



Effetto supporto, tensione locale e gradiente relativo di tensione nella predizione della vita a fatica

B. Reggiani

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Trieste, Via Alfonso Valerio 10 - 34127, Trieste, Italia

e-mail: reggiani@units.it

A. Freddi

DIEM – Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2 - 40136, Bologna, Italia

RIASSUNTO. Obiettivo ultimo delle ricerche nelle quali si inquadra questo studio è superare, o almeno limitare, la necessità di complicate e costose prove sperimentali a favore di altri metodi predittivi della vita a fatica. Scopo specifico del presente lavoro è, dopo una analisi critica delle diverse soluzioni proposte in letteratura, la valutazione di una formulazione atta a predire, tramite analisi agli Elementi Finiti (FEM), la vita a fatica locale, nella regione ad alto numero di cicli, di componenti di forma complessa con una distribuzione irregolare di tensione. Concetto base di questa teoria è che il fenomeno della vita a fatica sia governato dal gradiente relativo di tensione nella zona maggiormente sollecitata del componente. Le simulazioni proposte per il calcolo della pendenza delle curve S-N e del limite di fatica sono verificate tramite il confronto con dati sperimentali tratti da letteratura. Mentre la formulazione per il calcolo del limite di fatica mostra un buon accordo con i dati sperimentali (errore medio percentuale del 7%), la pendenza valutata mediante l'equazione proposta risulta in alcuni casi sovrastimata (errore medio percentuale oltre il 100%). Nel presente lavoro si propone quindi una nuova formula che permette di ottenere un errore medio percentuale sulla pendenza dell'ordine del 20% nel confronto con i dati sperimentali.

ABSTRACT. The ultimate goal of the research in which the present work is framed, is to overcome, or at least to limit, the need of costly, time-consuming and complicated experimental tests towards different predictive methods of the fatigue life. After an indepth analysis of different solutions proposed in literature, the specific aim of this paper is to assess a formulation that allows to predict the local fatigue life of components, in the high-cycle fatigue regime, with uneven stress distribution by means of Finite Element Analysis. One of the basic ideas of this theory is that the relative stress gradient in the highly stressed region is the fundamental parameter governing the fatigue life phenomenon. The equations used to compute the slope of the S-N curves and the local fatigue limit are proved against data from literature. Whilst the fatigue limit's formulation shows a good agreement with experimental data (mean percentage error of 7%), in several cases the slope is overestimated (mean percentage error over 100%). Thus, a novel equation is presented in this work to compute the slope that attains a mean percentage error of about 20% in the comparison with experimental data.

PAROLE CHIAVE: effetto supporto, gradiente relativo di tensione, tensione locale, fatica ad alto numero di cicli.

1 INTRODUZIONE

A partire dal 1850 con gli studi di Wöhler, molti lavori, soprattutto tra il 1930 ed il 1960, hanno contribuito all'attuale conoscenza del fenomeno della fatica nei componenti meccanici. L'attenzione posta dai primi studi sull'analisi dell'effetto intaglio [1-6] ha gradualmente

portato alla formalizzazione matematica del pensiero che la resistenza a fatica dipenda non solo dal massimo valore della tensione ma anche, e principalmente, dal valore del gradiente relativo di tensione, χ , nel punto maggiormente sollecitato. Rispetto all'approccio classico in cui il confronto avviene tra resistenze nominali, ovvero a pari tensione nominale imposta (Fig. 1a), le

formulazioni presenti in letteratura basate sul gradiente relativo di tensione presentano confronti a pari tensione massima (Fig. 1b). Viene così a definirsi un nuovo tipo di approccio denominato della tensione locale perché basato sull'analisi del comportamento del componente nella regione maggiormente sollecitata. Si parla pertanto di curve S-N locali [7,8].

Teoricamente, la resistenza nominale di un provino liscio dovrebbe essere, a parità di sollecitazione imposta, maggiore di quella del componente intagliato di un valore pari al coefficiente di concentrazione delle tensioni K_t . Numerose prove sperimentali hanno tuttavia mostrato che la presenza di un intaglio riduce il limite di fatica di un coefficiente minore di K_t , esattamente di K_f , noto come coefficiente di effetto intaglio nella fatica (Fig. 2).

Interpretando queste osservazioni dal punto di vista

della resistenza locale, è possibile affermare che la vita a fatica locale di un componente viene incrementata dalla presenza di un intaglio (a parità di tensione massima) o, più in generale, di un gradiente relativo di tensione. Questo incremento è proporzionale al coefficiente di concentrazione delle tensioni K_t , che incorpora parametri geometrici e di carico, smorzato da K_f chiamato infatti anche coefficiente di riduzione della resistenza a fatica, che permette di tener conto dell'effetto del materiale. A parità di tensione massima, l'effetto di un elevato coefficiente di concentrazione di tensione si manifesta in una ridotta sollecitazione media agente sul grano cristallino e, di conseguenza, in un ridotto numero di fibre del materiale sollecitato a livelli critici di tensione. Com'è noto, si può osservare che, passando da materiali a bassa resistenza statica a materiali ad alta resistenza statica, si assiste ad un miglioramento

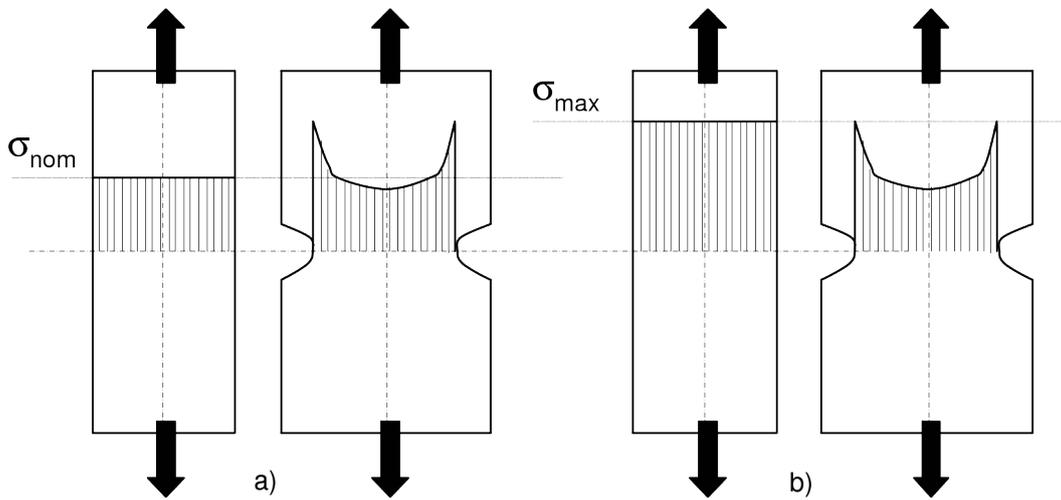


Figura 1: Confronto tra due provini a pari a) tensione nominale, b) tensione massima

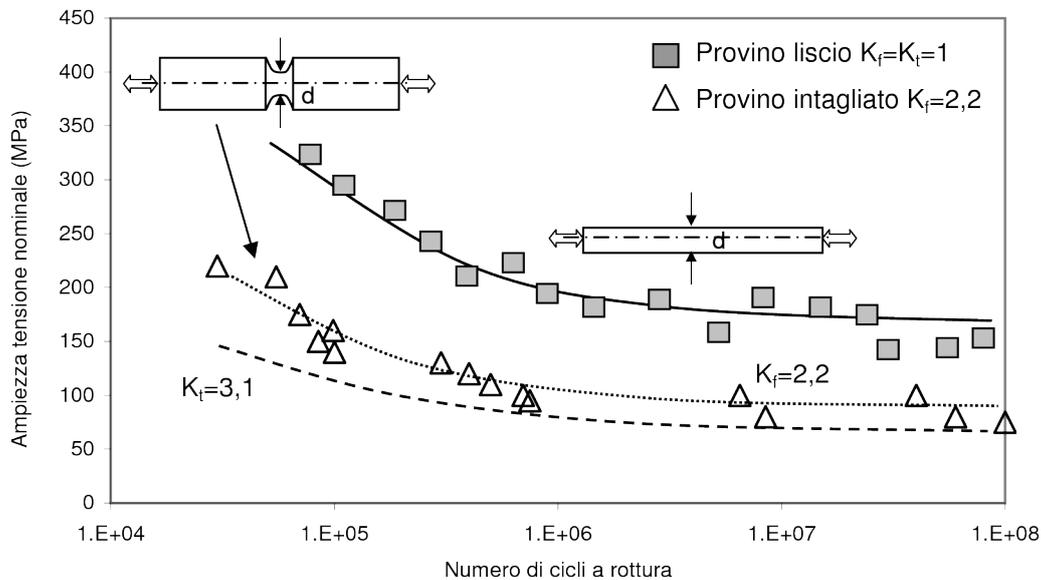


Figura 2: Confronto tra curve S-N nominali per un provino liscio ed uno intagliato. Per il provino intagliato sono riportate nel grafico le curve previste con il coefficiente di concentrazione delle tensioni K_t (curva teorica, linea tratteggiata) e di effetto intaglio nella fatica K_f (curva sperimentale, linea tratteggiata). Dati sperimentali tratti da [9].

della resistenza a fatica ma questo miglioramento non è proporzionale alla resistenza statica a causa dell'aumentata sensibilità all'intaglio.

Su queste basi viene definito un fattore di supporto [10-12], n , come rapporto tra K_t e K_f [13,14]:

$$n = \frac{\sigma_{DLocal}(\chi \neq 0)}{\sigma_D(\chi = 0)} = \frac{K_t}{K_f} \quad (1)$$

dove $\sigma_{DLocal}(\chi \neq 0)$ rappresenta il limite di fatica locale in presenza di un gradiente non nullo di tensione mentre $\sigma_D(\chi = 0)$ il limite di fatica (nominale) con una distribuzione regolare di tensione.

Il concetto di effetto supporto rappresenta la benefica conseguenza della presenza di un gradiente relativo di tensione sulla resistenza a fatica.

In letteratura sono state proposte diverse formulazioni analitiche dell'effetto supporto in cui compaiono un parametro geometrico, quale il gradiente relativo di tensione χ [7,8,12-18], o il raggio all'intaglio, ρ [19-23], ed uno dipendente dal materiale, tipicamente la resistenza statica del materiale, R_m , o la tensione di snervamento, $R_{p0.2}$, o una costante costruita "ad hoc". Siebel e Meuth (1929) [24], osservando che il cedimento per fatica si origina quando viene raggiunto un valore critico della tensione tangenziale all'interno di un volume finito di materiale identificato da un'ampiezza S_g , sono pervenuti alla seguente espressione per il fattore di supporto:

$$n = 1 + \sqrt{S_g \cdot \chi} \quad (2)$$

Heywood (1947) [23] ha proposto la seguente formula per il fattore di effetto supporto:

$$n = 1 + 2 \sqrt{\left(\frac{a}{\rho}\right)} \quad (3)$$

in cui la costante "a" rappresenta una lunghezza equivalente dei difetti nei materiali quali inclusioni, cavità, discontinuità superficiali, etc. Petersen (1951-52) [15-16] ha successivamente proposto una modifica della formulazione di Heywood, introducendo il concetto di "intaglio sostitutivo" pensato come singolo intaglio interno che produce nel componente lo stesso danneggiamento dei difetti del materiale:

$$n = 1 + \sqrt{\chi \rho^*} \quad (4)$$

dove χ è il gradiente relativo di tensione causato dall'eventuale intaglio esterno effettivo mentre ρ^* è il raggio dell'"intaglio sostitutivo" interno. Una formulazione del tutto analoga è stata proposta nel 1968 da Neuber [17] sviluppando l'idea già nota [27] che il

cedimento per fatica sia controllato dalla tensione media agente su un piccolo volume di materiale alla radice dell'intaglio descritto da una lunghezza microstrutturale fittizia, ρ^{**} :

$$n = \sqrt{1 + \chi \rho^{**}} \quad (5)$$

Bollenrath e Troost (1950-51) [19-21], partendo dall'osservazione che la deformazione plastica sia funzione dei gradienti di tensione e deformazione, essendo da questi parzialmente impedita, hanno interpretato la resistenza a fatica come un limite superiore di deformazione plastica ammissibile che può verificarsi nei grani di materiale di una struttura cristallina. Elaborando analiticamente questo pensiero, hanno proposto la seguente formula empirica per il computo del fattore di supporto n :

$$n = \frac{1}{1 - \frac{154/R_m}{1 + R_m/1370} + \frac{\rho}{10}} \quad (6)$$

applicabile per acciai con valore della resistenza statica a trazione R_m compresa tra 440 e 1000 MPa. Hück (1981) [18], sulla base di considerazioni statistiche su un elevato numero di curve di Wöhler raccolte dalla letteratura, ha proposto, per gli acciai con una resistenza statica a trazione $R_m \leq 1200$ MPa, la seguente espressione di n come:

$$n = (1 + 0.45 \cdot \chi^{0.3}) \quad (7)$$

Dietmann (1985) [22] ha suggerito una generalizzazione delle formule proposte da Siebel (2) e Petersen (4):

$$n = 1 + \left(\frac{C_1}{K}\right)^m \sqrt{\chi} \quad (8)$$

dove C_1 ed n sono costanti caratteristiche della classe di materiale mentre K è un parametro statico, ovvero la resistenza statica a trazione R_m o la tensione di snervamento $R_{p0.2}$. Di recente edizione, la guida dell'FKM (2003) [12] presenta delle procedure pratiche per la stima della resistenza a fatica di componenti suggerendo la seguente formula, variata per diversi intervalli di valore del gradiente relativo di tensione, per il calcolo del fattore di supporto:

$$n = 1 + \chi \cdot 10^{-\left(a_G - 0.5 + \frac{\sigma_B}{b_G}\right)} \quad \chi \leq 0.1 \text{ mm}^{-1} \quad (9)$$

$$n = 1 + \sqrt{\chi} \cdot 10^{-\left(a_G + \frac{\sigma_B}{b_G}\right)} \quad 0.1 \text{ mm}^{-1} \leq \chi \leq 1 \text{ mm}^{-1}$$

$$n = 1 + \sqrt[4]{\chi} \cdot 10^{-\left(a_G + \frac{\sigma_B}{b_G}\right)} \quad 1 \text{ mm}^{-1} \leq \chi \leq 100 \text{ mm}^{-1}$$

con a_G e b_G costanti del materiale.

Può essere osservata la limitata applicabilità di alcune delle formulazioni viste e, nello specifico, di quelle che impiegano il raggio all'intaglio come parametro geometrico (formule (3) e (6)). Infatti mentre il gradiente relativo di tensione è un fattore che tiene conto sia di caratteristiche geometriche che della tipologia di carico applicato, il raggio all'intaglio non tiene conto del tipo di carico e nessuna grandezza è inserita nelle formulazioni per considerare l'effetto del carico. In aggiunta, il raggio all'intaglio non è di norma definibile ed individuabile per geometrie complesse. Queste considerazioni sottolineano la rilevanza delle equazioni che introducono il gradiente relativo di tensione come parametro geometrico; esse consentono infatti di trasferire i concetti sopraesposti a componenti comunque complessi con forti variazioni geometriche per i quali non sono definibili i coefficienti di concentrazione delle tensioni e di effetto intaglio.

2 UNA RECENTE FORMULAZIONE PER LA PREDIZIONE DELLE CURVE S-N LOCALI

In accordo con la seguente nota formula [26] che descrive il tratto inclinato delle curve S-N:

$$N = N_D \left(\frac{\sigma_{Dlocal}}{\sigma_{(N)}} \right)^k \quad (10)$$

per stimare la vita a fatica (N) di un componente ad un dato livello di sollecitazione, $\sigma_{(N)}$, è necessario conoscere il limite di fatica (locale), σ_{Dlocal} , il numero di cicli al limite di fatica al ginocchio, N_D , e l'esponente, k , che definisce la pendenza della curva S-N.

Il limite di fatica locale in un punto critico di un componente ($\sigma_{Dlocal}(\chi \neq 0)$) è calcolabile, secondo l'equazione (1), tramite il fattore di supporto nel modo seguente:

$$\sigma_{Dlocal}(\chi \neq 0) = n \cdot \sigma_D(\chi = 0) \quad (11)$$

Un modello di simulazione è stato recentemente proposto da Eichseder per la previsione dell'intera curva S-N locale per componenti comunque complessi sulla base di un calcolo numerico (FEM) [7,8]. Partendo dall'analisi delle teorie sopra esposte, Eichseder ha proposto espressioni empiriche per il fattore di supporto,

la pendenza ed il numero di cicli al ginocchio delle curve S-N; rispettivamente:

$$n = \left(1 + \left(\frac{\sigma_{bf}}{\sigma_{tf}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\chi^*}{(2/b)} \right)^{K_D} \right) \quad (12)$$

$$k = k_{min} + \frac{k_{max} - k_{min}}{n^{K_k}} \quad (13)$$

$$\log(N_D) = \log(N_{Dmin}) + \frac{\log(N_{Dmax}) - \log(N_{Dmin})}{n^{K_n}} \quad (14)$$

dove:

σ_{bf} : Limite di fatica del materiale per un provino liscio soggetto a flessione rotante.

σ_{tf} : Limite di fatica del materiale per un provino liscio soggetto a trazione-compressione ($\chi = 0$).

$(2/b)$: Gradiente relativo di tensione del provino soggetto a flessione rotante.

χ^* : Gradiente relativo di tensione del componente.

K_D : Coefficiente di smorzamento dell'effetto supporto per il calcolo del limite di fatica.

k_{min} : Pendenza della curva S-N del materiale per un provino liscio soggetto a flessione rotante.

k_{max} : Pendenza della curva S-N del materiale per un provino liscio soggetto a trazione-compressione.

k : Pendenza della curva S-N del componente.

K_k : Coefficiente di smorzamento della pendenza.

N_{Dmin} : Numero di cicli al ginocchio della curva S-N del materiale per un provino liscio soggetto a flessione rotante.

N_{Dmax} : Numero di cicli al ginocchio della curva S-N del materiale per un provino liscio soggetto a trazione-compressione.

N_D : Numero di cicli al ginocchio della curva S-N del componente.

K_n : Coefficiente di smorzamento del numero di cicli al ginocchio della curva S-N.

I coefficienti di smorzamento sono caratteristici della classe del materiale [7,8] ed il gradiente viene calcolato con il Metodo degli Elementi Finiti. In linea con l'idea base di Bollenrath and Troost [19-21] di limitare il numero di prove sperimentali necessarie, la simulazione di Eichseder prevede la conoscenza di due sole curve S-N del materiale per stimare la vita a fatica di un componente mediante [12-14], in ogni nodo della struttura discretizzata. La prima prova è condotta su un provino con valore nullo del gradiente relativo di tensione (liscio soggetto a trazione-compressione), cui corrispondono σ_{tf} , k_{max} e N_{max} , una seconda su un provino con gradiente relativo di tensione non nullo

(liscio soggetto a flessione rotante), cui corrispondono σ_{bf} , k_{min} e N_{min} .

In Fig. 3 è riportato l'andamento del limite di fatica locale, $\sigma_{DLocale}$, in funzione del gradiente relativo di tensione per un acciaio Ck 45 [8]. Nella Figura viene messo in evidenza come la formulazione (12) proposta da Eichlseder per il calcolo di $\sigma_{DLocale}$ sulla base del fattore di supporto, sia un'interpolante dei corrispondenti valori delle due curve S-N del materiale sopra definite prese a riferimento. Analogamente si ha per le formulazioni (13) e (14) relative al calcolo del numero di cicli al limite di fatica, N_D , e della pendenza, k , della curva S-N del componente.

3 MATERIALI E METODI

3.1 Limite di fatica

Come citato nell'introduzione, scopo del presente lavoro è la valutazione del modello di simulazione proposto da Eichlseder basato sul concetto di tensione locale. A tal fine, i limiti di fatica locali forniti dalle diverse formulazioni, tramite l'equazione (11), sono stati confrontati con 254 dati sperimentali sui limiti di fatica di diversi tipi di acciai tratti dalla letteratura [14,27]. Questi ultimi dati sono i limiti sulla tensione nominale ottenuti in provini intagliati o non, e tengono quindi conto dell'effetto di sensibilità del materiale; i limiti di fatica locali sperimentali sono stati pertanto calcolati, in accordo con l'equazione (1), moltiplicando i limiti di fatica nominali per i fattori di concentrazione delle tensioni K_t .

Mentre i parametri utilizzati nelle altre formulazioni sono costanti per classi di materiali o correlati al valore

della resistenza statica, R_m , mediante opportune formule riportate in letteratura [15,16,22,27], le costanti caratteristiche dei materiali S_g e ρ^{**} nelle equazioni (2) e (5), di Siebel e Neuber rispettivamente, sono disponibili in letteratura per un numero limitato di valori di R_m . I dati mancanti sono stati pertanto ottenuti per interpolazione di quelli disponibili: le equazioni delle interpolanti sono riportate in Fig. 4 con il relativo coefficiente di correlazione. In Fig. 4b è stata imposta, per ipotesi, la condizione di tangenza a zero per valori della resistenza statica superiori a 2000 MPa.

Per i materiali per i quali il valore della resistenza statica non è disponibile in letteratura il confronto con i dati sperimentali è limitato alla sola formulazione di Eichlseder, non richiedendo questa il valore di R_m . In aggiunta, il calcolo del limite di fatica locale sulla base del fattore di supporto non è effettuabile nel caso di provini lisci in accordo con le formulazioni di Bollenrath (equazione (6)), Heywood (equazione (3)) e Dietmann (equazione (8)), richiedendo le stesse valori non nulli del raggio all'intaglio.

Come riportato in precedenza, la formulazione proposta da Eichlseder per il calcolo del limite di fatica è l'interpolante di due valori sperimentali del limite di fatica presi a riferimento; lo scostamento di tali dati dai corrispondenti valori predetti dalla formulazione sarà quindi nullo. Analogamente, nelle formule di Siebel, Neuber, Petersen e dell'FKM, un valore nullo del gradiente relativo di tensione fornisce esattamente il valore sperimentale. Pertanto questi casi sono stati esclusi nel computo dell'errore percentuale relativo ad ogni teoria.

Quanto detto spiega il diverso numero di dati sperimentali presi in considerazione per il confronto con

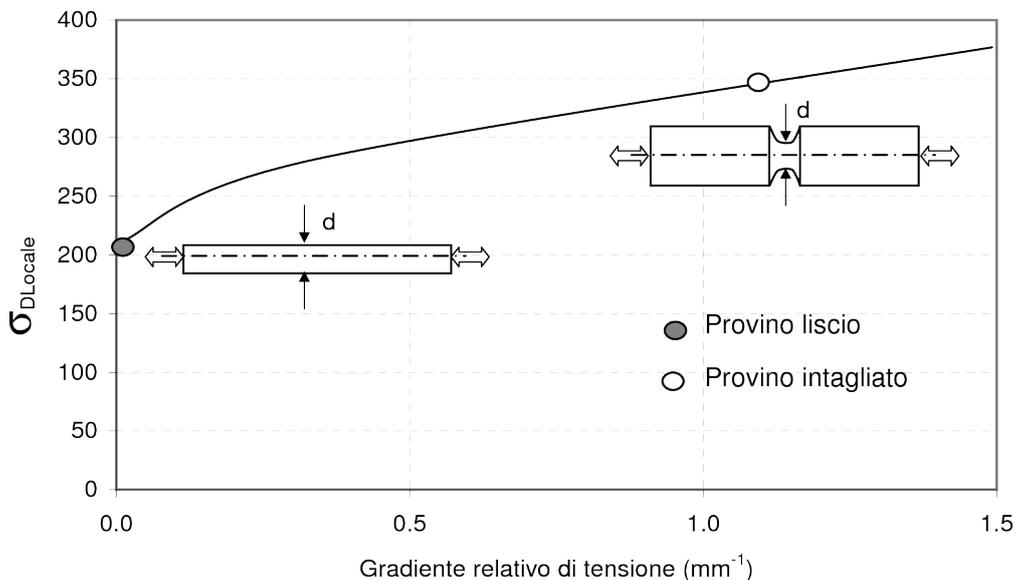


Figura 3: Andamento del limite di fatica locale in funzione del gradiente relativo di tensione come predetto dalla formulazione proposta da Eichlseder in accordo con l'equazione (12) [dati tratti da [8]].

i modelli teorici presentati (Tab. 1).

Un elenco completo dei dati sperimentali e dei valori delle costanti adottate è riportato in [28].

L'errore medio percentuale e la deviazione standard tra previsioni numeriche e dati sperimentali sono stati usati come indicatori per valutare la bontà delle diverse formulazioni.

3.2 Pendenza delle curve S-N

Per 57 dei dati reperiti dalla letteratura era disponibile anche il valore della pendenza delle curve S-N. Questi sono stati utilizzati per valutare l'accuratezza della formulazione proposta da Eichlseder secondo l'equazione (13).

3.3 Numero di cicli al ginocchio della curva S-N

Non è stato effettuato un confronto con l'equazione (14)

in quanto non è disponibile in letteratura un numero sufficiente di dati.

4 RISULTATI

4.1 Limite di fatica

In Tab. 1 sono riportati i risultati principali ottenuti dal confronto relativo al limite di fatica tra i dati sperimentali e le diverse formulazioni proposte per il fattore di supporto. Per i risultati dettagliati si veda [28].

A titolo di esempio, nella Fig. 5 sono mostrati, per un acciaio (C45 normalizzato [13]), i valori del limite di fatica locale ottenuti per via sperimentale e mediante le diverse formulazioni teoriche proposte al variare del gradiente relativo di tensione.

Come si vede dalla Tab. 1 e dalla Fig. 5, la formulazione

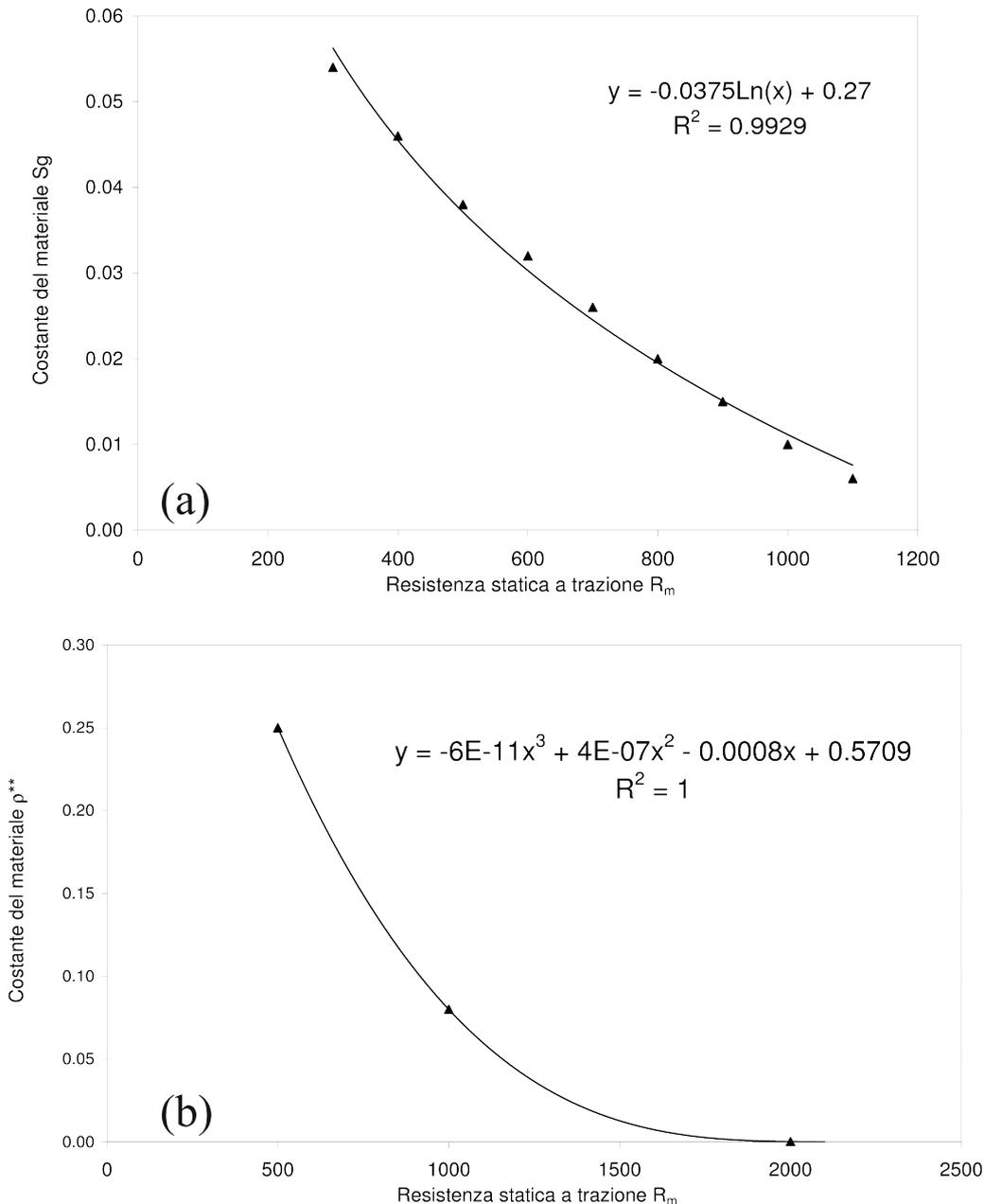


Figura 4: Equazioni di regressione utilizzate per il calcolo della costanti del materiale S_g (4a) e ρ^{**} (4b) utilizzate rispettivamente nelle equazioni (2) e (5).

di Eichlseder fornisce la miglior stima dei dati sperimentali; in particolare, su tutto l'insieme di dati analizzati, l'errore medio percentuale è del $7\% \pm 8\%$. Una buona approssimazione è data anche dalle formulazioni di Siebel, Neuber e Petersen, sebbene con un valore maggiore della deviazione standard. Contrariamente, Bollenrath & Troost, Heywood e Dietmman, non tenendo conto, nelle loro equazioni, dell'effetto del gradiente relativo di tensione, mostrano una maggiore divergenza dai dati sperimentali.

4.2 Pendenza delle curve S-N

Dai confronti eseguiti è emerso come la formulazione di Eichlseder per la previsione della pendenza delle curve S-N locali, k , sovrastimi in alcuni casi i dati sperimentali (errore medio percentuale superiore al 100%) [28]. Questo è imputabile al tipo di interpolazione utilizzata secondo la formula (13): infatti, mentre per valore nullo del gradiente relativo di tensione l'equazione conferma

esattamente il valore di k_{max} , per il caso corrispondente al massimo gradiente, il valore della pendenza, k_{min} , è sovrastimato.

Viene quindi proposta in questo lavoro la seguente formula per la stima della pendenza, k :

$$k = k_K \cdot \left[1 + \left(\frac{k_i}{k_K} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\chi}{\chi_i} \right)^{0.05} \right] \quad (15)$$

dove

k_K : Pendenza della curva S-N del materiale per un provino con valore nullo del gradiente relative di tensione.

k_i : Pendenza della curva S-N del materiale per un provino con valore non nullo del gradiente relative di tensione.

χ : Gradiente relativo di tensione del componente.

χ_i : Gradiente relativo di tensione del provino corrispondente a k_i .

L'equazione (15) presenta la medesima struttura della

	Eichlseder	Siebel	Neuber	Petersen	Bollenrath & Troost	Heywood	Dietmann	FKM
N	157	194	194	194	80	83	104	194
EMP	7	11	11	12	18	24	40	11
DS	8	15	31	17	11	28	61	11

Tabella 1: Previsioni numeriche e dati sperimentali sui limiti di fatica locali: N= numero di prove considerate, EMP= Errore Medio Percentuale, DS= Deviazione Standard.

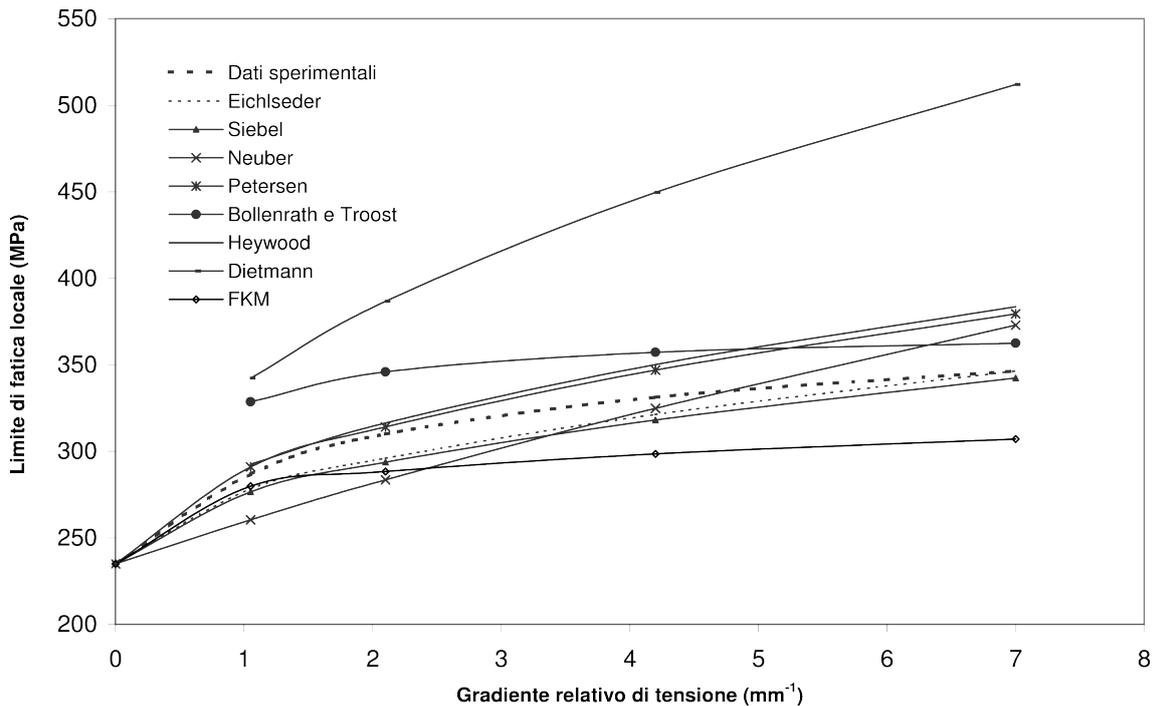


Figura 5: Valori predetti e dati sperimentali del limite di fatica locale per un acciaio (C45 normalizzato) riportati in funzione del gradiente relativo di tensione.

formula proposta da Eichlseder per il calcolo del fattore di supporto (equazione (12)) anche se con un diverso valore empirico dell'esponente. Ha pertanto il vantaggio di richiedere la conoscenza di due sole curve S-N del materiale per poter stimare la pendenza della curva S-N del componente in esame.

Al fine di rendere il procedimento di stima della pendenza robusto, accurato ed affidabile, è stato sviluppato uno schema a blocchi per il calcolo (Fig. 6).

Tale protocollo sviluppato in dettaglio [28] tiene conto della necessità di basare l'interpolazione su dati statisticamente significativi. Viene richiesto infatti che i dati di partenza presentino un valore del coefficiente lineare di regressione R^2 maggiore di una certa soglia definita specificatamente per il problema analizzato (in mancanza di ulteriori dati, il valore di 0.85 può essere considerato un valore soglia). A parità di R^2 viene scelto come riferimento, in modo conservativo, per k_i il dato con valore della pendenza più alto.

Seguendo questo protocollo, la nuova formulazione ha consentito di ottenere, sul totale di 57 risultati sperimentali analizzati, un errore medio percentuale sulla pendenza dell'ordine del 20% nel confronto con i dati sperimentali.

In Fig. 7 sono confrontati dati sperimentali e numerici per due acciai presi come esempio tra quelli analizzati. Dalle Fig 7a e 7b emerge con evidenza il significativo miglioramento ottenuto stimando i dati sperimentali con

la nuova formulazione proposta (equazione (15)).

6 CONCLUSIONI

La teoria proposta da Eichlseder permette di stimare la vita a fatica, in termini di limite di fatica, pendenza della curva S-N e numero di cicli al ginocchio della curva S-N, in funzione del gradiente relativo di tensione, χ , in ogni nodo della struttura discretizzata con il Metodo agli Elementi Finiti. Uno dei concetti base di questa teoria è che il gradiente relativo di tensione nel punto più sollecitato governi, a parità di ogni altra condizione, il danneggiamento del materiale per carichi affaticanti.

Le previsioni di vita a fatica, risultato delle diverse formulazioni considerate nel presente lavoro, sono state confrontate con i limiti di fatica locali sperimentali presi dalla letteratura. Si è verificato che la formulazione proposta da Eichlseder fornisce la migliore approssimazione con un errore medio percentuale del 7%. Questa teoria richiede, per la stima del limite di fatica, la conoscenza di solo due curve S-N del materiale.

E' stata inoltre verificata l'equazione proposta da Eichlseder per il calcolo della pendenza delle curve S-N. Si è osservato che tale equazione sovrastimava, in alcuni casi, i dati sperimentali (errore medio percentuale superiore al 100%). Si è proposta pertanto una nuova

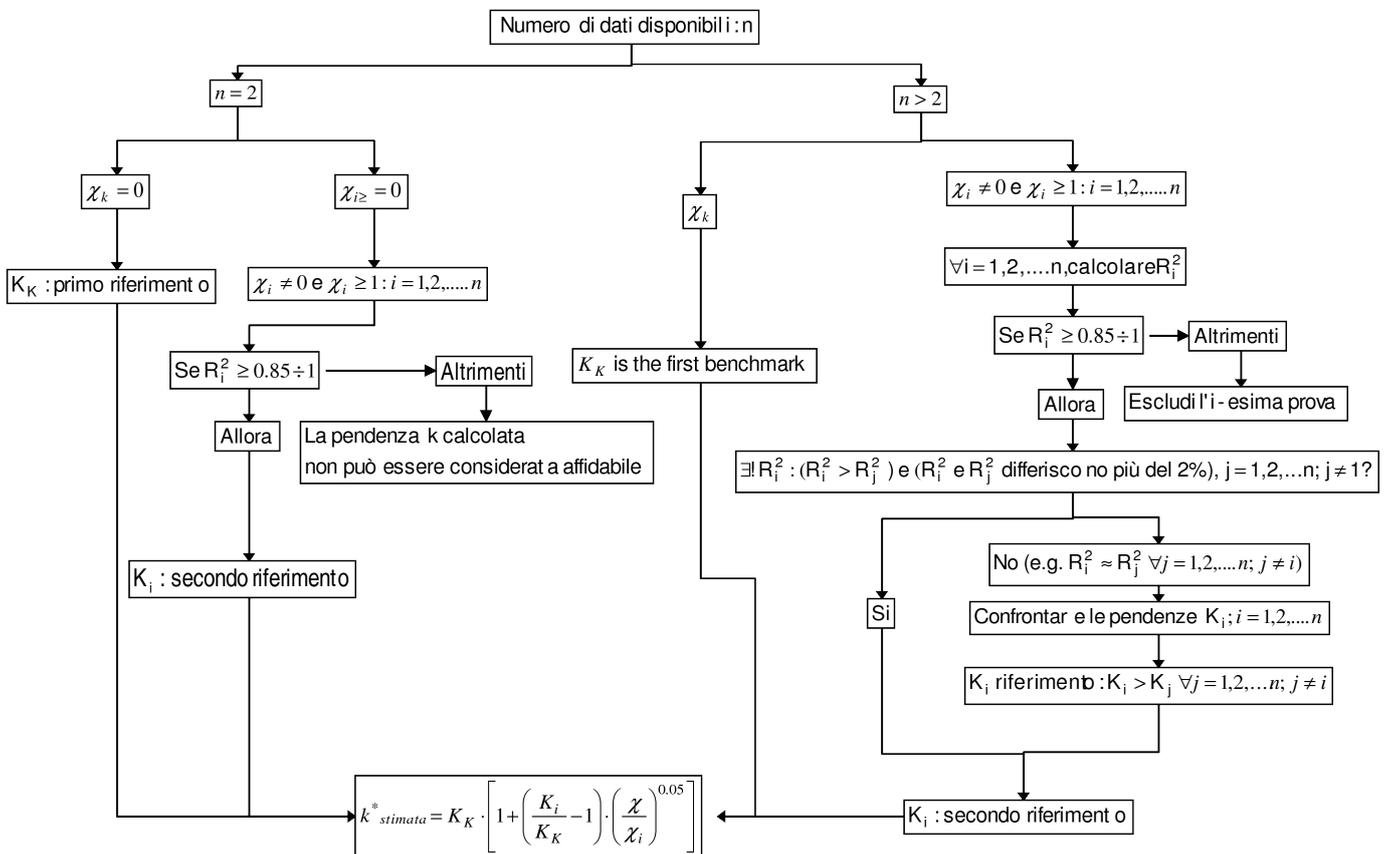


Figura 6: Schema a blocchi sviluppato per il calcolo della pendenza k delle curve S-N

formulazione con la quale si è ottenuto un errore medio percentuale di circa il 20%. Occorre tuttavia considerare che tale errore sulla pendenza del tratto inclinato si riflette poco sulla stima di vita nella regione della curva S-N a vita finita (medio ed alto numero di cicli) prossima al ginocchio.

7 RINGRAZIAMENTI

Il lavoro presentato è stato svolto presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Bologna nell'ambito di un Dottorato di Ricerca.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] H. F. Moore, T. Ver, Bulk, Univ. Illinois, 27 (1930) 208.
- [2] D. Morkovin, H. F. Moore, Proc. ASTM 44 (1944) 137 (Diskuss. 156).
- [3] H. Neuber, Kerbspannungslehre. 1st Edition. Springer-Verlang, Berlin (1937).
- [4] R. E. Peterson., Timoschenko-Festschrift (1938).
- [5] H. A. Philipp, Forsch. Ing.-Wes. (1942) 13.
- [6] A. Thum, K. Federn, Spannungszustand und Bruchausbildung. Springer-Verlag, Berlin (1939).
- [7] W. Eichlseder, H. Leitner, "Influence of Stress

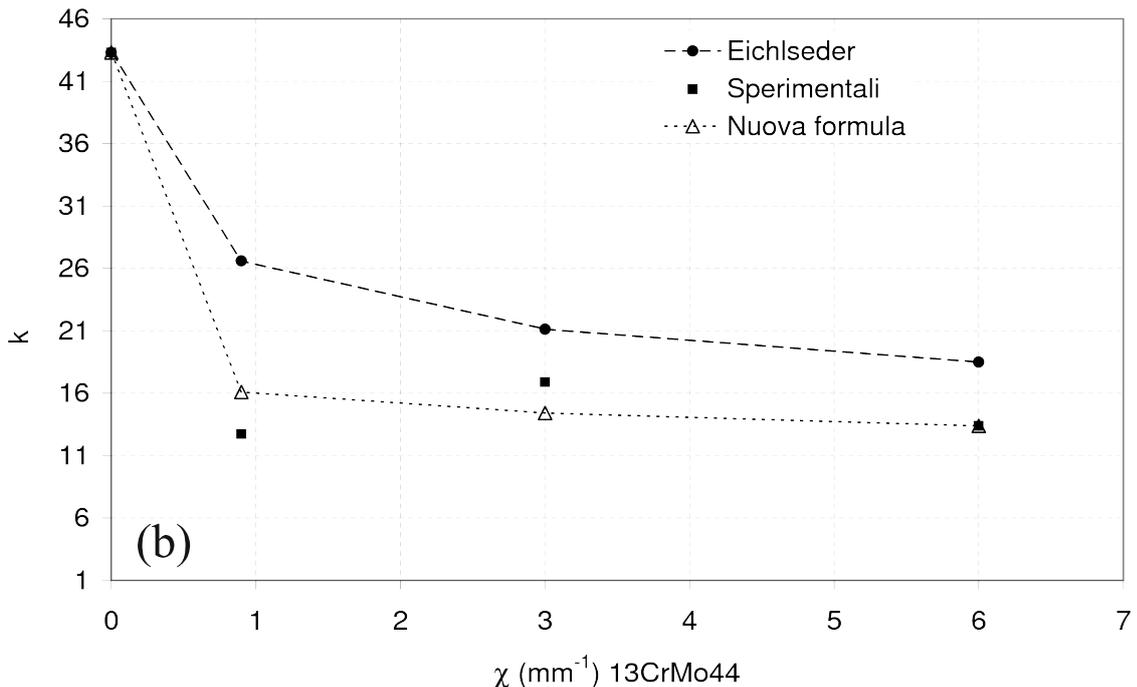
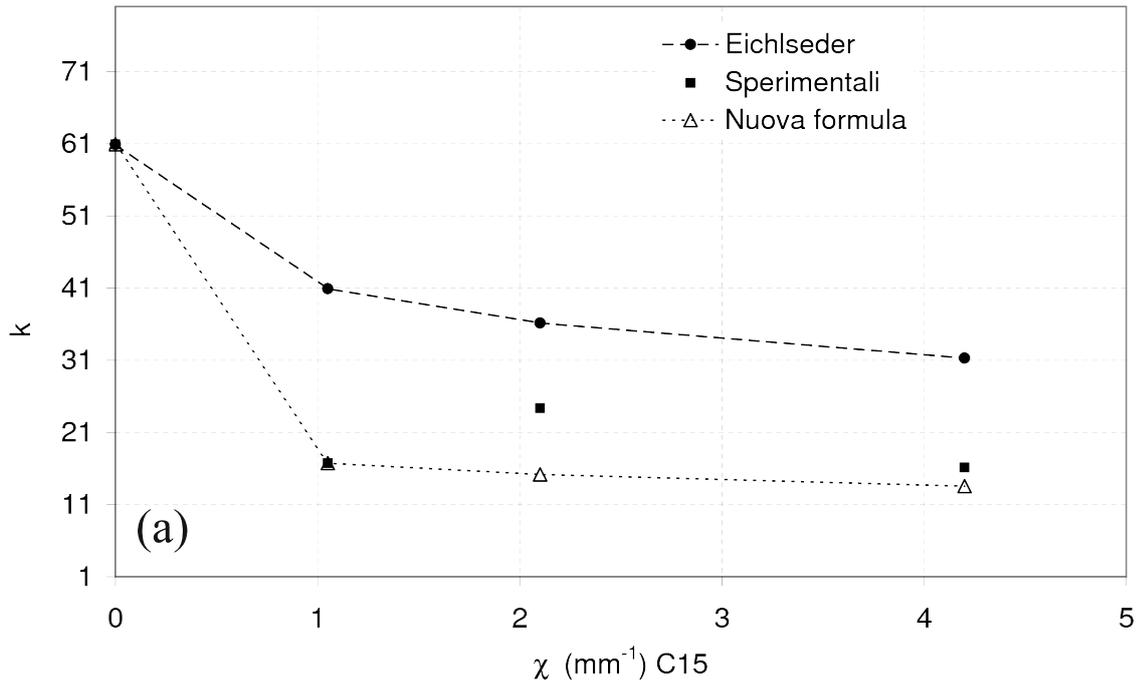


Figura 7: Confronto tra valori sperimentali e numerici predetti, in accordo con il protocollo sviluppato, della pendenza k per due acciai: (a) C15, (b) 13CrMo44.

- Gradient on S/N-Curve", *New Trends in Fatigue and Fracture* (2002).
- [8] W. Eichlseder, "Fatigue analysis by local stress concept based on finite elements results", *Computers and Structures*, 80 (2002) 2109-13.
- [9] A.D. Deutschman, W. Michels, C. Wilson, "Machine Design: Theory and Practice", Collier Macmillian Publishers (1975).
- [10] E. Haibach, *Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung 2.Auflage*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany (2002).
- [11] G. Niemann, H. Winter, B. R. Hohn, P. Davoli, *Manuale degli organi di macchine. Edizione italiana, Tecniche Nuove* (2006).
- [12] Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), *Analytical strength assessment of components in mechanical engineering. 5th , revised edition, English version, VDMA Verlag GmbH* (2003).
- [13] M. Stieler, *Untersuchungen über die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile bei Raumtemperatur, Dissertation, TU Stuttgart* (1954).
- [14] E. Siebel, M. Stieler, *Ungleichformige Spannungsverteilung bei schwingender Beanspruchung, VDI-Z 97* (1955) 121-126.
- [15] C. Petersen, *Die Vorgänge im zugig und wechselnd beanspruchten Metallgefüge. Teil 3. Z., Metallkunde* 42(6) (1951) 161-170.
- [16] C. Petersen, *Die Vorgänge im zugig und wechselnd beanspruchten Metallgefüge. Teil 4. Z., Metallkunde* 43(12) (1952) 429-433.
- [17] H. Neuber, *Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen, Konstruktion* 20(7) (1968) 245-251.
- [18] M. Hück, L. Thrainer, W. Schütz, *Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Grauguss – Synthetische Wöhlerlinien* (1981).
- [19] F. Bollenrath, A. Troost, *Wechselbeziehungen zwischen Spannungs-und Verformungsgradient. Teil 1. Arch. Eisenhüttenwesen* 21 (11/12) (1950) 431-436.
- [20] F. Bollenrath, A. Troost, *Wechselbeziehungen zwischen Spannungs-und Verformungsgradient. Teil 2. Arch. Eisenhüttenwesen* 22 (9/10) (1951) 327-335.
- [21] F. Bollenrath, A. Troost, *Wechselbeziehungen zwischen Spannungs-und Verformungsgradient. Teil 3. Arch. Eisenhüttenwesen* 23 (5/6) (1952) 193-201
- [22] H. Dietmann, *Zur Berechnung von Kerbwirkungszahlen, Konstruktion* 37(2) (1985) 67-71.
- [23] R. B. Heywood, "The relationship between fatigue and stress concentration", *Aircraft Engineering* 19 (1947) 81-84.
- [24] E. Siebel, H.O. Meuth, "Die Wirkung von Kerben bei schwingender Beanspruchung", *VDI Journal* 91 (1949) 319-323.
- [25] P. Kuhn, H.F. Hardraht, "An Engineering Method for Estimating the Notch-Size Effect in Fatigue test on Steel". NACA TN2805, Langlet Aeronautical Laboratory, Washington, (1952).
- [26] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, H. O. Fuchs, H. O. *Metal Fatigue in Engineering*, 2nd ed., Wiley, New York (2001).
- [27] R. B. Heywood, *Designing against fatigue*, London, Chapman and Hall (1962).
- [28] B. Reggiani, *Simulation models in Biomechanics and Experimental Mechanics. Tesi di Dottorato in Meccanica dei materiali e dei processi tecnologici. Università degli Studi di Bologna* (2007).