dei coefficienti del polinomio. La calibrazione del modello è completata e i dati per una successiva prova di fatica (anche termomeccanica) possono essere inseriti nella pagina del programma "Taira_tar5" mostrata in Figura 2.37. Inseriti i dati si passa alla pagina dei risultati "Taira_2" già spiegata in precedenza.

È importante notare che il programma è in grado di calcolare la vita a fatica di prove termomeccaniche, dove la temperatura equivalente "Teq" necessaria al calcolo del coefficiente λ è calcolata nel seguente modo:

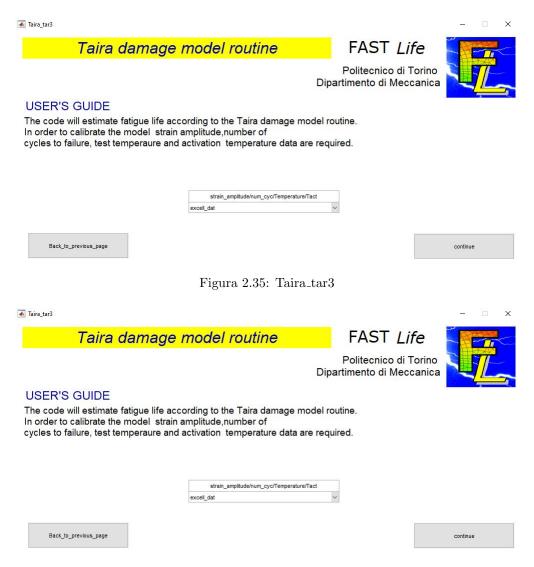


Figura 2.36: Taira_tar4

- \bullet Se la temperatura massima del ciclo è maggiore della temperatura di attivazione si impone la Teq pari alla temperatura massima
- Se la temperatura massima del ciclo è inferiore alla temperatura di attivazione si impone Teq pari alla temperatura media del ciclo.

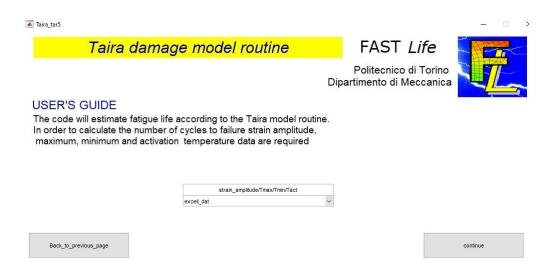


Figura 2.37: Taira_tar5

2.2.6 Nuovo modello di danneggiamento

Per stimare il numero di cicli necessari a portare a rottura il materiale secondo il Nuovo modello di danneggiamento è necessario premere il puslante "New damage model". Premuto tale pulsante si raggiunge la pagina mostrata in Figura 2.38. Raggiunta la pagina "New damage model_tit2" si può scegliere se calibrare il mo-

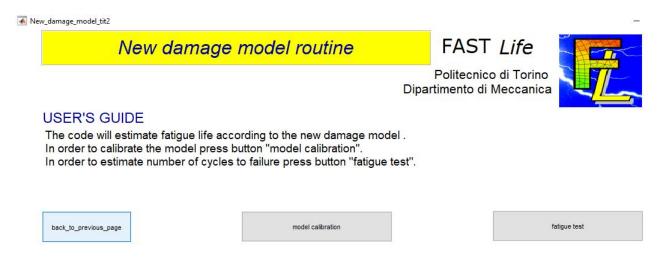


Figura 2.38: New_damage_model_tit2

dello e ottenere i coefficienti necessari per lo studio di future nuove prove a fatica(premere "model calibration"), oppure se, essendo già noti i coefficienti del modello, passare alla valutazione della vita a fatica secondo il modello proposto (premere il tasto "fatigue test").

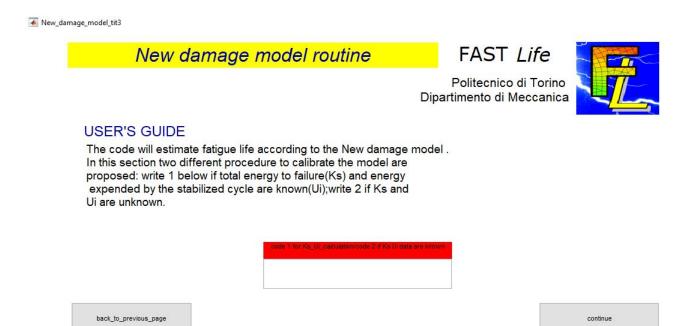


Figura 2.39: New_damage_model_tit3

Calibrazione del Nuovo modello di danneggiamento

Selezionato il tasto "model calibration" appare la schermata sovrastante (Figura 2.39) in cui si può selezionare come calibrare il modello:

- digitando "1" nella casella rossa si procede verso pagine del programma che permettono il calolo dell'energia totale necessaria a portare a rottura il materiale "Ks" e il calcolo dell'energia dissipata dal ciclo stabilizzato "Ui".
- digitando "2" nella casella rossa si procede verso pagine del programma in cui si può scrivere il valore dell'energia totale necessaria a portare a rottura il materiale "Ks" e il valore dell'energia dissipata dal ciclo stabilizzato "Ui".

Ottenuti i valori di "Ks" e "Ui si possono ottenere i coefficienti della retta di Basquin alla temperatura ambiente in due modi:

sigf/bb/epsf/cc stress,strain amp data

Figura 2.40: New_damage_model2

- premendo il pulsante "sigf'/bb/epsf'/cc" si procede verso pagine del programma in cui è possibile digitare il valore dei coefficienti della retta di Basquin.
- premendo il pulsante "stress, strainampdata" si procede ad una pagina del programma dove si ottengono i coefficienti della retta di Basquin tramite i valori dell'ampiezza della tensione, dell'ampiezza della deformazione e del numero di cicli a rottura.

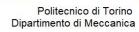
Ottenuti i valori della retta di Basquin alla temperatura ambiente è necessario calibrare i coefficienti e gli esponenti di $f_{\rm ms}$ che, come già spiegato nel capitolo precedente, è il fattore di correzione della vita a fatica che tiene conto degli effetti generati dalla tensione e deformazione media. Per calibrare tali coefficienti ed esponenti sono necessarie diverse prove con valori di tensione e deformazione media differenti. I valori ottenuti dovranno essere inseriti negli appositi popupmenu della schermata mostrata nella Figura 2.41. Per calibrare questi coefficienti è necessario scraicare l'applicazione di Matlab appositamente ideata al fine di ottenere i parametri di qualsiasi curvapartendo da dati sperimentali. L'applicazione si chiama "Curve fitting toolbox".

Nella pagina del programma chiamata "New_damage_model7" premendo il pulsante "calculation of eta and hh" si apre la pagina dell'applicazione "Curve fitting toolbox" dove è necessario inserire l'equazione corretta per ottenere i coefficienti del modello da inserire nelle apposite caselle della pagina "New_damag_model7". La formula utilizzata per calibrare il modello è la seguente:

New_damage_model4

New damage model routine

FAST Life





USER'S GUIDE

The code will estimate fatigue life according to the New damage model . In order to calibrate the model stress amplitude, mean stress, strain amplitude, mean strain and number of cycles to failure are required. Data must be included following the format of the example shown under this Guide. User can select data format: txt format or

	 stress_amplitude/mean_stress/numcycles	excell data	
excell_data	excell_data		s/numcycles
		excell_data	

back_to_previous_page

Figura 2.41: New_damage_model4

$$\frac{\sigma_{\text{a,eq}-1}}{\sigma_{\text{a}}} = (1 + \eta \frac{\sigma_{\text{m}}}{\sigma_{\text{a}}})^{h} \tag{2.18}$$

Nel codice Matlab i termini vengono ridotti a due vettori "xx" e "yy" ottenuti tramite le seguenti formule:

$$yy = \frac{\sigma_{\text{a,eq}-1}}{\sigma_{\text{a}}} \tag{2.19}$$

$$yy = \frac{\sigma_{\text{a,eq}-1}}{\sigma_{\text{a}}}$$

$$xx = \frac{\sigma_{\text{m}}}{\sigma_{\text{a}}}$$
(2.19)

L'utente deve selezionare la modalità "Custom equation" nella pagina dell'applicazione "Curve fitting toolbox" ed inserire l'equazione sottostante nella casella apertasi:

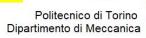
$$y = (1 + eta \times x)^h \tag{2.21}$$

Come si può vedere nella Figura 2.43 sulla sinistra si possono notare i valori dei parametri η e h che dovranno poi essere digitati nelle caselle della pagina "New_damage_model7". Sulla sinistra sono inoltre indicati i valori di \mathbb{R}^2 e di $\mathbb{R}^2_{\mathrm{adi}}$ dimostrano un alto valore di correlazione tra le variabili proposte essendo i loro valori particolarmente prossimi ad 1.

È necessario eseguire un procedimento analogo per tarare i valori di ξ e di k, premendo il pulsante "calculation of xi and kk" e digitando come "Custom

New damage model routine

FAST Life





USER'S GUIDE

The code will estimate fatigue life according to the New damage model routine. press button " eta and hh calculation" for eta and h parameters calibration, press button "xi and kk calculation" for csi and k parameters calibration. Write parameters values in below boxes and press "continue" to go to thermal parameters calculation.



Figura 2.42: New_damage_model7

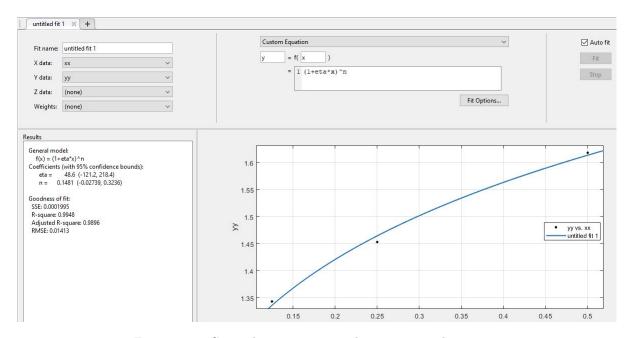


Figura 2.43: Curva di regressione per la tensione media

equation" la seguente equazione:

$$y = (1 + xi \times x)^k \tag{2.22}$$

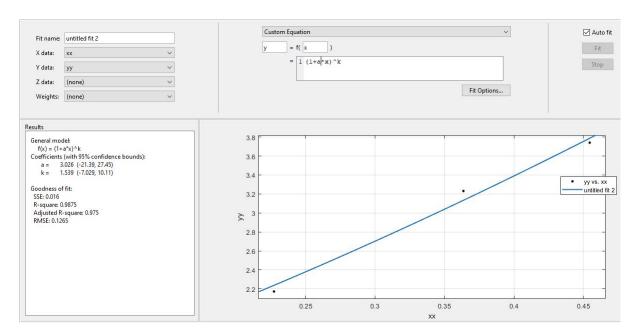


Figura 2.44: Curva di regressione per la deformazione media

Nella Figura 2.44 sono mostrati i valori dei parametri ottenuti a seguito della calibrazione, i valori di R^2 e di $R^2_{\rm adj}$ e la curva generata dall'equazione (2.7). Anche in questo caso i valori di R^2 e di $R^2_{\rm adj}$ forniscono la prova di un alto grado di correlazione tra le variabili.

Il passo successivo alla calibrazione di η , ξ , h e k è la calibrazione dei coefficienti e degli esponenti presenti nella formulazione necessaria al calcolo di $f_{\rm ht}$. $f_{\rm ht}$, cioè il fattore di correzione della vita a fatica che tiene conto degli effetti generati dalla variazione di temperatura, viene calibrato tramite prove a fatica isoterma a diversi livelli di temperatura.

Nelle pagine del programma chiamata "New_damage_model10" o "New_damage_model10a" (mostrate in Figura 2.45 ed in Figura 2.46) si possono inserire i dati necessari alla calibrazione del coefficiente termico. I dati da inserire sono i seguenti:

- tensione massima e tensione del materiale a rottura.
- temperatura massima, temperatura media, temperatura di attivazione, temperatura di fusione, numero di cicli necessari a portare a rottura il materiale.
- energia totale necessaria a portare a rottura il materiale "Ks" e energia dissipata dal ciclo stabilizzato "Ui".

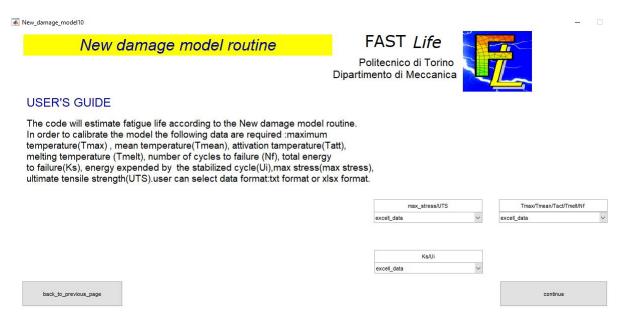


Figura 2.45: New_damage_model10

Per calibrare il modello sono pertanto necessarie anche prove a fatica isoterma a

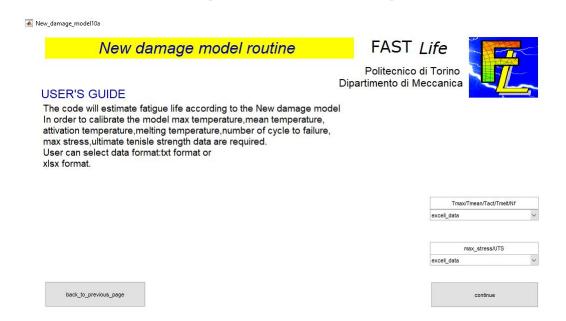


Figura 2.46: New_damage_model10a

diversi livelli di temperatura e tensione media nulla.

Inseriti i dati e premuto il tasto "continue" si apre la pagina del programma chiamata "New_damage_model14" mostrata in Figura 2.47

New damage model routine



continue

USER'S GUIDE

The code will estimate fatigue life according to the New damage model . press button "n and b calibration" for n and h parameters calibration, Write parameters values in below boxes and press "continue" to go to New damage model fatigue test .



Figura 2.47: New_damage_model14

La formula utilizzata per calibrare il modello è la legge costitutiva del modello dove il fattore $f_{\rm ms}$ è pari ad 1 (la tensione media delle prove usate è nulla). La formulazione si riduce alle seguenti equazioni:

$$N_{\rm f} = \frac{K_{\rm s}}{U_{\rm i}} f_{\rm ht} \tag{2.23}$$

$$N_{\rm f} = \frac{K_{\rm s}}{U_{\rm i}} \times \left(1 + \left[\left(\frac{\sigma_{\rm max}}{UTS}^{n}\right) \times \frac{exp\left(-\frac{T_{\rm att} - T_{\rm mean}}{T_{\rm max}}\right)}{exp\left(\frac{-T_{\rm max}}{T_{\rm melt}}\right)}\right]^{b}\right)^{-1}$$
(2.24)

Nel codice Matlab i termini dell'equazione (2.9) si riducono a tre vettori "xx", "yy" e "zz":

$$zz = \frac{U_{\rm i}}{K_{\rm s}} f_{\rm ht} \times N_{\rm f} \tag{2.25}$$

$$xx = \frac{\sigma_{\text{max}}}{UTS} \tag{2.26}$$

$$yy = \frac{exp(-\frac{T_{\text{att}} - T_{\text{mean}}}{T_{\text{max}}})}{exp(\frac{-T_{\text{max}}}{T_{\text{melt}}})}$$
(2.27)

Premendo il tasto "n and b calibration" si apre la pagina dell'applicazione "Curve fitting toolbox" mostrata nella Figura 2.48. L'utente deve selezionare la modalità "Custom equation" nella pagina dell'appicazione "Curve fitting toolbox" ed

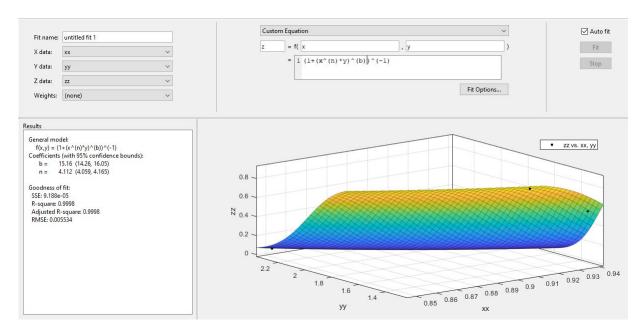


Figura 2.48: Curva di regressione coefficiente termico

inserire l'equazione sottostante nella casella apertasi:

$$z = (1 + (x^n \times y)^b)^{-1} \tag{2.28}$$

Anche per quanto riguarda la taratura del fattore di danneggiamento legato alle variazioni di temperatura i valori di R^2 e $R^2_{\rm adj}$ sono soddisfacenti.

Con questi dati il modello è calibrato ed è possibile stimare la vita a fatica imponendo nuove condizioni di prova nella pagina mostrata in Figura 2.49 . La pagina del programma dove si ottengono i risultati per la stima di nuove prove è "New_damage_model5" mostrata in Figura 2.50.

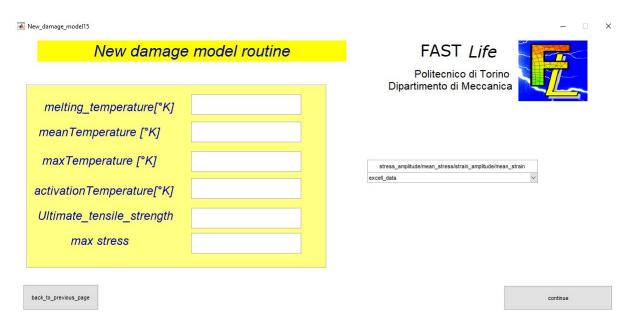


Figura 2.49: New_damage_ model 15

■ New_damage_model5				- 🗆 X
New damage mod	del routine		FAST <i>Life</i>	
		Dip	Politecnico di Torino partimento di Meccanica	1/2
USER'S GUIDE In order to see results push the below button	on			
	Results			
				Back to main menu

Figura 2.50: New_damage_ model 5

Capitolo 3

Conclusioni

Nelle conclusioni si sarebbe dovuto descrivere la precisione dei modelli sviluppati su "Fast Life" nel predire i risultati di prove a fatica termomeccanica; tuttavia per la mancata disponibilità di un'adeguata strumentazione non è stato possibile completare tali prove. Pertanto in queste conclusioni si spiega quali sono stati gli imprevisti che sono sopraggiunti e si suggeriscono possibili azioni per superare i problemi raggiunti.

Gli strumenti necessari per effettuare le prove di fatica termomeccanica sono i seguenti:

- macchina di prova necessaria ad imprimere carichi meccanici.
- induttore per scaldare il provino e generare così cicli termici.
- due estensimetri per misurare la deformazione totale.
- pirometro per misurare la temperatura superficiale del provino.
- due termocoppie per misurare la temperatura superficiale del provino.

Il primo passo da effettuare per sviluppare le prove a fatica termomeccanica è la scelta dei livelli massimi e minimi di temperatura della futura prova: il ciclo per poter testare il fattore termico dei modelli di Gocmez, Awarke e Pischinger e del modello sviluppato dalle ingegnere Sesana e Delprete deve superare la temperatura di attivazione del materiale (500-530 °C). Un secondo aspetto che non si deve trascurare è che l'intervallo di temperatura del ciclo termomeccanico non può essere troppo ampio per non dover ridurre troppo il carico meccanico applicabile. Per il calcolo della deformazione termica sarà necessario usare la seguente equazione:

$$\epsilon_{\rm th} = (\alpha) \times (\Delta T)$$
 (3.1)

Dove α è il coefficiente di dilatazione termica.

Il secondo passo da effettuare per sviluppare le prove a fatica termomeccanica è il calcolo dell'emissività del materiale.

Installate le termocoppie sul provino per controllare la temperatura superficiale si scalda il provino tramite l'induttore fino alla temperatura intermedia del futuro ciclo termico da generare. Il passo seguente consiste nel mantenere la temperatura al livello intermedio del ciclo fino a che l'oscillazione della temperatura diventa trascurabile e calcolare l'emissività che rende la temperatura percepita dal pirometro equivalente a quella misurata dalle temocoppie. Il procedimento sopra descritto si deve ripetere più volte per vari livelli di temperatura tra i valori massimi e minimi di temperatura del ciclo termico. Quest'ultimo passaggio è necessario per verificare che la variazione del valore dell'emissività non sia troppo elevato e che pertanto esso si possa considerare costante.

Finita la calibrazione del pirometro è necessaria la misurazione del tempo impiegato dalla temperatura del provino per diminuire dal valore massimo a quello minimo: per sincronizzare i cicli meccanici a quelli termici è necessaria la misurazione della durata dei secondi citati per poter programmare la durata dei primi. Ultimata quest'ultima misurazione è necessario installare gli estensimetri per poter effettuare le prove in controllo di deformazione. Infine non resta altro da fare che impostare le rampe termiche e meccaniche per portare prima il provino allo stato iniziale di tensione e di temperatura e impostare le rampe dei successivi cicli fino a portare a rottura il materiale.

I principali problemi che sono sopraggiunti durante il tentativo di effettuare le prove sono essenzialmente tre:

- disponibilità di provini inadeguati.
- indisponibilità degli estensimetri.
- mancanza dell'opzione di programmazione dell'induttore con conseguente impossibilità di effettuare cicli termici.

I provini a disposizione sono stati fabbricati con una filettatura che non permette il perfetto allineamento del provino con la macchina di prova generando così nelle successive ipotetiche prove una componente flessionale al carico applicato. La precisione dei test effettati risulta pertanto difficile da prevedere a priori.

Il problema della mancanza di estensimetri per il controllo della deformazione

imposta può essere ovviato applicando alle prove un controllo della corsa della traversa della macchina di prova. Dalla corsa si può quindi ricavare la deformazione generata, tuttavia la precisione di questo metodo di controllo potrebbe risultare notevolmente inferiore a quello descritto nella procedura precedente.

Sebbene i due problemi sopra citati generino degli errori nella misurazione è l'ultimo problema che ha reso impossibile le prove: senza la possibilità di generare i cicli termici con tempi precisi la sincronizzazione con i cicli meccanici è risultata impossibile da effettuare.

Concludendo per poter effettuare tali prove con risultati significativi sarebbe utile:

- comprare nuovi provini.
- comprare degli estensimetri.

Ed è necessario:

• installare l'applicazione di programmazione dell'induttore.

Bibliografia

- [1] Diapositive professoressa Cristiana Delprete
- [2] Cristiana Delprete, Raffaella Sesana Proposal of a new low-cycle fatigue life model for cast iron with room temperature calibration involving mean stress and high-temperature effects, 2019.
- [3] Andrea Vercelli Design methodologies for high temperature low cycle fatigue of engine components, 2011.
- [4] K.N. Smith, P. Watson, T.H. Topper A stress-strain function for the fatigue of metals, 1970.
- [5] R.P. Skelton Energy criterion for high temperature low cycle fatigue failure, 1991.
- [6] Shuji Taira Relationship between thermal fatigue and low-cycle fatigue at elevated temperature, 1973.
- [7] Taner Gocmez, Ali Awarke, Stefan Pischinger A new low cycle fatigue criterion for isothermal and out-of-phase thermomechanical loading, 2009.
- [8] Daining Fang, Avraham Berkovits Mean stress models for low-cycle fatigue for nichel-base superalloy, 1994.
- [9] D.Kujawski F.Ellyin A unified approach to mean stress effect on fatigue threshold conditions, 1994.
- [10] .S. Manson Thermal stress and low-cycle fatigue New York:McGraw-Hill,1996.
- [11] .H. Basquin. the esponential law of enfurance test. ASTM Proceedings, 10:625-630, 1910.

Bibliografia