

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI
BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9 – INGEGNERIA INDUSTRIALE

Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN:

**AFFIDABILITA' E SICUREZZA DELLE COSTRUZIONI
MECCANICHE**

**Procedura numerica per valutare l'effetto
dell'interferenza sulla resistenza a fatica di piatti forati:
applicazione a diversi materiali e a diversi livelli di
forzamento.**

CANDIDATO

William Consorti

RELATORE

Dr. Ing. Giorgio Olmi

CORRELATORI

Prof. Ing. Dario Croccolo

Dr. Ing. Massimiliano De Agostinis

Anno Accademico 2012/2013

Sessione I

1. INTRODUZIONE

La fatica è un fenomeno sovente responsabile del cedimento dei componenti meccanici. Esso è un progressivo cambiamento strutturale, localizzato e permanente, che occorre in componenti dove è presente un carico variabile nel tempo. Questo tipo di sollecitazione può comportare il cedimento del pezzo, nonostante i carichi siano ben inferiori a quelli di rottura o snervamento del materiale. Il fenomeno è aggravato da discontinuità geometriche, come fori, che comportano una concentrazione delle tensioni durante l'esercizio che va compensata con opportuni coefficienti per carichi statici e a fatica [1]. In presenza di discontinuità di questo genere è fondamentale compensare tali effetti negativi: per fare ciò si possono usare diverse tecniche come la "Cold Expansion" (espansione a freddo) o l'"Interference Fit" (connessioni con interferenza). Quest'ultimo processo mira a ridurre l'ampiezza di tensione in prossimità del foro attraverso l'accoppiamento con interferenza foro/perno. Seppur a discapito della tensione media, l'Interference Fit ha già dimostrato, in studi precedentemente condotti su leghe di alluminio (delle serie 2xxx e 7xxx) e in alcuni acciai microlegati, di migliorare notevolmente la vita a fatica dei provini.

L'obiettivo di questa ricerca è quello di indagare, in modo numerico, sul metodo Interference Fit applicato ad acciai facilmente reperibili commercialmente che abbiano diverse caratteristiche meccaniche, quali C40, C60, 34CrMo4 e 42CrMo4. In particolare verrà trattato il legame fra il carico esterno applicato (RemoteStress) e l'ampiezza di tensione media, per diversi livelli di interferenza, svincolando lo studio della vita a fatica, dal numero di

cicli. In passati studi [6] infatti è stato possibile tramite Curve di Calibrazione trovare una correlazione fra la vita a fatica del provino in esame e l'ampiezza di tensione mediata.

2. FATICA

La fatica è un processo in cui vi è un accumulazione del danno causato dalla ciclica applicazione di carichi, che possono essere ben al di sotto del carico di snervamento. Questo processo è potenzialmente pericoloso, poiché l'applicazione statica di un equivalente carico non causerebbe nessun effetto dannoso, perciò la sola analisi statica delle tensioni porterebbe erroneamente ad assumere che il pezzo sia stato correttamente progettato.

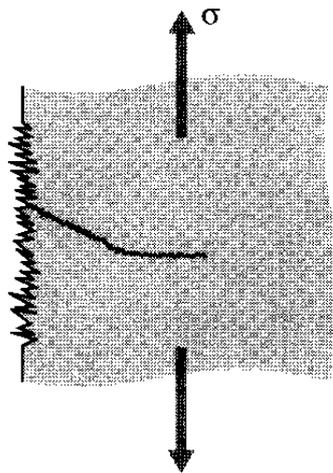


Figura 1 - Illustrazione di frattura a fatica [2]

Il fenomeno della rottura avviene solitamente in tre fasi:

1. Comparsa di piccole imperfezioni e crepe nei punti in cui vi è una concentrazione delle tensioni. Spesso queste imperfezioni si creano durante la lavorazione del materiale.
2. Partendo dalle imperfezioni iniziali vi è una propagazione progressiva delle crepe. Questa fase dipende dai cicli a cui è sottoposto il componente, ed essendo molto lento è pressoché impercettibile.

3. Rottura fragile del pezzo. Questa fase è improvvisa e il componente non presenta nessun tipo di deformazione che possa essere interpretata come segnale di pericolo.

Per prevenire questo fenomeno, spesso vengono effettuati trattamenti superficiali sul pezzo, che riducano le imperfezioni.

E' possibile individuare due principali fattori che influenzano la vita a fatica del componente:

- Cause interne al componente
- Cause esterne

Il primo tipo comprende tutte le caratteristiche del materiale quali, caratteristiche meccaniche, geometria, finitura superficiale e presenza di intagli. Le cause esterne invece comprendono le condizioni di utilizzo, ossia il tipo di carichi a cui è sottoposto il componente.

Caratteristica della sollecitazione.

Il fenomeno della fatica si manifesta soltanto in casi in cui vi siano sollecitazioni variabili nel tempo. Idealmente questa variazione temporale di carico viene rappresentata tramite una curva sinusoidale nel tempo.

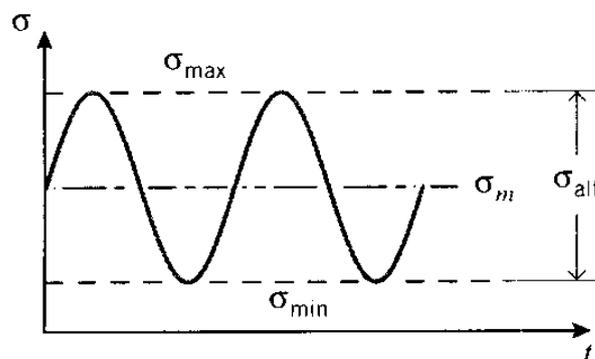


Figura 2 - Andamento Sinusoidale della Tensione [2]

A caratterizzare la curva sono, la tensione media σ_m e l'ampiezza della tensione σ_a . Viene definito un parametro R definito come il rapporto fra tensione minima e massima:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Ad esempio un rapporto di carico equivalente a $R=0,1$, che spesso viene utilizzato per studiare il comportamento di componenti nell'industria aeronautica, corrisponderà ad un ciclo di tensione in cui $\sigma_{\min} = 0.1 * \sigma_{\max}$.

CURVE S-N

Per determinare la vita a fatica di un componente, vengono determinate sperimentalmente delle curve S-N che legano il numero di cicli N, espressi in scala logaritmica, che il provino può sopportare a determinati valori di Ampiezza di tensione.

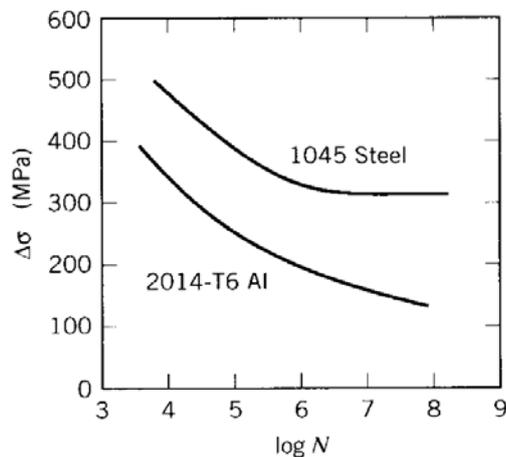


Figura 3 - Esempio Curve S-N [2]

In alcuni materiali, sotto determinati valori di ampiezza la curva di fatica si appiattisce, facendo in modo che il materiale abbia una vita a fatica teoricamente infinita.

I test per determinare il comportamento a fatica di un materiale sono molto lunghi e spesso per raccogliere dati rilevanti è necessario testare numerosi provini, per diversi valori di carico. Il carico viene inoltre generalmente applicato a circa 10Hz, poiché a frequenze maggiori l'inerzia della macchina che testa i provini e il calore generato potrebbero diventare un problema. A questi livelli di frequenza si impiegherebbero 11,6 giorni per raggiungere 10^7 cicli [2]. Questo rende la determinazione delle curve S-N un processo estremamente lungo e costoso.

3. STATO DELL'ARTE

Diversi studi sono stati condotti per trovare soluzioni che migliorassero la resistenza a fatica di componenti forati. Una di queste soluzioni è la "Cold Expansion" o Espansione a freddo. Questa tecnica consiste nel far passare, prima dell'assemblaggio, un perno, di dimensioni maggiori rispetto al foro, nel foro di fissaggio stesso. Il perno viene fatto passare da una parte all'altra del foro, comportando la nascita di una tensione tangenziale residua di compressione attorno al foro di fissaggio. Questa tensione ha lo scopo di ridurre la tensione risultante attorno al foro di fissaggio quando i componenti sono sottoposti a cicli di tensione variabili nel tempo.

Un'altra possibile soluzione, che verrà trattata più approfonditamente nel seguente lavoro, è quello dell' "Interference Fit", o montaggio con interferenza. A differenza dell'espansione a freddo, la spina non viene rimossa ma rimane fissata per interferenza nel foro, subendo anch'essa il ciclo di tensione variabile nel tempo. Come la Cold Expansion, anche l'Interference Fit ha lo scopo di creare tensioni residue in prossimità del foro. Queste tensioni da un lato aumentano la tensione media di un ciclo, ma dall'altro comportano il beneficio di ridurre l'ampiezza di tensione, che come noto ha l'influenza maggiore sulla vita a fatica del componente.

I precedenti studi sono sempre stati condotti seguendo una duplice strada:

- Prove sperimentali di resistenza a fatica su macchine apposite
- Simulazioni numeriche con software ad elementi finiti

Attraverso questo metodo, da risultati ottenuti in precedenti studi [6], è stato possibile trovare una relazione diretta fra il numero di cicli che il provino riusciva a sopportare prima della rottura e l'ampiezza di tensione mediata.

PROVE SPERIMENTALI

Nelle prove sperimentali condotte, il livello di interferenza è stato variato mantenendo costanti le dimensioni del foro e cambiando quelle della spina inserita. Ciò è stato fatto per studiare la risposta della vita a fatica del materiale, al variare del livello di interferenza.

L'interferenza I è definita come:

$$I = \frac{d - D}{d} \cdot 100$$

In cui D e d rappresentano rispettivamente il diametro del foro nel provino e il diametro della spina.

Nei passati studi [3] è stato riscontrato una diminuzione dell'ampiezza di tensione all'aumentare dei valori di interferenza. La vita a fatica del provino perciò presenta un sostanziale miglioramento fino a determinati valori di interferenza, oltre i quali la vita del componente ha un andamento pressoché asintotico, e l'ulteriore aumento di interferenza genera solamente un aumento della tensione media.

ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

Con lo scopo di verificare i risultati ottenuti, alle prove pratiche sono sempre state affiancate simulazioni agli elementi finiti. Questa tecnica di tipo numerico, ha come scopo quello di trovare soluzioni approssimate di

problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo quest'ultime a un sistema di equazioni algebriche. Le simulazioni condotte hanno confermato i risultati trovati con le prove pratiche, evidenziando l'andamento asintotico della vita a fatica del provino oltre determinati valori di interferenza.

Dai risultati ottenuti con l'analisi agli elementi finiti si è osservato che l'accoppiamento tramite interferenza fra spina e foro può lasciare, a seconda del valore dell'interferenza, tensioni di trazione, di compressione o entrambi in un intorno del foro.

Una differenza importante è presente tra i vari studi è che in qualcuno di essi l'analisi FEM è stata effettuata lungo due dimensioni (2D) [4] mentre in altri, in tre (3D)[5]. Nelle ricerche di quest'ultimo tipo si è potuto analizzare come varia la tensione attraverso lo spessore del provino e quindi si è capito quale sia il punto più sollecitato lungo la terza dimensione. Si è trovato che questo coincide con la posizione di ingresso della spina. Pur essendoci un'ampiezza di tensione simile agli altri, in quel punto la tensione media è maggiore, e quindi è quella la posizione in cui, nel caso in cui il perno sia collegato per interferenza al provino, la probabilità di nascita della cricca è maggiore.

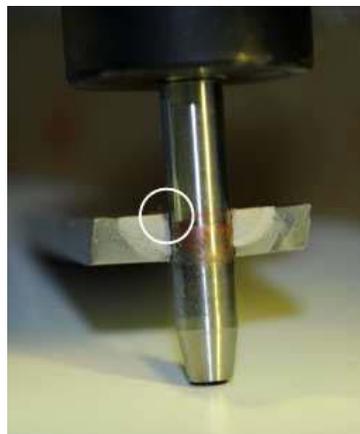


Figura 4: all' interno del cerchio si nota facilmente il punto da cui è partita la cricca [4]

Grazie all'uso di un software FEM 3D lungo la profondità del provino, si è cercato inoltre di indagare come variasse la tensione mantenendosi su uno stesso piano e allontanandosi dal foro. Sono stati tre i piani in cui sono state eseguite le simulazioni: il piano di ingresso della spina, quello di uscita e il piano mediato tra i due.

I riscontri dati dalle analisi effettuate hanno mostrato come la tensione nei vari piani dipenda anch'essa dal valore di interferenza con cui sono stati accoppiati il provino e la spina. Come mostrano i grafici la tensione tangenziale creatasi a causa dell'accoppiamento non è costante attraverso lo spessore. Per un grado di interferenza basso la tensione è di trazione in tutti e tre i piani, mentre invece all'aumentare dell'interferenza diventa di compressione nel piano mediato attorno al foro. Lo stato di compressione inoltre aumenta la sua estensione lungo uno stesso piano all'aumentare dell'interferenza.

Ciò potrebbe dipendere dal fatto che la spina, di grandezza superiore rispetto al foro, spinga verso l'esterno le parti attorno al foro creando quindi in esse uno stato compressivo.

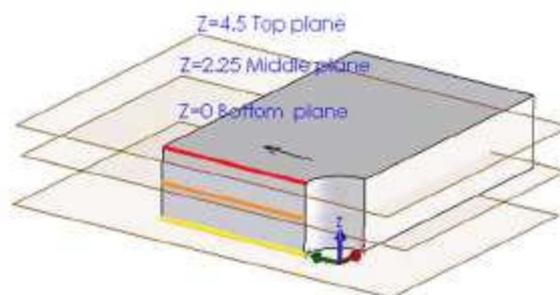


Figura 5: i tre piani su cui sono state effettuate le simulazioni [5]

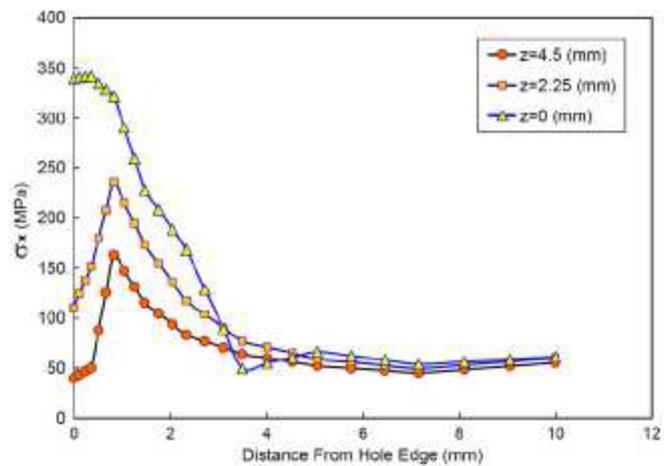


Figura 6: andamento dello stato tensionale in funzione della distanza dal foro per I=1% [5]

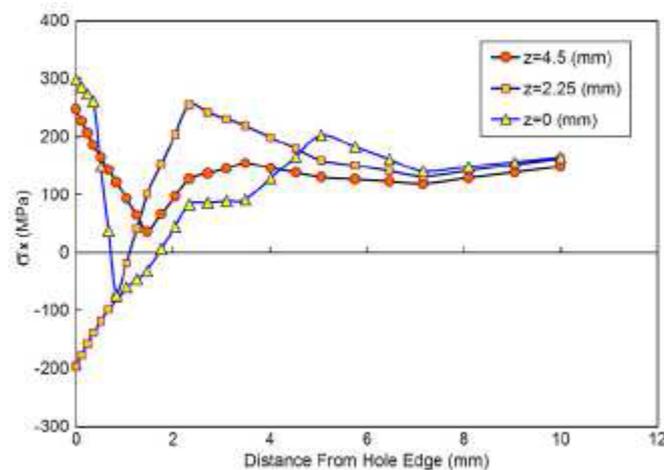


Figura 7: andamento dello stato tensionale in unzione della distanza dal foro con I=4% [5]

Infine è importante ricordare che nella quasi totalità di questi studi, si è usato come materiale una lega di alluminio (2xxx o 7xxx soprattutto).

STUDIO SULL' ACCIAIO MICROLEGATO

Sugli acciai (in particolare acciaio microlegato), sono stati eseguiti studi sperimentali e numerici per la determinazione della vita a fatica. Questa ricerca si è occupata di determinare la relazione fra l'ampiezza di tensione locale mediata e il numero di cicli per ogni livello di interferenza [6].

I dati sono stati raccolti, prima tramite test sperimentali di fatica eseguiti su provini di tipo "Open Hole" (OH) e I06 (interferenza dello 0,6%), quindi attraverso prove mediante l'uso di un programma agli elementi finiti. Dai dati ricavati è stato possibile trovare una relazione lineare fra Numero di Cicli e Ampiezza di tensione mediata. Fissato un numero di cicli infatti il valore di Ampiezza di tensione rimane pressoché invariato per i casi OH e con Interferenza. La curva che lega questi due valori è stata chiamata "Curva di calibrazione (Figura 8).

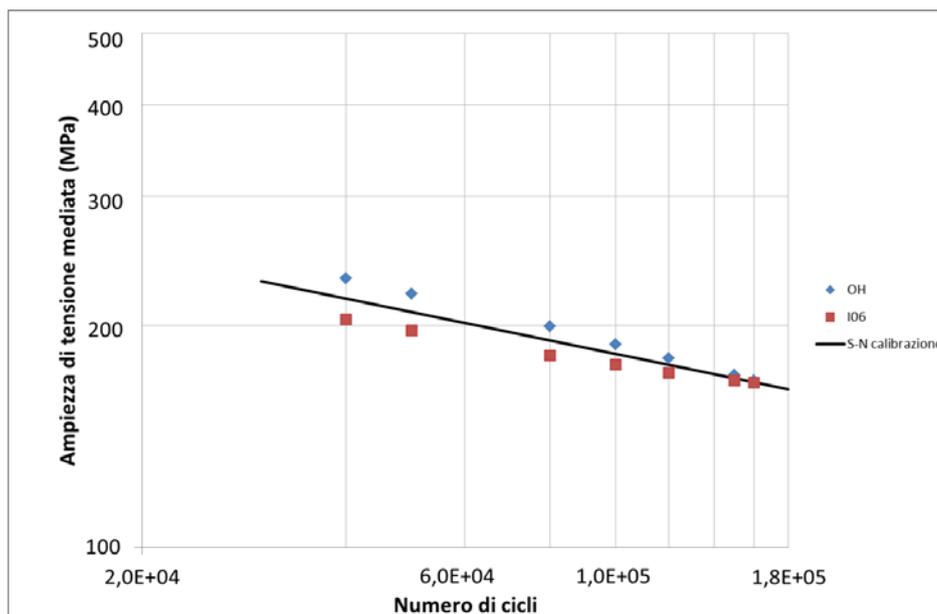


Figura 8 - Curva di Calibrazione (Acciaio Microlegato) [6]

Per valutare a fondo il comportamento del materiale si è deciso poi di compiere simulazioni FEM per molti altri livelli di interferenza, e per ognuno di essi, considerare diversi livelli di carico massimo (RS_{max} =tensione nominale massima lontano dal foro). Lo scopo di tale lavoro era quello di trovare la formulazione analitica delle curve S-N per vari livelli di interferenza, così da poter valutare l'effetto dell'interferenza sulla vita a fatica. I dati raccolti miravano in particolare a trovare (tramite una procedura che verrà in seguito spiegato nel capitolo "METODI"), per ogni livello di interferenza, l'Ampiezza di tensione mediata corrispondente alla Remote Stress applicata sul provino.

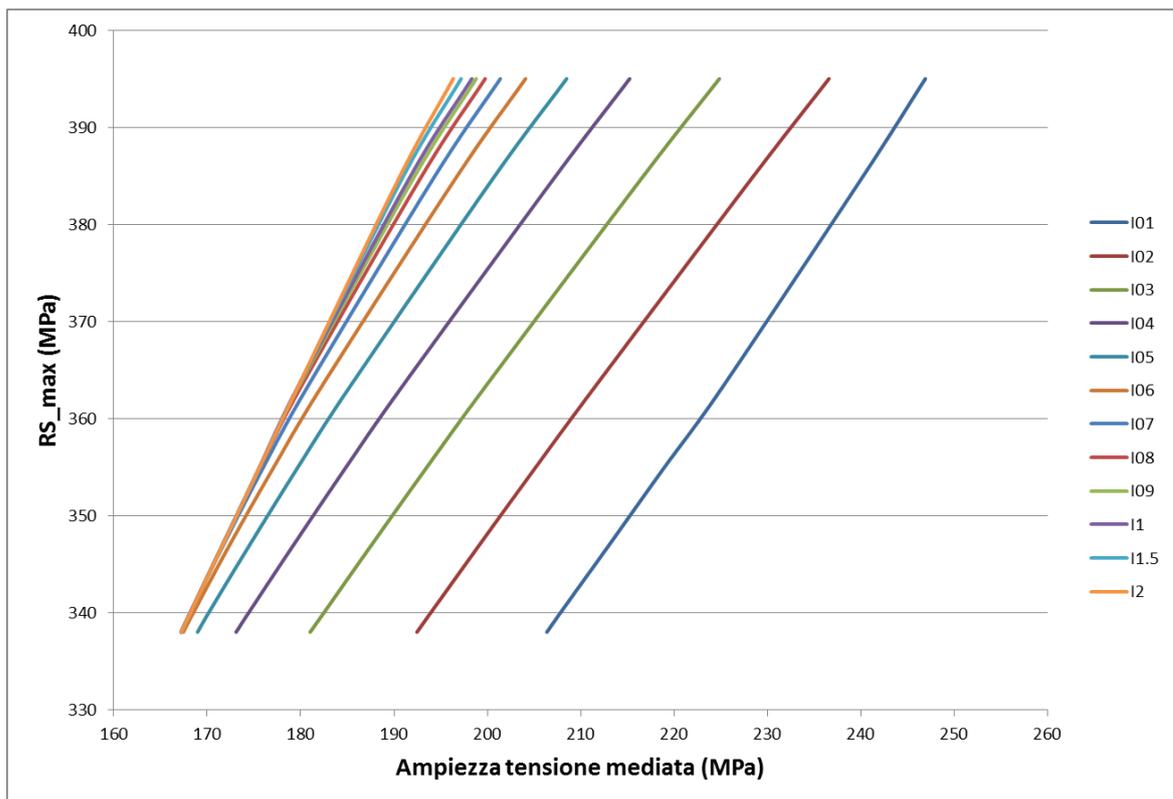


Figura 9 - Curve di Ampiezza di tensione mediata

Note queste curve e la curva di calibrazione, risulta immediato trovare le curve S-N che legano quantitativamente le RS_{max} al numero di cicli che il componente può sopportare.

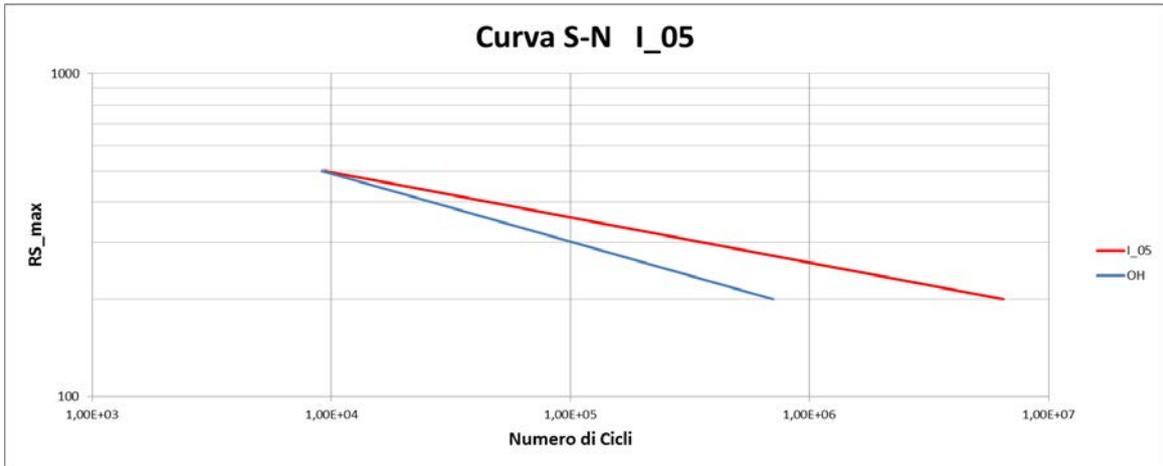


Figura 10 Esempio di Curva S-N estrapolata

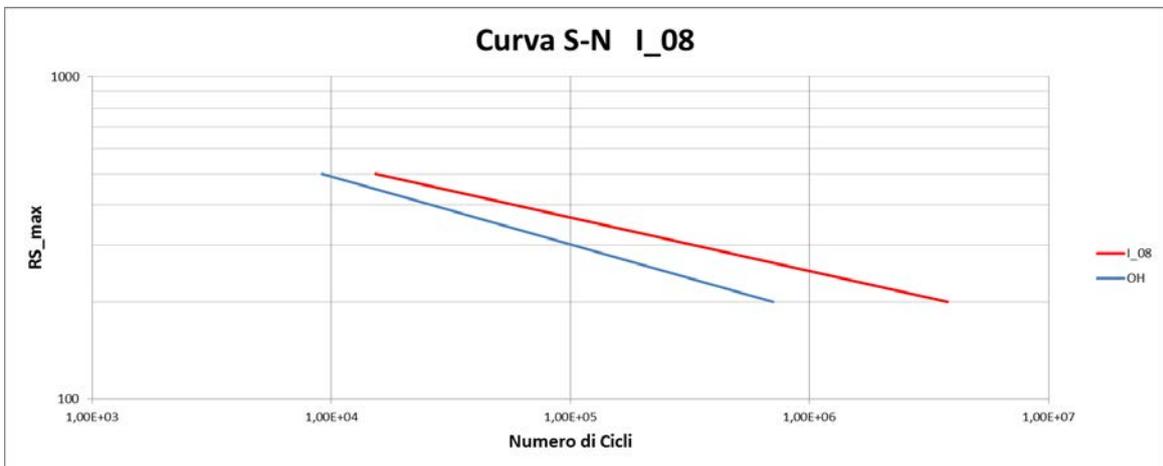


Figura 11 Esempio di Curva S-N estrapolata

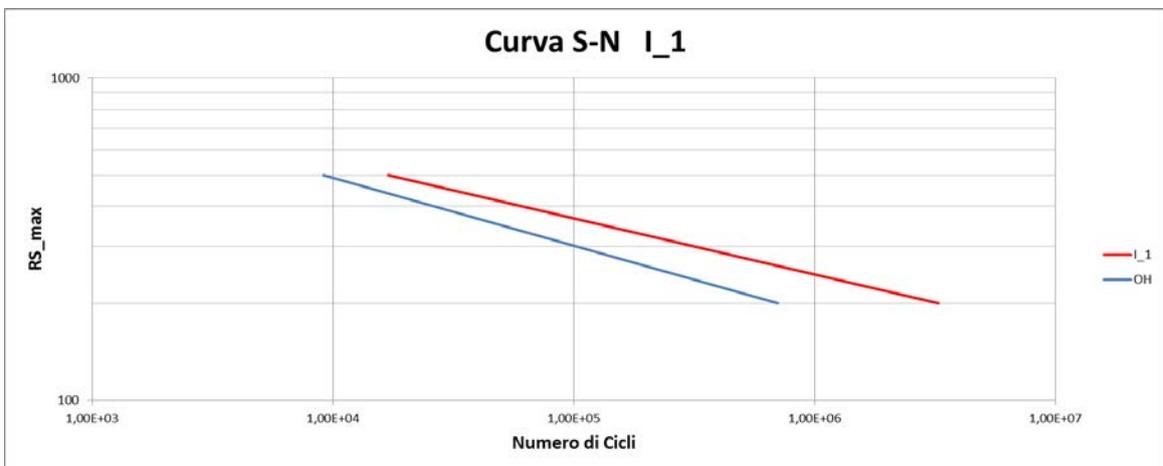


Figura 12 Esempio di Curva S-N estrapolata

4. OBIETTIVI

Precedenti ricerche hanno dimostrato l'effetto benefico che l'accompiamento tramite interferenza ha su un componente forato. E' stata trovata inoltre una netta relazione fra Ampiezza di Tensione e Numero di cicli che un componente riesce a sopportare prima della rottura.

Partendo da queste nozioni, dato l'elevato costo di prove sperimentali, si è voluto studiare un metodo numerico che potesse indagare in maniera qualitativa l'effetto dell'interferenza sul componente forato, in particolare trovando la relazione fra Ampiezza di tensione mediata e Remote Stress applicata sul provino. Per trovare tale metodo è stata scelta l'analisi agli elementi finiti.

Il seguente lavoro si pone come obiettivo quello di sviluppare un modello che permetta di valutare in maniera qualitativa l'effetto dell'interferenza su acciai reperibili commercialmente (da normativa EN UNI 10083), con proprietà meccaniche diverse fra loro. Per fare ciò verranno studiate le relazioni che legano l'Ampiezza di tensione mediata con la RS applicata. L'analisi sarà svincolata dal numero effettivo di cicli che il componente può sopportare, nonostante ciò darà una chiara idea dell'effetto che l'interferenza ha sull'ampiezza di tensione mediata, e quindi della vita a fatica del componente.

5. MATERIALI

I materiali utilizzati per gli studi condotti virtualmente comprendono sia acciai non-legati che basso-legati della normativa europea EN 10083. La scelta del materiale è stata fatta in base alle proprietà meccaniche. Per gli acciai non-legati sono stati utilizzati:

- **C40 Normalizzato** (da UNI EN 10083-2) - con seguenti caratteristiche statiche: Carico di rottura $S_u=580$ MPa, limite allo snervamento $S_y=320$ MPa, elongazione percentuale $A%=16\%$
- **C60 Bonificato** (da UNI EN 10083-2) - con seguenti caratteristiche statiche: Carico di rottura $S_u=850$ MPa, limite allo snervamento $S_y=580$ MPa, elongazione percentuale $A%=11\%$

Per gli acciai basso-legati sono invece stati usati:

- **34CrMo4 Bonificato** (da UNI EN 10083-3) - con seguenti caratteristiche statiche: Carico di rottura $S_u=1100$ MPa, limite allo snervamento $S_y=800$ MPa, elongazione percentuale $A%=11\%$
- **42CrMo4 Bonificato** (da UNI EN 10083-3) - con seguenti caratteristiche statiche: Carico di rottura $S_u=1200$ MPa, limite allo snervamento $S_y=900$ MPa, elongazione percentuale $A%=10\%$

In tutti i materiali è stato considerato un modulo di Young di $E=206$ GPa, un coefficiente di Poisson $\nu=0,3$, densità $\rho=7.850$ kg/m³. Tranne il C40 tutti gli acciai sono stati considerati allo stato di bonifica secondo normativa.

Il trattamenti termici effettuati sui metalli presi in esame sono stati considerati nel rispetto della normativa, con i seguenti parametri:

Table 13 — Heat treatment^a

Steel designation		Quenching ^{b,c}	Quenching ^d	Tempering ^e	End quench test	Normalizing ^f
Name	Number	°C	agent	°C	°C	°C
Quality steels						
C35	1.0501	840 to 880	Water or oil	550 to 660	-	860 to 920
C40	1.0511	830 to 870			-	850 to 910
C45	1.0503	820 to 860			-	840 to 900
C55	1.0535	810 to 850	Oil or water		-	825 to 885
C60	1.0601	810 to 850			-	820 to 880

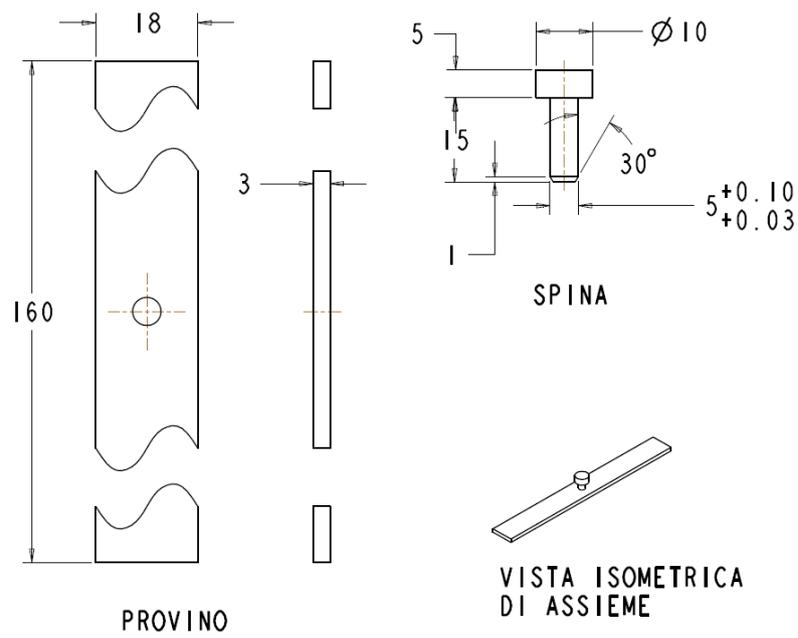
Figura 13 - Tabella TT da UNI EN 10083-2

prospetto 11 **Trattamento termico^{a)}**

Designazione dell'acciaio ^{b)}		Tempra ^{c),d)}	Agenti di tempra ^{e)}	Rinvenimento ^{f)}	Prova di tempra ad una estremità
Designazione simbolica	Designazione numerica	°C		°C	°C
38Cr2	1.7003	da 830 a 870	Olio o acqua	da 540 a 680	850 ± 5
46Cr2	1.7006	da 820 a 860	Olio o acqua	da 540 a 680	850 ± 5
34Cr4 34CrS4	1.7033 1.7037	da 830 a 870	Acqua o olio	da 540 a 680	850 ± 5
37Cr4 37CrS4	1.7034 1.7038	da 825 a 865	Olio o acqua	da 540 a 680	850 ± 5
41Cr4 41CrS4	1.7035 1.7039	da 820 a 860	Olio o acqua	da 540 a 680	850 ± 5
25CrMo4 25CrMoS4	1.7218 1.7213	da 840 a 900	Acqua o olio	da 540 a 680	850 ± 5
34CrMo4 34CrMoS4	1.7220 1.7226	da 830 a 890	Olio o acqua	da 540 a 680	850 ± 5
42CrMo4 42CrMoS4	1.7225 1.7227	da 820 a 880	Olio o acqua	da 540 a 680	850 ± 5
50CrMo4	1.7228	da 820 a 870	Olio	da 540 a 680	850 ± 5

Figura 14 Tabella TT da UNI EN 10083-3

I provini considerati sono di tipo piano con foro calibrato e sono accoppiati con una spina, il cui diametro è regolato per variare l'interferenza.



Il foro, praticato al centro del provino è stato mantenuto ad un diametro di 5mm. Il diametro della spina invece è stato variato in base all'off-set richiesto dai vari livelli di interferenza.

5. CALCOLO NUMERICO

La procedure di test in laboratori su provini reali è un processo estremamente dispendioso in termini di tempo e denaro. Il test per determinare la vita a fatica di un provino può durare diversi giorni. Per questo motivo si è deciso di adottare una soluzione alternativa negli studi della vita a fatica di provini, utilizzando un software agli elementi finiti, più precisamente Ansys WorkBench, allestendo una procedura di determinazione virtuale delle curve S-N.

L'analisi agli elementi finiti si basa su una tecnica atta a cercare soluzioni approssimate per problemi ingegneristici descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendole ad un sistema di equazioni algebriche. Questo è possibile discretizzando il componente in esame tramite una fitta griglia (detta Mesh) di dimensioni finite. Ogni primitiva (elemento finito) di questa griglia ha una forma codificata, che può essere triangolare o quadrilaterale (per analisi 2D), oppure esaedrica o tetraedrica (per analisi 3D). Su ognuno di questi elementi finiti, la soluzione è espressa tramite combinazione lineare di funzioni. Poiché questa discretizzazione è comunque un'approssimazione della soluzione reale, più fitta è la mesh, più la soluzione sarà precisa (a discapito di un aumento del costo computazionale).

Comunemente a tutti i software, l'analisi della soluzione tramite FEM è suddivisa in tre parti:

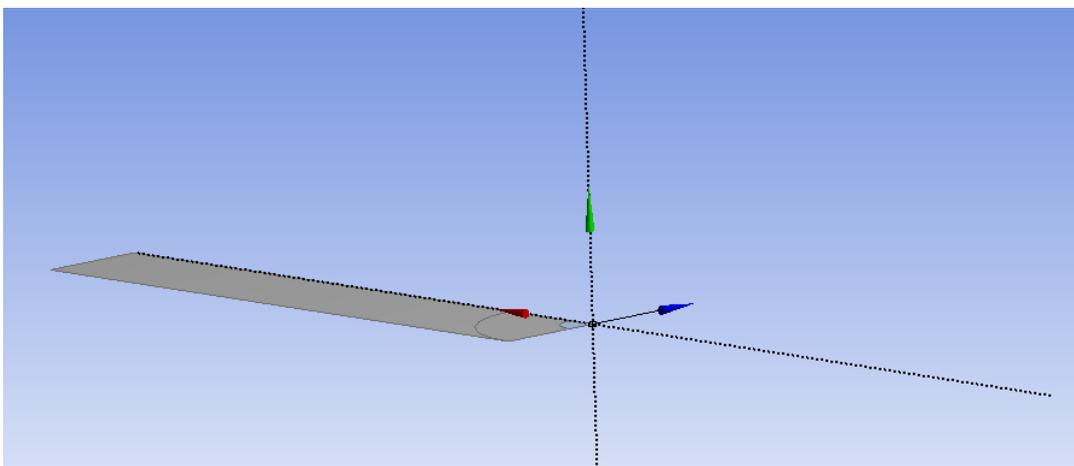
- Pre-processing, in cui è costruito il modello agli elementi finiti. In questa fase vi è il passaggio dal modello fisico che si vuole analizzare, al modello matematico.
- Processing, in cui vi è la risoluzione del problema agli elementi finiti
- Post-processing, in cui la soluzione è elaborata e rappresentata.

MODELLO

Il modello utilizzato nelle simulazioni agli elementi finiti è quello usato già in precedenza per test simili su altri materiali. Esso è stato costruito cercando di mantenerlo più possibilmente simile ai provini utilizzati nelle prove fisiche, ma allo stesso tempo cercando di adattarlo il più possibile alle necessità del software di analisi FEM. Per fare ciò nel modello sono state introdotte due importanti approssimazioni:

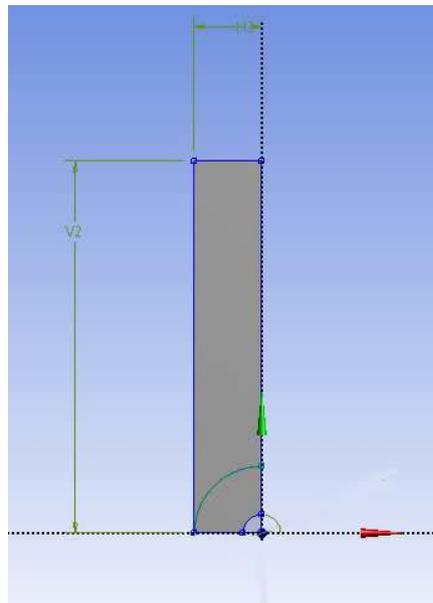
1. Eliminazione della terza dimensione del provino (spessore).
2. Considerazione di soltanto un quarto del provino.

L'eliminazione della terza dimensione del provino permette di avere un modello con soltanto due dimensioni. In questo modo è possibile eseguire una simulazione FEM in 2D anziché 3D, con una notevole diminuzione di costo computazionale.



Questo è consentito poiché lo stato tensionale del provino, almeno in prima approssimazione, può essere considerato piano, dato che lungo la direzione Z non sono presenti tensioni.

Con la seconda approssimazione sono stati individuati due assi di simmetria, verticale e orizzontale, passanti per il centro del foro. Le tensioni avrebbero quindi andamento simmetrico, ed il calcolo su tutto il provino completo perciò risulterebbe superfluo.



Per questo motivo sono state eliminate le parti simmetriche ed è stato mantenuto soltanto un quarto del provino originale, con dimensione di pari ad un'altezza di 50mm e una larghezza di 9mm (con raggio foro di 2,5mm).

Grazie a queste approssimazioni sono stati notevolmente diminuiti i costi computazionali del calcolatore, mantenendo tuttavia affidabili i risultati ottenuti.

6. METODI

ENGINEERING DATA - PROPRIETA' MATERIALI

Dentro al modello ANSYS sono stati inizialmente memorizzati i parametri degli acciai che andavano testati. Per fare ciò sono stati importati i dati relativi a: densità, coefficiente di espansione termica, Modulo di Young e coefficiente di Poisson.

Properties of Outline Row 3: 34CrMo4 bonificato					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Density	7850	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Reference Temperature	22	C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Isotropic Elastidty			<input type="checkbox"/>	
7	Young's Modulus	2,06E+05	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Poisson's Ratio	0,3		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>	
10	Yield Strength	800	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Tangent Modulus	2727,3	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Oltre a questi valori, si è dovuto costruire le curve Bilineari per ogni metallo. Per fare ciò sono stati inseriti lo "Yeald Strength" (o carico di Snervamento) S_y ed il "Tangent Modulus". Esso è determinato utilizzando, il carico di snervamento S_y , il carico di rottura S_u d il valore dell'elongazione percentuale $A\%$ tramite la formula:

$$Tangent Modulus = \frac{S_u - S_y}{A}$$

Per i diversi sono stati calcolati i seguenti valori:

Acciaio	Tangent Modulus (MPa)
C40 Normalizzato	1625
C60 Bonificato	2455
34CrMo4 Bonificato	2727
42CrMo4 Bonificato	3000

Questi valori hanno generato le seguenti curve bilineari per gli acciai:

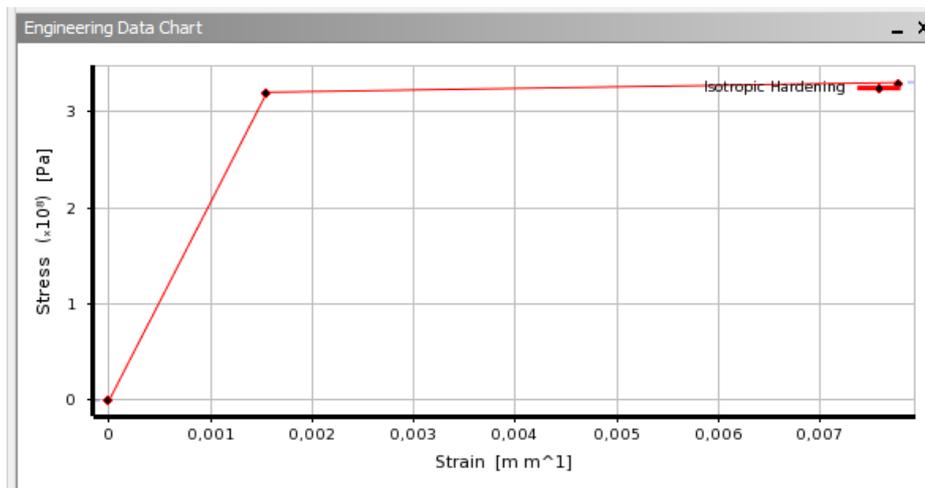


Figura 15 - Curva Bilineare C40 Normalizzato

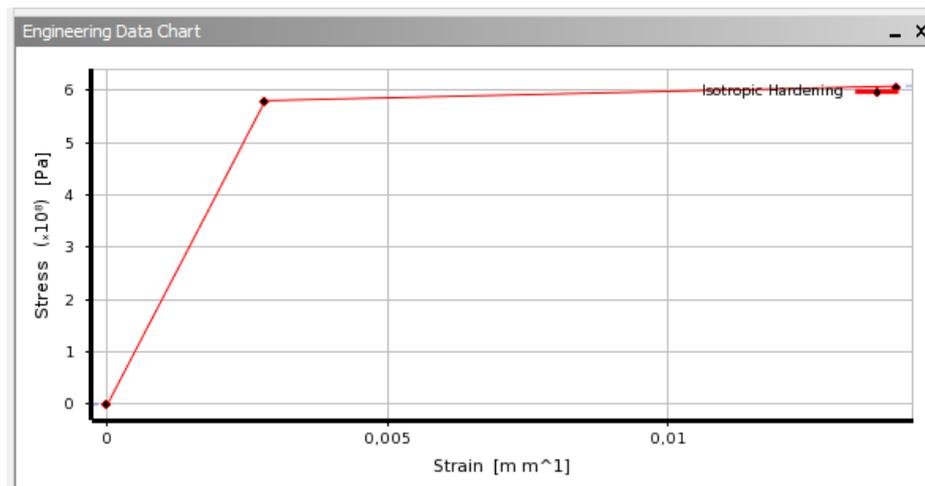


Figura 16 - Curva Bilineare C60 Bonificato

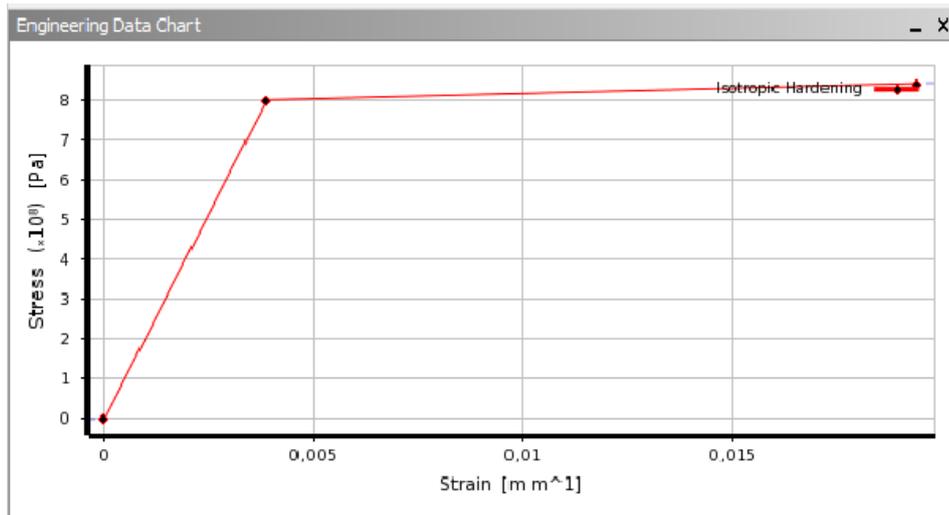


Figura 17 - Curva Bilineare 34CrMo4 Bonificato

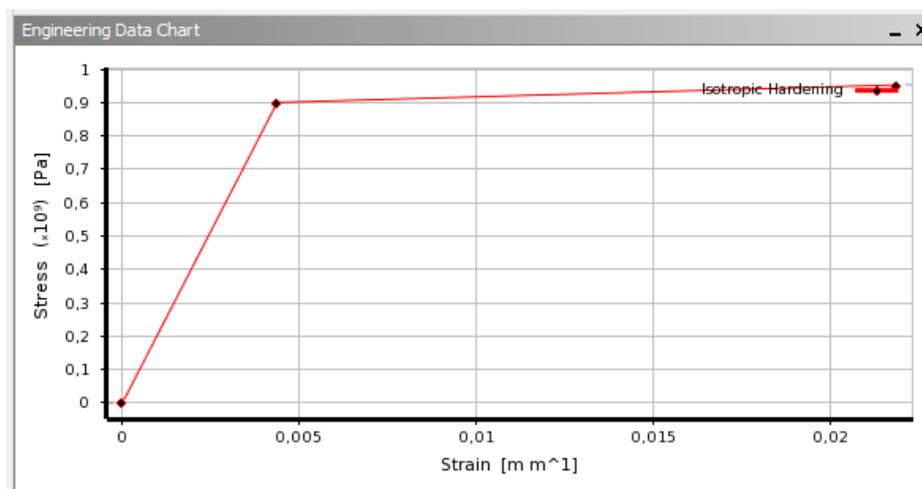


Figura 18 - Curva Bilineare 42CrMo4 Bonificato

PARAMETRI DELLE SIMULAZIONI

Scelto il materiale della piastra, prima di poter andare a modificare i valori dell'interferenza, si è dovuto modificare il parametro che stabilisse il tipo di contatto presente fra foro e perno. Il contatto fra i due è stato posto di tipo "frictionless", ossia senza attrito fra le due superfici di contatto.

Per variare i livelli di interferenza in ogni simulazione, si è dovuto modificare un valore detto di "Off-Set". Esso non è altro che la differenza fra d ="diametro perno" e D ="diametro foro".

$$Offset = d - D$$

Per trovare questo valore in ogni livello di interferenza, si partiti dalla formula dell'inteferenza stessa:

$$I\% = \frac{d - D}{D} \cdot 100$$

In cui è già presente il valore di offset. Per adattare però questo valore al provino inserito nel modello si è dovuto dividere il valore dell'offset a metà, peichè è rappresentato solo parte del provino.

La formula finale per determinare l'offsett perciò diventa:

$$Offset = \frac{1}{2} \frac{I\%}{100} D$$

I valori di offset calcolati per ogni livello di interferenza sono i seguenti.

I%	Offset (mm)
OH	0
0,02	0,0005
0,04	0,001
0,06	0,0015
0,08	0,002
0,1	0,0025
0,2	0,005
0,3	0,0075
0,4	0,01
0,5	0,0125
0,6	0,015
0,8	0,2
1	0,025
1,5	0,0375
2	0,05

L'ultimo parametro modificato per i test è stato il carico esterno sul provino, o Remote Stress. Per simulare un andamento ciclico e con un rapporto di carico pari a $R=0.1$, la tensione minima è stata posta pari al 10% di quella massima.

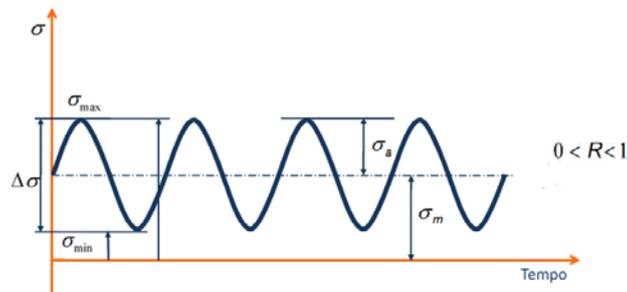


Figura 19 - Andamento sinusoidale delle tensioni

Questo vuol dire che il provino è stato mantenuto sempre in trazione durante le variazioni di carico.

Durante le simulazioni, l'andamento del carico è stato suddiviso in tre parti:

1. Forzamento della spina nel foro.
2. Aumento lineare della Remote Stress fino al livello massimo di carico.
3. Riduzione lineare della Remote Stress fino al livello minimo di carico.

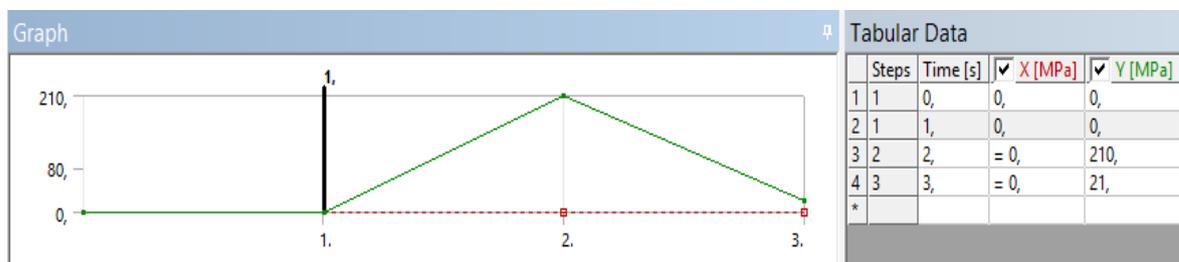


Figura 20 - Andamento del carico per un RSmax di 210MPa

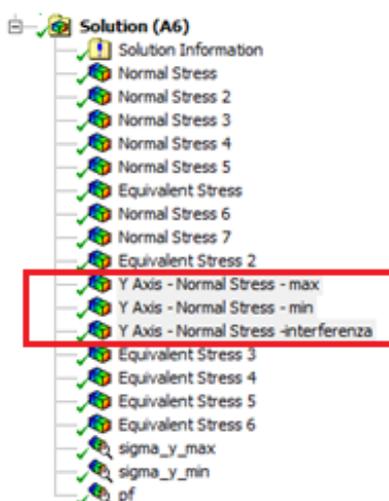
I carichi utilizzati durante le prove variano in base al tipo di materiale preso in considerazione e vanno da un massimo di $RS_{max}=390\text{MPa}$ ad un minimo di $RS_{min}=90\text{MPa}$, con step intermedi di 30MPa .

Da queste simulazioni sono stati esportati dati relativi a tre stati:

- Step 1 - Stato tensionale del provino con interferenza (senza Remote Stress).
- Step 2 - Stato tensionale del provino con RS_{max} .
- Step 3 - Stato tensionale del provino con RS_{min} (pari a $0,1 \times RS_{max}$).

ESPORTAZIONE E ELABORAZIONE DATI

Impostati tutti i parametri per un dato livello di Interferenza e carico, viene avviata la simulazione per calcolare le soluzioni. Al termine del calcolo vengono salvati, sotto forma di file di testo, 3 soluzioni delle tensioni lungo l'asse Y, relative ai 3 step considerati.



Ovviamente questa procedura deve essere ripetuta per tutti i valori di carico, di tutti i livelli di interferenza considerati.

I 3 file di testo salvati per i 3 diversi step vengono poi processati nel seguente modo:

1. Apertura dei file di testo tramite Excel.
2. Riorganizzazione dei valori di tensione lungo le ascisse, in ordine crescente dal centro del foro, fino al bordo del provino.
3. Unione dei 3 step in un unico foglio di calcolo.

In questo ultimo foglio di calcolo, rinominato con il livello di interferenza considerato, sono stati creati i grafici degli andamenti delle tensioni man

mano che ci si allontana dal bordo del foro. Nel grafico sottostante, è possibile vedere l'andamento del carico per un'interferenza $I=0,5\%$ con un valore di carico massimo $RS_{max}=270$ MPa, relativo ad un provino in C60 Bonificato.

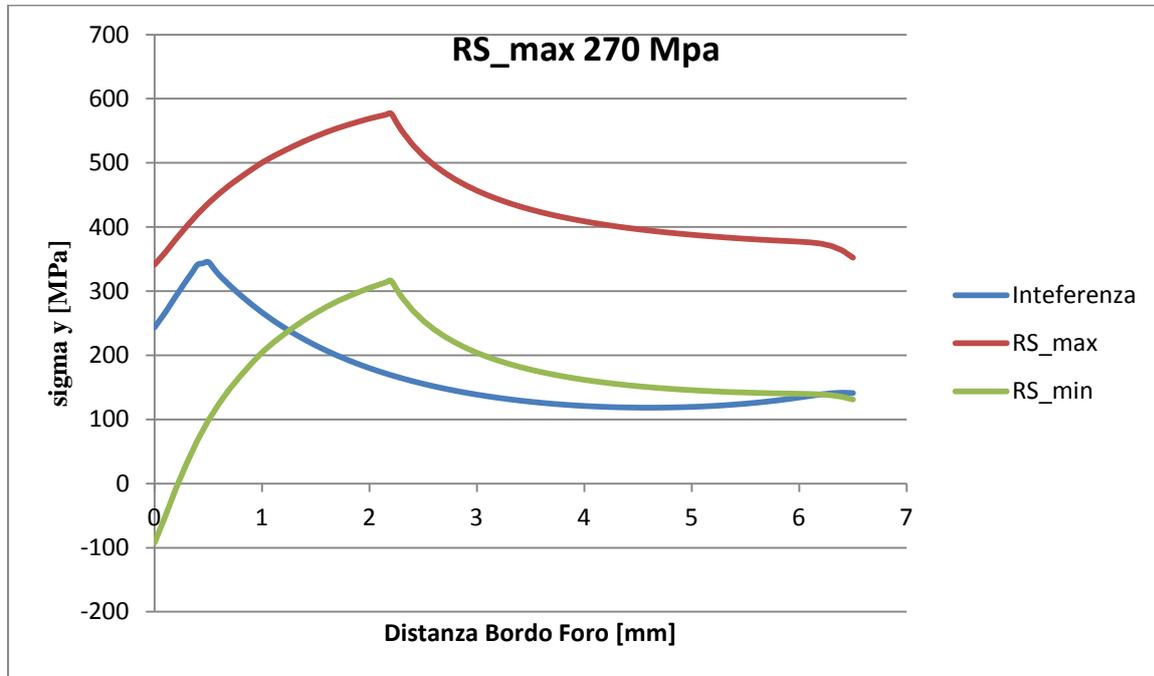


Figura 21- Andamento tensioni C60 con $I\%=0,5$

Da questi grafici, tramite il foglio di calcolo sono stati calcolati il "Sotto Curva", l'integrale cumulato e la media integrale.

Il "sotto curva" rappresenta l'area del trapezoide sottostante alla curva ed equivale a:

$$sotto\ curva = \frac{(b + B) \cdot h}{2}$$

Con B e b rispettivamente la base maggiore e minore del trapezoide, equivalenti a due valori di tensione σ_y contigui. h invece rappresenta la distanza fra i due punti di tensione considerati, equivalente a 0,05mm nei dati raccolti.

La somma di tutte queste aree sottostanti alla curva, da il valore dell'integrale cumulato definito come:

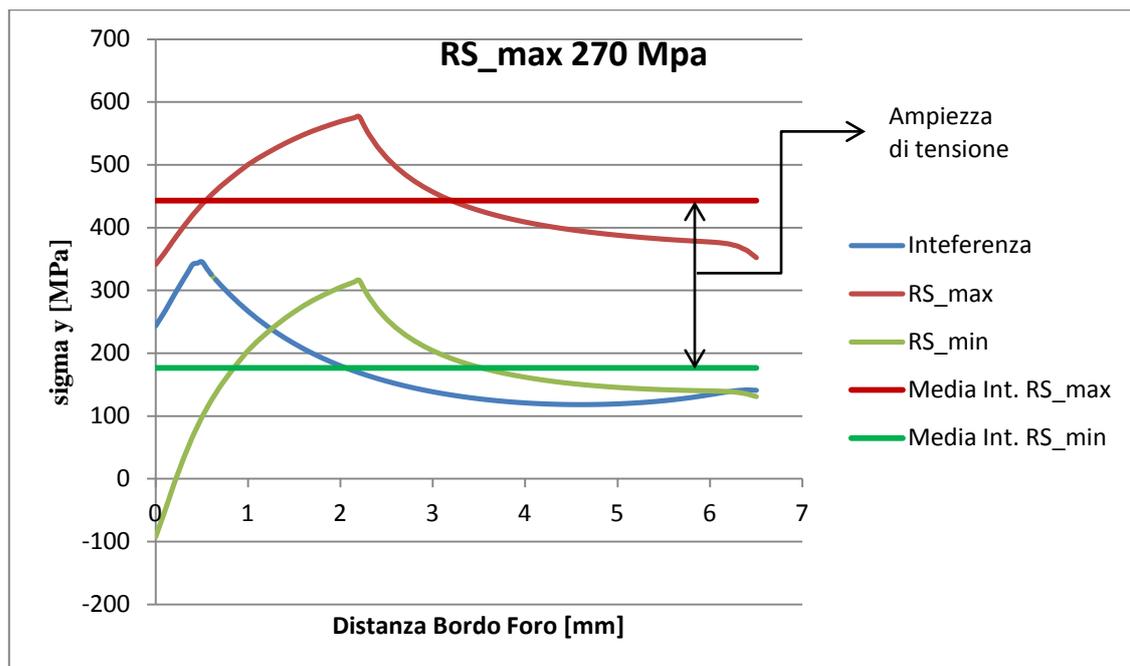
$$integrale\ cumulato = \sum_{i=1}^n sottocurva\ i$$

Con n equivalente al numero di trapezoidi presenti fra il bordo del foro, e il bordo del provino.

Ultimo valore calcolato è poi la media integrale. Essa è il rapporto fra l'integrale cumulato e il dominio di integrazione, che in questo caso va da 0 (bordo del foro) fino a 6,5 (bordo del provino).

$$media\ integrale = \frac{\sum_{i=1}^n sottocurva\ i}{dominio\ di\ integrazione}$$

Questi valori sono calcolati per ognuno dei 3 step, in modo da poter trovare i valori della media integrale per i due valori di carico, massimo e minimo.



A questo punto è immediato calcolare l'ampiezza di tensione locale mediata e la tensione media usando le formule:

$$\text{ampiezza di tensione} = \frac{(\text{media int max} - \text{media int min})}{2}$$

$$\text{tensione media} = \frac{(\text{media int max} + \text{media int min})}{2}$$

In cui “media int_{max}” e “media int_{min}” sono rispettivamente i valori della tensione locale mediata sull’intera superficie ai carichi massimo e minimo.

7. RISULTATI

Calcolata l'ampiezza di tensione mediata, per ogni livello di interferenza e di carico nei quattro diversi materiali, si è costruito un foglio di calcolo, che riassume i risultati ottenuti.

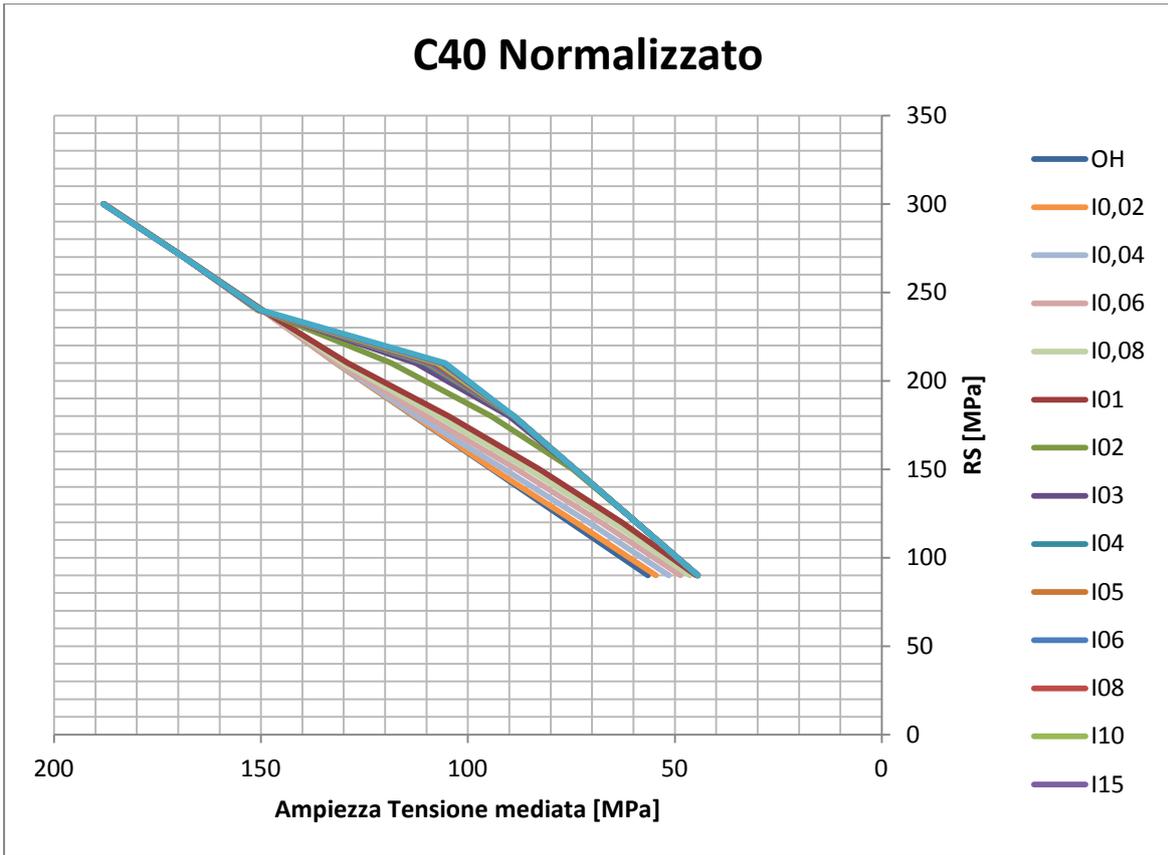
I valori di interferenza e di carico in tutte le simulazioni, sono stati variate in base alla risposta che il materiale forniva per ogni simulazione.

C40 Normalizzato

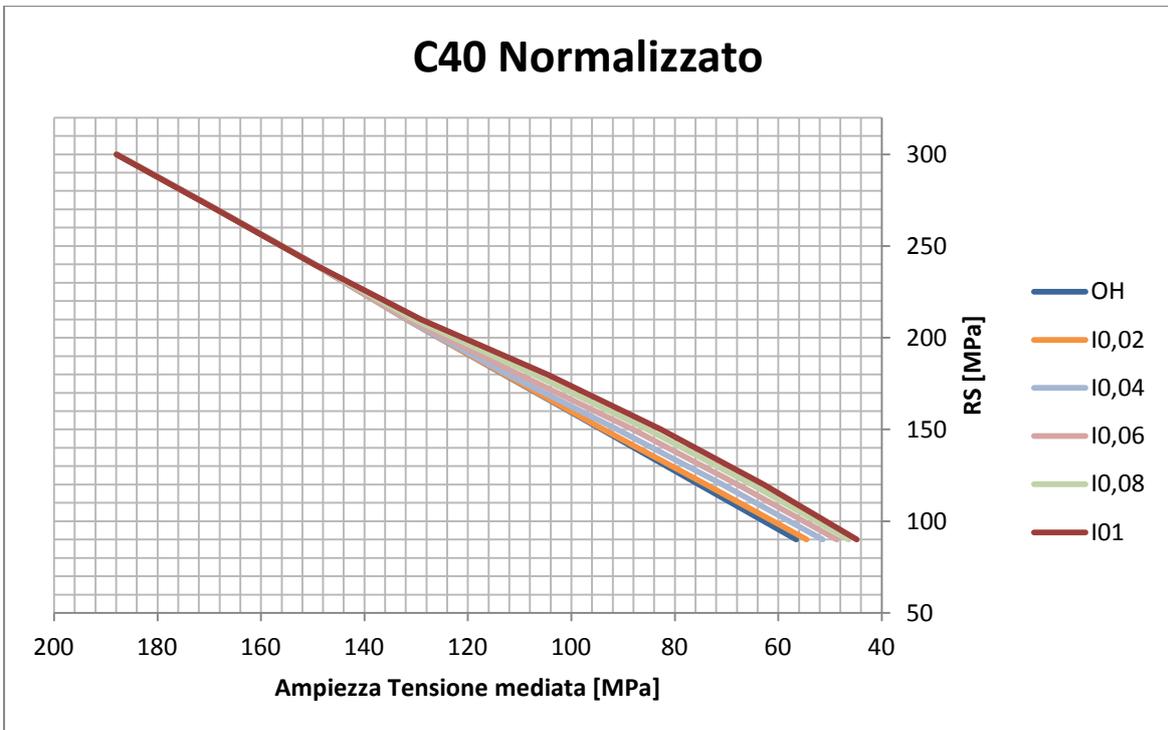
Di seguito mostrata la tabella riassuntiva dei risultati dell'ampiezza di tensione per il C40 normalizzato

Valore Ampiezza Tensione [MPa] per i rispettivi valori di Interferenza e RS_max								
	300 MPa	270 MPa	240 MPa	210 MPa	180 MPa	150 MPa	120 MPa	90 MPa
OH	187,9	168,6	149,7	131,8	113	94,2	75,3	56,5
I0,02	187,9	168,6	149,7	131,9	113	93,9	73,9	54,6
I0,04	187,9	168,6	149,7	131,7	112,4	91,1	70,8	51,5
I0,06	187,9	168,6	149,7	131,4	110,1	88,1	67,8	48,7
I0,08	187,9	168,7	149,7	130,4	107,3	85,3	65,1	46,4
I01	187,9	168,7	149,7	129	104,7	88,7	62,8	44,8
I02	188	168,7	150	118,6	94,4	74,7	59,2	44,5
I03	188	168,7	150,1	112,6	90,1	74,1	59,3	44,5
I04	188	168,7	150,4	110,4	89	74,1	59,3	44,5
I05	188	168,7	150,6	109,8	88,9	74,1	59,3	44,5
I06	188	168,7	150,6	109	88,9	74,1	59,3	44,5
I08	188	168,7	150,8	108,2	88,9	74,1	59,3	44,5
I10	188	168,7	150,8	107,4	88,9	74,1	59,3	44,5
I15	188	168,7	150,5	106,2	88,9	74,1	59,3	44,5
I20	188	168,7	150	105,5	88,9	74,1	59,3	44,5

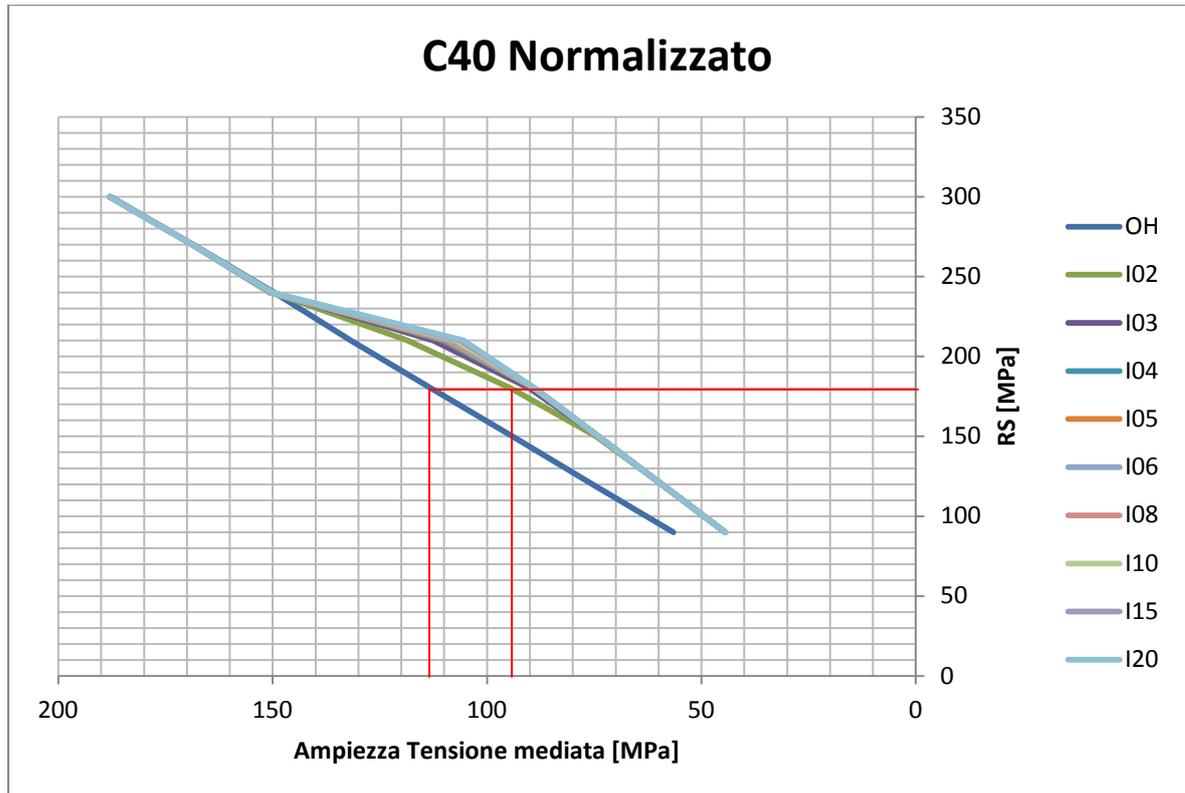
Da cui deriva il seguente grafico.



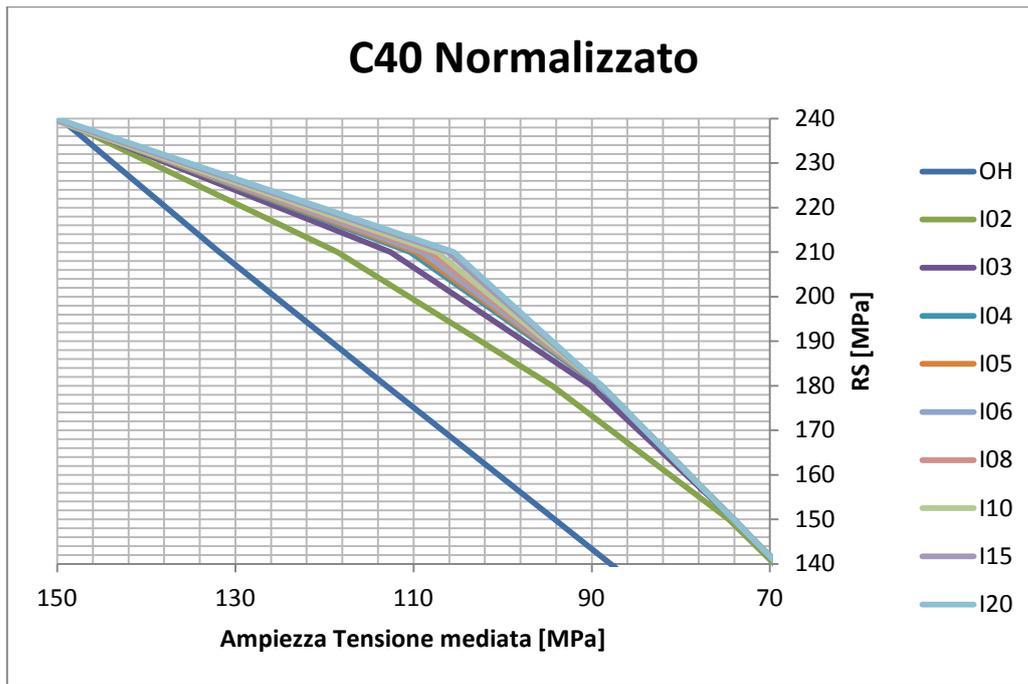
Per maggiore chiarezza i valori di vari livelli di interferenza saranno divisi in più grafici:



Nel C40 Normalizzato è possibile notare che per livelli di interferenza fino allo 0,1%, le variazioni di ampiezza di tensione mediata sono pressoché invariate.



Superati valori di interferenza, è possibile notare un lieve miglioramento nell'ampiezza di tensione media per Remote Stress comprese fra 240MPa e 150MPa. Per un livello di interferenza $I=0,2\%$ infatti è possibile notare un calo dell'ampiezza di tensione mediata da un valore di 113 MPa fino ad un valore di 94.4 MPa (differenza di 18,6 MPa).



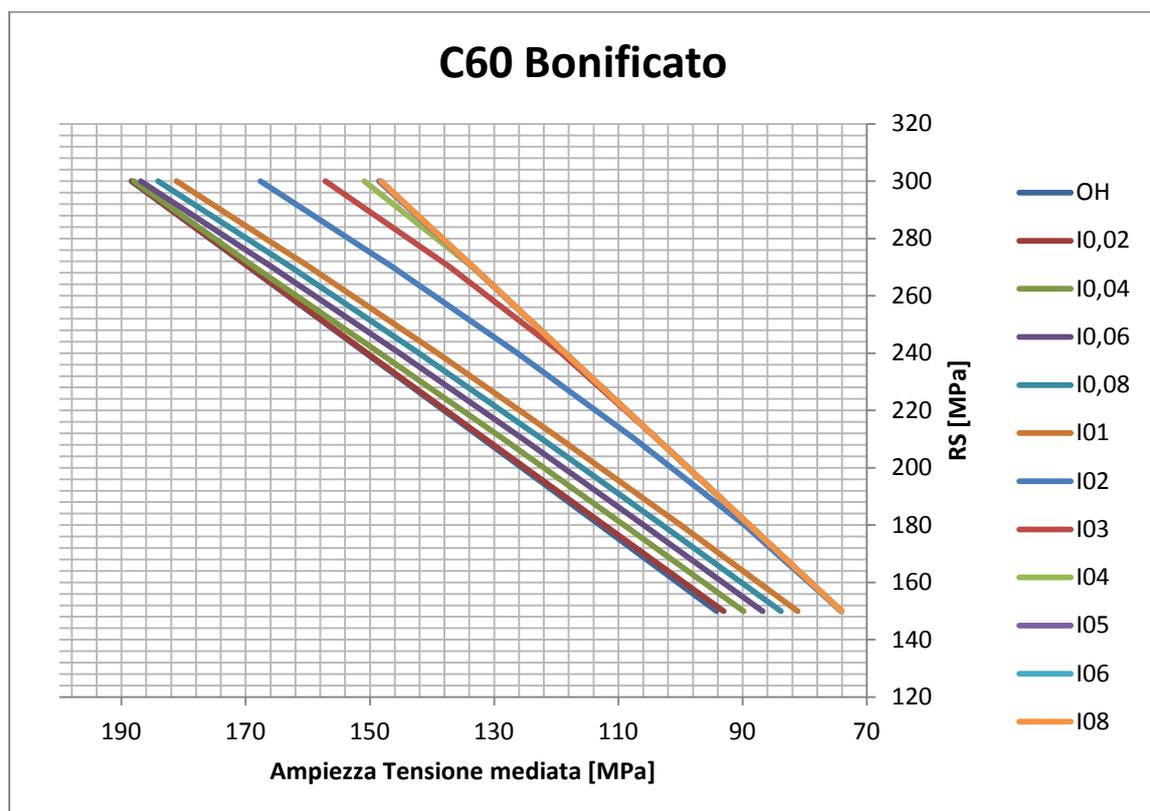
Dal dettaglio è possibile anche vedere che i miglioramenti della vita a fatica del C40 per i vari livelli di interferenza è molto limitato e presente soltanto in una breve fascia di variazione della RS.

C60 BONIFICATO

Nel caso del C60 bonificato si è proceduto a studiare il materiale usando parametri lievemente diversi da quelli del C40. Il livelli di interferenza sono stati testati solo fino a $I = 0,8\%$ poiché oltre questo livello l'effetto benefico dell'interferenza, in termini di riduzione dell'ampiezza di tensione mediata si annulla.

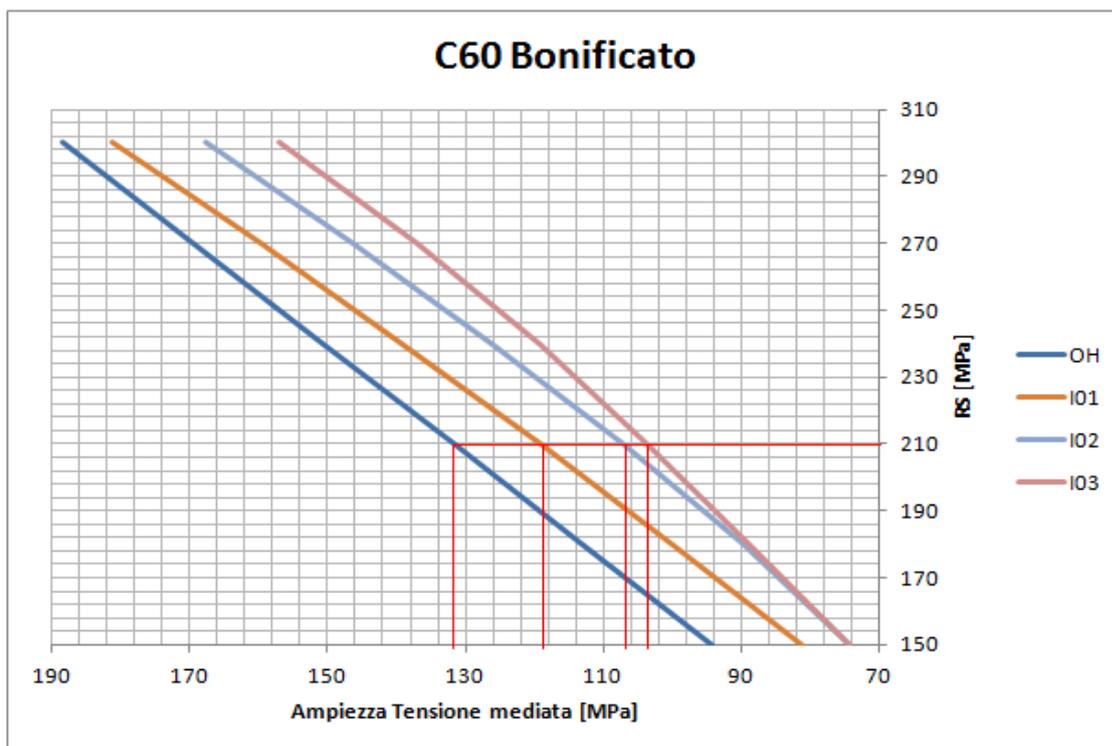
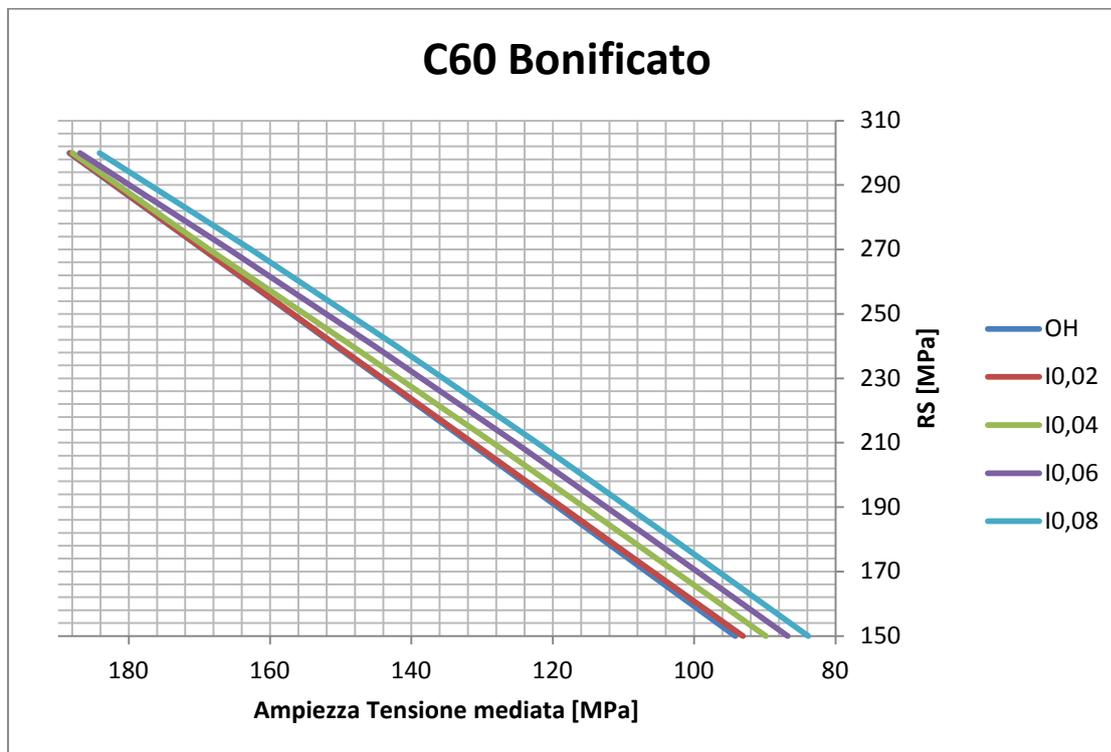
Valore Ampiezza Tensione [MPa] per i rispettivi valori di Interferenza e RS_max						
	300 MPa	270 MPa	240 MPa	210 Mpa	180 MPa	150 MPa
OH	188,4	169,5	150,7	131,8	113	94,2
I0,02	188,3	169,4	150,4	131,4	112,3	93,2
I0,04	188	168,6	148,4	128,5	109,1	89,9
I0,06	186,9	165,8	145,2	125,3	106	86,8
I0,08	184,1	162,7	142,1	122,3	102,9	83,9
I01	181,2	159,7	139,1	119,3	100	81,1
I02	167,7	146,4	126,3	107,3	89,7	74,1
I03	157,2	137,1	119,2	103,7	88,9	74,1
I04	150,9	133,5	118,6	103,7	88,9	74,1
I05	148,5	133,4	118,6	103,7	88,9	74,1
I06	148,2	133,4	118,6	103,7	88,9	74,1
I08	148,2	133,4	118,6	103,7	88,9	74,1

Da questi valori si ricavano i grafici:

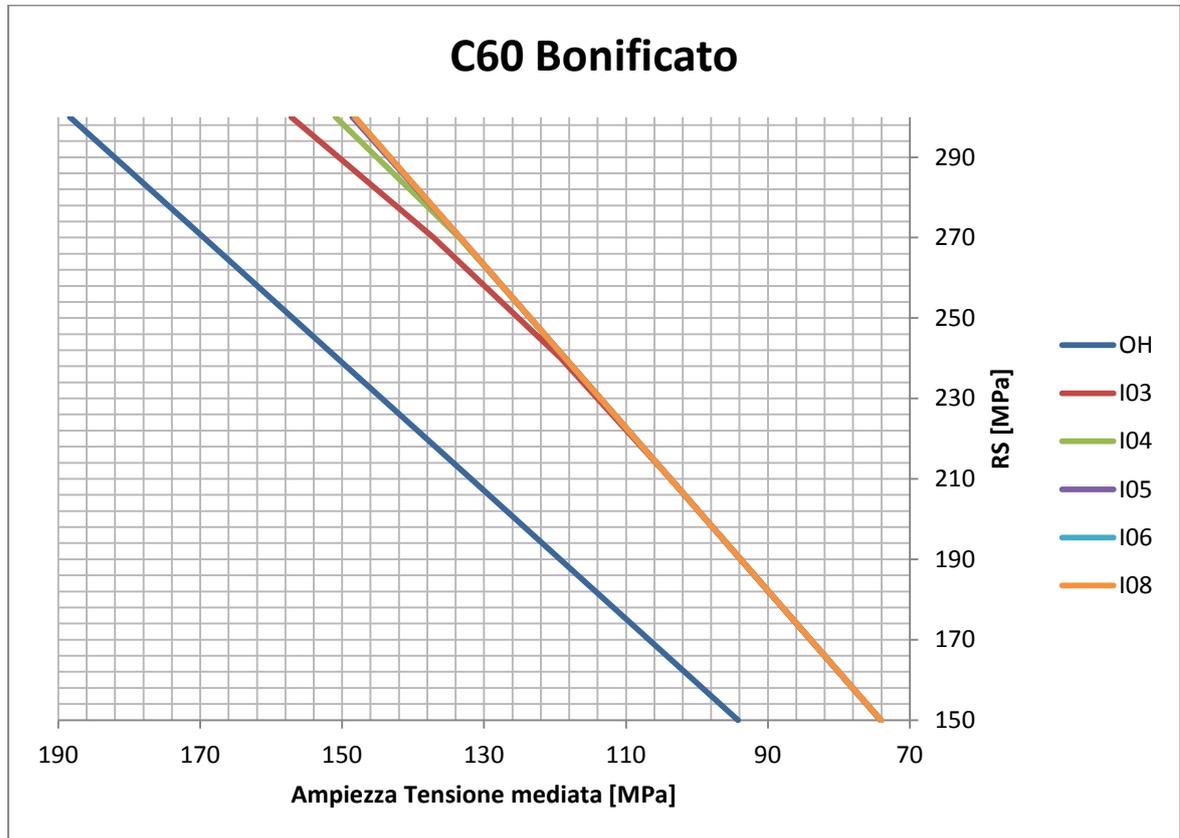


Per valori molto bassi di interferenza possiamo notare un lieve miglioramento della vita del materiale a fatica. Le curve infatti iniziano a

spostarsi verso destra con l'aumentare dell'interferenza, perciò l'ampiezza di tensione cala.



Per valori di interferenza compresi fra 0,1% e 0,3% inizia a notarsi un calo molto più significativo. L'ampiezza di tensione per un carico di 210MPa infatti passa da un valore di 131.8 MPa (OH), a 119.3MPa (I0.1), a 107.3MPa (I0.2) fino a 103.7 (I0.3).



Oltre un interferenza di $I=0,3\%$ è chiaro che il miglioramento nell'ampiezza di tensione mediata raggiunge un andamento asintotico e i miglioramenti sono pressoché trascurabili e soltanto per carichi alti.

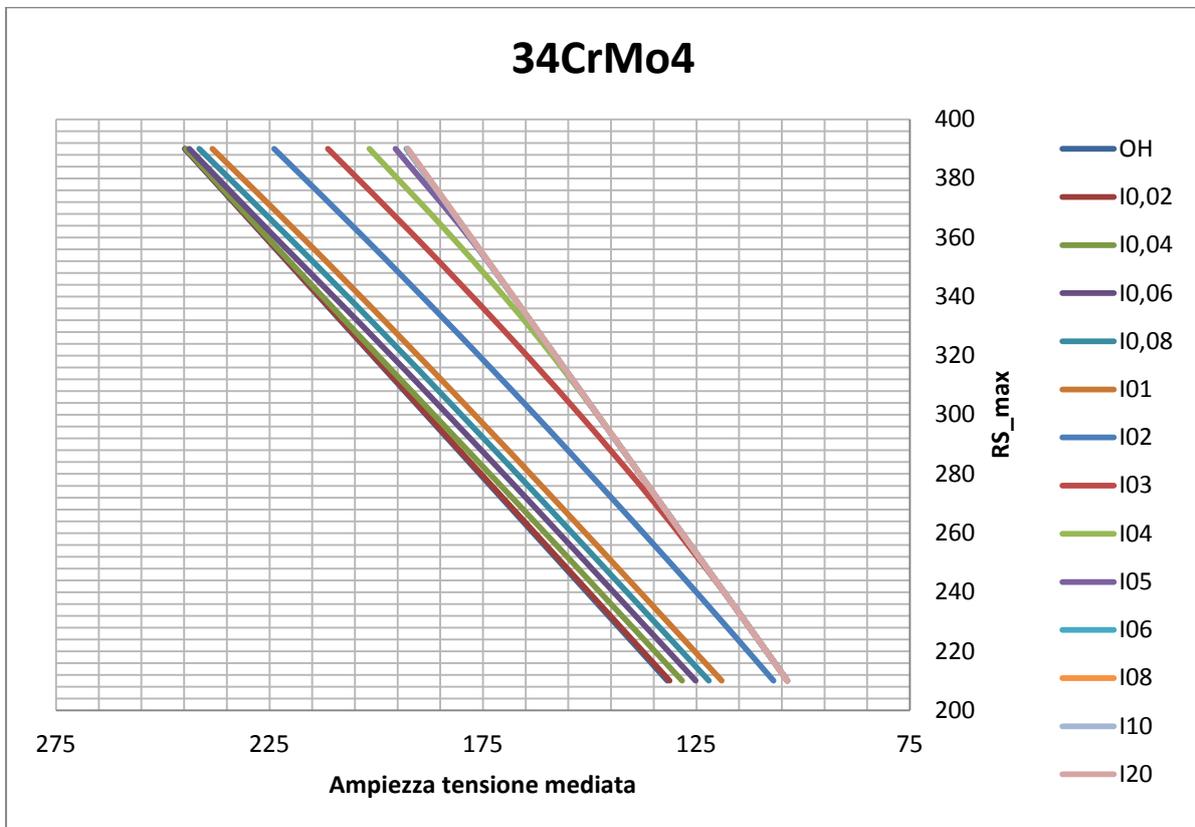
34CrMo4 Bonificato

Negli acciai legati è stata aumentata la Remote-Stress applicata al materiale. Questo tipo di acciaio possiede infatti proprietà meccaniche migliori rispetto agli acciai non legati.

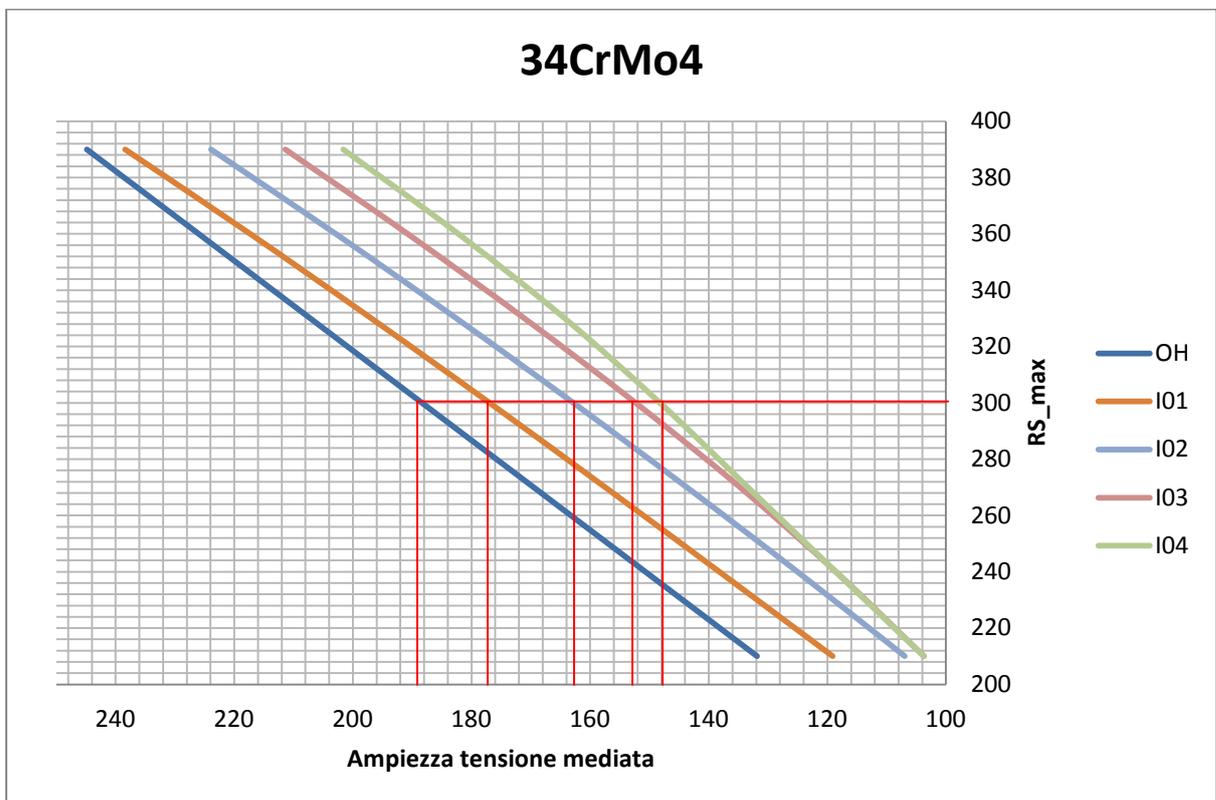
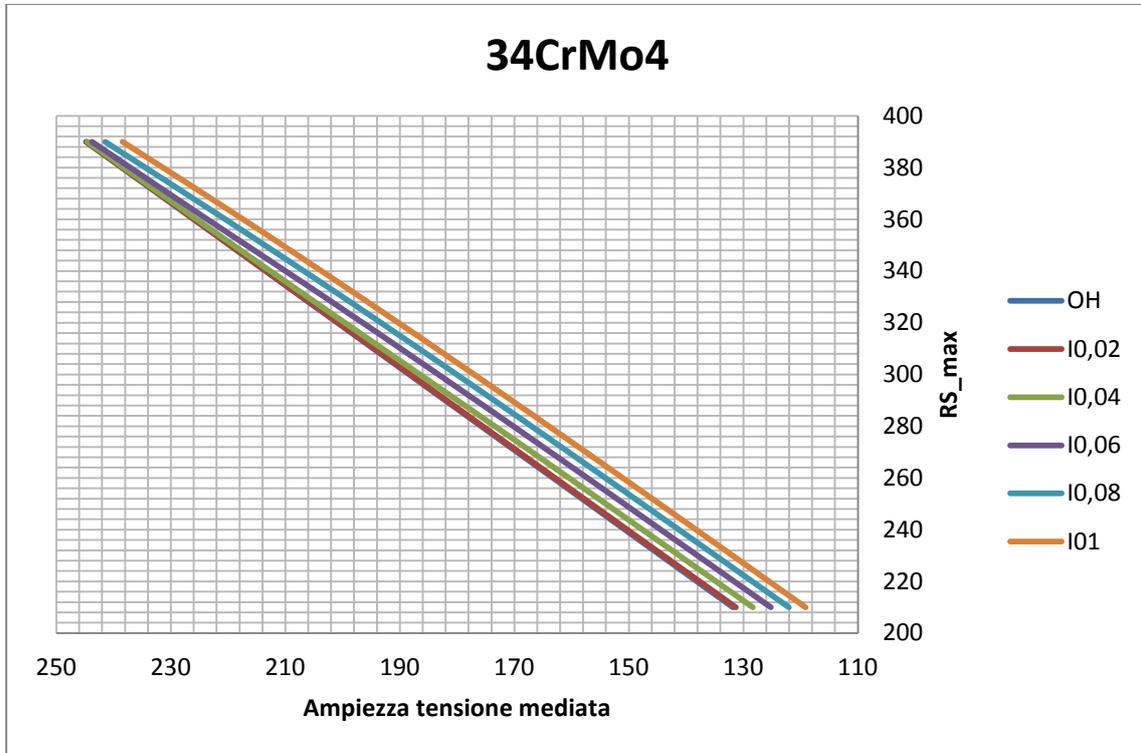
La tabella riassuntiva dei risultati è la seguente:

Valore Ampiezza Tensione [MPa] per i rispettivi valori di Interferenza e RS_max							
	390 MPa	360 MPa	330 MPa	300 MPa	270 MPa	240 MPa	210 MPa
OH	244,8	226	207,2	188,4	169,5	150,7	131,9
I0,02	244,7	225,9	207,1	188,1	169,2	150,3	131,3
I0,04	244,5	225,5	206,1	186,5	166,9	147,6	128,4
I0,06	243,8	223,6	203,2	183,2	163,7	144,4	125,2
I0,08	241,5	220,5	200	180,1	160,5	141,3	122,1
I01	238,4	217,3	196,9	177	157,5	138,2	119,1
I02	223,9	202,9	182,5	162,8	143,7	125,1	107
I03	211,4	190,8	171,1	152,4	134,7	118,6	103,7
I04	201,6	182,2	164,3	148,2	133,4	118,6	103,7
I05	195,5	178,2	163	148,2	133,4	118,6	103,7
I06	192,9	177,9	163	148,2	133,4	118,6	103,7
I08	192,7	177,9	163	148,2	133,4	118,6	103,7
I10	192,7	177,9	163	148,2	133,4	118,6	103,7
I20	192,7	177,7	163	148,2	133,4	118,6	103,7

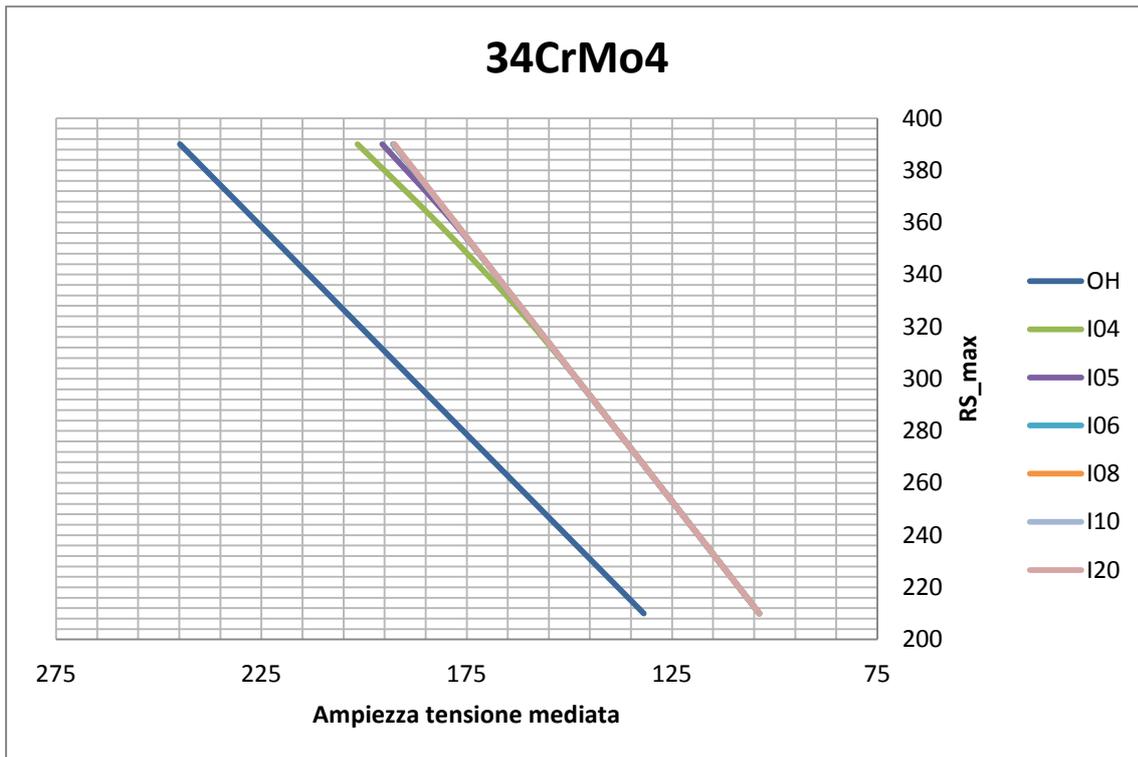
Da cui i grafici:



Per valori più bassi di interferenza è possibile anche in questo caso notare un miglioramento dell'ampiezza di tensione mediata rispetto al caso OH, anche se non molto marcata.



Come nel caso precedente il miglioramento nella vita a fatica dei provini ha un notevole miglioramento per livelli di interferenza dal valore di 0,1% in poi. Per una RS di 300MPa per esempio, si vede un decremento dell'ampiezza di tensione da: 188,3MPa (per caso OH), a 177MPa (per I0,1), a 162,8MPa (per I0,2), a 152,3MPa (per I0,3) fino a 148,2MPa (per I0,4).



Oltre un interferenza $I=0,4\%$ non vi è più un apprezzabile decremento nell'ampiezza di tensione mediata, neanche per valori notevolmente più alti (come $I=2\%$). Oltre questo valore perciò vi è soltanto un aumento della tensione media nel materiale.

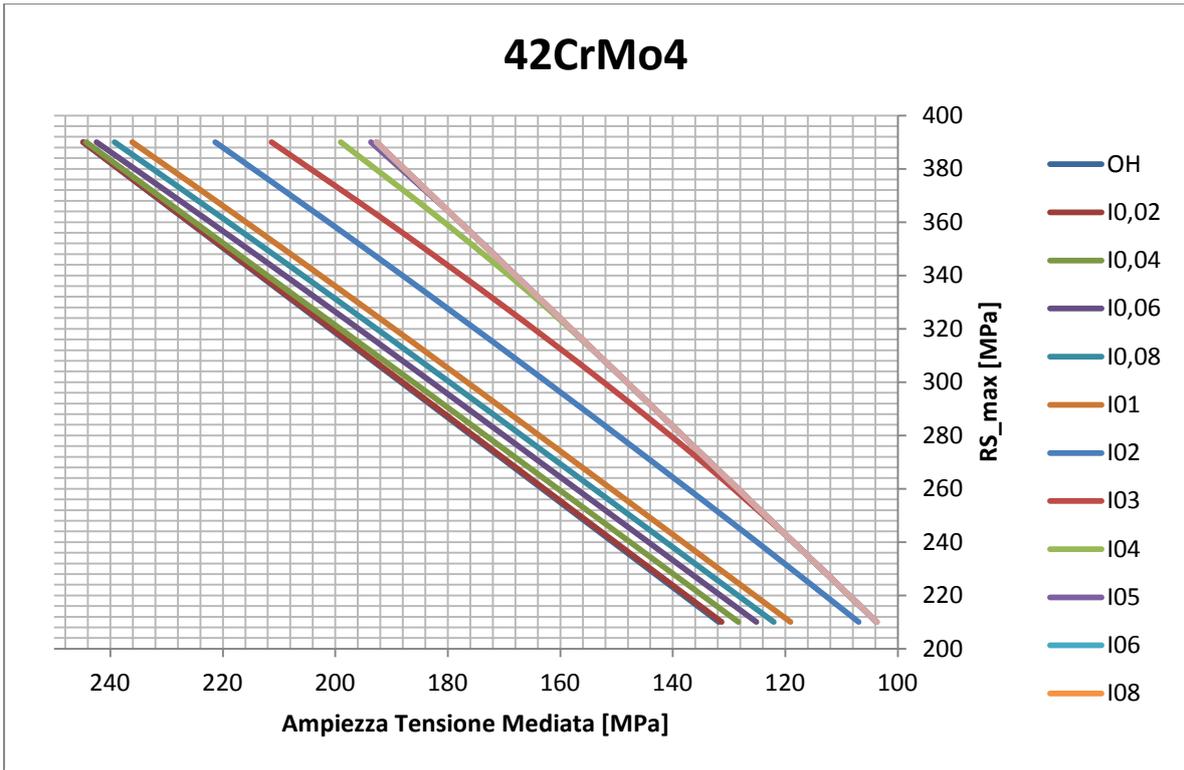
42CrMo4

Questo acciaio legato è stato studiato usando i medesimi parametri del 34CrMo4, poiché le caratteristiche meccaniche nei due materiali sono molto simili.

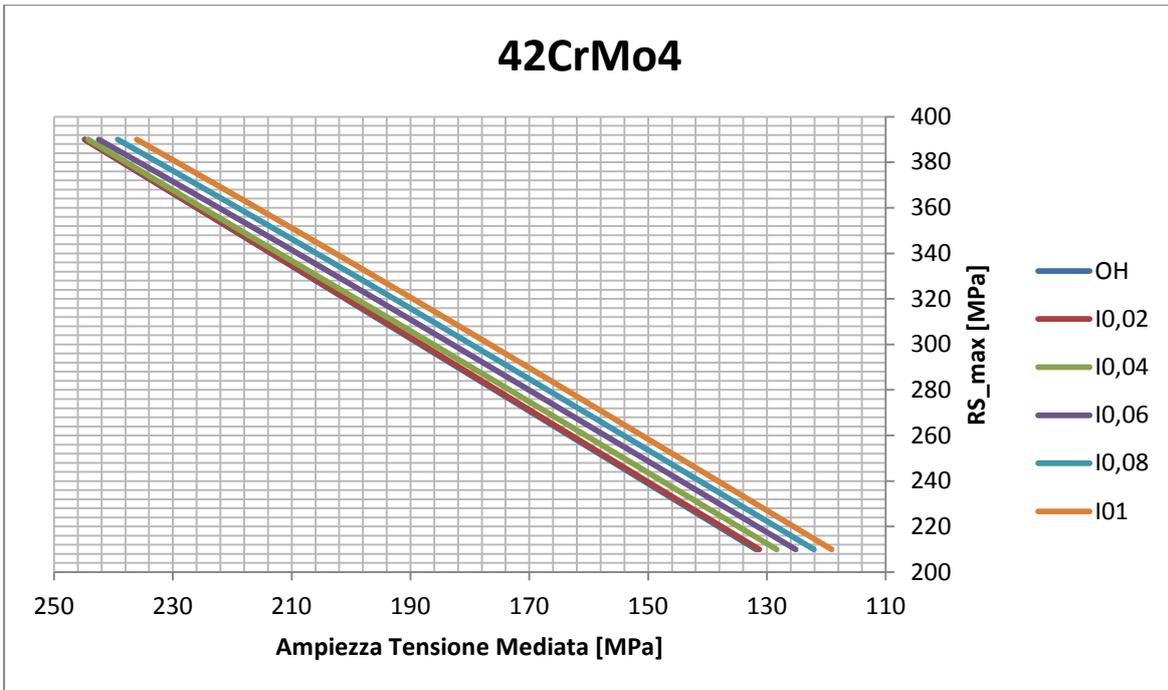
Segue la tabella riassuntiva dei dati:

Valore Ampiezza Tensione [MPa] per i rispettivi valori di Interferenza e RS_max							
	390 MPa	360 MPa	330 MPa	300 MPa	270 MPa	240 MPa	210 MPa
OH	244,8	226	207,2	188,4	169,5	150,7	131,9
I0,02	244,8	225,9	207	188,4	169,2	150,3	131,3
I0,04	244,3	225	205,6	186,2	166,9	147,6	128,4
I0,06	242,5	222,3	202,4	182,9	163,7	144,4	125,2
I0,08	239,3	219,1	199,2	179,7	160,5	141,3	122,1
I01	236,1	215,9	196,1	176,6	157,4	138,2	119,1
I02	221,4	201,2	181,6	162,4	143,6	125,2	107
I03	211,4	190,8	171,1	152,4	134,7	118,6	103,8
I04	199,1	180,7	163,6	148,2	133,4	118,6	103,8
I05	193,7	177,9	163	148,2	133,4	118,6	103,8
I06	192,7	177,9	163	148,2	133,4	118,6	103,7
I08	192,7	177,9	163	148,2	133,4	118,6	103,7
I10	192,7	177,9	163	148,2	133,4	118,6	103,7
I20	192,7	177,9	163	148,2	133,4	118,6	103,7

Da cui si ricavano le seguenti curve:

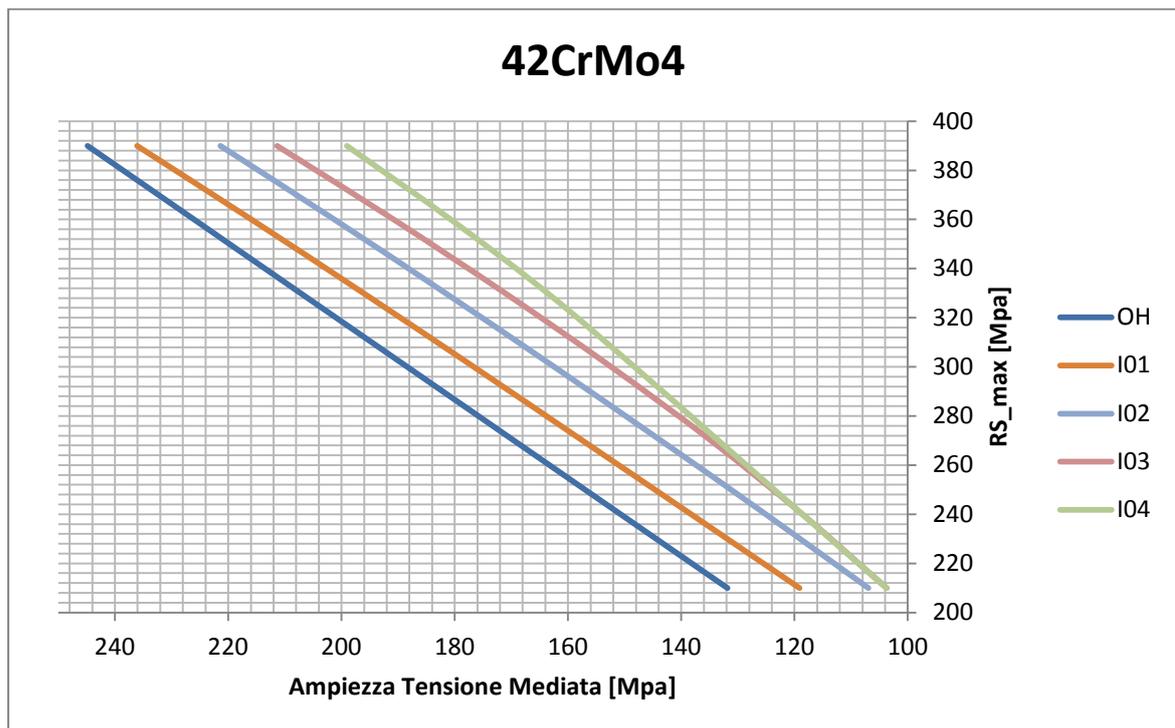


Già ad una prima occhiata è possibile notare una forte somiglianza con le curve trovare per il 34CrMo4.

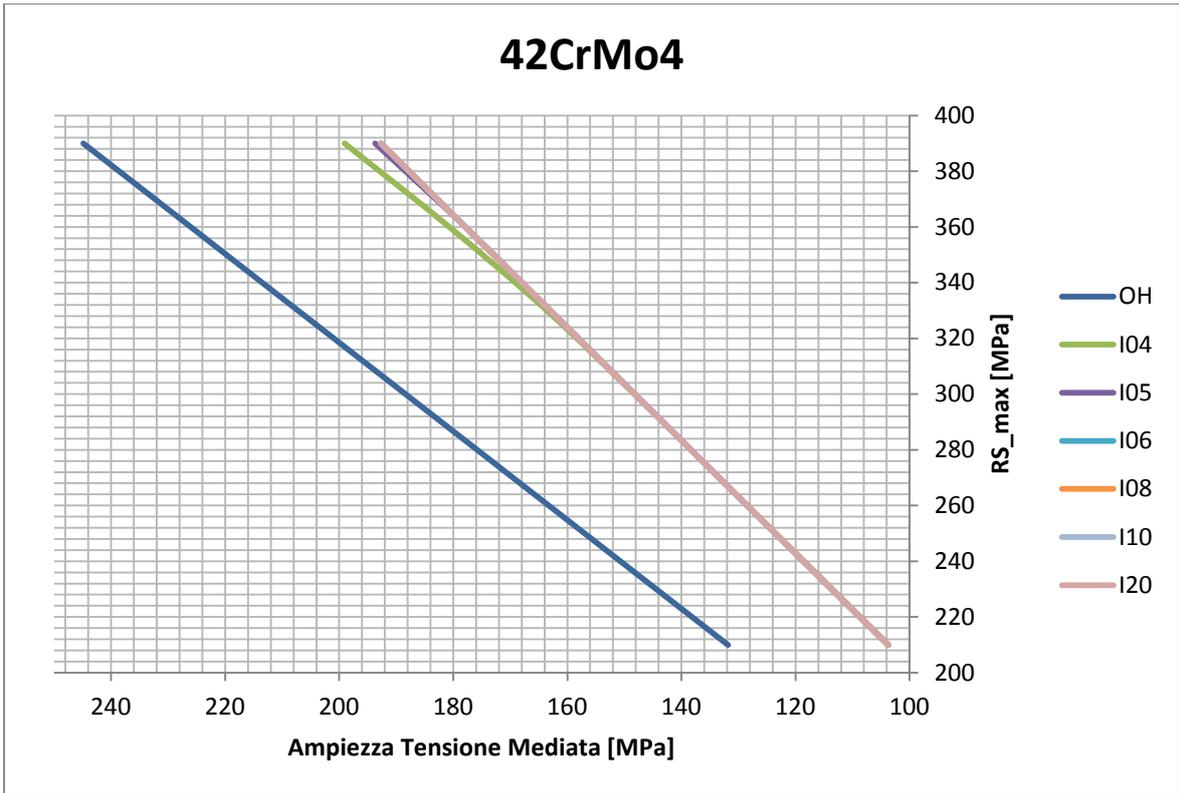


Guardando più in dettaglio le curve per bassi livelli di interferenza, esattamente come nel caso del 34CrMo4, notiamo un lieve e graduale decremento dell'ampiezza di tensione mediata con l'aumentare dell'interferenza.

Anche per livelli più alti di interferenza notiamo che la risposta del materiale è pressoché identica a quella dell'acciaio 34CrMo4. E' apprezzabile un considerevole diminuzione dell'Ampiezza di tensione mediata per livelli di interferenza compresi fra 0,1% e 0,4%. Oltre questi valori non vi è più nessun tipo di miglioramento alla vita a fatica, ma soltanto un aumento della tensione media dovuta all'aumento di interferenza.



42CrMo4



8. CONCLUSIONI

La tesi si è inserita in una ricerca che aveva come obiettivo quello studiare l'effetto di un accoppiamento, mediante interferenza con una spina, sulla resistenza a fatica di piatti forati. In particolare si è concentrata sulla relazione presente fra Remote Stress e Ampiezza di tensione mediata per diversi materiali a diversi livelli di interferenza.

L'obbiettivo dello studio eseguito è stato quello sviluppare un metodo numerico che permettesse di approfondire da un punto di vista almeno qualitativo le conoscenze sulla risposta a fatica di acciai sottoposti ad interferenza.

Dalle simulazioni FEM è emerso che la presenza di interferenza è un fattore benefico per la resistenza a fatica dei provini. A parità di RS_max infatti, le piastre accoppiate con interferenza risultano avere Ampiezza di tensione mediata minore. Questo miglioramento però raggiunge un asintoto superati determinati valori di interferenza.

È stato possibile inoltre notare una risposta diversa all'interferenza, per materiali con proprietà meccaniche differenti. In acciai con basse proprietà meccaniche come il C40, il miglioramento seppur presente è molto limitato, e rimane lineare soltanto per valori di interferenza fino allo 0,1%. Questi livelli di interferenza possono essere considerati quasi esclusivamente in via teorica, poichè nella realtà corrisponderebbero ad un offset di $2,5 \times 10^{-3}$ mm, un valore di tolleranza difficilmente raggiungibile.

Negli acciai bonificati con proprietà meccaniche migliori, come il C60 e in particolare il 34CrMo4 ed il 42CrMo4 invece, si è potuto apprezzare un chiaro miglioramento per livelli di interferenza fino allo 0,4%, valore oltre il quale l'effetto dell'interferenza sembrerebbe affievolirsi. In questi acciai la relazione fra Ampiezza di tensione mediata e RS_{max} risulta quasi perfettamente lineare.

I risultati ottenuti perciò permettono di confrontare qualitativamente la vita fatica del materiale a parità di carico, per diversi livelli di interferenza. Studi futuri permetteranno infatti di legare l'ampiezza di tensione mediata alla vita in termini di cicli, così da convertire le curve trovate in veri e propri diagrammi S-N.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Croccolo, M. De Agostinis, G. Olmi, “L’effetto dell’interferenza sulla vita di piatti forati in acciaio”. In Atti del 41° Convegno Nazionale AIAS, Vicenza, pp. 1–12, 5-8 Settembre 2012.
- [2] David Roylance, "Fatigue". Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology, May 1, 2001.
- [3] A. Lanciotti, C. Polese, “The effect of interference-fit fasteners on the fatigue life of central hole specimens”. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 28, 7, pp. 587–597 (2005).ù
- [4] D. Croccolo M. De Agostinis, N. Vincenzi, “Interference fit effect on improving fatigue life of a holed single plate”. In Atti del Workshop IGF 2012, Forni di Sopra (UD), pp. 99–104, 1-3 Marzo 2012.
- [5] T. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, B. Abazadeh, K. Saeedi, “An investigation about interference fit effect on improving fatigue life of a holed single plate in joints”. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 29, 4, pp. 675–682 (2010).
- [6] A. Gambi, " Determinazione sperimentale e numerica del comportamento a fatica di piatti forati considerando diversi livelli di interferenza". Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, anno accademico 2011/2012.