

STUDIO DELL'EFFETTO DELLA NON PROPORZIONALITÀ DELLO STATO DI SFORZO SULLA RESISTENZA A FATICA

A. Bernasconi¹, P. Davoli¹, M. Filippini¹, S. Foletti¹ and I.V. Papadopoulos²

¹Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, Via La Masa 34, 20156 Milano

²European Commission, JRC, IPSC, Ispra, Italy

E-mail: andrea.bernasconi@polimi.it; piermaria.davoli@polimi.it; stefano.foletti@polimi.it; mauro.filippini@polimi.it; joannis.papadopoulos@cec.eu.int;

SOMMARIO

L'effetto della non proporzionalità dello stato di sforzo sul comportamento a fatica multiassiale è stato indagato sia da un punto di vista sperimentale, considerando diversi materiali e diversi percorsi di carico, sia teorico, valutando le previsioni fornite da alcuni criteri di resistenza. Prove di fatica assiali-torsionali, caratterizzate da una componente di sforzo assiale di compressione pulsante dallo zero e una componente tangenziale alternata con uno sfasamento imposto tra i due segnali pari a 90° sono state condotte su un acciaio R7T impiegato per la costruzione di ruote ferroviarie monoblocco per treni ad alta velocità. Ulteriori prove di fatica multiassiali sono state condotte su un acciaio da bonifica, 39NiCrMo3, per studiare l'influenza di una differente frequenza tra componente assiale e tangenziale. Le prove descritte hanno permesso di indagare l'effetto della non proporzionalità dello stato di sforzo e della presenza di una componente assiale di compressione sulla durata a fatica, evidenziando i limiti di applicabilità di alcuni criteri.

1. INTRODUZIONE

La valutazione dell'efficienza dei criteri di fatica multiassiale richiede necessariamente il confronto con i risultati di prove sperimentali. In letteratura sono stati pubblicati numerosi dati sperimentali, ai quali è possibile attingere per condurre analisi comparative tra differenti approcci [1]. Tuttavia il panorama delle prove sperimentali reperibili in letteratura, già di per sé limitato, è ulteriormente circoscritto a situazioni caratterizzate da percorsi di carico proporzionali o a percorsi non proporzionali, ottenuti il più delle volte introducendo uno sfasamento tra componenti di sforzo alternate applicate con la stessa frequenza.

Questa limitazione non consente pertanto di selezionare ed impiegare con sufficiente confidenza i criteri più efficienti in alcuni casi di interesse pratico. Uno di questi casi è la fatica da contatto da rotolamento, un fenomeno di danneggiamento sotto-superficiale che si può manifestare per l'azione del campo di sforzi generato dal contatto, caratterizzato da componenti di sforzo non proporzionali. A titolo esemplificativo, in Figura 1 è riportato l'andamento dello stato di sforzo al di sotto del contatto mobile di un cilindro su un semispazio, entrambi elastici. Si può osservare che sono presenti uno sforzo di taglio alternato e tre componenti normali di compressione, pulsanti e sfasate di 90° rispetto allo sforzo di taglio. Per questo tipo di problema è frequentemente riportata in letteratura l'applicazione di criteri di fatica multiassiale [2-4], ma non sempre è stata verificata l'attendibilità delle loro previsioni in casi simili, facilmente riproducibili in laboratorio.

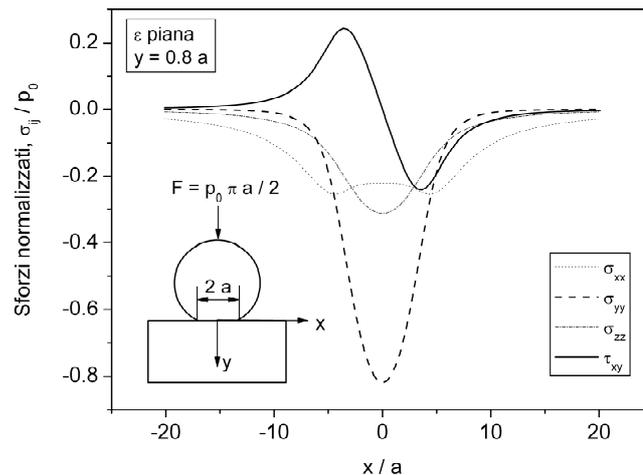


Figura 1: Componenti del tensore degli sforzi in un punto al di sotto di un contatto hertziano mobile (cilindro su semispazio elastico).

Un altro banco di prova significativo per i criteri è rappresentato dall'applicazione di sforzi aventi frequenze diverse che, rispetto a sollecitazioni isofrequenziali in fase, rappresentano un caso più vicino, sebbene semplificato, alle reali condizioni di impiego di molti componenti.

2. STATI DI SFORZO NON PROPORZIONALI

Nel seguito verranno presentati e discussi i risultati di alcune prove sperimentali condotte dagli autori e caratterizzate da uno stato di sforzo non proporzionale, più precisamente:

- sforzi assiali non alternati, con sovrapposta torsione alternata e sfasata, applicata con la stessa frequenza
- sforzi assiali e torsionali aventi frequenze diverse.

2.1 Compressione e torsione sfasate

L'indagine sperimentale è stata impostata alla verifica dell'effetto sul limite di fatica in torsione alternata di una componente assiale pulsante di compressione applicata con una differenza di fase di 90° . Lo stato di sforzo che si ottiene è non proporzionale, come mostrato in Figura 2. Questo stato di sforzo approssima le sollecitazioni tipiche dello stato tensionale in corpi a contatto, come ad esempio il ruota e rotaia.

La sola torsione con sovrapposta azione assiale non consente di simulare lo stato di sforzo triassiale che si ha in corrispondenza dei punti sottostanti l'impronta di contatto. Un'ulteriore approssimazione si può ottenere utilizzando provini tubolari cavi soggetti anche ad una pressione esterna in fase con l'azione assiale, che consente di aggiungere una seconda componente di sforzo normale, perpendicolare a quella generata dall'azione assiale, ottenuta per mezzo della sollecitazione circonferenziale di compressione [5]. Tuttavia l'impiego di questa tecnica comporta la necessità di disporre di una camera di pressione che applichi la pressione all'esterno del provino, un aggravio di costi nella realizzazione dei provini rispetto alla più semplice soluzione a clessidra piena, ed una riduzione significativa della frequenza di applicazione dei carichi, che risulta inferiore a 1 Hz.

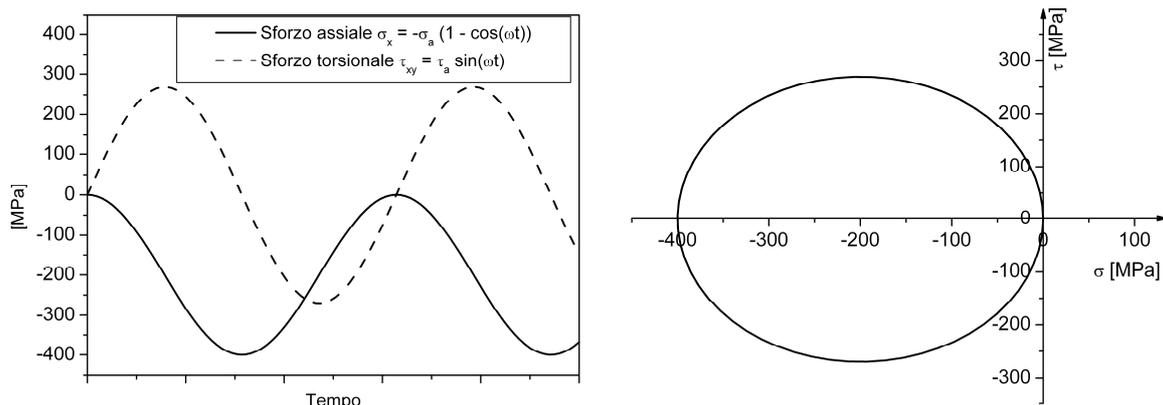


Figura 2: Percorso di carico composto da torsione e azione assiale di compressione, sfasate.

2.1 Azione assiale e torsione a frequenze diverse

In questo caso si è voluto valutare l'effetto della variazione del rapporto tra le frequenze tra lo sforzo assiale e quello di torsione, nel seguito indicato con il simbolo $\lambda = f_\tau / f_\sigma$. Entrambi gli sforzi assiale e torsionale hanno seguito una storia temporale sinusoidale alternata. Il rapporto tra le ampiezze degli sforzi è stato mantenuto costante e pari a $\tau_a / \sigma_a = 1/\sqrt{3}$. Sono stati scelti valori di $\lambda = 1, 2$ e 3 (v. Figura 3).

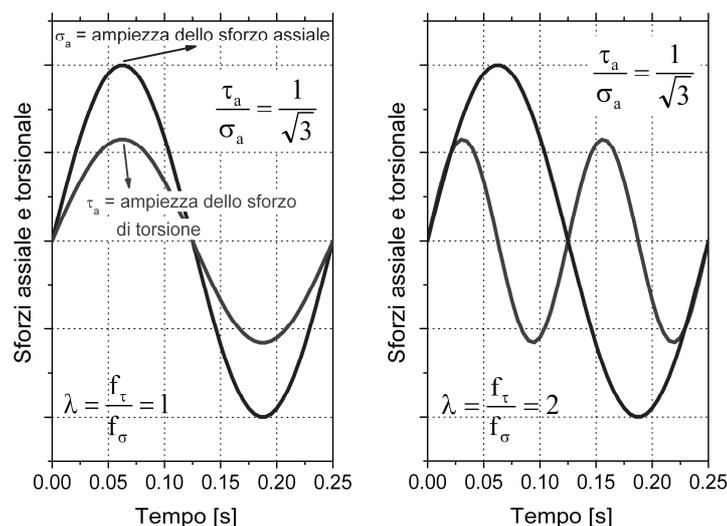


Figura 3: Percorsi di carico composti da azione assiale e torsione alternate, aventi diverse frequenze.

3. MATERIALI E METODOLOGIE SPERIMENTALI

I materiali oggetto della sperimentazione sono stati i seguenti:

- acciaio R7T, per le prove di fatica in compressione pulsante e torsione sfasate;
- acciaio 39NiCrMo3, per le prove di azione assiale e torsione a frequenze diverse.

Tutte le prove sono state condotte su una macchina servo-idraulica MTS 809, dotata di un attuatore assiale-torsionale di capacità assiale di 250 kN e torsionale di 2000 Nm a controllo indipendente. Le prove sono state condotte in controllo di forza.

3.1. Acciaio per ruote ferroviarie R7T

Si tratta di un acciaio a struttura ferritica-perlitica comunemente impiegato per la realizzazione di ruote ferroviarie monoblocco destinate ai treni ad alta velocità. Le proprietà meccaniche più significative sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1: Proprietà dell'acciaio R7T

R_m [MPa]	σ_w [MPa]	τ_w [MPa]
820-940	375	312

Le prove di fatica multiassiale sono state condotte su provini pieni estratti da alcune ruote ferroviarie, secondo lo schema riportato in Figura 4. Le prove sono consistite in tre serie, caratterizzate da oscillazioni del carico assiale pulsante di compressione di 0 MPa, 200 MPa e 400 MPa, e da carichi torsionali la cui ampiezza è stata variata secondo una sequenza di tipo *staircase* breve [6], al fine di definire la variazione del limite di fatica torsionale in funzione del carico assiale. Una descrizione più completa della sperimentazione è riportata in [7, 8].

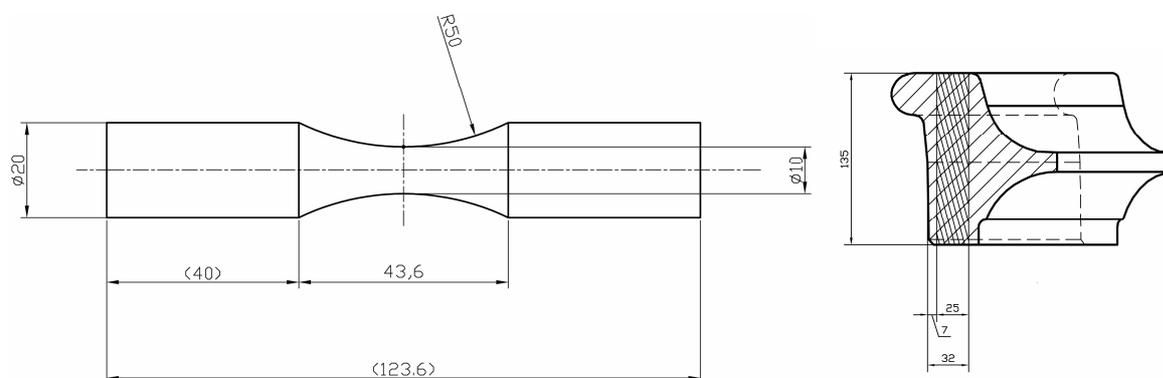


Figura 4: Disegno di provini pieni utilizzati per le prove multiassiali sull'acciaio R7T e posizione di estrazione dalle ruote ferroviarie

3.1. Acciaio 39NiCrMo3

Il materiale studiato è un acciaio bonificato di normale impiego nelle costruzioni meccaniche. Le proprietà sono riassunte in Tabella 2. I provini, a clessidra e pieni, aventi un tratto utile di 16 mm di diametro, sono stati ricavati da barra per tornitura, seguita da elettro-pulitura per la rimozione degli sforzi residui. I limiti di fatica sono stati definiti mediante l'applicazione del metodo di Dixon ad una sequenza di carichi di tipo *staircase* breve sulla componente torsionale. Un maggior numero di dettagli sulla sperimentazione sono riportati in [9].

Tabella 2: Proprietà dell'acciaio 39NiCrMo3

R_m [MPa]	σ_w [MPa]	τ_w [MPa]
850	368	265

4. RISULTATI E COMMENTO

I limiti di fatica ottenuti dalla sperimentazione sull'acciaio R7T sono riportati in Tabella 3, in funzione del valore dell'oscillazione dello sforzo di compressione $\Delta\sigma$. I limiti sono indicati con il simbolo τ_{amm} . Si può osservare che i valori di τ_{amm} diminuiscono all'aumentare di $\Delta\sigma$.

Tabella 3: Risultati delle prove di fatica multiassiale sull'acciaio R7T

$\Delta\sigma_x$ [MPa]	τ_{amm} [MPa]
0	297
200	287
400	267

Questi risultati sono stati confrontati con le previsioni del criterio di Dang Van [10], in quanto è il criterio che viene proposto più frequentemente per la previsione del danneggiamento per fatica da contatto, in particolare quello tra ruota e rotaia.

Il criterio di Dang Van permette di condensare la storia temporale delle componenti del tensore degli sforzi in due scalari, funzione del tempo, $\tau_{DV}(t)$ e $\sigma_H(t)$, rispettivamente massimo sforzo di taglio (simmetrizzato) e sforzo idrostatico, calcolati nel generico istante t .

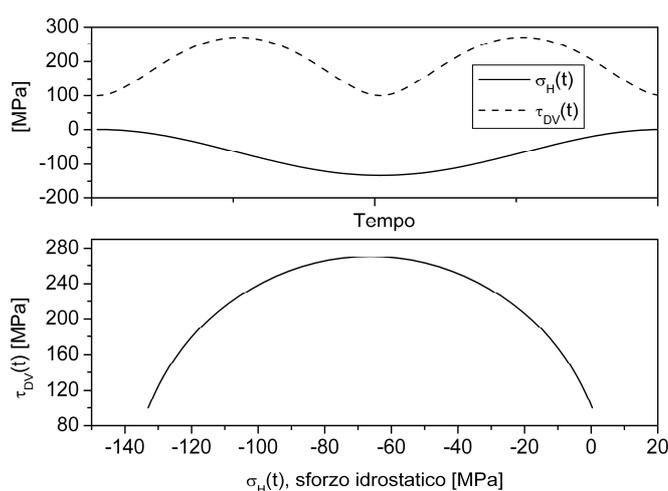


Figura 5: Rappresentazione nel piano di Dang Van dello stato di sforzo di Figura 2

In Figura 5 è mostrato l'andamento di queste due grandezze, derivate dagli sforzi rappresentati in Figura 2. Il criterio stabilisce che i valori di $\tau_{DV}(t)$ e $\sigma_H(t)$, per i quali non si ha

nucleazione del danno per fatica, sono racchiusi in un dominio rappresentato da una retta con pendenza negativa, passante per il punto $(\tau_w, 0)$. I percorsi corrispondenti ai valori di sforzo riportati in Tabella 3 avrebbero pertanto dovuto disporsi in posizioni tangenti a questa retta limite. Come è possibile osservare dal grafico di Figura 6 ciò non avviene. Si deduce invece che il criterio di Dang Va prevede un incremento dei valori di τ_{amm} , non osservato nelle prove sperimentali.

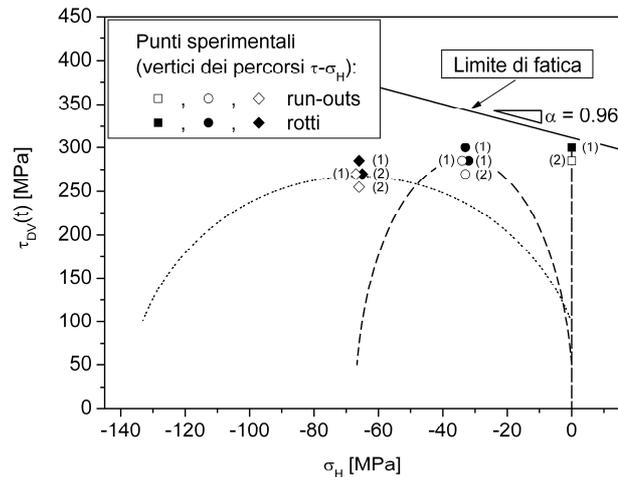


Figura 6: Rappresentazione nel piano di Dang Van dei risultati delle prove sperimentali

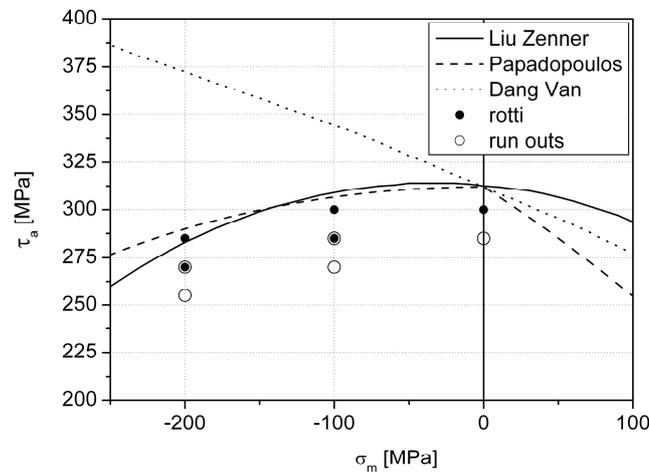


Figura 7: Confronto dei risultati sperimentali con le previsioni dei criteri di Dang Van, Papadopoulos e Liu-Zenner nel piano τ_a, σ_m

La discrepanza tra valori sperimentali e previsioni è messa in evidenza anche dal grafico di Figura 7, dove sono riportati i valori dell'ampiezza dello sforzo di torsione τ_a ed il valore medio dello sforzo normale σ_m . Nello stesso grafico di Figura 7 sono riportate anche le linee corrispondenti alle previsioni ottenute con alcuni criteri basati sull'applicazione dell'approccio integrale. Si osserva che sia il criterio di Liu-Zenner [11] che il criterio di Papadopoulos [12, 13] colgono la diminuzione dei valori di τ_a .

Tabella 4: Risultati delle prove di fatica multiassiale sull'acciaio 39NiCrMo3

	σ_{xaD} [MPa]	τ_{xaD} [MPa]
$\lambda = 1$	295	170
$\lambda = 2$	260	150
$\lambda = 3$	266	153

In Tabella 4 sono riportati i limiti di fatica ottenuti con l'acciaio 39NiCrMo3 in funzione del rapporto λ tra la frequenza dello sforzo di torsione e di quello assiale. Si osserva una diminuzione dei limiti al passaggio da $\lambda = 1$ a $\lambda = 2$, mentre la variazione per $\lambda = 3$ è più contenuta. Il confronto con le previsioni fornite dai criteri di Liu-Zenner e Papadopoulos è anche in questo caso positivo, come mostrato in Figura 8.

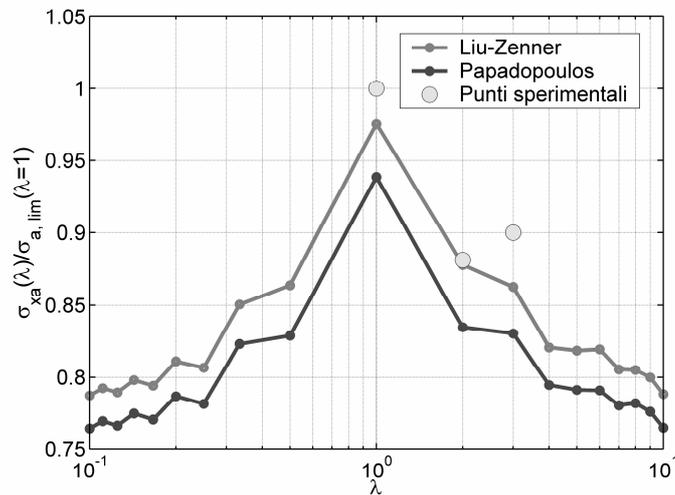


Figura 8: Confronto dei risultati sperimentali con le previsioni dei criteri di Papadopoulos e Liu-Zenner in funzione del rapporto λ tra le frequenze.

L'applicazione di criteri basati sul concetto di piano critico ha fornito previsioni contrastanti. Da un lato il criterio di Findley [14] fornisce previsioni che si discostano dai risultati sperimentali con scarti più significativi di quelli osservati a seguito dell'applicazione dei criteri basati sull'approccio integrale, pur cogliendo tuttavia la diminuzione dei limiti, come riportato in Figura 9. Questo andamento non si osserva invece nel grafico di Figura 10, dove sono riportate le previsioni ottenute applicando il criterio di Dang Van, anch'esso basato sul concetto di piano critico. Le previsioni ottenute sono caratterizzate dall'invarianza dei limiti di fatica per valori di λ dispari, mentre i valori corrispondenti a λ pari sono più alti di quelli per λ dispari, comunque decrescenti all'aumentare di λ .

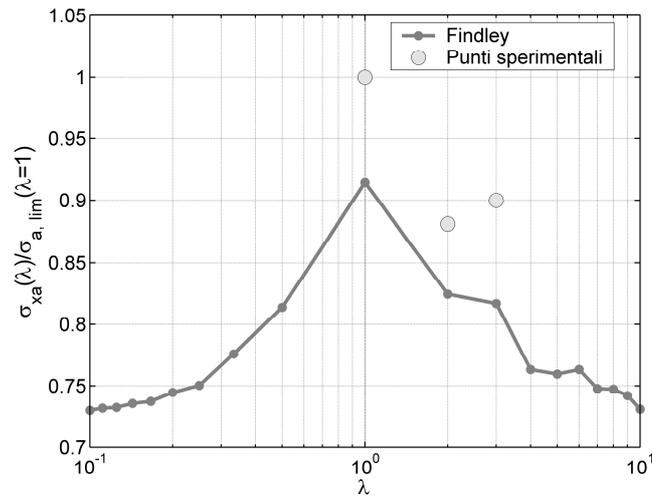


Figura 9: Confronto dei risultati sperimentali con le previsioni del criterio di Findley in funzione del rapporto λ tra le frequenze.

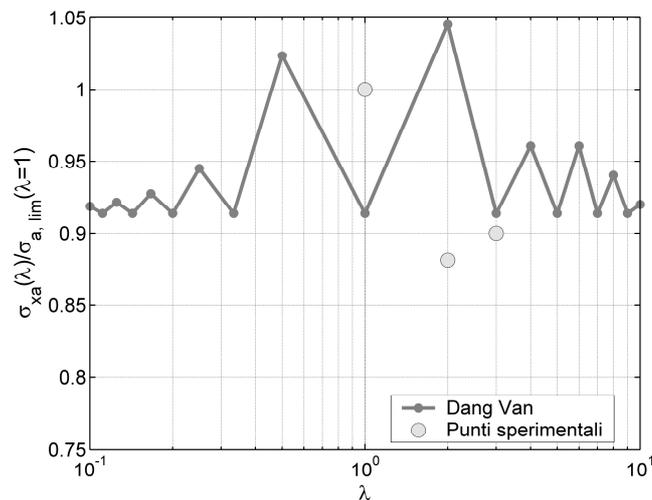


Figura 10: Confronto dei risultati sperimentali con le previsioni del criterio di Dang Van in funzione del rapporto λ tra le frequenze.

La singolare dipendenza delle previsioni del criterio di Dang Van dai valori di λ si spiega osservando i percorsi $\tau_{DV}(t)-\sigma_H(t)$ di Figura 11. In Figura 11(a) sono riportati i percorsi corrispondenti a $\lambda = 1$ e $\lambda = 2$: si può osservare che il percorso per $\lambda = 2$ non è tangente alla retta limite quando invece quello per $\lambda = 1$ la interseca. Ciò significa che secondo il criterio di Dang Van il limite di fatica per $\lambda = 2$ dovrebbe essere più alto. Allo stesso modo, come illustrato in Figura 11(b), indipendentemente dal valore di λ , purché dispari, il punto di tangenza con la retta limite rimane invariato, spiegando così l'allineamento dei punti a λ dispari che si osserva nel grafico di Figura 10.

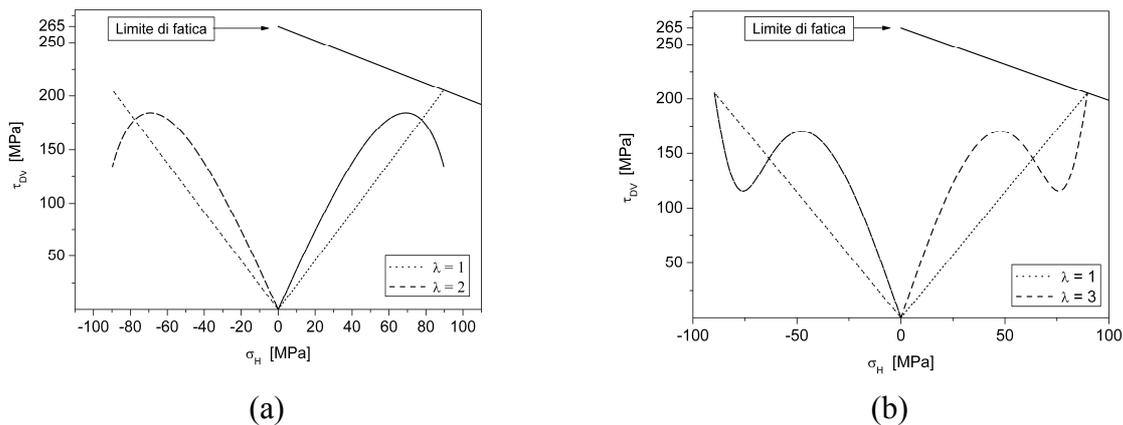


Figura 11: Interpretazione delle prove di flessione e torsione combinate al variare del rapporto delle frequenze, secondo il criterio di Dang Van.

4. CONCLUSIONI

Dall'analisi dei risultati sperimentali qui riassunti, emerge l'elevata capacità predittiva dei criteri basati sull'approccio integrale, anche per percorsi di carico non proporzionali particolarmente complessi. Sono stati invece sottolineati alcuni punti deboli del criterio di Dang Van, in particolare nel caso in cui venga applicato a problemi di fatica da contatto da rotolamento.

L'indagine risulta limitata soltanto ad alcuni criteri e pertanto non può considerarsi esaustiva, non essendo stati ancora considerati molti criteri, in particolare quelli di più recente formulazione.

In ogni caso dai risultati qui presentati si può osservare come un'analisi comparativa in grado di individuare pregi e limiti dei differenti approcci sia più discriminante quando si considerino dati sperimentali relativi a percorsi di carico non proporzionali complessi, che ad esempio contemplino la presenza di componenti medie di compressione o sforzi applicati con frequenze diverse.

Bibliografia

- [1] I.V. Papadopoulos, P. Davoli, C. Gorla, M. Filippini, A. Bernasconi, A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals, *Int J Fatigue*, vol.19 No. 3, pp. 219-235, 1997
- [2] J.W. Ringsberg, M. Loo-Morrey, B.L. Josefson, A. Kapoor, J.H. Beynon, Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue, *Int. J. Fatigue* 22, (2000) 205–215.
- [3] A. Ekberg, Rolling contact fatigue of railway wheels – a parametric study, *Wear* 211 (1997) 280–288.
- [4] A. Ekberg, E. Kabo, H. Andersson, An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 25 (2002) 899–909.
- [5] A. Bernasconi, P. Davoli, M. Filippini, S. Foletti, Dispositivo di pressurizzazione esterna di provini cavi per prove di fatica multiassiale, XXXI Convegno Nazionale Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS), Parma, 18-21 Settembre 2002
- [6] W. Dixon, F. Massey, *Introduction to statistical analysis*, McGraw-Hill, New York, 1983.

- [7] A. Bernasconi, P. Davoli, M. Filippini, S. Foletti, An integrated approach to rolling contact sub-surface fatigue assessment of railway wheels, *Wear*, Vol. 258/7-8, pp 973-980, 2005
- [8] A. Bernasconi, M. Filippini, S. Foletti and D. Vaudo, Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under combined out of phase torsion and pulsating negative axial load. 7th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture. June 28 – July 1, 2004, Berlin, Germany
- [9] A. Bernasconi, S. Foletti, Effect of the frequency ratio on the fatigue limit under combined torsion and axial load, 3rd Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics. May, 12-15 2004 Porretta Terme (BO)
- [10] K. Dang Van, B. Griveau, O. Message, On a new multiaxial fatigue limit criterion: theory and application, in: M.W. Brown, K.J. Miller (Ed.), *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, EGF 3, pp. 479–496, 1989.
- [11] Liu J and Zenner H. Fatigue limit of ductile metals under multiaxial loading, in *Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture*. Carpinteri A, de Freitas M and Spagnoli A editors. ESIS STP Vol. 31. Elsevier Science. ISBN: 0-08-044129-7, 2003, pp. 147–163.
- [12] Papadopoulos IV A high-cycle fatigue criterion applied in biaxial and triaxial out-of-phase stress conditions. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 1995; 18: 79-91.
- [13] Papadopoulos IV. A new criterion of the fatigue strength for out-of-phase bending and torsion. *Int J Fatigue* 1994;16(6):377–84.
- [14] W.N. Findley, A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending, *J. Eng. Ind.-Trans. ASME*, 81 (1959) 301–306.