

ANALISI DI RESISTENZA A FATICA DI LEGA IN ALLUMINIO AlSi10Mg REALIZZATA MEDIANTE TECNOLOGIA ADDITIVE MANUFACTURING

Autori:

Ing. Giacomo Rigoni | TEC Eurolab srl. | www.tec-eurolab.com

Ing. Fabrizio Rosi | TEC Eurolab srl. | www.tec-eurolab.com

Ing. Alessio Faraguti | TEC Eurolab srl. | www.tec-eurolab.com



1.0 INTRODUZIONE

La maggioranza delle cause di rottura di componenti in servizio è legata a fenomeni di fatica. L'ottimizzazione della progettazione e l'utilizzo di materiali speciali porta a dover considerare con maggiore attenzione quest'aspetto; uniti ai test di analisi dei materiali è doveroso affiancare uno studio statistico dei fenomeni osservati al fine di garantire una certa fiducia dei risultati. Il presente studio è stato realizzato su componenti realizzati in lega di alluminio AISi10Mg realizzati mediante tecnologia additiva a letto di polvere. La tecnologia additiva consente notevoli vantaggi strutturali e termo-fluidodinamici legati alla forma dei componenti; garantisce densità molto superiori rispetto alle fusioni, tuttavia non è in grado di realizzare una densità di materiale paragonabile a materiale ottenuto da pieno (laminato o trafilato). Dunque è necessario che il produttore di materiale finito (il costruttore di oggetti 3D) affianchi alla progettazione dei componenti un'attenta analisi del comportamento a fatica del materiale ed un'analisi statistica dei risultati robusta.

2.0 PRINCIPI GENERALI

2.1 RESISTENZA MECCANICA DEI MATERIALI METALLICI

La resistenza meccanica è la massima resistenza a cui resiste un materiale prima di arrivare a rottura se sollecitato con una tensione normale. La caratterizzazione della resistenza meccanica di un materiale metallico viene effettuata mediante prova di trazione di un provino standardizzato (figura 1, 2).

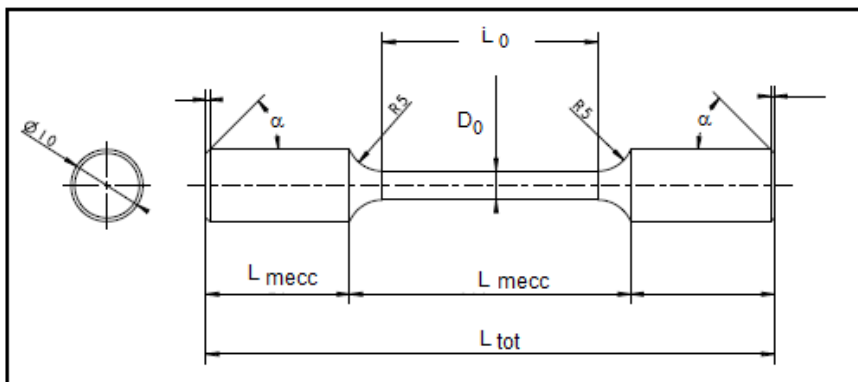


Figura 1. Esempio di provino tondo.

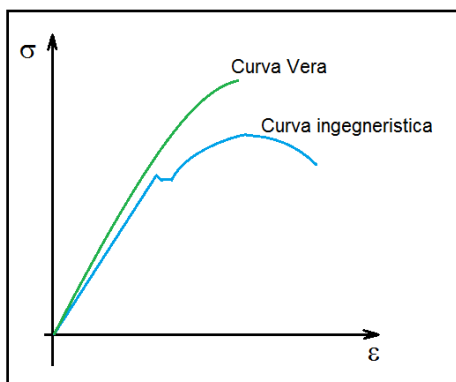


Figura 2. Curva vera e curva ingegneristica

Vengono definiti tensioni i carichi distribuiti su una superficie. Esistono tensioni normali $\sigma_N = F/A$; tensioni di taglio $\sigma_T = T/A$ e tensioni tangenziali $\tau = F_t/A$.

Viene definito allungamento la differenza tra lunghezza finale e iniziale di un provino soggetto ad una certa tensione, $\Delta L = L - L_0$.

La deformazione lineare ingegneristica ε_E è il rapporto tra l'allungamento ΔL e la lunghezza iniziale L_0 .

La deformazione vera è $\varepsilon_v = \ln(L/L_0) = \ln(1 + \varepsilon_E)$.

Le curve ottenute dalle prove di trazione si contraddistinguono per una parte lineare elastica, che definisce il modulo di elasticità del materiale $E = \sigma_{elastico} / \varepsilon_{elastico}$ (legge di Hooke), ed una parte plastica definita dalla relazione: $\sigma = K \varepsilon^n$, dove K è una costante di proporzionalità legata alle tensioni ed n è definito come coefficiente di incrudimento.

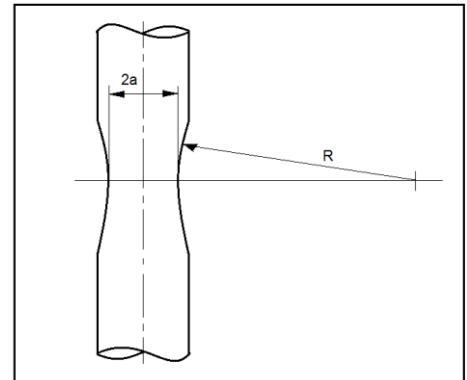
Il provino di prova lavora in regime mono-assiale, tuttavia in prossimità della zona di rottura avvengono fenomeni di strizione che dimostrano la trasformazione a regime triassiale. Il parametro di Bridgmann (o correzione di Bridgman) viene calcolato osservando il raggio di curvatura sui bordi del provino in prossimità della rottura, a causa della strizione avvenuta (figura 3).

$$K_{Bridgmann} = \left[\left(1 + \frac{2R}{a} \right) \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \right]^{-1}$$

Il parametro di Bridgmann abbasserà di una certa percentuale la tensione media a rottura vera:

$$\sigma_v^* = K_{Bridgmann} \sigma_v$$

Figura 3. Strizione a rottura del provino



2.2 FENOMENO DELLA FATICA

Viene definita fatica il processo di progressivo localizzato e permanente cambio strutturale occorso in un materiale soggetto a condizioni in cui le tensioni e le deformazioni fluttuano generando cricche o completo cedimento dopo un numero sufficiente di fluttuazioni.

Con il termine permanente si intende che una volta innescato il processo è irreversibile.

La fluttuazione implica che tensioni o deformazioni cambino ciclicamente.

I fattori principali che generano il fenomeno della fatica sono:

1. una tensione sufficientemente alta
2. una fluttuazione di tensione
3. un certo numero di cicli.

Quando le tensioni sono positive significa che il componente è soggetto a trazione, viceversa, quando le tensioni sono negative il componente è soggetto a compressione. La somma delle tensioni può restituire un valore medio di tensione nullo (figura 4-a) oppure con un certo valore (figura 4-b), in base alla differenza tra tensioni massime e minime. Nelle situazioni reali la fluttuazione delle tensioni ed i cicli sono casuali (figura 4-c).

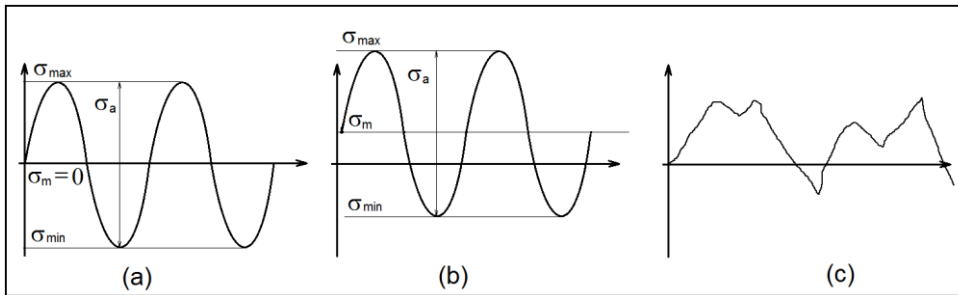


Figura 4. Esempi di cicli di fatica.

Si definiscono ampiezza di tensioni cicliche: $\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

Si definisce rapporto di tensioni: $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$

La resistenza di un materiale alla fatica viene descritta mediante le curve tensione-cicli (S-N) di Wohler (figura 5). Il tipo di curva che ne descrive il comportamento dipende dal materiale (figura 6); agli acciai presentano spesso un gomito caratteristico che descrive il limite a fatica, mentre leghe leggere presentano un asintoto orizzontale. Il limite a fatica descrive la tensione al di sotto della quale si ipotizza una vita infinita del componente.

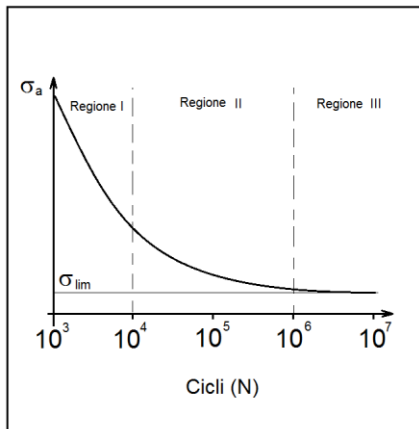


Figura 5. Esempio di curva di Wohler

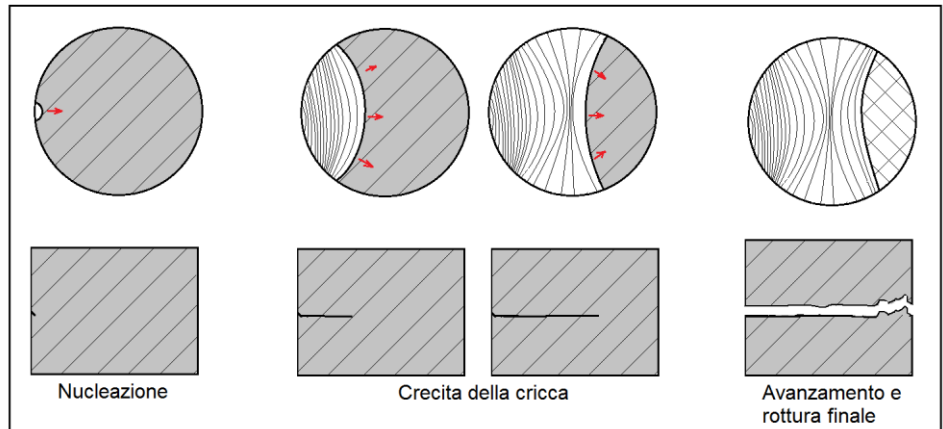


Figura 6. Propagazione del difetto nel componente.

Regione I descrive la fatica di tipo oligociclico; Regione II descrive fatica ad elevato numero di cicli; regione III descrive teoricamente la vita infinita.

Le fasi dello sviluppo della cricca sono diverse a seconda dei casi, possiamo considerare:

Stadio 0. Incrudimento o addolcimento del materiale a causa della redistribuzione delle dislocazioni.

Stadio 1, le cricche di fatica tendono a nascere sulla superficie o in prossimità della stessa. Solitamente

In presenza di un intaglio o di una discontinuità superficiale.

Sulla superficie le tensioni (flessione, torsione) tendono ad essere superiori rispetto al cuore. Inoltre possono essere presenti tensioni superficiali residue originate dalle lavorazioni precedenti.

In assenza di discontinuità superficiali la nucleazione può avvenire in presenza di bande di scorrimento persistenti; il movimento di scorrimento genera estrusioni ed intrusioni di materiale in base al tipo di carico, di compressione e di trazione rispettivamente. La spiegazione del fenomeno è legata al movimento delle dislocazioni cristalline, che tendono ad unirsi lungo una direttrice a causa dell'azione ripetuta dei carichi.

Infine è opportuno considerare l'ambiente in cui il componente è in servizio, la corrosione favorisce velocemente la formazione di discontinuità superficiali.

Altri tipi di discontinuità possono essere cavità, pori, inclusioni.

Stadio 2. La crescita della cricca avviene quando la cricca cambia direzione e si propaga in direzione normale rispetto alle tensioni applicate. L'avanzamento continua con un'alternanza di assottigliamento e smussatura della frattura, generando le caratteristiche striature. In generale, la crescita della cricca è correlata al parametro di concentrazione

delle tensioni K. Dunque la variazione della dimensione della cricca all'aumentare dei cicli è legata alla variazione stessa del parametro di concentrazione delle tensioni ΔK . La relazione è definita dalla legge di Paris:

$$da/dn = C(\Delta K)^m$$

Dove a = dimensione della cricca, n = cicli, C ed m sono parametri legati al materiale, temperatura, ambiente. Mentre ΔK è il parametro legato alla variazione del parametro di concentrazione delle tensioni.

Nella regione I il ΔK è definito come il valore di soglia che genera un avanzamento della cricca. Nello stadio 2 il rapporto da/dn è stabile ed assume un valore lineare; questo consente di fare opportune stime sulla vita residua di un componente.

La natura intergranulare o transgranulare della cricca dipende solitamente dal tipo di materiale, ambiente, carico applicato.

Stadio 3. La dimensione della cricca è macroscopico e la velocità di avanzamento esponenziale. Siamo nello stadio finale di formazione di una macro cricca e cedimento finale. Il cedimento finale si manifesta quando la sezione resistente rimasta non è più in grado di resistere ai carichi applicati. Lo studio della propagazione della cricca è valutato mediante la tenacità a frattura, tenendo in considerazione i parametri K_{Ic} e J_c .

L'avanzamento della cricca e la vita residua del componente sono descritti nella figura 7. Come si può notare 80% della vita del componente soggetto a fatica è utilizzata per la generazione di micro-cricche; mentre la presenza di macro-cricche è relativa al 20% della vita residua del componente.

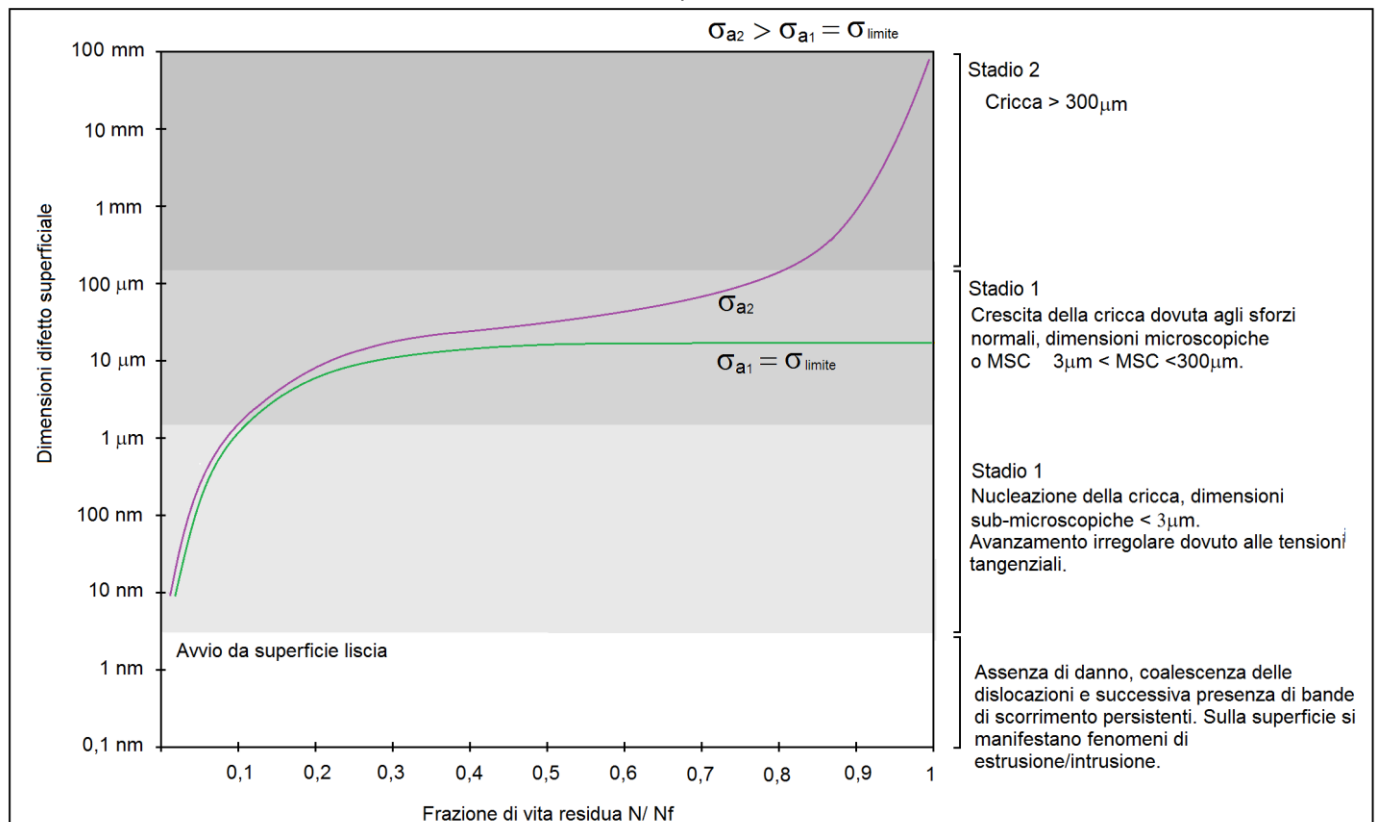


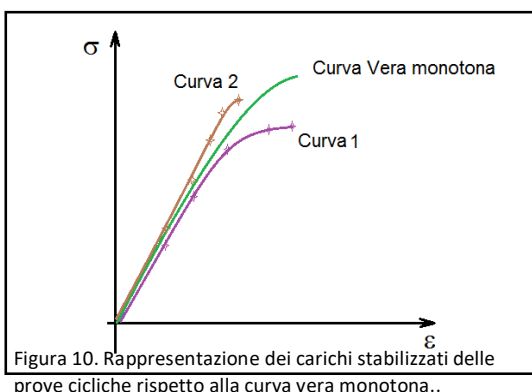
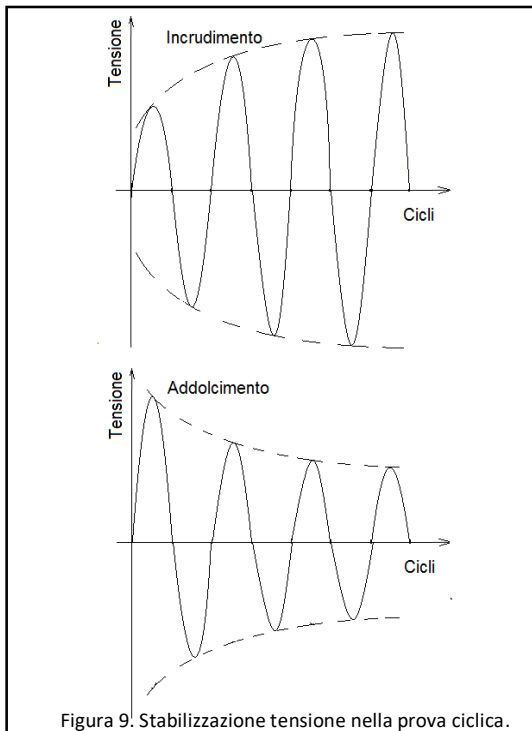
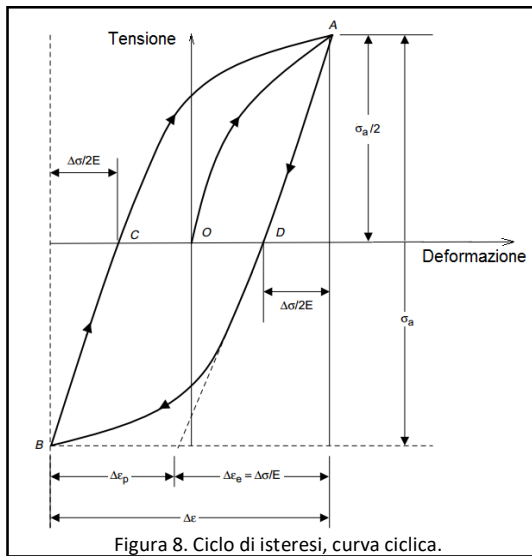
Figura 7. Propagazione del difetto in funzione della frazione di vita del componente.

2.3 FATICA AD ELEVATO NUMERO DI CICLI

La fatica ad elevato numero di cicli è correlata a $N > 10^5$ e tensioni in campo elastico. Solitamente vengono rappresentati mediante le curve Wholer in ipotesi di tensione-vita (S-N), in scala logaritmica. Storicamente sono state determinate diverse relazioni empiriche per determinare il limite a fatica per molti materiali, tuttavia per i materiali costruiti mediante tecnologia additive manufacturing diventa molto complicato applicare simili modelli. E' dunque preferibile utilizzare un approccio sperimentale, data la natura non anisotropa del materiale e la possibile presenza di inclusioni/vuoti.

2.4 FATICA A BASSO NUMERO DI CICLI

Eseguendo delle prove con ampiezza di carico costante (fatica oligociclica) in regime elastico si nota che le tensioni e le deformazioni sono direttamente correlate con il modulo elastico. Tuttavia quando il carico ciclico genera deformazioni plastiche permanenti la risposta del sistema è più complessa e descrive una curva di isteresi (figura 8). Quando la tensione è positiva il sistema opera in trazione, mentre quanto è negativa opera in compressione.



Come si può notare quando le tensioni si annullano, rimane una deformazione permanente (tratti CO e OD rispettivamente); durante l'intero ciclo la deformazione complessiva $\Delta\epsilon$ è composta da una componente elastica $\Delta\epsilon_e$ e da una componente plastica $\Delta\epsilon_p$. Eseguendo delle prove cicliche a deformazione costante si nota che in una fase iniziale di alcune centinaia di cicli il materiale assume un comportamento non costante; la tensione massima e minima variano aumentando o diminuendo (in valore assoluto). La spiegazione del fenomeno risiede nel movimento delle dislocazioni che possono incrudire o addolcire il materiale; il modulo elastico tende quindi ad aumentare o diminuire rispettivamente (figura 9). Solitamente i materiali incrudiscono quando $\sigma_{max}/\sigma_{snerv.} \geq 1,4$ mentre addoliscono quando $\sigma_{max}/\sigma_{snerv.} \leq 1,2$.

La spiegazione del fenomeno risiede anche questa volta nel movimento delle dislocazioni del reticolo cristallino. Quando si è in presenza di un elevato numero di dislocazioni il carico ciclico le redistribuisce secondo un reticolo più stabile, per cui è necessario un carico inferiore per generare una deformazione plastica (addolcimento).

Viceversa quando si è in presenza di poche dislocazioni, il carico ciclico le concentra addensando, per cui è necessario un carico maggiore per generare una deformazione plastica (incrudimento). Eseguendo più prove cicliche, con deformazioni diverse, si può costruire l'andamento delle tensioni massime stabilizzate e confrontarlo con la curva vera monotona. In presenza di fenomeni di addolcimento (figura 10 – curva 1) il materiale ha una risposta peggiore rispetto alla sollecitazione, mentre in presenza di fenomeni di incrudimento (figura 10 – curva 2) il materiale ha una risposta migliore.

Dall'andamento delle tensioni massime stabilizzate, ottenute dalle prove cicliche è possibile valutare in campo plastico la costante di proporzionalità ciclica K' e l'incrudimento ciclico n' , secondo la relazione: $\sigma = K'\epsilon^{n'}$.

Valutando il rapporto K/K' possiamo osservare che:

$K/K' > 1$ il materiale si addolcisce

$K/K' < 1$ il materiale si incrudisce

2.5 IPOTESI DI DEFORMAZIONE-VITA

Le informazioni ottenute dalle curve cicliche sono fondamentali per calcolare le deformazioni elastiche e plastiche in base alle ipotesi di Basquin e Manson-Coffin rispettivamente:

a) $\Delta \varepsilon_e = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (N)^b$ (Basquin)

b) $\Delta \varepsilon_p = \varepsilon'_f (N)^c$ (Manson-Coffin)

I parametri c e b sono legati al parametro di incrudimento ciclico n' precedentemente elaborato.

σ_a è l'ampiezza della sollecitazione

σ'_f è approssimativamente la tensione vera di rottura

ε'_f è approssimativamente la deformazione vera a rottura

E è il modulo elastico

N è il numero di cicli

b è il parametro di resistenza a fatica

c è il parametro di duttilità a fatica

c) $b = \frac{-n'}{1+5n'}$

d) $c = \frac{-1}{1+5n'}$

In tali condizioni è possibile avere il grafico deformazione – cicli in base alle ipotesi (a) e (b) ottenuto grazie a prove monotone e prove a basso numero di cicli (figura 11). Si può affermare che fino al limite dei cicli N_t prevale sensibilmente il campo plastico, oltre questa soglia prevale il campo elastico.

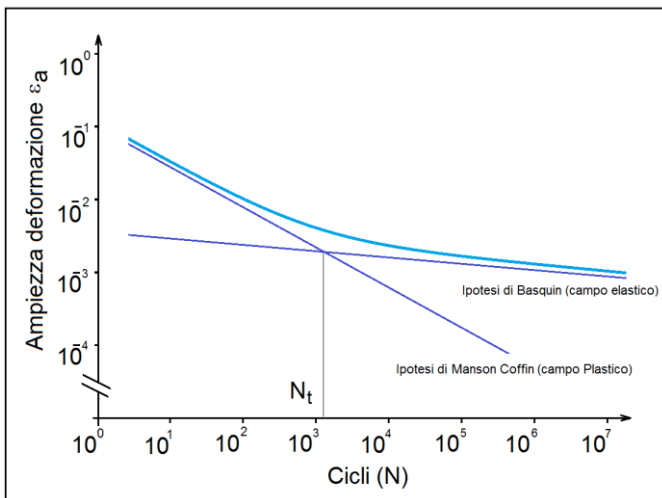


Figura 11. Rappresentazione deformazione – vita.

2.6 ANALISI STATISTICA DI WEIBULL

L'analisi statistica di Weibull consente di avere una analisi delle probabilità di rottura con ragionevole accuratezza, inoltre consente di utilizzare un numero contenuto di campioni. Già per via grafica è possibile ottenere dei risultati e delle valutazioni sull'andamento delle rotture.

La distribuzione di probabilità cumulativa (Cumulative Function Distribution, $F(t)$) produce dei parametri che descrivono l'andamento delle rotture η , β :

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta}$$

dove η = Fattore di scala che definisce il tempo necessario a raggiungere il 67% di probabilità di rottura e β = Fattore di pendenza della curva definisce le diverse famiglie di rotture.

Risulta particolarmente utile analizzare il parametro β :

$\beta < 1,0$ Indica mortalità Infantile dei componenti. Problematica riconducibile a problemi di produzione, assemblaggio, mancato controllo qualità.

$\beta \sim 1,0$ Indica rotture casuali. Problematiche legate ad errata manutenzione, errori umani, danneggiamento causato da fattori esterni, concomitanza di più di tre fattori di rottura contemporaneamente.

$1,0 < \beta < 4,0$ Usura precoce. Problematica legata a rotture meccaniche (duttilità, fragilimento,...)
Fatica a basso numero di cicli solitamente presenta solitamente un parametro $2,5 < \beta < 4,0$
Corrosione presenta solitamente un parametro $2,0 < \beta < 3,5$

$\beta > 4,0$ Indica che il materiale o componente è arrivato al limite di vita per il quale è stato progettato. Solitamente le rotture avvengono per fatica ad elevato numero di cicli, tenso-corrosione, alcune forme di erosione, limite delle proprietà meccaniche del materiale.

Esistono molti modelli matematici per stimare i parametri η e β , in questa trattazione è stato utilizzato il metodo standard. Tale metodo consente di mettere a confronto un numero limitato di campioni (2-100) ed utilizza il metodo di regressione dei valori dell'asse delle X (tempo) rispetto ai valori dell'asse delle Y ($F(t)$) calcolati con il rango mediano .

3.0 ANALISI MATERIALE AISi10Mg

Il materiale oggetto di studio è una lega Al-Si realizzata mediante tecnologia a letto di polvere e fusione Laser. Il materiale è da considerarsi anisotropo e lo sviluppo di provini orizzontali risulta essere peggiore rispetto a quello verticale. Inoltre la dimensione dei layer di crescita è stata appositamente incrementata per velocizzare i tempi di produzione, ma con l'inconveniente di generare microporosità uniformemente distribuite.

3.1 PROVE DI TRAZIONE

Sono state prese in considerazione le prove eseguite sui provini orizzontali a titolo cautelativo. I risultati delle prove sono riportati in tabella 1.

Da un'analisi di Weibull a due parametri Figura (12) sui valori di snervamento delle prove di trazione sono emersi un parametro di scala di 190MPa ed un parametro di forma di 56gradi, calcolati con il metodo di regressione. Il coefficiente di correlazione quadratico del 95,85% dimostra una buona attendibilità del metodo utilizzato.

In queste condizioni si può stabilire che una fiducia del 99,9% dell'assenza di rotture è garantita da un carico di snervamento di 184MPa. Un'analisi statistica più cautelativa del campione di prove sulla popolazione, mediante il parametro di T-Student, rileva che con la medesima fiducia si ha un valore minimo di 172MPa.

Tabella 1.

Sample	Posizione	Alloy	Diametro mm	L0 mm	Rm MPa	Reh MPa	Strizione %
1	orizzontale	AISi10Mg	6,23	25	340	192	7,5
2	orizzontale	AISi10Mg	6,23	25	331	193	7,5
3	orizzontale	AISi10Mg	6,23	25	337	199	8,0
4	orizzontale	AISi10Mg	6,24	25	359	210	8,0
5	orizzontale	AISi10Mg	6,21	25	362	191	7,5
6	orizzontale	AISi10Mg	6,25	25	318	190	7,0
7	orizzontale	AISi10Mg	6,23	25	375	190	7,0
8	orizzontale	AISi10Mg	6,22	25	337	195	8,0

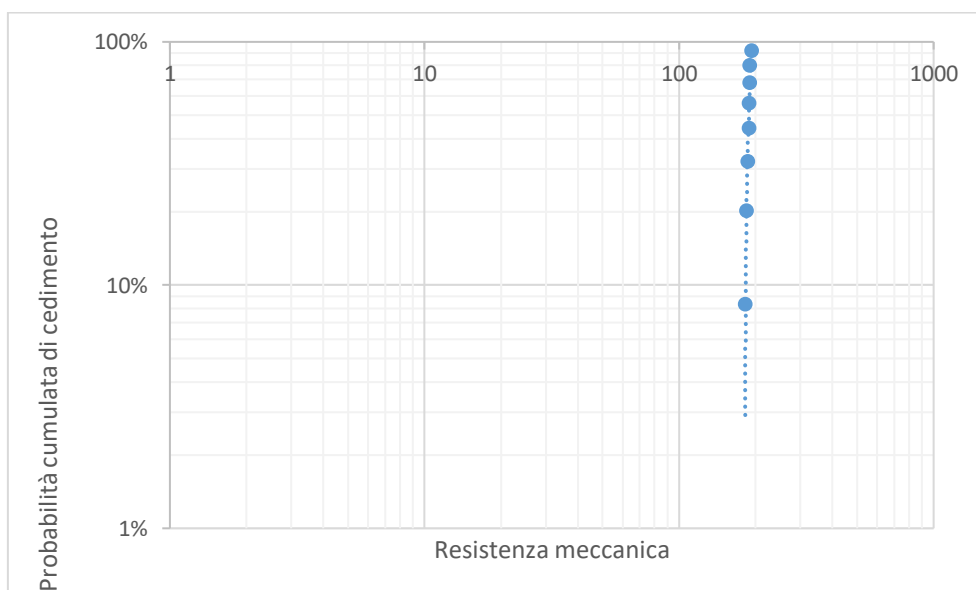


Figura 12. Grafico di Weibull sulle prove di trazione eseguite.

3.2 PROVE DI FATICA A BASSO NUMERO DI CICLI LCF (DEFORMAZIONE IMPOSTA)

Partendo dalla curva di prova del provino con carico di snervamento peggiore sono state verificate le curve ingegneristica e quella vera. Sfruttando poi i dati delle prove cicliche eseguite a bassa frequenza sono state messe a confronto la curva ingegneristica con quella ciclica (figura 13). Da questa prima analisi emerge che il materiale oggetto di studio, sollecitato a fatica, tende ad addolcirsi (figura 14).

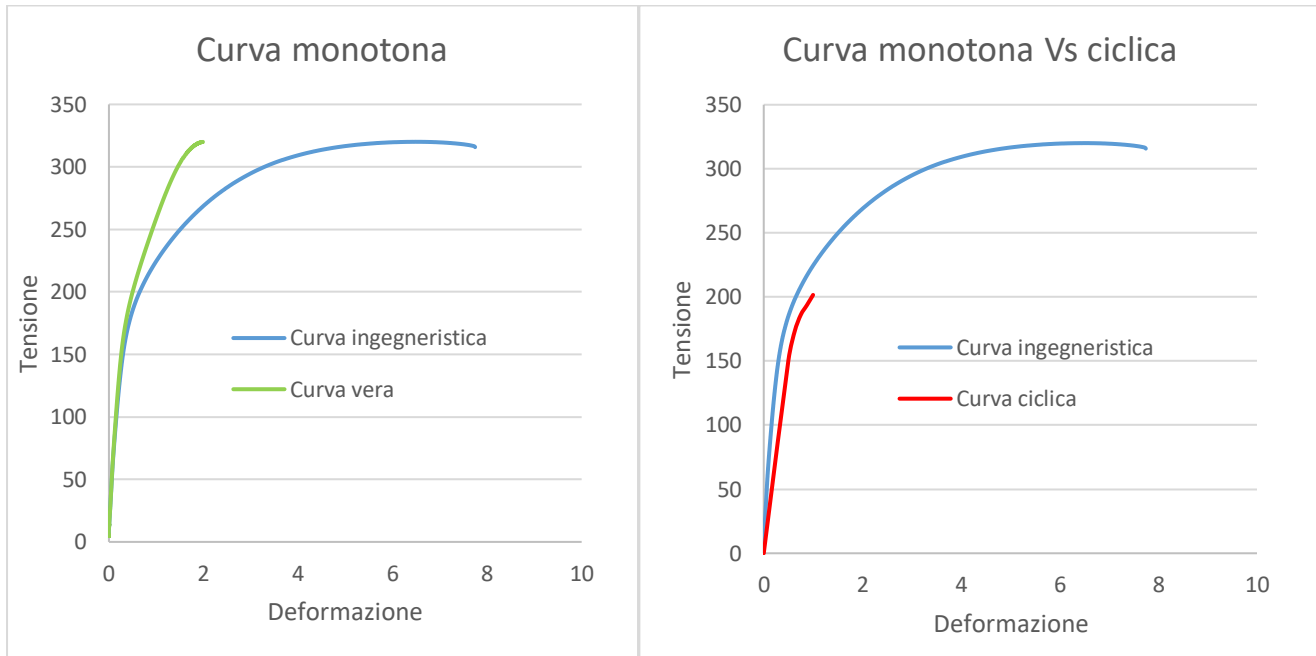


Figura 13. Confronto tra curva ingegneristica e vera.

Figura 14. Confronto tra curva ingegneristica e curva tensioni cicliche Stabilizzate.

Un'analisi secondo le ipotesi di Basquin e Manson Coffin portano alla costruzione del grafico deformazione – vita rappresentato in figura 15. Risulta interessante valutare le deformazioni in campo plastico portano ad una vita di circa 1 milione, mentre avere una resistenza a fatica ad elevato numero è necessario avere deformazioni elastiche sufficientemente basse.

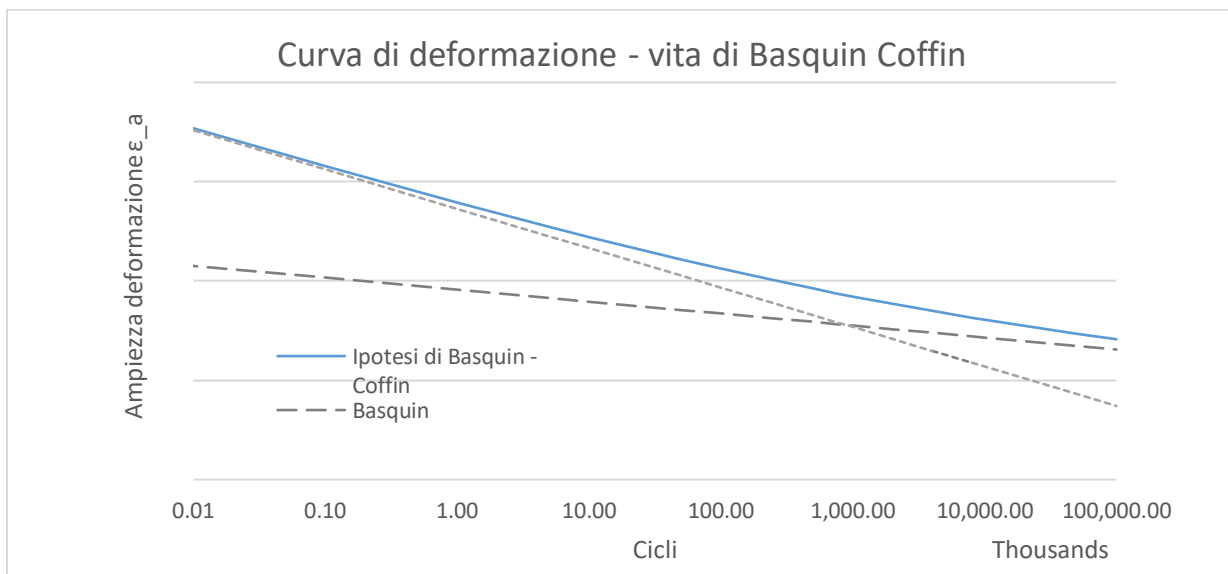


Figura 15. Curva di deformazione-Vita chiamato di Basquin-Coffin.

Volendo realizzare una valutazione tensione vita sono state rappresentate le tensioni in ambito elastico dalle ipotesi di Basquin e le prove sperimentali HCF eseguite per determinare il limite di fatica (figura 16).

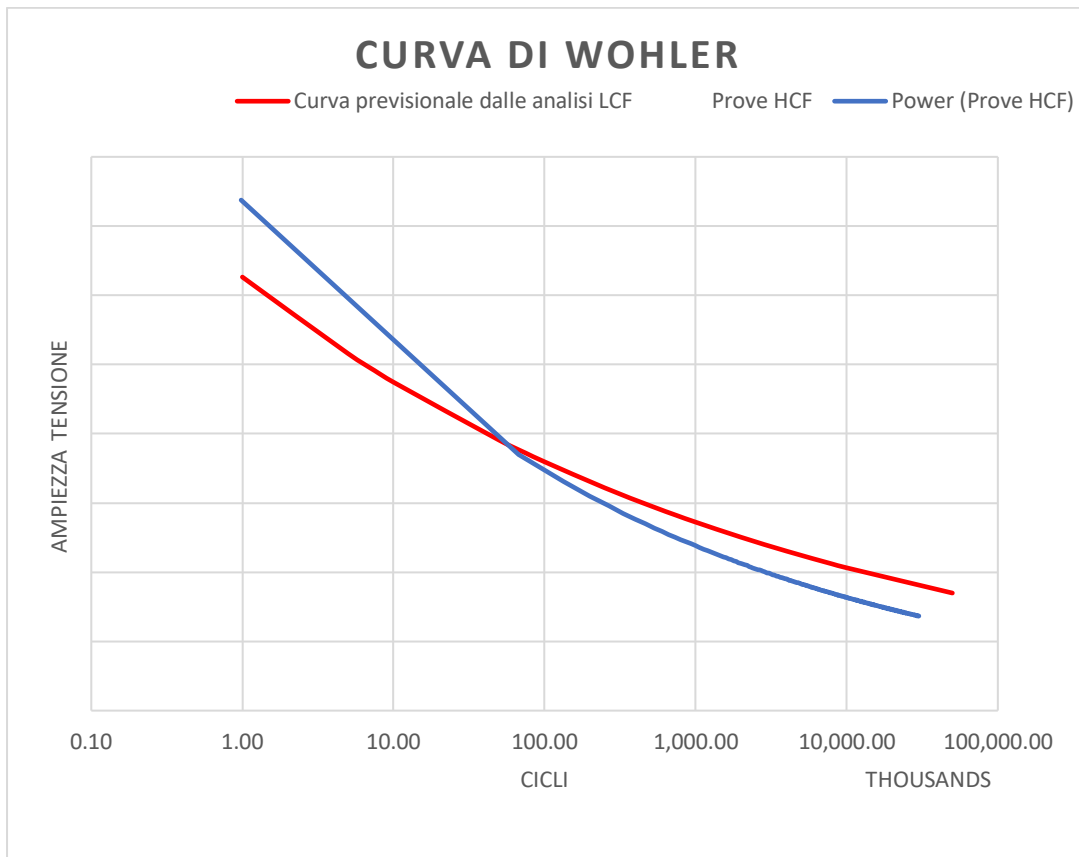


Figura 16. Curva di Wohler sperimentale raffrontata con la curva previsionale ottenuta dalle analisi LCF

Ai valori sperimentali di tensione limite di fatica è opportuno applicare i seguenti coefficienti di riduzione:

- C tensioni triassiali in fase di rottura (tramite il coefficiente di Bridgmann),
- C relativo al volume specifico (in rapporto al volume reale del componente in esercizio)
- C relativo al tipo di carico applicato (flessione, torsione,...)

Ed infine eseguire una correzione statistica valutando il numero di campioni utilizzati e di fiducia tipo T_student oppure mediante i coefficienti e la fiducia di Weibull.

3.3 CONCLUSIONI

Il materiale oggetto di studio ha rilevato micro imperfezioni che possono influenzare negativamente la vita in esercizio del componente finale. Tuttavia tali imperfezioni erano state volutamente introdotte al fine di verificare le caratteristiche meccaniche minime del materiale.

Il fenomeno di addolcimento rilevato nelle curve cicliche è dovuto al fatto che il materiale non è stato disteso correttamente dopo la produzione dei provini. Materiali incruditi/induriti tendono a distendersi/addolcirsi, mentre materiali dolci tendono a subire il fenomeno opposto.

E' stato verificato che sulle superfici sono presenti tensioni residue di elevata entità; tali tensioni vanno considerate nelle ipotesi di deformazione vita.