

SESSIONE A
VEICOLI

**OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DI DELIBERA
SPERIMENTALE DI UN VEICOLO**

C. Braccesi, F. Cianetti, D. Pioli

*Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli studi di Perugia,
Via G. Duranti 1 - 06125 Perugia, e-mail: pioli@caedii.unipg.it*

SOMMARIO

Questo articolo descrive il processo di progettazione di prove di durata (*durability tests*) relativamente ad un nuovo veicolo da immettere sul mercato; tali prove devono riprodurre missioni veicolari rappresentative della reale vita operativa del veicolo (*target*), in maniera accelerata, affidabile e controllata mediante utilizzo di banchi prova.

Per non perdere di significatività, le prove di affidabilità si devono basare su misure sperimentali eseguite su un prototipo fisico del veicolo sottoposto a prove su strade pubbliche; questi dati, una volta traslati nel dominio Rainflow, serviranno per definire con tecniche matematiche e statistiche, un target di riferimento. A questa prima fase di definizione della missione del veicolo su strade, ne segue una seconda in cui il veicolo viene testato su percorsi prova (*test tracks*) appositamente progettati per concentrare gli eventi danneggianti in distanze più corte.

Infine viene selezionata una particolare combinazione di percorsi prova usando speciali tecniche di ottimizzazione matematica, così che la sequenza eguagli il target.

Nel corso del presente lavoro verranno pertanto descritte le tecniche utilizzate per la definizione del target, come pure i metodi di ottimizzazione utilizzati per la determinazione del mix ideale di test tracks; verrà infine presentato un caso reale in cui l'intera procedura viene applicata ad un veicolo IVECO S2000 destinato al mercato australiano.

L'attività è frutto di una collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia e la IVECO Testing Labs & Methodologies di Torino.

1. INTRODUZIONE

Uno degli obiettivi che ci si pone nell'ambito della progettazione di un nuovo prodotto consiste nell'accelerare la fase di sviluppo e ridurre di conseguenza il così detto "time to market".

Sicuramente una delle fasi più importanti e critiche, perché particolarmente dispendiosa per quanto concerne tempi e costi, è rappresentata dalle prove di affidabilità da effettuare su un suo prototipo. Occorrerà pertanto progettare una strategia di prova sufficientemente affidabile in grado di verificare in modo veloce, sicuro e controllato, le varie caratteristiche funzionali e di affidabilità che il veicolo deve avere (comfort, resistenza meccanica, vita a fatica, ...). In parallelo bisognerà fare in modo che tali prove siano il più possibile corrispondenti con il reale utilizzo che si ipotizza esser fatto del prodotto da parte del cliente (*customer usage*) nel corso della sua vita operativa.

Scopo del presente lavoro è definire una procedura ottimizzata in grado di sintetizzare, a partire da storie temporali di tensione\deformazione e di accelerazione misurate su campo, e di conseguenza rappresentative del reale utilizzo, le funzioni del tempo con cui si comandano i banchi prova per simulare la vita operativa del veicolo. Ciò consentirà di ridurre tempi e costi del ciclo di produzione del singolo veicolo, ma anche di generare un database di funzioni di comando, catalogate per diverse missioni veicolari e per diverse tipologie di veicolo [1], utilizzabile nella fase di progettazione (*test-schedule*).

2. PROCESSO DI DELIBERA SPERIMENTALE: "DURABILITY TESTS"

La procedura sviluppata ripercorre le fasi di un tipico processo di delibera sperimentale. Nella prima fase si definisce la missione operativa del veicolo. Ciò viene fatto rilevando sperimentalmente su un prototipo fisico del veicolo una serie di misure (per lo più di tipo accelerometrico ed estensimetrico) eseguite su strade pubbliche in grado di rappresentare in maniera adeguata quelle che esso incontrerà nel corso della sua vita operativa (*data acquisition*).

Quantificare la vita del veicolo, intesa come chilometraggio totale che esso dovrà garantire, ed individuare le diverse tipologie di superfici stradali che esso incontrerà, nonché il loro peso percentuale, è un compito piuttosto difficile, risolvibile solo con approccio di tipo statistico basato su indagini di mercato sull'utilizzo fatto dai propri clienti [2]. In tal modo è possibile definire delle distanze-obiettivo, relativamente ad ogni diversa condizione stradale, percorse ad esempio dal 90% dei clienti e sulle quali impostare la campagna di misura.

Ovviamente le acquisizioni vengono eseguite per distanze ben più corte di quelli che sono i reali obiettivi di progetto. Il processamento dei segnali acquisiti mediante particolari algoritmi di conteggio (in particolar modo il Rainflow [4-6]) consente di ottenere un'immagine sintetica di tutti i canali di acquisizione in forma matriciale e quindi facilmente manipolabile matematicamente col fine di applicare tecniche statistiche di estrapolazione e sovrapposizione che permettono, come vedremo successivamente nel terzo paragrafo, di sintetizzare le analoghe matrici relative all'intera distanza obiettivo (target).

Inoltre l'utilizzo della statistica degli eventi estremi, direttamente applicabile alle matrici Rainflow (estrapolazione quantile), dà al progettista l'ulteriore possibilità di identificare le condizioni peggiori di servizio (*worst case*) che il veicolo può trovarsi ad affrontare nel corso della sua vita; un'applicazione alquanto esplicativa è la possibilità

di poter valutare quale tra un certo numero di piloti sia il guidatore che maggiormente sollecita il veicolo per esempio dal punto di vista della resistenza a fatica. È intuitivo come identificare la situazione di peggiore di utilizzo per la definizione del target sia un primo input di affidabilità e qualità nell'ambito della progettazione di durability tests.

La fase successiva della procedura consiste nell'individuare una serie limitata di percorsi prova (*proving ground* o *test tracks*) cui sottoporre il medesimo prototipo strumentato nel medesimo modo. L'utilizzo di percorsi prova progettati ad "hoc" per concentrare l'evento danneggiante in distanze più brevi, consente, come è ovvio, un notevole risparmio di tempo, introducendo un sensibile fattore di accelerazione all'intera procedura di prova. Quello che può sembrare poco chiaro è la correlazione esistente tra i percorsi prova e il reale utilizzo del veicolo; scopo del presente lavoro consiste proprio nell'identificare una o più sequenze di questi percorsi prova che nella loro combinazione ottimale riproducano il più fedelmente possibile il target per ogni canale di acquisizione, come verrà meglio spiegato nel quarto paragrafo.

Per far ciò occorre post-processare tutte le storie temporali (*time histories*) acquisite durante questa seconda fase, con le già citate tecniche di conteggio, ottenendo per ognuna delle suddette prove altrettante matrici quanti sono i canali di acquisizione.

A questo punto si hanno a disposizione tutti gli input necessari per poter determinare il mix di test tracks ottimale in grado non solo di accelerare la procedura di prova, ma anche di mantenere la "correlazione", con le condizioni di reale utilizzo.

3. IL DOMINIO "RAINFLOW"

Come detto la prima parte del processo consiste in una fase di acquisizione dati in cui vengono misurati segnali temporali con prove sperimentali eseguite sia su strade pubbliche, sia su percorsi prova particolarmente gravosi.

Ovviamente i segnali temporali dovranno essere validati in modo da eliminare tutti quei difetti insiti nelle normali tecniche di acquisizione come spikes, drifts, rumore elettrico (*data consolidation*). A tal proposito si possono utilizzare tecniche di validazione che lavorano sia nel dominio del tempo, sia in quello della frequenza [3].

Un dominio particolarmente favorevole in cui processare le *time histories* acquisite per lo scopo che ci siamo proposti, è il dominio Rainflow [4-6]. Come è noto infatti questo è il dominio più naturale in cui fare analisi di fatica su componenti meccanici. Difatti il metodo di conteggio Rainflow consente di individuare, estrarre e catalogare dalle storie temporali i cicli di fatica in esse presenti, dando degli outputs espressi in forma matriciale facilmente manipolabili matematicamente e che di conseguenza ben si prestano ad essere post-processati con tecniche di sintesi (estrapolazione e sovrapposizione) per la definizione del target [7-9], nonché con tecniche di ottimizzazione per la definizione del mix ottimale di test tracks [1-2],[10-11], che verranno trattati nel quarto paragrafo del presente lavoro.

3.1 Sovrapposizione

Tale tecnica consente di concatenare e combinare tra loro due o più eventi in un unico istogramma (Rainflow matrix). Come è noto la matrice Rainflow della somma di due storie temporali sarà in generale diversa dalla somma delle singole matrici Rainflow; supponendo di avere due *time histories* $s_1(t)$ e $s_2(t)$, allora l'effetto del loro concatenamento si potrà stimare correttamente utilizzando la seguente relazione:

$$RF[s_1(t) \oplus s_2(t)] \equiv [RFM_1] + [RFM_2] + RF[RES_1 \oplus RES_2] \quad (1)$$

Dove RF indica l'algoritmo di processamento Rainflow, \oplus il concatenamento temporale, mentre RFM e RES rispettivamente le matrici Rainflow ed i residui delle due storie temporali. La precedente relazione si può così interpretare: il Rainflow effettuato sulla sequenza temporale che si ottiene concatenando le due time histories $s_1(t)$ e $s_2(t)$, è pari alla somma delle matrici Rainflow delle singole time histories più il Rainflow eseguito sul concatenamento temporale dei due residui.

3.2 Estrapolazione

Un'operazione di estrapolazione può essere effettuata in termini di lunghezza o di "severità" [7]. Nel primo caso tale tecnica consente di stimare la matrice Rainflow relativa ad una certa distanza, a partire da misure effettuate su distanze più brevi; nel secondo caso consente di individuare la situazione di peggiore utilizzo quando si hanno a disposizione diverse misure in cui viene fatto variare un parametro (ad esempio il guidatore). Come è intuitivo non si può estrapolare semplicemente moltiplicando le matrici per il corrispondente fattore di scala. Per prima cosa occorre considerare che, se viene aumentata la durata della prova, con ogni probabilità si osserveranno cicli con ampiezza più elevata, e quindi meno frequenti, che nella prova originaria potevano non essere presenti (statistica degli eventi estremi [8-9]). Collegato a quanto appena detto c'è l'effetto del residuo che può portare alla chiusura di cicli di ampiezza molto maggiore di quella che ci aspetteremmo se semplicemente moltiplicassimo le matrici Rainflow per un fattore di scala. Infine occorre considerare che i cicli possono variare leggermente la loro posizione all'interno della RFM e quindi passare da un elemento (*bin*) ad un altro, caso strettamente legato alla statistica del fenomeno ed alla natura discreta della RFM; occorrerebbe pertanto tenere conto della distribuzione statistica dei cicli all'interno della RFM. Ciò può esser fatto trasformando la RFM in una funzione continua. L'utilizzo di stimatori non parametrici di natura locale, consente di definire, a partire da una matrice discreta, la corrispondente funzione densità di probabilità dei cicli Rainflow; gli stimatori da utilizzare devono inoltre riflettere l'ulteriore necessità di "correlare" il più possibile tra loro gli elementi appartenenti alla stessa sub-diagonale della RFM, perché aventi stessa ampiezza e quindi parimenti danneggianti (da questo fatto deriva tra l'altro la natura locale di tali estimatori). Una distribuzione che risponde a questi requisiti è la binormale a media nulla, così esprimibile:

$$K(u, v) = \frac{1}{2^p \sqrt{\det \Sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2}(u, v)\Sigma^{-1}\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}\right) \quad (2)$$

in cui:

$$\Sigma = \frac{1}{2} \mathbf{s}^2 \begin{pmatrix} I^2 + 1 & I^2 - 1 \\ I^2 - 1 & I^2 + 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Σ rappresenta la matrice di covarianza dipendente da \mathbf{s} (deviazione standard) e I che è un parametro ("peso") che va scelto in maniera tale da soddisfare la speciale necessità che gli elementi appartenenti alla stessa sub-diagonale abbiano la medesima influenza sulla funzione K . La funzione K va considerata come una funzione densità di probabilità dei cicli Rainflow, per cui il suo utilizzo per effettuare una estrapolazione (semplicemente moltiplicandola per il corrispondente fattore di scala) risolve implicitamente i problemi relativi alla distribuzione statistica dei cicli all'interno della RFM ed alla natura discreta delle matrici Rainflow.

4. “CUSTOMER CORRELATION”

Supponendo di aver acquisito da n canali, si avrà un target definito da n matrici Rainflow ($RFM_T^{(i)}$) ed altrettante matrici dello stesso formato per ognuno degli m test tracks sui quali si è svolta la seconda fase di acquisizione sperimentale ($RFM_j^{(i)}$):

$$\begin{aligned} \text{TARGET} &= \{RFM_T^{(1)}, RFM_T^{(2)}, \dots, RFM_T^{(n)}\} \\ \text{TRACK } j &= \{RFM_j^{(1)}, RFM_j^{(2)}, \dots, RFM_j^{(n)}\}, \quad j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4)$$

A questo punto è possibile eseguire un'operazione di ottimizzazione matematica col fine di determinare il numero di ripetizioni di ogni singolo test track per eguagliare la matrice Rainflow del target per ogni canale di acquisizione (*customer correlation*). Tale operazione viene effettuata utilizzando differenti algoritmi di ottimizzazione che sono presenti in letteratura ed implementati in differenti softwares commerciali [1-2], [10-11].

4.1 Algoritmi di ottimizzazione

Il più immediato fra i vari algoritmi di ottimizzazione per effettuare un'operazione di customer correlation, è senz'altro un semplice algoritmo lineare [2], che, relativamente all'i-esimo canale di acquisizione, può essere espresso nella seguente forma:

$$RFM_T^{(i)} \cong \mathbf{a}_1^{(i)} RFM_1^{(i)} + \mathbf{a}_2^{(i)} RFM_2^{(i)} + \dots + \mathbf{a}_m^{(i)} RFM_m^{(i)} = \sum_{j=1}^m \mathbf{a}_j^{(i)} RFM_j^{(i)} = RFM_{OTT}^{(i)} \quad (5)$$

In cui $RFM_{OTT}^{(i)}$ è la matrice Rainflow ottimizzata per l'i-esimo canale.

La precedente relazione può essere risolta semplicemente con tecniche ai minimi quadrati, che darà come risultato la n-upla di valori $(\mathbf{a}_1^{(i)}, \mathbf{a}_2^{(i)}, \dots, \mathbf{a}_m^{(i)})$ con la quale combinare linearmente le matrici dei percorsi prova e definire una matrice Rainflow ottimizzata in maniera tale che sia minima la sua differenza con la relativa matrice Rainflow del target. Tale differenza sarà espressa in termini di cicli presenti (“contati”) nei singoli elementi delle due matrici (*bins*). Ovviamente è possibile ottenere una relazione simile alla precedente per ognuno dei canali di acquisizione, per cui nasce l'ulteriore problema di determinare quella particolare n-upla di valori che sia soddisfacente per tutti i canali in parallelo.

Esistono in letteratura ulteriori algoritmi di ottimizzazione più raffinati, che si basano su un approccio differente al problema [10-11]. In questo caso il parametro di controllo è il danno prodotto dalle varie Rainflow matrix (calcolabile facendo delle ipotesi sul materiale e dunque definendo le curve di durata), mentre l'ottimizzazione può essere fatta minimizzando ad esempio la lunghezza complessiva o la durata, o il costo (6), o la differenza tra il danno prodotto (8), dell'insieme dei singoli percorsi che devono approssimare la missione del veicolo. Si avrà inoltre la possibilità di imporre dei vincoli: ad esempio si potrà definire una percentuale minima o massima di utilizzo di un particolare percorso di prova. Si avranno i seguenti due ulteriori algoritmi di ottimizzazione (6), (8):

$$\min(\mathbf{a}_1^{(i)}L_1^{(i)} + \mathbf{a}_2^{(i)}L_2^{(i)} + \dots + \mathbf{a}_m^{(i)}L_m^{(i)}) = \min \sum_{j=1}^m \mathbf{a}_j^{(i)}L_j^{(i)} \quad (6)$$

tale che:

$$(\mathbf{a}_1^{(i)}D_1^{(i)} + \mathbf{a}_2^{(i)}D_2^{(i)} + \dots + \mathbf{a}_m^{(i)}D_m^{(i)}) = \sum_{j=1}^m \mathbf{a}_j^{(i)}D_j^{(i)} \geq D_T^{(i)} \quad (7)$$

$$\min |\mathbf{a}_1^{(i)}D_1^{(i)} + \mathbf{a}_2^{(i)}D_2^{(i)} + \dots + \mathbf{a}_m^{(i)}D_m^{(i)} - D_T^{(i)}| \quad (8)$$

Con la seguente condizione valida per entrambi:

$$\mathbf{b}_j \leq C_j \leq \mathbf{d}_j \quad (9)$$

In cui D è il parametro danno, L si riferisce alla lunghezza (durata o costi), le C invece rappresentano delle condizioni di vincolo relativamente all'utilizzo dei vari tracciati, mentre \mathbf{b} e \mathbf{d} sono i valori limite di C; al solito il pedice "T" identifica il target, mentre il pedice "j", il track j-esimo.

4.2 Accelerazioni e deformazioni

Finora abbiamo riportato delle relazioni che devono essere soddisfatte dalle matrici Rainflow (5) o da un parametro da esse ricavabile (8), relativamente a dei segnali temporali misurati durante prove sperimentali, senza specificare che tipo di segnali utilizzare. Come detto precedentemente i segnali acquisiti (perché più facilmente misurabili) sono essenzialmente accelerazioni e micro deformazioni; per cui l'operazione di correlazione verrà effettuata su tali tipi di storie temporali.

Però mentre da un lato la connessione tra deformazione e fatica è ben chiara, lo stesso non si può dire per le accelerazioni. Per di più dato che per effettuare una correlazione occorrono le matrici Rainflow, ci si potrebbe chiedere come sia possibile effettuare un conteggio Rainflow su segnali non estensimetrici, dal momento che esso trova la sua giustificazione teorica nell'individuazione dei cicli isteretici chiusi nel piano tensione-deformazione. D'altro lato però è tecnicamente possibile applicare l'algoritmo Rainflow anche a storie temporali non estensimetriche [4-6]. Per cui è possibile processare ad esempio segnali accelerometrici con tale algoritmo e ricavare da essi le matrici Rainflow relative; ma come interpretare tali matrici? Sicuramente non potranno essere utilizzate per fare delle previsioni sulla vita a fatica del veicolo.

Tuttavia nell'ambito di una strategia di customer correlation il conteggio Rainflow assume l'importante significato di metodo di confronto e non più soltanto quello di un metodo per estrarre le informazioni riguardanti la vita a fatica ed il danno prodotto.

In quest'ottica si potrebbe difatti definire un parametro danno da una storia accelerometrica con le consuete leggi per la sua stima (Miner). Va bene inteso però che tale valore D non rappresenta il vero danno a fatica del componente quanto piuttosto un parametro col quale confrontare tra loro due o più storie accelerometriche e valutare quale fra esse è la più gravosa. D'altra parte esistono metodi di stima del danno basati su analisi degli spettri in frequenza dei segnali di tensione; essendo le accelerazioni misurate legate alle eccitazioni del sistema, evidentemente queste producono livelli di tensione a loro proporzionali per mezzo della risposta dinamica del sistema. Quindi anche da questo punto di vista risulta significativo l'utilizzo di segnali accelerometrici.

In definitiva dunque parleremo non soltanto di cicli di fatica ottenibili applicando un conteggio Rainflow ad una storia temporale, ma più in generale di "cyclic input history"; per cui avremo cicli di accelerazione, cicli di deformazione, cicli di

spostamento, ...; si potrà definire una storia “ciclica” per ognuno dei diversi tipi di segnale misurato in fase di data acquisition stimabile da un conteggio Rainflow.

Le informazioni contenute nelle storie temporali di questi segnali di diversa natura verranno pertanto ridotte in matrici Rainflow che rappresenteranno il vero input di un processo di customer correlation. Questo anche perché, almeno in questa fase, non occorre conoscere il vero danneggiamento subito dai componenti: per quanto detto finora si può pensare che l’esatto danneggiamento venga prodotto in virtù del fatto che viene riprodotta, nel miglior modo possibile, la stessa cyclic input history del target.

Non dimentichiamo però che lo scopo finale di una customer correlation è quello di determinare una metodologia per simulare la vita a fatica; ossia in ultima analisi deve risultare che il mix di tracks trovati utilizzando il criterio di riprodurre la stessa cyclic input history del target, dia anche un’equivalenza a fatica. Ci si chiede allora come tale metodo possa funzionare.

Si assume il seguente schema logico [2]:

- La vita operativa del veicolo è proporzionale alla fatica
- La fatica è proporzionale ai cicli di deformazione
- I cicli di deformazione sono proporzionali ai cicli di tensione
- I cicli di tensione sono proporzionali ai cicli di carico
- I cicli di carico sono proporzionali alla cyclic input history

In conclusione la vita a fatica è proporzionale alla cyclic input history.

5. UN ESEMPIO APPLICATIVO

Come esempio applicativo viene di seguito descritta la procedura relativamente ad un veicolo IVECO denominato S2000 e destinato al mercato australiano (fig. 1).

Si è dovuto inizialmente mettere a punto una strategia di prova mirata a riprodurre le condizioni di normale utilizzo riscontrate nelle tipiche strade australiane. Il veicolo è stato opportunamente strumentato utilizzando trasduttori di accelerazione, di deformazione e di spostamento. In particolar modo sono stati acquisiti un totale di 28 canali così suddivisi: nove estensimetri posizionati sul telaio (fig. 2) (canali 1÷9), una rosetta estensimetrica rettangolare (fig. 3) (canali 10÷12), dieci accelerometri sul telaio (canali 12÷22), due trasduttori piezoresistivi per la misura delle corse delle sospensioni (23 e 24) ed infine quattro accelerometri sui mozzi (25÷28).



Fig. 1 IVECO S2000

L’acquisizione è stata effettuata per una distanza di circa 3.000 Km, percorsi su strade comuni australiane, di cui circa 500 Km percorsi su strade non asfaltate. In analogia a quanto detto precedentemente i dati misurati sono stati ridotti in matrici Rainflow e sottoposte a procedura di estrapolazione mediante utilizzo di fattori di scala ottenendo le corrispondenti matrici relative all’intera distanza obbiettivo, ossia 300.000 Km di cui il 70% da percorrere su strade asfaltate ed il restante 30% su sterrati.

Tale procedura di estrapolazione è stata utilizzata per uniformarci agli standard di calcolo del partner della ricerca, dovendo infatti a tal fine utilizzare un codice di calcolo commerciale (n-Code) che non prevedeva altre metodologie di estrapolazione. È da

sottolineare anche il fatto che la stessa operazione di correlazione è stata vincolata dall'utilizzo di tale codice.



Fig. 2 Estensimetro posizionato sul montante del portellone laterale



Fig. 3 Rosetta rettangolare posizionata sul vano motore

Successivamente il medesimo prototipo è stato utilizzato per acquisire inputs sui seguenti test tracks: pista denominata *highway* (strada asfaltata), pista denominata *gravel* (percorso sterrato), pista denominata *rough course* (composta da un tratto di pavè (fig. 4) più un tratto di corrugato); sono state per ultimo eseguite prove particolari come la figura otto, *bumpers* (percorso con ostacoli, fig. 5) e *twist* (percorso con buche).



Fig. 4 Test track denominato rough course (corrugato)



Fig. 5 Proving ground denominato bumpers

Le storie temporali acquisite in questa seconda fase sono state anch'esse ridotte in matrici Rainflow dello stesso formato di quelle del target, e sono state poi combinate tra loro in modo tale da approssimare la corrispondente RFM del target relativa al medesimo canale.

L'operazione di combinazione è stata effettuata applicando un semplice algoritmo lineare (5), descritto nel precedente paragrafo 4.1, ai soli canali accelerometrici dando come risultato il numero di ripetizioni dei singoli percorsi prova tale che venga riprodotta la stessa ciclic input history del target; per quanto detto precedentemente ciò dovrebbe garantire anche un'equivalenza a fatica. I risultati ottenuti sono mostrati in tabella 1 in cui vengono evidenziati i contributi dei singoli percorsi prova. Tali risultati sono da ritenersi piuttosto soddisfacenti in quanto hanno consentito una notevole riduzione della lunghezza e conseguentemente della durata della prova di delibera; in particolar modo volendo

Tab. 1 Risultati della correlazione

CORRELATION RESULT		TEST SCHEDULE	
LAPS	EVENT	LAPS	EVENT
12000	Bumps	120	Bumps
3000	Cor40	30	Cor40
600	Fig82_	6	Fig82_
13000	Gravel	130	Gravel
10000	Highway	100	Highway
600	Pav50	6	Pav50
39200	Events	392	Events
		100	Repeats

riprodurre i 300.000 Km del target rappresentativo dell'intera vita del veicolo, si ottiene una successione di percorsi di prova di una lunghezza totale di circa 37.000 Km, ottenendo comunque una discreta corrispondenza tra le matrici ottimizzate e quelle del target, come mostrato nelle figure 6 e 7. La sequenza trovata è ottimizzata relativamente al canale 20. La figura successiva mostra difatti lo spettro estraibile dalla matrice Rainflow della soluzione ottimizzata relativa a tale canale di acquisizione (in rosso), sovrapposto a quello relativo al target (in blu). L'ordinata di tale grafico rappresenta il numero di cicli contati aventi una particolare ampiezza (*range*), riportata in ascissa sottoforma di livelli normalizzati.

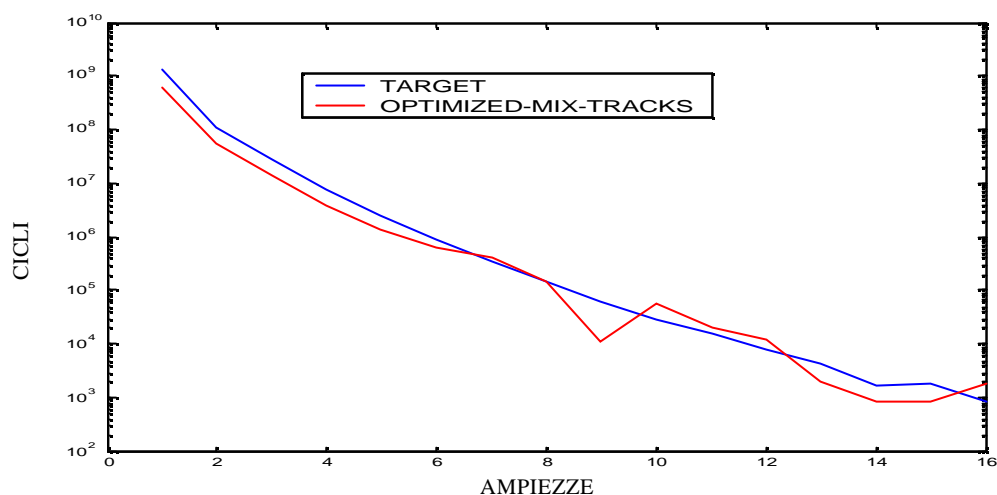


Fig. 6 Confronto tra gli spettri di carico del target e del mix di track ottimizzato relativo al canale accelerometrico n. 20

Nonostante la soluzione sia ottimizzata per il canale 20, riesce a ricostruire con accettabile approssimazione anche i restanti canali accelerometrici, come mostrato in figura 7. In cui al solito vengono riportati gli andamenti degli spettri ottenuti dalle matrici Rainflow di alcuni dei restanti canali accelerometrici confrontati con quelli relativi al target. L'equivalenza a fatica si può riscontrare da un analogo confronto tra gli spettri relativi ai canali estensimetrici, come mostrato in fig. 9 relativamente ai canali 7 ed 8.

Il numero di ripetizioni dei singoli percorsi così trovato servirà per definire i segnali di comando per i banchi prova (*test rig*) con l'ulteriore possibilità di ridurre la durata eliminando segmenti di segnale che danno un contributo irrilevante al danno totale contemporaneamente su tutti i canali. Per quest'ultima operazione, come è ovvio, si useranno solo i canali estensimetrici (*editing a fatica*).

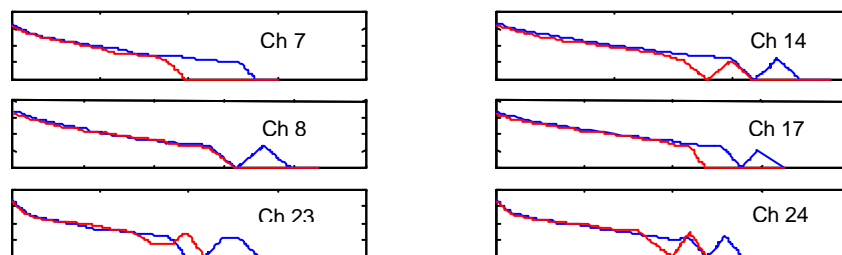


Fig. 9 Confronto tra gli spettri di carico del target e del mix di track ottimizzato relativo ai canali accelerometrici n. 13, 14, 15, 17, 23 e 25

6. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si è descritta la procedura utilizzata per progettare prove di durata e di affidabilità di un veicolo. In particolar modo si è visto come sia possibile definire a partire da segnali di accelerazione, una sequenza di percorsi prova che dia un'equivalenza a fatica relativamente a le condizioni di reale utilizzo; la modalità con la quale si sintetizzano i segnali di comando dei banchi prova a partire da tale sequenza, facendo uso dei canali estensimetrici (editing a fatica), è un altro aspetto molto importante della metodologia, meritevole di approfondimenti in lavori successivi. Una possibilità ulteriore consiste nel dare come input al processo di correlazione gli spettri in frequenza (PSD) dei segnali acquisiti, oltre alle consuete matrici Rainflow. Tale opportunità diviene particolarmente importante quando le frequenze naturali del veicolo sono all'interno della banda dell'eccitazione per cui risulta necessario ricostruire non solo la cyclic input history del target, ma anche le sue frequenze proprie. Un tale approccio al problema della correlazione inoltre, acquisisce una notevole rilevanza in relazione alla possibilità di stimare il danno a fatica direttamente a partire dagli spettri di tensione, per cui anch'esso sarà oggetto di studi e sviluppi futuri.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. D'Aprile, M. Macri, T. Bruder, C. Liefoghe, "Structural characterization of a vehicle on a rig test versus different road profiles: analysis of experimental result", *ATA*, vol. 54 n. 7/8, luglio/agosto 2001;
- [2] D. F. Ensor, "Customer correlation & Accelerated proving", *n-Code international LTD: the durability institute*;
- [3] E. O. Doebelin, "Measurement system, application and design", McGraww-Hill, New York, 1990
- [4] B. Atzori, R. Tovo, "I metodi di conteggio die cicli di fatica: stato dell'arte, problemi e possibilità di sviluppo", *ATA*, vol. 47 n. 4, aprile 1994;
- [5] Y. Murakami, "The Rainflow method in fatigue", *Butterworth-Heinenmann*, 1992
- [6] K. Dressler, M. Speckert, "Counting method in fatigue analysis", *Tecmath GmbH, Kaiserslautern*, 1995;
- [7] K. Dressler, B. Grunder, M. Hack, V. B. Kottgen, "Extrapolation of Rainflow matrices", *SAE, technical paper 960569*, 1996;
- [8] R. D. Reiss, M. Thomas, "Statistical analysis of extreme values", *Birkhauser Verlag, Basel* 1997;
- [9] E. J. Gumbel, "Statistics of extremes", *Columbia University Press, New York*, 1992;
- [10] B. Grunder, M. Speckert, M. Pompetzky, "Design of durability sequences based on Rainflow optimisation", *Sae technical series*, 980690;
- [11] B. Grunder, M. Speckert, P. Pirro, J. D. Zweibrucken, "Optimal configuration of test schedules", *LMS Durability Technologies*;
- [12] F. Ambrogi, C. Braccesi, F. Cianetti, "Valutazione dello stato tensionale di elementi strutturali mediante sintesi modale", *XXIX Convegno nazionale AIAS, Vicenza 2000*;
- [13] C. Braccesi, F. Cianetti, "Sviluppo e verifica sperimentale di una procedura di valutazione virtuale dello stato di sollecitazione di componenti meccanici in campo automobilistico", *XXXI Convegno nazionale AIAS, Parma 2002*;
- [14] J. A. Collins, "Failure of materials in mechanical design", John Wiley & Sons, 1992;
- [15] The WAFO group; "WAFO: a Matlab Toolbox for analysis of random waves and loads, tutorials version 2.0.02", Lund Institute of Technology.