

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Meccanica



Caratterizzazione a fatica e criteri di progettazione damage
tolerant di componenti di trasmissioni di potenza per la
propulsione aerospaziale

Relatore: Prof. Ing. Mauro FILIPPINI

Tesi di Laurea di:

Moreno Ghelfi Matr. 681662

Anno Accademico 2009 - 2010

Indice Generale

Introduzione

1 Definizione del problema

1.1	Materiale: AISI 4340.....	6
1.2	Stato dell'arte: lo studio del problema della fatica.....	7
1.3	La progettazione a fatica per componenti critici	8
1.4	Modelli di riferimento per lo studio della propagazione.....	9
1.5	Sollecitazioni cicliche di ampiezza variabile	14
1.6	Pianificazione attività sperimentale	15

2 Prova sperimentale di fatica

2.1	Modalità di prova	17
2.2	Materiale.....	18
2.3	Macchina di prova	20
2.4	Stima analitica del limite di fatica	23
2.5	Problema degli sforzi residui da lavorazione meccanica	26
2.6	Elettropulitura	27
2.7	Prova sperimentale e stima del limite di fatica.....	30
2.8	Modello analitico per la definizione del comportamento a fatica.....	32
2.9	Analisi delle superfici di frattura.....	34

3 Criterio di progettazione damage tolerance: prova sperimentale di fatica flessionale su provini microintagliati

3.1	Modalità di prova	37
3.2	Materiale.....	38
3.3	Relazione tra limite di fatica e dimensione del difetto.....	43
3.4	Stima del limite di fatica: modello di El-Haddad 3D modificato	46
	3.4.1 Risultati prova di propagazione	48
3.5	Comportamento dei microintagli	51
3.6	Fase di precricatura dei provini	55
3.7	Prova sperimentale e stima del limite di fatica	63
3.8	Analisi delle superfici di frattura.....	65

4	Effetto del trattamento superficiale di pallinatura sul comportamento a fatica	
4.1	Modalità di prova	69
4.2	Materiale.....	70
4.3	Previsione del limite di fatica.....	73
4.4	Prova sperimentale	84
4.5	Analisi delle superfici di frattura.....	86
4.6	Effetto degli sforzi residui superficiali di rullatura	88
5	Damage tolerance:prove a spettro	
5.1	Definizione spettro di carico	92
5.2	Materiale.....	100
5.3	Macchina di prova	102
5.4	Modalità di prova	104
5.5	Simulatore di propagazione.....	107
5.6	Risultati e confronti prove a spettro	110
	5.1 Provini esenti da sforzi residui	110
	5.2 Provini per la simulazione della pallinatura	116
	5.3 Provini per la simulazione della rullatura	121
5.7	Confronto simulatore/ NASGRO 4.2.....	124
6	Conclusioni	133
	Riferimenti bibliografici	137

Introduzione

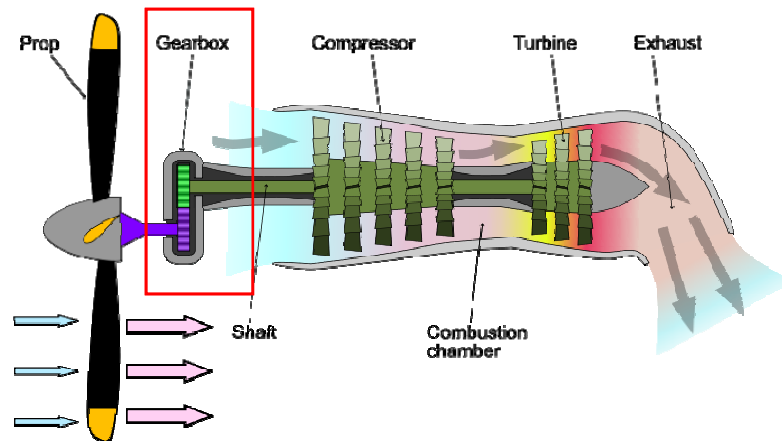
L'undici dicembre del 2009, a Siviglia in Spagna, l'Airbus A400M completa con successo il suo primo volo di collaudo. Concepito per dare supporto tattico-strategico in missioni a sfondo militare, il velivolo è un quadrimotore turboelica da trasporto ad ala alta sviluppato dal consorzio europeo EADS/Airbus Military e momentaneamente in fase di test.



Airbus Military A400M

Attualmente, nel mondo occidentale, nella progettazione e nella realizzazione degli aeromobili, soprattutto militari, viene data grandissima importanza agli aspetti di manutenibilità dei componenti e del velivolo nel suo complesso. In tale quadro, l'ingegnerizzazione dei sistemi, le politiche industriali e la ricerca tecnologica si stanno muovendo, più o meno all'unisono, verso questa direzione e ogni "balzo tecnologico" deve essere attentamente ragionato, e confrontato con queste necessità logistiche. Nel contesto lo sviluppo del potentissimo propulsore TP400-D6, rappresenta una vera e propria sfida tecnologica sotto moltissimi aspetti e si configura come uno degli elementi più qualificanti del nuovo velivolo. La ragione della scelta della tecnologia turboprop risiede, essenzialmente, nella volontà di ridurre i consumi di carburante e, conseguentemente, il costo di esercizio del velivolo, che dovrebbe posizionarsi ben al di sotto di quello dei suoi diretti concorrenti. Non solo, sviluppando fino a 8200 kW il nuovo propulsore turboelica è il più potente mai montato su un aereo occidentale.

Le esigenze richieste dallo sviluppo di un simile progetto, portano inevitabilmente al coinvolgimento di forza lavoro che abbia accumulato esperienza ed affidabilità nel corso del tempo. Per il nuovo cargo europeo A400M AVIO s.p.a., azienda leader mondiale nel settore aerospaziale, progetta e produce la trasmissione di potenza del motore TP400-D6.



Schema di motore turboprop: scatola della trasmissione di potenza



TP400-D6 esposto al salone internazionale dell'aeronautica di Parigi (2007)

Il componente in questione ha il delicato compito di raccogliere l'elevata potenza sviluppata dal propulsore da trasmettere all'elica con la miglior efficienza, che risulta associata a requisiti tecnologici allo stato dell'arte, in particolare in termini di peso ed efficienza.

Specifiche del motore	
Motore	TP400-D6
Potenza[kW]	8200
Rapporto di compressione	25
Lunghezza[m]	3,5
Diametro[m]	0,92
Diametro max pale elica[m]	5,3
Potenza /Peso[kW/ kg]	4,41
Compressore	5BP,6HP
Turbina	1HP, 1MP, 3BP
Applicazioni	A400M

Le caratteristiche principali del riduttore di potenza derivano direttamente dalle specifiche del propulsore riportate in tabella, in particolare dalla potenza uscente dall'albero:

- Potenza d'uscita: circa 8200 kW
- Coppia d'uscita: circa 100 kN·m
- Rapporto di riduzione: circa 9,5:1
- Densità di potenza ed efficienza molto elevate
- Affidabilità paragonabile alle trasmissioni "best in class" per turboprop commerciali.

L'esperienza AVIO nello sviluppo di trasmissione di potenza risale agli anni '60 e, da allora, la Società ha sempre investito nella ricerca e nello sviluppo di nuovi prodotti per mantenere la propria leadership tecnologica nel settore. AVIO ha sviluppato, attraverso specifici programmi tecnologici, sistemi di ingranaggi avanzati che hanno consentito la partecipazione ad applicazioni innovative con elevatissima densità di potenza. Gli elementi tecnologici innovativi, che caratterizzano il know-how riconosciute nel settore sono:

- Peso: rapporto tra coppia in uscita all'elica e peso doppia rispetto alle attuali applicazioni
- Ingranaggi con piste cuscinetti integrali
- Architettura 'flessibile' tollerante ai disallineamenti ed alle deformazioni indotte dall'elica
- Materiali degli ingranaggi ad elevata resistenza meccanica
- Elevata efficienza: perdite minori dell'1% della potenza trasmessa grazie a metodi di superfinitura per dentature e sedi cuscinetto
- Riduzione dei costi operativi
- Miglioramento complessivo dell'affidabilità



TP400D-6 in fase collaudo



Trasmissione meccanica di potenza: rotismo epicicloidale

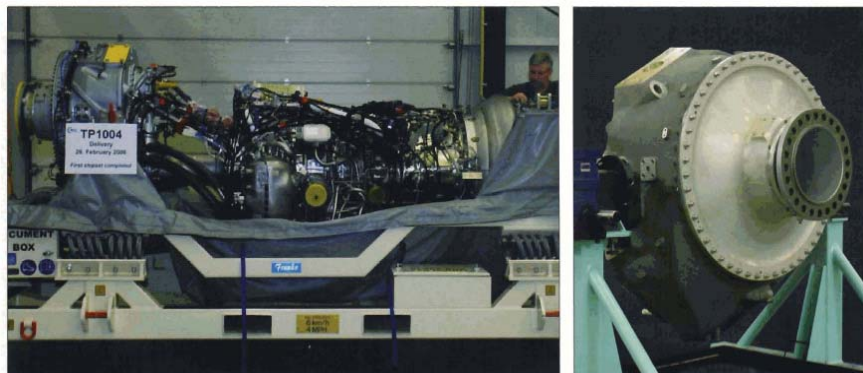


Capitolo 1

Definizione del problema

Le trasmissioni meccaniche di potenza ad ingranaggi, presenti negli aeroplani, negli elicotteri ed usate anche in campo spaziale, sono tra le applicazioni più avanzate di questo campo. Infatti, ad i requisiti di elevata densità di potenza (kW/kg) e di longevità, si uniscono particolari esigenze di sicurezza ed affidabilità. Non solo, gli sviluppi in campo motoristico, in buona parte dettati da esigenze ambientali^[19], tendono a rendere più severe queste esigenze. Analogamente, i periodi di impiego tra due successivi interventi di manutenzione tendono a dilatarsi. Esigenze progettuali impegnative anche per quanto riguarda gli organi di trasmissione si presentano sia a causa del previsto uso di generatori elettrici di bordo aventi potenza maggiore che in aerei civili, sia per la scelta di particolari strategie riguardo ai profili nelle missioni di volo, come quelle di tipo militare. Per fare fronte a queste esigenze, occorre tra l'altro aumentare i valori ammissibili di progetto per quanto riguarda le sollecitazioni, andando oltre ai limiti tradizionalmente fissati da normative. La ricerca, che qui si descrive, è stata principalmente orientata a riprodurre sperimentalmente, condizioni simili a quelle di esercizio e quindi esplorare il campo della fatica con cedimenti dopo alto numero di cicli. Questa attività è stata svolta presso il Politecnico di Milano nel Dipartimento di Meccanica, in collaborazione con AVIO Propulsione Aerospaziale s.p.a..

Si sono perciò eseguite numerose prove in laboratorio, svolte nell'arco di un anno, finalizzate a studiare il comportamento a fatica della lega AISI 4340 impiegata per un componente della trasmissione di potenza del motore turboelica TP400-D.



1.1 Materiale: AISI 4340

Il materiale destinato alla realizzazione del componente per la trasmissione di potenza è un acciaio a medio tenore di carbonio e basso tenore di elementi di lega. Se ne riportano di seguito le caratteristiche principali.

AISI 4340 acciaio, bonificato

Sottocategorie: AISI 4000 Series Steel; Ferrous Metal; Low Alloy Steel; Medium Carbon Steel; Metal

Parole chiave: alloy steels, AMS 5331, AMS 6359, AMS 6414, AMS 6415, ASTM A322, ASTM A331, ASTM A505, ASTM A519, ASTM A547, ASTM A646, MIL SPEC MIL-S-16974, B.S. 817 M 40 (UK), SAE J404, SAE J412, SAE J770, DIN 1.6565, JIS SNCM 8, IS 1570 40Ni2Cr1Mo28, IS 1570 40NiCr1Mo15

Composizione chimica:

Elemento di lega	Peso[%]	C	Cr	Mn	Mo	Ni	Fe	P	S	Si
	min	0,37	0,7	0,6	0,2	1,83	96	0,035	0,04	0,23
	max	0,43	0,9	0,8	0,3					

Caratteristiche meccaniche (fonte):

Durezza Rockwell (Politecnico)	HRC	40
Durezza Vickers (Politecnico)	HV	393,2
Carico di snervamento (AVIO s.p.a.)	R _{sn} [MPa]	1190
Carico di rottura (AVIO s.p.a.)	R _m [MPa]	1375
Modulo di elasticità (tipico acciai)	E [GPa]	205
Modulo di Poisson (tipico acciai)	v	0,3

1.2 Stato dell'arte: lo studio del problema della fatica

“Il materiale può essere portato al cedimento da molte ripetizioni di sforzi, che sono al di sotto del limite elastico”.

Il tedesco Wöhler è uno tra i primi famosi pionieri ad occuparsi dello studio sperimentale del problema del cedimento a fatica dei materiali. A partire dalla seconda metà dell'800, dati i numerosi incidenti catastrofici avvenuti, prima su treni e poi su aerei, si verificò un massiccio aumento di persone impegnate nella ricerca nel campo della fatica.

In particolare, dal secondo dopoguerra, quando si introdussero nuovi modelli e strumentazioni per le prove sperimentali sempre più complesse, si osservò un rapido sviluppo della meccanica della frattura applicato a studi di propagazione delle cricche per fatica.

Schijve^[20], Elber^[21], Paris^[22], sono solo alcuni tra gli studiosi che hanno contribuito allo sviluppo e all'evoluzione di modelli e metodologie rivolti al calcolo della propagazione.

Nella prima metà degli anni '70, in seguito alla richiesta di specifiche sempre più restrittive, la USAF (US Air Force) introdusse nuove specifiche strutturali^[23], le famose Damage Tolerance Requirements, nelle quali si parte dall'assunto che in tutti i punti critici della struttura sono presenti, a partire dal momento in cui viene realizzata, difetti assimilabili a cricche. Questi difetti possono essere indotti dalle lavorazioni durante il ciclo tecnologico, o possono essere stati generati dai carichi d'esercizio. In sostanza il produttore degli aerei doveva essere in grado di dimostrare “con prove sperimentali e con calcoli” che in presenza di difetti fosse assicurata una durata sufficiente (durability) e una resistenza statica residua adeguata (damage tolerance). La causa di questo cambiamento nelle specifiche strutturali risiedeva nel fatto che la USAF, ancora dopo il 1960, non era riuscita ad ottenere una durata utile e un'integrità strutturale adeguate dei propri aerei, visto che troppo spesso si verificavano incidenti dovuti alla fatica, che costavano inevitabilmente vite umane.

Il successo della damage tolerance parla da sé: da quel momento il numero degli incidenti aerei crollò vertiginosamente, a tal punto da essere estesa ad altri componenti^[24], come per esempio turbine, accessori per carrelli e cilindri idraulici.

Inseguito specifiche Damage Tolerance vennero emesse anche per aerei commerciali; sono tuttavia molto meno dettagliate e per questa ragione hanno avuto meno successo delle specifiche USAF.

1.3 La progettazione a fatica per componenti critici: l'approccio *Damage Tolerant*

Nelle strutture sono sempre inevitabilmente presenti zone di concentrazione di sforzo dovute, tipicamente, a cambiamenti di forma geometrica, ad applicazione di carichi o a contatti tra diverse parti. Inoltre è spesso difficile evitare la presenza di irregolarità superficiali o cavità di ritiro nei componenti, dovute ai processi di fabbricazione, ed eventuali difetti dovuti a danneggiamenti in esercizio, come ad esempio corrosione o incisioni dovute all'impatto di oggetti estranei. Nel caso in cui la struttura sia sottoposta a carichi variabili nel tempo, da queste zone possono nucleare, e successivamente propagare, cricche di fatica che costituiscono un pericolo per l'integrità della stessa struttura. In molti casi la formazione e propagazione di cricche di fatica non può essere evitata e la loro presenza viene tollerata in fase di progettazione.

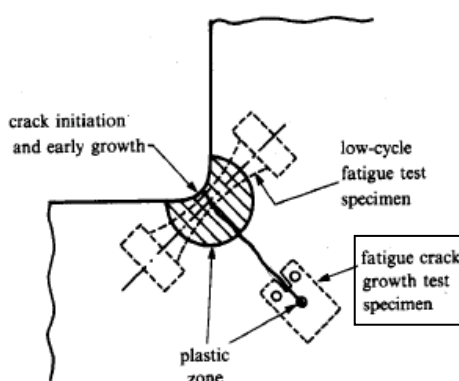


Figura 1.3.1 Modello schematico per la propagazione

Per far ciò è però indispensabile riuscire a determinare, tramite le metodologie della meccanica della frattura, i possibili punti di innesco di cricche di fatica e i tempi di propagazione necessari al raggiungimento della propagazione instabile. Questo permette di stabilire i tempi di ispezione del componente in modo tale da poter intervenire con la riparazione o con la sostituzione della parte danneggiata di struttura quando necessario. L'approccio appena descritto costituisce la cosiddetta progettazione *damage tolerant*. L'origine di questa filosofia progettuale risale alla prima metà degli anni '70 quando, in seguito ad eventi catastrofici che riguardarono in particolar modo velivoli militari, venne effettuata una revisione critica della metodologia progettuale comunemente utilizzata. Fino ad allora la progettazione delle strutture, in particolar modo aeronautiche, era basata sull'approccio *safe-life*: la struttura veniva dimensionata in modo tale che in tutto l'arco della sua vita utile non si sviluppavano cricche di fatica. L'incertezza che caratterizza i dati di fatica dei materiali, sommata alle

limitazioni che caratterizzano le leggi che permettono di stimare la vita a fatica, spesso di natura empirica, obbligava i progettisti all'adozione di coefficienti di sicurezza elevati. Questo contrastava però con la tendenza di realizzare velivoli sempre più leggeri e dalle prestazioni più spinte. Inoltre, come già ricordato, gli alti coefficienti di sicurezza utilizzati non mettevano al riparo da cedimenti prematuri. Poiché dall'analisi di questi cedimenti risultò evidente che la causa principale era la formazione e la propagazione a fatica di cricche in punti particolarmente sollecitati o in prossimità di difetti della struttura, si rese necessaria la definizione della progettazione *damage tolerant*.

1.4 Modelli di riferimento per lo studio della propagazione

La rassegna delle leggi proposte per descrivere la propagazione a fatica di una fessura, sia per carichi ad ampiezza costante che variabile, ha mostrato le incertezze che in esse sono contenute e come il problema sia ancora aperto. La questione diviene ancora più complessa qualora si voglia determinare, oltre alla dimensione della fessura col progredire dei cicli di carico, anche la sua esatta forma geometrica ed il suo orientamento all'interno del solido. Ulteriori complicazioni si presentano nel caso di una fessura tridimensionale, per la quale la descrizione dell'accrescimento consiste nella determinazione della propagazione della superficie di rottura. Quindi, lo studio dei fenomeni di fatica per situazioni complesse, necessita dell'introduzione di semplificazioni (ad esempio sulla geometria della fessura durante il suo accrescimento) che consentano la soluzione del problema in modo sufficientemente semplice ma accurato.

Le soluzioni elastiche di problemi di propagazione rappresentano le basi della meccanica della frattura e possono ritenersi adeguate in moltissimi problemi in cui sia presumibile uno sviluppo limitato dei fenomeni di plasticizzazione. Il crescente interesse in questa disciplina può essere attribuito al verificarsi, nonostante progettazioni accurate, di rotture in esercizio di strutture e componenti dovute a propagazione di fessure.

L'analisi dei fenomeni coinvolti nella propagazione delle cricche per fatica, cioè sotto l'azione di carichi variabili nel tempo, sono fondamentalmente tre^[25]:

- La velocità di propagazione è controllata dal fattore di intensità degli sforzi K e dalla sua variazione nel tempo, che a sua volta dipende dalla dimensione del difetto e dalla sua forma;
- La velocità di propagazione della cricca a parità di sforzo aumenta man mano che la cricca si propaga;

- La cricca si propaga fino ad un valore critico a_f , in corrispondenza del quale si verifica il fenomeno della frattura fragile per un numero di cicli finale N_f .

In figura 1.4.1 è riportata una tipica curva di accrescimento di una cricca da un valore iniziale a_d al valore finale a_f .

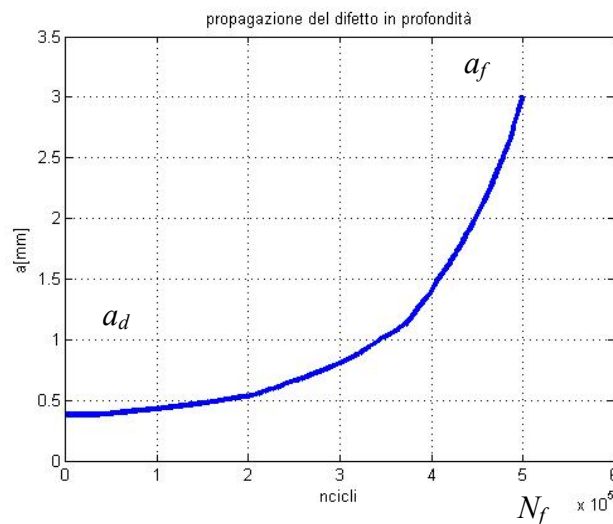


Figura 1.4.1 Propagazione di cricca

Il significato di a_d è quello di dimensione della cricca che esce dall'ispezione periodica (tipica della damage tolerance); quindi d sta per *detected*, individuata e misurata, e rappresenta la soglia di sensibilità dello strumento di controllo. Si presuppone cioè che esistano cricche di dimensioni inferiori visto che non è possibile rilevarle.

La resistenza è determinata dalla relazione:

$$K = F \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \rightarrow \sigma_c = \frac{K_c}{F\sqrt{\pi a}}$$

I coefficienti di sicurezza che possono essere definiti sono due, sulla durata e sullo sforzo:

$$\varphi_N = \frac{N_f}{N}; \quad \varphi_\sigma = \frac{\sigma_f}{\sigma_{max}}$$

A tal proposito la propagazione è governata dall'equazione del Paris. Si definiscono sulla base del ciclo di sollecitazione di fatica ad ampiezza costante:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}; \quad \Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$$\Delta K = F \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi a}$$

Dove F è il fattore di forma della cricca.

La velocità di propagazione è data dalla legge del Paris, rappresentabile in diagramma doppio logaritmico:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

Dove C e m sono coefficienti propri del materiale da caratterizzare sperimentalmente.

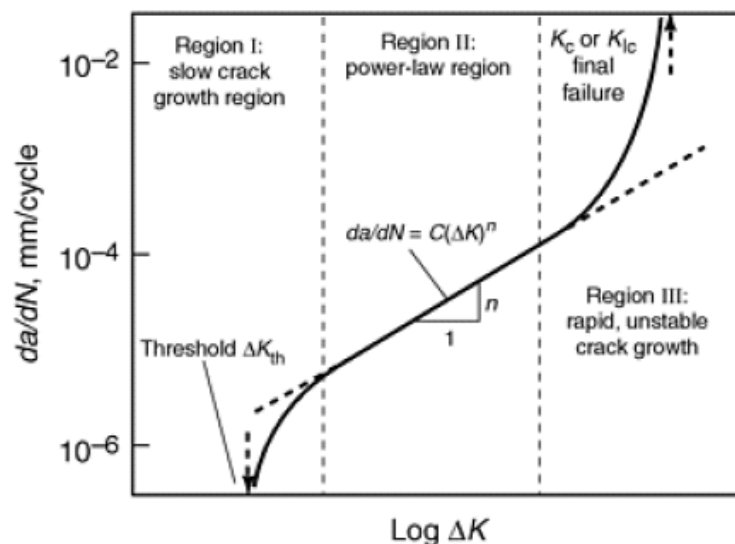


Figura 1.4.2 Velocità di propagazione di cricche lunghe^[4]

In questo diagramma si osservano tre regioni^[25]:

1. Zona dei bassi valori di $\frac{da}{dN}$: l'andamento è quasi verticale, e tende ad un asintoto detto valore di soglia ΔK_{th}
2. Zona valori intermedi di $\frac{da}{dN}$: andamento lineare descritto dalla legge del Paris
3. Zona di alti valori di $\frac{da}{dN}$: andamento a cui corrisponde la propagazione instabile della cricca

La caratterizzazione della propagazione di cricche per fatica sulla base della Meccanica della Frattura si basa sul concetto di similitudine. Questo principio implica semplicemente che per un dato materiale e per date condizioni ambientali, a parità del parametro K_I si verificheranno identiche condizioni all'apice per l'avanzamento della cricca. Quindi indipendentemente dalle dimensioni, a pari ΔK_I ci si aspetta che la velocità di avanzamento sia la medesima. Purtroppo per cricche che hanno dimensioni confrontabili con quelle delle dimensioni microstrutturali (dimensioni dei grani) oppure per cricche che nucleano in corrispondenza della radice di intagli o difetti del materiale quali inclusioni o cavità da ritiro, la velocità di propagazione dipende dalle dimensioni della cricca. In particolare, si verifica che le cricche possono propagare per valori al di sotto della soglia tipica per le cricche lunghe. Infatti a pari ΔK la velocità di propagazione per le cricche corte può essere superiore a quello delle cricche lunghe (figura 1.4.3).

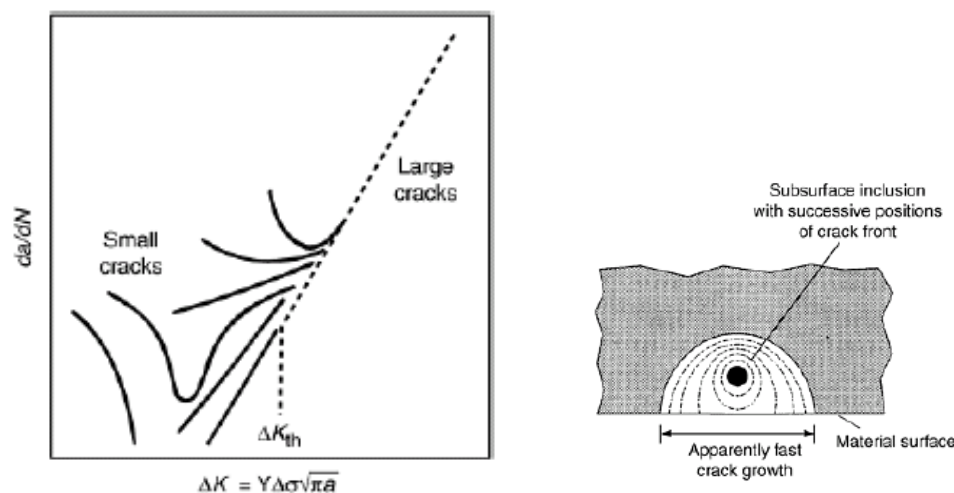


Figura 1.4.3 Comportamento di cricche corte^[4] assunte in corrispondenza di difetti

Il principio di similitudine alla base della MFLE cade parzialmente in difetto nel caso di cricche corte.

Pertanto mentre il valore di soglia è indipendente dalla lunghezza della cricca, per le cricche corte esiste una dimensione limite a_0 sotto la quale il valore di soglia decresce al diminuire delle dimensioni delle cricche (figura 1.4.4). Inoltre nel caso delle cricche corte si osservano interazioni con la microstruttura del materiale: ad esempio quando una cricca raggiunge il bordo grano un ostacolo micro strutturale, la sua velocità di propagazione ne viene fortemente influenzata^[5].

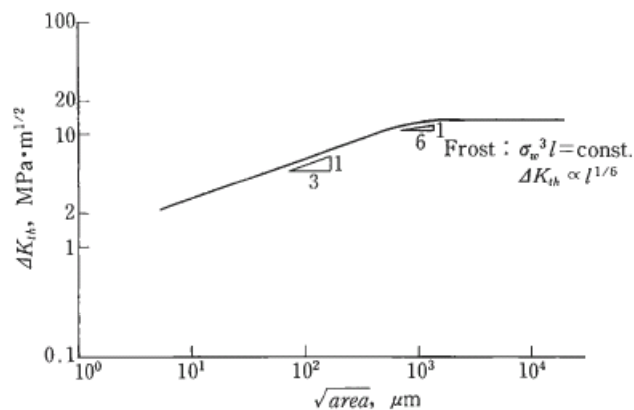


Figura 1.4.4 Soglia di propagazione per cricche corte^[5]

In effetti le cricche di fatica di interesse per molte applicazioni strutturali sono spesso molto piccole e corte per una frazione significativa della vita a fatica della struttura. Coerentemente con questo tipo di approccio non si considerano le fasi di nucleazione e accrescimento, ma si descrive la vita a fatica in termini di propagazione a partire dai piani di scorrimento e dai difetti preesistenti o formati nei primi cicli di carico. Si distinguono due fasi:

- Lo sviluppo delle cricche corte per prevalenti azioni di scorrimento (stage 1 figura 1.4.5)
- Formazione di cricche più grandi la cui crescita è comandata dagli sforzi normali (stage 2 figura 1.4.5)

Come si è detto, le microcricche e i microdifetti da cui nucleano le cricche di fatica si sviluppano in modo diverso dalle cricche lunghe, poiché risentono degli effetti della microstruttura della zona plastica all'apice della cricca e delle concentrazioni di sforzo al fondo degli intagli. L'insieme delle peculiarità delle cricche corte prende il nome, nella letteratura tecnica recente di *short-crack effect*.

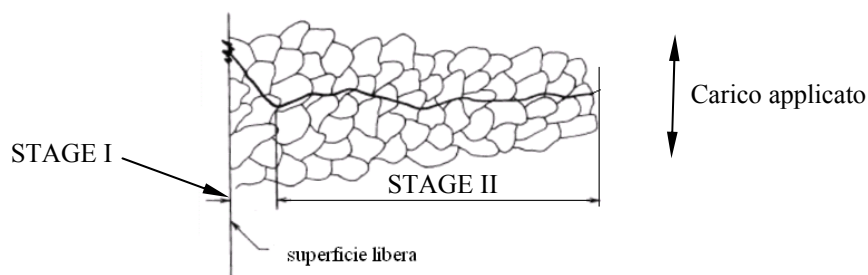


Figura 1.4.5 Fasi di accrescimento della cricca

1.5 Sollecitazioni cicliche di ampiezza variabile

Gli effetti di sequenza furono osservati inizialmente da Schijve^[20] (1973, 1976). L'applicazione di un sovraccarico di trazione, ad esempio, determina una temporanea riduzione della velocità di crescita della fessura. Il fenomeno trova spiegazione nel concetto di "chiusura della fessura" ("*crack closure*"): in seguito alle deformazioni plastiche che inevitabilmente hanno luogo all'apice del difetto, all'atto dello scarico il materiale plasticizzato è soggetto a tensioni di compressione che tendono a richiudere la fessura a causa del completo ritorno elastico delle zone lontane dal difetto. L'intensità di questi sforzi di compressione dipende dalla storia di carico precedente. Il ritardo nella propagazione generalmente non si verifica immediatamente dopo aver applicato il sovraccarico: perché si manifesti è necessario che la fessura penetri all'interno della zona plasticizzata creata dal sovraccarico stesso.

Un effetto esattamente opposto hanno i sovraccarichi "negativi" (cicli con σ_{min} minore di quella dei cicli precedenti), i quali producono allo scarico una riduzione degli sforzi residui di compressione con conseguente aumento della velocità di crescita della fessura. Questo effetto di accelerazione della crescita del difetto riveste una importanza marginale rispetto al ritardo di cui si è detto in precedenza, e viene solitamente trascurato nei modelli di propagazione.

Gli effetti di fatica generati da cicli di ampiezza variabile possono essere studiati raggruppando i cicli ad ampiezza costante presenti nello spettro reale (Figura 1.5.1) determinato sperimentalmente o in fase di design di progetto.

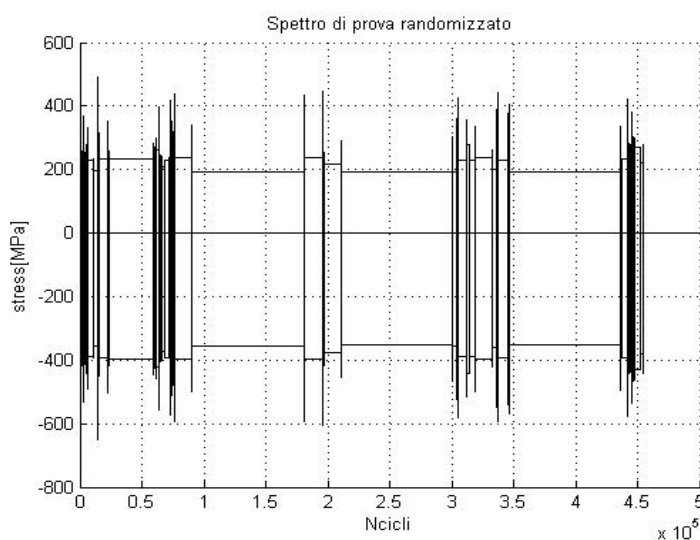


Figura 1.5.1 Esempio di tipico spettro di carico

1.6 Pianificazione attività sperimentale

L'attività pianificata in collaborazione con AVIO s.p.a. persegue l'obiettivo della caratterizzazione a fatica della lega AISI 4340 destinata alla realizzazione di un componente (propeller-shaft) della trasmissione meccanica di potenza del propulsore TP400-D6.

1. In primo luogo dev'essere determinato il comportamento a fatica del materiale esente da difetti e sforzi residui superficiali tramite modello analitico sul diagramma di Haigh. In particolare questo valuta l'effetto dello sforzo medio applicato e dev'esser supportato da un punto sperimentale ($\Delta\sigma_{w0(R=0,05)}$) ricavato dal relativo Stair Case breve.
2. Le prove di propagazione^[12] hanno lo scopo della determinazione dei parametri caratteristici del materiale, ovvero le costanti dell'equazione di NASGRO versione 4.2. A supporto di tale attività vengono ricavate con prove su provini SE(B) le curve del Paris per cinque diversi rapporti di ciclo.
3. I primi due punti diventano quindi un sostegno indispensabile per la determinazione del legame tra il limite di fatica e dimensione del difetto. Di fatto i due Stair Case per $R=0,05$ e $R=-2,5$ eseguiti su provini intagliati devono confermare la validità del modello analitico di El-Haddad 3D modificato, ideato per descrivere il comportamento di cricche corte.
4. Un'ulteriore attività si pone l'obiettivo di quantificare l'effetto degli sforzi residui derivanti da trattamenti meccanici superficiali quali pallinatura e rullatura. Tramite uno Stair Case breve, eseguito su provini sottoposti ai trattamenti, si vuole valutare l'effettiva bontà del programma implementato in ambito MATLAB per la stima del limite di fatica per materiale riportante un gradiente di sforzi superficiali residuo non nullo.
5. Il fine ultimo è quello di prevedere la propagazione di un difetto preesistente nel componente sottoposto a carichi variabili nel tempo. Due prove a spettro per ogni tipologia di prova devono essere effettuate su provini a clessidra: lo scopo è quello di validare il simulatore di propagazione implementato in ambito MATLAB e sottolineare l'effettivo miglioramento dei trattamenti meccanici superficiali sul comportamento a fatica del materiale.

Tabella 1.6.1 Prove rivolte alla caratterizzazione a fatica della lega AISI4340

PROVE Sperimentali	Tipologia	Rapporto di ciclo	Scopo
Fatica su provini lisci	Stair case breve	0,05	Definizione modello analitico su Haigh
Propagazione	Paris	0,7;0,05; -1; -2;-2,5	Parametri caratteristici equazione NASGRO
Fatica su provini intagliati	Stair case breve	0,05 -2,5	Validazione modello analitico El-Haddad
Fatica su provini intagliati pallinati e rullati	Stair case breve	0,05	Definizione modello analitico per la stima del limite di fatica: effetto sforzi residui
Spettro	Sforzi residui: nulli;pallinati;rullati	variabili	Simulatore propagazione ed effetto sforzi residui

Capitolo 2

Prova sperimentale di fatica

L'attività riportata nel presente capitolo è volta alla caratterizzazione del comportamento a fatica del materiale esente da difetti superficiali tramite modello supportato opportunamente da dati sperimentali, in grado di stimare l'effetto dello sforzo medio sul limite di fatica effettivo.

2.1 Modalità di prova

Il test, condotto in riferimento alla normativa ISO 12107^[1], prevede l'esecuzione di uno Stair Case con l'obiettivo della determinazione statistica del limite di fatica assiale per un assegnato valore del rapporto di ciclo di sollecitazione:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0,05 \quad (2.2.1)$$

Fissato il limite per il quale si ritiene che il materiale abbia vita illimitata:

$$N = 10^7 \text{ cicli}$$

si procede calcolando analiticamente l'ampiezza di sollecitazione prossima al limite di fatica, per poi testare il primo provino a tale livello. A seconda dell'esito, rotto **x** oppure non rotto **o**, il seguente provino verrà testato ad un livello inferiore o superiore, distanziato di un passo pari al 5% del primo livello, mantenuto poi costante per gli step successivi fino al completamento della sequenza composta da provini.

Terminato lo Stair Case i risultati vengono sottoposti ad un'analisi statistica^{[2],[3]} per la stima effettiva del limite di fatica in termini di variazione di sollecitazione picco-picco $\Delta\sigma_{w0}$.

2.2 Materiale

Per effettuare lo Stair Case si ha a disposizione un set di 10 provini cilindrici, estratti casualmente dall'intero campione di 30 provini fornito da AVIO s.p.a., di cui viene riportato il disegno costruttivo in figura 2.2.1.

La preparazione del materiale da testare consiste in alcune fasi atte a ridurre la rugosità e gli sforzi residui superficiali derivanti dal processo di tornitura.

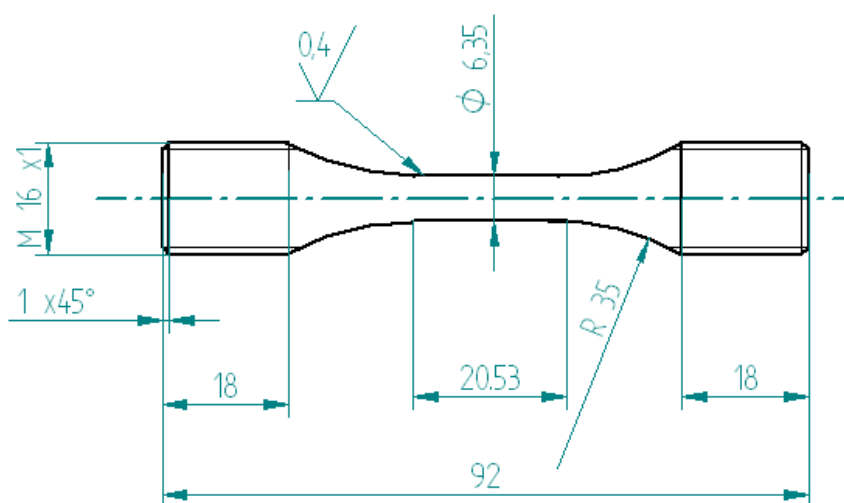


Figura 2.2.1 Disegno costruttivo del provino cilindrico da testare

Estratto dal campione un provino, viene effettuata la misura degli sforzi residui in superficie tramite diffrattometro *Xstress 3000 AST Stresstech* tarato per acciaio. Tale valore mostrato in tabella 2.2.1a, attestato su circa -500 MPa, è sintomatico del processo di lavorazione alle macchine utensili necessario per la realizzazione del provino e forviante per quanto riguarda la conduzione del test poiché non inerente alle caratteristiche intrinseche del materiale.

Allo scopo di abbattere la rugosità superficiale, il provino viene sottoposto a lucidatura manuale effettuata avendo cura di descrivere un movimento longitudinale lungo l'asse ed omogeneo lungo la circonferenza, con l'ausilio di carta abrasiva avente granulometria decrescente di taglia 600-800-1000. Ovviamente l'operazione comporta una riduzione del diametro iniziale, motivo per il quale viene rilevato nell'operazione seguente tramite proiettore di profili sensibile al centesimo di millimetro, per poi essere comparato con quello fornito da AVIO s.p.a., per i quali si sono riscontrati errori come evidenziato in tabella

2.2.2, ma comunque utilizzato in fase di sperimentazione. Tale asportazione comporta anche la riduzione degli sforzi residui superficiali di compressione di circa 200 MPa, rilevata ancora una volta al diffrattometro e mostrata in tabella 2.2.1b.

Tabella 2.2.1 Rilevamento sforzi residui superficiali al diffrattometro **a)** provino tornito; **b)** provino lucidato manualmente

Provino	s/n ISM 015	Tornitura	
σ_1	-452,72	MPa	
σ_2	-584,53	MPa	
Φ	4	°	
0°	-453,5	MPa ±	10,4
FWHM	3,026	° ±	0,035
45°	-528,5	MPa ±	19,3
FWHM	3,065	° ±	0,027
90°	-583,8	MPa ±	42,9
FWHM	2,983	° ±	0,035

a)

Provino	s/n ISM 015	Lucidatura manuale	
σ_1	-267,89	MPa	
σ_2	-359,53	MPa	
Φ	22	°	
0°	-287,3	MPa ±	11,5
FWHM	3,007	° ±	0,025
45°	-377,5	MPa ±	22,7
FWHM	2,985	° ±	0,018
90°	-376,2	MPa ±	32,5
FWHM	3,060	° ±	0,021

b)

A questo punto si decide di condurre il test anche se gli sforzi residui superficiali, seppur ridotti, non sono trascurabili. Di fatto, come verrà evidenziato nel paragrafo 2.5, il limite di fatica tende ad aumentare a causa dello strato superficiale compresso che impedisce all'eventuale difetto di propagare.

Riepilogando brevemente le fasi di preparazione dei provini, i cui diametri sono riportati in tabella 2.2.2, consistono in:

- Rilevamento sforzi residui superficiali
- Lucidatura manuale, figura 2.2.2a
- Misura dei diametri, figura 2.2.2b
- Rilevamento nuovi sforzi residui superficiali



a)

b)

Figura 2.2.2 Fasi di preparazione al test dei provini : a) lucidatura manuale; b) rilevamento diametri al proiettore di profili

Tabella 2.2.2 Rilevamento dati durante le fasi di preparazione dei provini

ID provino s/n ISM	diametro AVIO [mm]	σ residui superficiali tornitura	σ residui superficiali lucidatura	diametro post lucidatura [mm]
006	6,355			6,35
007	6,359			6,365
008	6,370			6,365
009	6,371			6,36
010	6,365			6,36
012	6,366			6,36
013	6,367			6,365
014	6,352			6,36
015	6,352	~ -500 MPa	~ -300 MPa	6,35
016	6,357			6,355

2.3 Macchina di prova

Lo Stair Case breve viene effettuato con l'ausilio di una macchina di prova a risonanza: la *Rumul TESTRONIC resonant testing machine*. La macchina in dotazione al Politecnico di Milano ha una capacità di carico fino a 100 kN, consente oscillazioni di ampiezza 6 mm ed opera fino a frequenze di 250 Hz, regolabili attraverso l'ancoraggio di masse apposite alla traversa superiore. Sono montate celle di carico che misurano forze di 100 kN. Gli afferraggi montano provini filettati con filettatura metrica M16x1. Inoltre la macchina è situata in box antirumore con atmosfera condizionata alla temperatura costante di 23°C.

Il sistema di bloccaggio riportato in figura 2.3.1 consiste in due afferraggi M16x1 attraverso i quali viene afferrato il provino; questo è premuto alle basi, e quindi assialmente, da due punzoni i quali, essendo esternamente filettati, vengono saldamente collegati agli afferraggi da due ghiera esterne. Quest'ultime al serraggio, premono assialmente e inducono una forza che mantiene saldo il contatto tra la superfici di base del provino e i rispettivi punzoni. Quello inferiore è fisso e permette di rilevare le forze applicate tramite la cella di carico, mentre quello superiore è azionato dal magnete.

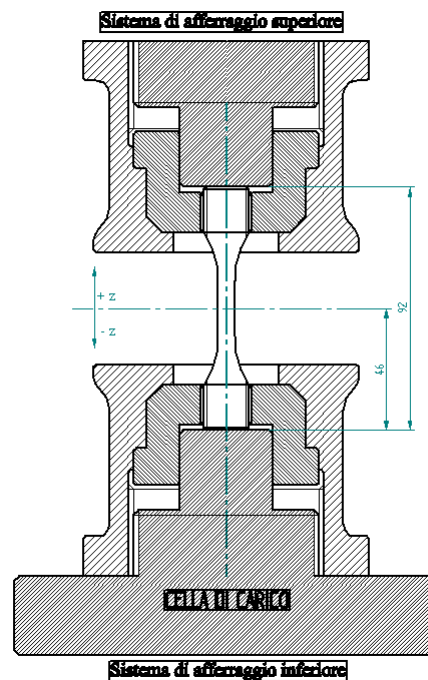
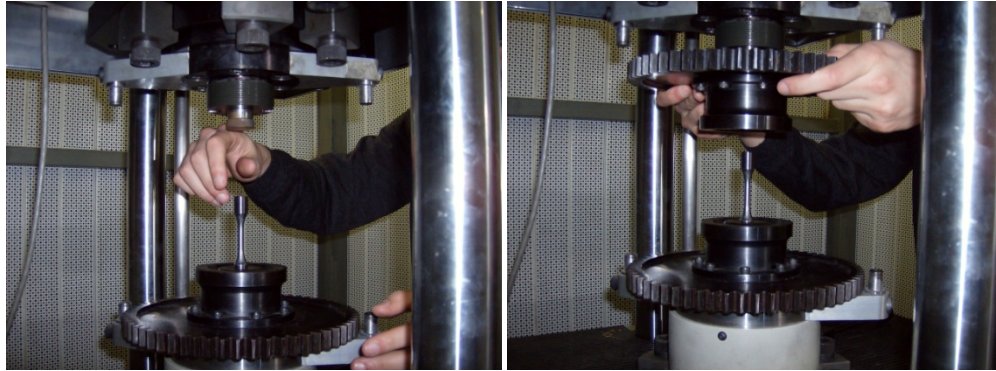


Figura 2.3.1 Schema del sistema di bloccaggio *Rumul TESTRONIC resonant testing machine*

La sequenza di montaggio del provino consiste in alcuni passi ripresi in figura 2.3.2 :

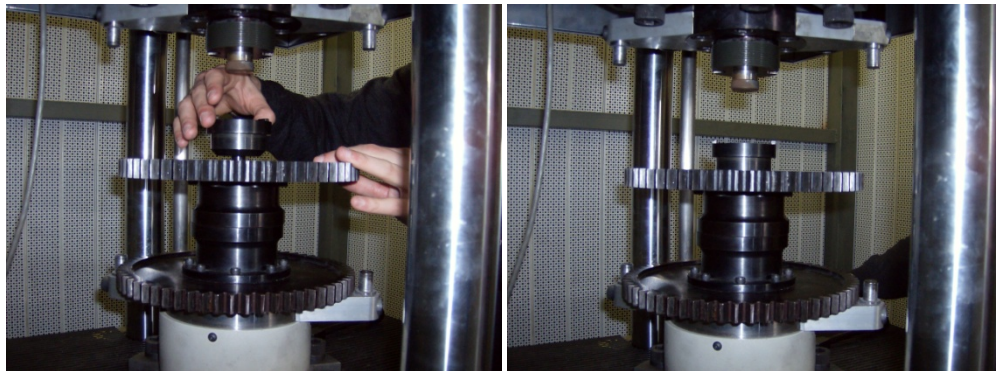
- a) Posizionamento tramite accoppiamento filettato al sistema di afferraggio inferiore. Durante l'operazione è necessario avvitare il provino alla ghiera interna fino ad ottenere battuta con il punzone inferiore.
- b) Posizionamento della ghiera esterna superiore.
- c) Posizionamento dell'afferraggio superiore.
- d) Abbassamento del punzone superiore fino all'ottenimento di una forza di precarico di compressione all'incirca di 1300 N.
- e) Posizionamento della ghiera esterna superiore.

- f) Serraggio delle due ghiera esterne tramite chiave in dotazione alla macchina. Con questa operazione viene pressoché annullato il precarico creato durante la fase d.



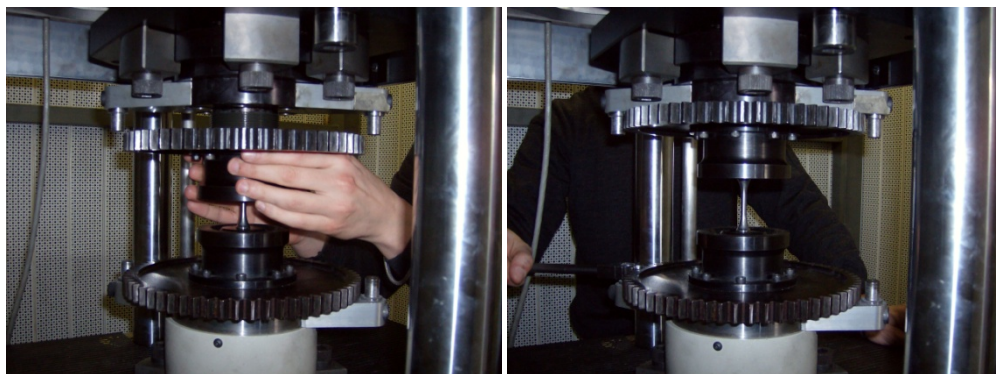
a)

b)



c)

d)



e)

f)

Figura 2.3.2 Sequenza di montaggio provino su Rumul Testronic

Il software che gestisce il controllo della macchina richiede in input, oltre la sezione del provino, lo sforzo medio da applicare durante il test σ_{med} e lo sforzo alternato σ_a .

Per quanto riguarda la conduzione e l'eventuale interruzione della prova si hanno a disposizione diversi "allarmi":

- Numero di cicli: il limite di fatica è fissato per $N=10^7$
- Frequenza di prova: come detto la macchina funziona in risonanza. Una volta a regime, la frequenza non varia per tutto l'arco della prova se non si hanno cedimenti. Se il provino cede, la sezione resistente si riduce e la frequenza del sistema si abbassa, come si evince dall'equazione 2.3.1. La prova quindi viene bloccata quando il software sente una variazione di frequenza di ± 2 Hz.

$$\begin{cases} k_{provino} = \frac{E \cdot A}{l} \\ f = \frac{\omega}{2\pi} = \sqrt{\frac{k}{m}} \end{cases} \quad (2.3.1)$$

- Posizione traversa: per una maggior sicurezza si creano limiti, superiore ed inferiore, che riguardano la corsa della traversa superiore.
- Livello di sforzo: per lo stesso motivo e per salvaguardare l'integrità del provino si creano dei limiti di sforzo in prova, superiore ed inferiore, compatibili con il test.

2.4 Stima analitica del limite di fatica

Il diagramma di Haigh in figura 2.4.2 mostra come, all'aumentare dello sforzo medio e quindi del rapporto di ciclo, l'ampiezza di sollecitazione limite applicabile diminuisca.

Di fatto, per R compreso tra ± 1 , il legame tra lo sforzo alternato e lo sforzo medio è descritto dalla retta che unisce i punti che individuano sulle ascisse il carico di rottura R_m e sulle ordinate il limite di fatica alternato σ_{fa} determinato nell'equazione 2.2 tramite il prodotto tra il carico di rottura e il coefficiente di fatica alternata assiale C_{fa} , ricavato dal diagramma riportato in figura 2.4.1 tratta da ASM Handbook^[4], riferito ad un acciaio AISI 4340 con carico di rottura leggermente inferiore al materiale in questione ma comunque estendibile a questo. Al contrario, per $R < -1$, il limite in termini di sforzo alternato viene assunto costante.

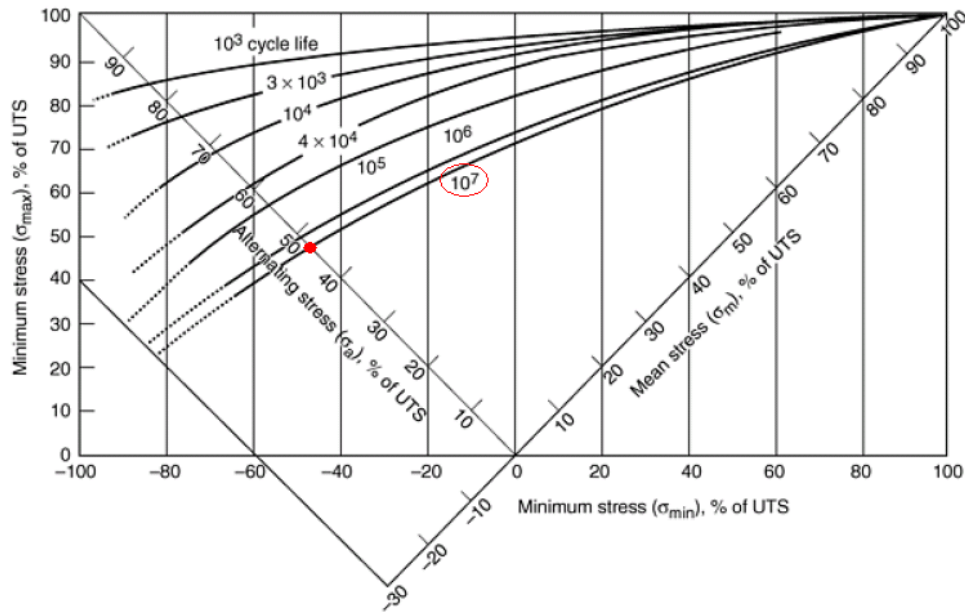


Figura 2.4.1 Diagramma di Haigh iso-vita per AISI 4340 per la determinazione di C_{fa}

Come detto in precedenza si vuole determinare il limite di fatica del materiale in termini di variazione di sforzo $\Delta\sigma$ ad un rapporto di ciclo $R = 0,05$ mantenuto costante.

Lo sforzo limite alternato è individuato, nell'equazione 2.4, dall'intersezione della retta avente come coefficiente angolare A , a sua volta funzione del rapporto di ciclo scelto, con la retta definita sul diagramma di Haigh rappresentante il modello di Goodman.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0,05 \quad \rightarrow \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} = 0,9048 \quad (2.1)$$

$$\sigma_{fa} = Rm \cdot C_{fa} = 632,5 \text{ MPa} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} \frac{\sigma_a}{\sigma_{fa}} + \frac{\sigma_m}{Rm} = 1 \\ \sigma_a = A \cdot \sigma_m \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} \sigma_{a,limite} = \frac{\sigma_{fa} \cdot Rm \cdot A}{\sigma_{fa} + A \cdot Rm} = 419,3 \text{ MPa} \\ \sigma_{m,limite} = \frac{\sigma_{a,limite}}{A} = 463,4 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2.4)$$

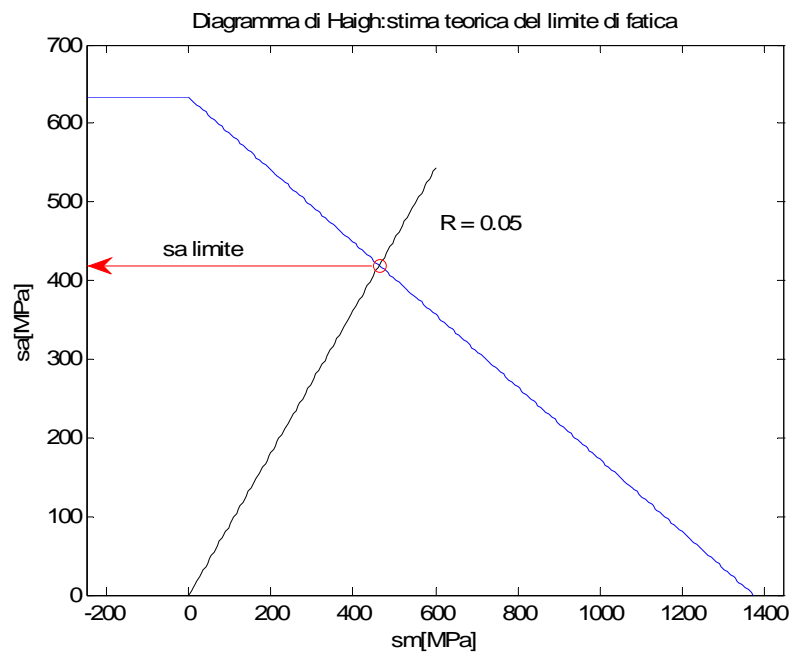


Figura 2.4.2 Diagramma di Haigh per la stima del limite di fatica teorico

Il primo livello a cui testare il primo provino è quindi individuato dall'equazione 2.5 in cui si decide di assumere un valore prossimo al doppio dello sforzo limite alternato calcolato precedentemente sul diagramma di Haigh. Il passo d con cui eseguire gli step successivi dello Stair Case è determinato dall'equazione 2.6 come suggerisce la normativa.

$$\Delta\sigma_{w0,teorico} = 2 \cdot \sigma_{a,limite} = 840 \text{ MPa} \rightarrow 850 \text{ MPa} \quad (2.5)$$

$$d = 5\% \Delta\sigma_{w0,teorico} \approx 40 \text{ MPa} \quad (2.6)$$

2.5 Problema degli sforzi residui da lavorazione meccanica

Estratto casualmente un provino dal campione (s/n ISM 009), si vuole testare il livello di sforzo stimato per la prova e l'effetto degli sforzi residui ancora presenti nello strato superficiale.

Tabella 2.5.1 Stair Case rilevato in fase di settaggio dei parametri di prova

Identificazione provino	s/n ISM 009	s/n ISM 009	s/n ISM 009	s/n ISM 009	s/n ISM 009	s/n ISM 009	s/n ISM 009
prova	01	02	03	04	05	06	07
$\Delta\sigma$ [MPa]							
1130							O
1090						O	
1050					O		
1010				O			
970			O				
930		O					
890							
850	O						
810							
N°cicli	10^7	10^7	$3,7 \cdot 10^6$	$6,2 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$

La tabella 2.5.1 è riferita allo Stair Case ricavato con lo stesso provino per diversi livelli di sforzo crescenti per i quali non si hanno avuto rotture.

Le prime due prove sono state condotte per un numero di cicli pari a dieci milioni, per i quali si ritiene che il materiale abbia vita illimitata, le seguenti evidenziano il fatto che gli sforzi residui superficiali non possono essere trascurati poiché l'ultimo livello di sforzo in prova è coincidente con lo snervamento del materiale, come mostrato dall'equazione 2.8.

$$\sigma_{max} = \frac{\Delta\sigma_{prova\ 07}}{1-R} = \frac{1130}{0,95} = 1189,5 \approx 1190\ MPa = \sigma_{sn} \quad (2.8)$$

In base a questa osservazione si è deciso di sospendere il test per sottoporre i provini ad elettropulitura, processo elettrochimico attraverso il quale viene asportato lo strato superficiale in cui sono concentrati gli sforzi di compressione derivanti dal processo di tornitura. In questo modo il materiale presenterebbe uno strato superficiale scarico, motivo per il quale ci si aspetta una riduzione della resistenza a fatica.

2.6 Elettropulitura

Come accennato in precedenza, tramite il processo di elettropulitura si vuole asportare chimicamente lo strato superficiale in cui sono concentrati gli sforzi residui derivanti dai processi di lavorazione meccanica a cui il provino è stato sottoposto.

Il processo, in figura 2.6.1, è di tipo galvanico: il provino, immerso in soluzione acida (94% acido acetico + 6% acido perclorico), è attraversato da corrente prodotta da un generatore di tensione e costituisce il polo positivo del sistema (anodo). Il catodo, invece, è costituito da una gabbia di laminette in acciaio che attornia il provino e immersa interamente nell'acido. In questo modo si crea un potenziale che asporta gli elettroni superficiali del provino ottenendo l'effetto desiderato, senza indurre tensioni al materiale. Si precisa che per salvaguardare le filettature, che consentono l'afferraggio alla macchina di test, queste vengono avvolte con del nastro isolante per evitare il contatto con la soluzione e quindi la parziale erosione.

Per ottenere un'asportazione più omogenea sul fondo del contenitore della soluzione è posizionato un magnete messo in rotazione dalla piastra magnetica sottostante. L'obiettivo è quello di cedere alla massa fluida un moto vorticoso con asse parallelo e centrato a quello del provino.

Inoltre viene eseguita un'ulteriore fase di lucidatura per la preparazione di una superficie più idonea al processo tramite burattatura, figura 2.6.2, con velocità di rotazione di 50 m/min per la durata complessiva di 2 ore.

Per poter definire i parametri di controllo del processo, durata e intensità di corrente, si effettuano prove graduali al termine delle quali viene rilevato il diametro del provino e lo stress superficiale tramite diffrattometro; in tal modo viene univocamente determinato lo spessore all'interno del quale il gradiente di sforzi residui si esaurisce.

L'intensità di corrente, che tende ad innalzarsi a causa dell'aumento della temperatura del bagno acido, viene regolata manualmente tramite la tensione indotta e mantenuta nel range 1,6÷1,8 A.

La durata del processo viene scelta in base alle 2 prove effettuate su due diversi provini, esterni al campione scelto per la prova di fatica, come mostrato in tabella 2.6.1: mentre per il primo provino, sottoposto a 15 minuti di elettropulitura, si rilevano sforzi residui non ancora trascurabili ed un strato eroso di 35 μm riferito al raggio; per la seconda prova, della durata di 20 minuti, si rileva una superficie del provino pressoché scarica ed una diminuzione del diametro di quasi 100 μm , come riportato in tabella 2.6.2.



a)



b)

Figura 2.6.1 Elettropulitura dei provini: a) macchina per il processo elettrochimico; b) particolare del provino prima dell'immersione



a)



b)

Figura 2.6.2 Fase di burattatura: a) montaggio provini su testa mandrinata b) buratto

Tabella 2.6.1 Rilevamento sforzi residui superficiali al diffrattometro a) $t_{\text{elettropulitura}} = 15 \text{ min}$;

b) $t_{\text{elettropulitura}} = 20 \text{ min}$

Provino	s/n ISM 005	$t_{\text{elettropulitura}}$	15 min	Provino	s/n ISM 028	$t_{\text{elettropulitura}}$	20 min
σ_1	-74,96	MPa		σ_1	15,18	MPa	
σ_2	-156,93	MPa		σ_2	-14,98	MPa	
Φ	-34	°		Φ	-82	°	
0°	-130,5	MPa ±	11,0	0°	-14,5	MPa ±	8,3
FWHM	2,798	° ±	0,018	FWHM	2,6	° ±	0,0
45°	-154,3	MPa ±	-11,7	45°	4	MPa ±	15,3
FWHM	-2,853	° ±	0,027	FWHM	2,724	° ±	0,014
90°	-101,4	MPa ±	9,3	90°	14,7	MPa ±	15,4
FWHM	2,791	° ±	0,03	FWHM	2,758	° ±	0,015

a)

b)

Tabella 2.6.2 Rilevamento diametri dei provini sottoposti ad elettropulitura: in corsivo le due prove per la determinazione della durata del processo

s/n ISM	Diametro post lucidatura [mm]	Tempo elettropulitura [min]	Diametro post elettropulitura [mm]	Asportazione [μm]
006	6,35	20	6,245	105
007	6,365	20	6,248	117
008	6,365	20	6,24	125
009	6,36	20	6,26	100
010	6,36	20	6,26	100
012	6,36	20	6,26	100
013	6,365	20	6,24	125
014	6,36	20	6,24	120
015	6,35	20	6,233	117
016	6,355	20	6,225	130
<i>005</i>	<i>6,35</i>	<i>15</i>	<i>6,28</i>	<i>70</i>
<i>028</i>	<i>6,355</i>	<i>20</i>	<i>6,26</i>	<i>95</i>

2.7 Prova sperimentale e stima del limite di fatica

Dalla sequenza Stair Case riportata in tabella 2.7.1 ottenuta in fase di sperimentazione è possibile dedurre come sia stato annullato l'effetto degli sforzi residui superficiali. Le prime due prove infatti dimostrano una diminuzione drastica della resistenza a fatica del materiale mentre la terza denota un comportamento meno conservativo di quello stimato tramite il diagramma di Haigh semplificato al paragrafo 2.4. Lo Stair case, ritenuto significativo, inizia alla quarta prova e termina all'undicesima, al completamento del test di 8 provini.

Il rapporto di ciclo R e il passo d tra i vari step della sequenza rimangono invariati rispetto la fase di design dell'esperimento mentre il primo livello di sforzo in prova in termini di variazione di sollecitazione è pari a 970 MPa. La frequenza di prova è molto simile per ogni prova attestandosi sui 97 Hz, comunque non si ritiene influisca sul comportamento a fatica del materiale a temperatura ambiente.

Tabella 2.7.1 Sequenza Stair case breve sperimentale AISI 4340

Id. provino: s/n ISM	009	008	010	010	007	006	013	012	014	015	016
prova	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011
$\Delta\sigma$ [MPa]											
note				start							
1130	X										
1090											
1050											
1010		X			X				X		
970				O		X		O		X	
930			O				O				O
890											
850											
810											
N°cicli	$1,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^6$	10^7	$1,4 \cdot 10^6$	$5,69 \cdot 10^5$	10^7	10^7	$3,3 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$	10^7

La stima statistica del limite di fatica $\Delta\sigma_{w0}$ al rapporto di ciclo testato è stata ottenuta in riferimento al metodo di Dixon^[3], applicato per una sequenza avente $N > 6$ e un cambio di risposta al secondo livello:

$$\Delta\sigma_{w0} = \frac{\sum \Delta\sigma_i}{N} + \frac{d}{N} \cdot (A + C) \quad (2.7.1)$$

dove $\Delta\sigma_i$ sono i livelli di sforzo della sequenza, d è il passo della serie, N è la dimensione del campione N' diminuita del numero di risposte uguali che precedono il livello a cui il seguente si avrà il primo cambio di risposta mentre A e C sono coefficienti ottenuti dalla tabella 2.7.2.

Tabella 2.7.2 Valori di A e C per sequenze con $N > 6$.
 $C=0$ per sequenza la cui prima parte è **o** o **x**

no-nx	A	C per sequenza la cui prima parte è			
		oo	ooo	oooo	ooooo
5	10.8	0	0	0	0
4	7.72	0	0	0	0
3	5.22	.03	.03	.03	.03
2	3.20	.10	.10	.10	.10
1	1.53	.16	.17	.17	.17
0	0	.44	.48	.48	.48
-1	-1.55	.55	.65	.65	.65
-2	-3.30	1.14	1.36	1.38	1.38
-3	-5.22	1.77	2.16	2.22	2.22
-4	-7.55	2.48	3.36	3.52	3.56
-5	-10.3	3.5	4.8	5.2	5.3
nx-no	-A	xx	xxx	xxxx	xxxxx
		-C per sequenza la cui prima parte è			

Ricavati i valori dei coefficienti dipendenti dalla serie è possibile effettuare la stima, che si riduce ad una semplice media aritmetica riportata dall'equazione 2.7.2.:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{sequenza: } oxxooxxo \\ N' = N = 8 \\ n_x - n_o = 0 \end{array} \right. \rightarrow A = C = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\sigma_{w0} = \frac{\sum \Delta\sigma_i}{N} = 970 \text{ MPa} \\ R = 0,05 \end{array} \right. \quad (2.7.2)$$

Questo rappresenta il punto sperimentale, punto di partenza per la costruzione del modello analitico che descrive il comportamento a fatica del materiale.

2.8 Modello analitico per la definizione del comportamento a fatica

In questa fase si vuole creare un modello analitico in grado di stimare il limite di fatica del materiale tenendo conto dell'effetto dello sforzo medio applicato e quindi del rapporto di ciclo. Come affermato in precedenza il limite calcolato tramite il diagramma di Haigh semplificato (modello di Goodman) per il rapporto di ciclo in esame è piuttosto conservativo rispetto al risultato sperimentale. Al contrario, il modello di Gerber risulta non conservativo, come mostrato in figura 2.8.1.

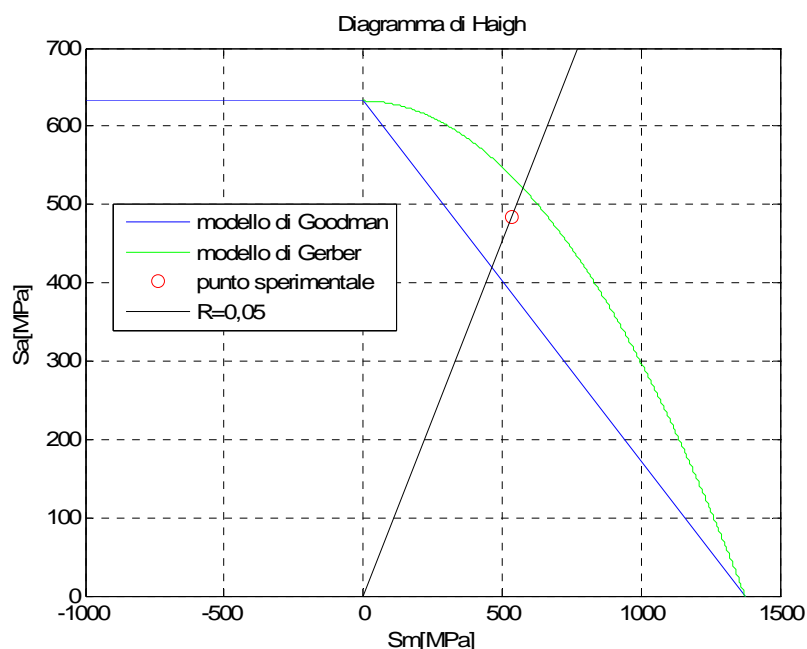


Figura 2.8.1 Confronto tra modelli in letteratura e punto sperimentale

Il punto sperimentale ricavato tramite Stair Case al paragrafo precedente diventa quindi un punto fermo per la costruzione del modello che descrive l'effetto dello sforzo medio solamente per rapporti di ciclo compresi tra -1 e +1. Seguendo il modello di Gerber, si utilizza una parabola per l'interpolazione dei punti sperimentali: siccome si ha un solo punto disposizione ci si è riferiti ai punti sui rispettivi assi del diagramma. Per quanto riguarda lo sforzo alternato si mantiene lo stesso valore utilizzato al paragrafo 2.4 che identifica il limite di fatica assiale per $R = -1$, mentre lo sforzo medio è limitato allo snervamento del materiale piuttosto che al carico di rottura come previsto dal modello di Gerber. Per rapporti di ciclo inferiori a -1 il limite è assunto costante e pari al limite di fatica

assiale σ_{fa} . Introducendo le coordinate dei punti da interpolare come condizioni al contorno:

$$\begin{cases} S_x = [\sigma_{sn}, 0] \\ S_y = [0, \sigma_{fa}] \\ S_{exp} = [\sigma_{a,exp}, \sigma_{m,exp}] \end{cases} \quad (2.8.1)$$

$$\begin{cases} a = \frac{-b \cdot \sigma_{y0} - \sigma_{fa}}{\sigma_{y0}^2} \\ b = \frac{\sigma_{a,exp} + \sigma_{fa} \cdot \left(\frac{\sigma_{m,exp}^2}{\sigma_{y0}^2} - 1 \right)}{\sigma_{m,exp} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{m,exp}}{\sigma_{y0}} \right)} \\ c = \sigma_{fa} \end{cases} \quad (2.8.2)$$

è possibile definire i coefficienti della parabola espressa dall'equazione 2.8.3 e rappresentata in figura 2.8.2.

$$\sigma_a = \sigma_m^2 \cdot a + \sigma_m \cdot b + c \quad (2.8.3)$$

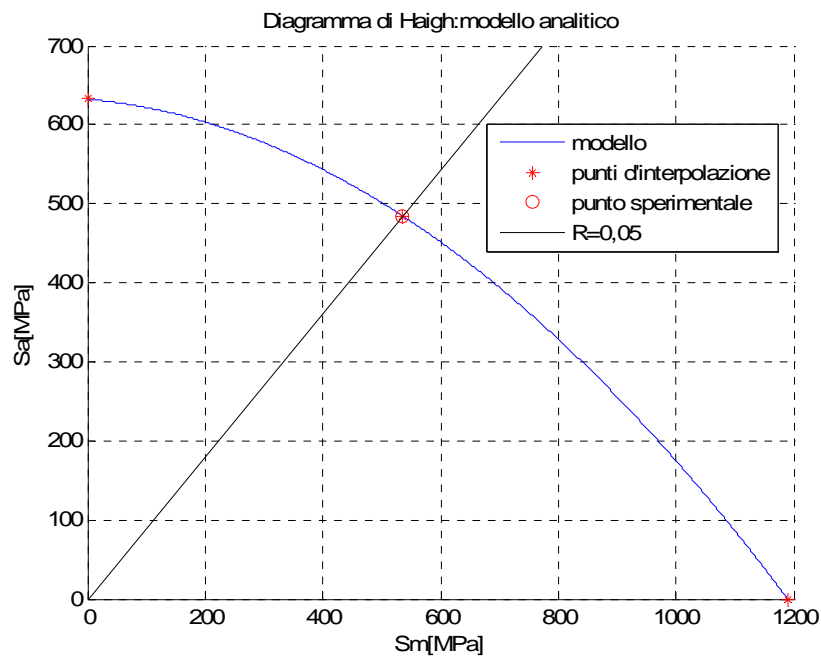


Figura 2.8.2 Effetto dello sforzo medio: modello analitico

2.9 Analisi delle superfici di frattura

Questo paragrafo ha l'obiettivo di definire un modello capace di giustificare le modalità di frattura del materiale e quindi di individuare eventuali cause di inneschi che hanno portato al cedimento della struttura cristallina. L'analisi delle superfici di frattura supportata da microscopio ottico ed elettronico SEM chiarisce tale proposito.

Ad una prima visione, figura 2.9.2a, si rileva la presenza di una linea di frattura disposta a 45° rispetto l'asse del provino giustificata dal fatto che gran parte della sezione effettivamente cede per scorrimento come per le rotture quasi-statiche di materiali duttili e nelle rotture di schianto per fatica ad alto numero di cicli. A tale riguardo è facile identificare un piano, detto *piano delle superfici di frattura*, di limitata estensione rispetto l'area della sezione trasversale del provino orientato proprio come quest'ultima sul quale si deve cercare la causa di innesco che ha portato al cedimento, figura 2.9.2b-c-d.

Il microscopio elettronico SEM permette una profonda analisi all'interno della struttura del materiale, motivo per il quale sarebbe superfluo indagare sull'intera sezione del provino. Ci si limita ad investigare sulle cause d'innesco del cedimento e quindi ad ispezionare il piano delle superfici di frattura: questo presenta un fronte di propagazione detto a *linee di spiaggia* sul quale la cricca è propagata, direzionato dalla superficie libera verso il centro del provino, figura 2.9.2e. L'attenzione viene quindi focalizzata sul bordo, con lo scopo di identificare le eventuali cause di concentrazione di sforzi, rappresentate dai difetti presenti nella struttura cristallina del materiale.

Solamente in due casi si rileva la presenza di un difetto, di forma circolare e del diametro di circa dieci micron, posizionato in prossimità del raggio esterno del provino, figura 2.9.2f. Grazie all'esame dello spettro ricavato al SEM, figura 2.9.3, si può affermare che trattasi di un'inclusione non metallica a base di calcio unitasi al reticolo cristallino nel bagno fuso in fase di produzione. Questo conferma la teoria del Murakami^[5], per la quale difetti sferici posizionati nel reticolo ad una distanza prossima alla superficie sono più critici per quanto riguarda l'integrità del materiale rispetto a difetti spostati verso il centro della sezione.

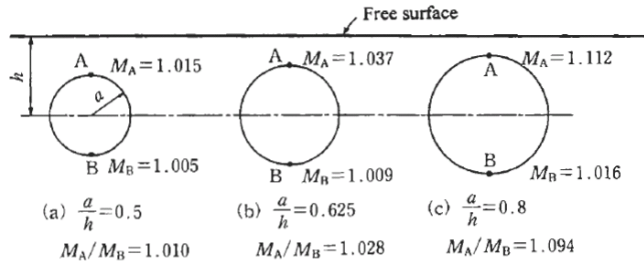
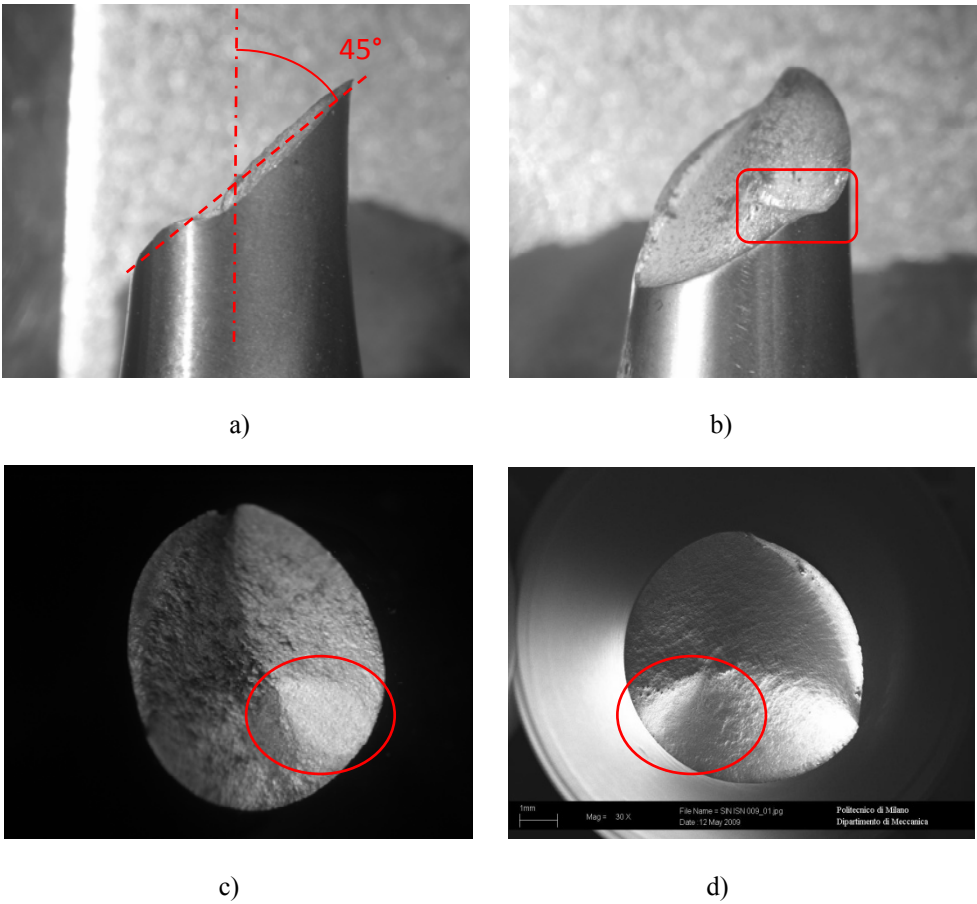


Figura 2.9.1 Fattore d'intensificazione degli sforzi per un difetto circolare prossimo alla superficie libera del materiale

Il fatto che nella maggior parte dei casi non sia stata individuata la presenza di difetti nella struttura cristallina induce a pensare che la cricca sia nucleata in superficie a causa dell'inevitabile irregolarità di quest'ultima, che rappresenta il luogo dove si concentrano maggiormente gli sforzi. È possibile inoltre affermare che il materiale è ottenuto con un processo di produzione coperto da segreto aziendale per il quale si ottiene un'elevata qualità.



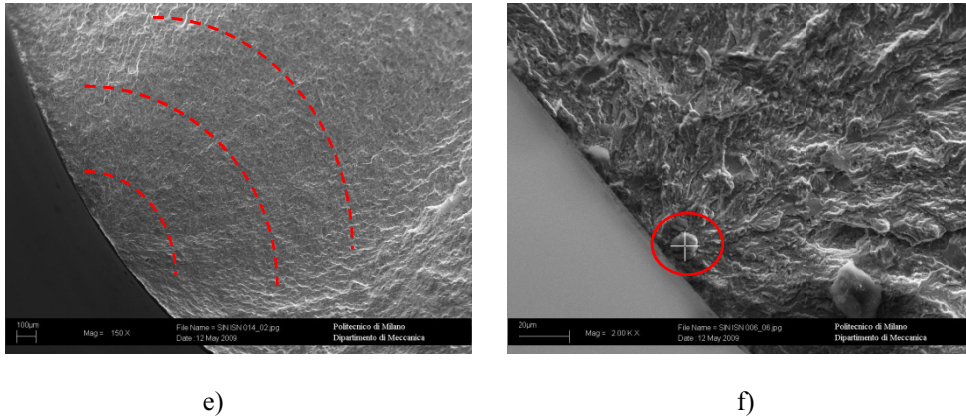


Figura 2.9.2 Analisi delle superfici di frattura

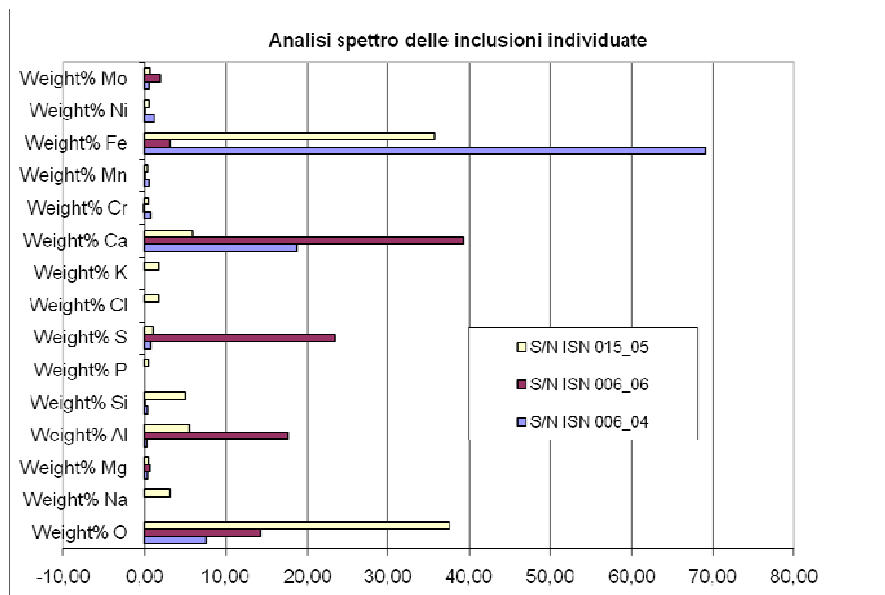


Figura 2.9.3 Inclusioni a base di calcio rilevate nella struttura cristallina

Capitolo 3

Criterio di progettazione damage tolerance: prova sperimentale di fatica flessionale su provini microintagliati

Dopo aver stabilito il comportamento a fatica del materiale in assenza di difetti, l'attività sperimentale si propone di entrare più a fondo nella caratterizzazione del materiale ammettendo che, nei punti più sollecitati e quindi più critici della struttura, siano presenti difetti nella struttura cristallina, seguendo così un approccio *damage tolerance*.

Nello specifico si vuole determinare la relazione tra limite di fatica e dimensione del difetto, il cosiddetto 'diagramma di Kitagawa', tramite modelli esistenti in letteratura che riguardano appunto la valutazione della resistenza a fatica in presenza di difetti assunti come microcricche.

L'obiettivo ultimo per l'attività pianificata rimane la verifica delle stime del diagramma ottenibili con il modello 'El-Haddad 3D' e disporre così di un modello predittivo nei riguardi del limite di fatica di microcricche al variare del rapporto di ciclo.

Tale modello deve poi trovare ulteriore conferma nella stima del limite di fatica dei provini soggetti al trattamento di pallinatura, tema affrontato nel capitolo 4.

3.1 Modalità di prova

Come per la prova di fatica su provini lisci il test, condotto in riferimento alla normativa ISO 12107^[1], prevede l'esecuzione di uno Stair Case con l'obiettivo della determinazione statistica del limite di fatica assiale di un provino microintagliato per un assegnato valore del rapporto di ciclo di sollecitazione:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0,05$$

e per un limite per il quale si ritiene che il materiale abbia vita illimitata:

$$N = 10^7 \text{ cicli}$$

Terminato lo Stair Case i risultati vengono sottoposti ad un'analisi statistica^{[2],[3]} per la stima effettiva del limite di fatica in termini di variazione di sollecitazione picco-picco $\Delta\sigma_w$. Tale risultato verrà poi utilizzato per verificare la bontà del modello predittivo preso in esame.

3.2 Materiale

Per effettuare lo Stair Case si ha a disposizione un set di 20 provini cilindrici, eccedenti dall'intero campione di 30 provini fornito da AVIO s.p.a. adottati per la prova di fatica al capitolo 2.

La preparazione del materiale da testare prevede la realizzazione di una superficie con caratteristiche di rugosità adeguate e la minimizzazione delle tensioni residue derivanti dal processo di tornitura tramite le fasi mostrate al paragrafo 2.2. Brevemente si riportano i punti focali:

- a) Lucidatura manuale con carta abrasiva di granulometria decrescente (600-800-1000)
- b) Burattatura di due ore alla velocità di 50 giri/min
- c) Rilevamento diametri tramite proiettore di profili sensibile al centesimo di millimetro
- d) Elettropulitura in soluzione acida (94% acido acetico + 6% acido perclorico) durante la quale lo strato superficiale compresso ($\approx 100 \mu\text{m}$) viene asportato chimicamente. Parametri di processo:

$$\begin{cases} t_{\text{elettropulitura}} = 20 \text{ min} \\ 1,6 < I[A] < 1,8 \end{cases}$$

- e) Rilevamento diametri finali tramite proiettore di profili

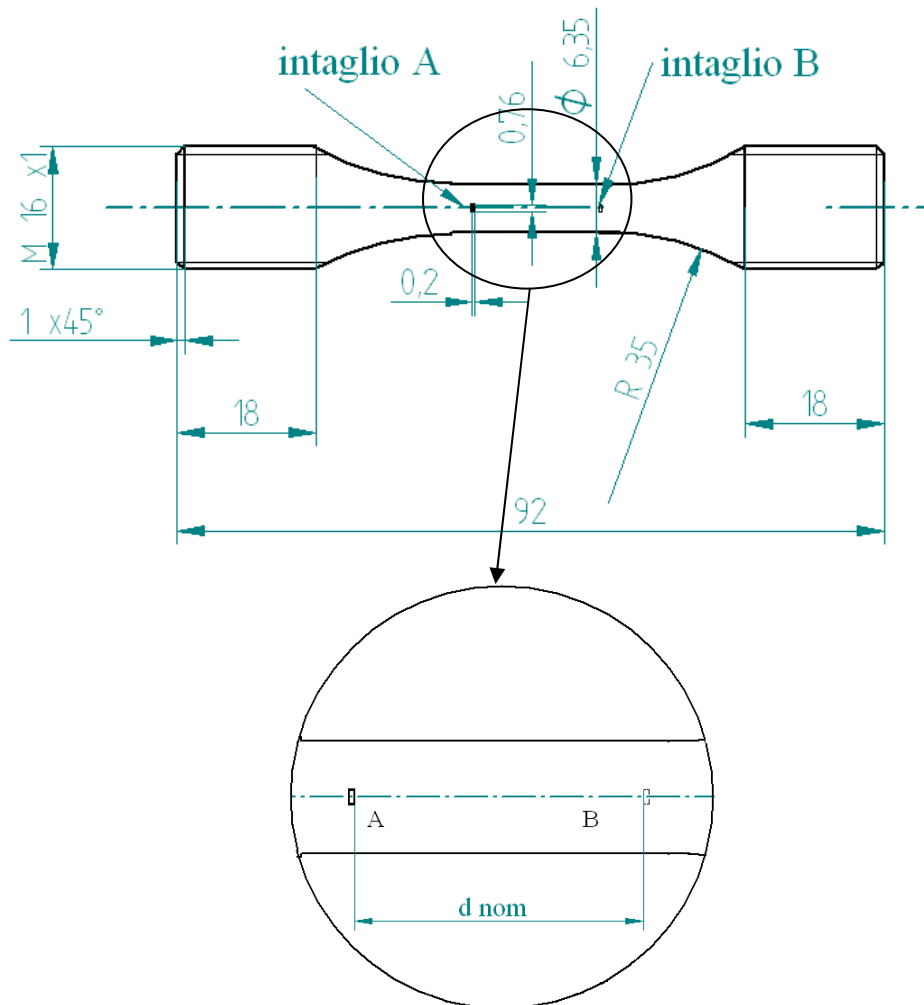


Figura 3.2.1 Disegno costruttivo del provino cilindrico da testare

A questo punto la fase di design di progetto, per tener conto del fatto che i difetti sono sempre presenti nel materiale, prevede l'esecuzione di due microintagli semicircolari, identificati dalle lettere A e B, disposti trasversalmente rispetto l'asse del provino, su due lati opposti, lungo il tratto cilindrico utile, ad una distanza nominale $d_{nom} = 6,35$ mm, come riportato in figura 3.2.1. La lavorazione, effettuata da CATE s.r.l., consiste in un processo di elettroerosione a tuffo per mezzo di utensile avente la forma di un dischetto di raggio $R = 0,38$ mm e spessore $s < 0,2$ mm. È da notare che le specifiche di progetto non vengono rispettate dal momento che i micro difetti affioranti in superficie giacciono sullo stesso lato del provino, come dimostra la figura 3.2.2; la distanza

tra gli intagli fa comunque escludere un significativo effetto di interazione del campo di sforzo all'apice dei due microintagli.

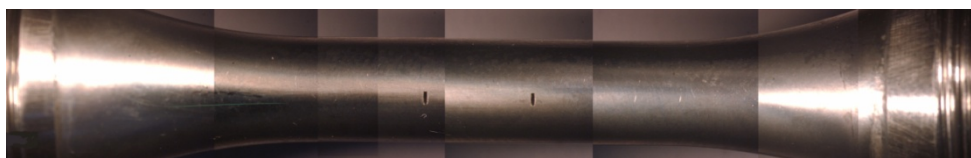


Figura 3.2.2 Microintagli al microscopio ottico “fuori specifica”

Inoltre, eseguendo un'analisi più approfondita della superficie lavorata, con l'ausilio del SEM, ad un ingrandimento 400x, viene osservato che il processo di elettroerosione crea un intaglio che in prossimità della superficie presenta uno svasamento del quale non è possibile stabilire la profondità. Ciò induce difficoltà nel rilevare le dimensioni poiché non si presenta una linea di demarcazione regolare da prendere come riferimento nell'operazione. Le misure si riferiscono alla parete interna del microintaglio in esame. I difetti artificiali mostrano comunque una larghezza in superficie che tende ad essere sempre maggiore al diametro del dischetto usato per la lavorazione. A titolo di esempio si riporta in figura 3.2.3 l'immagine SEM dell'intaglio B del provino vergine s/n ISM030.

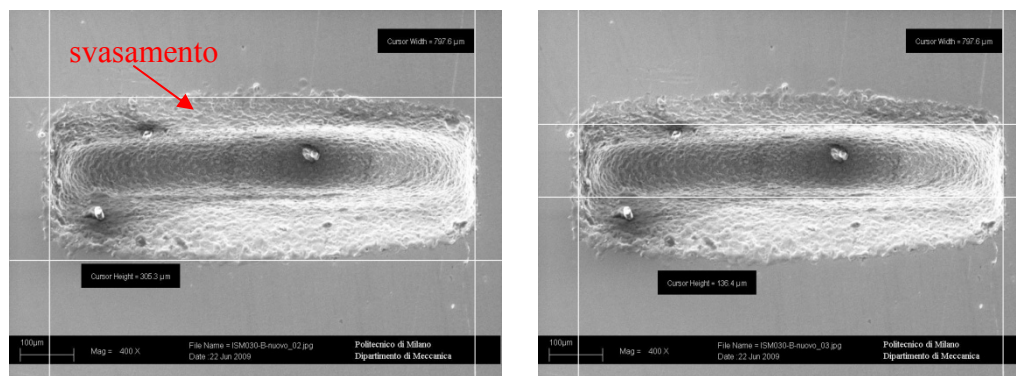


Figura 3.2.3 Microintaglio al microscopio elettronico SEM

Nel seguito verrà evidenziato come, secondo Murakami^[5], il legame tra il limite di fatica e il SIF (Stress Intensity Factor) di soglia sia legato al valore dell'area del difetto proiettata nella direzione trasversale rispetto a quella di applicazione del carico come mostrato di seguito in figura.

Per questo motivo è necessario il calcolo dell'area nominale del microdifetto generato artificialmente per simulare la presenza di una cricca funzione del

diametro del provino e della geometria dell'utensile. A tale riguardo infatti non è possibile effettuare una stima sulla profondità effettiva del microintaglio poiché non è noto a priori l'avanzamento effettuato dall'utensile in fase di lavorazione; viene quindi assunto teoricamente un difetto semicircolare come previsto dal progetto per il quale si effettua il calcolo dell'area.

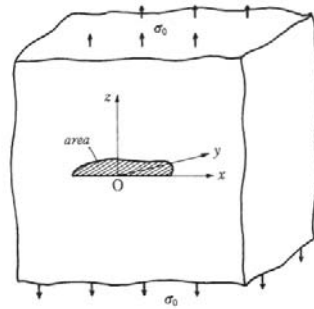


Figura 3.2.4 Proiezione trasversale al carico dell'area del difetto

Questo prevede la determinazione degli angoli relativi al centro del provino α e al centro dell'utensile β come mostrato dall'equazione 3.2.1 e in figura 3.2.5.

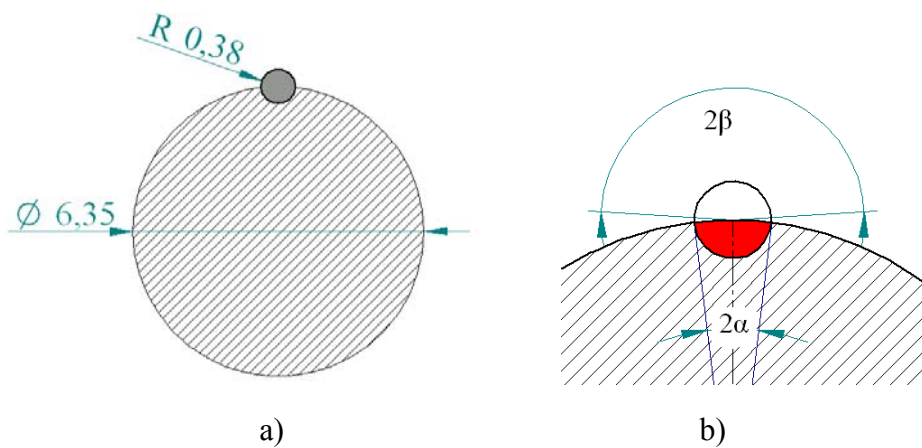


Figura 3.2.5 Calcolo dell'area del difetto: a) dimensioni nominali di utensile e provino
b) particolare del microintaglio per la determinazione degli angoli al centro

$$\begin{cases} \beta = \arccos\left(\frac{r_{utensile}}{2 \cdot R_{provino}}\right) \\ \alpha = \pi - 2 \cdot \beta \end{cases} \quad (3.2.1)$$

$$Area = \beta \cdot r_{utensile}^2 + 2 \cdot \left(\frac{\alpha}{2} \cdot R_{provino}^2 - \frac{1}{2} \cdot R_{provino} \cdot r_{utensile} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (3.2.2)$$

È da sottolineare che in letteratura la dimensione del difetto è espressa attraverso il parametro radice dell'area \sqrt{area} dimensionalmente coincidente con la profondità. Infine, il diametro del provino, unica variante nel calcolo, influisce modestamente sulla dimensione del difetto. Di fatto tutti i microdifetti hanno un valore di \sqrt{area} attestato sui 470 μm .

La tabella 3.2.1 riporta i diametri rilevati nelle fasi di preparazione dei provini e il calcolo delle aree dei microintagli necessari per l'esecuzione delle prove sperimentali.

Tabella 3.2.1 Rilevamento dati durante le fasi di preparazione dei provini e calcolo delle aree dei difetti funzione dei diametri

ID provino s/n ISM	Diametro AVIO [mm]	Diametro lucidatura [mm]	Diametro elettropulitura [mm]	Asportazione elettropulitura [μm]	Area microintaglio [mm^2]	\sqrt{area} [μm]
001	6,363	6,355	6,26	95	0,22098	470,08
002	6,360	6,355	6,238	117	0,22096	470,06
003	6,358	6,35	6,273	77	0,22099	470,09
004	6,361	6,36	6,27	90	0,22099	470,09
005	6,358	6,35	6,29	60	0,22101	470,11
011	6,360	6,355	6,25	105	0,22097	470,07
017	6,365	6,36	6,26	100	0,22098	470,08
018	6,367	6,365	6,25	115	0,22097	470,07
019	6,347	6,34	6,228	112	0,22095	470,05
020	6,357	6,35	6,24	110	0,22096	470,06
021	6,353	6,345	6,27	75	0,22099	470,09
022	6,352	6,345	6,26	85	0,22098	470,08
023	6,365	6,36	6,275	85	0,22099	470,10
024	6,352	6,34	6,225	115	0,22094	470,05
025	6,349	6,345	6,23	115	0,22095	470,05
026	6,357	6,345	6,252	93	0,22097	470,07
027	6,355	6,35	6,285	65	0,22100	470,11
028	6,365	6,355	6,26	95	0,22100	470,10
029	6,360	6,35	6,273	77	0,22099	470,09
030	6,358	6,35	6,235	115	0,22095	470,06

Lo Stair Case breve viene effettuato con l'ausilio della macchina utilizzata per la prova di fatica su provini lisci: la *Rumul TESTRONIC resonant testing machine*. Per le caratteristiche si rimanda il lettore al paragrafo 2.2.

3.3 Relazione tra limite di fatica e dimensione del difetto

Il concetto fondamentale di similitudine alla base della meccanica della frattura presuppone che cricche con differente geometria ed in provini diversi siano soggette ad identiche condizioni nella regione dell'apice della cricca se il parametro K è il medesimo. Poiché ΔK caratterizza univocamente la crescita delle cricche nell'ambito della LEFM, la velocità di propagazione delle cricche nei differenti provini sarà quindi la medesima. L'applicazione del concetto di similitudine implica anche che cricche con differente geometria non propagano quando il ΔK al fondo di tali cricche sia inferiore della soglia del materiale. In tal caso la dipendenza tra limite di fatica e dimensione del difetto si potrebbe ricavare dalla Meccanica della Frattura Lineare Elastica, valida per cricche lunghe, dalla relazione 3.3.1. Questa implica che il limite di fatica non sia inteso come lo sforzo a cui non nucleano cricche, bensì come lo sforzo a cui si arresta la propagazione della cricca^[6].

$$\Delta\sigma_w = \frac{\Delta K_{th}}{F \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \quad (3.3.1)$$

dove :

- $\Delta\sigma_w$ indica il limite di fatica;
- ΔK_{th} la variazione del SIF di soglia di propagazione;
- F il fattore di forma della cricca in esame;
- a la profondità della cricca.

Ad ogni modo, siccome il limite di fatica in presenza di difetti $\Delta\sigma_w$ non può eccedere quello del provino liscio $\Delta\sigma_{w0}$, esiste un limite superiore rappresentato dal limite di fatica per materiale esente da difetti $\Delta\sigma_{w0}$: ne risulta che il limite di fatica al variare della profondità della cricca può essere espresso da un diagramma, detto di Kitagawa, mostrato in figura 3.3.1 composto da due rette: una che esprime la 3.3.1 e la seconda esprime $\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{w0}$. La dimensione della cricca a_0 per cui le due rette si intersecano viene detto parametro di El-Haddad:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta K_{th,LC}}{F \cdot \Delta\sigma_{w0}} \right)^2 \quad (3.3.2)$$

Questo è convenzionalmente considerato come la dimensione della cricca al di sotto della quale le microcricche risentono delle barriere o "soglie" microstrutturali; ovvero identifica il passaggio dalla regione della meccanica della frattura lineare da quella soggetta all'effetto delle cricche corte (short-crack effect).

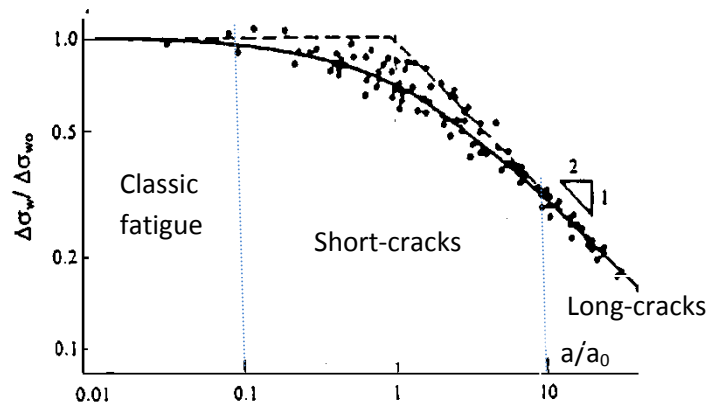


Figura 3.3.1 Diagramma di Kitagawa-Takahashi

Il modello di El-Haddad modifica la 3.3.1 sulla base dell'omonimo parametro introdotto precedentemente:

$$\Delta\sigma_w = \frac{\Delta K_{th,LC}}{F \cdot \sqrt{(a+a_0)}} \quad (3.3.3)$$

La relazione esprime un modello 2D per il quale F è univocamente determinata e prefissata, di conseguenza è impossibile descrivere cricche con forme diverse. Considerando la 3.3.2, la relazione tra limite di fatica e profondità del difetto diventa:

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{w0} \cdot \sqrt{\frac{a_0}{a+a_0}} \quad (3.3.4)$$

Allo stesso modo il modello può essere esteso al calcolo della soglia:

$$\Delta K = \Delta K_{th} \cdot \sqrt{\frac{a}{a+a_0}} \quad (3.3.5)$$

La 3.3.4 e la 3.3.5 possono essere applicate rispettivamente per la stima del limite di fatica e della soglia di propagazione del difetto sulla base delle costanti del materiale $\Delta\sigma_{w0}$ e $\Delta K_{th,LC}$ ricavate in fase sperimentale ad un prefissato rapporto di ciclo.

Il metodo di Murakami-Endo origina da una serie di studi compiuti dagli autori sull'effetto delle inclusioni non metalliche e dei microdifetti^[7]. L'assunzione principale è che il limite di fatica di un pezzo contenente difetti, inclusioni e disomogeneità dev'essere inteso non come il limite di sforzo al quale non si ha nucleazione di cricche, ma come lo sforzo a cui le cricche originatesi dai difetti non si propagano. Si ammette quindi che le cricche corte si formino comunque

al fondo degl'intagli, ma che in corrispondenza del limite di fatica non propagano. Da questo punto di vista il parametro che caratterizza sia microintagli che le cricche è il massimo SIF lungo il fronte della cricca tridimensionale.

Per il calcolo del ΔK di cricche superficiali l'espressione proposta da Murakami^[5] è basata non sulle dimensioni massime della cricca ma sull'area del difetto proiettato sul piano perpendicolare allo sforzo applicato, come mostra la figura 3.3.2.

$$\Delta K = 0,65 \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot \sqrt{area}} \quad (3.3.6)$$

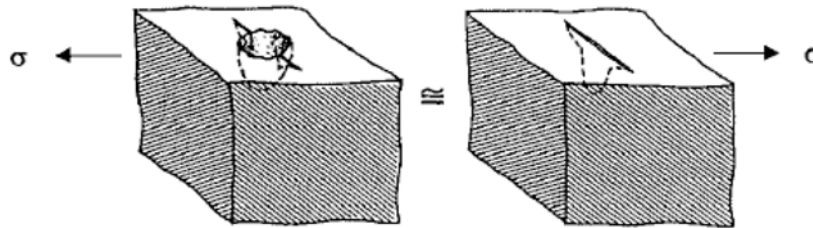


Figura 3.3.2 Parametro \sqrt{area} assunto da Murakami per la stima del limite di fatica

Perciò immaginando che al limite di fatica si abbiano sempre delle cricche non propaganti, questi si calcola come quel livello di sforzo tale per cui il SIF corrispondente è al limite della soglia di propagazione:

$$\Delta K_{th} = 0,65 \cdot \Delta\sigma_w \cdot \sqrt{\pi \cdot \sqrt{area}} \quad (3.3.7)$$

dove ΔK_{th} dipende dalla dimensione della cricca/difetto.

In definitiva per descrivere il limite di fatica e la soglia per cricche di forma differente è possibile modificare il modello di El-Haddad^[8] tramite la relazione del Murakami, ottenendo così un modello 3D:

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{w0} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{area}a_0}{\sqrt{area} + \sqrt{area_0}}} \quad (3.3.8)$$

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th,LC} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{area}}{\sqrt{area} + \sqrt{area_0}}} \quad (3.3.9)$$

3.4 Stima del limite di fatica:

modello di El-Haddad 3D modificato

Il primo step per la stima del limite di fatica del provino microintagliato, sottoposto a carico alternato con rapporto di ciclo $R = 0,05$, consiste nel calcolo empirico del parametro di El-Haddad applicato al modello di Murakami^[8]:

$$\sqrt{area_0} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta K_{th,LC(R=0,05)}}{0,65 \cdot \Delta \sigma_{w0(R=0,05)}} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{4,91}{0,65 \cdot 970} \right)^2 = 19,2 \mu m \quad (3.4.1)$$

dove:

- $\Delta K_{th,LC}$ [MPa \sqrt{m}] è la soglia di propagazione per le cricche lunghe stimata sperimentalmente (sottoparagrafo 3.4.1) con prove di meccanica della frattura eseguita con provini SEB su *RUMUL cracktronic*;
- $\Delta \sigma_{w0}$ [MPa] è il limite di fatica dei provini “lisci” stimato sperimentalmente con prova Stair case su *RUMUL testronic*;

A questo punto, tramite il modello di El-Haddad modificato da Beretta^[8] è possibile stimare il limite di fatica riferito alla dimensione del difetto superficiale:

$$\Delta \sigma_w = \Delta \sigma_{w0(R=0,05)} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{area_0}}{\sqrt{area} + \sqrt{area_0}}} = 970 \cdot \sqrt{\frac{19,2}{470 + 19,2}} = 192,3 MPa \quad (3.4.2)$$

Un'ulteriore limite stimabile è dato dalla possibilità di considerare che il difetto è superficiale piuttosto che interno al materiale tramite il fattore di correzione maggiorativo per la soglia di propagazione (1,2) stimato sperimentalmente^[9].

$$\sqrt{area_0} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1,2 \cdot \Delta K_{th,LC(R=0,05)}}{0,65 \cdot \Delta \sigma_{w0(R=0,05)}} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1,2 \cdot 4,91}{0,65 \cdot 970} \right)^2 = 27,7 \mu m \quad (3.4.1)$$

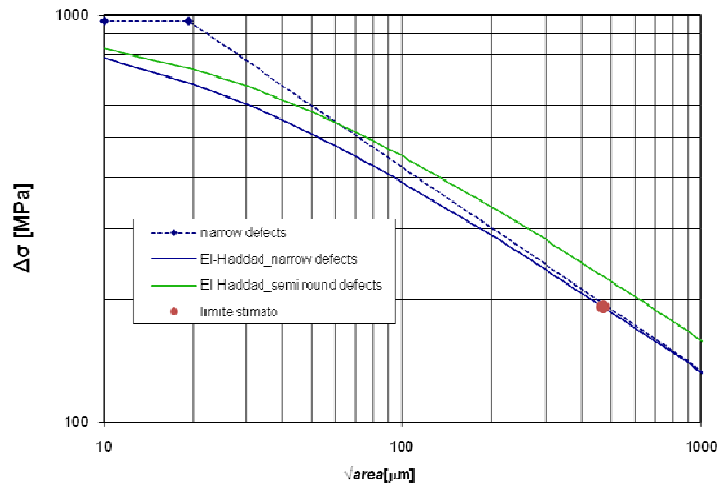
Allo stesso modo:

$$\Delta \sigma_w = \Delta \sigma_{w0(R=0,05)} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{area_0}}{\sqrt{area} + \sqrt{area_0}}} = 970 \cdot \sqrt{\frac{27,7}{470 + 27,7}} = 228,8 MPa \quad (3.4.2)$$

Per l' esecuzione dello Stair Case si decide di adottare un livello di sforzo appena superiore a quello stimato, mostrato dal diagramma in figura 3.4.1, ed un passo d compreso tra il 5% e il 10% come previsto dalla norma.

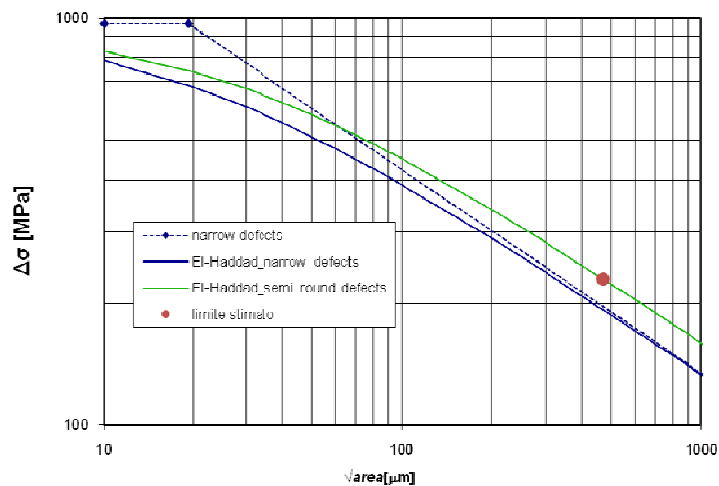
$$\begin{cases} \Delta\sigma_{(I \text{ livello})} = 240 \text{ MPa} \\ d = 8\% \quad \Delta\sigma_w(I \text{ livello}) \approx 20 \text{ MPa} \end{cases} \quad (3.4.3)$$

Kitagawa-Takahashi diagram



a)

Kitagawa-Takahashi diagram

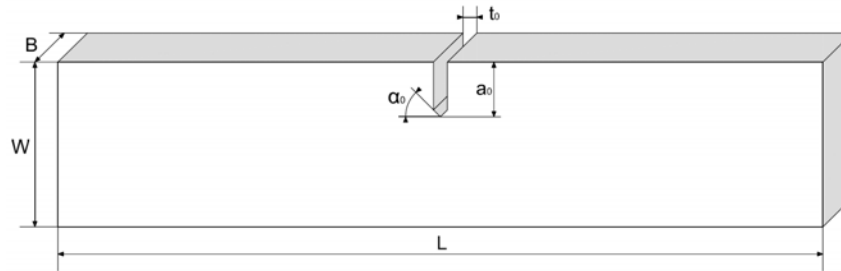


b)

Figura 3.4.1 Diagramma di Kitagawa per la previsione del limite di fatica: modello di El-Haddad 3D modificato a) difetto narrow b) difetto swallow

3.4.1 Risultati prova di propagazione

Per la prova di propagazione ci si riferisce al Report AISI4340 crackgrowth^[12]. È stata condotta su provini SE(B), di cui si riporta il disegno costruttivo in figura 3.4.2, con l'ausilio di macchina *RUMUL cracktronic*.



a_0	t_0	α_0	W	B	L
[mm]	[mm]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]
8	2	60	24	12	110

Figura 3.4.2 Disegno costruttivo provino SE(B)

Il test ha lo scopo di definire la soglia di propagazione per cricche lunghe $\Delta K_{th,LC}$ e la velocità di propagazione per diversi rapporti di ciclo. In sostanza viene costruita sperimentalmente la curva del Paris sul diagramma $da/dN-\Delta K$: di seguito si riportano brevemente i risultati interpolati con l'equazione di NASGRO^[13].

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q} \quad (3.4.4)$$

Dove f è il parametro che tiene conto dell'effetto clousure:

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & -2 \leq R < 0 \end{cases} \quad (3.4.5)$$

e i coefficienti sono dati da:

$$A_0 = \left(0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2 \right) \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} S_{max} / \sigma_0 \right) \right]^{1/\alpha} \quad (3.4.6)$$

$$A_1 = (0.415 - 0.071\alpha)S_{\max} / \sigma_0$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1$$

La soglia viene definita dall'equazioni empiriche seguenti:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_1^* \left[\frac{1-R}{1-f[R]} \right]^{(1+RC_{th}^p)} / (1-A_0)^{(1-R)C_{th}^p} \quad R \geq 0 \quad (3.4.7)$$

$$\Delta K_{th} = \Delta K_1^* \left[\frac{1-R}{1-f[R]} \right]^{(1+RC_{th}^m)} / (1-A_0)^{(C_{th}^p - RC_{th}^m)} \quad R < 0$$

Dove:

$$\Delta K_1^* = \Delta K_1 \left[\frac{a}{a+a_0} \right]^{1/2}$$

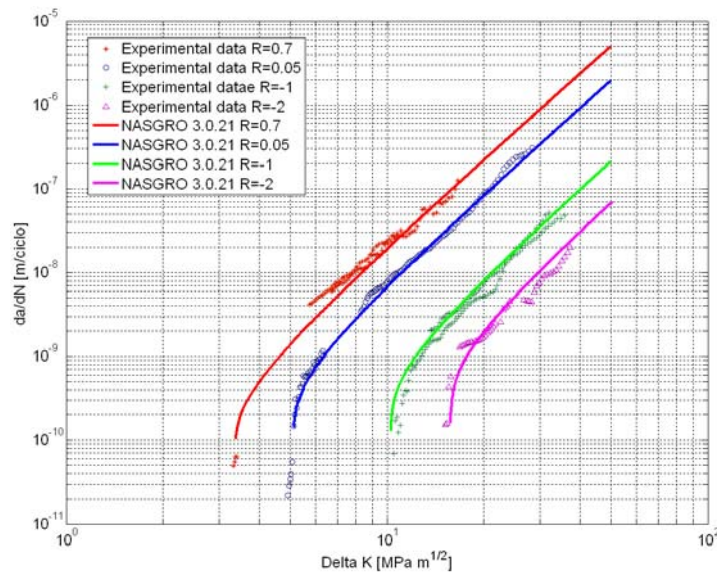


Figura 3.4.4 Curve del Paris sperimentali per diversi rapporti di ciclo

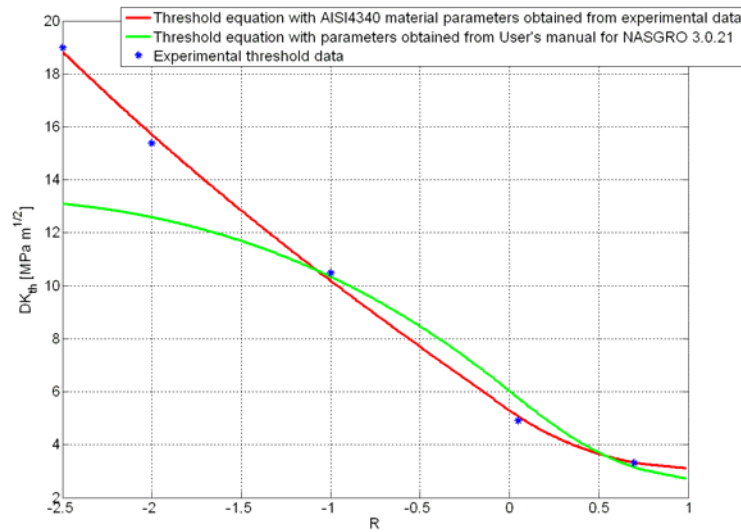


Figura 3.4.4 Andamento soglia di propagazione AISI 4340

I parametri caratteristici del materiale, riportati nella tabella 3.4.1, sono frutto dell'interpolazione ai minimi quadrati sui logaritmi dei punti sperimentali ricavati per i rapporti di ciclo riportati nelle figure 3.4.3-4. L'equazione di NASGRO può essere così utilizzata per la previsione del comportamento a fatica ovvero per la definizione di un modello di propagazione di difetti.

Tabella 3.4.1 a) Parametri sperimentali caratteristici dell'equazione di NASGRO
b) soglie sperimentali

α	2		R	$\Delta K_{th,LC}$ [MPa√m]		
a_0	0,0381	mm				
S_{max}/σ_o	0,3					
n	3,3592				0,7	3,32
p	0,41				0,05	4,91
q	0,001				-1	10,48
ΔK_I	2,9501	MPa√m			-2	15,39
C_{thp}	0,514				-2,5	19
C_{thn}	-0,1104					
C	$1,9446 \cdot 10^{-11}$					
Kc	100	MPa√m				
da/dN		m/ciclo				

a)

b)

3.5 Comportamento dei microintagli

La tabella 3.5.1 riporta la sequenza del test eseguito in fase sperimentale. La prova è stata sospesa al quinto passo poiché si osserva un comportamento a fatica diverso da quello previsto con il modello di El-Haddad modificato. In effetti si delinea una sorta di up&down tra 260 MPa (O) e 280 MPa (X) per cui il limite di fatica corrispondente sarà stimato dalla media tra i due valori:

$$\Delta\sigma_w = 270 \text{ MPa}$$

Tale valore si attesta ben oltre le previsioni effettuate in precedenza al paragrafo 3.4, sia per difetti narrow che per difetti semicircolari, come si evince dal diagramma in figura 3.5.1.

Il materiale presenta quindi una resistenza superiore a quanto previsto dal modello teorico: questo potrebbe essere dovuto al fatto che in realtà i microintagli eseguiti sui provini non si comportino come cricche, ma bensì come intagli.

Per supportare questa tesi è necessaria la verifica della presenza di microcricche non propaganti sul fondo e in superficie, in corrispondenza del bordo, si effettua una esame al SEM dei microdifetti artificiali appartenenti ai provini runout.

Tabella 3.5.1 Stair Case rilevato in fase di settaggio dei parametri di prova

Identificazione provino	s/n ISM 026	s/n ISM 029	s/n ISM 004	s/n ISM 025	s/n ISM 005
prova	01	02	03	04	05
$\Delta\sigma$ [MPa]					
280			X		X
260		O		O	
240	O				
220					
f [Hz]	97,2	97,2	97,2	96,98	97,3
N°cicli	10^7	10^7	964'526	10^7	$1,25 \cdot 10^6$

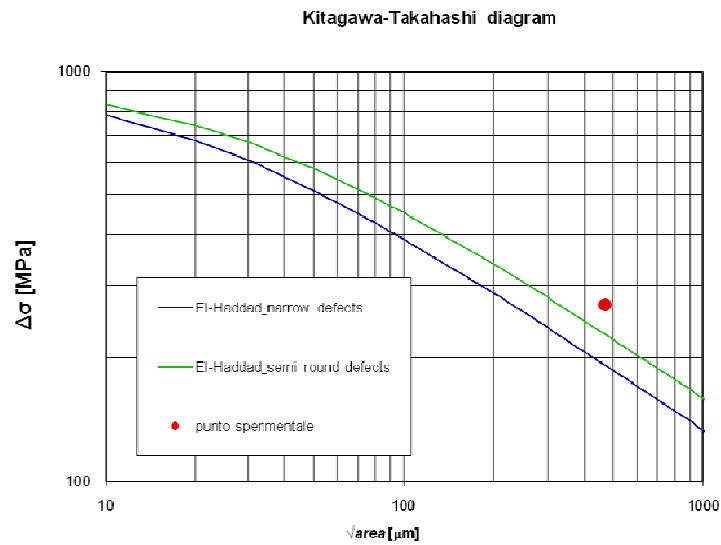


Figura 3.5.1 Diagramma di Kitagawa: scostamento dalle previsioni

L'esame al microscopio elettronico conferma le ipotesi: i microintagli generati per elettroerosione possiedono una morfologia tale da non permettere la simulazione del comportamento di cricche. Infatti *non si è mai rilevata la presenza di microcricche non propaganti emananti dai microintagli*, sia sul fondo che in superficie.

In conclusione è corretto che il materiale mostri un comportamento tale per cui il limite di fatica è superiore rispetto quello che compete alle microcricche.

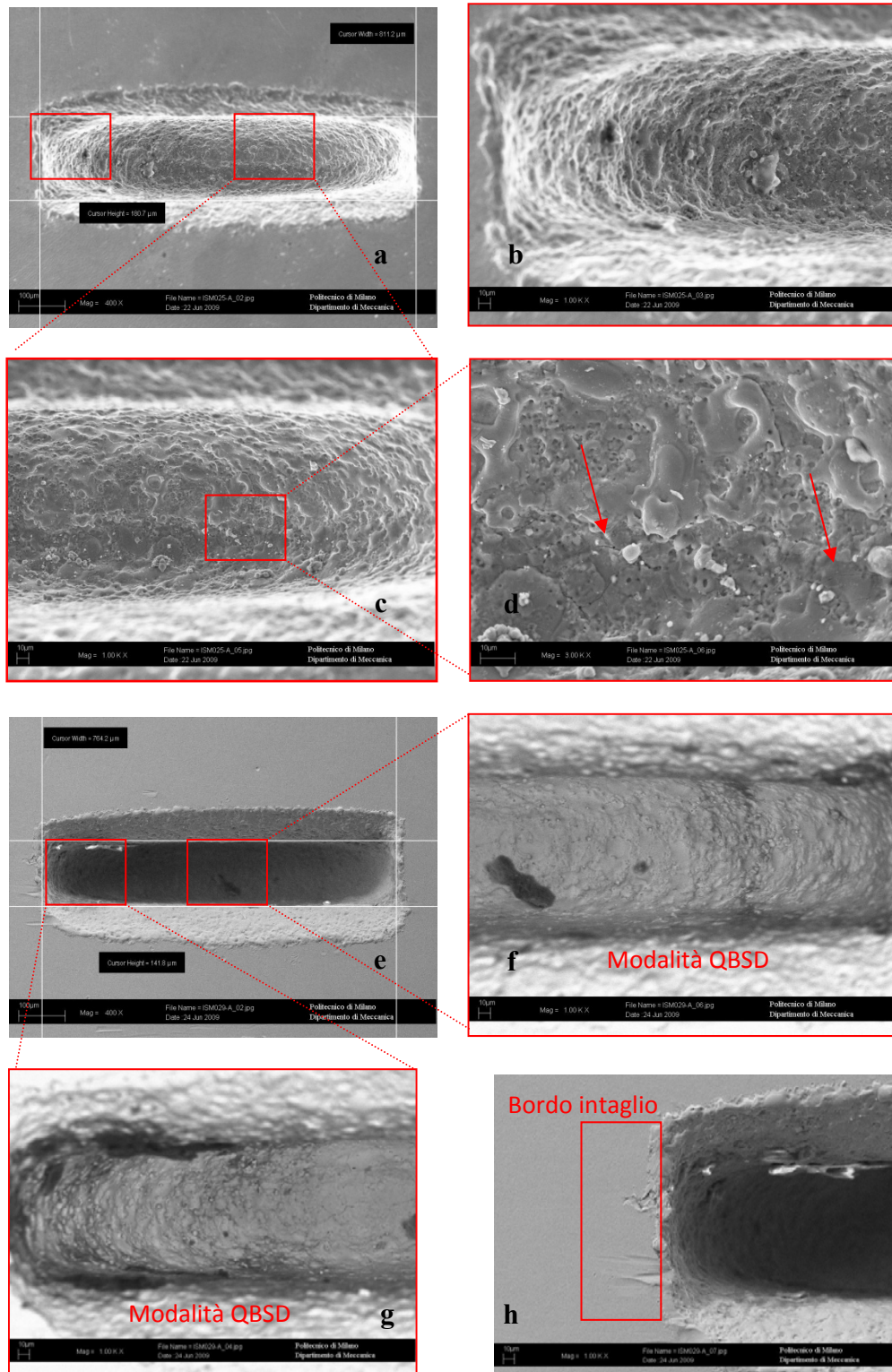


Figura 3.5.2 Esame al SEM per la verifica della presenza di microcricche non propaganti

A titolo di esempio vengono riportate le immagini riguardanti due intagli, denominati con la lettera A, di due differenti provini (s/n ISM 026 e 029), sollecitati con l'ampiezza di sforzo maggiore (260 MPa). In entrambi i casi non è possibile cogliere la presenza delle microcricche non propaganti né sul fondo dell'intaglio (figura 3.5.2c-d-f-g), né sul bordo, in superficie (figura 3.5.2h). Quello che si osserva sul fondo, per un ingrandimento 3000X, non corrisponde alla morfologia propria di microcricche; probabilmente il processo di elettroerosione ha infragilito il materiale che durante i primi cicli di carico cede in maniera impercettibile superficialmente mostrando la formazione di cricche dalla conformazione ramificata sul fondo senza che possiedano una linea di frattura comune. Per effettuare un confronto si esamina al SEM un provino che ha mostrato cedimento in prova (s/n ISM 005) ed un provino vergine (s/n ISM 030). La cricca, presente sull'intaglio B, che ha portato alla rottura è effettivamente molto marcata (figura 3.5.3a-b); la zona in cui la cricca è propagata è ben visibile sezionando fragilmente il provino, con l'ausilio di azoto liquido (figura 3.5.3c). Il provino vergine non riporta alcuna cricca sul fondo (figura 3.5.3d).

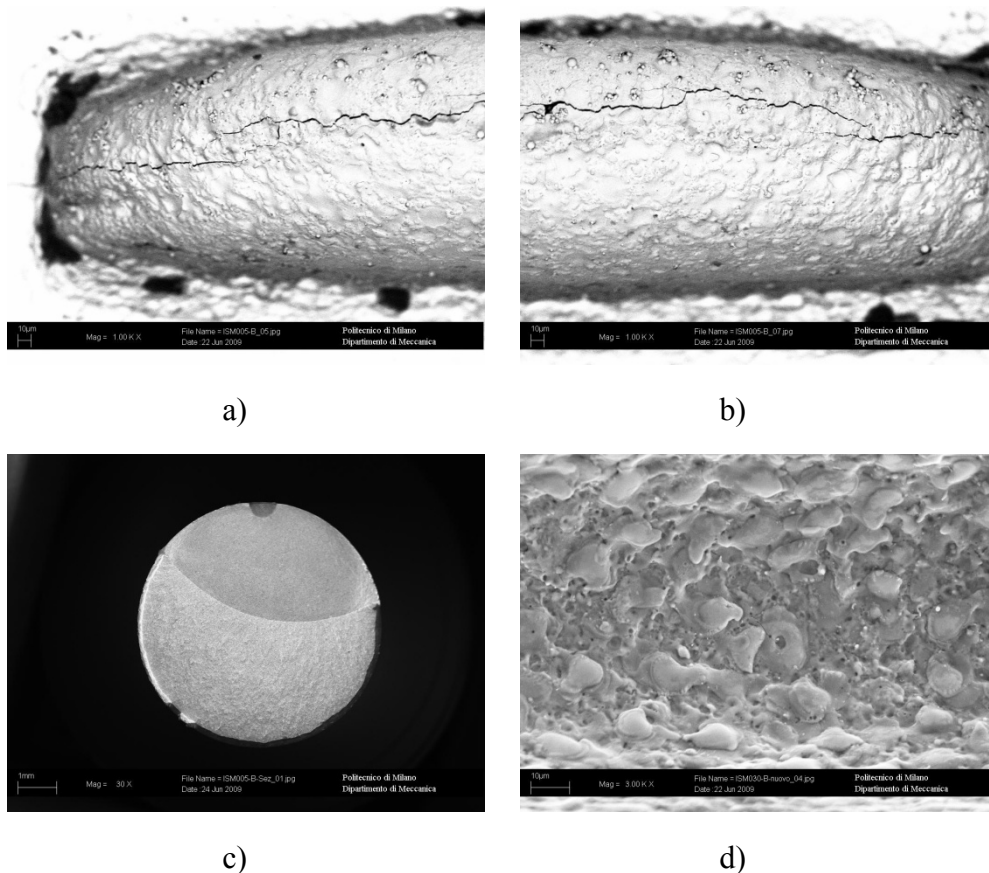


Figura 3.5.3 Esame al SEM per la verifica della presenza di microcricche non propaganti

3.6 Fase di precricazione dei provini

Come dimostrato al paragrafo precedente la morfologia dell'intaglio è tale da non permettere la simulazione di un comportamento proprio delle microcricche non propaganti: si sceglie quindi di *precricare* i provini.

Si vuole effettuare quest'operazione in fatica, con un rapporto di ciclo $R = -2,5$ al fine di agevolare la formazione delle microcricche esenti da effetti di closure^[10].

Per la stima del valore limite di fatica in queste condizioni si ricorre ancora una volta al modello di El-Haddad-Murakami, rappresentato in figura 3.6.1:

$$\sqrt{area_0} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta K_{th,LC(R=-2,5)}}{0,65 \cdot \Delta \sigma_{w0(R=-2,5)}} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{19}{0,65 \cdot 1265} \right)^2 = 170 \mu m \quad (3.6.1)$$

$$\Delta \sigma_w = \Delta \sigma_{w0(R=-2,5)} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{area_0}}{\sqrt{area} + \sqrt{area_0}}} = 1265 \cdot \sqrt{\frac{170}{470+170}} = 651,9 MPa \quad (3.6.2)$$

dove:

- $\Delta K_{th,LC(R=-2,5)}$ [MPa \sqrt{m}] è la soglia di propagazione per le cricche lunghe stimata sperimentalmente (vedi sottoparagrafo 3.4.1) con prove di meccanica della frattura eseguita con provini SEB su *RUMUL cracktronic*;
- $\Delta \sigma_{w0(R=-2,5)}$ [MPa] è il limite di fatica dei provini "lisci" stimato tramite modello definito al capitolo 2. Si rammenta che per rapporti di ciclo inferiori a -1 il limite di fatica è assunto costante;

Si decide quindi di testare la risposta del primo provino ad un livello praticamente coincidente rispetto a quello della stima effettuata tramite il modello di El-Haddad modificato. Il passo d equivale al 6% di tale livello.

$$\begin{cases} \Delta \sigma_{(I \text{ livello})} = 650 MPa \\ d = 6\% \Delta \sigma_{(I \text{ livello})} \approx 40 MPa \end{cases} \quad (3.6.3)$$

A partire da questo livello si vuole comprendere quale sia il valore di sforzo da adottare per l'operazione di precricazione dei provini. Inevitabilmente si ottiene una sequenza random simile ad uno Stair Case, riportata in tabella 3.6.1, utile per la verifica del modello al rapporto di ciclo $R=-2,5$, scelto appunto per questa fase delicata. Durante il test se il provino cede viene abbassato il livello di sforzo mentre se risulta runout viene esaminato al SEM in corrispondenza dei microintagli per verificare la presenza delle microcricche non propaganti.

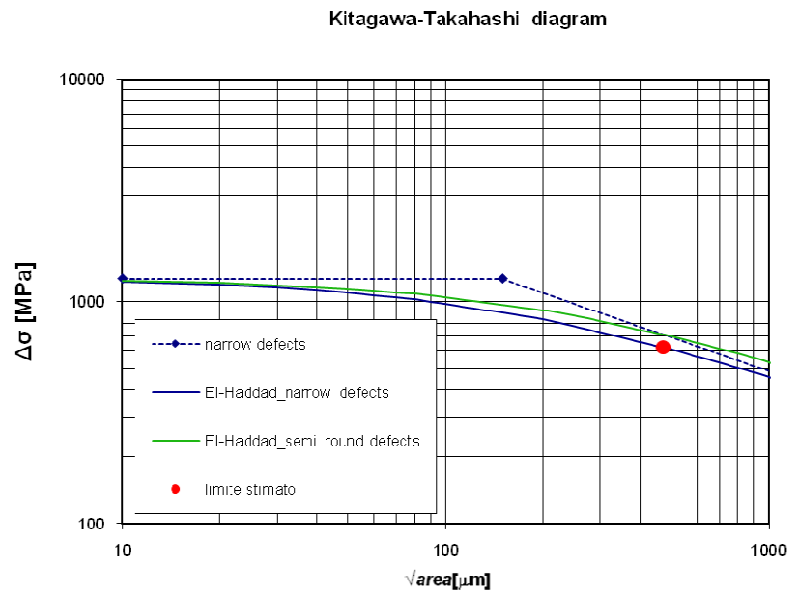
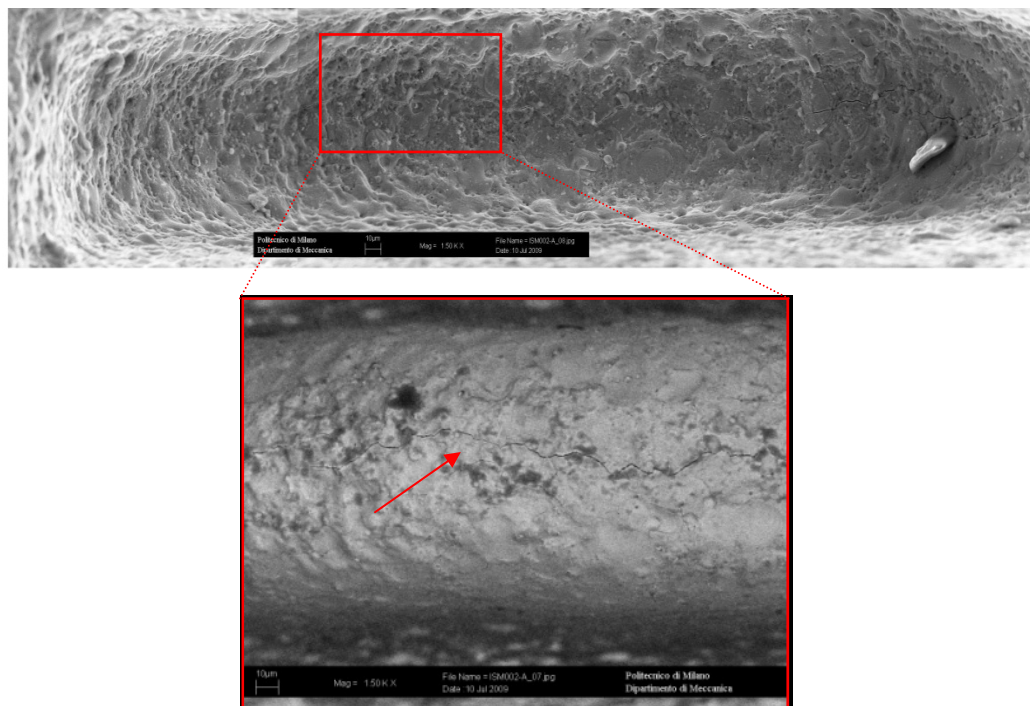


Figura 3.6.1 Diagramma di Kitagawa per la stima del limite di fatica

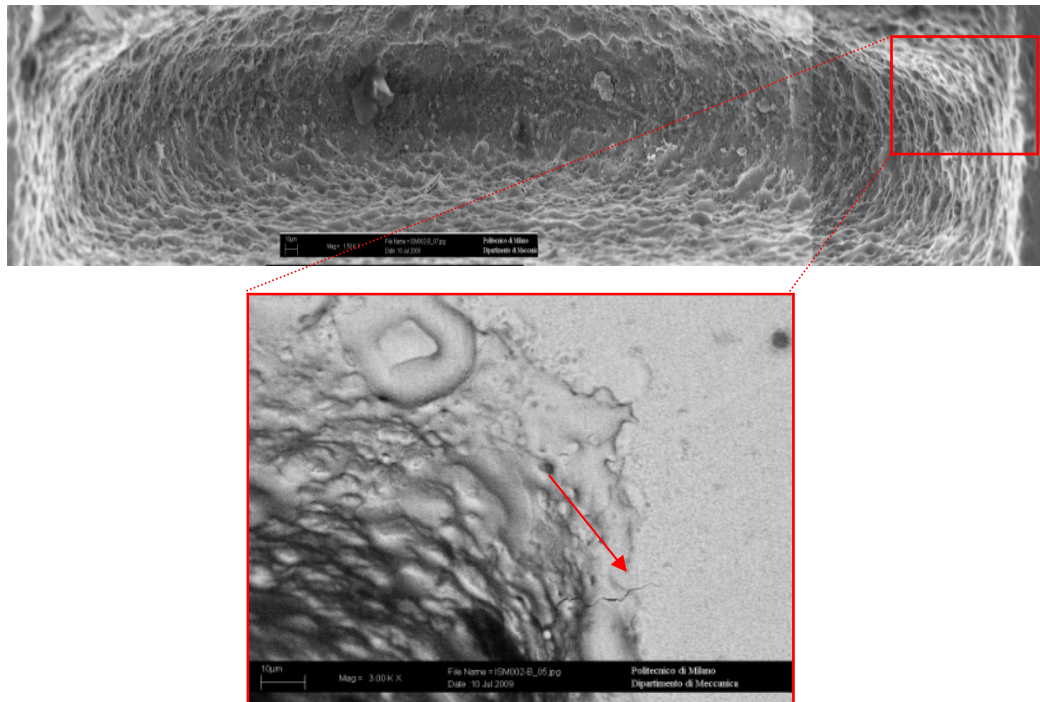
Tabella 3.6.1 Sequenza sperimentale ottenuta in fase di precriccatura

Id. provino: s/n ISM	030	002	001	025	026	029	019	003	017	021	018	020	027	022
prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Δσ [MPa]									a/c		a/c			
R=-2,5														
650	X		O											
630														
610		O		O	X									
590						O	X							
570								O						
550														
530														
500									X					O
480										O	X			
460												O	O	
N°cicli [milioni]	1,65	12,4	15	10	4,21	10	2,2	10	1,2	7,3	1,7	10	15	10

Tutti i provini risultano precriccati poiché mostrano la formazione di una microcricca visibile con ingrandimento 1500X sia in superficie, dove affiora al bordo del difetto per circa 20 μm , sia sul fondo del microintaglio dove si presenta come una linea marcata e ben definita, formata tra i grani cristallini. È da notare che non sempre la microcricca affiora al bordo intaglio ma comunque si ritiene il provino precriccato quando sul fondo, in corrispondenza dell'apice, è presente la microcricca non propagante. A titolo d'esempio si riportano le immagini dei microintagli , A e B, appartenenti al primo runout (s/n ISM 002) preso come riferimento per le precriccature successive.



a)



b)

Figura 3.6.2 Precricatura provino s/n ISM 002: a) intaglio A b) intaglio B

A conferma di quanto detto, si seziona fragilmente, tramite azoto liquido (figura 3.6.3), un provino ritenuto precriccato (s/n ISM003): si nota la presenza delle microcricche non propaganti su tutto il fronte dell'apice che risulta ricalcato (figura 3.6.4).



Figura 3.6.3 Rottura fragile del provino tramite azoto liquido

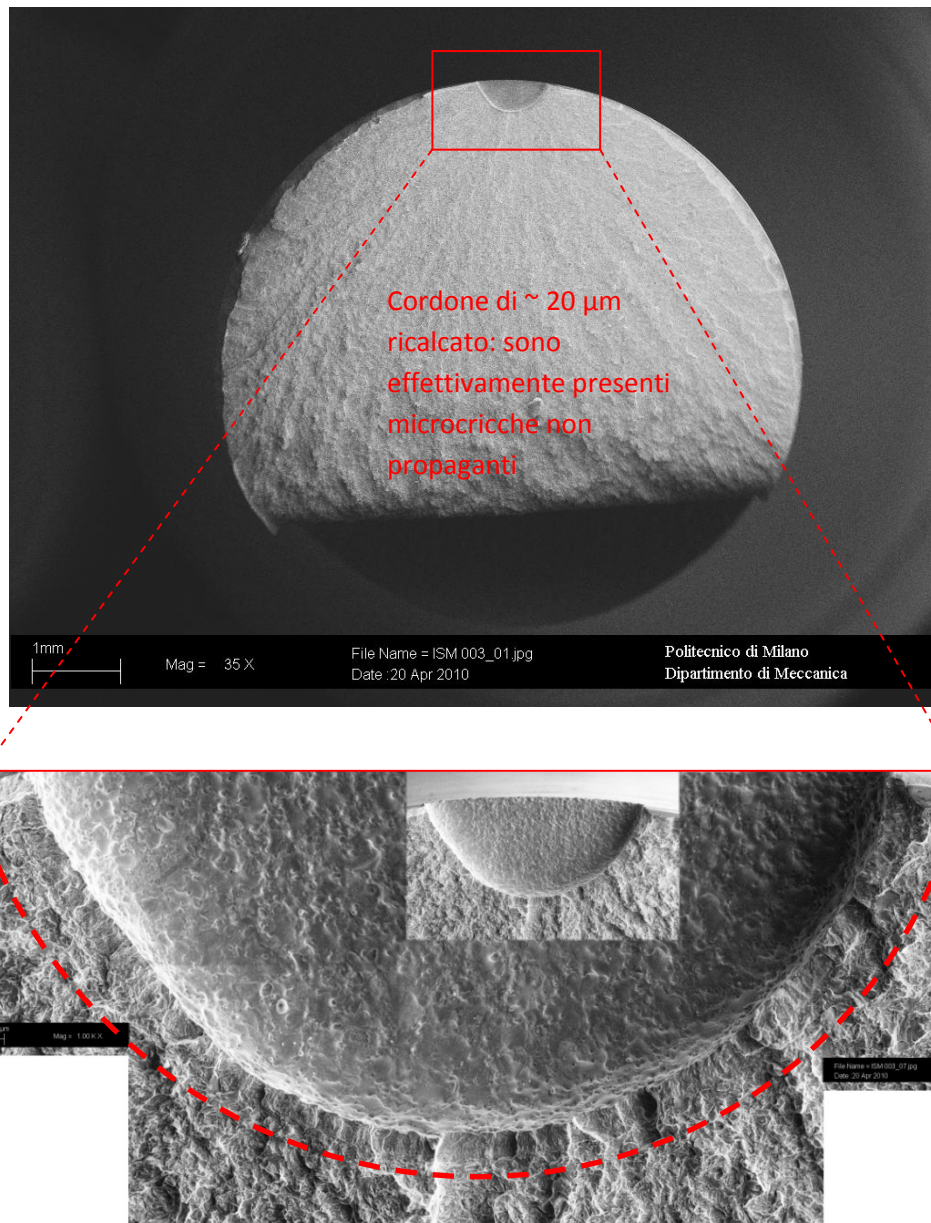


Figura 3.6.4 Microcricche non propaganti all'apice del microintaglio

La sequenza di tabella 3.6.1 deve a tal punto permettere la stima del limite di fatica al rapporto di ciclo utilizzato per la precricatura. Poiché non si ha a disposizione uno Stair Case tipico, con livelli di sforzo in prova up and down, si ricorre alla stima tramite il metodo della massima verosimiglianza. Questo non ha esito positivo perché i dati non posseggono una distribuzione normale. Per comprendere meglio il problema vengono esaminati al SEM i microintagli dei provini rotti alla nona e undicesima prova, allo scopo di definirne le dimensioni.

Questi provini, in controtendenza alle altre rotture ricavate per livelli di sforzo di precricazione più alti, mostrano cedimento per livelli di sforzo ben al di sotto del limite stimato teorico. L'idea è che questi abbiano dimensioni diverse da quelle nominali per le quali la propagazione del difetto è accelerata.

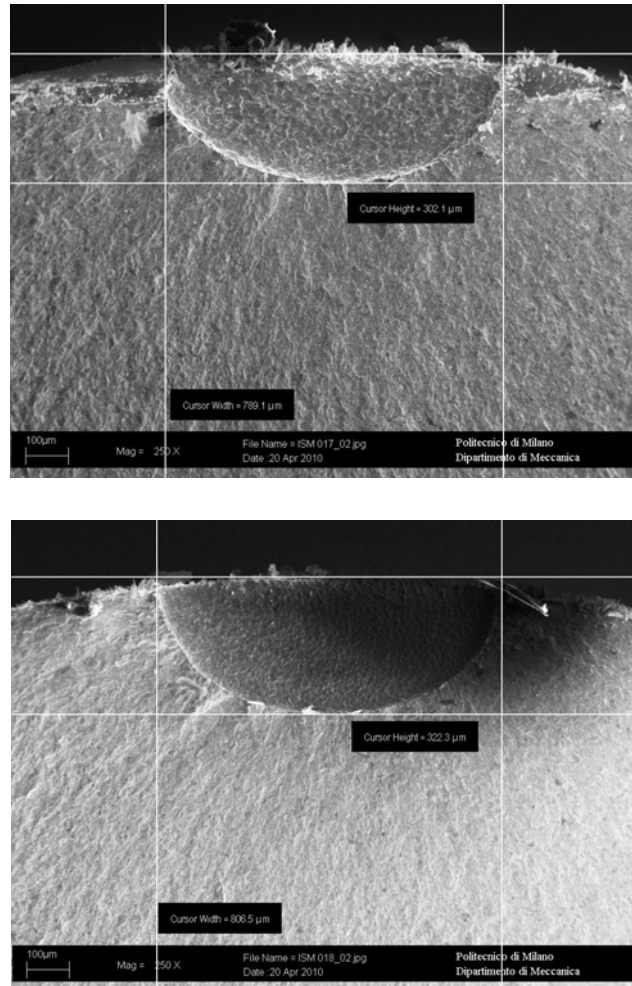


Figura 3.6.5 Microdifetto con rapporto $a/c < 1$

Dall'esame al microscopio SEM si osserva che i microintagli sono effettivamente fuori specifica poiché posseggono un rapporto $\frac{a}{c} < 1$. L'area risulta poco più piccola di quella nominale ma questo non deve trarre in inganno. Infatti, in questo caso, è ben più importante l'effetto che ha la forma del difetto. Quello fuori specifica è semiellittico, quindi la driving force all'apice del microintaglio è più gravosa rispetto quella agente sul difetto semicircolare. È giusto quindi che i provini riportanti questo tipo di difetti mostrino un limite di fatica più basso, motivo per cui vengono considerati "fuori serie".

A questo punto la stima del limite di fatica per il rapporto di ciclo scelto per la precricatura viene effettuato estrapolando dalla sequenza un possibile Stair Case riportato di seguito, ottenuto testando altri quattro provini ai livelli precedentemente saltati, che risultano ancora “vergini”.

Tabella 3.6.2 Sequenza Stair Case arrangiata ottenuta in fase di precricatura

Id. provino: s/n ISM	030	011	026	019	028	023	003	029	025	001
prova	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010
$\Delta\sigma$ [MPa]										
R=-2,5										
650	X									
630		X								O
610			X						O	
590				X				O		
570					X		O			
550						O				
530										
N°cicli [milioni]	1,65	0,557	4,21	2,26	0,84	10	10	10	10	10

La stima statistica del limite di fatica $\Delta\sigma_w$ al rapporto di ciclo $R=-2,5$ è stata ottenuta in riferimento al metodo di Dixon^[3], applicato per una sequenza avente $N > 6$ e un cambio di risposta al sesto livello:

$$\Delta\sigma_{w0} = \frac{\sum \Delta\sigma_i}{N} + \frac{d}{N} \cdot (A + C)$$

dove $\Delta\sigma_i$ sono i livelli di sforzo della sequenza, d è il passo della serie, N è la dimensione del campione N' diminuita del numero di risposte uguali che precedono il livello a cui il seguente si avrà il primo cambio di risposta mentre A e C sono coefficienti ottenuti dalla tabella 2.7.2. Ricavati i valori dei coefficienti dipendenti dalla serie è possibile effettuare la stima.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{sequenza: } oxxoxxo \\ N' = 10 \\ N = 6 \\ n_x - n_o = 0 \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A = 0 \\ C = -0,48 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\sigma_{w0} = 601 \text{ MPa} \\ R = -2,5 \end{array} \right. \quad (2.7.2)$$

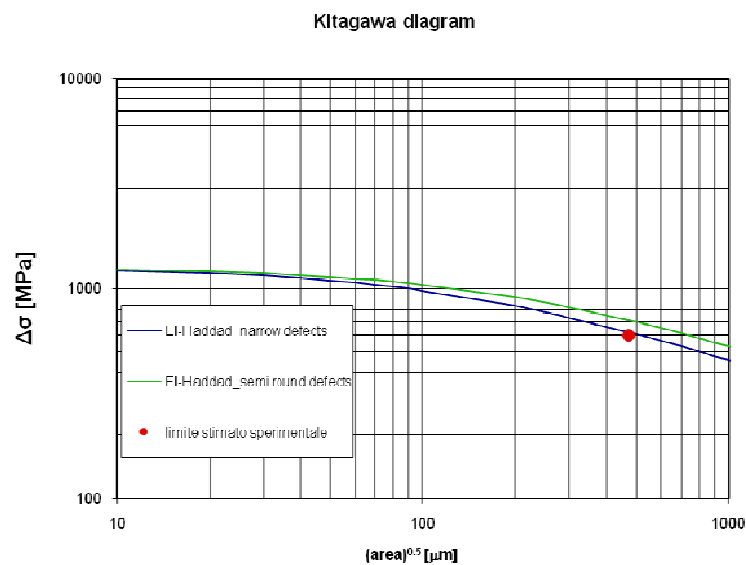


Figura 3.6.6 Validità del modello di El-Haddad 3D modificato

Questo rappresenta il punto stimato sperimentalmente visibile sul diagramma di Kitagawa. Come si può notare le previsioni del modello sono confermate parzialmente dall'attività sperimentale. L'errore risulta infatti risulta quasi dell'8% e il modello di El-Haddad 3D appare non conservativo rispetto al limite ricavato sperimentalmente. A tal proposito, a questo rapporto di ciclo, il comportamento del materiale non è ben delineato a partire dal quello delle cricche lunghe, come mostra la figura 3.6.7, definito tramite prova di propagazione.

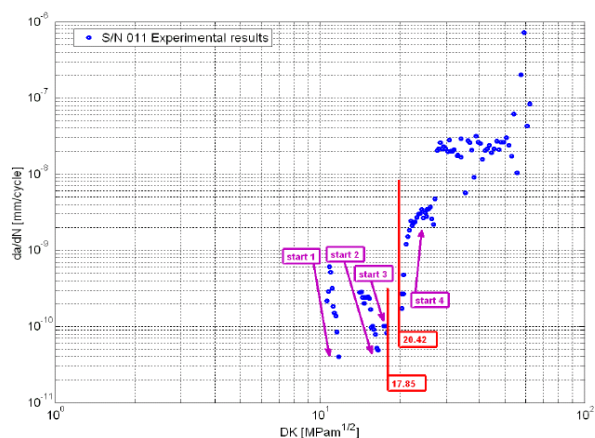


Figura 3.6.7 Prova di propagazione per $R=-2,5$; soglia non ben definita

3.7 Prova sperimentale e stima del limite di fatica

Il test riprende, non considerando le prove precedentemente effettuate su provini non precriccati, per definire la sequenza Stair Case breve, definita da 8 provini, riportata in tabella 3.7.1 utilizzata per la stima del limite di fatica in termini di variazione di sforzo.

Il rapporto di ciclo R e il passo d tra i vari step della sequenza rimangono invariati rispetto la fase di design dell'esperimento mentre il primo livello di sforzo in prova in termini di variazione di sollecitazione è pari a 220 MPa.

Tabella 3.7.1 Sequenza Stair case breve sperimentale AISI 4340

Id. provino: s/n ISM	003	025	001	029	002	027	021	022
prova	06	07	08	09	10	11	12	13
$\Delta\sigma$ [MPa]	Sequenza arrangiata: 000xxx00							
note	Provini precriccati $R=0,05$							
280						X		
260					O		X	
240		X		O				O
220	O		O					
N°cicli	10	0,81	10	10	10	0,67	0,53	10

La stima statistica del limite di fatica $\Delta\sigma_w$ al rapporto di ciclo testato è stata ottenuta in riferimento al metodo di Dixon^[3], applicato per una sequenza arrangiata nell'ordine avente $N'=8$, $N=6$ e un cambio di risposta al quarto livello:

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_f + k \cdot d = 240 + 0,678 \cdot 20 = 253,5 \text{ MPa} \quad (3.7.1)$$

dove $\Delta\sigma_f$ è l'ultimo livello di sforzo della sequenza, d è il passo della serie, e k è un coefficiente ricavato dalla tabella 3.7.2.

Una stima più conservativa è stata ricavata col metodo di Hodge-Rosenblatt^[11] sulla sequenza originaria ricavata dallo Stair Case: questo prevede una media attorno al primo cambio di risposta, aggiungendo il livello di sforzo fittizio che si sarebbe testato con un provino successivo.

$$\Delta\sigma_w = \frac{\sum \Delta\sigma_i + \Delta\sigma_{fittizio}}{N+1} = 246,6 \text{ MPa} \quad (3.7.2)$$

Pertanto il modello di El-Haddad modificato introdotto nel paragrafo 3.4, che prevede un limite di 228,8 MPa per $R=0,05$, denota un errore del 7% rispetto alla stima più conservativa ottenuta con il metodo di Hodge-Rosenblatt, figura 3.7.1, dimostrando di descrivere bene il comportamento del materiale.

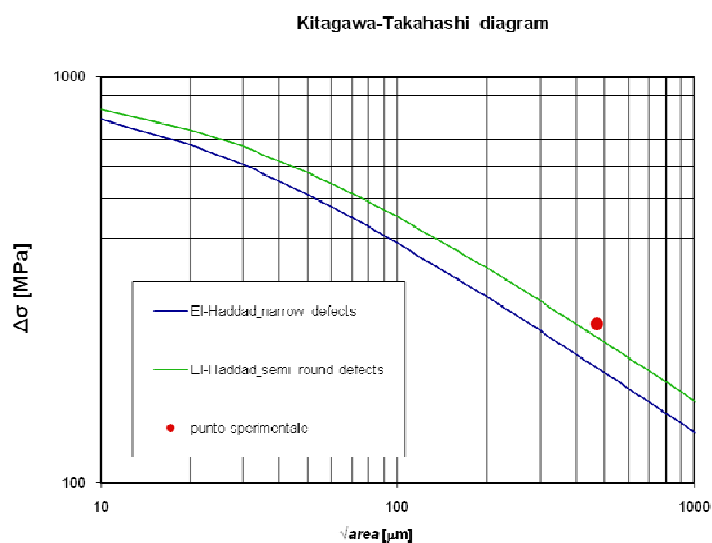


Figura 3.7.1 Diagramma di Kitagawa: modello di El-Haddad modificato e punto sperimentale

Tabella 3.7.2 Valore di k per la stima del limite di fatica

Dimensione del campione	Seconda parte della serie	K per serie di prove la cui prima parte è				Errore standard	
		o	oo	ooo	oooo		
2	x	-500	-.388	-.378	-.377	o	.98σ
3	xo	.842	.890	.894	.894	ox	.76σ
	xx	-.178	.000	.026	.028	oo	
4	xoo	.299	.314	.315	.315	oxx	.67σ
	xox	-.500	-.439	-.432	.432	oxo	
	xoo	1.000	1.122	1.139	1.140	oox	
	xxx	.494	.440	.500	.506	ooo	
5	xooo	-.457	-.154	-.154	-.154	ooxx	.61σ
	xoox	-.878	-.881	-.860	-.860	ooxo	
	xoxo	.701	.737	.741	.741	ooxx	
	xoox	.084	.169	.181	.182	ooxo	
	xxoo	.303	.372	.380	.381	ooxx	
	xxox	-.305	-.169	-.144	-.142	ooxo	
	xxoo	1.288	-.300	1.544	1.349	ooxx	
	xxxx	.535	.897	.985	1.000	oooo	
6	xoooo	-.647	-.547	-.547	-.547	ooxxx	.56σ
	xooox	-1.360	-1.247	-1.246	-1.246	ooxxx	
	xooxo	.372	.380	.381	.381	ooxxx	
	xooxx	-.169	-.144	-.142	-.142	ooxxx	
	xooxo	.022	.39	.040	.040	ooxxx	
	xooxx	-.300	.458	-.453	-.453	ooxxx	
	xooxo	1.169	1.237	1.247	1.248	ooxxx	
	xooxx	.611	.732	.756	.758	ooxxx	
	xooxo	-.296	-.266	-.263	.263	ooxxx	
	xooxx	-.831	.763	-.733	-.732	ooxxx	
	xooxo	.831	.035	.952	.954	ooxxx	
	xooxx	.296	.463	.500	.504	ooxxx	
	xooxo	.300	.648	.678	.681	ooxxx	
	xooxx	-.043	.187	.244	.252	ooxxx	
xooxo	1.603	1.917	2.000	2.014	ooxxx		
xxxxx	.893	1.389	1.465	1.496	ooooo		
		x	xx	xxx	xxxx	Seconda parte della serie	
- K per serie la cui prima parte è							

3.8 Analisi delle superfici di frattura

Le prove vengono interrotte quando la frequenza mostra uno scostamento da quella iniziale. Questo significa che il provino è soggetto ad una diminuzione della sezione utile a causa dell'avanzamento della cricca che scaturisce dal microintaglio generato artificialmente.

Le provette che mostrano cedimento sono sottoposte ad un esame al SEM dopo esser state sezionate fragilmente, in corrispondenza della cricca, con l'ausilio di azoto liquido. In questa sede non si vuole tanto esaminare la superficie di frattura, tipica dei cedimenti per fatica (figura 3.8.2) dove è apprezzabile la zona del fronte di propagazione della cricca, piuttosto è interessante definire la morfologia dell'intaglio, in particolare quanto esso è profondo.

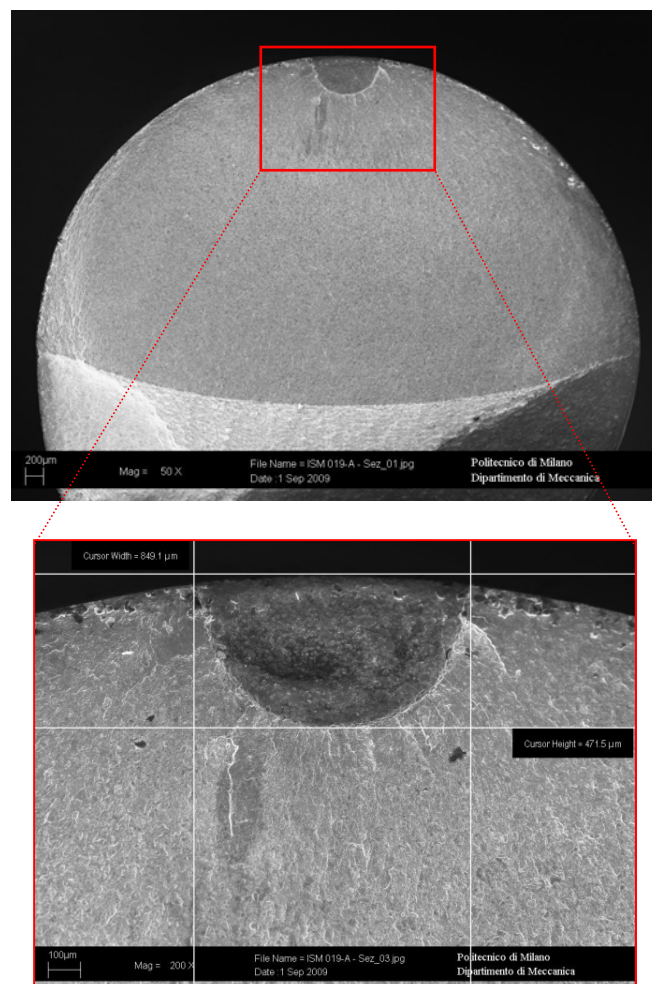


Figura 3.8.1 Microintaglio fuori specifica

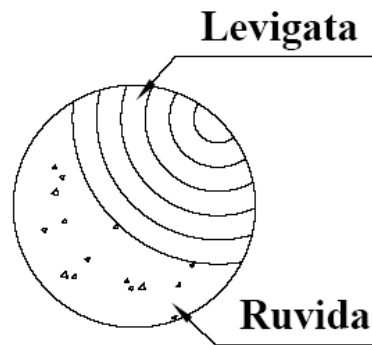


Figura 3.8.2 Superfici di frattura: tipico cedimento per fatica

Si è infatti riscontrato che in tutti cedimenti la dimensione del microintaglio risulta fuori specifica poiché eccede nella dimensione lungo la profondità della cricca. Questo testimonia quanto il processo di elettroerosione sia delicato che comporta una certa dispersione dei dati.

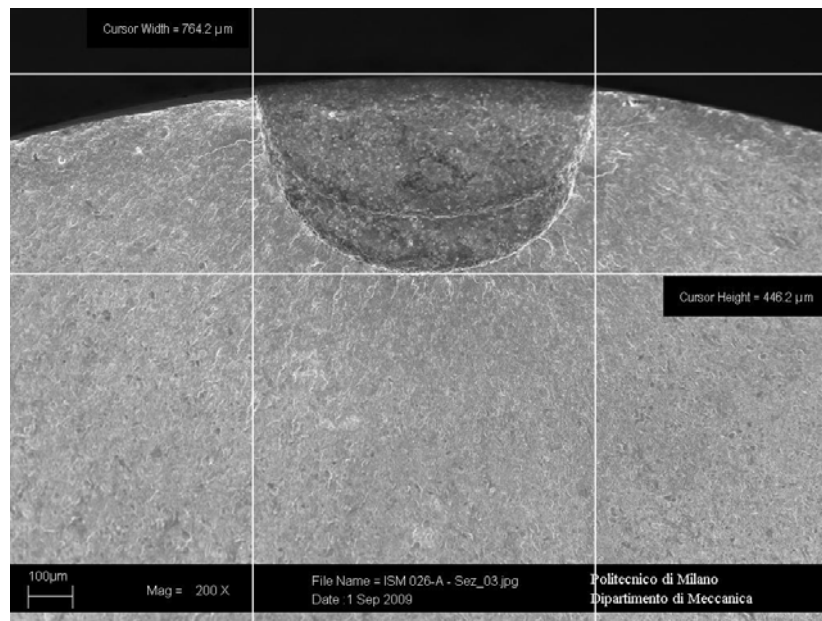


Figura 3.8.3 Processo di elettroerosione $a=0,45$ mm $c=0,38$ mm

Capitolo 4

Effetto del trattamento superficiale di pallinatura sul comportamento a fatica

La pratica della pallinatura^[17], in figura 4.1, è assai diffusa come trattamento superficiale nei componenti soggetti a fatica ad alto numero di cicli allo scopo di migliorare la resistenza a fatica del materiale. L'effetto benefico è dato non tanto dall'entità dello sforzo residuo in superficie ma dal gradiente di sforzo in profondità indotto dal trattamento cioè da uno strato sufficientemente profondo con sforzi residui di entità importante (figura 4.2). I motivi per i quali gli sforzi residui portano alla modifica della resistenza a fatica derivano dall'ipotesi che, rimanendo in campo elastico, gli sforzi applicati si sommano algebricamente a quelli residui: se questi ultimi sono di compressione, e quelli applicati di trazione, la somma algebrica sarà minore dello sforzo applicato, con il conseguente miglioramento che si apprezza sul diagramma di Haigh e sul diagramma di Wöhler^[15] in figura 4.3-4.

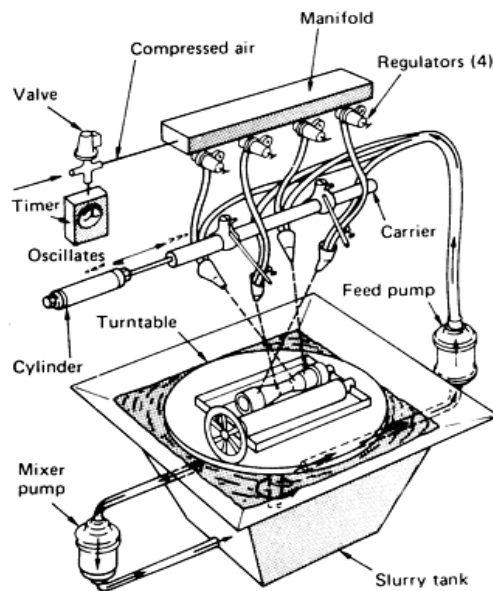


Figura 4.1 Trattamento superficiale di tipo meccanico: pallinatura

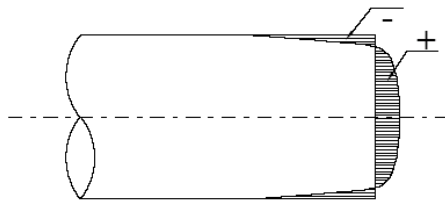


Figura 4.2 Gradiente di sforzi residui indotti dal trattamento di pallinatura

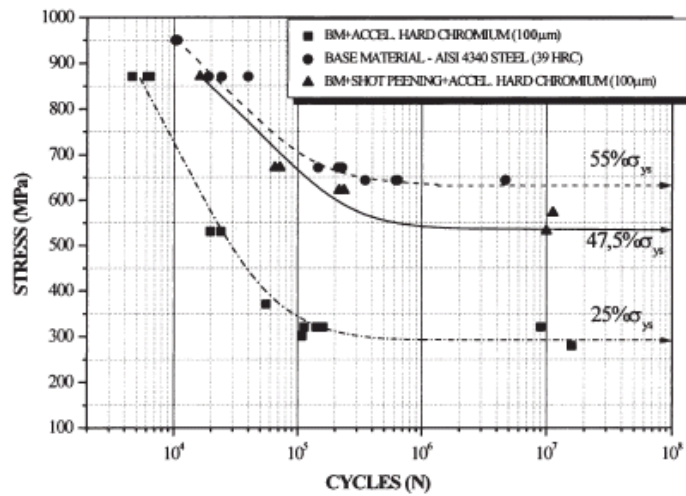


Figura 4.3 Diagramma S/N per AISI 4340^[15]

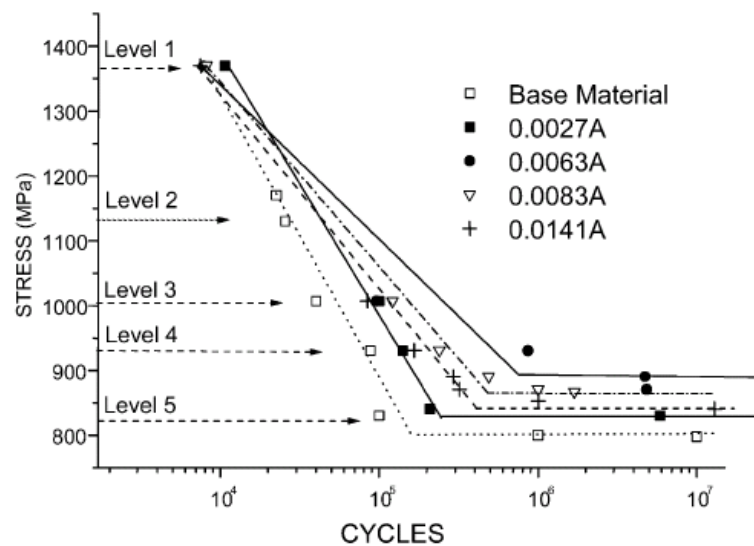


Figura 4.4 Effetto pallinatura: diagramma S/N per AISI 4340^[16]

L'obiettivo dell'attività è la verifica sperimentale di un modello analitico di previsione del limite di fatica del materiale soggetto ad un gradiente di sforzi residui, siano essi derivanti dal processo di produzione del provino o dal trattamento fisico-chimico che segue, nel presente dal trattamento superficiale di pallinatura.

4.1 Modalità di prova

Il progetto prevede la conduzione di uno Stair Case breve con 8 provini intagliati. Lo scopo è la determinazione statistica del limite di fatica flessionale in termini di ΔM della lega AISI 4340 sottoposta a trattamento di pallinatura al rapporto di ciclo già sperimentato precedentemente ovvero $R=0,05$. Viene utilizzata la macchina di prova a risonanza in dotazione al Politecnico di Milano: *RUMUL cracktronic*, in figura 4.1.1, avente una capacità di carico fino a 160 Nm che opera fino a frequenze di 130 Hz. Il limite per il quale si interrompe la prova è di 10 milioni di cicli. Il software che gestisce il controllo della macchina è simile a quello introdotto nel paragrafo 2.2 e richiede in input il carico da applicare in termini di momento medio M_{med} e alternato M_a per la definizione del rapporto di ciclo R . L'estrapolazione del punto sperimentale consente la verifica del modello analitico predittivo definito al paragrafo 4.3.

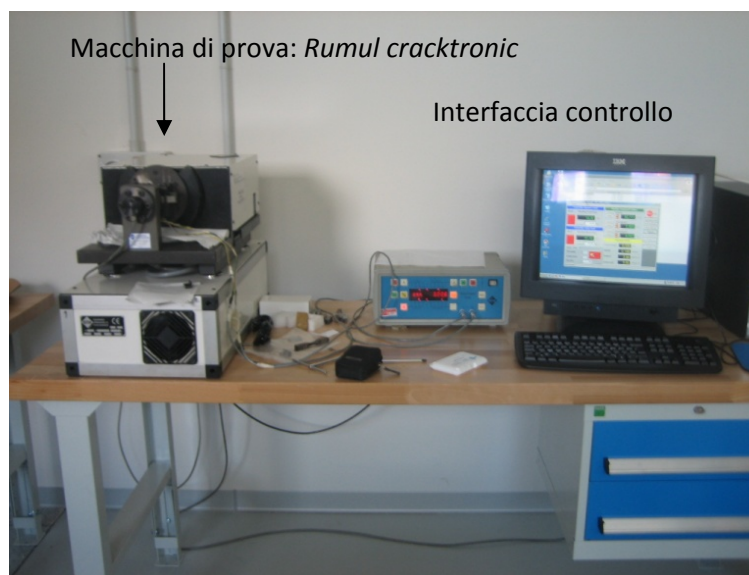


Figura 4.1.1 Apparecchi per il test

4.2 Materiale

Vengono fornite da AVIO s.p.a. dodici provette, numerate in senso crescente da 001 a 012, per l'esecuzione dello Stair Case di cui si riporta il disegno costruttivo (figura 4.2.1).

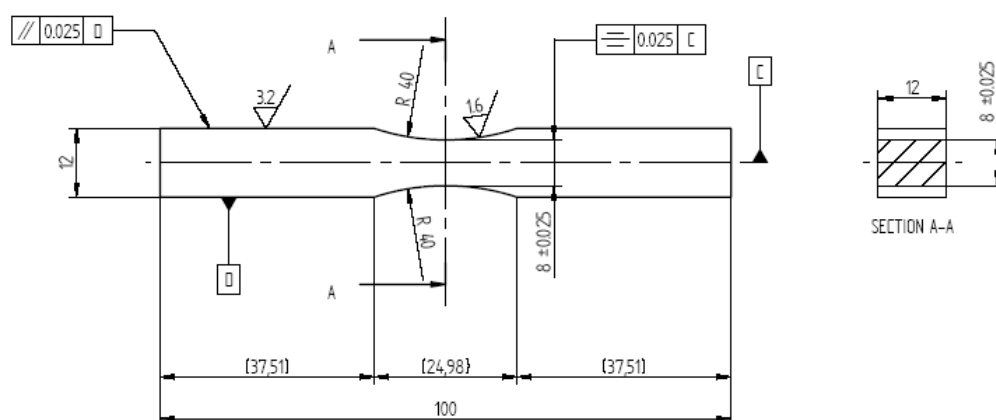


Figura 4.2.1 Provino per l'esecuzione dello Stair Case

La superficie del tratto centrale del provino è pallinata ed ad un primo esame ottico (ingrandimento 50x) si presenta come in figura 4.2.2.

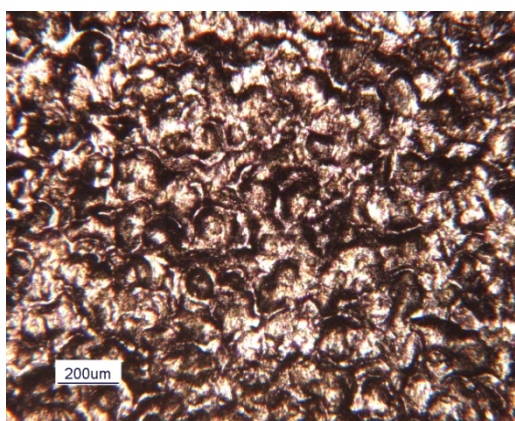


Figura 4.2.2 Morfologia della superficie del tratto utile dopo trattamento di pallinatura

Il beneficio che questa operazione comporta è stimabile attraverso il gradiente di sforzi residui indotto^{[15],[16]}. A tale riguardo è disponibile il profilo degli sforzi residui di compressione rilevato su due provette (s/n 005-010) da AVIO tramite

diffratometro *Xstress 3000 AST Stresstech*, a vari step di profondità, ricavati con la tecnica di asportazione tramite elettropulitura, rispetto la superficie della provetta e riportato di seguito in tabella 4.2.1. Un'ulteriore verifica, effettuata con diffratometro dello stesso tipo, in dotazione anche al Politecnico di Milano (figura 4.2.3), tarato per acciaio (tabella 4.2.1), conferma il valore dello sforzo residuo di compressione in prossimità della superficie ovvero alla quota zero.

Tabella 4.2.1 Rilievo sforzi residui di pallinatura al diffratometro

Diffratometro Xstress 3000 AST Stresstech			
X-ray tube:	Cr Kalpha	Tube voltage[kV]:	30
N°incl.:	6/6	Incl.[°]:	0-45-90
Tube corrent[mA]:	6,7	Poisson's ratio:	0,3
Psi-Oscill.:	0	Psi-Oscill.:	0
Collimator Φ[mm]	1	Exp Time[s]:	20
N° Phi-Osc.:	0	Material data:	Fe Ferrite

profondità [μm]	sforzi [MPa]
0	-500,00
9	-593,50
79,5	-640,50
99	-571,00
122,5	-350,00
155	-160,50
200,8	23,00

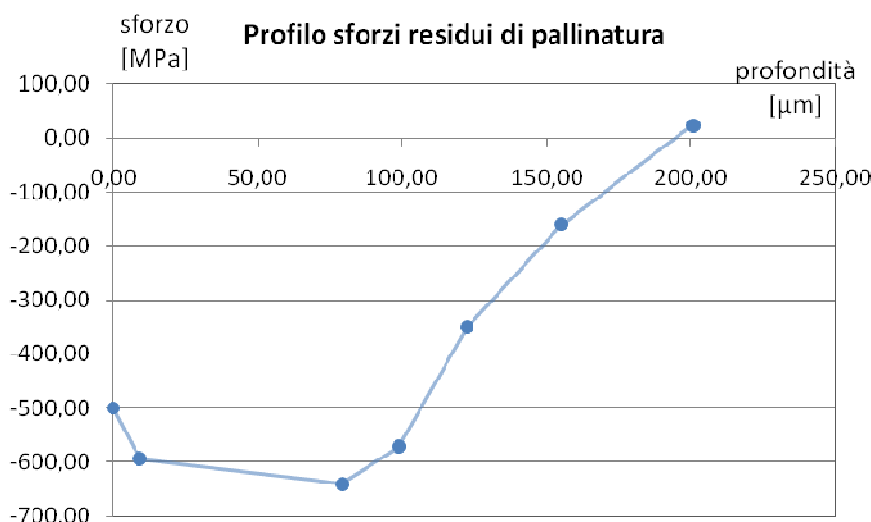


Figura 4.2.3 Profilo sforzi residui al diffratometro fornito da AVIO



Figura 4.2.4 Misura sforzi residui in superficie: *Xstress 3000 AST Stresstech*

Il progetto (figure 4.2.2) prevede quindi l'esecuzione del microintaglio superficiale che simula la presenza di una cricca, di cui si riporta la morfologia rilevata al microscopio ottico(50x) in figura 4.2.3, posizionato nel tratto centrale raccordato, centrato rispetto gli assi di simmetria del provino. L'operazione è eseguita da CATE s.r.l. tramite processo di elettroerosione a tuffo con l'ausilio di utensile di forma circolare con $R=0,38$ mm.

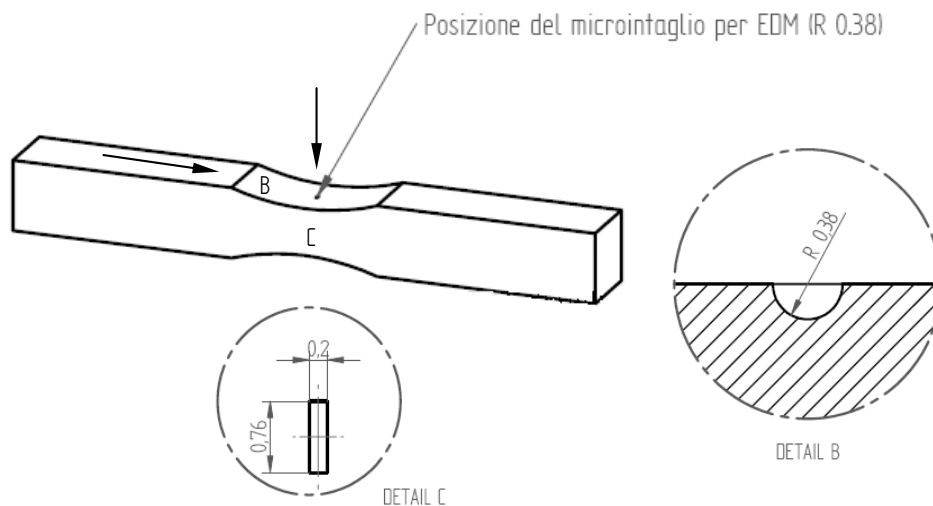


Figura 4.2.2 Esecuzione del microintaglio

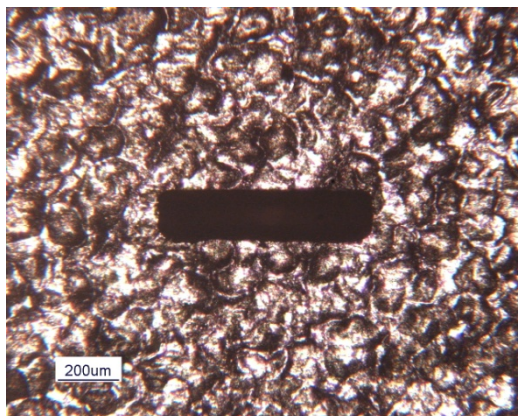


Figura 4.2.3 Microintaglio al microscopio ottico (50x)

4.3 Previsione del limite di fatica

La propagazione dei difetti a fatica è fortemente influenzata dalla presenza degli sforzi residui ed è quindi molto importante riuscire a valutarne gli effetti per avere delle previsioni di crescita del difetto accurate o semplicemente per stimare il limite di fatica del componente.

A questo scopo l'approccio che viene seguito considera di sovrapporre gli sforzi residui alle sollecitazioni provocate dal carico applicato per valutare lo sforzo effettivo agente, tradotto in termini di fattore di intensificazione degli sforzi.

Per riuscire a dare una valutazione quantitativa della pallinatura i problemi da affrontare sono diversi: in primo luogo si devono definire i valori e gli andamenti delle sollecitazioni agenti sul provino, siano esse residue o derivanti dal carico applicato; successivamente si deve valutare il corrispettivo fattore d'intensificazione degli sforzi per poi sommare algebricamente i due effetti definendo così il SIF effettivo agente all'apice della cricca come:

$$K_{eff} = K_{res} + K_{Bending} \quad (4.3.1)$$

Per quanto riguarda la definizione del profilo dei residui ci si riferisce alla tabella 4.2.1. Con l'ausilio di MATLAB, si effettua prima l'interpolazione dei dati con polinomio di terzo grado per stabilirne l'andamento in direzione della profondità (figura 4.3.1) :

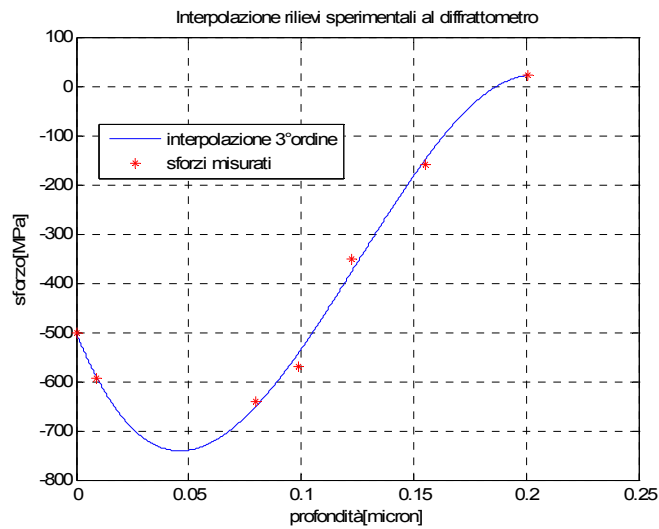


Figura 4.3.1 Interpolazione degli sforzi residui

Poiché la struttura cristallina è in equilibrio l'effetto di tale gradiente di sforzi dev'essere bilanciato da una distribuzione di sforzi che abbia l'effetto contrario. Immaginando di considerare mezzo spessore del provino, si ipotizza quindi che all'interno del provino gli sforzi abbiano una distribuzione costante ad un livello tale da garantire l'equilibrio: il calcolo, riportato nelle equazioni 4.3.2-3, prevede la valutazione dell'integrale sotteso al polinomio definito al passo precedente che coincide dimensionalmente ad uno sforzo lineare. Tale azione, come detto, dev'essere controbilanciata dallo sforzo costante agente sull'altra porzione di sezione del mezzo provino, come riportato in figura 4.3.2.

$$\sigma_{res} = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad \begin{cases} a = -394390 \\ b = 147730 \\ c = -11150 \\ d = -500 \end{cases} \quad (4.3.1)$$

$$\frac{\sigma}{x} = \int_0^{200,8} \sigma_{res} \cdot dx = -87.2857 \frac{N}{mm} \quad (4.3.2)$$

$$\sigma_{cost} = -\left(\frac{\sigma}{x} \cdot \frac{1}{\frac{t}{2} - 200,8}\right) = 23 \text{ MPa} \quad (4.3.3)$$

$$\begin{cases} \sigma_{res} = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d & x \leq 0,2008 \text{ mm} \\ \sigma_{res} = \sigma_{cost} & \forall x \end{cases}$$

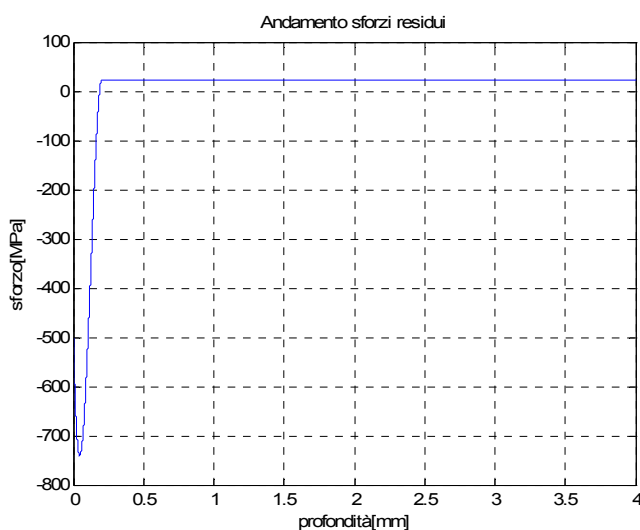


Figura 4.3.2 Definizione andamento sforzi residui

Per quanto riguarda invece la distribuzione di sforzi nella sezione critica della provetta causata dal momento flettente applicato essa assume il tipico andamento “a farfalla”, per il quale gli sforzi massimi in valore assoluto sono i punti più distanti dall’asse neutro, come si vedrà nel seguito.

Per la valutazione dell’effetto in termini di fattore di intensificazione di sforzi K si ricorre all’utilizzo del metodo della “weight function” definita da Wang-Lambert^[14] per una cricca semiellittica in una lastra piana spessa t e larga w avente rapporto $\frac{a}{c} \leq 1$.

Secondo gli autori il SIF all’apice del difetto assunto come una cricca è definito dall’equazione 4.3.4:

$$K = \int_0^a \sigma(x) \cdot m(x, a) dx \quad (4.3.4)$$

Dove:

- K è il fattore di intensificazione degli sforzi;
- $\sigma(x)$ è la distribuzione di sforzi lungo la profondità della cricca;
- $m(x, a)$ è la weight function nella forma generale definita per il modello di riferimento in figura 4.3.2 che tiene conto della forma della cricca e definita dalla:

$$m(x, a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left[1 + M_1 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_2 \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] \quad (4.3.4)$$

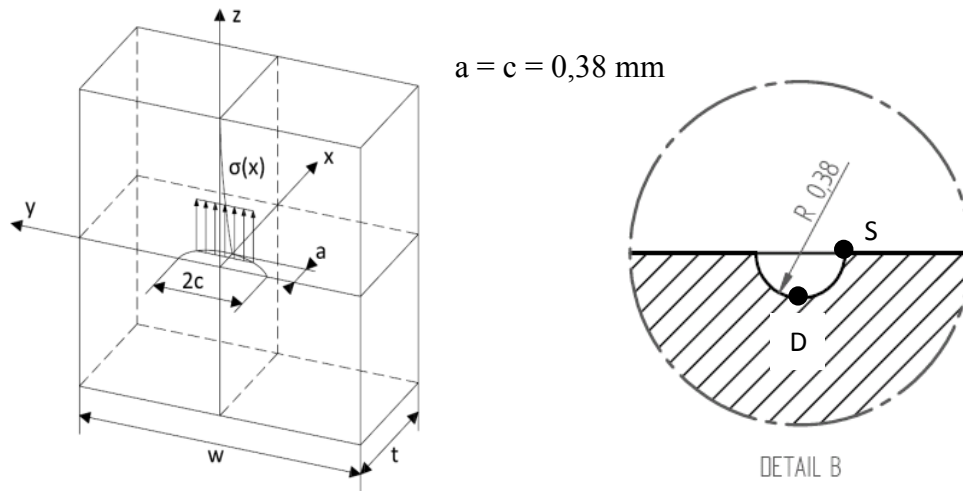


Figura 4.3.2 Modello di riferimento per la definizione del SIF

Si effettua il calcolo del fattore di intensificazione degli sforzi per i punti all'apice della cricca in superficie S (surface) e in profondità D (deepest) funzione dei profili di sforzo definiti in precedenza: a tal proposito si riportano le weight function ed i relativi coefficienti utilizzati per l'implementazione in ambito MATLAB (equazione 4.3.5-15):

Calcolo dei SIF:

$$\begin{cases} K_D = \int_0^a \sigma(x) \cdot m_D(x, a) dx \\ K_S = \int_0^a \sigma(x) \cdot m_S(x, a) dx \end{cases} \quad (4.3.5)$$

Weight function:

$$\begin{cases} m_D(x, a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left[1 + M_{1D} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_{2D} \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_{3D} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] \\ m_S(x, a) = \frac{2}{\sqrt{\pi x}} \left[1 + M_{1S} \left(\frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_{2S} \left(\frac{x}{a}\right) + M_{3S} \left(\frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] \end{cases} \quad (4.3.6)$$

Dove i coefficienti sono di seguito definiti dalle:

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1,65} \quad (4.3.7)$$

$$\begin{cases} M_{1D} = \frac{\pi}{\sqrt{2Q}}(4Y_0 - 6Y_1) - \frac{24}{5} \\ M_{2D} = 3 \\ M_{3D} = 2 \left(\frac{\pi}{\sqrt{2Q}}Y_0 - M_{1D} - 4 \right) \end{cases} \quad (4.3.8)$$

$$\begin{cases} M_{1S} = \frac{\pi}{\sqrt{4Q}}(30F_1 - 18F_0) - 8 \\ M_{2S} = \frac{\pi}{\sqrt{4Q}}(60F_0 - 90F_1) + 15 \\ M_{3S} = -(1 + M_{1S} + M_{2S}) \end{cases} \quad (4.3.9)$$

$$\begin{cases} Y_0 = B_0 + B_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + B_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4 + B_3 \left(\frac{a}{t}\right)^6 \\ Y_1 = A_0 + A_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + A_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4 + A_3 \left(\frac{a}{t}\right)^6 \end{cases} \quad (4.3.10)$$

$$\begin{cases} F_0 = \left[C_0 + C_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + C_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{a}{c}} \\ F_1 = \left[D_0 + D_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + D_2 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{a}{c}} \end{cases} \quad (4.3.11)$$

$$\begin{cases} A_0 = 0,4537 + 0,1231 \left(\frac{a}{c}\right) - 0,7412 \left(\frac{a}{c}\right)^2 + 0,46 \left(\frac{a}{c}\right)^3 \\ A_1 = -1,652 + 1,665 \left(\frac{a}{c}\right) - 0,534 \left(\frac{a}{c}\right)^2 + \frac{1}{0,198 + \left(\frac{a}{c}\right)^{0,846}} \\ A_2 = 3,418 - 3,126 \left(\frac{a}{c}\right) - \frac{1}{0,041 + \left(\frac{a}{c}\right)} + 17,259 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{9,286} \\ A_3 = -4,228 + 3,643 \left(\frac{a}{c}\right) + \frac{1}{0,02 + \left(\frac{a}{c}\right)} - 21,924 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{9,203} \end{cases} \quad (4.3.12)$$

$$\begin{cases} B_0 = 1,0929 + 0,2581 \left(\frac{a}{c}\right) - 0,7703 \left(\frac{a}{c}\right)^2 + 0,4394 \left(\frac{a}{c}\right)^3 \\ B_1 = 0,456 - 3,045 \left(\frac{a}{c}\right) + 2,007 \left(\frac{a}{c}\right)^2 + \frac{1}{0,147 + \left(\frac{a}{c}\right)^{0,685}} \\ B_2 = 0,995 - \frac{1}{0,027 + \left(\frac{a}{c}\right)} + 22 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{9,953} \\ B_3 = -1,459 + \frac{1}{0,014 + \left(\frac{a}{c}\right)} - 24,211 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{8,071} \end{cases} \quad (4.3.13)$$

$$\begin{cases} C_0 = 1,2972 + 0,1548 \left(\frac{a}{c}\right) - 0,0185 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \\ C_1 = 1,5083 - 1,3219 \left(\frac{a}{c}\right) + 0,5128 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \\ C_2 = -1,101 + \frac{0,879}{0,157 + \left(\frac{a}{c}\right)} \end{cases} \quad (4.3.14)$$

$$\begin{cases} D_0 = 1,2687 - 1,0642 \left(\frac{a}{c}\right) + 1,4646 \left(\frac{a}{c}\right)^2 - 0,725 \left(\frac{a}{c}\right)^3 \\ D_1 = 1,1207 - 1,2289 \left(\frac{a}{c}\right) + 0,5876 \left(\frac{a}{c}\right)^2 \\ D_2 = 0,19 - 0,608 \left(\frac{a}{c}\right) + \frac{0,199}{0,035 + \left(\frac{a}{c}\right)} \end{cases} \quad (4.3.15)$$

A questo punto tutte le sollecitazioni sono tradotte in termini di K per permettere un approccio più significativo poiché in presenza di cricche, o come nel nostro caso di microdifetti assunti tali, non è possibile ragionare in termini di sforzo nominale.

Il primo passo è tradurre l'effetto della pallinatura, in figura 4.3.3, definendo in questo modo i SIF residui all'apice nei due punti, equazione 4.3.16:

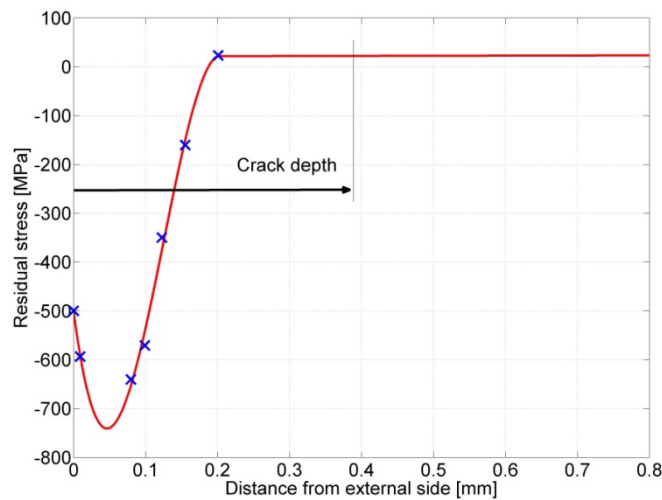


Figura 4.3.3 Sforzi residui di pallinatura

$$\begin{cases} K_{D,res} = \int_0^a \sigma_{peen}(x) \cdot m_D(x, a) dx = -1,8132 \text{ MPa}\sqrt{m} \\ K_{S,res} = \int_0^a \sigma_{peen}(x) \cdot m_S(x, a) dx = -13,0766 \text{ MPa}\sqrt{m} \end{cases} \quad (4.3.16)$$

Si può affermare quindi che l'effetto in superficie del trattamento di pallinatura in termini di SIF è molto più benefico nel punto S rispetto al punto in profondità D. In effetti in superficie gli sforzi di compressione sono molto più alti in modulo rispetto all'apice in profondità, dove addirittura sono lievemente di trazione (figura 4.3.3). Si focalizza quindi l'attenzione su questo punto per effettuare i calcoli di previsione del limite di fatica.

Il procedimento è iterativo. Si ipotizza un momento alternato ΔM con rapporto di ciclo $R=0,05$ applicato al provino (figura 4.3.4): questo genera nel punto D uno sforzo massimo definito dalla 4.3.17.

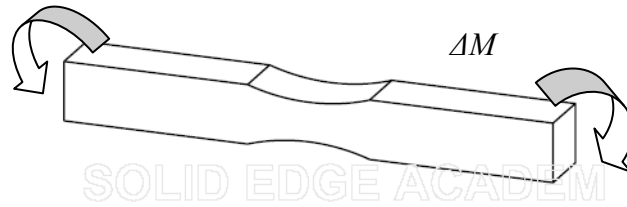


Figura 4.3.4 Sforzo applicato ai provini durante il test

$$\begin{cases} M_{max} = \frac{\Delta M}{1-R} \\ \sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_f} \end{cases} \quad (4.3.17)$$

Dove il modulo di resistenza a flessione per sezione rettangolare è definito dalla:

$$\begin{cases} W_f = J \cdot \frac{t}{2} \\ J = \frac{1}{12} \cdot b \cdot t^3 \end{cases} \quad (4.3.18)$$

Il polinomio che descrive lo sforzo agente funzione del momento applicato risulta come detto lineare:

$$\sigma_{Bending} = \sigma_{max} - \frac{\sigma_{max}}{h/2} \cdot x \quad (4.3.19)$$

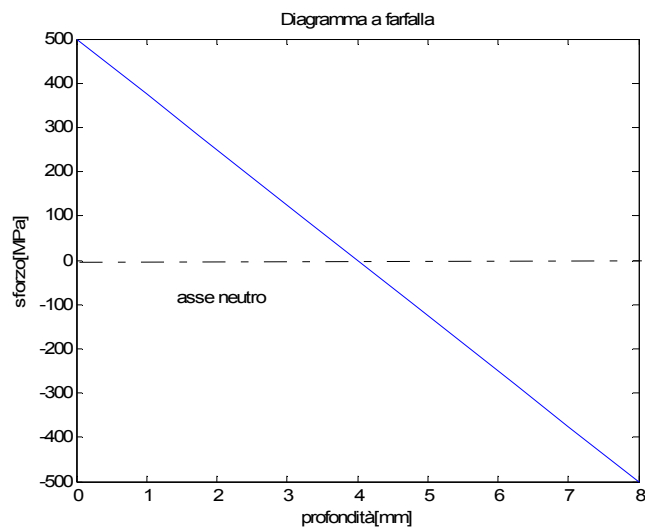


Figura 4.3.5 Diagramma a farfalla

Si traduce quindi lo sforzo massimo agente nel punto D in termini di SIF tramite la weight function che tiene conto delle dimensioni della cricca:

$$K_{D,Bending} = \int_0^a \sigma_{Bending}(x) \cdot m_D(x, a) dx \quad (4.3.20)$$

A questo punto dev'esser valutato il rapporto di ciclo effettivamente agente nel punto D, in profondità, sovrapponendo algebricamente i due effetti:

$$R_{eff} = \frac{K_{D-Min,Bending} + K_{D,res}}{K_{D-Max,Bending} + K_{D,res}} \quad (4.3.21)$$

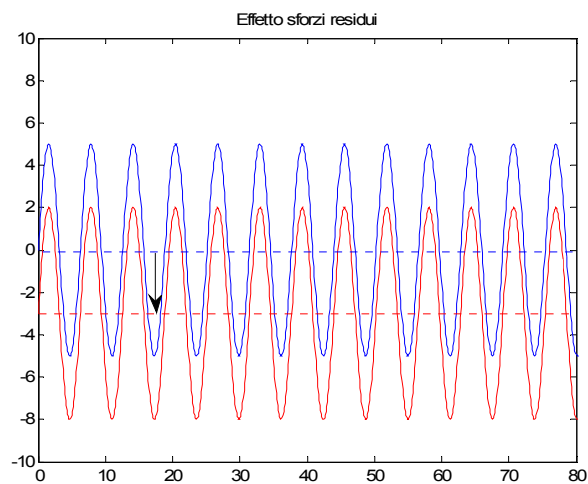


Figura 4.3.6 Effetto sullo sforzo medio dei residui

Come si può notare dal grafico in figura 4.3.6, l'effetto degli sforzi residui tende ad abbassare il rapporto di ciclo che effettivamente viene visto dal punto critico in questione.

Il punto chiave, che necessita di iterazioni per convergere ad una soluzione, consiste nel porre l'uguaglianza tra i SIF che agiscono sul provino testato in questa sede e quello testato nel capitolo 3 con prove di fatica assiale, per il quale si è definito il limite di fatica tramite il modello di El-Haddad modificato. È un'operazione legittima poiché si basa sul concetto fondamentale di similitudine alla base della meccanica della frattura il quale presuppone che cricche con differente geometria ed in provini diversi siano soggette ad identiche condizioni nella regione dell'apice della cricca se il parametro K è il medesimo. Di fatto si stima il limite di fatica del provino sollecitato assialmente in termini di variazione di sforzo, come al paragrafo 3.4, per il rapporto di ciclo effettivo calcolato al passo precedente.

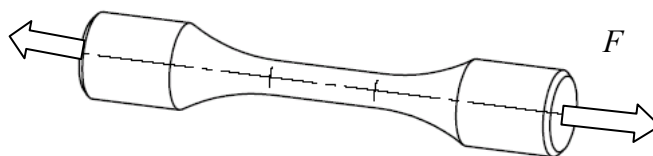


Figura 4.3.7 Provino sollecitato assialmente

Tramite la weight function tale limite viene poi tradotto in termini di ΔK , ponendo lo sforzo costante su tutta la sezione come polinomio d'integrazione, per verificare che:

$$\Delta K_{Bending} = \Delta K_{Axial} \quad (4.3.22)$$

Se l'uguaglianza non è verificata si itera più volte il problema per convergere alla soluzione che determinerà appunto la stima del limite di fatica del provino pallinato in termini di ΔK e ΔN che corrisponderanno ad un certo livello di sforzo $\Delta \sigma$.

Di seguito si riportano i passi che riassumono l'architettura del software implementato in MATLAB:

- 1) Calcolo del SIF all'apice in profondità indotto dagli sforzi residui in superficie:

$$K_{D,res} = f(\sigma_{peen}, \sqrt{area})$$

- 2) Applico momento di primo tentativo;
- 3) Calcolo ΔK causato dal momento applicato su provetta da testare:

$$\Delta K_{Bending} = f(\sigma_{Bending}, \sqrt{area})$$

- 4) Definizione del rapporto di ciclo visto effettivamente dal punto D:

$$R_{eff} = \frac{\Delta K_B \cdot R + K_{D,res}}{\Delta K_B(1 - R) + K_{D,res}}$$

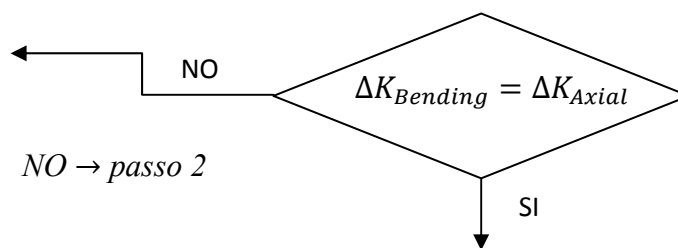
- 5) Calcolo del limite di fatica con modello di El-Haddad 3D per provino sollecitato assialmente:

$$\Delta\sigma_w = f(R_{eff}, \sqrt{area})$$

- 6) Traduzione del limite in termini di ΔK :

$$\Delta K_{Axial} = f(R_{eff}, \sqrt{area}, \Delta\sigma_w)$$

- 7) Verifica dell'uguaglianza tra i ΔK :



- 8) $SI \rightarrow \Delta\sigma_{Bending} = f(R, \Delta N)$

→ Risultati ottenuti con software implementato nell'ambito MATLAB in cui l'output è costituito da un report come di seguito.

REPORT

Provino PALLINATO: valutazione sforzi residui in termini di ΔK nel punto critico all'apice della cricca $a=c=0.38$ mm \rightarrow radAREA= 454 μ m
 SIFmax all'apice della cricca indotto dalla pallinatura:
 -1.8132 MPa \sqrt m

SCELTE EFFETTUATE all'ultimo step, per il ΔM limite per provino pallinato:
 PROVINO sollecitato assialmente esente da sforzi residui superficiali, per il quale l' R effettivo visto all'apice della cricca dal provino pallinato:

R effettivo = -0.3217

Provino privo di sforzi residui superficiali, sollecitato assialmente stima tramite parabola passante per i tre punti del limite di fatica per provino liscio per il Rapporto di ciclo scelto:

$\Delta\sigma_{w0} = 1.1572e+003$ MPa

Valore della soglia di propagazione per cricche lunghe per il Rapporto di ciclo scelto

$\Delta K_{th,LC} = 6.7228$ MPa \sqrt m

parametro di El-Haddad: radAREA0 = 26.5689 μ m

Limite di fatica del provino intagliato per rapporto di ciclo scelto: $\Delta\sigma_w = 272.1$ MPa

**PROVINO PALLINATO:
 MOMENTO LIMITE (picco-picco per provino pallinato)**

$\Delta M = 37.42$ Nm

siccome $R=0.0500$

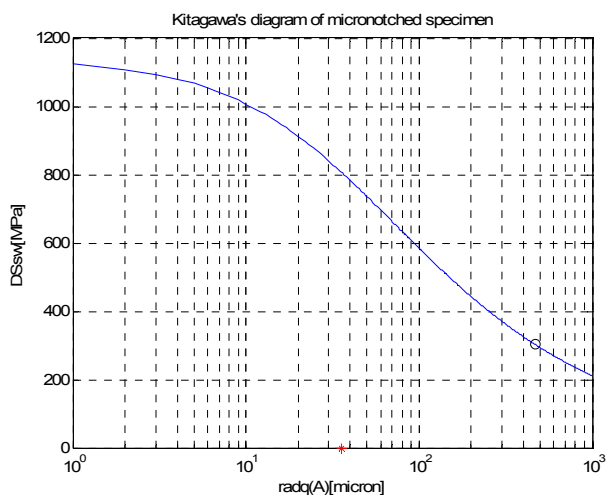
corrispondono i seguenti valori di:

MOMENTO medio: [Nm]
 20.6795

MOMENTO alternato: [Nm]
 18.71

MOMENTO minimo: [Nm]
 1.9695

MOMENTO massimo: [Nm]
 39.3895



che causa nel punto critico D all'apice della cricca $DK = 6.1$ MPa \sqrt m
 equivalente a una variazione di sforzo nominale di $\Delta\sigma = 292.3438$ MPa

4.4 Prova sperimentale

Il test prevede la definizione della sequenza Stair Case breve, definita da 8 provini, riportata in tabella 4.4.1 utilizzata per la stima del limite di fatica in termini di variazione di momento applicato al rapporto di ciclo $R=0,05$.

Il primo livello testato è superiore di 12 Nm rispetto il valore stimato al paragrafo 4.3 per iniziare idealmente la sequenza con un cedimento. Lo Stair Case inizia effettivamente alla seconda prova, il passo d tra gli step equivale al 7% del primo livello e finisce con il completamento del test di 9 provini utili (+1 rispetto la fase di design di progetto).

$$\begin{cases} \Delta N_{(I \text{ livello})} = 49,5 \text{ Nm} \\ d = 7\% \Delta N_{(I \text{ livello})} = 3,465 \text{ Nm} \end{cases}$$

Tabella 4.4.1 Sequenza Stair Case ricavata con provette pallinate sottoposte a ΔM

prova	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Identificazione provino: s/n	008	006	009	003	007	001	002	012	004	011
note	set	start								
ΔM[Nm]										
R=0,05										
75,57	X									
49,5		X								
46,04			X							
42,59				X		X				O
39,13					O		X		O	
35,67								O		
N° cicli	$7,5 \cdot 10^4$	$3,38 \cdot 10^5$	$7,46 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^5$	$12 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^5$	$21 \cdot 10^6$	$14,7 \cdot 10^6$	$14,4 \cdot 10^6$

La stima statistica del limite di fatica ΔN al rapporto di ciclo testato è stata ottenuta in riferimento al metodo di Dixon^[3], applicato per una sequenza avente l'ordine definito in prova, e numerosità $N'=9$, $N>6$ e un cambio di risposta al quarto livello:

$$\Delta M_w = \frac{\sum \Delta M_i}{N'} + \frac{d}{N'} \cdot (A + C) \quad (4.4.1)$$

dove ΔM_i rappresentano i livelli di sforzo della sequenza, d è il passo della serie, N è la dimensione del campione N' è quella diminuita del numero di risposte uguali che precedono il livello a cui il seguente si avrà il primo cambio di risposta mentre A e C sono coefficienti ottenuti dalla tabella 2.7.2.

Ricavati i valori dei coefficienti dipendenti dalla serie è possibile effettuare la stima, riportata dall'equazione 4.4.2:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{sequenza: } \mathbf{OXXOXXO} \\ N' = N = 8 \\ n_x - n_o = -1 \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A = -1,55 \\ C = -0,65 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta M_w = \frac{\sum \Delta M_i}{N} + \frac{d}{N} \cdot (A + C) = 40,97 \text{ Nm} \rightarrow \Delta \sigma_w = 320 \text{ MPa} \\ R = 0,05 \end{array} \right. \quad (4.4.2)$$

Una stima più conservativa è stata ricavata col metodo di Hodge-Rosenblatt^[11] sulla sequenza originaria di 9 provini ricavata dallo Stair Case: questo prevede una media attorno al primo cambio di risposta, aggiungendo il livello di sforzo fittizio che si sarebbe testato con un provino successivo.

$$\Delta M_w = \frac{\sum \Delta M_i + \Delta M_{\text{fittizio}}}{N+1} = 40,86 \text{ Nm} \rightarrow \Delta \sigma_w = 319 \text{ MPa} \quad (4.4.3)$$

Pertanto il modello analitico introdotto al paragrafo 4.3, che prevede un limite di $\Delta M_w = 37,42 \text{ Nm}$ per $R=0,05$, denota un errore dell'8% rispetto alla stima più conservativa ottenuta con il metodo di Hodge-Rosenblatt dimostrando di descrivere bene il comportamento del materiale.

Si può quindi affermare che effettivamente *la pallinatura aumenta le caratteristiche di resistenza a fatica del materiale*: a parità di dimensione del microdifetto il materiale osserva un aumento della resistenza a fatica in termini di variazione di sforzo di 74,5 MPa.

4.5 Analisi delle superfici di frattura

L'esame al microscopio a scansione elettronica SEM delle superfici di frattura e dei microintagli dei provini che hanno superato il limite delle prove interrotte (runout a 10^7 cicli) chiarisce ancora una volta la modalità di cedimento a fatica del materiale.

Si osserva che i provini runout presentano microintagli per i quali sul fondo, cioè all'apice in profondità, sono presenti microcricche non propaganti. In superficie queste sembrano ad una prima analisi non affiorare (figura 4.5.1a).

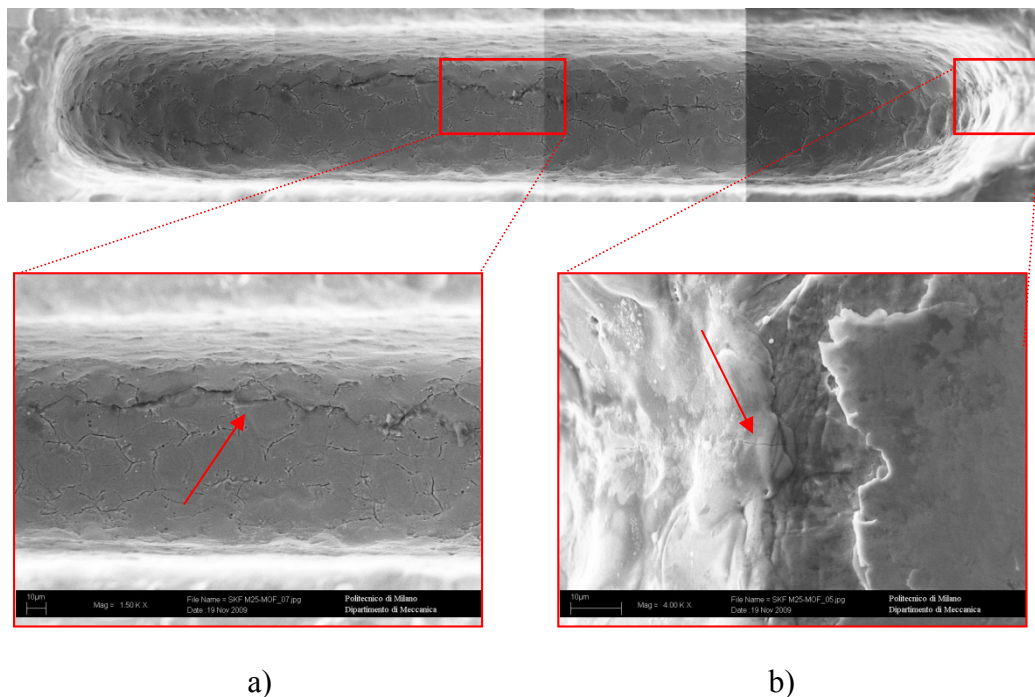


Figura 4.5.1 Microintaglio riportante microcricche non propaganti

D'altro canto un'approfondita analisi (figura 4.5.1b) con più alti ingrandimenti (4000x) mette in evidenza che sul bordo è presente una microfessura che tende a rimanere chiusa, come se "qualcosa" le impedisse di aprirsi. È questo il primo effetto evidente della pallinatura: l'alto gradiente di sforzo in compressione indotto nello strato prossimo alla superficie si oppone all'apertura della cricca. Un'ulteriore conferma è data dall'analisi delle superfici di frattura: in superficie, rispetto al fronte in profondità, la propagazione è rallentata dalla pallinatura (figura 4.5.2).

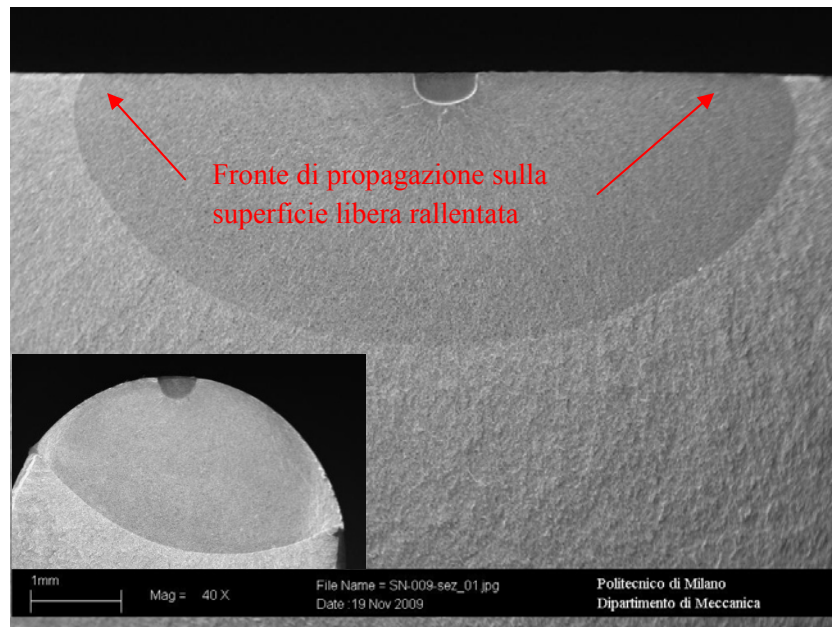


Figura 4.5.2 Effetto di rallentamento-opposizione alla propagazione, nel riquadro un cedimento di provino esente da sforzi residui superficiali

Infine per verificare la dimensione iniziale del microdifetto artificiale si effettuano le misure della profondità e larghezza: gli intagli eseguiti possiedono le specifiche di progetto (figura 4.5.3).

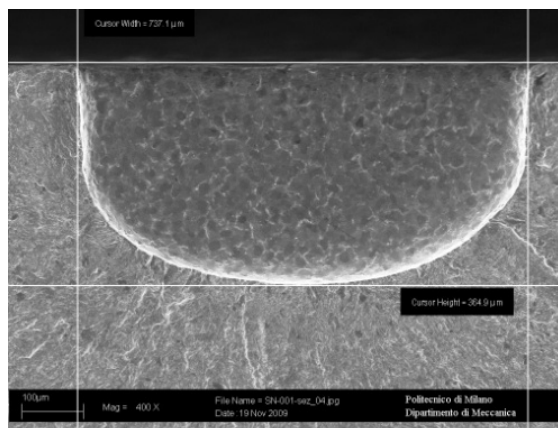


Figura 4.5.3 Verifica delle dimensioni dei microintagli

4.6 Effetto degli sforzi residui superficiali di rullatura

Viene fornito da Avio il profilo di sforzi (figura 4.6.1) residui dovuto alla rullatura di provette da utilizzare per la determinazione di una sequenza Stair Case breve al fine di stimare l'effetto sulla resistenza a fatica.

Tramite il software sviluppato si ricava il limite di fatica stimato teorico da verificarsi in sede sperimentale.

Allo stesso modo, definito il profilo di sforzi residui indotto dal trattamento in profondità:

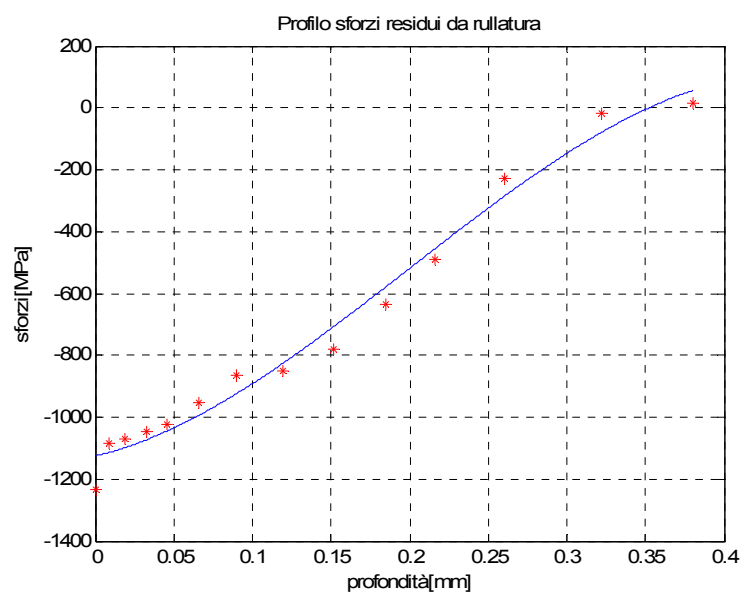


Figura 4.6.1 sforzi residui di rullatura

Che comporta dei fattori di intensificazione all'apice di:

$$\begin{cases} K_{D,res} = \int_0^a \sigma_{rull}(x) \cdot m_D(x, a) dx = -6,4 \text{ MPa}\sqrt{m} \\ K_{S,res} = \int_0^a \sigma_{rull}(x) \cdot m_S(x, a) dx = -24,1 \text{ MPa}\sqrt{m} \end{cases}$$

Questi comportano un aumento notevole delle caratteristiche di resistenza a fatica, confermati dai risultati ottenuti nel report seguente.

REPORT

Provino RULLATO: valutazione sforzi residui in termini di ΔK nel punto critico all'apice della cricca $a=c=0.38$ mm \rightarrow radAREA= 454 μ m
SIFmax all'apice della cricca indotto dalla rullatura:
-6.407 MPa \sqrt m

SCELTE EFFETTUATE all'ultimo step, per il ΔM limite per provino rullato:
PROVINO sollecitato assialmente esente da sforzi residui superficiali, per il quale l' R effettivo visto all'apice della cricca dal provino rullato:

R effettivo = -1.3457

Provino privo di sforzi residui superficiali, sollecitato assialmente stima tramite parabola passante per i tre punti del limite di fatica per provino liscio per il Rapporto di ciclo scelto:

$\Delta\sigma_{w0}$ = 1265 MPa

Valore della soglia di propagazione per cricche lunghe per il Rapporto di ciclo scelto

$\Delta K_{th,LC}$ = 11.986 MPa \sqrt m

parametro di El-Haddad: radAREA0 = 67.63 μ m

Limite di fatica del provino intagliato per rapporto di ciclo scelto: $\Delta\sigma_w$ = 455.5145 MPa

**PROVINO RULLATO:
MOMENTO LIMITE (picco-picco per provino rullato)**

$\Delta M = 62.5$ Nm

siccome $R=0.0500$

corrispondono i seguenti valori di:

MOMENTO medio: [Nm]

34.539

MOMENTO alternato: [Nm]

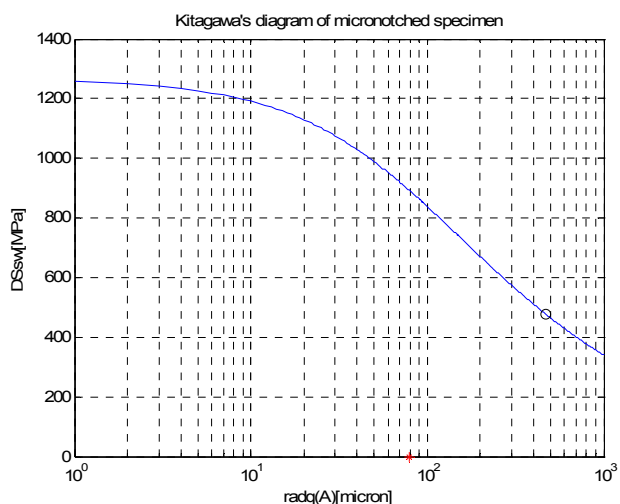
31.25

MOMENTO minimo: [Nm]

3.2895

MOMENTO massimo: [Nm]

65.789



che causa nel punto critico D all'apice della cricca $DK = 10.23$ MPa \sqrt m

Capitolo 5

Damage tolerance: prove a spettro

L'attività sin'ora svolta ha contribuito alla definizione di un modello di previsione che determina la relazione tra limite di fatica e dimensione del difetto, assunto come microcricca e caratterizzato dal parametro \sqrt{area} , sul cosiddetto 'diagramma di Kitagawa', tramite il modello 'El-Haddad 3D'. Non solo per mezzo di questi è possibile discriminare il campo delle cricche corte da quello delle cricche lunghe per i quali si hanno comportamenti diversi.

Inoltre, definiti i parametri caratteristici del materiale all'interno dell'equazione di NASGRO con prove di propagazione a rapporti di ciclo differenti, è possibile stimare la velocità di propagazione della cricca se il ΔK all'apice determinato dal carico applicato ad un certo rapporto di ciclo è superiore della soglia stimata, a sua volta funzione di quest'ultimo.

Assemblando i modelli validati in precedenza, ci si è rivolti allo sviluppo di un modello di propagazione implementato in ambiente MATLAB per la previsione dell'accrescimento del difetto sottoposto ad uno spettro di carico appositamente progettato per l'applicazione in questione. Il tipo di approccio è tipico della progettazione *damage tolerance* in cui, come si è più volte sottolineato, si ammette nel componente la presenza di difetti che, soggetti a cicli di carico durante l'esercizio, tendono a propagare e quindi a far collassare il sistema. Al fine di evitare il cedimento la progettazione prevede ispezioni e manutenzioni periodiche sul componente critico per il ripristino delle condizioni iniziali (lunghezza di cricca).

Il modello che simula la propagazione della cricca cerca successivamente conferma sperimentale attraverso prove con il medesimo spettro su provini a clessidra microintagliati e precriccati, accompagnate da ispezioni che monitorano in superficie la dimensione del difetto.

L'obiettivo principale resta, come nel capitolo 4, la valutazione dell'effetto benefico dei trattamenti meccanici superficiali quali pallinatura e rullatura.

5.1 Definizione spettro di carico

La fase di progettazione dell'esperimento prevede in primo luogo la definizione dello spettro di carico. Viene fornito da AVIO s.p.a. uno spettro di carico generato in fase di design da Airbus sulla base di uno studio basato sull'analisi numerica eseguita sul componente della trasmissione di potenza. I dati forniti necessitano un'elaborazione ulteriore al fine di effettuare prove sensate, sia nei tempi che nei costi, poiché lo spettro è esteso per un numero di cicli pari a $9 \cdot 10^8$ distribuiti in 4034 blocchi di numerosità variabile. L'obiettivo è perciò la definizione di uno spettro equivalente a quello fornito che verrà utilizzato per il test.

Il concetto fondamentale alla base di quest'operazione è quello di considerare i blocchi che, al primo ciclo, innescano la propagazione della cricca, cioè:

$$\Delta K_{blocco} > \Delta K_{th}$$

È da osservare che l'analisi, a questo livello, non prende in considerazione il fatto che i cicli successivi al primo, all'interno dell'*i*-esimo blocco ritenuto significativo, tendono a propagare il difetto. Si vuole in sostanza "tagliare" lo spettro originale, creato per il componente, tralasciando tutti i blocchi aventi ampiezze non significative per quanto riguarda l'effetto di apertura sulla cricca, assunta con dimensioni prossime a quella del microintaglio artificiale.

A questo scopo, mediante MATLAB, viene creato un programma che effettua le seguenti operazioni:

- Acquisizione spettro originale: il file riporta il numero di cicli per blocco al quale corrisponde un livello di sforzo massimo e minimo individuato da $\sigma_{i,max}$ e $\sigma_{i,min}$;
- Acquisizione gradienti di sforzo che agiscono sul componente propeller-shaft, assunto come una piastra spessa 18 mm avente difetto superficiale semicircolare con $R=0,38$ mm, come in figura 5.1.1, derivanti da analisi FEM: vengono valutati i polinomi (figura 5.1.2) che interpolano i σ_{max} e σ_{min} , necessari per il calcolo fattore di intensificazione degli sforzi K ;

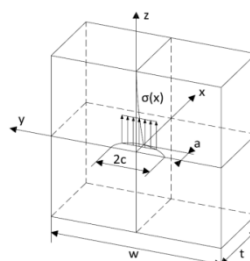


Figura 5.1.1 Modello assunto per la determinazione dei SIF

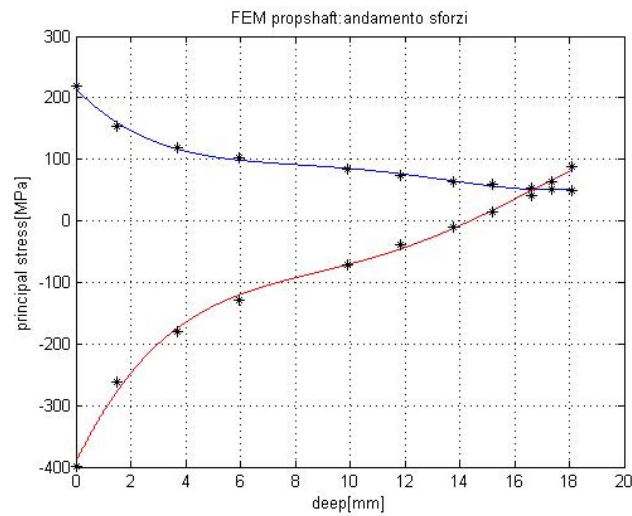


Figura 5.1.2 Gradiente di stress agente sul componente

- Valutazione del SIF all'apice del difetto, in superficie e in profondità (punti S e D): integrazione della weight function (vedi paragrafo 4.3) per difetto semicircolare e polinomio ricavato al punto 2, in funzione della dimensione della cricca, per entrambi i livelli di sforzo;
- Valutazione del SIF più critico, in S oppure in D, scalato rispetto il livello di sforzo dato per il blocco i-esimo:

$$\begin{cases} K_{max} = K_{max(D \text{ oppure } S)} \cdot \frac{\sigma_{max,i-esimo \text{ blocco}}}{\sigma_{max,FEM}} \\ K_{min} = K_{min(D \text{ oppure } S)} \cdot \frac{\sigma_{min,i-esimo \text{ blocco}}}{\sigma_{min,FEM}} \end{cases} \quad (5.1.1)$$

- Calcolo del ΔK all'apice della cricca responsabile della sua apertura:

$$\Delta K_{(D/S)} = K_{max} - K_{min} \quad (5.1.2)$$

- Determinazione del rapporto di ciclo per componente esente da trattamenti superficiali: in questo modo si avrà a disposizione uno spettro più ampio rispetto al caso in cui si considera l'eventuale effetto di trattamento superficiale meccanico, per il quale si è potuto constatare al capitolo 4 il beneficio in termini di resistenza a fatica, che quindi comporterebbe il taglio di un maggior numero di blocchi;

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (5.1.3)$$

Verifica del campo LEFM: sulla base dell'esperienza delle precedenti prove si vuole verificare se il rapporto di ciclo del blocco i-esimo comporta un parametro di El-Haddad per il quale è possibile ricadere nel campo delle cricche corte (figura 5.1.3). Si nota come il parametro in esame vari significativamente, soprattutto per R via via sempre più negativi.

→ Se $\sqrt{area_0} > \sqrt{area_{difetto}}$ si entra nel campo delle cricche corte.

A tal riguardo la soglia sarà stimata tramite l'equazione di NASGRO introducendo il parametro di El-Haddad (a_0 nell'equazione) proprio del blocco i-esimo. Nel caso contrario la soglia da stimare sarà differente dal caso seguente, utilizzato per cricche lunghe per cui $a_0 = cost = 0,038mm$.

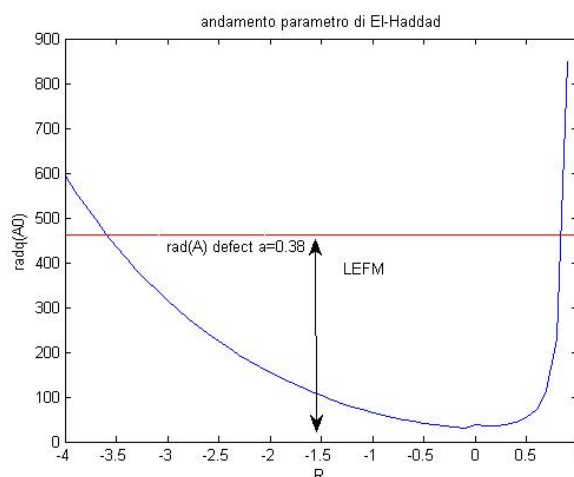


Figura 5.1.3 Andamento del parametro di El-Haddad funzione del rapporto di ciclo

- Valutazione dell'equazione di NASGRO per il calcolo della soglia in funzione di R : $\Delta K_{th,LC}(R)$. Va osservato che vengono utilizzati i parametri del materiale ottenuti fittando i punti sperimentali ricavati dalle prove di propagazione e riportati in tabella 5.1.1, includendo la prova non ben definita per la quale la soglia è pari a $19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ per $R=-2,5$. Si osserva inoltre che per $R>1$ il blocco viene scartato poiché si ritiene che i carichi totalmente in compressione non comportano l'apertura della cricca.

Tabella 5.1.1 a) Parametri sperimentali caratteristici dell'equazione di NASGRO
b) soglie sperimentali in funzione di R

α	2		R	$\Delta K_{th,LC}$ [MPa√m]
a_0	0,0381	mm	0,7	3,32
S_{max}/σ_o	0,3		0,05	4,91
ΔK_I	2,9501	MPa√m	-1	10,48
C_{thp}	0,514		-2	15,39
C_{thn}	-0.1104		-2,5	19
da/dN		m/ciclo		

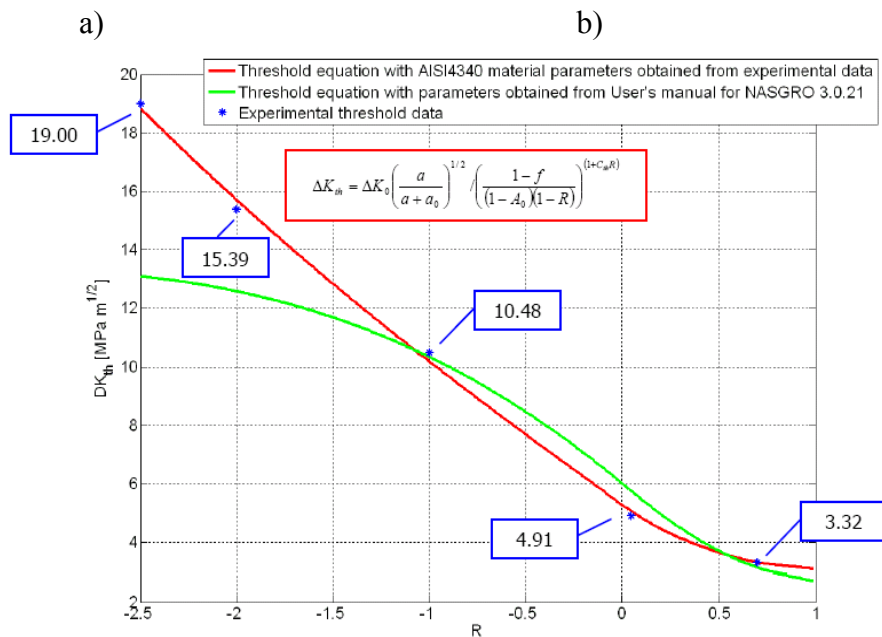


Figura 5.1.4 Andamento sperimentale della soglia per cricche lunghe funzione del rapporto di ciclo

- Creazione del nuovo spettro di prova: scelta dei blocchi significativi, ovvero che al primo ciclo tendono a far propagare la cricca. La condizione discriminante per la scelta del blocco i-esimo è dunque:

$$\Delta K_{blocco} > \Delta K_{th} \quad (5.1.4)$$

- Analisi del nuovo spettro di prova:
 - visualizzazione dei blocchi significativi;
 - conteggio dei blocchi e dei relativi cicli;
 - ordinamento decrescente in funzione del $\Delta\sigma$;
 - visualizzazione dello spettro ordinato;

Viene riassunta in figura 5.1.5 l'architettura del programma rivolto alla determinazione dello spettro equivalente oggetto di prove sperimentali:

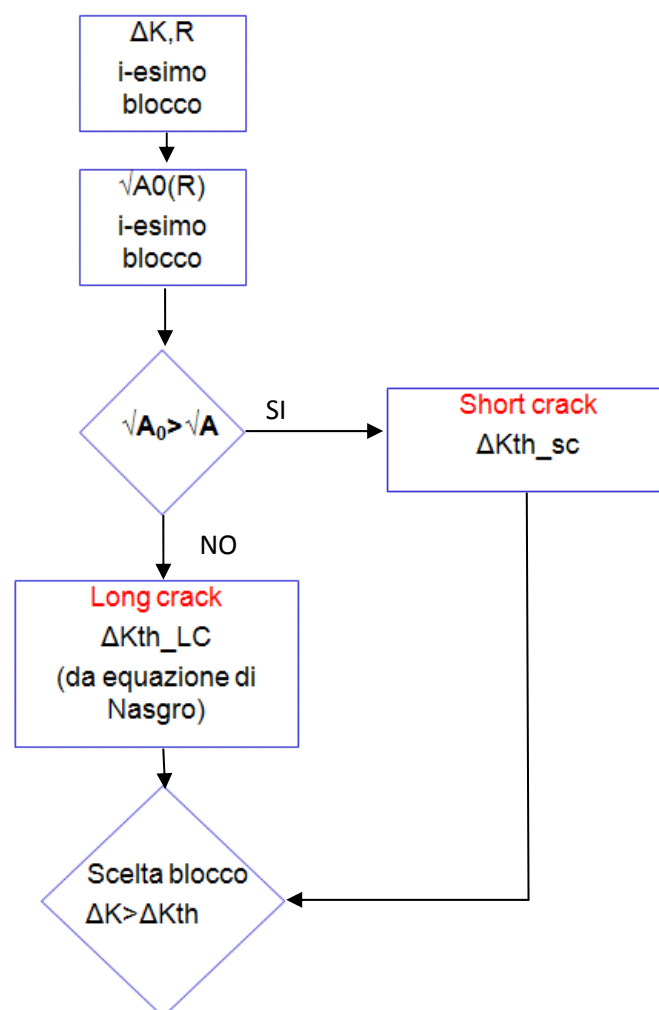
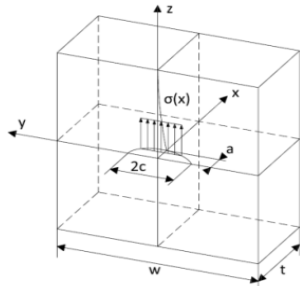


Figura 5.1.5 Architettura del software per la definizione dello spettro di carico

Tramite i passaggi sopra riportati viene effettuata la scelta ritenuta più idonea alla sperimentazione:

Tabella 5.1.2 Spettro scelto per l'esperimento



a [mm]	0,5
N° blocchi	674
N° cicli	9'102'801

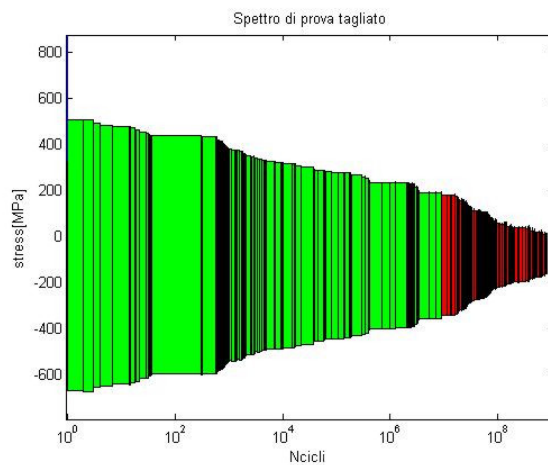


Figura 5.1.6 Spettro di carico tagliato per la fase sperimentale

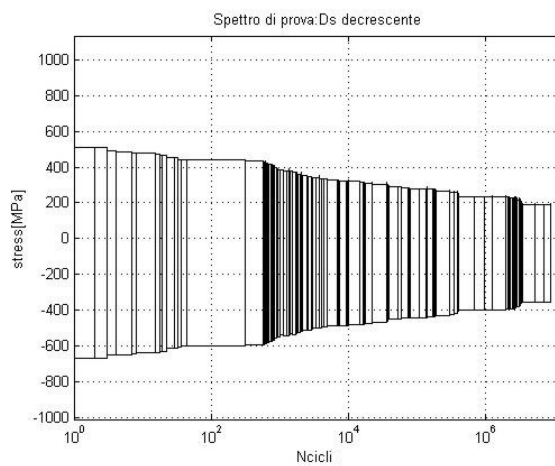


Figura 5.1.7 Spettro di carico ordinato in senso decrescente in $\Delta\sigma$

Si osserva che per il componente in questione viene ipotizzato un difetto iniziale di 0,5 mm, più esteso rispetto quello di progetto (0,38 mm), ottenendo uno spettro avente le caratteristiche ricavabili dalla tabella 5.1.2 e in figura 5.1.6-7. è noto che lo spettro scelto è senza dubbio più gravoso rispetto a quello di design poiché non considera tutti quei blocchi che inizialmente non fanno propagare il difetto.

A questo punto per avere ripetibilità nella fase sperimentale, si vuole creare uno spettro equivalente a quello scelto in scala 1/20.

Pertanto per i blocchi con numerosità > 20 il numero di cicli, diviso per 20, viene approssimato per difetto all'intero inferiore;

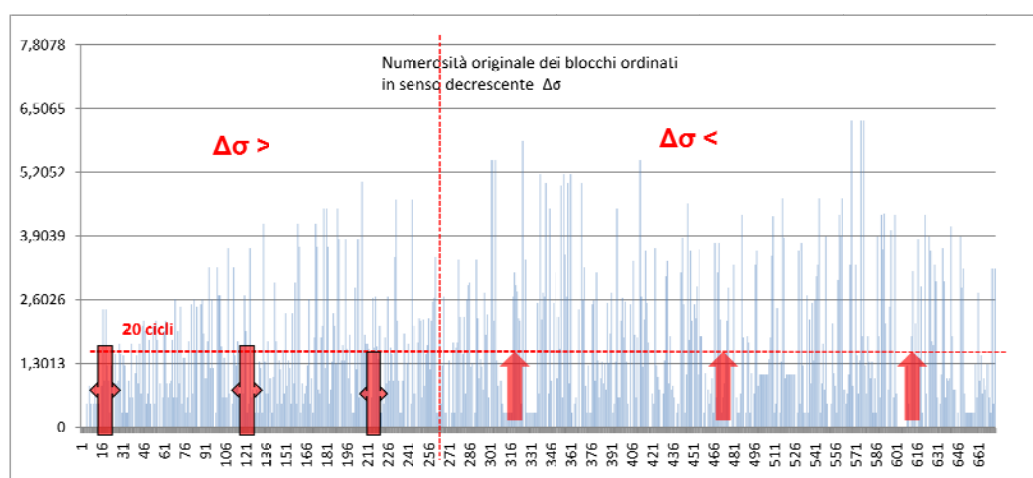


Figura 5.1.8 Spettro di carico: ripetibilità e numerosità dei blocchi dello spettro

Per i blocchi, invece, con numerosità < 20 (figura 5.1.8):

- I blocchi iniziali, che hanno $\Delta\sigma$ maggiori, vengono accorpati per raggiungere la numerosità voluta. Il valore del $\Delta\sigma$ corrispondente al blocco sarà il risultato della media tra i valori di sforzo dei relativi blocchi.
- Al contrario i blocchi che hanno $\Delta\sigma$ minori vengono portati alla numerosità 20 in modo da poter effettuare un ciclo quando lo spettro viene diviso per 1/20.

Ancora una volta il risultato ottenuto è quello di ottenere uno spettro più gravoso di quello originale dalle caratteristiche in tabella 5.1.3 e figura 5.1.9. L'ultima fase pre-test consiste in una randomizzazione dei blocchi (figura 5.1.10).

Tabella 5.1.2 Spettro di carico in prova

a [mm]	0,5
N° blocchi	549
N° cicli	9'105'944
1/20	455'147

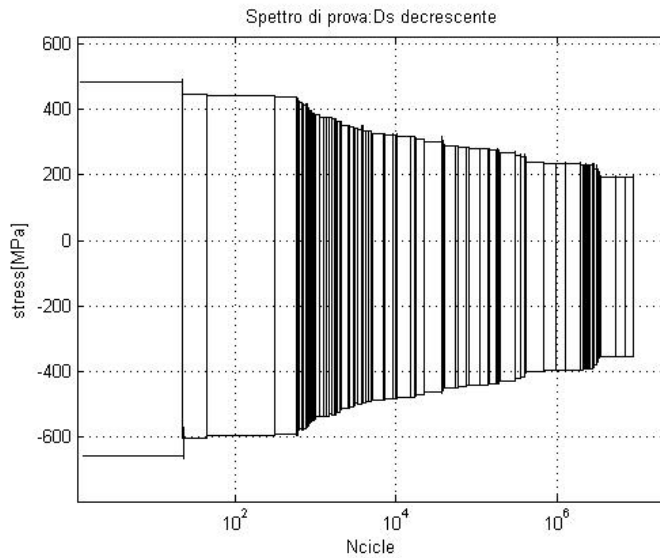


Figura 5.1.9 Spettro di carico definito e ordinato

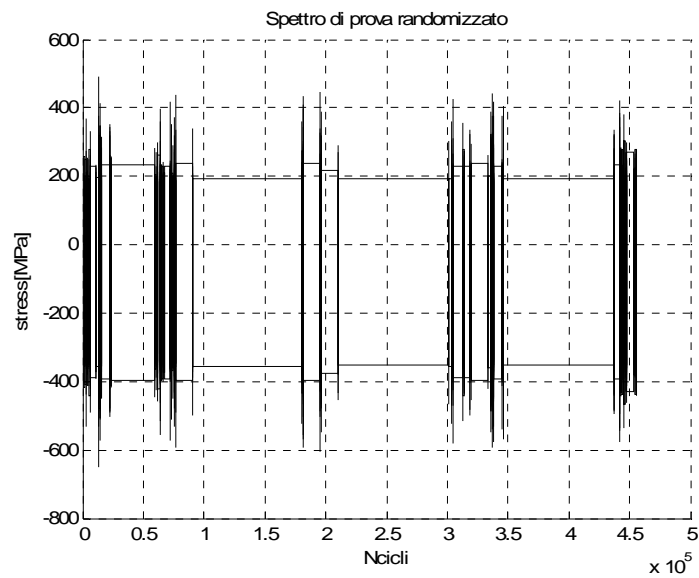


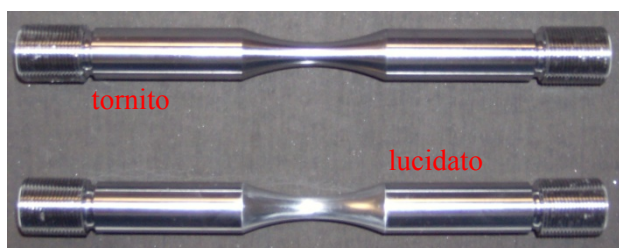
Figura 5.1.10 Spettro di carico random scalato 1/20

5.2 Materiale

Per l'esecuzione delle prove a spettro vengono forniti da AVIO s.p.a. 12 provini a clessidra di cui si riporta il disegno costruttivo in figura 5.2.2.

La preparazione del materiale da testare prevede:

- a) Lucidatura manuale con carta abrasiva di granulometria decrescente (600-800-1000);



- b) Burattatura di due ore alla velocità di 50 giri/min;
- c) Rilevamento diametro della sezione di gola tramite proiettore di profili sensibile al centesimo di millimetro (tabella 5.2.1);
- d) Elettropulitura in soluzione acida (94% acido acetico + 6% acido perclorico) durante la quale lo strato superficiale compresso ($\approx 100 \mu\text{m}$) viene asportato chimicamente (tabella 5.2.1). Parametri di processo:

$$\begin{cases} t_{\text{elettropulitura}} = 23 \text{ min} \\ 1,6 < I[\text{A}] < 1,8 \end{cases}$$

- e) Rilevamento diametro finale tramite proiettore di profili (tabella 5.2.1);
- f) Esecuzione dei microintagli A e B, in figura 5.2.1, tramite elettroerosione in corrispondenza della sezione di gola;

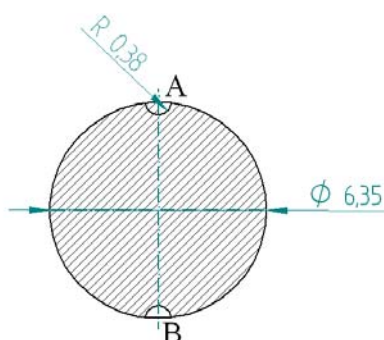


Figura 5.2.1 Esecuzione microdifetti superficiali nella sezione di gola

- g) Precricatura a fatica, su *Rumul TESTRONIC resonant testing machine*, della quale si riportano i dati in tabella 5.2.2;
- h) Asportazione dei codoli filettati (dettaglio A in figura 5.2.1)

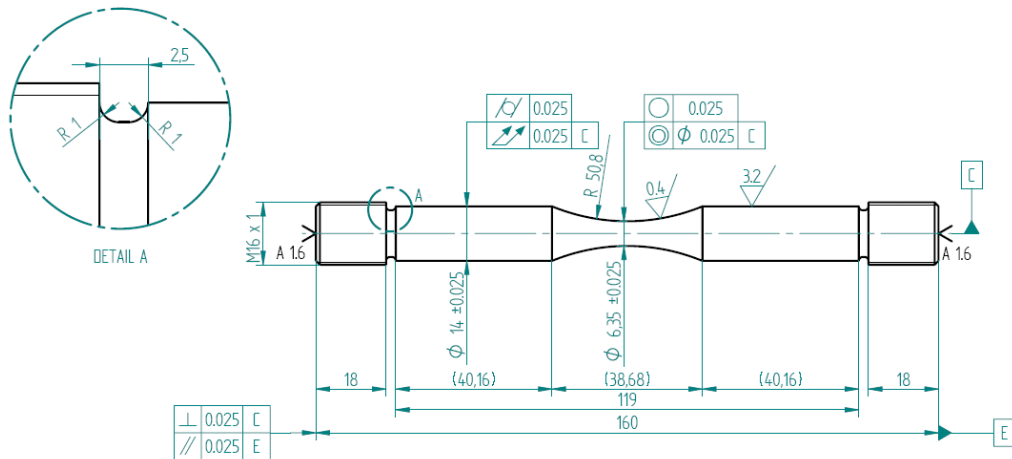


Figura 5.2.1 Disegno costruttivo del provino a clessidra da testare

Tabella 5.2.1 Dati rilevati in fase di preparazione

S/N ISM clessidra	D _{AVIO} [mm]	D _{gola,AVIO} [mm]	t _{elettropulitura} [min]	D _{elettropulitura} [mm]	Asportazione [μm]
001	13,996	6,325	23	6,135	195
003	13,990	6,340	23	6,247	103
004	14,011	6,325	23	6,2	120
005	14,005	6,330	23	6,152	188
006	14,001	6,360	23	6,07	265
007	14,011	6,330	23	6,251	84
008	13,999	6,325	23	6,057	273
009	14,012	6,330	23	6,086	249
010	14,007	6,330	23	6,198	137
011	13,996	6,325	23	6,11	215

Tabella 5.2.2 Livelli utilizzati per la precriccatura a fatica dei provini

Prova #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Identificazione provino: s/n ISM-clessidra	006	010	007	004	008	003	009	001	011	005
$\Delta\sigma_w$[MPa]										
$R=-2,5$										
570	X	O	O							
550				O	X					
530										
500						O	O	O	O	
480										
460										O
N° cicli	10^7	$1,5 \cdot 10^6$	10^7	10^7	$1,18 \cdot 10^6$	10^7	$1,5 \cdot 10^6$	10^7	10^7	10^7

5.3 Macchina di prova

Al contrario delle prove sin'ora effettuate, si vuole applicare al provino uno spettro di carico, definito al paragrafo 5.1, caratterizzato da blocchi di numerosità molto differente tra loro, con rapporti di ciclo e livelli di sforzo variabili, al fine di simulare le reali condizioni d'esercizio del componente.

Ovviamente le macchine a risonanza non permettono questo tipo di controllo, ecco il motivo per cui si ricorre ad una macchina servoidraulica in dotazione al Politecnico di Milano: *MTS® Model 793.10 MultiPurpose TestWare*. È dotata di afferraggi idraulici, una cella di carico da 100 kN posizionata sulla traversa superiore e dell'azionamento servoidraulico (figura 5.3.1) ma soprattutto consente di usare in prova frequenze fino a 35 Hz, decisamente più basse rispetto alle macchine a risonanza, per le quali, con i giusti accorgimenti, è possibile seguire il riferimento desiderato.

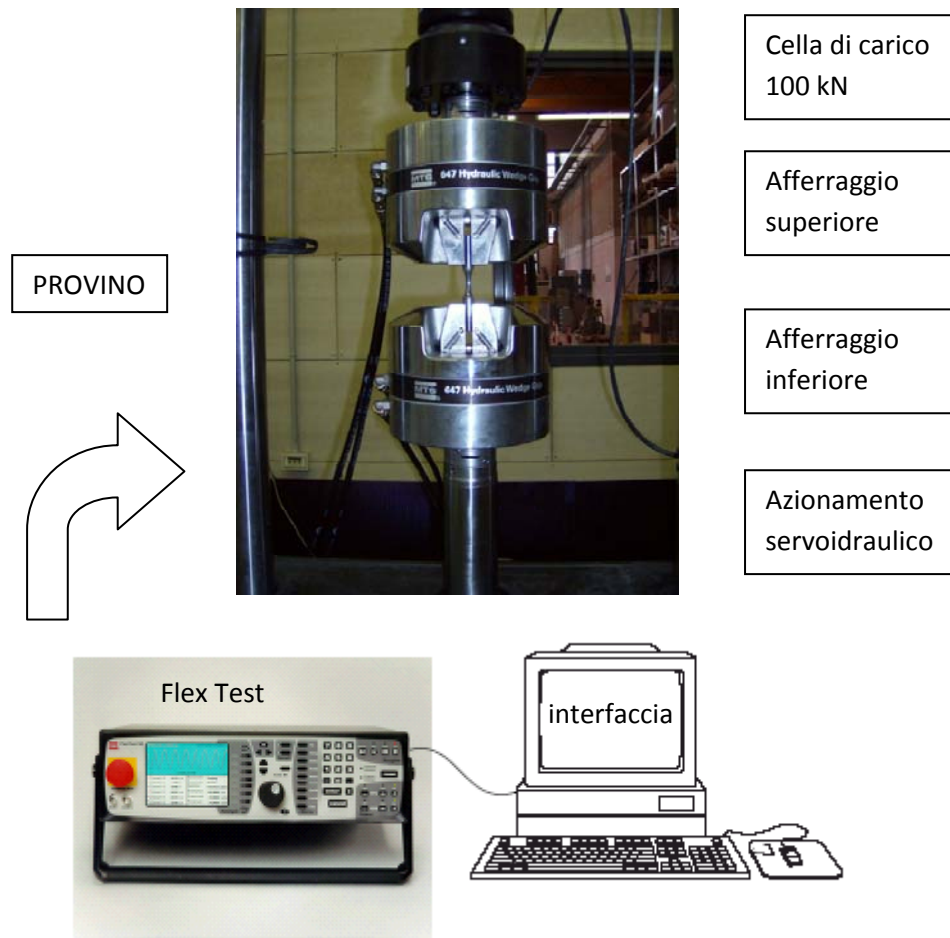


Figura 5.3.1 Sistema di prova

Il software che gestisce il controllo della macchina permette quindi di simulare lo spettro scelto per la prova tramite codice stilato per il caso in esame. Di fatto è necessaria l'intestazione, figura 5.3.2, nella quale si riporta il canale d'acquisizione e la forma d'onda utilizzata, nel nostro caso *TaperedSine* affiancata dal tipo di controllo denominato PVC, che aggiusta i guadagni in modo autonomo in base ai livelli di sforzo e alla frequenza del blocco i-esimo. Inoltre vanno intestate le colonne nelle quali si indicano in ordine: la frequenza del blocco [Hz], il numero corrispettivo dei mezzi cicli [segmenti] e i livelli di forza da applicare, minimi e massimi [kN].

Frequency Hz	Count segments	Level1 kN	Level2
3.5000000e+001	1.8079200e+005	-1.8928859e+001	-2.7207637e+000
2.0000000e+000	2.0000000e+000	-2.2276871e+001	6.1438648e-001
2.8000000e+001	4.6880000e+003	-1.8974419e+001	-2.6761761e+000
2.0000000e+000	9.4000000e+001	-1.8709866e+001	-2.9377565e+000
1.5000000e+001	4.5800000e+002	-2.2410634e+001	7.6895672e-001
2.0000000e+000	2.0000000e+000	-1.8501791e+001	-2.7980488e+000
2.0000000e+000	8.0000000e+000	-2.3986062e+001	2.3473567e+000
2.0000000e+000	2.0000000e+000	-1.9931565e+001	-1.7011946e+000
2.0000000e+000	2.0000000e+000	-2.1905308e+001	2.7849346e-001
2.0000000e+000	2.0000000e+000	-1.8695003e+001	-2.7088737e+000
2.0000000e+000	2.0000000e+000	-2.1468350e+001	-1.9413477e-001
2.0000000e+000	2.0000000e+000	-1.8870381e+001	-2.5513309e+000
2.0000000e+000	2.0000000e+000	-2.1108677e+001	-5.5083532e-001
2.0000000e+000	2.0000000e+000	-1.8385863e+001	-2.9169490e+000

Figura 5.3.2 Esempio file d'acquisizione Flex Test

Per permettere le ispezioni programmate, si utilizza il comando *button* che interrompe la prova con la cadenza prefissata. I valori delle frequenze per blocco sono ottimizzati al fine di eseguire prove relativamente brevi: per i blocchi molto numerosi le frequenze raggiungono la massima ammissibile mentre per effettuare pochi cicli ad alti livelli di sforzo si scelgono frequenze più basse, dell'ordine di pochi Hz.

5.4 Modalità di prova

Come accennato si vuole avere conferma sperimentale della validità del simulatore di propagazione sviluppato in ambiente MATLAB. Viene quindi applicato al provino lo spettro definito al paragrafo 5.1 e con cadenza periodica si eseguono ispezioni in corrispondenza del bordo dei microintagli tramite la tecnica delle repliche in fogli di acetato (figura 5.4.1): si ritaglia una striscia dal foglio di acetato (a), questa viene poi immersa totalmente per circa un minuto in acetone (b) al fine di renderla plasmabile e posizionata in corrispondenza del microintaglio propagante del provino leggermente in trazione (c). L'operazione risulta molto delicata, è necessario un continuo tamponamento della replica per far fuoriuscire l'aria, evitando così la formazione di bolle. Nel momento in cui la replica assume una consistenza idonea viene prelevata e incollata su un vetrino (d) per poi essere esaminata al microscopio ottico (e-f). Il fine è quello di rilevare lo scostamento dalle previsioni del simulatore per prove effettuate sui provini a clessidra. Inoltre si vuole verificare l'effetto degli sforzi residui agenti sul componente: è un'operazione complicata poiché i provini sono esenti da sforzi residui superficiali. Il concetto fondamentale di similitudine alla base della meccanica della frattura presuppone che cricche con differente geometria ed in provini diversi siano soggette ad identiche condizioni nella regione

dell'apice della cricca se il parametro K è il medesimo. Poiché ΔK caratterizza univocamente la crescita delle cricche nell'ambito della LEFM, la velocità di propagazione delle cricche nei differenti provini sarà quindi la medesima. L'idea è quella di applicare una forza di precarico di compressione che simuli la condizione che effettivamente è presente nel componente all'apice della cricca in profondità in termini di fattori di intensificazione degli sforzi. Di fatto non è possibile applicare al provino il gradiente di sforzi indotto dalla pallinatura o rullatura, ecco il motivo per cui si prende come riferimento un solo punto della sezione, ovvero quello più critico.

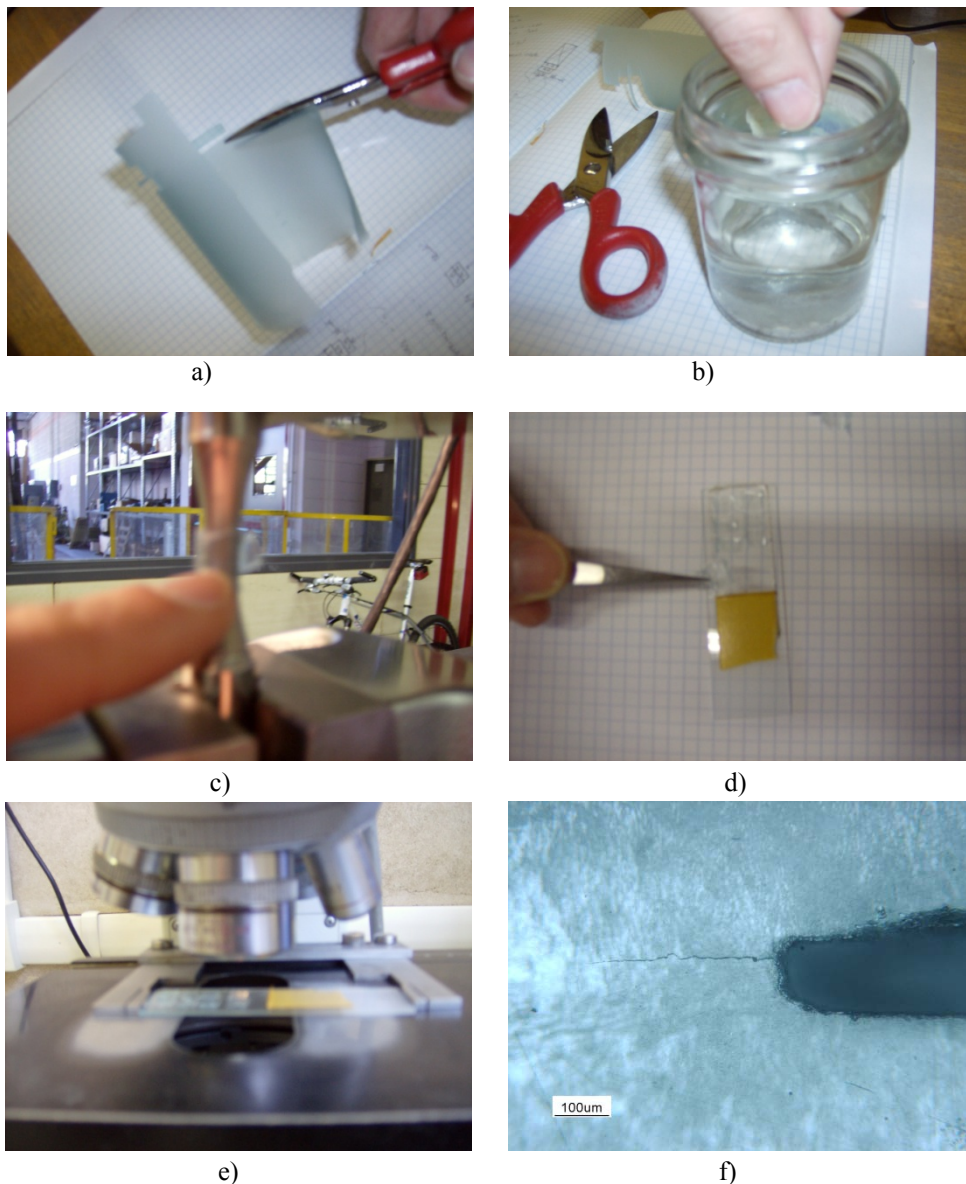


Figura 5.4.1 Tecnica delle repliche con fogli di acetato

Per la definizione della lunghezza di cricca superficiale si prende visione al microscopio ottico delle repliche ricavate durante la sperimentazione. La misura del difetto viene calcolata facendo una media tra la lunghezza dei due rami che si estendono dal bordo intaglio, come dimostrato in figura 5.4.2 e dall'equazione 5.4.1, in cui c_0 è la larghezza iniziale del difetto.

$$c = \frac{c_1 + c_2}{2} + \frac{c_0}{2} \quad (5.4.1)$$

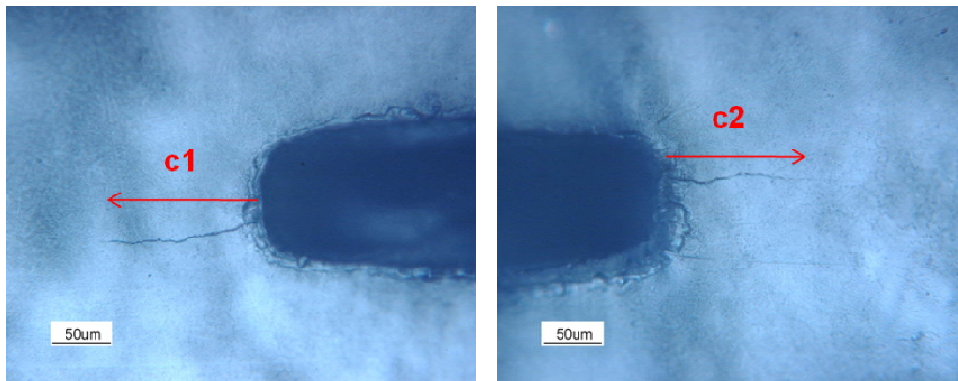


Figura 5.4.2 Rilevamento misura del difetto in superficie

5.5 Simulatore di propagazione

Sulla base del comportamento a fatica mostrato dal materiale ci si è rivolti allo sviluppo di un simulatore per la propagazione di difetti per la lega AISI 4340, implementato nell'ambito MATLAB. In particolare si vuole prevedere la propagazione della cricca in superficie, poiché è questa ad essere rilevata durante la fase di sperimentazione. A tal proposito il simulatore viene definito, in prima battuta, per simulare la propagazione della cricca in un provino dalle caratteristiche delineate nel paragrafo 5.2; si sottolinea l'assenza di sforzi residui superficiali ottenuta tramite processo di elettropulitura. Avvenuta la verifica sperimentale, il simulatore verrà implementato per il componente, assunto come una lastra piana caricata attraverso un gradiente di sforzi definito nel paragrafo 5.1 e che riporta trattamento meccanico superficiale di pallinatura o rullatura.

È chiaro a questo punto che il provino rappresenta la situazione più critica rispetto al componente che è sollecitato tramite gradiente di sforzo.

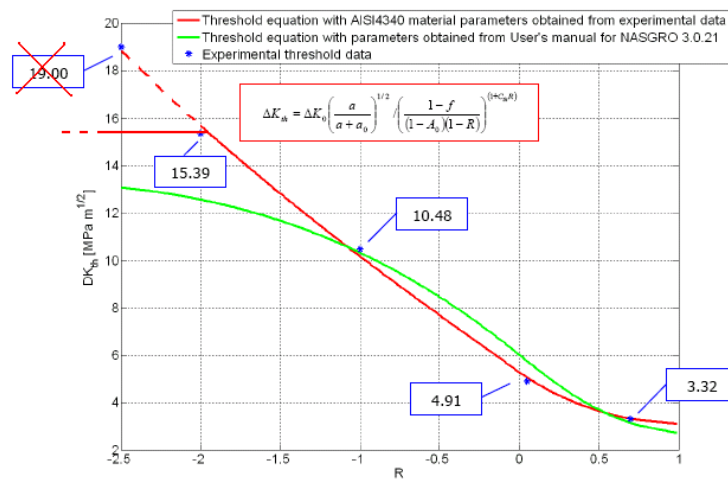
Il simulatore riporta le seguenti caratteristiche:

1. Acquisizione dello spettro di prova randomizzato definito nel paragrafo 5.1;
2. Definizione dei parametri caratteristici del provino quali diametro e dimensione della microcricca;
3. Definizione dei parametri caratteristici a fatica del materiale (capitoli 2-3);
4. Determinazione del passo di discretizzazione dn dei cicli contenuti nel blocco in esame per l'implementazione dell'equazione di NASGRO: vengono definiti il numero d'iterazioni da eseguire per blocco e l'eventuale scarto implementato all'ultimo passo.

$$\begin{cases} n^{\circ}iterazioni = floor\left(\frac{n^{\circ}cicli}{dn}\right) \\ scarto = n^{\circ}cicli - (n^{\circ}iterazioni \cdot dn) \end{cases} \quad (5.51)$$

5. Controllo della dimensione del difetto in superficie c : se è maggiore della lunghezza critica ($c = 3\text{mm}$) il simulatore blocca l'implementazione fornendo il numero di cicli a cui il provino ipoteticamente abbia ceduto;
6. Valutazione del ΔK funzione dei carichi del blocco tramite weight function sia in superficie che in profondità (punti S e D);
7. Definizione del limite di fatica liscio $\Delta\sigma_{W0}$ (capitolo 2);
8. Valutazione della soglia di propagazione per cricche lunghe $\Delta K_{th,LC}$ tramite equazione di NASGRO;
9. Calcolo del parametro di El-Haddad $\sqrt{area_0}$ (capitolo 3);

10. Valutazione soglia di propagazione in funzione del campo in cui si ricade (cricche lunghe oppure cricche corte): a tal proposito si puntualizza che la stima della soglia per $R < -2$ viene tagliata imponendo un plateau ad un livello costante come mostrato in figura 5.5, in linea col modello di NASGRO. In effetti non si hanno dati disponibili oltre tale rapporto di ciclo, osservando che la prova di propagazione a $R = -2,5$ non ha dato risultati ben interpretabili, figura 5.5.2.



NASGRO 3.0.21 equation threshold fitting versus NASGRO curves obtained with material parameters (AISI – SAE steel 4340 – 1240-1380 UTS; Plt & Forg; code C4DD21AB1) from user's manual [4].

Figura 5.5.1 Taglio della soglia a $R = -2$

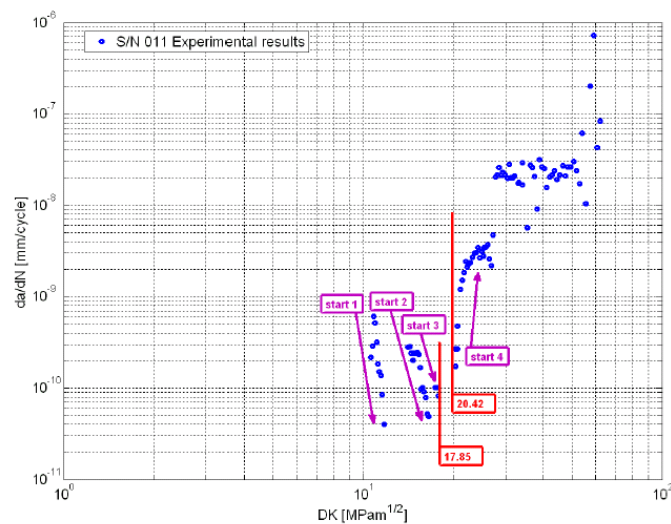


Figura 5.5.2 Prova di propagazione per $R = -2,5$: soglia non esttamente definita

11. Valutazione della velocità di propagazione tramite l'equazione di NASGRO nel caso in cui il carico agente sia maggiore della soglia, ovvero:

se $\Delta K > \Delta K_{th}$ calcolo della velocità $\frac{da}{dN}$ di propagazione per ciclo in mm/ciclo. Si osserva che viene effettuato lo stesso calcolo per il punto in superficie S.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \cdot \Delta K \right]^n \cdot \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q} \quad (5.5.2)$$

Dove f è una funzione che tiene conto dell'effetto di clousure, R è il rapporto di ciclo, e gli altri coefficienti sono i parametri del materiale.

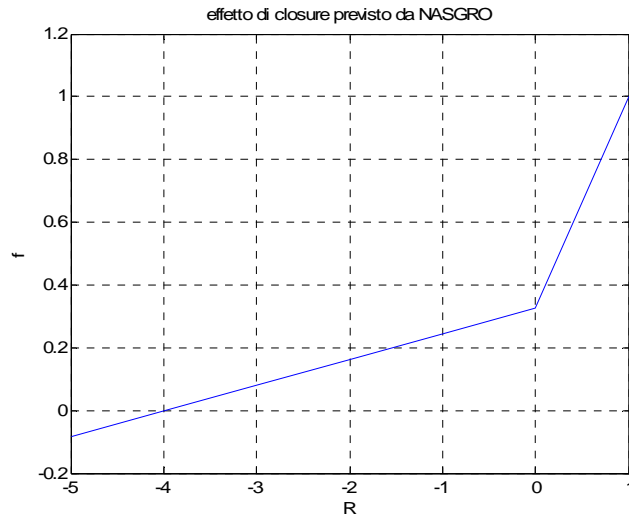


Figura 5.5.3 Effetto di closure previsto da NASGRO

12. Calcolo dell'avanzamento di cricca per l'iterazione dn sia in profondità a che in superficie c :

$$\begin{cases} a = \frac{da}{dN} \cdot dn \\ c = \frac{dc}{dN} \cdot dn \end{cases} \quad (5.5.3)$$

13. Aggiornamento della lunghezza di cricca sia in profondità a che in superficie c e conteggio del numero di cicli implementati;
 14. Raggiunti i dieci milioni di cicli o il cedimento, rappresentazione delle curve di propagazione ($a-N$; $c-N$; $a/c-a$).

5.6 Risultati e confronti prove a spettro

5.6.1 Provini esenti da sforzi residui

Lo spettro di prova è quello definito al paragrafo 5.1, esso contiene blocchi con rapporti di ciclo compresi tra $-1,9 < R < -1$ e viene testato su 2 provini. In entrambi i casi solamente un microintaglio dei due presenti propaga. Di seguito si riportano i risultati e i confronti con il simulatore rispetto le prove in laboratorio.

- s/n ISM clessidra 007

Tabella 5.6.11 Lunghezze di cricca superficiale in prova.
Intaglio A $c_0=0,760$ mm

N	C_1 [mm]	C_2 [mm]	C[mm]
50000	0,1290	0,1200	0,5045
100000	0,2770	0,2830	0,6600
150000	0,4370	0,4610	0,8290
200000	0,8090	0,6970	1,1330
260000	2,5400	2,1910	2,7455
276608			3

Si osserva che il simulatore è molto sensibile alla dimensione iniziale del difetto. Questa è funzione della zona creatasi in fase di precraccatura all'apice dell'intaglio: per tener conto di questo fatto è necessaria la *verifica sperimentale della simulazione a posteriori*, quando, una volta rotto il provino, viene esaminato al SEM con lo scopo di stimare l'estensione iniziale del difetto. Di fatto si riporta la lunghezza c_1 della microcricca sulla sezione trasversale dell'intaglio. A questo punto la profondità dell'intaglio viene stimata attraverso 2 ipotesi limiti, in figura 5.6.11:

- Rosso → precricatura con cordone dallo spessore uniforme, ovvero c_1 costante sul fronte di propagazione;
- Blu → precricatura con cordone dallo spessore non uniforme, $c_1=0$ in direzione di a giustificata dal fatto che $\Delta K_D < \Delta K_S$

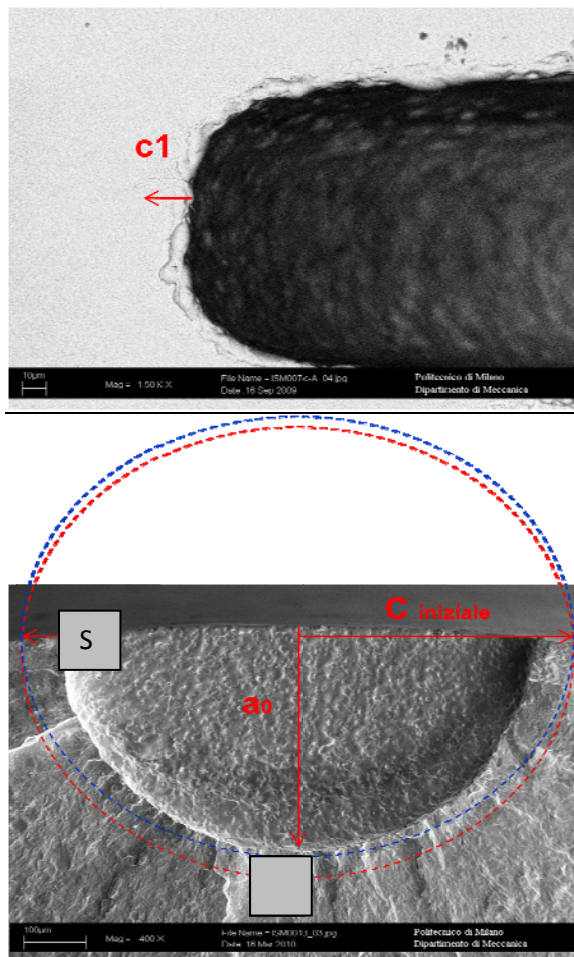


Figura 5.6.11 Determinazione dimensione iniziale del difetto

Per cui:

$$c_{iniziale} = c_1 + \frac{c_0}{2} = 0,021 + 0,38 = 0,4 \text{ mm}$$

$$\begin{cases} a_{iniziale,rosso} = c_1 + a_0 = 0,02 + 0,415 = 0,435 \text{ mm} \\ a_{iniziale,blu} = c_1 + a_0 = 0 + 0,415 = 0,415 \text{ mm} \end{cases}$$

Con: $d = 6,251 \text{ mm}$

Risultati ottenuti tramite simulatore a confronto con le prove sperimentali:

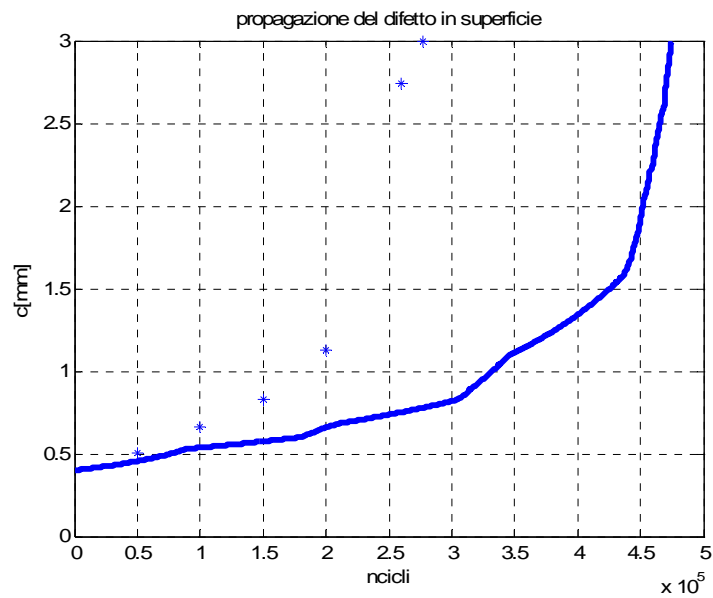


Figura 5.6.12 Simulazione di propagazione $c=0,4$ mm; $a=0,435$ mm. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=17,85$ MPa \sqrt{m}

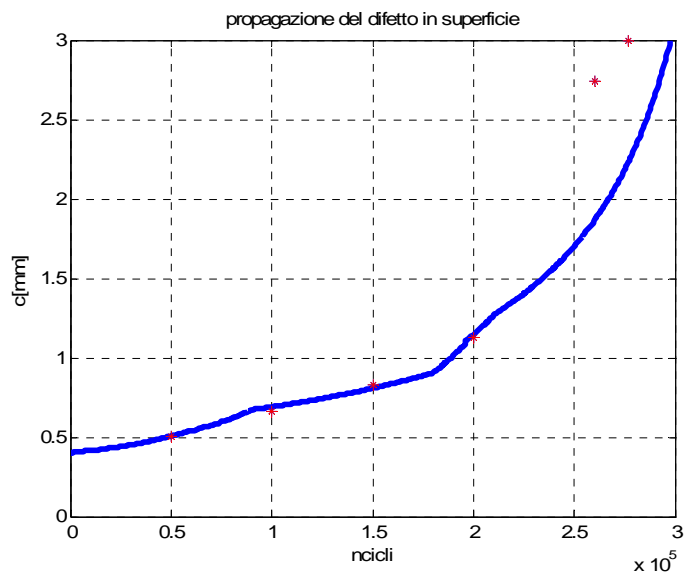


Figura 5.6.13 Simulazione di propagazione $c=0,4$ mm $a=0,435$ mm. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=19$ MPa \sqrt{m}

Come introdotto, il simulatore sviluppato risulta molto sensibile ai parametri caratteristici del materiale e alla dimensione iniziale del difetto.

Vengono riportati i risultati ottenuti per il difetto dalle dimensioni maggiori ($c=0,4\text{mm}$ $a=0,435\text{mm}$), ricavate a posteriori; per differenti parametri del materiale.

Infatti, siccome non si dispone di risultati certi per la prova di propagazione a $R=-2,5$, tramite queste prove si vuole effettuare una taratura del modello predittivo sulla base della stima dei parametri del materiale stimati fittando i punti sperimentali delle soglie funzione di R , differenziando la prova ad $R=-2,5$ per la quale vengono assunte due differenti soglie ($17,85$ e $19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). Inoltre lo spettro di carico risulta assai gravoso ed è difficoltoso stimare l'effetto dei sovraccarichi dei blocchi con variazioni di sforzo maggiori ed inseguire l'avanzamento della cricca in un così breve periodo.

La figura 5.6.13 riporta la curva di propagazione più vicina ai punti sperimentali ottenuti in laboratorio ed è ricavata per la soglia a 19 MPa .

- s/n ISM clessidra 009

Nella prova seguente si registra il cedimento del provino per un numero di cicli pari a 188272, risultato che il simulatore non prevede in nessun caso.

Tabella 5.6.12 Lunghezze di cricca superficiale in prova.
Intaglio A $c_0=0,762$ mm

N	C_1 [mm]	C_2 [mm]	C [mm]
50000	0,0900	0,2010	0,5265
100000	0,6040	0,6300	0,9980
150000	1,2490	1,2210	1,6160
188272			3

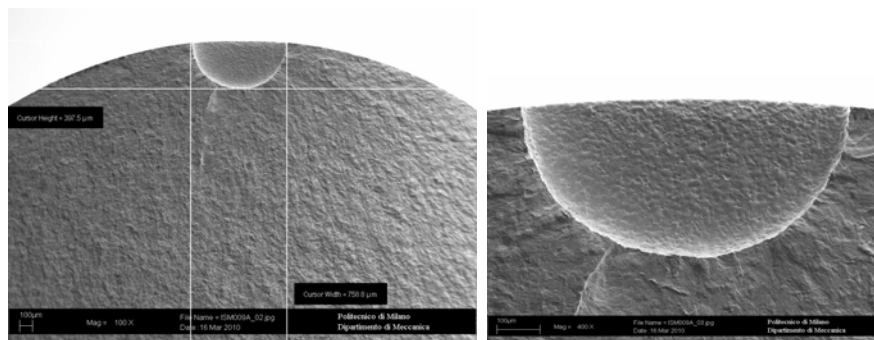


Figura 5.6.14 Determinazione dimensioni del difetto a posteriori

In questo caso non è rilevabile una zona di precricatura che faccia aumentare le dimensioni iniziali del difetto per cui per la simulazione viene utilizzata la dimensione del microdifetto generato per elettroerosione immaginando di avere 0,2 mm di cordone di precricatura costante su tutto il fronte.

Il simulatore risulta inadeguato poiché prevede una vita maggiore rispetto a quella ricavata sperimentalmente.

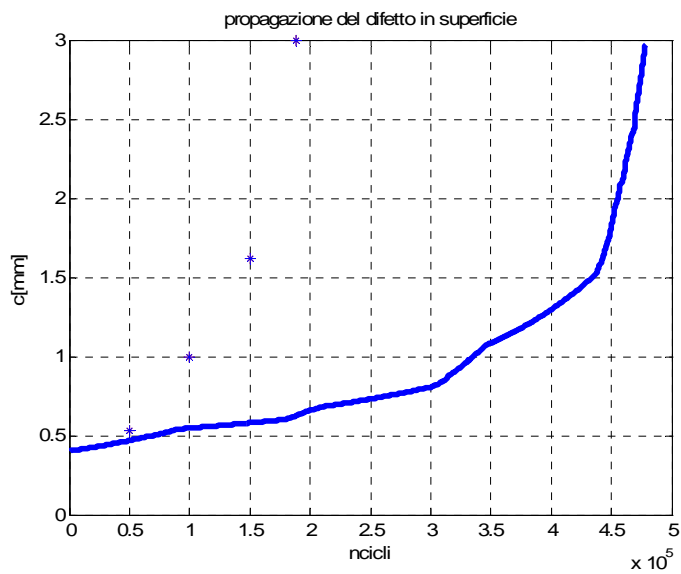


Figura 5.6.15 Simulazione di propagazione $c=0,4$ mm $a=0,4$ mm. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=17,85$ MPa \sqrt{m}

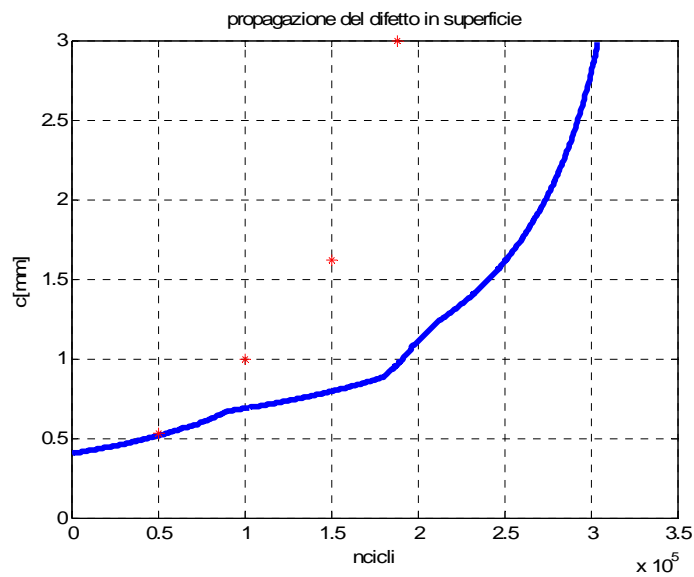


Figura 5.6.16 Simulazione di propagazione $c=0,4$ mm $a=0,4$ mm. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=19$ MPa \sqrt{m}

5.6.2 Provini per la simulazione della pallinatura

Con quest'operazione si vuole ricostruire la stessa condizione di sollecitazione, in termini di K , nel punto D, cioè in profondità. Questo punto infatti risulta essere il più critico poiché la pallinatura ha un effetto benefico soprattutto in superficie visto che il gradiente di sforzi residui di compressione si esaurisce nei primi 200 μm .

Il test viene quindi eseguito con il medesimo spettro randomizzato a cui, livello per livello, si somma algebricamente la forza di precarico di compressione (figura 5.6.21). Per la determinazione di questa si ricorre ancora una volta all'integrazione della weight function su due fronti: dal profilo di sforzi residui agente sul provino pallinato (capitolo 4) viene ricavato il fattore di sovrasollecitazione nel punto D da eguagliare con il corrispettivo determinato da una forza costante sulla sezione del provino a clessidra. L'effetto è quello di sollecitare il provino con blocchi aventi rapporti di ciclo più negativi compresi tra $-4 < R < -1,8$ a parità di variazione di sforzo $\Delta\sigma$.

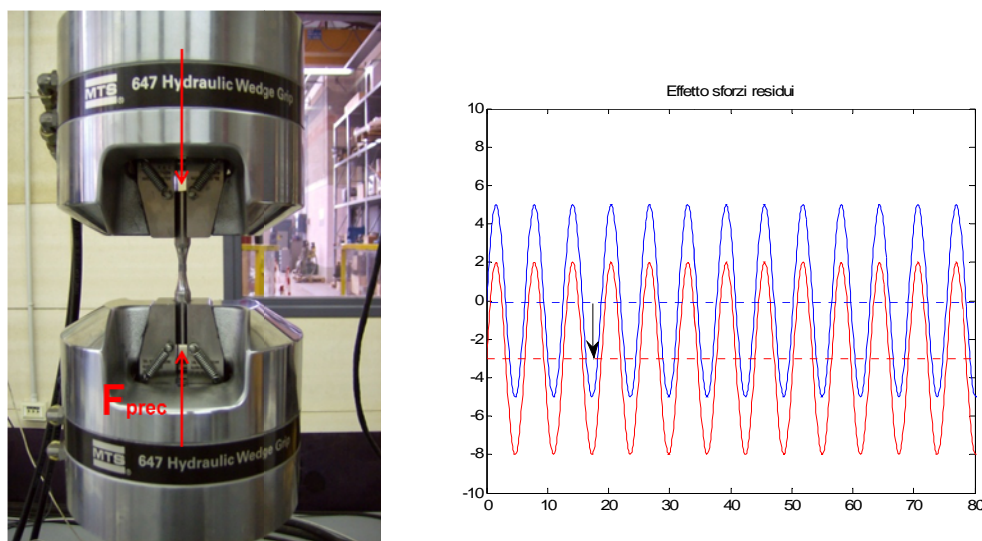


Figura 5.6.21 Forza di precarico per la simulazione della pallinatura e relativo effetto

Lo scopo finale è quello di poter valutare sperimentalmente l'effetto del trattamento effettuato sul componente sulla velocità di propagazione del difetto.

- s/n ISM clessidra 003

La forza di prearico viene calcolata assumendo il diametro della sezione di gola reale del provino e le dimensioni nominali del difetto:

$$\begin{cases} d = 6,247\text{mm} \\ a = c = 0,38\text{mm} \end{cases} \rightarrow F_{prec} = -2,3\text{ kN} \text{ che implica } K_{D,res} = -1,71\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Tabella 5.6.21 Lunghezze di cricca superficiale in prova : Intaglio A $c_0=0,766\text{ mm}$

N	C ₁ [mm]	C ₂ [mm]	C[mm]
100000	0,1360	0,1460	0,5240
210000	0,1820	0,1810	0,5645
325000	0,1960	0,1920	0,5770
455000	0,2440	0,2600	0,6350
555000	0,3590	0,4070	0,7660
665000	0,6690	0,6570	1,0460
900973			3

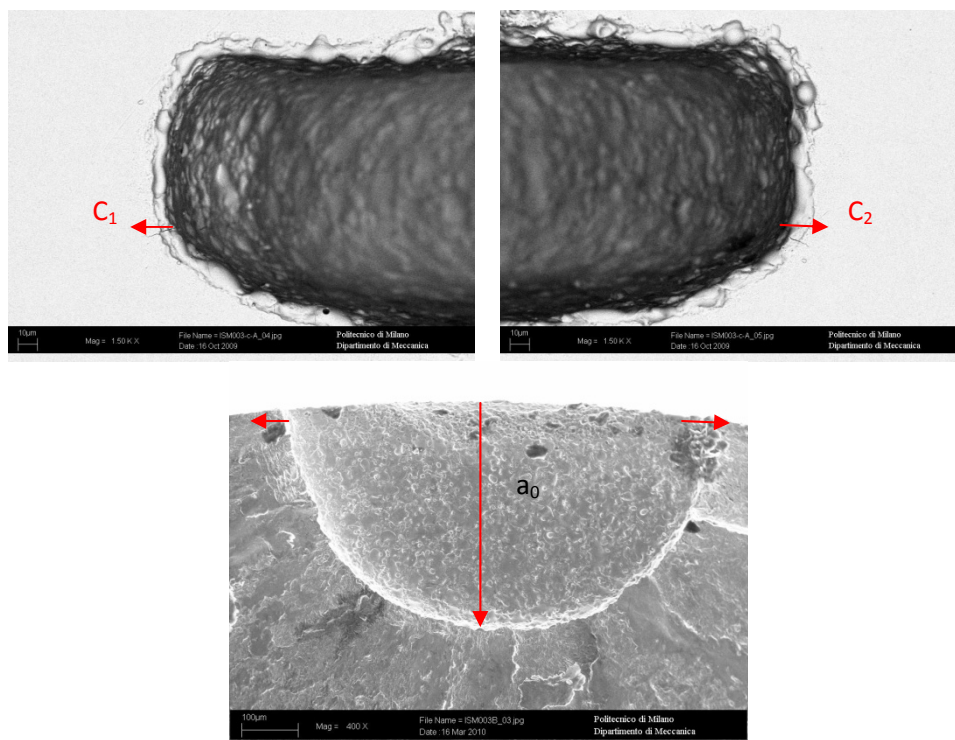


Figura 5.6.22 Determinazione dimensioni del difetto a posteriori

$$c_{iniziale} = \frac{c_1 + c_2}{2} + \frac{c_0}{2} = 0,025 + 0,385 = 0,41 \text{ mm}$$

$$a_{iniziale} = a_0 = 0,411 \text{ mm}$$

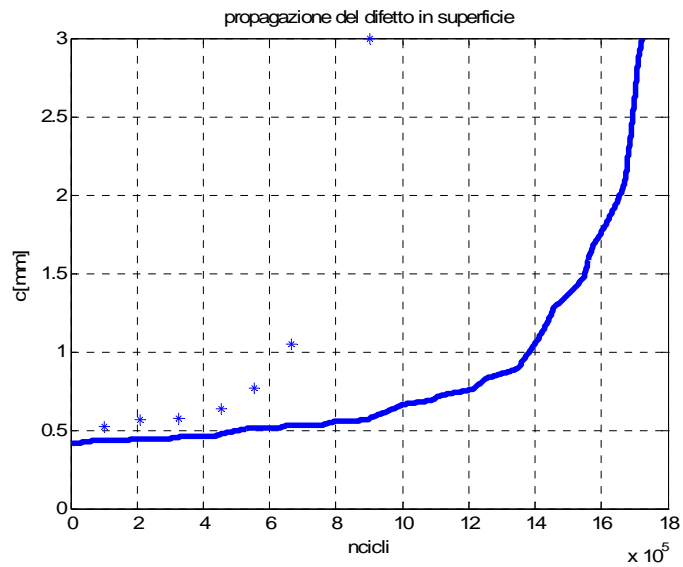


Figura 5.6.23 Simulazione di propagazione $c=0,41 \text{ mm}$ $a=0,411 \text{ mm}$. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=17,85 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

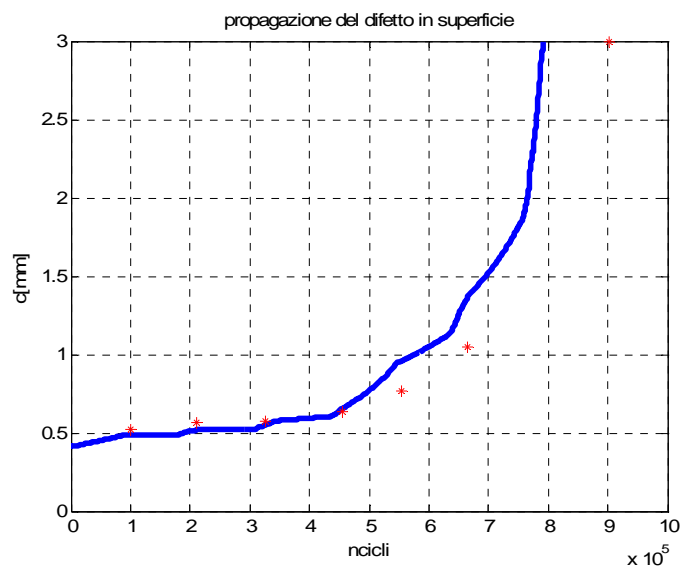


Figura 5.6.24 Simulazione di propagazione $c=0,41 \text{ mm}$ $a=0,411 \text{ mm}$. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Anche questa volta i parametri stimati fittando i punti che riportano la soglia di propagazione per cricche lunghe pari a $\Delta K_{th}=19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ per $R=2,5$, danno le previsioni migliori.

- s/n ISM clessidra 010

$$\begin{cases} d = 6,198 \text{ mm} \\ a = c = 0,38 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow F_{prec} = -2,45 \text{ kN} \text{ che implica } K_{D,res} = -1,71 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Tabella 5.6.21 Lunghezze di cricca superficiale in prova.
Intaglio B $c_0=0,762 \text{ mm}$

N	C ₁ [mm]	C ₂ [mm]	C[mm]
271000	0,0280	0,0330	0,4115
810000	0,0530	0,1030	0,4590
1310000	0,0650	0,1220	0,4745
2030000	0,1080	0,1360	0,5030
2400000	0,1190	0,1500	0,5155
2730000	0,1270	0,1530	0,5210
3286000	0,1670	0,1780	0,5535
3587000	0,1700	0,3530	0,6425
3676000			3

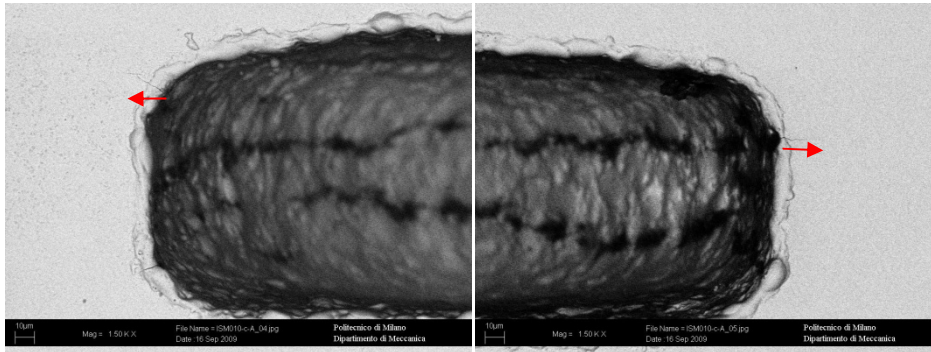


Figura 5.6.25 Determinazione dimensioni del difetto

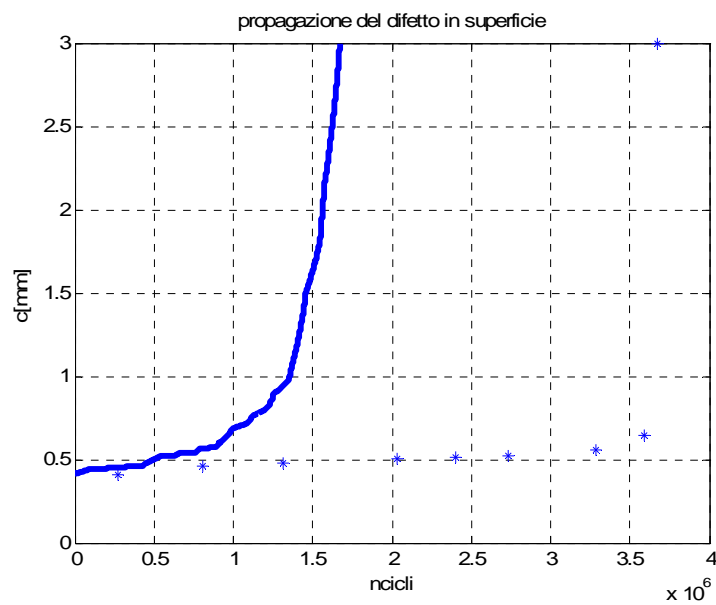


Figura 5.6.26 Simulazione di propagazione $c=0,41$ mm $a=0,41$ mm. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=17,85$ MPa \sqrt{m}

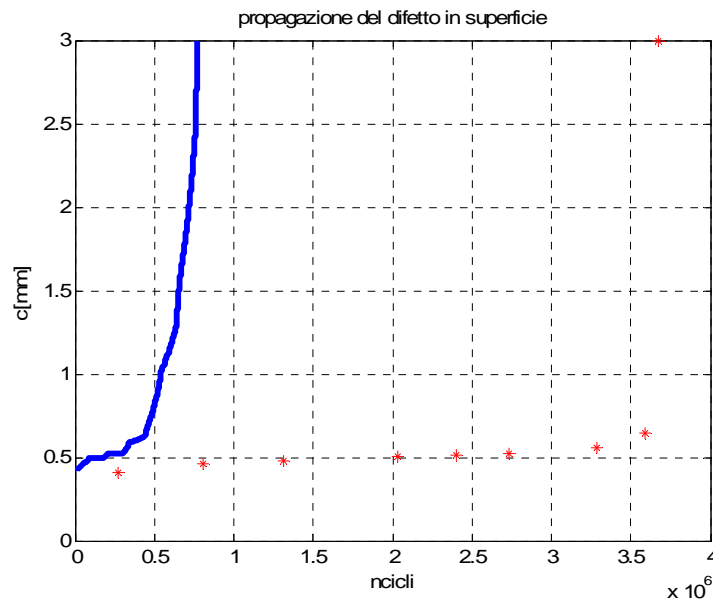


Figura 5.6.27 Simulazione di propagazione $c=0,41$ mm $a=0,41$ mm. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=19$ MPa \sqrt{m}

Le previsioni, che ovviamente non si discostano molto dal caso precedente e quindi sono conservative rispetto la propagazione ottenuta nella prova sperimentale, per la quale la lunghezza critica è stata raggiunta per circa 3,5 milioni di cicli.

Si può quindi affermare che la pallinatura aumenta le caratteristiche di resistenza alla propagazione ma non in modo tale da poterla arrestare.

5.6.3 Provini per la simulazione della rullatura

Il procedimento per la determinazione delle forze di precarico è il medesimo. Questa volta però gli sforzi residui superficiali agiscono più in profondità, per questo motivo si avranno forze in modulo nettamente maggiori per i quali la quasi totalità dei blocchi sollecita il provino con cicli tutti in compressione.

- s/n ISM clessidra 005

$$\begin{cases} d = 6,152 \text{ mm} \\ a = c = 0,38 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow F_{prec} = -8,35 \text{ kN} \text{ che implica } K_{D,res} = -6,4 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

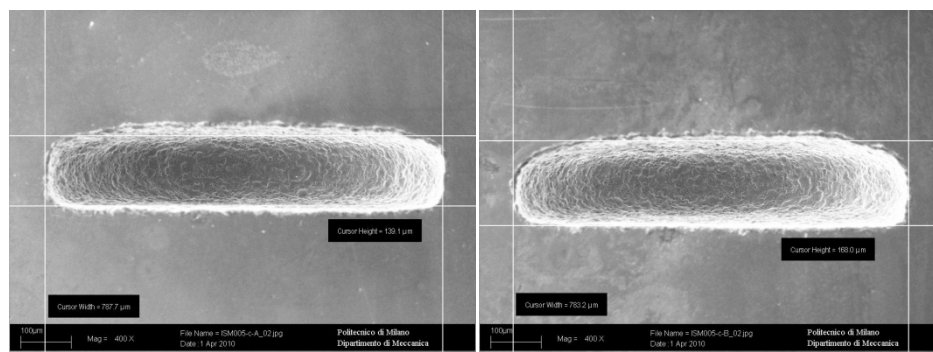


Figura 5.6.31 Determinazione dimensioni del difetto

È da osservare che in questa tipologia di prove il provino non ha ceduto e il difetto, al contrario delle prove precedenti, è propagato in corrispondenza di entrambi gli intagli. Inoltre si è osservato un accrescimento del difetto iniziale, dovuto probabilmente al riassorbimento della zona plastica formata durante la fase di precricatura, di cui il simulatore non tiene conto, e un progressivo rallentamento all'avanzamento. La previsioni, come mostrato in figura 5.6.32, sono in linea con le prove sperimentali dato il fatto che la cricca non è propagante, anche nel caso in cui si usino i parametri che prevedono una propagazione più accelerata come visto nei sottoparagrafi precedenti.

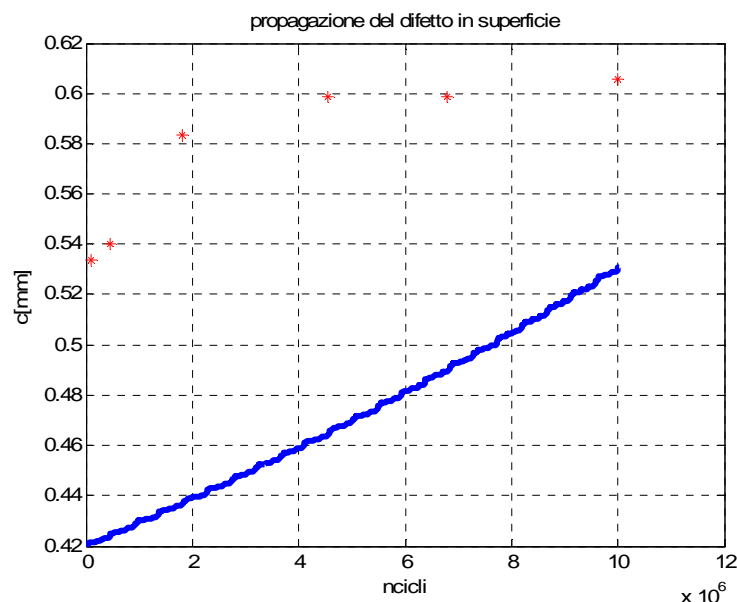


Figura 5.6.32 Simulazione di propagazione $c=0,42$ mm $a=0,42$ mm. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=19$ MPa \sqrt{m}

- s/n ISM clessidra 011

$$\begin{cases} d = 6,11\text{mm} \\ a = c = 0,38\text{mm} \end{cases} \rightarrow F_{prec} = -8,45\text{ kN} \text{ che implica } K_{D,res} = -6,4\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

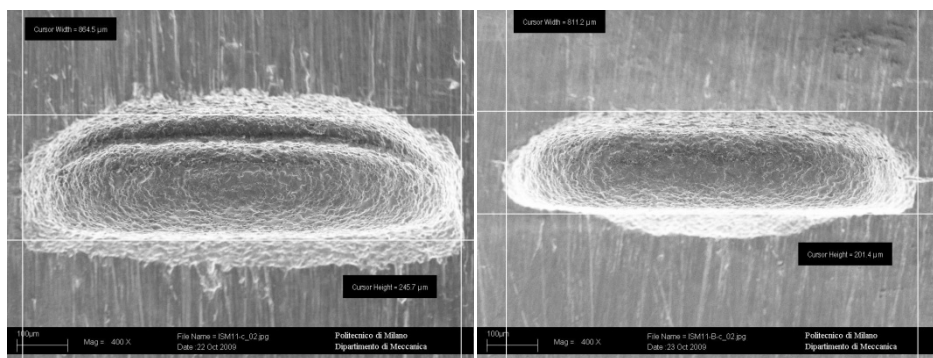


Figura 5.6.34 Determinazione dimensioni del difetto

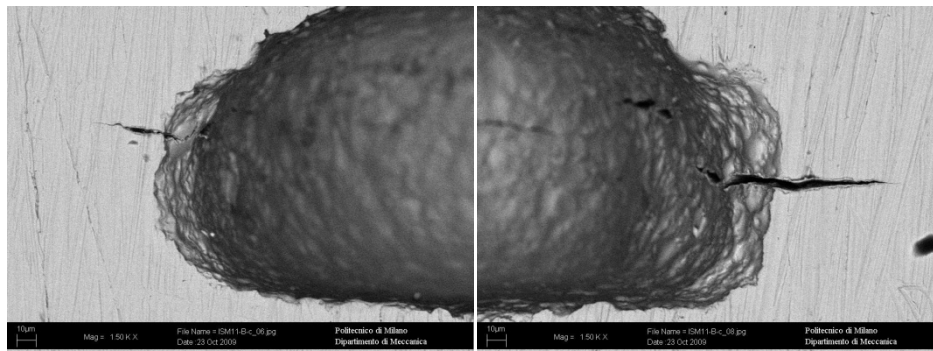


Figura 5.6.35 Determinazione dimensioni del difetto

In questo caso la precricatura comporta un difetto iniziale ben più grande di quello originale. Il simulatore prevede quindi una propagazione lenta causata proprio dalle dimensioni iniziali assunte per la cricca che in realtà non propaga. Il simulatore risulta così conservativo nei riguardi della vita del provino (figura 5.6.36).

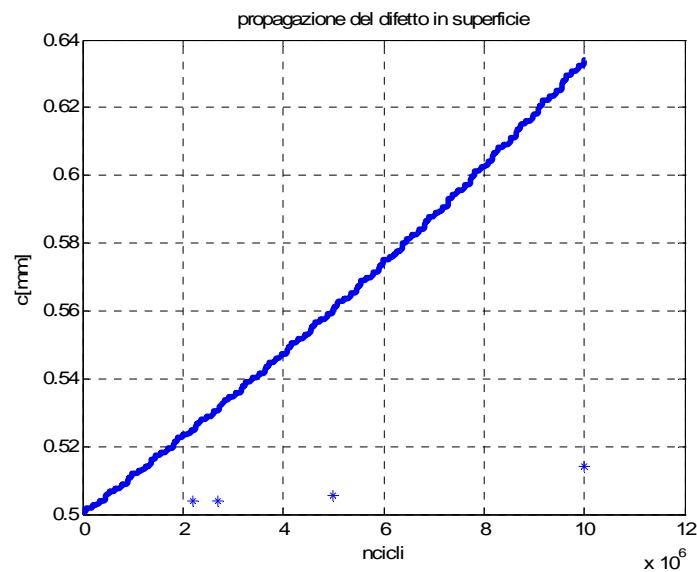


Figura 5.6.36 Simulazione di propagazione $c=0,5$ mm $a=0,5$ mm. Parametri materiale ricavati con soglia sperimentale $R=-2,5 \rightarrow \Delta K_{th}=19$ MPa \sqrt{m}

5.7 Confronto simulatore/ NASGRO 4.2

Viene ora presentato un confronto basato sulle previsioni stimate dal simulatore e quelle ottenute con NASGRO 4.2.

Software:

NASGRO 4.2: crack propagation and fracture mechanics analysis

NASFLA program: fatigue crack growth

Moduli per l'ingresso dei dati per la simulazione di propagazione:

- geometria del problema (figura 5.7.1)
- scelta materiale (figura 5.7.2)
- definizione spettro (figura 5.7.3)
- opzioni di output dei risultati (figura 5.7.4)

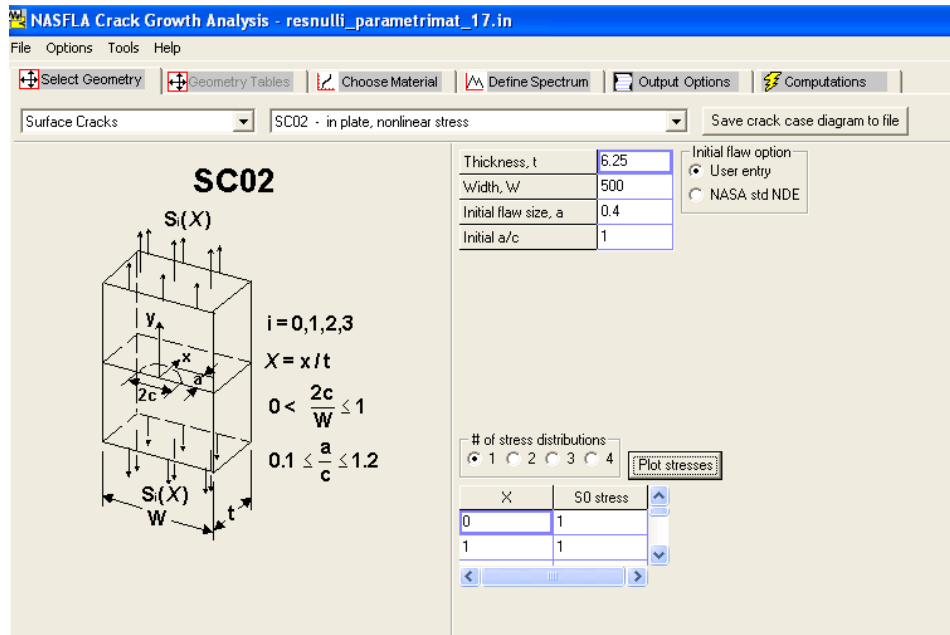


Figura 5.7.1 Geometria del problema

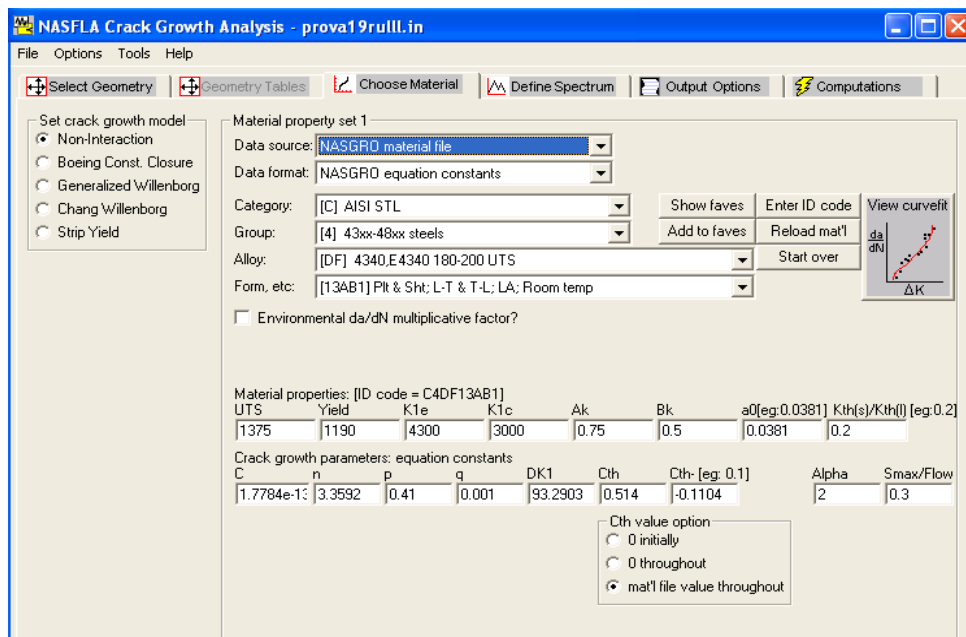
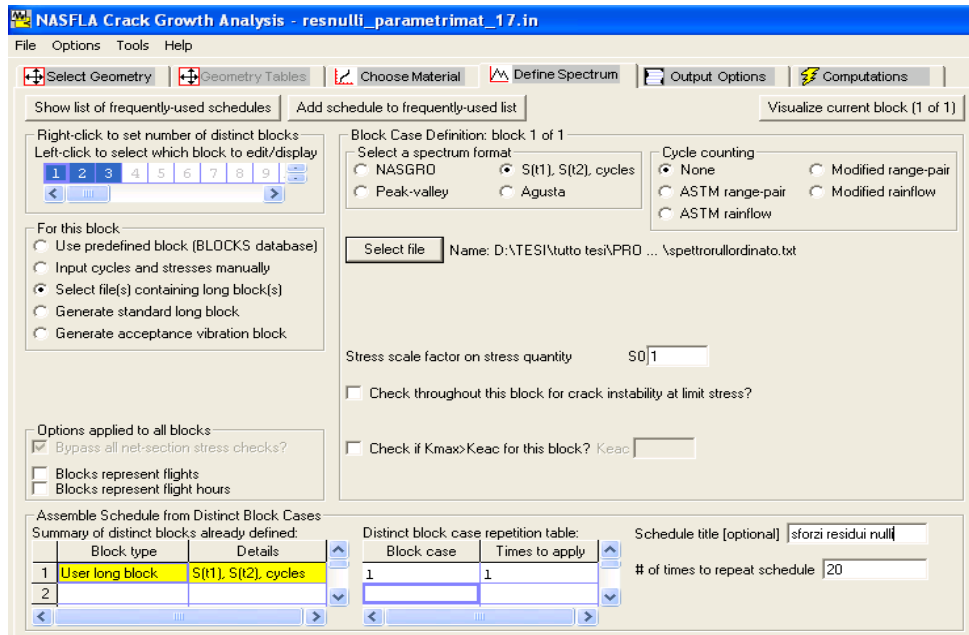


Figura 5.7.2 Scelta materiale e relativi parametri



Prova che considera il materiale esente da sforzi residui superficiali

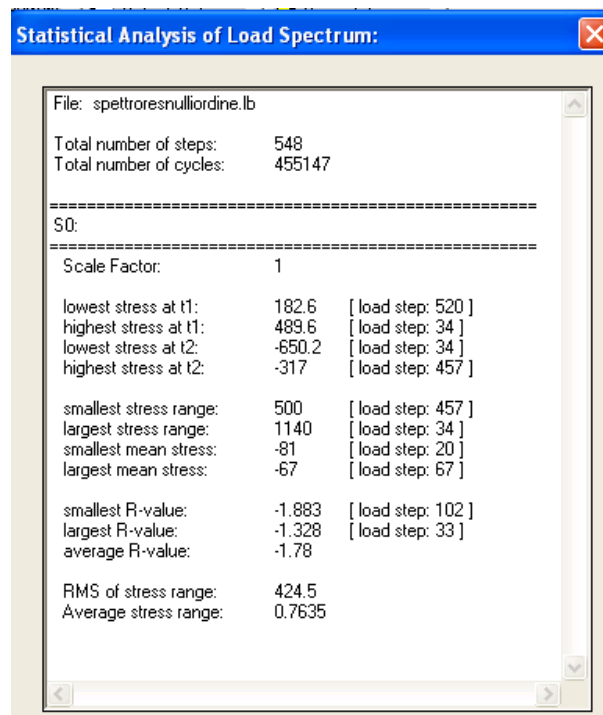




Figura 5.7.3 Definizione spettro

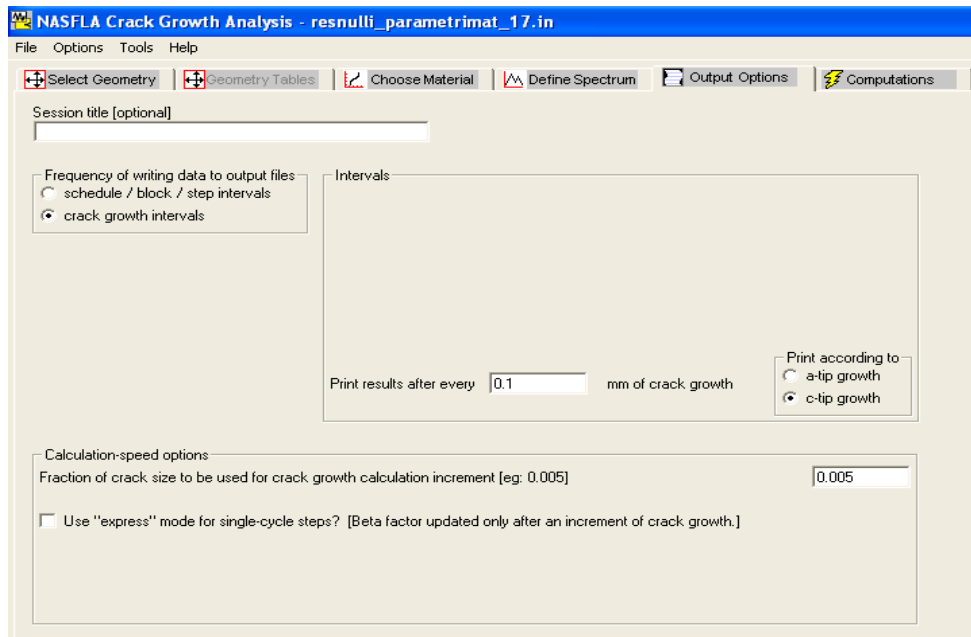
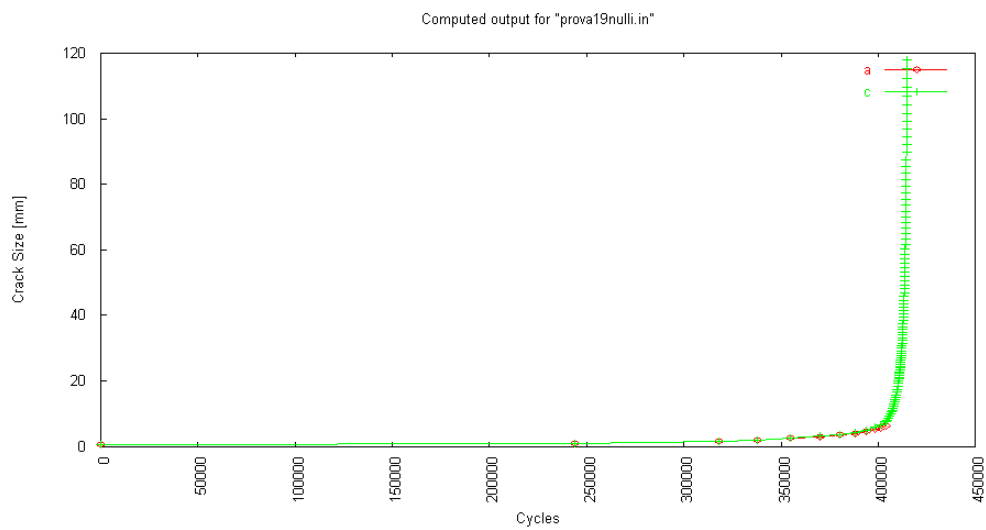


Figura 5.7.4 Definizione file di risultato



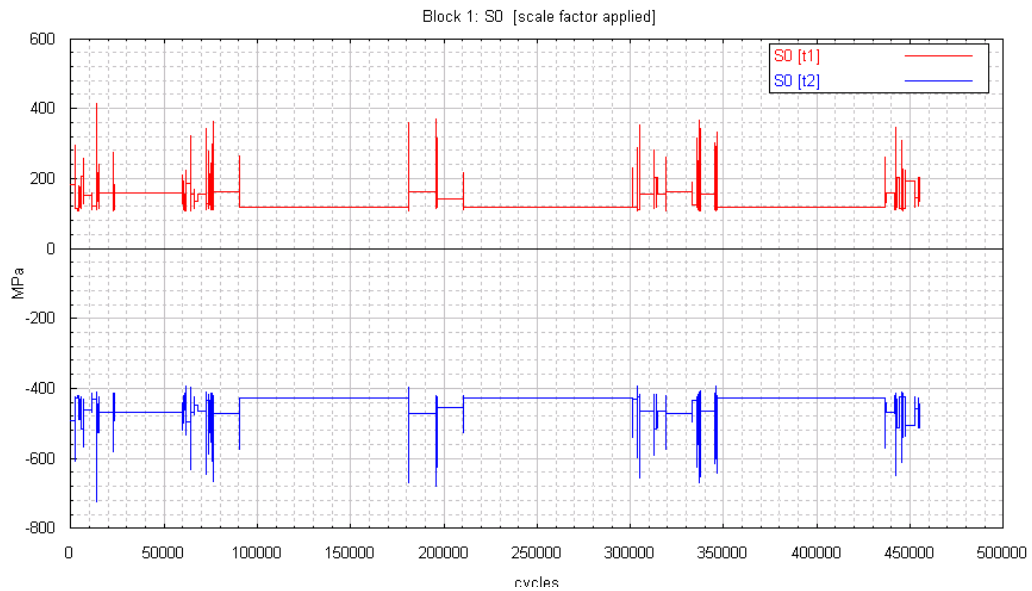
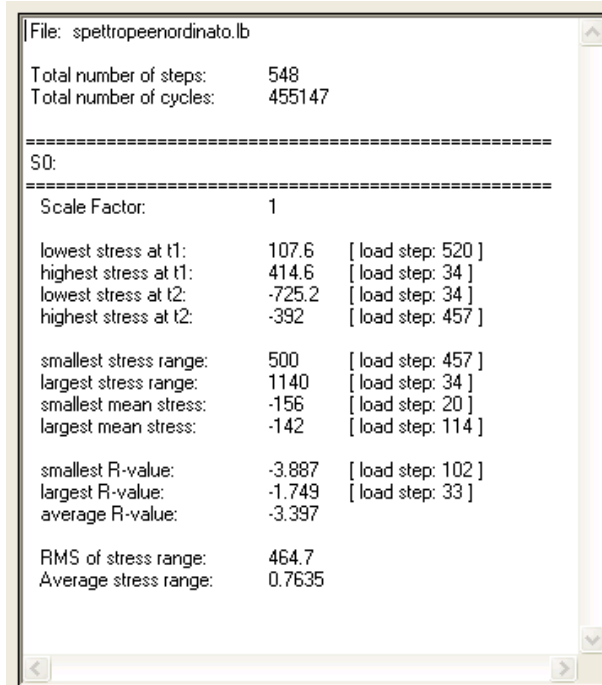
	341128.20	2.0542	2.0779
	343759.82	2.1557	2.1842
	346779.06	2.2624	2.2964
	351207.42	2.3735	2.4138
	354992.81	2.4778	2.5246
	358595.48	2.5862	2.6405
	361649.48	2.6862	2.7480
	364568.18	2.7895	2.8599
	367355.55	2.8961	2.9763
	370015.44	3.0062	3.0975
	372551.56	3.1196	3.2236
	374671.96	3.2215	3.3381
	376702.77	3.3261	3.4567
	378646.44	3.4331	3.5795
	380505.47	3.5426	3.7067
	382282.42	3.6547	3.8384
	383979.86	3.7692	3.9747
	385373.51	3.8693	4.0955
	386712.31	3.9712	4.2199
	387997.91	4.0749	4.3481
	389231.99	4.1805	4.4802

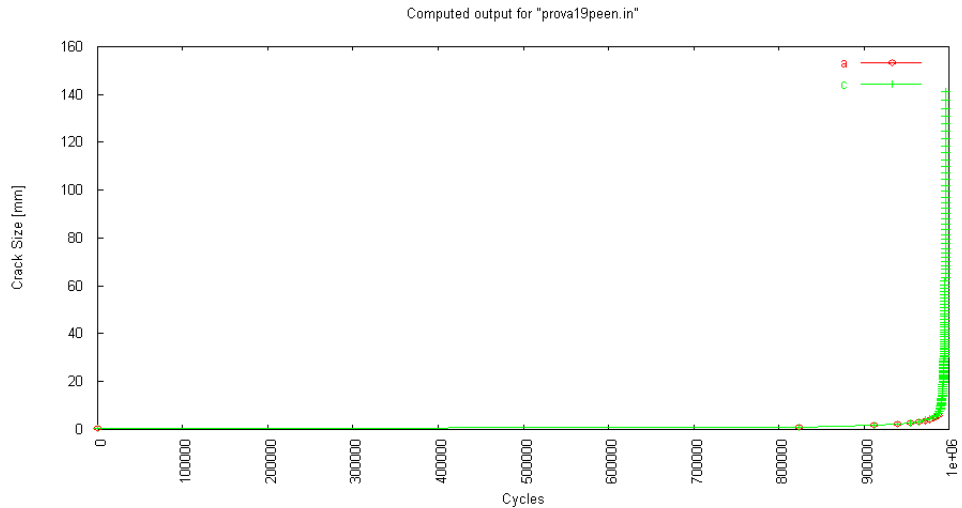
Figura 5.7.5 Risultati NASGRO

Il simulatore sviluppato, prevedendo il raggiungimento della lunghezza critica per circa 300'000 cicli è conservativo rispetto a NASGRO per il quale vengono raggiunti i 370'000 cicli.

Per il caso in cui il provino cede dopo soli 190'000 cicli

Prova per la simulazione della pallinatura





Run	Stop			
		948900.65	2.2587	2.2928
		951883.13	2.3697	2.4101
		954435.74	2.4739	2.5207
		956867.86	2.5823	2.6365
		958931.69	2.6822	2.7438
		960905.89	2.7855	2.8555
		962792.93	2.8921	2.9717
		964595.19	3.0021	3.0927
		966315.01	3.1155	3.2186
		967753.98	3.2174	3.3329
		969133.08	3.3219	3.4514
		970630.05	3.4232	3.5674
		972441.43	3.5387	3.7015
		973351.21	3.6509	3.8330
		974221.13	3.7655	3.9692
		975176.52	3.8711	4.0963
		976115.85	3.9731	4.2207
		977279.60	4.0827	4.3562
		978378.61	4.1912	4.4923
		979219.92	4.2987	4.6287
		980027.23	4.4080	4.7693

Select details to show:
 Input: Geometry
 Input: Material
 Input: Spectrum
 Sched/blk/step #
 Cycle count
 Crack size
 Max K

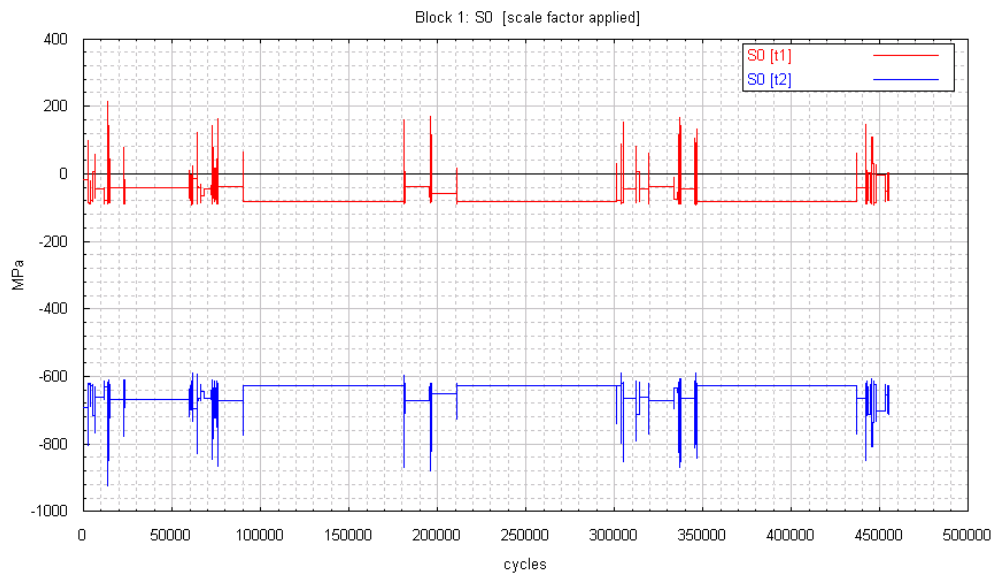
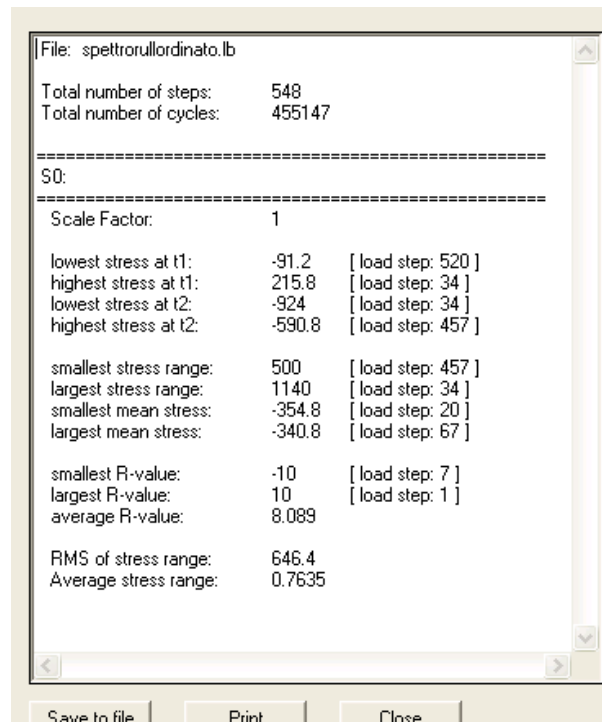
Select details to plot:
 Crack size
 Max K
 Beta factor, F
 Net stress fctr, G
 Residual strength
 da/dN
 DKth

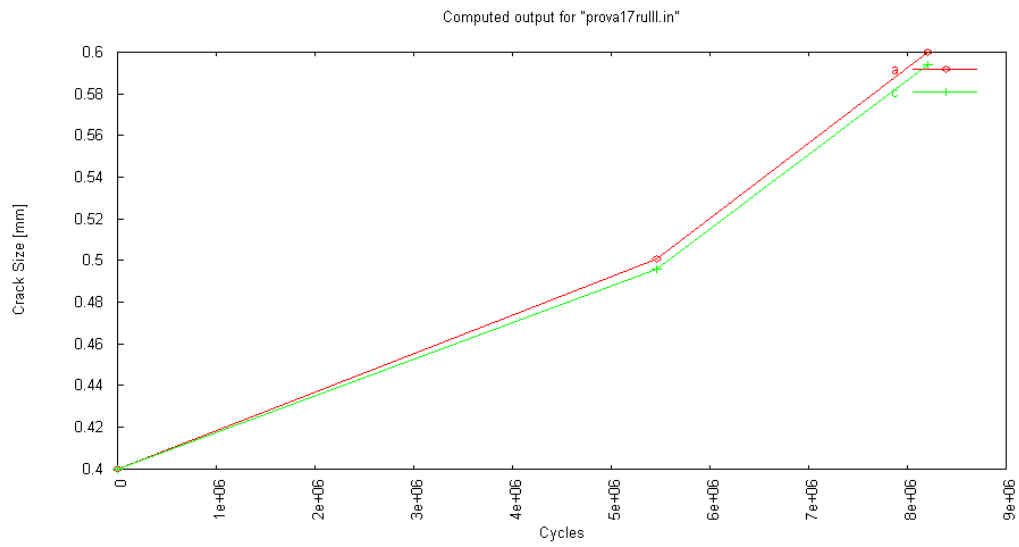
Plot v. N v. a v. blks

ALL calc'd data to csv file Print window Close window Save window contents to doc file

Anche in questo caso il simulatore, che considera il comportamento delle cricche corte, è conservativo rispetto NASGRO.

Prova per la simulazione della rullatura





Dopo 20 giri di spettro NASGRO prevede un accrescimento del difetto di circa 200 μm in controtendenza al modello di propagazione implementato più vicino ai risultati ricavati sperimentalmente.

Capitolo 6

Conclusioni

Nel capitolo 2 è stato affrontato il problema della caratterizzazione del comportamento a fatica del materiale esente da difetti e sforzi residui superficiali. L'approccio seguito è tipico del classico studio del problema della fatica: sulla base di prove sperimentali è stato definito il relativo modello analitico sul diagramma di Haigh riportato in figura 6.1., per il quale si apprezza l'effetto dello sforzo medio sul limite di fatica alternato assiale.

Il modello analitico ricavato è di seguito riportato; si nota che per rapporti di ciclo inferiori a -1 il limite è assunto costante, mentre per quanto riguarda il primo quadrante il modello definito è simile a quello di Sodeberg.

$$\begin{cases} \sigma_a = \sigma_m^2 \cdot a + \sigma_m \cdot b + c & R > -1 \\ \sigma_a = \sigma_{fa} & R \leq -1 \end{cases}$$

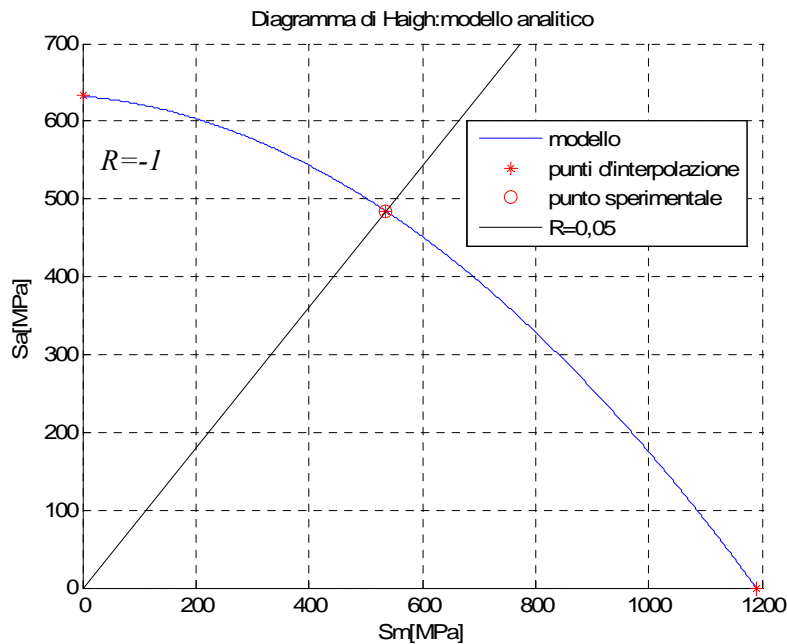
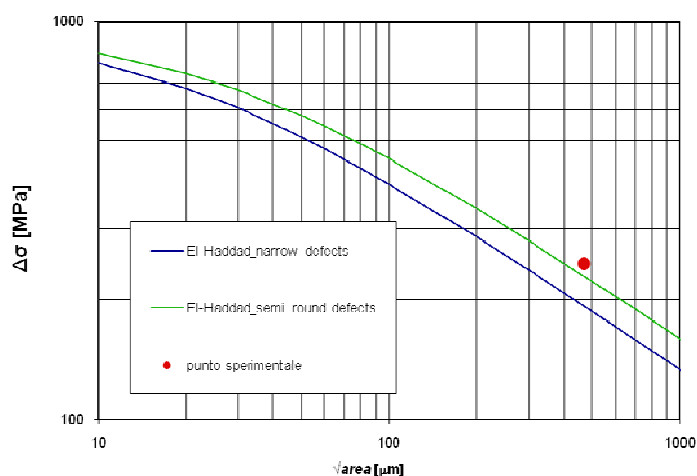


Figura 6.1 Effetto dello sforzo medio: modello analitico

Sulla base del comportamento stabilito con prove di propagazione, il capitolo 3 è stato rivolto alla conferma sperimentale di un modello predittivo sul diagramma di Kitagawa. La relazione tra limite di fatica e dimensione del difetto superficiale è descritta, con buona approssimazione, dal modello di El-Haddad 3D modificato in cui si definisce l'omonimo parametro, che discrimina il comportamento delle cricche corte da quelle lunghe:

$$\sqrt{area_0} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta K_{th,LC(R)}}{0,65 \cdot \Delta \sigma_{w0(R)}} \right)^2$$

Kitagawa-Takahashi diagram



Kitagawa diagram

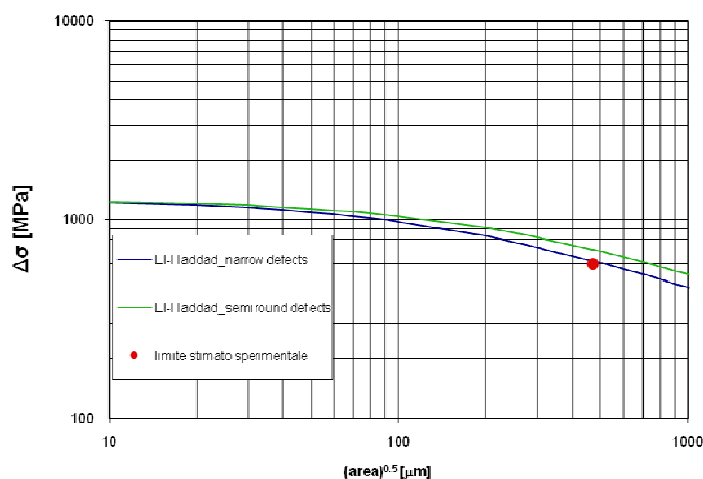


Figura 6.2 Diagramma di Kitagawa per i rapporti di ciclo testati

È disponibile quindi un modello per la previsione del comportamento di cricche corte per la lega AISI 4340, in funzione del rapporto di ciclo.

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{w0(R)} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{area_0}}{\sqrt{area} + \sqrt{area_0}}}$$

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th,LC(R)} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{area}}{\sqrt{area} + \sqrt{area_0}}}$$

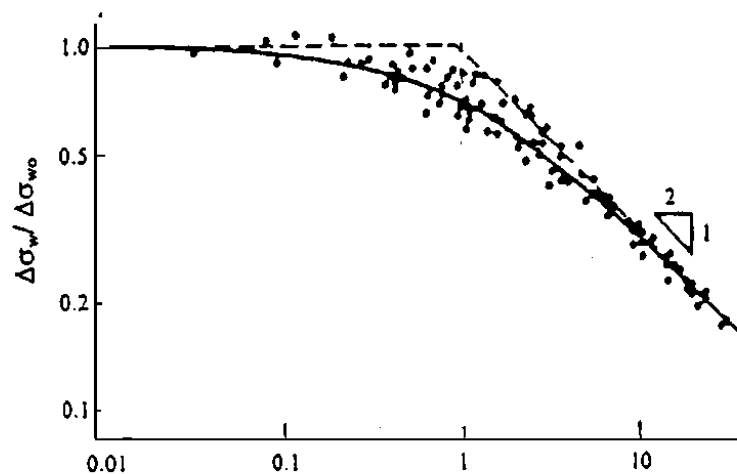


Figura 6.3 Diagramma di Kitagawa-Takahashi

Nel capitolo 4 è stato sviluppato, sulla base dei modelli ricavati in precedenza, un modello numerico in ambiente MATLAB che permette di stimare il limite di fatica del materiale quand'esso è soggetto a sforzi residui superficiali. Il fine è quello di stabilire l'effetto dei trattamenti meccanici superficiali eseguiti sul componente per aumentarne le caratteristiche di resistenza a fatica. Non si hanno a disposizione i parametri con cui i provini sono stati trattati, prima nel caso di pallinatura poi di rullatura, ma si può affermare che quest'ultima ha un effetto decisamente superiore sulla resistenza del materiale visto che induce un gradiente di sforzi che si esaurisce meno velocemente in direzione della profondità. La stima del limite attraverso il software trova riscontro sperimentale solamente nel caso della pallinatura poiché è l'unico test ad essere eseguito.

Le prove a spettro affrontate nel capitolo 5 hanno contribuito alla taratura del modello simulante la propagazione.

I parametri più idonei sono quelli per cui la soglia a $R=-2,5$ è di $\Delta K_{th}=19\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Tabella 5.1.1 a) Parametri sperimentali caratteristici dell'equazione di NASGRO
b) soglie sperimentali in funzione di R

α	2	
C	$1,446 \cdot 10^{-11}$	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
p	0,41	
q	0,001	
n	3,3592	
S_{max}/σ_o	0,3	
ΔK_I	2,9501	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
C_{thp}	0,514	
C_{thn}	-0.1104	
da/dN		m/ciclo

a)

R	$\Delta K_{th,LC}$ [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
0,7	3,32
0,05	4,91
-1	10,48
-2	15,39
-2,5	19

b)

Il modello di propagazione sviluppato risulta efficiente poiché conservativo anche se la variabilità riscontrata nelle prove in laboratorio, soprattutto nel caso di simulazione della pallinatura dove i rapporti di ciclo sono compresi tra $-2 < R < -4$ è elevata. Questo potrebbe essere dovuto alle condizioni di prova per le quali non si possiede un sufficiente controllo.

Inoltre, simulando l'effetto dei trattamenti superficiali tramite la similitudine assunta all'apice della cricca, si può confermare che *la rullatura imprime uno stato superficiale tale per cui la resistenza è superiore rispetto la pallinatura.*

Riferimenti bibliografici

- [1] ISO 12107 Metallic materials – Fatigue testing – Statistical planning and analysis of data (Switzerland 2003)
- [2] W.J. Dixon, A.M. Mood, A method for obtaining and analyzing sensitivity data, *Journal of the American Statistical Association*, vol.43 (1948), pp 109-126
- [3] W.J. Dixon, The up-and-down method for small samples, *Journal of the American Statistical Association*, (1965), pp 967-978
- [4] D.W. Cameron, Allegany, NY, and D.W. Hoepfner, Department of Mechanical Engineering, University of Utah, *ASM Handbook volume 19 Fatigue and Fracture*
- [5] Y. Murakami, Kyushu University, Japan (2002), *Metal Fatigue : Effects of small defects and nonmetallic inclusion*
- [6] S. Beretta, Politecnico di Milano, Dipartimento di meccanica, *Valutazione della resistenza a fatica in presenza di difetti*
- [7] Y. Murakami, M. Endo, *Effects of hardness and crack geometries on ΔK_{th} of small cracks emanating from small defects*, The behavior of short fatigue cracks (K.J. Millerand E.R. de Los Rios Eds.), MEP, London, 1986
- [8] S. Beretta, *Propagation of short cracks in a High Strength Steel for Railway Axles*. Proc.14th European Conference on Fracture ECF14, Krakow, Poland (2002).
- [9] S. Beretta, M. Carboni, M. Madia, *Fatigue Strength in Presence of Inhomogeneities: Influence of Constraint*, Journal of ASTM International, Vol.3, No.4 (2006)
- [10] M.A. James, Scott C. Forth, J.A. Newman, *Load history effects resulting from compression precracking*, Journal of ASTM International, Vol.2, No.8 (2005)
- [11] S. Beretta, *Trattamento statistico dei dati di prove di fatica*, Politecnico di Milano, Dipartimento di meccanica
- [12] L. Patriarca, S. Beretta, *Report AISI 4340 crackgrowth*, Politecnico di Milano, Dipartimento di meccanica

- [13] NASGRO 's Manual reference
- [14] X. Wang, S. B. Lambert, *Stress intensity factors for low aspect ratio semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates subjected to nonuniform stresses*, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- [15] M.P. Nascimento, R.C. Souza, W.L. Pigatin, H.J.C. Voorwald, *Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 aeronautical steel*, International Journal of Fatigue 23 (2001) 607–618
- [16] M.A.S. Torres, H.J.C. Voorwald, *An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel*, International Journal of Fatigue 24 (2002) 877–886
- [17] *Surface Engineering*, (1994) Volume 5 of the *ASM Handbook*.
- [18] MTS® Model 793.10 MultiPurpose TestWare, *User information and software reference*
- [19] Obiettivi per il 2020 fissati dallo Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE) XXXV CONVEGNO NAZIONALE AIAS – ANCONA, 13-16 SETTEMBRE 2006
- [20] J. Schijve, F.A. Jacobs and P.J. Tromp, *"Flight simulation tests on notched elements"*, NLR-Report TR 74033, 1974
- [21] W.Elber, *Fatigue crack propagation: some effects of crack closure on the mechanism of fatigue crack propagation and cyclic tensile loading*, University of New South Wales, 1968
- [22] P.C: Paris, *The growth cracks due to variations in load*, Dissertation, Lehigh University, 1962
- [23] SAF, *Military specification airplane damage tolerance requirements*, Mil-A-83444, 1974
- [24] *Damage tolerance design Handbook*, vol.1-4, Gallagher , 1983
- [25] P.Davoli, A.Bernasconi, M.Filippini, S.Foletti, *Comportamento meccanico dei materiali*, McGraw-Hill, Milano, 2005