

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

Ingegneria Agraria

Ciclo XXIV

Settore Concorsuale di afferenza: 07/C1

Settore Scientifico disciplinare: AGR/09

Prove accelerate per la verifica strutturale di trattori agricole

Presentata da: Michele Mattetti

Coordinatore Dottorato

Prof. Ing. Adriano Guarnieri

Relatore

Prof. Ing. Giovanni Molari

Esame finale anno 2012

*"Il genio? passia con metodo
Peccato che me manca il metodo"*

Sommario

1	Introduzione	8
2	Teoria della fatica	17
2.1	Meccanismo di danneggiamento a fatica	18
2.2	Caratterizzazione del comportamento a fatica di un materiale.....	20
2.3	Danneggiamento e leggi del danneggiamento accumulato	26
2.4	Progettazione probabilistica	30
2.5	Il conteggio dei cicli attraverso il metodo Rainflow.....	32
2.6	Estrapolazione della matrici di rainflow	36
3	Metodologia per la realizzazione di test accelerati.....	42
3.1	Descrizione del metodo.....	42
3.1.1	Sollecitazioni target.....	42
3.1.2	Definizione di test accelerati	50
3.2	Applicazione della metodologia ad una trattrice di 80 kW .	55
3.2.1	Questionari	55
3.2.2	Misure.....	57
3.2.3	Target	61
3.2.4	Definizione delle condizioni di prova nei proving grounds	76
3.3	Risultati.....	76
4	Conclusioni.....	82
5	Bibliografia.....	86

Elenco delle figure

Figura 1: Confronto tra i due cicli di carico di un test statico.....	14
Figura 2: Schema di un banco 4-poster	14
Figura 3: Linee di spiaggia sulla superficie di rottura in un componente in alluminio (Schijve, 2009).....	19
Figura 4: Schematizzazione di una curva Stress – Life (Lee, 2005)	22
Figura 5: Incrudimento ed addolcimento del materiale soggetto ad una deformazione ciclica (Petrucci, 2010)	23
Figura 6: Schematizzazione di una curva Strain-Life (Lee, 2005).....	24
Figura 7: Effetto del valore medio sulla curva Stress-Life.....	25
Figura 8: Legge di accumulazione del danneggiamento	26
Figura 9: Curva Stress-Life per il calcolo dello pseudo-danneggiamento	30
Figura 10: Danneggiamento dei carichi di servizio e della resistenza di un componente	31
Figura 11: Illustrazione di una strain history con i rispettivi cicli di isteresi (Schijve, 2009)	33
Figura 12: Loadspectra calcolato da una loading-history	34
Figura 13: Confronto tra una matrice di tipo From - To (a) con una Mean - Range (a)	35

Figura 14: Confronto tra i dati grezzi (sinistra) e distribuzione di probabilità stimata con i Kernel (destra linea blu). In rosso sono evidenziati i Kernel utilizzati per la stima.	39
Figura 15: Schema del processo di calcolo della matrice target	49
Figura 16: Illustrazione di alcune tipiche pavimentazioni dei proving grounds	52
Figura 17: Missione di utilizzo della trattrice in esame	56
Figura 18: Dimensione delle aziende agricole clienti	56
Figura 19: Principali attività delle fattorie	57
Figura 20: Trattore strumentato e lavorazioni	59
Figura 21: Posizionamento degli estensimetri: (a) braccio superiore, (b) terzo punto, (c) braccio inferiore, (d) assale anteriore.....	60
Figura 22: Calcolo delle matrici di rainflow (b) a partire dalle loading-history (a) ...	61
Figura 23: Danneggiamento orario adimensionalizzato al danneggiamento minimo per ciascun canale per tre differenti canali in 5 diverse ripetizioni dell'aratura	62
Figura 24: Confronto tra le matrici in cui il danneggiamento orario è minimo (a) ed il danneggiamento orario è massimo (b) per il carico orizzontale sinistro dell'assale anteriore	62
Figura 25: Estrapolazione a quantile della matrice di rainflow per il carico verticale dell'assale anteriore: (a) matrici di rainflow calcolate da diverse ripetizioni dell'operazione di aratura, (b) matrice estrapolata	63
Figura 26: Danneggiamenti adimensionalizzati per ciascun canale nelle condizioni utilizzate	65

Figura 27: Matrici di rainflow del carico verticale dell'assale anteriore sinistro scelte per ciascuna macrocategoria: (a) caricatore frontale, (b) lavorazione del terreno, (c) lavorazione con PdP, (d) trasporto.....	66
Figura 28: Matrici di rainflow del carico orizzontale dell'assale anteriore sinistro scelte per ciascuna macrocategoria: (a) caricatore frontale, (b) lavorazione del terreno, (c) lavorazione con PdP, (d) trasporto	67
Figura 29: Matrici di rainflow del carico sul braccio superiore destro scelte per ciascuna macrocategoria: (a) caricatore frontale, (b) lavorazione del terreno, (c) lavorazione con PdP, (d) trasporto	68
Figura 30: Andamento del danneggiamento al variare dell'ampiezza dei cicli delle matrici scelte per ciascuna macrocategoria per il carico verticale sinistro dell'assale anteriore	69
Figura 31: Andamento del danneggiamento al variare dell'ampiezza dei cicli delle matrici scelte per ciascuna macrocategoria per il carico assiale sul terzo punto	70
Figura 32: Confronto di diverse matrici di rainflow: loading-history dimezzata (a), loading-history dimezzata moltiplicata per due (b), loading-history completa (c) estrapolata di durata dalla loading-history dimezzata (d) per il carico verticale dell'assale anteriore sinistro.....	71
Figura 33: Andamento del danneggiamento al variare dell'ampiezza del carico per le 4 matrici illustrate in Figura 32.....	72
Figura 34: Confronto di diverse matrici del carico verticale dell'assale anteriore sinistro, ricavate da diverse simulazioni montecarlo per evidenziare la casualità del processo	73
Figura 35: Danneggiamento al variare dell'ampiezza dei cicli per 4 simulazioni di estrapolazione per il carico sul braccio superiore sinistro dell'attacco a tre punti.....	73

Figura 36: Confronto tra la matrice non estrapolata (a) e la matrice estrapolata (b) del carico verticale sinistro dell'assale anteriore nella condizione di trasporto	74
Figura 37: Definizione della matrice di rainflow target per il carico verticale sinistro dell'assale anteriore: (a) matrici di rainflow estrapolate per ciascuna macrocategoria, (b) matrice di rainflow target.....	75
Figura 38: Confronto dei loadspectra del test (linea rossa) e quelli target (linea rossa) dei diversi canali. Nell'angolo in alto a destra di ciascun grafico è mostrata per ciascun canale la differenza percentuale tra il danneggiamento del loadspectra del test e quello target.....	77
Figura 39: Confronto dei loadspectra del test (linea rossa) e quelli target (linea rossa) nei diversi canali. Nell'angolo in alto a destra di ciascun grafico è mostrata per ciascun canale la differenza percentuale tra il danneggiamento del loadspectra del test e quello target.....	79
Figura 40: Elenco delle durate di ciascuna condizione di prova nei due test definiti	80

Elenco delle tabelle

Tabella 1: Raccolta delle lavorazioni monitorate.....	58
Tabella 2: Elenco dei carichi misurati	59
Tabella 3: Lavorazioni più intense per ciascuna macrocategoria	64
Tabella 4: Condizioni di carico nel proving ground.....	76

1 Introduzione

Nel mercato globale, attualmente diffusosi nel mondo, i beni prodotti in un paese sono venduti in una qualsiasi altra nazione. Non fa eccezione il settore delle macchine agricole, dove una trattrice viene usata in tutto il mondo, nonostante le differenti tradizioni agricole. La globalizzazione ha portato consistenti cambiamenti nel mercato dei beni agroalimentari incrementando la competitività tra i mercati. Questo obbliga gli agricoltori a ridurre i costi di produzione per mantenere un prezzo competitivo del bene attraverso l'adozione di macchinari agricoli fortemente specializzati che a sua volta devono potersi interfacciare correttamente a qualsiasi trattrice agricola. Di conseguenza si è assistito ad un cambiamento delle necessità degli agricoltori ma anche delle necessità dei costruttori. Vengono prodotte trattrici agricole sempre più versatili ed idonee ad ogni tipologia di utilizzo. I clienti sono diventati sempre più sensibili, incrementando le loro aspettative in termini di affidabilità del veicolo e perciò molti costruttori usano l'affidabilità per aumentare l'immagine del marchio. In questo scenario è evidente come i produttori debbano ridurre il time-to-market in analogia alla tendenza del settore automotive (Hughes, Jones, & Burrows, 2005) e nello stesso tempo a elevare l'affidabilità dei loro prodotti.

La procedura di progettazione è solitamente di tipo "trial and error": si progetta il veicolo secondo carichi predefiniti, si costruisce un prototipo, lo si testa, si modificano i componenti che non superano i target prefissati dall'azienda ed infine si costruisce un nuovo prototipo, quindi si ripete la procedura precedente e così via. In tale contesto, questa procedura non è più sostenibile in quanto rallenta notevolmente lo sviluppo di nuove trattrici. Negli ultimi anni si sono

affermati nell'industria automobilistica e non, i tool *CAE*, quali: analisi FEM, analisi multibody, analisi di fatica, ecc. Questi hanno permesso di ridurre notevolmente il numero di passaggi tra i reparti di progettazione e di testing. I suddetti tool si basano su leggi matematiche che simulano il comportamento del componente da dover progettare. Studi precedenti hanno evidenziato come gli errori derivati da un modello matematico non accurato siano di gran lunga minori di quelli ottenibili da input errati, come ad esempio utilizzando delle sollecitazioni non corrette (Broek, 1989). La variabilità di questi input è dovuta a differenti tipologie di superfici di percorrenza, operatori, condizioni di carico, ecc e sono di notevole importanza per la stima della vita a fatica di un componente meccanico (Thomas, 1997). Inoltre è stato stimato che la variabilità dell'utilizzo di un autoveicolo sia di gran lunga più difficile da definire rispetto a quella causata dalle proprietà dei materiali (Socie & Pompetzki, 2004). I progettisti usualmente tengono in considerazione tutte queste variabili definendo opportuni coefficienti di sicurezza. Tali coefficienti devono essere tanto più alti, tanto minore è la conoscenza della variabilità delle sollecitazioni e della resistenza di un componente. Questo può portare in alcuni casi ad un sovradimensionamento dei componenti e conseguentemente a eccessivi costi di produzione.

Alla luce di ciò risulta molto importante conoscere dettagliatamente i carichi di servizio e tenere in considerazione la loro variabilità. I carichi possono essere ricavati tramite misure durante l'utilizzo della macchina o utilizzando software multibody. Questi ultimi permettono la simulazione del veicolo in diversi scenari di utilizzo e quindi il calcolo di forze e accelerazioni sviluppate dalle iterazioni tra veicolo e scenario. La prima soluzione è piuttosto costosa, mentre la seconda porta con se alcune imprecisioni dovute a modelli ancora non

sufficientemente validi, come ad esempio la modellazione degli pneumatici (Ensor, Cook, & Birtles, 2005) o l'iterazione tra veicolo e suolo deformabile. Pertanto la determinazione dei carichi su un veicolo agricolo è piuttosto difficile, in quanto le variabili suddette sono amplificate rispetto al settore automotive per via dell'eterogeneità degli impieghi, delle condizioni e proprietà meccaniche del terreno, delle condizioni di carico e delle differenti metodologie di utilizzo in termini di parametri di lavoro. Quindi, ad oggi, la misura dei carichi che gravano sulla trattrice risulta essere la soluzione migliore. Tali misure devono essere fatte su un veicolo simile a quello che l'azienda vuole introdurre nel mercato, spesso sul modello precedente. La compressione dei tempi di sviluppo non consente di poter fare misure sul prototipo. Pertanto i carichi misurati sono differenti da quelli che realmente graverebbero sul veicolo da sviluppare. Numerosi studi sono stati effettuati al fine di modellare i carichi di servizio in funzione del veicolo e delle condizioni di utilizzo, consentendo in tal modo di poter evitare la campagna di misure (Karlsson, 2007); tuttavia metodologie simili non sono ancora state applicate alle trattrici agricole. Alla luce di ciò risulta evidente che una corretta stima dei carichi esclusivamente attraverso misure sia piuttosto onerosa e difficile anche a causa dell'impossibilità di misurare l'intera popolazione. Risulta pertanto necessario utilizzare questionari che consentano di definire un certo profilo di utilizzo e quindi di attuare una precisa campagna di misure atta a coprirlo. Tale metodologia è denominata "correlazione cliente" e consiste nel definire delle condizioni di carico corrispondenti ad un certo periodo di utilizzo da parte del cliente più gravoso (Olofsson, 2000). Diverse applicazioni di tale metodologie sono state effettuate per il settore automotive per l'intero veicolo (Ensor & Cook, 2007) o

per i singoli componenti (Campean & Brunson, 2000; Dodds, Vidwans, Rajendra, & Subbarao, 2011).

Nelle macchine agricole ancora non sono state utilizzate queste metodologie, ma si è cercato di stimare le sollecitazioni nel normale utilizzo della trattrice, definendo uno spettro di carico per le trasmissioni di trattrici agricole (Kim, Ryu, & Kim, 2001) e di stimare la vita a fatica della trasmissione a partire da spettri di carico ricavati da misure (Renius, 1977).

I tool CAE odierni sono sufficientemente accurati, tuttavia l'approvazione finale di un componente del veicolo viene sempre fatta attraverso test di durata anche se richiedono parecchio tempo per il loro svolgimento (Oelmann, 2002). Di conseguenza la riduzione del time-to-market passa anche attraverso la riduzione del tempo necessario per svolgere i test. Questo obiettivo può essere raggiunto adottando i test accelerati, in grado di riprodurre nella struttura lo stesso danneggiamento in minor tempo. Il raggiungimento di tale obiettivo può avvenire attraverso: l'incremento delle sollecitazioni, l'incremento della loro frequenza o l'eliminazione dei cicli non danneggianti. Con il primo metodo la vita a fatica del materiale risulta essere ridotta ed induce a rotture del componente che possono non verificarsi durante il servizio della macchina, mentre con il secondo si possono indurre degli effetti dinamici non realistici se la frequenza della sollecitazione eguaglia una frequenza propria di un componente del veicolo (Schutz, 1974a). Precedenti studi hanno evidenziato che l'eliminazione degli cicli meno danneggianti risulta essere la più efficace (Kenefeck, 1982; Tedford, Carse, & Crossland, 1973). Un test accelerato è valido se riproduce lo stesso danneggiamento dei carichi di servizio e le stesse rotture indotte durante il servizio.

La bontà di un test accelerato può essere valutata attraverso il *fattore di accelerazione* che è il rapporto tra il tempo da riprodurre e la durata del test. In test all'esterno per veicoli stradali, il fattore di accelerazione può essere dato dal rapporto tra il chilometraggio da replicare e quello del test. I test accelerati possono essere svolti in laboratorio o all'esterno attraverso degli appositi tracciati denominati proving grounds. I test in laboratorio sono più vantaggiosi in quanto hanno una maggiore ripetibilità, sono meno costosi da svolgere, non devono essere fermati ad ogni rottura del veicolo, non richiedono il completo assemblaggio del veicolo ed inoltre consentono di ottenere dei fattori di accelerazione più alti rispetto a quelli dei proving grounds. D'altro canto i proving grounds consentono di effettuare i test sull'intero veicolo in maniera semplice e nello stesso tempo replicare fedelmente i carichi di servizio. I test in laboratorio sull'intero veicolo possono essere replicati attraverso:

- cicli di carico di ampiezza costante (Figura 1a)
- cicli di carico a blocchi (Figura 1b)
- Banco 4-poster (Figura 2)

Nel primo caso si applicano ad uno specifico componente cicli sinusoidali ad ampiezza costante in numero tale da indurre lo stesso danneggiamento sulla struttura. Nel secondo caso si applicano dei blocchi di cicli sinusoidali di diverse ampiezze replicando in maniera più fedele lo spettro di carico e prendendo in considerazione anche l'effetto della sequenza del carico sul danneggiamento della struttura.

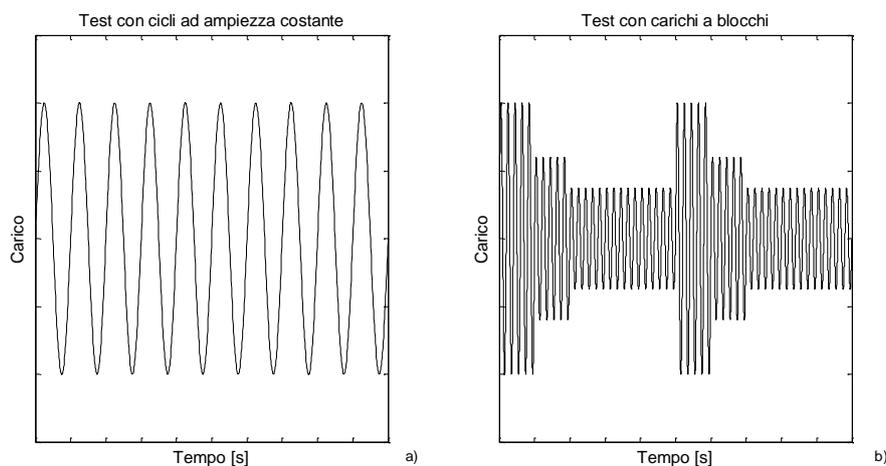


Figura 1: Confronto tra i due cicli di carico di un test statico

I banchi *4-poster* sono dei banchi prova costituiti da quattro cilindri idraulici collegati ai mozzi del veicolo o a piattelli sul quale il veicolo è appoggiato (Figura 2).

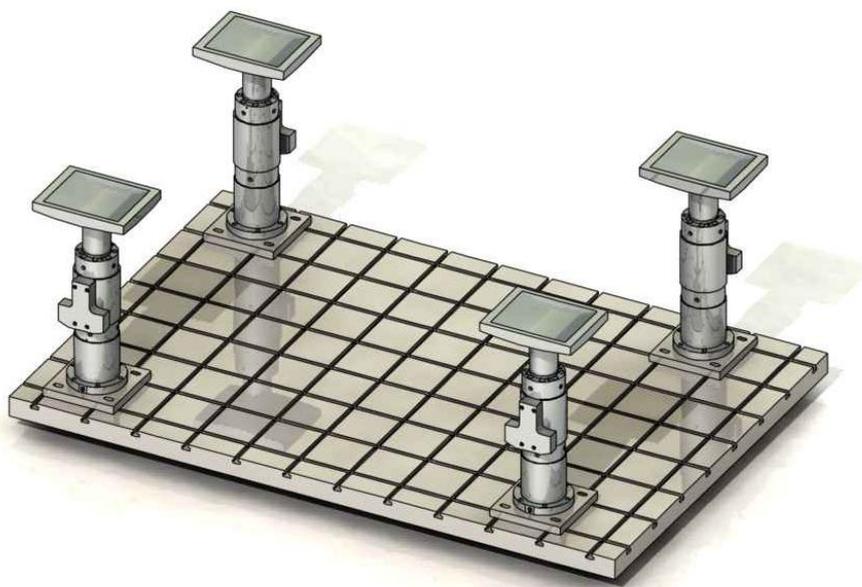


Figura 2: Schema di un banco 4-poster

Tali cilindri vengono azionati applicando alla struttura uno spostamento in modo tale che l'eccitazione induca in un punto

desiderato della struttura una specifica deformazione o un'accelerazione di un punto della struttura. Ciò è possibile se il comportamento della struttura è lineare altrimenti il sistema non riesce a replicare la risposta desiderata. I cilindri consentono di avere un test più fedele, in quanto consentono di replicare lo spettro dei carichi.

I proving grounds sono solitamente specifici tracciati caratterizzati da pavimentazioni speciali opportunamente create per replicare alcuni manti stradali che un veicolo può incontrare nell'arco della sua vita. Tali tracciati concatenano eventi estremi uno di seguito all'altro consentendo in tal modo di accelerare il test. Questi vengono prevalentemente utilizzati su veicoli stradali, mentre su veicoli agricoli non esistono specifici proving grounds. Molti costruttori di macchine agricole hanno specifici tracciati in grado di replicare condizioni particolarmente sfavorevoli. I carichi da replicare in fase di test, vengono solitamente scelti replicando una condizione particolarmente sfavorevole mentre il numero di cicli o il numero delle ore di test vengono usualmente definiti attraverso l'esperienza aziendale. In questo modo le sequenze di carico applicate alle strutture sono spesso differenti da quelle realmente gravanti sulla macchina. Negli ultimi anni diversi studi sono stati fatti dalle aziende automobilistiche per cercare di aggiornare le loro specifiche alle condizioni più simili a quelle che sono realmente incontrate dai veicoli (Thomas, Perroud, Bignonnet, & Monnet, 1999). Per le trattrici agricole, test accelerati sono stati definiti per l'intero veicolo usando proving grounds automobilistici (Molari, Mattetti, Falagario, & Sedoni, 2011). L'utilizzo di proving grounds automobilistici è vantaggioso, in quanto esistono diversi profili in grado di riprodurre diversi spettri di carico con benefici sulla riproducibilità dei carichi di

servizio. Riprodurre i carichi di servizio con le operazioni di campo non consentirebbe di poter accelerare il test in maniera considerevole in quanto le sollecitazioni non potrebbero né essere amplificate significativamente e né susseguirsi più rapidamente. Inoltre il test non sarebbe ripetibile e sarebbe poco praticabile in quanto necessiterebbe di un terreno di dimensioni tali da poter effettuare ininterrottamente una specifica lavorazione per ore.

In tale contesto, gli obiettivi di questa tesi sono:

- stabilire una metodologia che consenta di definire uno spettro di sollecitazioni da poter utilizzare sia in fase di progettazione che in fase di testing
- stabilire una metodologia per replicare tali spettri attraverso un test accelerato strutturale dell'intero veicolo
- valutare la capacità dei proving groundx nel replicare i carichi di servizio su una trattrice agricola

Tale metodologia è stata validata applicandola allo sviluppo di una nuova trattrice da 80 kW della CNH.

2 Teoria della fatica

In questo capitolo viene illustrato il danneggiamento di materiali metallici soggetti a sollecitazioni affaticanti e descritti i metodi per calcolare la vita residua di un materiale metallico soggetto a sollecitazioni affaticanti.

Esistono due teorie fondamentali per valutare il comportamento a fatica di un materiale metallico: la teoria *Stress-Life* e quella *Strain-Life*. Tali teorie sono basate su sollecitazioni semplici di tipo sinusoidale, tuttavia le sollecitazioni gravanti su un veicolo sono di tipo random. Quindi le due teorie non sarebbero applicabili direttamente per valutare il comportamento a fatica in ambito veicolistico. Per far ciò si utilizza il conteggio dei cicli, un metodo che consente di convertire un carico random in una serie di cicli semplici, consentendo quindi di usare una delle due teorie fondamentali per calcolare il danneggiamento strutturale generato. Il danneggiamento incrementa in maniera non lineare con l'ampiezza della sollecitazione, rendendo necessaria una stima precisa delle sollecitazioni gravanti sul materiale. La stima dei carichi su un veicolo è un'operazione notevolmente costosa, perché è necessario effettuare misure in numerose condizioni di utilizzo. A tal scopo i metodi di estrapolazione sono di notevole aiuto consentendo di stimare le sollecitazioni in condizioni leggermente differenti da quelle misurate e quindi di poter stimare in maniera precisa il danneggiamento che la struttura di un veicolo può incontrare nell'arco della sua vita.

2.1 Meccanismo di danneggiamento a fatica

La rottura strutturale più comune è causata dalla fatica, un processo di danneggiamento del materiale generato da un carico variabile di ampiezza molto inferiore al carico di rottura statico. Rispetto allo studio di carichi statici, la stima del comportamento a fatica del materiale è piuttosto complessa in quanto la rottura è dipendente dagli stress localizzati (LA VERNE ROOT, 1969) richiedendo pertanto una conoscenza dettagliata della distribuzione delle tensioni sul materiale. La fatica è un processo composto da tre fasi: inizio di una cricca, propagazione e rottura finale del componente. Durante l'applicazione del carico, si può indurre una deformazione plastica localizzata nelle zone in cui le tensioni sono maggiori e un danneggiamento permanente della struttura che può portare alla sua rottura. Ad ogni ciclo si forma una nuova zona di plasticità del materiale, che porta ad estendere la cricca. Maggiore è il numero dei cicli ad un certo carico e maggiore è la lunghezza della cricca. Dopo un determinato numero di cicli, l'estensione della cricca è talmente grande, che la sezione resistente del materiale non è sufficiente da poter resistere al carico applicato portando alla rottura del componente. Le zone di plasticizzazione localizzate producono delle striature sulla superficie di rottura che sono usualmente denominate linee di spiaggia (Figura 3).

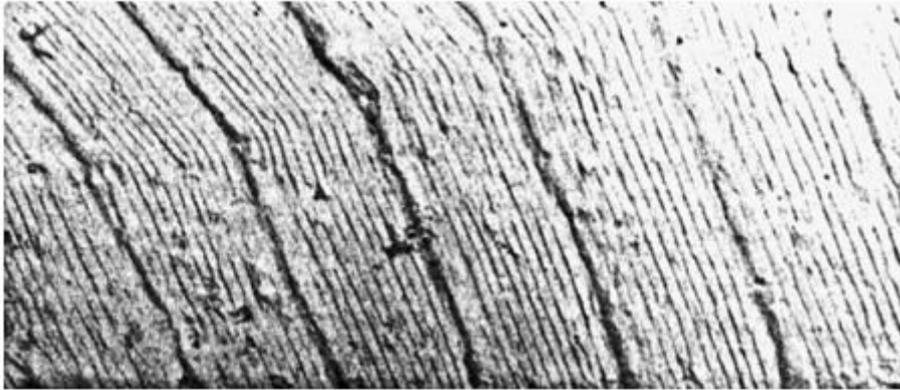


Figura 3: Linee di spiaggia sulla superficie di rottura in un componente in alluminio (Schijve, 2009)

Lo studio del comportamento a fatica del materiale richiede un'analisi dettagliata della distribuzione delle tensioni sul componente in quanto la cricca si sviluppa dove è presente un'alta concentrazione delle tensioni, quindi in prossimità di: inclusioni, porosità, discontinuità della geometria, ecc. Nella maggior parte dei casi la cricca si sviluppa in superficie, in quanto il materiale risulta essere meno vincolato rispetto l'interno. All'aumentare del numero di cicli la cricca si espande lungo il piano delle massime tensioni di taglio e la sua velocità di espansione è esclusivamente dipendente dalle proprietà meccaniche del materiale. L'espansione della cricca è un fenomeno non ancora completamente noto, si ritiene che il materiale a contatto con l'ambiente esterno si ossidi e ciò può in qualche modo ridurre la forza di coesione tra le varie particelle del materiale (Schijve, 2009). La fatica non è un processo reversibile, questo sia a causa dell'ossidazione del materiale in presenza del crack che a causa della plasticizzazione del materiale.

In conclusione i fattori che influiscono il comportamento a fatica del materiale sono:

- fattori geometrici, ad esempio: discontinuità geometriche, dimensioni del componente;

- fattori superficiali, ad esempio: rugosità;
- fattori di natura metallurgica;
- fattori ambientali (temperatura, corrosione, ecc);
- tipologia della sollecitazione.

Tutti eccetto l'ultimo incidono sulla presenza di inclusioni o difetti nel materiale facendo sì che ci sia una certa dispersione sulla resistenza a fatica del materiale tale da richiedere uno studio statistico (Cost, 1969; Bastenaire, 1975).

2.2 Caratterizzazione del comportamento a fatica di un materiale

Le curve Stress-Life e le curve Strain-Life consentono di valutare la resistenza a fatica di un determinato materiale. Entrambe vengono ricavate da prove sperimentali su provini standardizzati di un determinato materiale, applicando sollecitazioni all'inversione di ampiezza costante, per un numero di cicli tale da portare il provino a rottura. La prova viene ripetuta per diversi livelli di sollecitazioni.

Nella prova Stress-Life la sollecitazione è applicata controllando la tensione in uno specifico punto del provino, mentre nella prova Strain-Life la sollecitazione è applicata valutando la deformazione in uno specifico punto del provino. Il primo metodo è il più idoneo per valutare la vita a fatica del materiale con sollecitazioni di bassa intensità in cui il comportamento del materiale è tipicamente elastico, il secondo invece risulta essere più idoneo per sollecitazioni di elevata ampiezza o di tipo random in quanto in tali condizioni il materiale si comporta plasticamente. Metodologie standard sono

state fornite per la definizione di curve Stress-Life (Shanley, 1955) e Strain-Life (ASTM, 2010a).

In Figura 4 è mostrata la schematizzazione di una curva Stress-Life con in ordinata l'ampiezza della sollecitazione, mentre in ascissa è riportato il numero di cicli a rottura del provino. La porzione di curva con pendenza negativa è chiamata *zona a vita finita*, mentre la porzione di curva con pendenza nulla è chiamata *zona a vita infinita*. La porzione di curva a vita finita è caratterizzata da due rette di due differenti pendenza: quella a bassa pendenza è denominata *Low-cycle fatigue* nel quale la deformazione plastica è prevalente e relativa ad un numero di cicli massimo di 10^3 , mentre quella a pendenza maggiore è denominata *High-cycle fatigue* dove è prevalente la deformazione elastica con un numero di cicli massimo di 10^6 . Il punto di intersezione è chiamato *ginocchio* (per materiali metallici tale punto è a circa 10^6 inversioni) ed il valore della tensione per tale ascissa è chiamato *limite di fatica*. La curva è essere espressa dalla equazione (1) formalmente nota come equazione di Basquin (Basquin, 1910):

$$S_a = S_f'(2N_f)^b \quad (1)$$

dove:

S_a : carico a rottura al numero di inversioni N_f

S_f' : coefficiente di resistenza a fatica

N_f : numero di inversioni alla rottura del provino

b : esponente di resistenza a fatica

b può essere assunto pari a -0.3 se il comportamento a fatica è dominato dalla propagazione della cricca (ad esempio in componenti

saldati o con dolci intagli), mentre può essere assunto pari a -0.15 se il comportamento a fatica è dominato dallo sviluppo della cricca. Sono stati definiti valori di b per diverse tipologie di materiali (Deitrick, 1972).

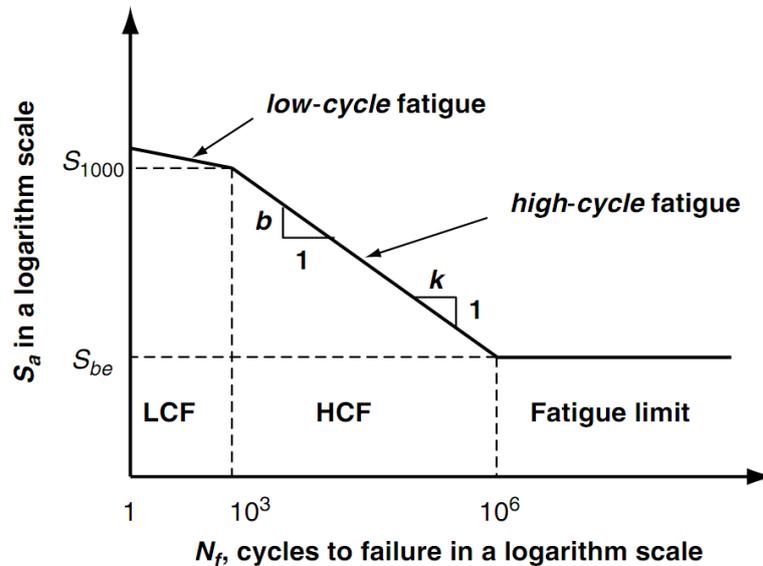


Figura 4: Schematizzazione di una curva Stress – Life (Lee, 2005)

L'equazione (1) viene usata per fittare i dati sperimentali secondo quanto è indicato dalla ASTM (ASTM, 2010b)

Molti materiali se soggetti a cicli di deformazione, possono variare la loro resistenza, a causa di due tipologie di fenomeni quali l'incrudimento e l'addolcimento. In alcune condizioni la risposta è un misto tra i due. L'incrudimento e l'addolcimento del materiale sono rappresentati in Figura 5:

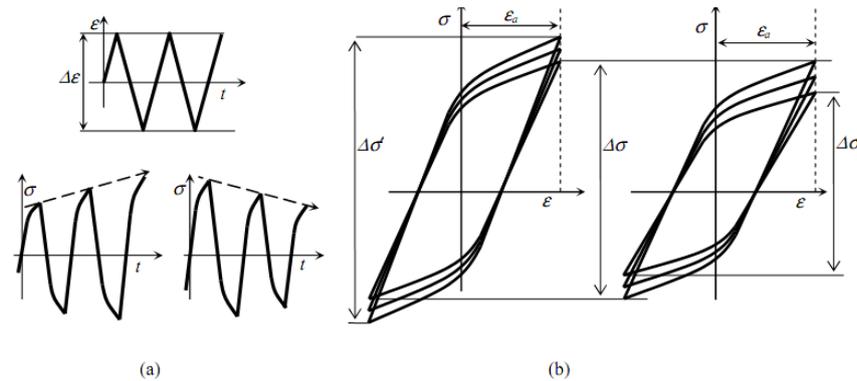


Figura 5: Incrudimento ed addolcimento del materiale soggetto ad una deformazione ciclica (Petrucci, 2010)

Materiali duri come ad esempio l'acciaio tendono ad addolcirsi, mentre materiali morbidi tendono ad incrudirsi; il fenomeno si stabilizza dopo un numero di cicli compreso tra il 10 ed il 30% del numero di cicli a rottura, per questo motivo è possibile supporre che il comportamento ciclico a deformazione del materiale sia stabile durante il test Strain-Life. In Figura 6 è riportata la schematizzazione di una curva Strain-Life. La curva sperimentale viene interpolata dall'equazione:

$$\epsilon_a = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{S_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (2)$$

dove:

ϵ_e : deformazione elastica

ϵ_p : deformazione plastica

ϵ_f' : coefficiente di duttilità a fatica

c : esponente di duttilità a fatica, di solito per materiali metallici varia tra 0.3 e 1

La deformazione è pertanto composta da una deformazione elastica e plastica, il cui primo contributo della (2) è espresso dall'equazione di Basquin (1) divisa per il modulo di Young del materiale.

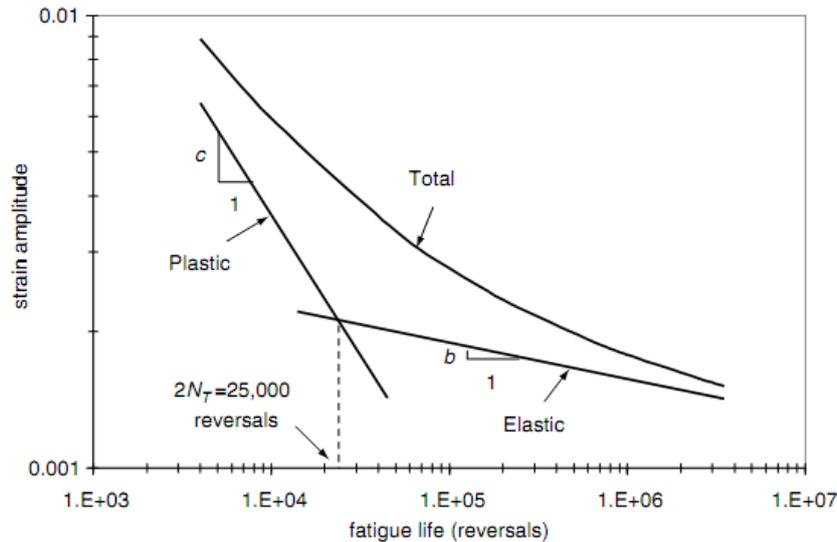


Figura 6: Schematizzazione di una curva Strain-Life (Lee, 2005)

Le curve Stress-Life e Strain-Life sono ricavate per una sollecitazione di tipo sinusoidale all'inversione ad una frequenza prefissata, ma spesso un componente si ritrova in una condizione differente da quella di test. Al fine di comprendere meglio il comportamento del materiale in condizioni differenti dal test, si illustra brevemente l'effetto dei vari parametri che caratterizzano una sollecitazione:

- *Ampiezza della sollecitazione*: maggiore è l'ampiezza e maggiore sarà la probabilità di indurre plasticizzazioni locali all'interno del materiale e quindi minore sarà la resistenza a fatica del materiale
- *Valore medio della sollecitazione*: valori medi positivi riducono la resistenza a fatica del materiale, mentre valori medi negativi ne aumentano la resistenza a fatica di un materiale, in virtù del fatto che una tensione media positiva incrementa

il valore di picco della tensione. L'effetto del valore medio è crescente al decrescere del numero dei cicli. Numerose equazioni sono state introdotte per correggere l'ampiezza dei cicli quando il valore medio è diverso da zero (Shin & Lukens, 1983). In Figura 7 è illustrato l'effetto del valore medio sulla curva Stress-Life.

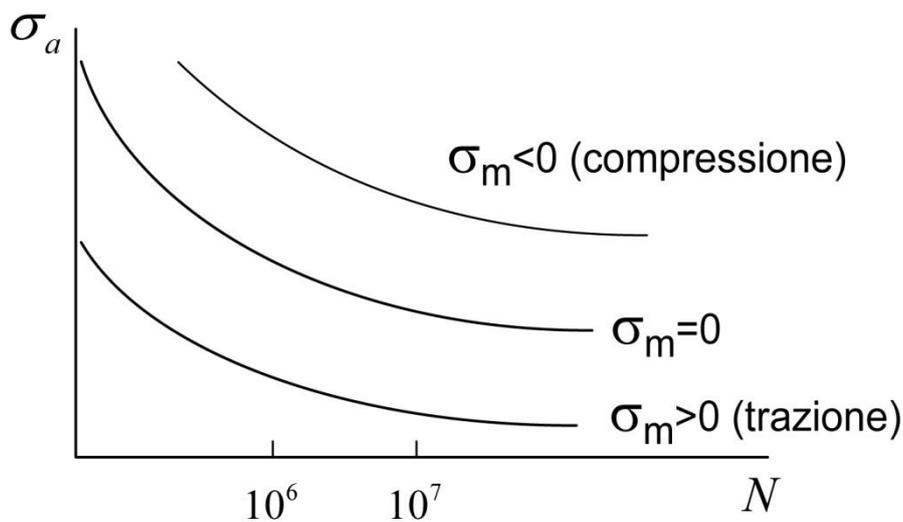


Figura 7: Effetto del valore medio sulla curva Stress-Life

- *Numero dei cicli:* maggiore è il numero dei cicli e più velocemente la cricca si propaga riducendo la vita a fatica
- *Frequenza della sollecitazione:* l'effetto è nullo per basse frequenze, mentre oltre una certa soglia il materiale inizia a scaldarsi a causa dei cicli di isteresi riducendo la vita a fatica del materiale. Per la maggior parte degli acciai e delle leghe d'alluminio è stato registrato che al di sotto dei 117 Hz la frequenza è totalmente trascurabile [12]. Più è alta la frequenza e maggiore sarà il numero di cicli a parità di tempo, facendo sì che il componente si danneggi in un tempo di servizio minore

- *Forma della sollecitazione*: a parità di frequenza, al variare di questa varia il tempo di esposizione del crack agli agenti ambientali, ma tale effetto è evidente esclusivamente per sollecitazioni di frequenza molto bassa (Barsom, 1971)

2.3 Danneggiamento e leggi del danneggiamento accumulato

Si definisce danneggiamento a fatica di un materiale l'insieme delle modifiche delle caratteristiche del materiale indotte dallo sviluppo di cricche causate dall'applicazione ripetuta di cicli di carico. Al fine di valutare numericamente il danneggiamento è stato espresso attraverso un numero compreso tra 0 e 1 punto dove avviene la rottura.

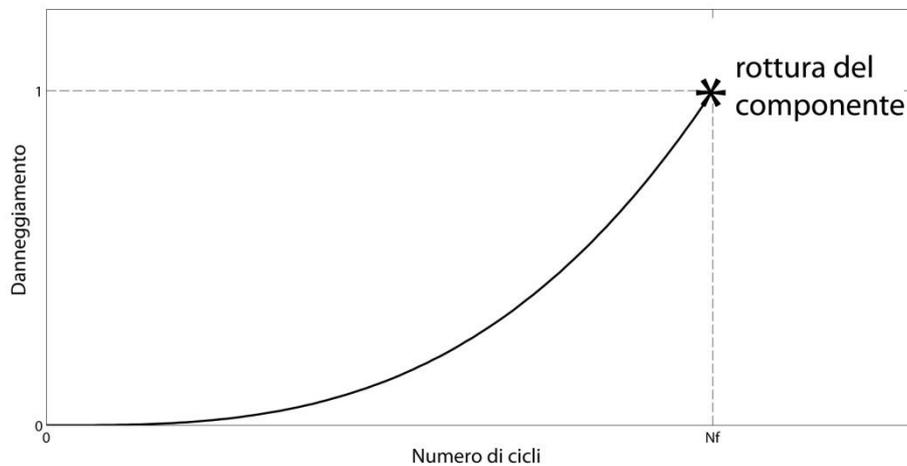


Figura 8: Legge di accumulazione del danneggiamento

Shanley (Shanley, 1955) propose di valutare il danneggiamento attraverso la lunghezza accumulata di una cricca rapportata alla lunghezza massima ammissibile:

$$D = \frac{a}{a_f} \quad (3)$$

con:

D: danneggiamento

a: lunghezza accumulate della cricca

a_f : lunghezza massima ammissibile della cricca, lunghezza oltre al quale la sezione resistente del materiale non è tale da reggere il carico

In uno dei primi modelli introdotti la lunghezza accumulata della cricca è stata espressa attraverso la relazione (Manson & Halford, 1981):

$$a = a_0 + (a_f - a_0) \left(\frac{n}{N_f} \right)^{\alpha_f} \quad (4)$$

con:

n: numero di cicli

a: lunghezza accumulata dalla cricca

a_0 : lunghezza iniziale dalla cricca, diversi modelli sono stati proposti per il calcolo di questa grandezza (Peterson, 1959; Dowling, 2007)

N_f : numero di cicli applicati per ottenere la lunghezza massima ammissibile della cricca

α_f : esponente determinato empiricamente con andamento rappresentato da:

$$\alpha_f = \frac{2}{3} N_f^{0.4} \quad (5)$$

La formula (4) è stata ricavata empiricamente con due ampiezze della sollecitazione. In definitiva il danneggiamento risulta espresso dalla relazione:

$$D = \frac{1}{a_f} \left[a_0 + (a_f - a_0) \left(\frac{n}{N_f} \right)^{\alpha_f} \right] \quad (6)$$

N_f viene ricavato dalla curva Stress-Life o Strain-Life del materiale.

Il metodo indubbiamente più utilizzato è la regola di Palmgren-Miner (Palmgren, 1924; Miner, 1945) ed è basato sulle seguenti assunzioni:

- Il danneggiamento è proporzionale al lavoro assorbito dal materiale
- Il lavoro che può essere assorbito fino a rottura è costante
- Il lavoro assorbito da n_i cicli al carico S_i è esclusivamente dipendente dall'ampiezza del ciclo e dal numero di cicli stesso, pertanto il danneggiamento assorbito da n_i cicli di ampiezza S_i , che porta a rottura il materiale dopo $N_{f,i}$ cicli è:

$$D_i = \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (7)$$

- Il danneggiamento sviluppato da diversi livelli di carico viene aggiunto linearmente, pertanto:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (8)$$

dove:

n_i : numero di cicli applicati al livello di carico S_i

$N_{f,i}$: numero di cicli a rottura al livello di carico S_i ricavabile dalla curva Stress-Life o Strain-Life del materiale per quel determinato livello di carico

Tale legge fu ideata da Palmgren (Palmgren, 1924), mentre Miner (Miner, 1945) dimostrò che è in grado di predire correttamente la vita residua del materiale. Successivamente molte critiche furono rivolte al metodo (Wirsching, 1983; Lee, 2005), in quanto non è basato su una grandezza misurabile, come ad esempio la lunghezza della cricca come proposto da (Shanley, 1955). Inoltre trascura completamente alcuni effetti fondamentali quali ad esempio l'effetto della sequenza del carico molto importante in presenza di plasticizzazioni locali del materiale ed i cicli di ampiezza inferiore al limite di fatica. Per di più studi precedenti hanno evidenziato che non sempre si ha la rottura per $D=1$ (Curtis, Tinling, & Abstein, 1971) ed anche lo stesso Miner affermò che il valore unitario è un valore medio in grado di prevedere la vita a fatica con un errore inferiore al 50% (Nelson, 1978). Per tenere conto di ciò i progettisti usano delle curve Stress-Life di design. Viene pertanto tenuta in considerazione la dispersione della resistenza a fatica dei materiali (Benson & Sadhneni, 2010).

Nonostante ciò la regola di Miner-Palmgren è ampiamente usata essendo di semplice implementazione, fornisce dei risultati sufficientemente validi in presenza di sollecitazioni random ed è efficace nel confrontare il danneggiamento tra diverse *loading-histories* applicate ad uno stesso componente (Schutz, 1974b). In questi, solitamente è utilizzata una curva Stress-Life ideale in quanto non si è interessati al reale danneggiamento del materiale, bensì a capire tra diverse *loading-histories* misurate sullo stesso

componente, la più dannosa (Ensor & Cook, 2007). Il danneggiamento viene espresso:

$$D = \sum_i n_i S_i^k \quad (9)$$

con $K=-1/b=4$. È necessario avere una stima precisa di K , che può essere fatta attraverso test o in maniera conservativa utilizzando dei opportuni coefficienti (Lee, 2005) nel caso in cui ciò non sia possibile. Tale valore del danneggiamento viene usualmente denominato pseudo-danneggiamento risulta essere dipendente esclusivamente dalla pendenza della zona *high-cycle fatigue* rendendo la curva Stress-Life uguale a quella raffigurata in Figura 9:

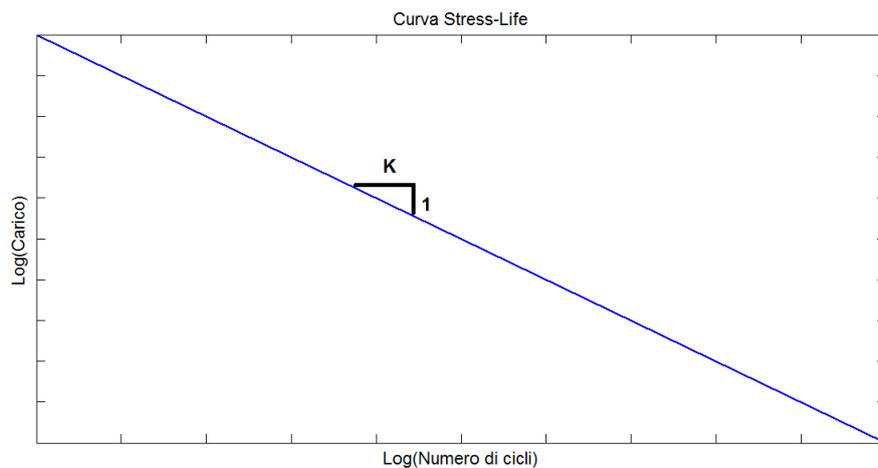


Figura 9: Curva Stress-Life per il calcolo dello pseudo-danneggiamento

2.4 Progettazione probabilistica

Il progetto di un qualsiasi componente meccanico viene effettuato considerando le sollecitazioni e la resistenza del materiale come delle proprietà deterministiche. Due campioni differenti di uno stesso componente presentano due resistenze differenti in termini di

danneggiamento che possono essere causate: dalla variazione delle proprietà meccaniche intrinseche del materiale, dalle tolleranze geometriche che possono indurre nel componente differenti tensioni e dai processi metallurgici e di lavorazione che possono provocare tensioni residue, ecc. D'altro canto anche l'utilizzo dello stesso componente può essere fortemente variabile in particolar modo nel settore automotive. Il danneggiamento indotto dai carichi di servizio e quello che porta a rottura il componente sono variabili (Figura 10). Quando le due curve si intersecano si può registrare la rottura del componente in particolari condizioni. Tanto maggiore è l'area di intersezione tra le due curve e tanto maggiore è la probabilità che avvengano rotture sul componente.

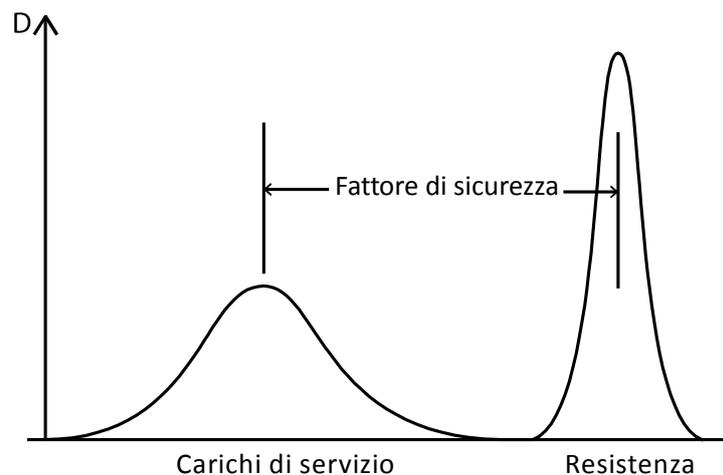


Figura 10: Danneggiamento dei carichi di servizio e della resistenza di un componente

In passato in fase di progettazione si utilizzavano valori medi o un valore scelto dall'azienda sia per la resistenza del componente che per i carichi di servizio e poi si introduceva un fattore di sicurezza per tenere in considerazione la variabilità dei due valori, di difficile stima. Tale fattore di sicurezza deve essere tanto maggiore, quanto maggiori sono le incertezze del problema, portando in molti casi ad un

sovradimensionamento del componente con un eccessivo aumento dei costi di produzione, ma ciò non è più sostenibile in un mercato competitivo com'è quello odierno.

Al fine di incrementare l'affidabilità del prodotto risulta necessario conoscere la distribuzione di probabilità di entrambi i valori e pertanto negli ultimi anni la progettazione di tipo deterministico è stata sostituita da una progettazione di tipo probabilistico, in cui le proprietà del materiale sono state sostituite da variabili espresse dalla distribuzione di probabilità del danneggiamento dei carichi di servizio e del danneggiamento che induce la rottura del componente. Dalla distribuzione di probabilità dei carichi di servizio si considera quel danneggiamento tale per cui una percentuale di operatori utilizzano il componente in maniera meno intensa, solitamente viene posto tale valore pari al 95% o al 99% in funzione del grado di affidabilità fissato dal costruttore.

In questa tesi ci si focalizzerà esclusivamente sulla stima della probabilità dei carichi di servizio.

2.5 Il conteggio dei cicli attraverso il metodo Rainflow

Fin qui si è parlato di danneggiamento del materiale sviluppato da cicli sinusoidali di ampiezza costante. Le sollecitazioni gravanti su un veicolo risultano tuttavia essere di tipo random, caratterizzate da carichi la cui ampiezza ed il loro valore medio sono variabili nel tempo. Pertanto è stato necessario introdurre tecniche di conteggio dei cicli che consentono di riferirsi alla teoria Stress-Life o a quella Strain-Life. Tali tecniche identificano i cicli all'interno di una stress history consentendo di ricavare un istogramma dei cicli contenuti

all'interno del segnale e quindi di stimare la vita a fatica attraverso una delle leggi per calcolare il danneggiamento. Tra i diversi metodi per il conteggio dei cicli (ad esempio in (Lee, 2005)) il metodo rainflow è quello più indicato per il calcolo del danneggiamento a fatica in quanto prende in considerazione l'isteresi generata dal ciclo, considerando alcuni effetti connessi al danneggiamento a fatica (Dressler, Hack, & Krüger, 1997). Di questo metodo sono stati implementati diversi algoritmi del tutto equivalenti e tra questi si ricordano: l'algoritmo a tetto di Pagoda (Matsuishi & Endo, 1968) che è quello originario, l'algoritmo a tre punti (Downing & Socie, 1982), quello a quattro punti che mantiene anche la sequenza dei cicli (Anthes, 1997) ed infine quello non ricorsivo (Rychlik, 1987) che consente una più facile implementazione su software. In Figura 11 è illustrato il conteggio dei cicli con i rispettivi cicli di isteresi nel piano tensione-deformazione:

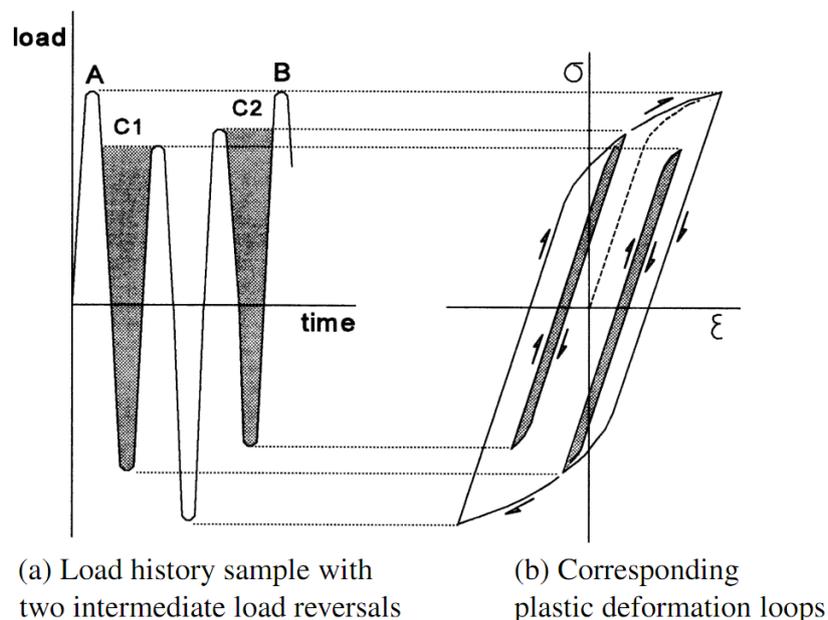


Figura 11: Illustrazione di una strain history con i rispettivi cicli di isteresi (Schijve, 2009)

Nel calcolo della matrici di rainflow è importante conoscere la successione dei massimi e dei minimi in quanto definiscono i cicli di isteresi. La pendenza dei segmenti con il quale questi sono collegati tra di loro non influisce sul danneggiamento.

Il conteggio dei cicli può essere rappresentato in diversi modi in funzione del numero dei parametri. Uno dei metodi più semplici per rappresentare i cicli contenuti in una *loading-history* è quello di rappresentare l'ampiezza dei cicli. Tale rappresentazione è chiamata *range-pair*, *load-histogram* o *loadspectra*; in Figura 12 è riportato esempio, dove in ascissa sono riportate le ampiezze dei cicli, mentre in ordinata il numero dei cicli per quel livello di carico.

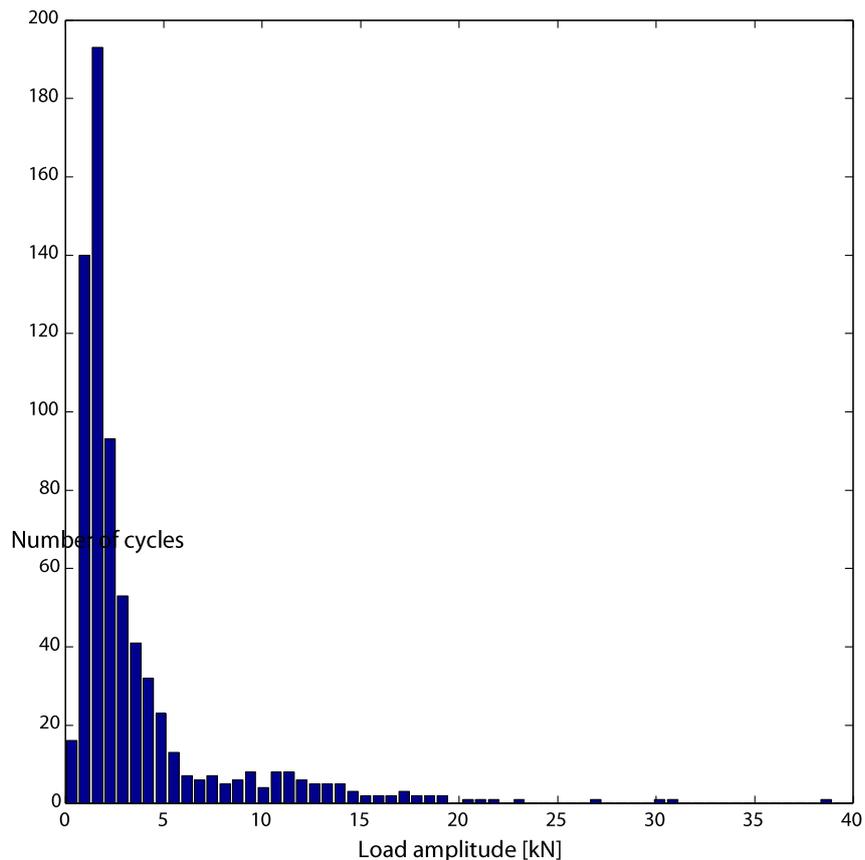


Figura 12: Loadspectra calcolato da una loading-history

Una seconda rappresentazione a due parametri consiste nel definire una matrice in cui i due assi contengono l'intensità del minimo e del massimo dei cicli, o in alternativa il valore medio e l'ampiezza del ciclo (Figura 13):

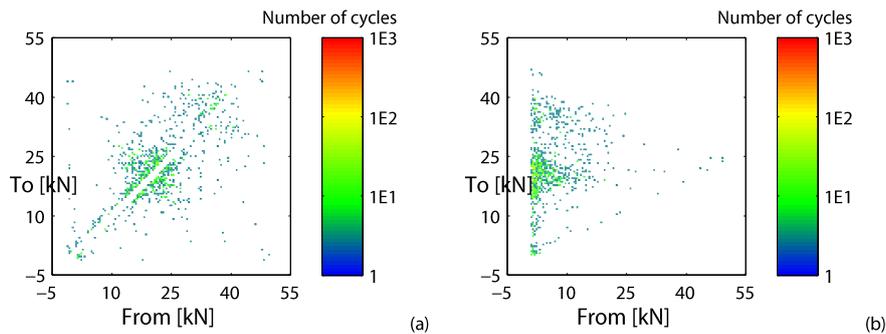


Figura 13: Confronto tra una matrice di tipo From - To (a) con una Mean - Range (a)

Sono inoltre possibili conversioni tra le due rappresentazioni.

La rappresentazione a due parametri è sicuramente la più dettagliata consentendo una stima più verosimile del danneggiamento in quanto può essere valutato l'effetto del valore medio sul danneggiamento. La rappresentazione ad un parametro risulta essere più pratica delle altre ed inoltre permette di confrontare un loadspectra con la curva Strain-Life del materiale avendo una stima visiva della vita a fatica del materiale. Inoltre in numerose applicazioni sono stati definiti loadspectra standardizzati che rappresentano condizioni di carico per certe tipologie di strutture, veicoli, ecc in speciali condizioni di carico e vengono utilizzati per analizzare il comportamento a fatica di specifici componenti sia in fase di test (Schütz, Klätschke, Steinhilber, Heuler, & Schütz, 1990) che per simulazioni in CAE software.

2.6 Estrapolazione della matrici di rainflow

L'analisi di loading-history attraverso matrici di rainflow offre numerosi vantaggi, in quanto consente di compattare una loading-history in una forma matriciale e pertanto di valutare la pericolosità dei carichi sulla struttura attraverso il calcolo del danneggiamento. Lo pseudo-danneggiamento risulta essere fortemente influenzato dai cicli ad alta ampiezza, poco frequenti. Una buona stima del danneggiamento necessita di una buona stima delle matrici di rainflow, in particolar modo nelle zone con una bassa frequenza. È stato mostrato che i carichi di servizio sono fortemente variabili in funzione di numerose variabili (Socie & Pompetzki, 2004), molte di queste sono casuali e quindi sono di difficile misurazione. Ad esempio uno dei fattori che maggiormente influiscono sul danneggiamento è il guidatore. Non è possibile poter valutare in maniera precisa il danneggiamento, in quanto sarebbe necessario misurare il danneggiamento indotto da tutti i driver della popolazione. A tal fine è stata introdotta l'estrapolazione a quantile della matrice di rainflow (Dressler, Gründer, Hack, & Köttingen, 1996). Tale strumento statistico consente di calcolare la matrice di rainflow più danneggiante in un set di matrici ricavate in simili condizioni, come potrebbero essere quelle derivate da misure fatte in un operazioni simili, ma con diversi operatori ed in terreni con diverse caratteristiche meccaniche. L'idea alla base è quella di suddividere ciascun matrice di rainflow in clusters, caratterizzati da un certo valore del danneggiamento. I clusters potranno essere suddivisi in funzione della loro variabilità tra le matrici. Clusters caratterizzati da una bassa variabilità sono originati da effetti meccanici indotti dall'operazione svolta, mentre quelli associati ad un'alta variabilità sono corrisposti ad effetti meccanici indotti dal differente utilizzo da

parte dell'operatore e dalle differenti proprietà meccaniche del terreno. Questa tipologia di estrapolazione permette di calcolare la matrice di rainflow che sintetizza un utilizzo della trattrice che sia più intenso per l' X % della popolazione. Ciò viene fatto calcolando l' X ° percentile della distribuzione dei cluster del danneggiamento all'interno della matrice di rainflow.

Definita la matrice più danneggiante in un campione di matrici simili, è necessario definire una matrice che sia rappresentativa dell'intera vita di utilizzo del trattore. Per semplicità questa operazione veniva svolta moltiplicando la matrice rappresentativa dell'utilizzo orario o al chilometro per il numero di ore o di chilometri da replicare. Questo significa replicare il fenomeno nello stesso ed identico modo a quello misurato, tuttavia anche lo stesso operatore, nel percorrere un certo tracciato non riuscirà mai a ripetere la *loading-history*. Non è possibile supporre che l'utilizzo della macchina sia identico a quello misurato. Tuttavia fare una misura sufficientemente lunga tanto da misurare le sollecitazioni in ogni circostanza risulta essere costoso e poco praticabile. Per stimare i carichi poco probabili e nello stesso tempo fare misure corte, è utile identificare la distribuzione di probabilità della matrice di rainflow, anche se non assume alcuna distribuzione di probabilità nota. Per superare questo problema sono stati ideati due approcci: stima della distribuzione di probabilità della matrice di rainflow attraverso un metodo non parametrico (Dressler et al., 1996; Roth, 1998; Socie, 2001) oppure la stima della distribuzione della probabilità, attraverso una distribuzione idonea a modellare la zona della matrice dei cicli ad alta ampiezza ed usare una distribuzione non parametrica per le zone con cicli a bassa ampiezza (Johannesson & Thomas, 2001).

Le distribuzioni di probabilità possono essere di tipo parametrico e di tipo non parametrico. Nella prima si assume che i dati siano distribuiti secondo una legge dipendente da alcuni parametri che dovranno essere identificati dai dati misurati, mentre nella seconda non si fa alcuna assunzione sul set di dati e perciò sono più flessibili consentendo di determinare la distribuzione di probabilità di qualsiasi set di dati. Alcune distribuzioni comunemente utilizzate sono: la distribuzione Gaussiana, la distribuzione di Poisson, la distribuzione Binomiale, ecc; mentre il metodo più famoso per determinare la distribuzione di probabilità secondo un metodo non parametrico è il metodo a Kernel. Le distribuzioni parametriche consentono di estrapolare in maniera più precisa i valori estremi dei dati misurati, mentre quelle non parametriche sono di notevole aiuto tutte le volte che i dati si distribuiscono con una legge non nota.

I Kernel nel caso bidimensionale sono delle funzioni $K(x,y)$ caratterizzate dalla seguente proprietà:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x,y) dx dy = 1 \quad (10)$$

Essenzialmente il Kernel è una sorta di distribuzione di probabilità. Esistono diverse tipologie di Kernel (Scott, 1992), ma i più utilizzati sono i Kernel gaussiani e quelli di Epanechnikov. La stima della distribuzione di probabilità viene fatta posizionando ciascun Kernel su ogni osservazione e sommando tutti i vari Kernel per ottenere la reale distribuzione di probabilità:

$$f(x,y) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-X_i}{h}, \frac{y-Y_i}{h}\right) \quad (11)$$

dove:

$f(x,y)$: valore della probabilità in uno specifico punto

h : larghezza di banda del Kernel

n : numero di Kernel

X_i e Y_i : coordinata in cui il Kernel è centrato

In Figura 14 viene riportata, per semplicità la stima della distribuzione di probabilità monodimensionale attraverso i Kernel.

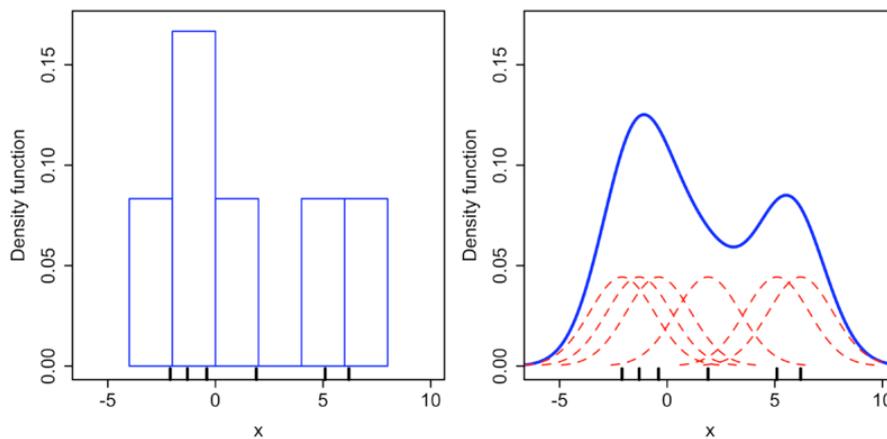


Figura 14: Confronto tra i dati grezzi (sinistra) e distribuzione di probabilità stimata con i Kernel (destra linea blu). In rosso sono evidenziati i Kernel utilizzati per la stima.

La difficoltà nell'applicazione di questo metodo sta nel determinare la larghezza di banda del Kernel (h) in quanto condiziona la bontà del processo di stima; valori ottimali della banda del Kernel sono stati proposti (Epanechnikov, 1969). Dressler ha evidenziato che bassi valori di larghezza di banda del Kernel fittano bene le zone della matrice in cui vi sono molti valori, mentre alti valori di larghezza di banda fittano bene le regioni della matrice in cui vi sono pochi valori; pertanto una larghezza di banda di tipo adattativo risulta essere preferibile.

Definita la distribuzione di probabilità della matrice di rainflow da estrapolare si utilizza la simulazione montecarlo per poter definire la

matrice di rainflow estrapolata. La simulazione montecarlo è un metodo che genera eventi, attraverso l'estrazione di numeri casuali tra loro non correlati. Ciascun numero estratto corrisponde ad un ciclo che in funzione dell'entità del numero ed in funzione della distribuzione di probabilità ricavata, viene posizionato all'interno della matrice estrapolata. Il numero dei cicli da generare sarà dato dal prodotto tra il numero dei cicli della matrice da estrapolare per il numero di volte che si vuole estendere la matrice di rainflow da estrapolare. A titolo di esempio se si avesse una matrice contenente 10 cicli che sintetizza l'utilizzo di un'ora, e la si vorrebbe estrapolare per ottenere la matrice equivalente a 5 ore di utilizzo, si devono generare 50 cicli.

L'approccio di Johannesson e Thomas (Johannesson & Thomas, 2001) definisce quella che viene chiamata matrice limite ovvero la matrice di rainflow adimensionalizzata al chilometro o ad un utilizzo orario che si otterrebbe da una loading-history infinitamente lunga. Dalla matrice limite si ottiene la matrice estrapolata come prodotto tra la matrice limite ed il numero dei km o delle ore che si devono simulare. In tale metodo i bins della matrice di rainflow dei carichi che maggiormente incidono sul danneggiamento vengono modellati attraverso una distribuzione generalizzata di Pareto, mentre i restanti bins vengono modellati attraverso la stima a Kernel. Solitamente si sceglie come valore soglia il valore del carico oltre il quale ci sono il 20% dei cicli.

L'approccio di Dressler e Socie sono processi casuali e pertanto generano matrici sempre differenti, anche se ad alti fattori di estrapolazione le matrici tenderanno tutte a convergere per via della legge dei grandi numeri. D'altro canto l'approccio di Johannesson consente di avere una stima più precisa dell'estrapolazione in quanto

utilizza una distribuzione parametrica e richiede inoltre anche una minore quantità di misure. Il primo metodo consente di estrapolare correttamente qualsiasi tipologia di matrice di rainflow in quanto la distribuzione non parametrica si adatta meglio ai dati disponibili. È bene precisare che l'estrapolazione di durata della matrice di rainflow si modella su dati che sono stati misurati e pertanto non consentono di predire la matrice rappresentante della fase di aratura a partire da una matrice rappresentante dell'utilizzo in fase di trasporto, in quanto la distribuzione dei carichi è diversa.

3 Metodologia per la realizzazione di test accelerati

Al fine di poter definire una qualsiasi tipologia di test è necessario definire le sollecitazioni target che devono essere riprodotte durante il test. Per far ciò si devono utilizzare questionari per calcolare il 95° percentile della distribuzione del danneggiamento, consentendo di riprodurre in fase di test le sollecitazioni che siano più danneggianti di quelle subite dalla trattrice durante l'utilizzo da parte del 95% della popolazione, in modo tale da garantire un elevato grado di affidabilità della macchina. La stima delle sollecitazioni può essere fatta solo attraverso un'adeguata campagna di misure in quanto la predizione tramite software CAE è non accurata.

In questo capitolo viene descritta la metodologia che permette di definire tali sollecitazioni target.

3.1 Descrizione del metodo

3.1.1 Sollecitazioni target

3.1.1.1 Questionari

La formulazione dei questionari è un aspetto cruciale in quanto deve consentire di stimare il danneggiamento della struttura del veicolo per tutti gli operatori a partire dai questionari. Questo è possibile esclusivamente se esiste una relazione tra le risposte alle domande del questionario e le sollecitazioni gravanti sul veicolo.

Nel questionario devono essere inserite in primo luogo domande inerenti la dimensione dell'azienda in esame, nello specifico:

- numero di ettari di terreno
- numero di capi di bestiame in possesso
- numero di trattrici in possesso
- classe di potenza delle trattrici possedute
- tipologie di piantagioni ed attività dell'azienda
- tipologie di macchinari in esame

La vita a fatica della macchina è dipendente dal numero di cicli affaticanti e quindi dal tempo di utilizzo della macchina, pertanto è stato inserito nel questionario:

- il numero di ore annue di utilizzo
- il numero di anni di servizio prima della sostituzione della trattrice

Infine i carichi gravanti nella macchina risultano essere dipendenti dalle lavorazioni svolte dalla macchina e pertanto è importante conoscere le lavorazioni eseguite e la loro distribuzione nell'anno. A causa delle numerose funzioni che una trattrice può eseguire tutte le lavorazioni sono state ricondotte in 4 macrocategorie. Le macrocategorie scelte sono:

- *Lavorazioni con caricatore frontale:* ad esempio movimento di balle di fieno, di letame, di terreno, di granaglie
- *Lavorazioni di preparazione del terreno:* lavorazioni di preparazione del terreno che non utilizzano la presa di potenza
- *Lavorazioni con presa di potenza:* seminatrice, spargi concime, spargi letame, ecc
- *Trasporto* con diverse tipologie di attrezzi e di rimorchi

3.1.1.2 Misure

Al fine di valutare la distribuzione dei carichi è necessario effettuare un'ampia campagna di misura durante il reale utilizzo della macchina. Il danneggiamento strutturale risulta essere fortemente dipendente da numerosi fattori ambientali quali ad esempio: pendenza e stato di degrado della superficie di percorrenza, proprietà meccaniche e stato del terreno, ma anche di utilizzo quali ad esempio distribuzione dei pesi della macchina, tipologia di lavorazione svolta, operatore, ecc. Questo fa sì che tutte le misure della stessa tipologia (ad esempio di aratura), devono essere ripetute più volte in quanto le condizioni sono variabili e quindi anche le sollecitazioni. La stima del 95° percentile del danneggiamento è corretta soltanto se la campagna di misura viene fatta in modo tale da coprire tutte le condizioni di utilizzo, altrimenti la stima sarebbe non corretta. D'altro canto per esigenze aziendali è impegnativo effettuare una così estesa campagna di misura in virtù dei costi e dei tempi di sviluppo sempre più ristretti, pertanto si è costretti a trovare un compromesso tra numero di condizioni di misura e tempo impiegato per le misure. Comunque sia è necessario fare misure di almeno un anno in modo tale da poter coprire tutte le lavorazioni compiute dalla trattrice. Il metodo migliore per effettuare queste misure è quello di strumentare una flotta di trattori simile a alla macchina da introdurre sul mercato, lasciare le trattrici in diverse aziende agricole per il periodo necessario. Le aziende agricole devono essere opportunamente selezionate in funzione dell'analisi di mercato ricavata dai questionari. Naturalmente maggiore sarà la flotta e più precisa sarà la conoscenza del 95° percentile del danneggiamento. La definizione delle condizioni che

dovranno essere monitorate possono essere ricavate dai questionari e possono essere trascurate tutte quelle operazioni che vengono svolte per una frazione della popolazione inferiore al 5%.

Pianificata la campagna di misura, è necessario definire quali parametri o sollecitazioni monitorare, ed in particolare: forze, deformazioni, spostamenti, accelerazioni, ecc. L'ideale è valutare le sollecitazioni in ogni componente critico del veicolo, cioè in tutti quelli in cui si è registrata un'alta frequenza di rotture strutturali o in cui si registrano le più alte sollecitazioni sul veicolo che possono essere determinate attraverso le analisi FEM dei vari componenti strutturali del veicolo. Questo metodo benché ottimale, richiederebbe un alto numero di sensori e quindi un costo elevato. Il carico di ciascun componente è correlato al comportamento ed all'utilizzo del veicolo, pertanto è più corretto monitorare quelle sollecitazioni che identificano l'utilizzo ed il comportamento del veicolo. In un autoveicolo è invece corretto monitorare tutti quei parametri che definiscono la dinamica del veicolo, ad esempio il carico sugli assali è dovuto al beccheggio, al rollio ed al movimento verticale del veicolo (Rupp, Masieri, & Dornbusch, 2005). D'altro canto in una trattoria, in virtù del campo d'applicazione è necessario monitorare le sollecitazioni correlate agli input esterni che sollecitano il veicolo attraverso le interazioni tra suolo e veicolo che in una trattoria vengono rappresentate dalle forze che gravano sugli assali anteriori e posteriori e quelle che gravano sugli elementi dell'attacco a tre punti. Se invece si fosse interessati ad analizzare le sollecitazioni di uno specifico componente è più opportuno misurare le sollecitazioni direttamente su questo attraverso l'installazione di estensimetri o accelerometri.

Volendo ricavare le sollecitazioni generate dagli input esterni non è opportuno misurare la deformazione locale della struttura, bensì è bene correlarla con la forza esterna che grava sul veicolo, in quanto cambiando il posizionamento dell'estensimetro o modello del trattore le deformazioni sarebbero differenti. Quindi definire una deformazione o una tensione target è poco opportuno perciò è consigliabile posizionare gli estensimetri in modo tale che sia possibile trovare una correlazione tra deformazione locale della struttura e forza esterna. Quindi è necessario che:

- siano posizionati il più vicino possibile alla forza che si vuole ricavare, in modo tale da essere maggiormente sensibili alle forze esterne garantendo un'adeguata protezione del sensore;
- l'elemento sul quale siano posizionati è soggetto ad una sollecitazione possibilmente uniassiale, altrimenti una differente caratteristica della sollecitazione potrebbe generare la medesima deformazione nel punto di applicazione dell'estensimetro. Se ciò non fosse possibile, è opportuno scegliere il punto di applicazione in modo tale che sia il meno sensibile alle altre caratteristiche della sollecitazione. Ad esempio se un elemento fosse soggetto sia a sforzo normale che a flessione, per valutare la forza assiale è necessario posizionare l'estensimetro sull'asse neutro, mentre se si è interessati a valutare la sollecitazione che genera flessione è necessario posizionare l'estensimetro il più lontano possibile dall'asse neutro;
- sia il più possibile lontano da intagli in modo tale che il comportamento della struttura sia il più lineare possibile

consentendo di avere una stima corretta della sollecitazione esterna dalla deformazione della struttura misurata; per questo possono essere utilizzate le simulazioni FEM per definire l'ideale posizionamento degli estensimetri componente per componente.

3.1.1.3 Matrici di rainflow target

Effettuate tutte le misure nelle opportune condizioni, tutte le loading-history devono essere convertite in matrici di rainflow. Le matrici di rainflow calcolate devono essere tutte adimensionalizzate ad una certa distanza chilometrica o unità temporale questo per rendere il danneggiamento indipendente dalla durata delle acquisizioni e quindi di poter confrontare diverse loading-history. Per macchine agricole è più sensato adimensionalizzare le matrici ad un utilizzo orario essendo l'utilizzo della macchina espresso in ore. Le matrici di rainflow così calcolate possono essere classificate in funzione dell'utilizzo e del danneggiamento, consentendo quindi il loro raggruppamento. Il danneggiamento di ciascun gruppo di matrici è variabile e non potendo fare misure in qualsiasi condizione, la stima del 95° percentile del danneggiamento obbliga l'utilizzo di metodi statistici. Per ricavare per ciascuno utilizzo la matrice di rainflow al 95° percentile rappresentativa di ciascun campione di dati è utile utilizzare l'extrapolazione a quantili (Paragrafo 2.6). Fatto ciò è necessario ricavare per ciascun canale quella matrice che sia rappresentativa dell'utilizzo in quella macrocategoria. Questa operazione è stata fatta scegliendo l'operazione la cui somma dei danneggiamenti di ciascun canale sia la più alta. Sarebbe stato maggiormente in favore della sicurezza scegliere la matrice col danneggiamento più alto per ciascun canale, ma in tal modo si

sarebbe ricavato un insieme di matrici di rainflow che non sarebbero corrisposte ad alcuna operazione realistica. Al fine di definire il target è bene non solo avere un set di sollecitazioni, ma anche avere un ciclo di lavoro rappresentativo del cliente più danneggiante, in tal modo è possibile ricavare le sollecitazioni target per una futura trattrice della stessa classe, esclusivamente facendo delle misure nelle lavorazioni definite dal ciclo di lavoro, consentendo di risparmiare una notevole quantità di tempo.

Da questa operazione, per ciascun canale, si ottengono un numero di matrici pari al numero di macrocategorie. Dalle matrici orarie si devono ottenere matrici che corrispondono alla vita di utilizzo della macchina per la specifica macrocategoria. Questa operazione viene effettuata attraverso l'estrapolazione di durata (Paragrafo 2.6). Il calcolo di tale matrice obbliga la scelta di opportuni fattori di estrapolazione che definiscono il numero di cicli da imporre nella matrice estrapolata. La scelta del fattore di estrapolazione è cruciale, e devono essere grandi abbastanza affinché l'utilizzo del veicolo in tutte le macrocategorie sia maggiore del 95% dei clienti. Questo significa che la vita della trattrice è data dal prodotto tra i 95° percentili del numero di ore annue e del numero di anni prima della sostituzione della macchina. Come frazione di utilizzo per ciascuna macrocategoria, usualmente vengono usati i valori attesi della loro distribuzione ricavabile dai questionari (Dressler, Speckert, Müller, & Weber, 2009). Sommando poi le 4 matrici estrapolate in durata si ottiene per ciascun canale la matrice rappresentativa dei carichi di servizio che grava sulla trattrice nell'arco della sua vita di utilizzo. Il processo di derivazione della matrice target è illustrato in Figura 15:

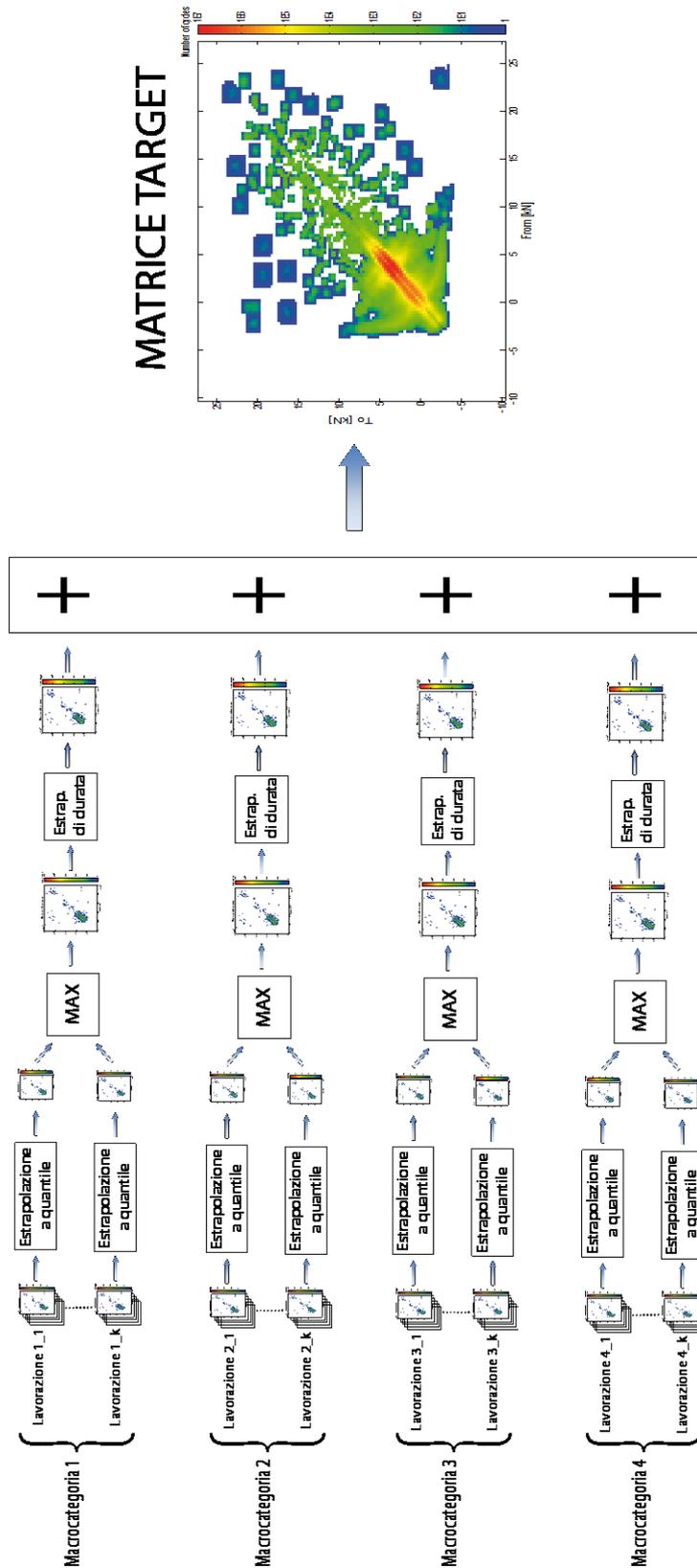


Figura 15: Schema del processo di calcolo della matrice target

In questo modo è possibile definire per ciascun canale la matrice generata durante l'utilizzo più estremo che dovrà poi essere replicata in fase di lavoro.

Con questa procedura non viene definita esclusivamente una specifica in termini di sollecitazioni, ma anche in termini di ciclo di lavoro, cioè i compiti più gravosi che sono eseguiti da una specifica classe di trattore. Questo approccio risulta essere diverso rispetto a quello usualmente utilizzato (Ledesma, Jenaway, Wang, & Shih, 2005), questo per la difficoltà nel poter definire a priori l'utilizzo della macchina a causa delle diverse operazioni che possono essere eseguite all'interno di ciascuna macrocategoria.

3.1.2 Definizione di test accelerati

Definite le sollecitazioni target, queste devono essere replicate attraverso un test che può essere un banco prova o specifici tracciati opportunamente progettati. Tuttavia la riproduzione completa delle sollecitazioni richiede parecchio tempo e pertanto risulta impensabile eseguire un test che riproduce nella sua interezza le medesime sollecitazioni. A tal fine si utilizzano i test accelerati in grado di fornire lo stesso danneggiamento dei carichi di servizio in un tempo notevolmente ridotto. I test possono essere accelerati in numerosi modi: ad esempio incrementando l'ampiezza delle sollecitazioni e quindi applicando lo stesso danneggiamento con un numero inferiore di cicli, incrementando la frequenza delle sollecitazioni e quindi la velocità con la quale si susseguono, ed infine eliminando i cicli meno danneggianti e pertanto tutti quei cicli che incidono poco sul danneggiamento. L'ultima soluzione è sicuramente quella preferibile in quanto lo

spettro delle sollecitazioni è più fedele rispetto a ciò che realmente grava sulla trattrice.

Un metodo affermato da anni nel settore automobilistico per applicare sollecitazioni simili a quelle target è quello di adottare i proving grounds automobilistici. Tali proving grounds sono essenzialmente dei tracciati speciali nei quali un veicolo può essere testato in ogni condizione senza obbligare il costruttore a portare un prototipo all'esterno dell'azienda. Tali proving grounds vengono usualmente utilizzati per:

- *Analisi di durabilità dell'intero veicolo*: valutazione del comportamento e della capacità del veicolo di durare per l'intero periodo di vita atteso, garantendo il servizio per il quale è stato progettato per la struttura e per i sottosistemi;
- *Analisi di comfort*: valutazione del sistema sospensivo di isolare il conducente dalle diverse irregolarità stradali;
- *Analisi di guidabilità*: valutazione complessiva della guidabilità del veicolo in manovre estreme o in *open-loop test* (Molari, Mattetti, et al., 2011; Mattetti, Molari et al., 2012);

In questa attività i proving grounds sono stati impiegati esclusivamente per testare la struttura del veicolo. Questi contengono una serie di tracciati dotati di pavimentazioni speciali con tutte le tipologie di input che un veicolo stradale può incontrare nell'arco della sua vita, ad esempio: passaggi a livelli con diverse inclinazioni rispetto alla direzione di marcia, tombini con diversi affondamenti rispetto al manto stradale, pavé, sampietrini, ecc (Figura 16).



Figura 16: Illustrazione di alcune tipiche pavimentazioni dei proving grounds

I proving grounds consentono di replicare i carichi di servizio in un tempo ridotto, questo attraverso la concatenazione di eventi estremi incrementando notevolmente la loro densità chilometrica. Tuttavia non esistono specifici proving grounds per macchine agricole: la dinamica della deformabilità del terreno non può essere replicata ed inoltre le irregolarità dei manti di percorrenza sono differenti. Pertanto è necessario verificare la capacità dei proving grounds di replicare i carichi di servizio. La definizione del test consiste nel definire il numero di ripetizioni per ciascuna condizione di prova in modo tale che il danneggiamento del test sia almeno uguale a quello derivato dai carichi di servizio. In termini matematici questo significa:

$$D_T^j \leq R_i D_i^j \quad (12)$$

dove:

R_i : il numero di ripetizioni della condizione di prova i-esima

D_T^j : danneggiamento dei carichi di servizio della sollecitazione j-esima

D_i^j : danneggiamento nella condizione di prova i-esima del canale j-esimo

Per poter accelerare ulteriormente il test è anche possibile introdurre un peso per ciascun canale, per pesare in maniera differente le sollecitazioni, riducendo l'effetto dei canali meno critici, cioè quei canali in cui sono state registrate meno rotture:

$$D_T^j \leq w_i R_i D_i^j \quad (13)$$

dove:

w_i : fattore peso per il canale i-esimo un numero compreso tra 0 e 1

Il numero di ripetizioni non è una semplice moltiplicazione dei loadspectra, in quanto gli operatori nel percorrere i tracciati non ripeteranno le loading-histories nel medesimo modo e pertanto si è deciso di estrapolare le matrici di rainflow. In questa ottica il numero di ripetizioni viene considerato come fattore di estrapolazione.

La scelta delle condizioni di prova, corrisponde a scegliere: i tracciati, le condizioni di carico e le velocità di percorrenza. Nella maggior parte dei casi il numero di canali è nettamente inferiore al numero di condizioni di prova e pertanto ci sono infinite ennuple che verificano la (12). Tra queste si preferisce scegliere quella ennupla che consenta di ridurre al minimo la durata del test, definita da:

$$T = \sum_i t_i R_i \quad (14)$$

dove:

T: durata del test

t_i : durata unitaria della i -esima condizione di prova

Il problema può essere tradotto come un problema di ottimizzazione vincolata nel quale la funzione obiettivo da minimizzare è la (14) mentre il vincolo è espresso dalla (12), essendo un problema nonlineare, può essere risolto con il metodo del punto interno (Miller, 2000).

L'ottimizzazione impone che il danneggiamento globale per ciascun canale sia maggiore o uguale a quello dei carichi di servizio. Tuttavia tale ottimizzazione porta ad una non precisa riproduzione dei carichi, in quanto i carichi di bassa intensità, pesando molto meno di quelli ad alta intensità, verrebbero in qualche modo trascurati ottenendo test che seppur analoghi dal punto di vista del danneggiamento risultano essere notevolmente differenti. Alla luce di ciò si è preferito calcolare i loadspectra risultanti del test e quelli dei carichi di servizio, suddividere i loadspectra in diversi cluster in funzione del danneggiamento dei vari cluster ed infine imporre che lo pseudo-danneggiamento di ciascun cluster del test sia maggiore dell'equivalente cluster dei carichi di servizio. In tal modo è possibile rendere i loadspectra del test più simili a quelli di servizio. Il numero di condizioni di prova deve essere scelto facendo in modo che per ciascun canale, i loadspectra di tutte le condizioni di prova presentino tutte le ampiezze dei cicli presenti nei loadspectra dei carichi di servizio.

Tanto più è alto il numero delle condizioni di prova è tanto migliore sarà la capacità della routine di ottimizzazione di trovare quella combinazione di condizioni di prova che consente di riprodurre i loadspectra dei carichi di servizio.

3.2 Applicazione della metodologia ad una trattrice di 80 kW

Tutti gli aspetti teorici introdotti nei capitoli precedenti, sono stati applicati ad un caso di studio al fine di validare la metodologia per calcolare un target di carico e definire un test accelerato per una specifica trattrice utilizzando dei proving ground automobilistici.

La trattrice scelta per applicare la metodologia è una nuova trattrice. Tale trattrice è un entry-level per l'azienda con passo di circa 3,500 m, massa a vuoto inferiore ai 3500 kg. Tale trattore è pensato per la semina, per la fienagione, per gli utilizzi con il caricatore frontale. Le piccole dimensioni gli consentono di entrare agevolmente in una stalla per raccogliere il letame o per portare balle di fieno.

3.2.1 Questionari

In Figura 17 sono mostrati i valori attesi della distribuzione delle percentuali di utilizzo per ciascuna categoria:

95° percentile della distribuzione delle ore annue: 320h

95° percentile della distribuzione degli anni prima della sostituzione: 10 anni

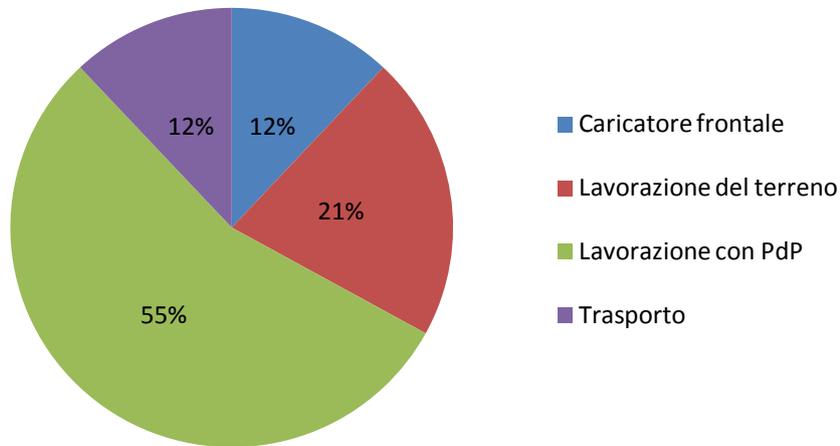


Figura 17: Missione di utilizzo della trattrice in esame

In Figura 18 vengono mostrate le dimensioni delle aziende agricole clienti. L'utilizzo prevalente della macchina è quello di macchina tutto fare per aziende di piccole dimensioni mentre come macchina speciale in aziende di grandi dimensioni, come l'uso del caricatore frontale.

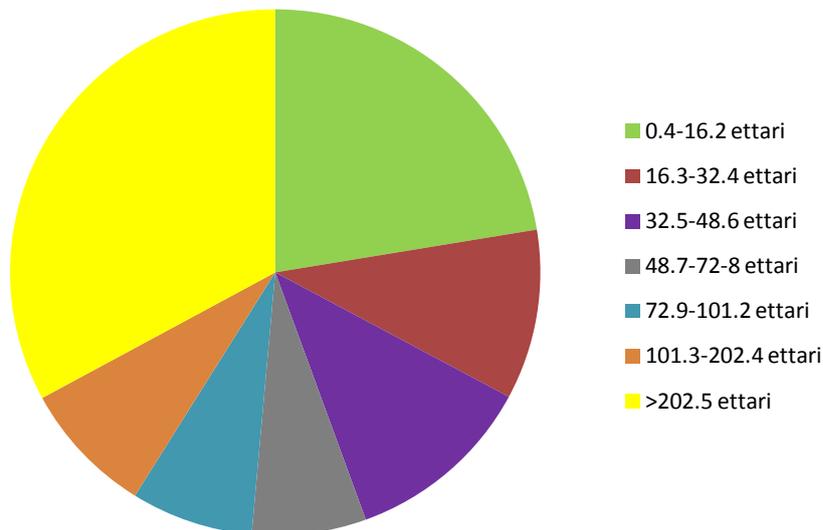


Figura 18: Dimensione delle aziende agricole clienti

In Figura 19 sono mostrate le principali attività delle fattorie clienti: le percentuali di utilizzo si ripartiscono ugualmente tra le

varie tipologie di utilizzo, ciò evidenzia la natura tutto fare di tale trattrice.

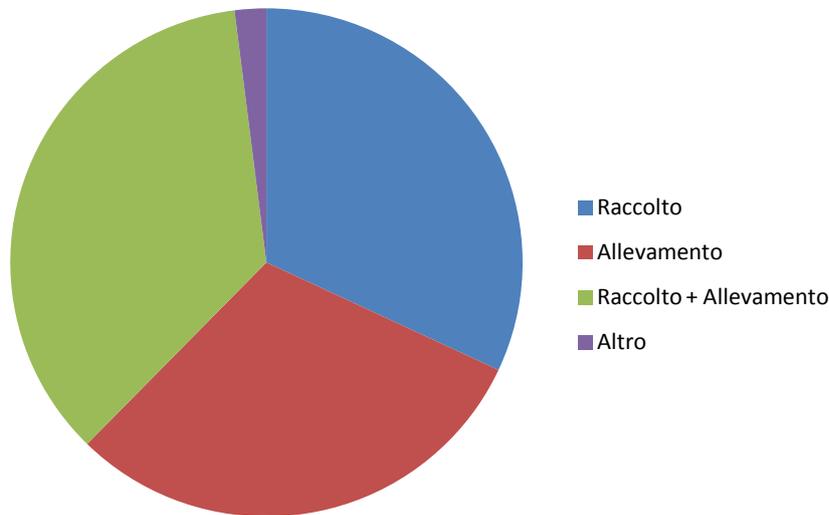


Figura 19: Principali attività delle fattorie

3.2.2 Misure

È stato strumentato un trattore simile a quello che si vuole introdurre sul mercato. Si è preferito strumentare un solo trattore per fare misure in diverse aziende agricole ogni qualvolta che queste dovevano eseguire una lavorazione specifica. In tal modo è stato possibile ottenere numerose misure in arco temporale limitato. Il trattore è stato utilizzato da 25 aziende con un differente conducente per ciascuna di esse. In ciascuna azienda sono state effettuate differenti operazioni per un periodo di 5 ore per ciascuna lavorazione per un totale di 20 lavorazioni differenti ripetute in 5 aziende differenti. In tal modo è stato possibile raccogliere 500 ore di misure in numerose condizioni di lavoro e con differenti operatori. Le lavorazioni sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1: Raccolta delle lavorazioni monitorate

	Macrocategoria di utilizzo	Lavorazione
1	Caricatore frontale	Spostamento di letame
2		Spostamento di balle di fieno
3		Spostamento di terra
4	Lavorazioni con presa di potenza	Spargi letame
5		Imballatrice a balle tonde
6		Imballatrice a balle quadrate
7		Spargi concime
8		Volta fieno
9		Erpice rotante
10		Seminatrice
11		Tagliafieno
12	Lavorazioni del terreno	Aratura
13		Erpice a dischi
14		Coltivatore
15	Trasporto	Trasporto con rimorchio pieno
16-20		Trasporto con attrezzi di diversa dimensione e peso

In Figura 20 viene illustrato il trattore che è stato strumentato durante alcune lavorazioni.



Figura 20: Trattore strumentato e lavorazioni

In Tabella 2 sono raccolti i carichi misurati:

Tabella 2: Elenco dei carichi misurati

Numero canale	Carico misurato	
1	Carico sui bracci superiori (Figura 21.a)	Sinistro
2		Destro
3	Carico sul terzo punto (Figura 21.b)	
4	Carico sui bracci inferiori (Figura 21.c)	Sinistro
5		Destro
6	Carico verticale sull'assale anteriore (Figura 21.d)	Sinistro
7		Destro
8	Carico orizzontale sull'assale anteriore (Figura 21.d)	Sinistro
9		Destro

A rigore sarebbe stato necessario misurare anche i carichi orizzontali e verticali dell'assale posteriore, ma a causa della rigidità della scatola assale, la deformazione sarebbe stata così bassa da avere un segnale eccessivamente rumoroso e quindi

poco utilizzabile. Il veicolo è stato strumentato con estensimetri a mezzo ponte con resistenze da 120Ω .

La sollecitazione esterna è stata ricavata tarando l'estensimetro con carichi noti applicati al componente.



Figura 21: Posizionamento degli estensimetri: (a) braccio superiore, (b) terzo punto, (c) braccio inferiore, (d) assale anteriore

I segnali acquisiti sono stati campionati a 500Hz e successivamente sono stati filtrati con un filtro passa alto con frequenza di taglio di 167Hz per rimuovere il rumore ad alta frequenza. Successivamente tutti i segnali sono stati manipolati al fine di rimuovere eventuali derive generate da variazioni di temperatura e spikes generati da impulsi elettrici.

Tutti i segnali sono stati convertiti in matrici di rainflow di tipo from-to (Figura 22) e successivamente sono state tutte adimensionalizzate ad un utilizzo orario.

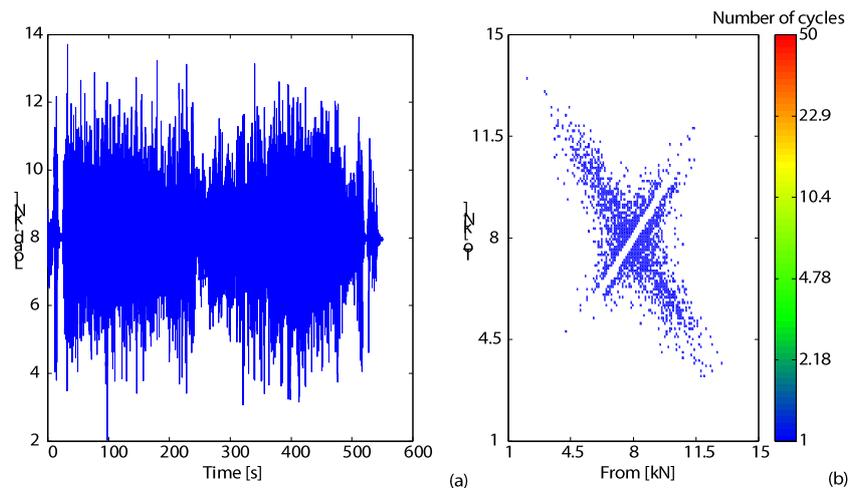


Figura 22: Calcolo delle matrici di rainflow (b) a partire dalle loading-history (a)

3.2.3 Target

Dalle misure svolte sono state definite le matrici target utilizzando gli strumenti la metodologia introdotta nel paragrafo 3.1.1.

Dalle acquisizioni si sono ricavate 100 matrici di rainflow per ciascun canale. Di queste, 20 sono state ricavate da lavorazioni differenti, questo per valutare l'effetto del driver e delle condizioni del terreno sulla medesima lavorazione. Nell'eseguire la medesima operazione è stata registrata una sensibile variabilità delle sollecitazioni, tanto da indurre un danneggiamento anche di 4 volte maggiore tra le diverse ripetizioni della lavorazione (Figura 23). Questo è dovuto ad un differente stato del terreno ed operatore, che possono indurre a cicli estremi e poco frequenti, riconoscibili nella matrice di rainflow come punti isolati distanti dalla diagonale principale. Tali punti sono stati cerchiati in Figura 24. È evidente come non sia possibile fare una sola ripetizione di una condizione di lavoro e supporre che il veicolo la esegua sempre l'operazione in quel modo.

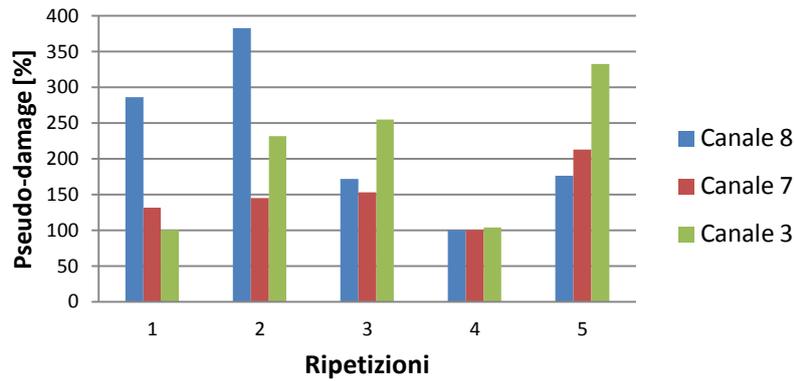


Figura 23: Danneggiamento orario adimensionalizzato al danneggiamento minimo per ciascun canale per tre differenti canali in 5 diverse ripetizioni dell'aratura

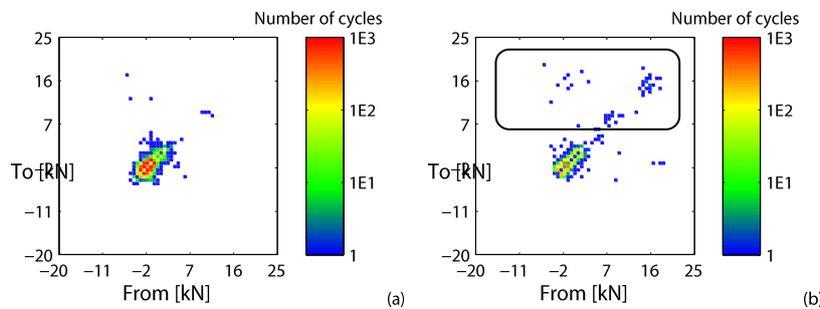


Figura 24: Confronto tra le matrici in cui il danneggiamento orario è minimo (a) ed il danneggiamento orario è massimo (b) per il carico orizzontale sinistro dell'assale anteriore

A questo scopo al fine di identificare per ciascun canale una matrice di rainflow che sintetizzi l'utilizzo al 95° percentile della popolazione di una specifica operazione, è necessario utilizzare l'estrapolazione a quantile della matrice di rainflow (Paragrafo 2.6). In

Figura 25 sono riportate le matrici di rainflow ottenute con diverse ripetizioni della lavorazione di aratura e la matrice di rainflow ottenuta con una estrapolazione a quantile della lavorazione di aratura.

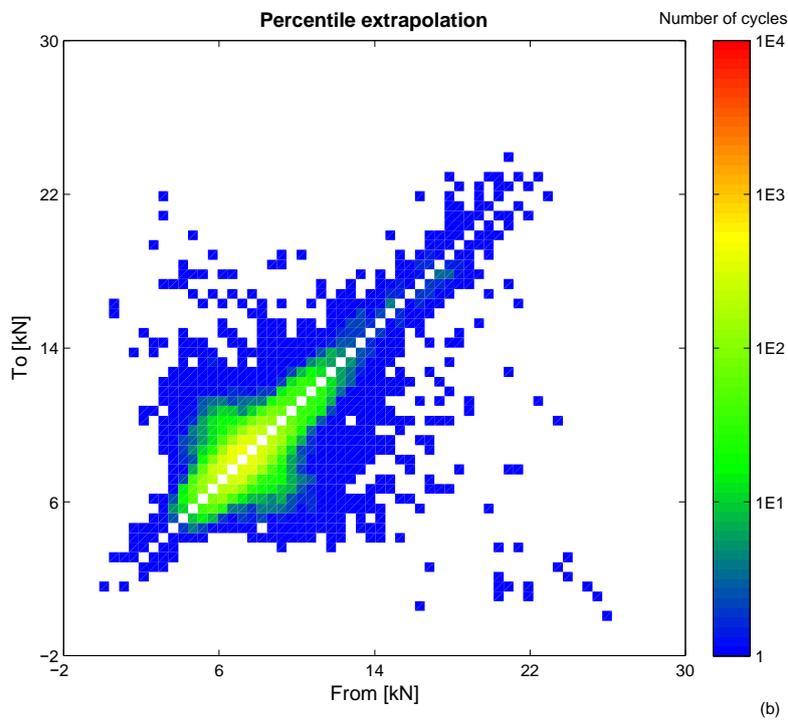
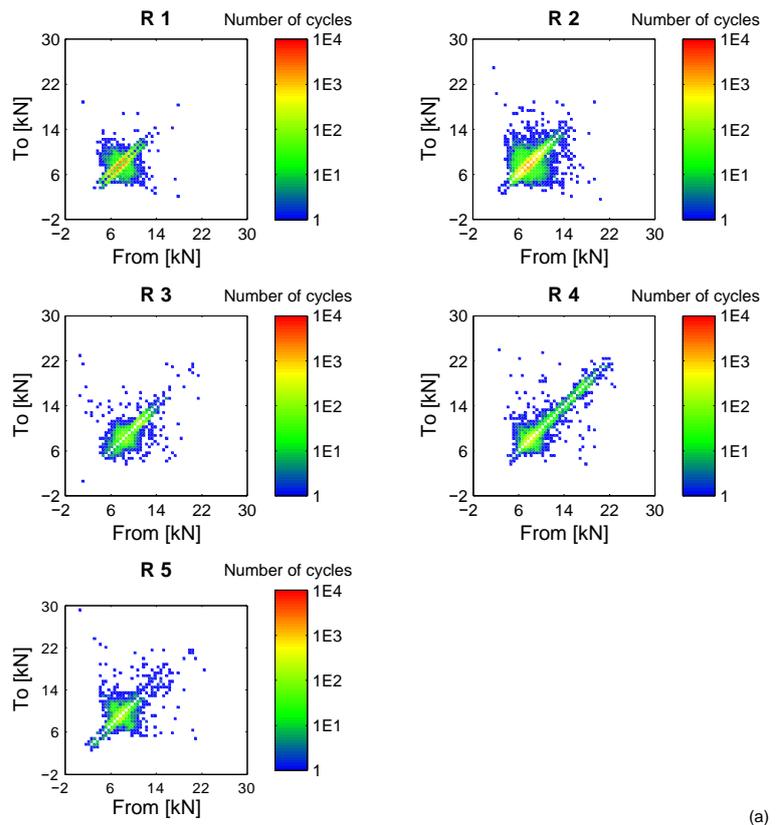


Figura 25: Estrapolazione a quantile della matrice di rainflow per il carico verticale dell'assale anteriore: (a) matrici di rainflow calcolate da diverse ripetizioni dell'operazione di aratura, (b) matrice estrapolata

La forma delle matrici durante l'operazione di aratura sono tutte molto simili tra loro con l'unica differenza nella loro estensione. La matrice estrapolata ha una forma piuttosto simile a quelle delle matrici dalla quale è stata ricavata con l'unica differenza che questa contiene tutti i cicli presenti in tutte le matrici dalla quale è stata calcolata. Con questa operazione si sono ridotte le matrici a 20 per canale suddivise per macrocategoria di utilizzo. Da queste matrici, per ciascuna macrocategoria di utilizzo è stata scelta l'operazione con la somma dei danneggiamenti più alti tra le diverse matrici di rainflow. In Tabella 3 sono elencate le 4 operazioni più impegnative per ciascuna macrocategoria:

Tabella 3: Lavorazioni più intense per ciascuna macrocategoria

Macrocategoria	Lavorazione
Caricatore frontale	Spostamento di terra
Lavorazione del terreno	Aratura
Lavorazione con PDP	Trinciatura
Trasporto	Trasporto con attrezzo portato

Tali operazioni hanno consentito di definire il ciclo di lavoro che caratterizza l'utilizzo della macchina estremo della macchina nell'arco della sua vita.

In Figura 26 vengono mostrati per ciascun canale i danneggiamenti adimensionalizzati a quello minimo delle matrici di rainflow scelte. I danneggiamenti più alti sono presenti sul terzo punto, sui bracci inferiori dell'attacco a tre punti e sul carico verticale dell'assale anteriore. Inoltre la condizione di trasporto è quella più gravosa in quasi tutti i canali, mentre per l'assale anteriore la più sollecitante è quella che prevede l'utilizzo del caricatore frontale. L'attacco a tre punti è estremamente sollecitato durante la fase di trasporto

in quanto in questa condizione di lavoro la trattrice marcia in strade di campagna sconnesse. A questo si aggiunge il fatto che l'attacco a tre punti non è un collegamento perfettamente rigido, piccole oscillazioni sono permesse a causa dei giochi nel collegamento e pertanto causa urti ogni qual volta il veicolo attraversa un'asperità della superficie di percorrenza.

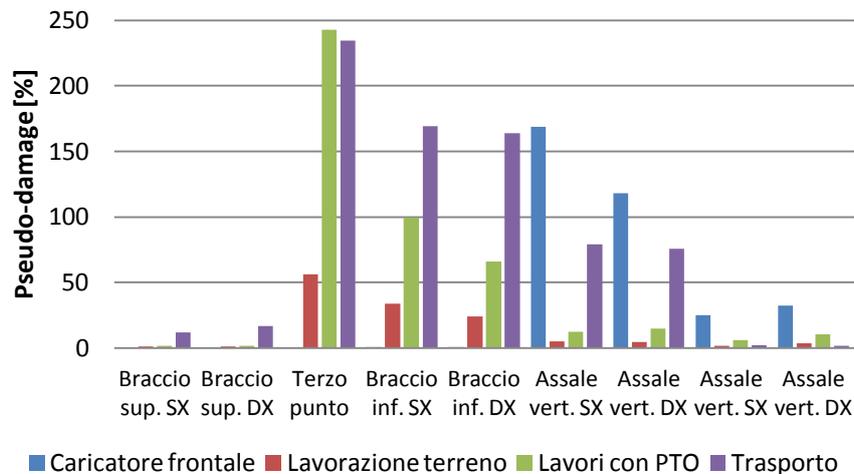


Figura 26: Danneggiamenti adimensionalizzati per ciascun canale nelle condizioni utilizzate

L'utilizzo del caricatore frontale porta il trattore a lavorare con diversi valori medi del carico verticale dell'assale anteriore, mentre per le restanti operazioni i cicli sono maggiormente incentrati nella zona del carico statico del trattore, generando cicli di bassa ampiezza. Questo fa sì che con il caricatore frontale la trattrice si ritrovi a lavorare ad ampiezze dei cicli maggiori, danneggiando maggiormente la struttura. Questo è evidente osservando le matrici di rainflow di Figura 27. La matrice di rainflow associata al caricatore frontale (a) si estende a cicli più intensi, cioè più distanti dalla diagonale principale ma i cicli presentano una frequenza bassa. Invece la lavorazione del terreno

è quella che presenta una matrice più concentrata attorno al valore medio della reazione anteriore del terreno.

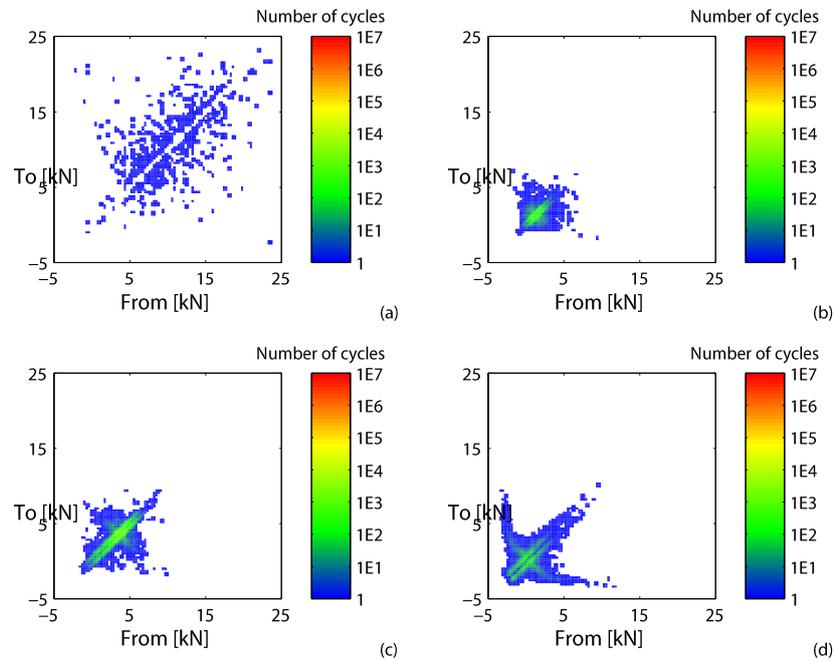


Figura 27: Matrici di rainflow del carico verticale dell'assale anteriore sinistro scelte per ciascuna macrocategoria: (a) caricatore frontale, (b) lavorazione del terreno, (c) lavorazione con PdP, (d) trasporto

Medesime considerazioni possono essere fatte per il carico orizzontale dell'assale anteriore (Figura 28).

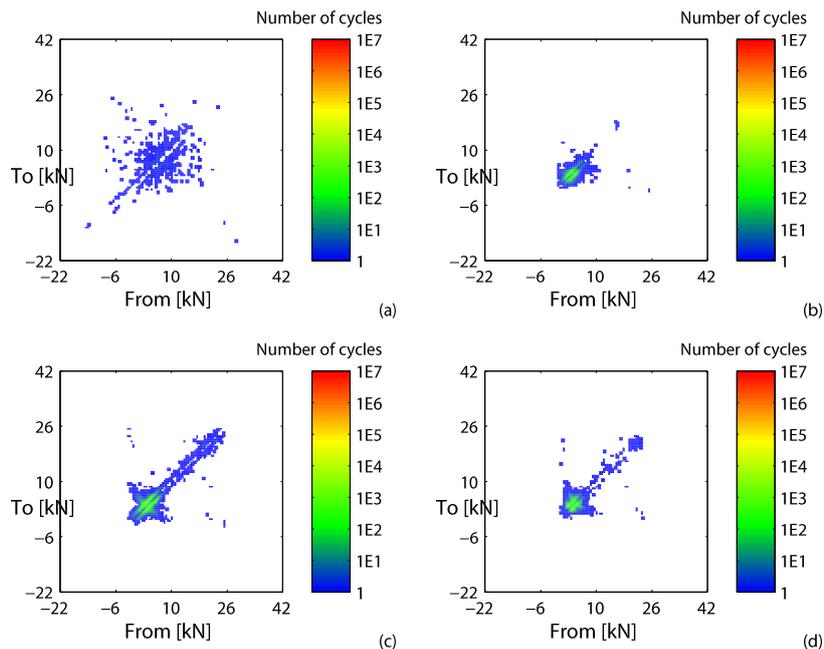


Figura 28: Matrici di rainflow del carico orizzontale dell'assale anteriore sinistro scelte per ciascuna macrocategoria: (a) caricatore frontale, (b) lavorazione del terreno, (c) lavorazione con PdP, (d) trasporto

Per quanto riguarda il carico sul braccio superiore destro (Figura 29) il trasporto presenta una matrice che si estende notevolmente a cicli distanti dalla diagonale principale e quindi notevolmente danneggianti. La lavorazione con presa di potenza confrontata con quella del terreno presenta dei cicli di ampiezza paragonabile essendo i cicli concentrati attorno alla diagonale principale in entrambi i casi, ma nel caso della lavorazione del terreno si dispongono attorno al carico statico, mentre nella lavorazione con presa di potenza i cicli si dispongono su tutta l'estensione della diagonale. Ovviamente durante l'utilizzo con caricatore frontale essendo l'attacco a tre punti scarico i cicli sono tutti localizzati attorno allo zero.

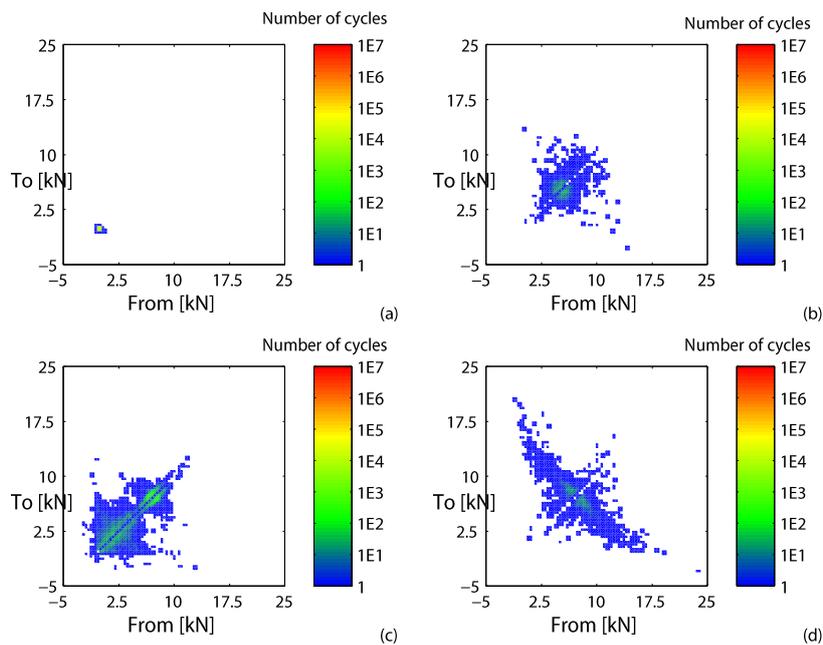


Figura 29: Matrici di rainflow del carico sul braccio superiore destro scelte per ciascuna macrocategoria: (a) caricatore frontale, (b) lavorazione del terreno, (c) lavorazione con PdP, (d) trasporto

Nonostante il trasporto sia una delle operazioni più danneggianti per la maggior parte dei canali è lecito chiedersi perché non utilizzare esclusivamente questa operazione nella definizione della matrice di rainflow che sintetizza la vita del trattore, con ovvi benefici dal punto di vista dell'affidabilità della trattrice. In Figura 30 è illustrata la variazione del danneggiamento al variare dell'ampiezza del carico per le quattro matrici di rainflow scelte per ciascuna macrocategoria: per basse ampiezze il trasporto fornisce più danneggiamento del caricatore frontale, mentre per alte ampiezze il caricatore frontale fornisce un danneggiamento molto maggiore. Se si assume che il trattore esegua nella sua vita esclusivamente il trasporto, verrebbe a mancare il danneggiamento alle alte ampiezze provocato dal caricatore frontale riducendo quindi la fedeltà della stima delle matrici di rainflow target. Le operazioni di lavorazione del terreno e con

presa di potenza in tutto lo spettro di ampiezze sono meno sollecitanti delle altre lavorazioni, questo è dovuto al fatto che il trasporto induce nel trattore un evidente beccheggio e quindi trasferimenti di carico longitudinale. Il caricatore induce invece una forte variazione del carico, indotta dalla massa di terreno caricato con la pala e dalla variazione della distanza della pala dall'assale anteriore, sviluppando carichi di elevata intensità.

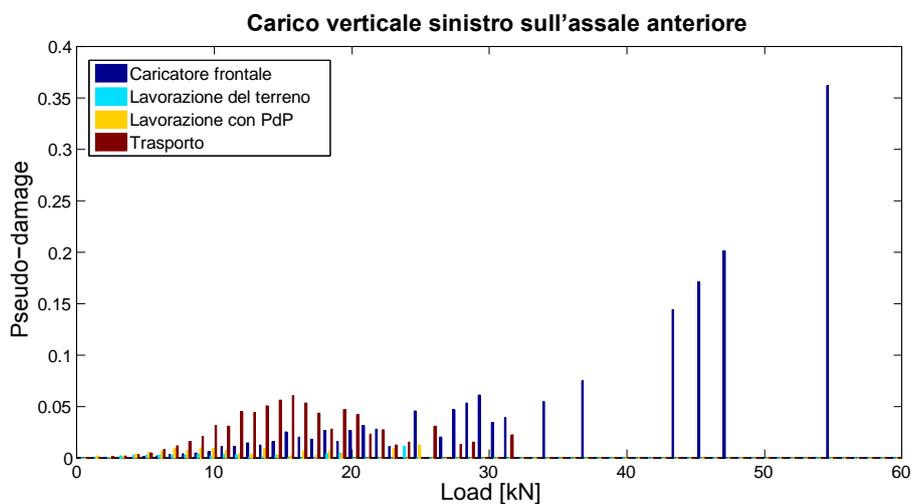


Figura 30: Andamento del danneggiamento al variare dell'ampiezza dei cicli delle matrici scelte per ciascuna macrocategoria per il carico verticale sinistro dell'assale anteriore

Dall'andamento del danneggiamento al variare dell'ampiezza delle sollecitazioni per il terzo punto (Figura 31) è evidente che le lavorazioni con presa di potenza forniscono un alto contributo danneggiante ai cicli di bassa ampiezza, il trasporto a media ampiezza, mentre le lavorazioni del terreno ai cicli di ampiezza elevata. Spesso i cicli a bassa ampiezza sono associati a fenomeni di alta frequenza che possono indurre rotture dinamiche provocate da risonanze strutturali. Tutto ciò chiarisce l'importanza di non poter utilizzare una sola condizione per definire le sollecitazioni che gravano sulla trattore nell'arco della sua vita.

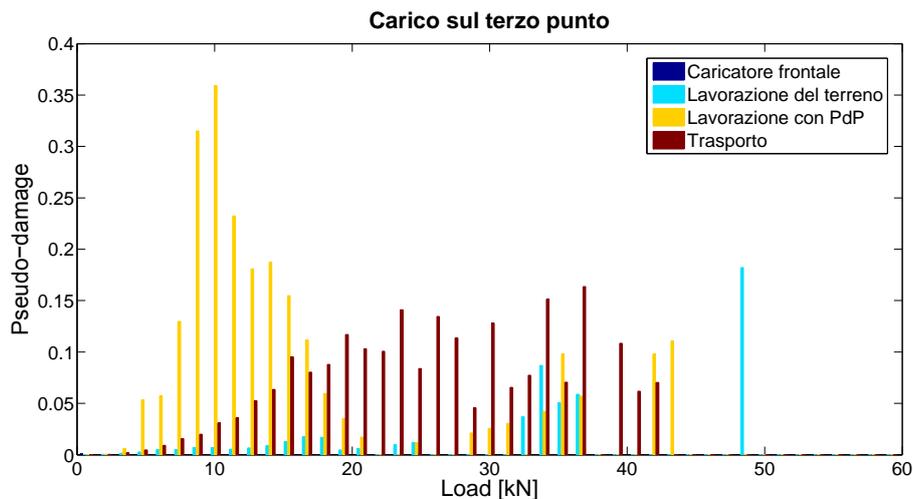


Figura 31: Andamento del danneggiamento al variare dell'ampiezza dei cicli delle matrici scelte per ciascuna macrocategoria per il carico assiale sul terzo punto

Definite le matrici le più danneggianti per ciascuna macrocategoria sono state estrapolate in durata in modo da definire quelle matrici che sintetizzano l'utilizzo della trattoria per ciascuna macrocategoria durante la sua vita.

Di seguito si analizza la necessità di dover estrapolare in durata una matrice di rainflow: una lunga *loading-history* è stata dimezzata e ne è stata calcolata la matrice di rainflow (Figura 32 (a)); tale matrice è stata poi raddoppiata (Figura 32 (b)), estrapolata con un fattore di estrapolazione pari a due (Figura 32 (d)) ed infine confrontata con la matrice dell'intera *loading-history* (Figura 32 (c)). La matrice raddoppiata sembrerebbe più simile, rispetto alla matrice estrapolata, a quella ricavata dall'intera *loading-history*, questo è dovuto al fatto che a bassi fattori di estrapolazione la matrice estrapolata è maggiormente concentrata attorno i cicli caratterizzati dalla maggiore probabilità di occorrenza e quindi attorno alla diagonale principale. Nonostante la differenza visiva della matrice di rainflow della *loading-history* lunga con quella estrapolata, confrontando il danneggiamento al

variare dell'ampiezza dei cicli di tutte e 4 le matrici (Figura 33) risulta evidente che la matrice di rainflow raddoppiata contiene i medesimi cicli contenuti nella matrice di rainflow di origine, mentre sia la matrice estrapolata che quella ricavata dall'intera *loading-history* presentano cicli non contenuti nelle altre due oltre ad avere un danneggiamento globale pressoché identico tra loro.

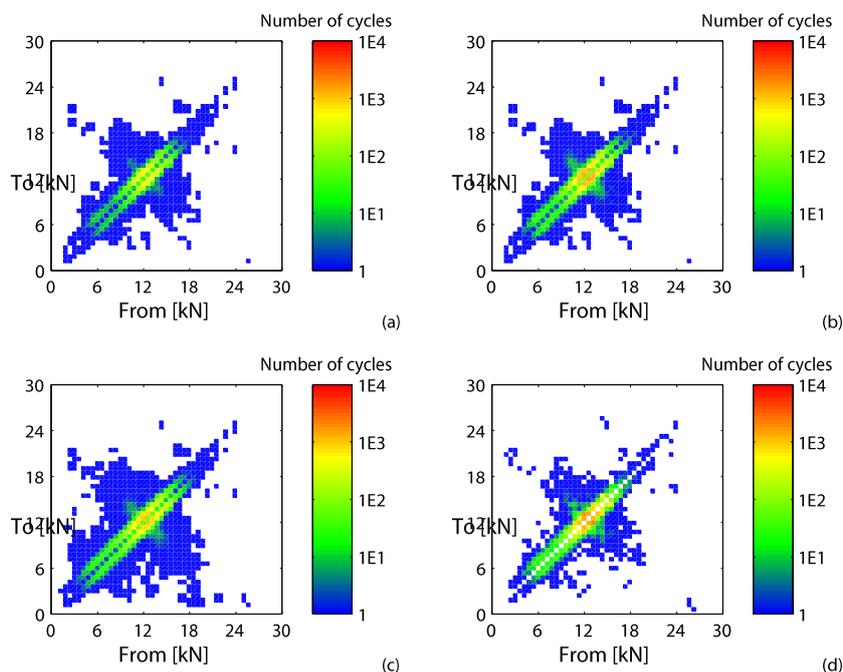


Figura 32: Confronto di diverse matrici di rainflow: *loading-history* dimezzata (a), *loading-history* dimezzata moltiplicata per due (b), *loading-history* completa (c) estrapolata di durata dalla *loading-history* dimezzata (d) per il carico verticale dell'assale anteriore sinistro

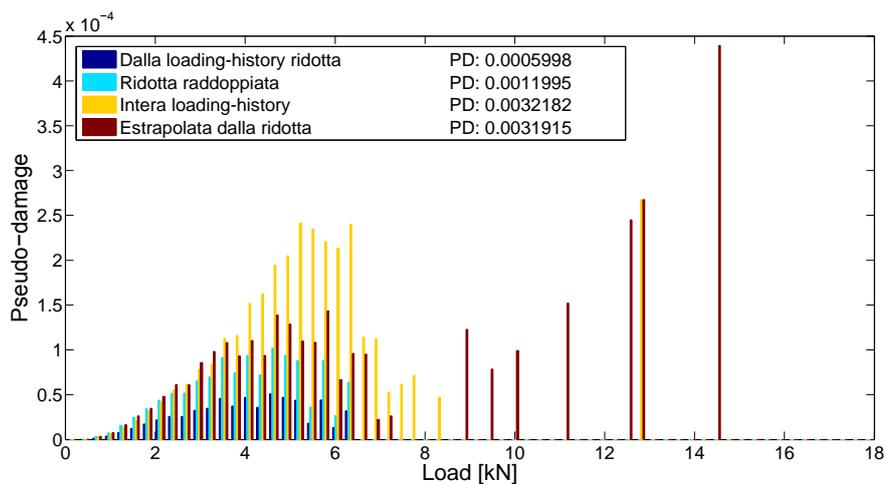


Figura 33: Andamento del danneggiamento al variare dell'ampiezza del carico per le 4 matrici illustrate in Figura 32

Il processo di costruzione della matrice estrapolata è un processo completamente casuale e ciò risulta evidente a bassi fattori di estrapolazione. Eseguendo diverse estrapolazioni della stessa matrice e con lo stesso fattore di estrapolazione si ottengono matrici di rainflow differenti (Figura 34) con diversi danneggiamenti (Figura 35). Questo rende utile eseguire diverse estrapolazioni se il fattore di estrapolazione è basso, ma d'altro canto solitamente i fattori di estrapolazione sono molto maggiori di due ed in tal caso per la legge dei grandi numeri tutte le simulazioni convergono a matrici simili. In ogni modo tutte le matrici estrapolate presentano un danneggiamento equivalente, anche se si ripartisce in maniera differente tra i vari cicli: per bassi cicli questa differenza è pressoché trascurabile mentre per alti cicli la differenza è molto più marcata in virtù della loro bassa probabilità di occorrenza.

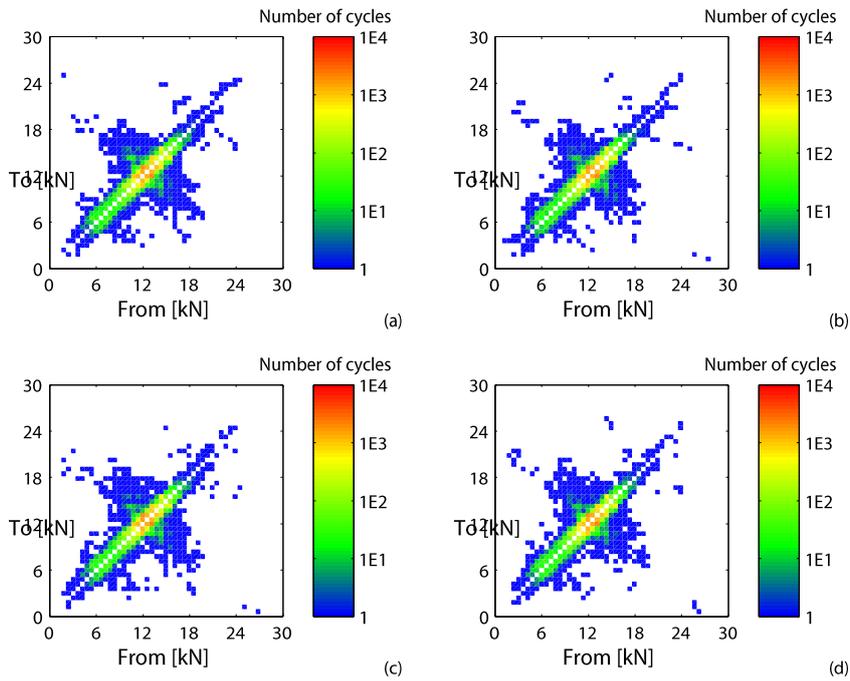


Figura 34: Confronto di diverse matrici del carico verticale dell'assale anteriore sinistro, ricavate da diverse simulazioni montecarlo per evidenziare la casualità del processo

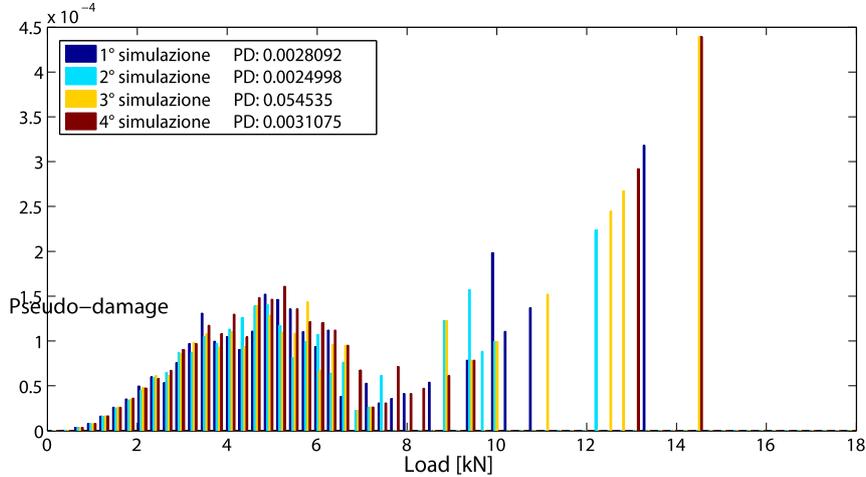


Figura 35: Danneggiamento al variare dell'ampiezza dei cicli per 4 simulazioni di estrapolazione per il carico sul braccio superiore sinistro dell'attacco a tre punti

In Figura 36 vengono confrontate una matrice di rainflow non estrapolata con l'equivalente estrapolata in durata nell'utilizzo di trasporto.

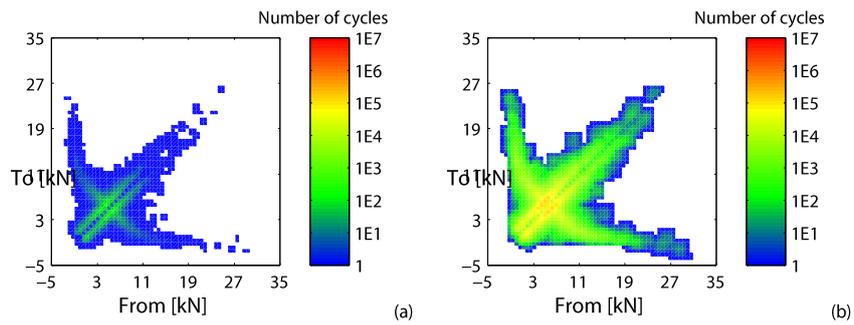


Figura 36: Confronto tra la matrice non estrapolata (a) e la matrice estrapolata (b) del carico verticale sinistro dell'assale anteriore nella condizione di trasporto

Per ciascuno canale la matrice di rainflow target è data dalla somma delle 4 matrici di rainflow estrapolate (Figura 37).

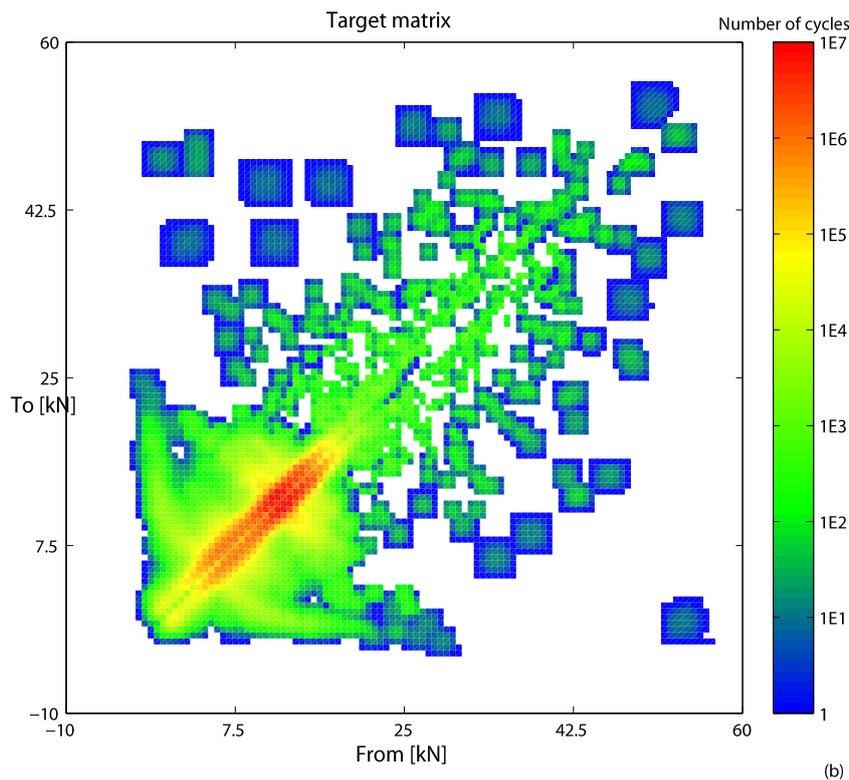
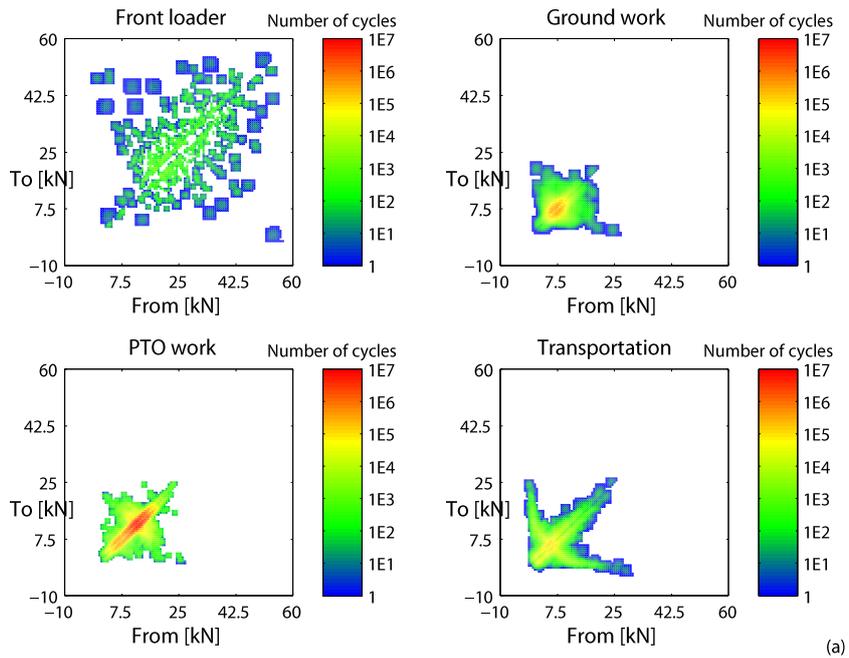


Figura 37: Definizione della matrice di rainflow target per il carico verticale sinistro dell'assale anteriore: (a) matrici di rainflow estrapolate per ciascuna macrocategoria, (b) matrice di rainflow target

3.2.4 Definizione delle condizioni di prova nei proving grounds

Successivamente sono state definite le combinazioni di prova in grado di consentire di replicare l'utilizzo reale nei proving grounds automobilistici. Pertanto sono stati monitorati i medesimi canali per ciascun proving ground nelle condizioni di carico elencate in Tabella 4:

Tabella 4: Condizioni di carico nel proving ground

Condizione di carico	Zavorra anteriore	Zavorra posteriore
1	0 kg	0 kg
2	500 kg	0 kg
3	0 kg	1270 kg
4	500 kg	1270 kg

Al fine di massimizzare il fattore di accelerazione, le zavorre anteriore e posteriore sono state scelte in modo tale che con entrambe le zavorre, il veicolo raggiungesse il carico tecnicamente ammesso, definito come il carico massimo sopportabile dagli assali del trattore senza limitare la massima velocità. Quest'ultima per ciascuna pista è stata scelta in modo tale da consentire di guidare il veicolo mantenendo un adeguato comfort di marcia. Dalle diverse condizioni di prova al proving ground è stato poi applicata la routine di ottimizzazione al fine di definire i tracciati da utilizzare ed il numero di ripetizioni.

3.3 Risultati

In Figura 38 vengono confrontati i *loadspectra target* (linea blu) e quelli derivanti dal test (linea rossa).

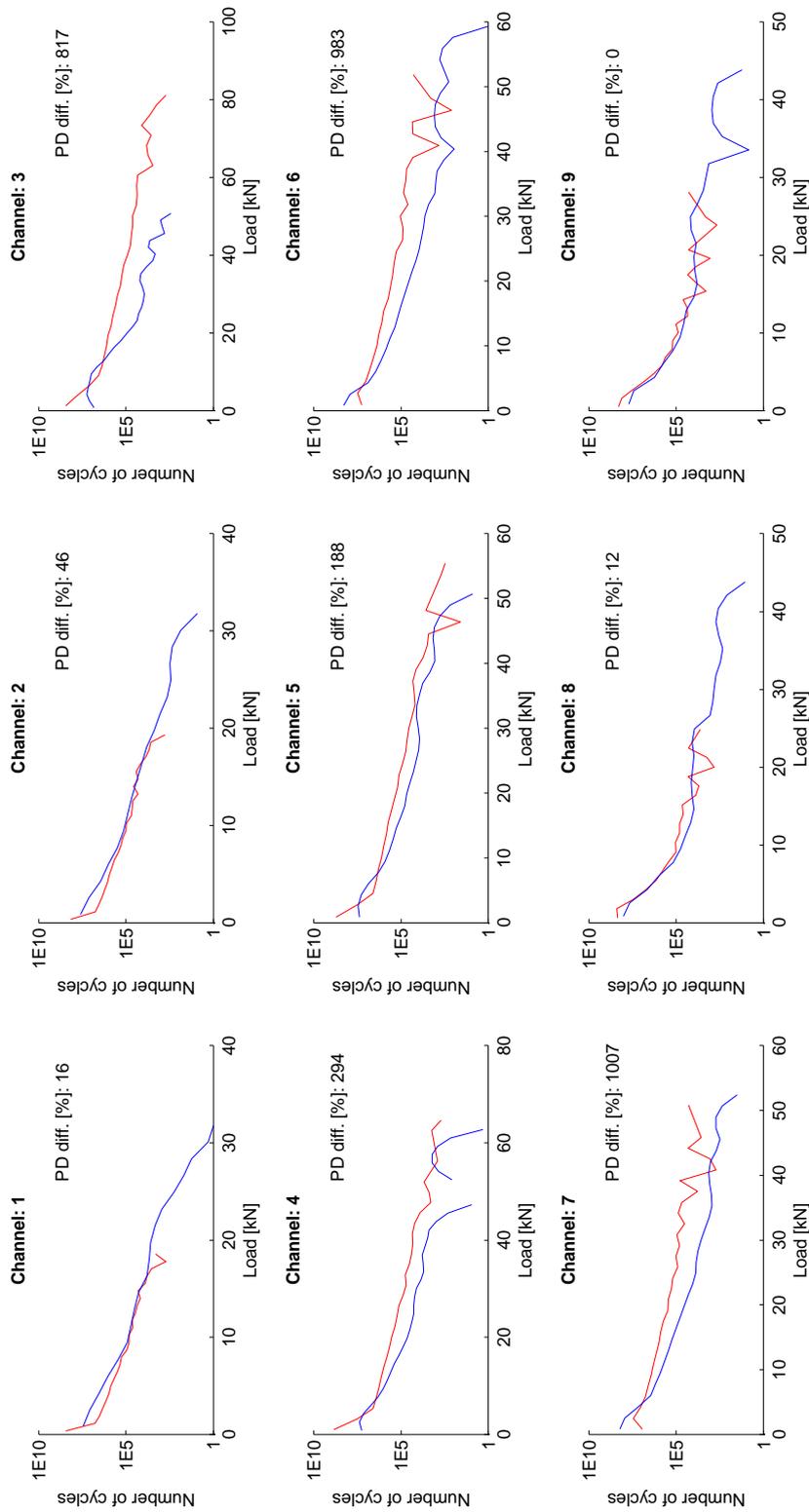


Figura 38: Confronto dei loadspectra del test (linea rossa) e quelli target (linea blu) dei diversi canali. Nell'angolo in alto a destra di ciascun grafico è mostrata per ciascun canale la differenza percentuale tra il danneggiamento del loadspectra del test e quello target

In alcuni carichi il test è eccessivamente sollecitante ottenendo un danneggiamento addirittura di 10 volte maggiore di quello del *loadspectra target*, come ad esempio per il carico verticale dell'assale anteriore ed il carico assiale del terzo punto mentre per altri, quali ad esempio quello dei bracci superiori dell'attacco a tre punti, il danneggiamento risulta essere identico a quello del *loadspectra target*. Ciò è dovuto al fatto che in quest'ultimi i *loadspectra* derivati dai proving grounds non hanno tutte le ampiezze presenti nei *loadspectra target* richiedendo di dover applicare un maggior numero di cicli di ampiezza inferiore al fine di ottenere un danneggiamento equivalente a quello del *loadspectra target*. Il tempo totale del test è stato di circa **7800 ore**, e quindi i soli proving grounds non consentono di poter accelerare il test. Ciò è dovuto al fatto che il test non riesce a riprodurre correttamente i carichi di una trattrice in lavorazione.

Al fine di poter accelerare il test sono state introdotte due operazioni di campo ripetibili e semplici da riprodurre in azienda. Sono state effettuate due operazioni di spostamento laterale del materiale con il caricatore frontale eseguite su una superficie dura utilizzando sabbia e ghiaia in modo tale da replicare la prova con due differenti livelli di carico. In Figura 39 vengono confrontati i *loadspectra target* (linea rossa) con quello del test.

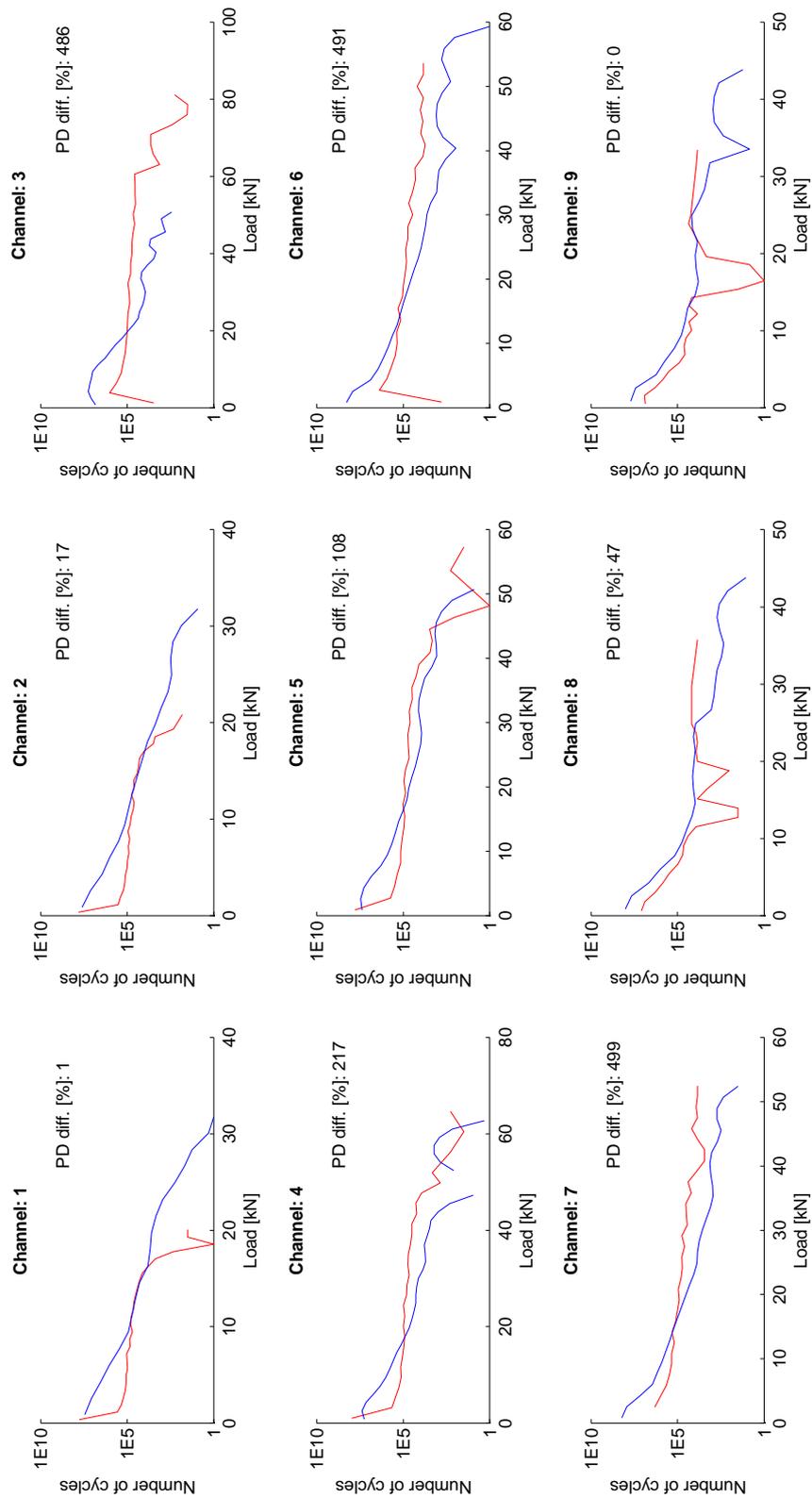


Figura 39: Confronto dei loadspectra del test (linea rossa) e quelli target (linea rossa) nei diversi canali. Nell'angolo in alto a destra di ciascun grafico è mostrata per ciascun canale la differenza percentuale tra il danneggiamento dei loadspectra del test e quello target

È possibile notare come, ad esempio l'ampiezza massima nei loadspectra del carico orizzontale dell'assale anteriore sia incrementata di circa il 25% dell'ampiezza massima. Ciò ha consentito di avere una riproduzione dei loadspectra più fedele, di ridurre notevolmente la durata del test ed inoltre di avere un danneggiamento meglio ripartito tra i diversi canali.

In Figura 40 vengono riportate le durate di ciascuna condizione di carico nei due test definiti.

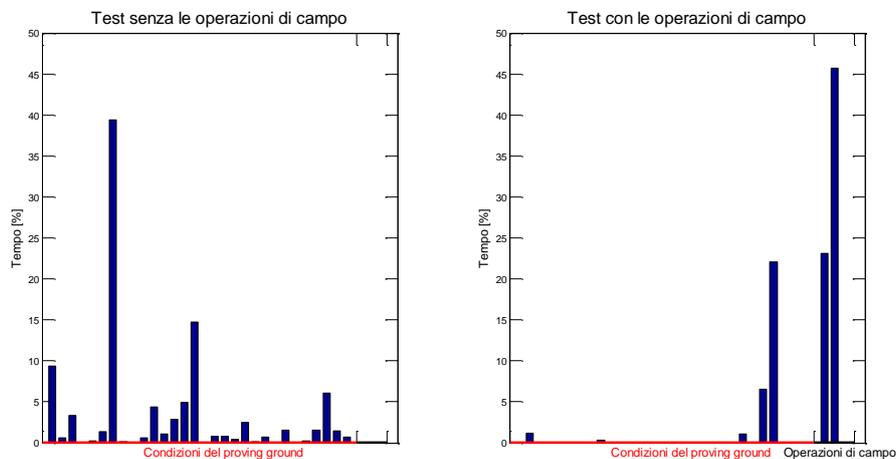


Figura 40: Elenco delle durate di ciascuna condizione di prova nei due test definiti

È evidente che le due operazioni di campo incidono sul numero delle ripetizioni, per il 65% della durata totale del test. Inoltre l'introduzione di queste configurazioni di prova ha consentito di ridurre notevolmente le configurazioni di prova totali, con ovvi benefici sulla praticità di esecuzione del test. Il tempo totale del test è di circa **1100 ore**, consentendo un fattore di accelerazione globale del test di circa 3. È bene parlare di fattore di accelerazione globale in quanto a rigore il fattore di accelerazione risulterà diverso canale per canale, ad esempio quello del carico verticale dell'assale anteriore risulterà essere molto più alto rispetto a quello orizzontale, visto che il danneggiamento del

loadspectra target viene raggiunto dopo un numero molto inferiore di ore. Il fattore di accelerazione globale risulta essere molto più basso di quello ottenuto per veicoli automobilistici, che solitamente è attorno al 10 (Braccesi, Cianetti, & Pioli, 2005; Garcia, Araan, & Ruiz, 2010). Ciò è causata dall'incapacità del proving grounds di replicare per alcuni canali i carichi ad alta ampiezza rendendo necessario applicare un numero maggiore di cicli di ampiezza inferiore e dalla ridotta velocità di percorrenza dei tracciati.

4 Conclusioni

L'evoluzione del mercato delle trattrici agricole sta ricalcando la stessa evoluzione che si è verificata negli ultimi anni in tutto il settore veicolistico. Nello specifico i tempi di sviluppo sempre più compressi obbligano i costruttori di macchine agricole a ridurre i tempi di sviluppo. D'altro canto i clienti sono diventati sempre più attenti, non solo alle alte prestazioni della macchina, ma anche ad un'alta affidabilità. A questo si aggiunge che una macchina viene venduta in tutto il mondo e le alte prestazioni devono essere garantite in tutti i mercati, anche se caratterizzati da una tradizione agricola molto diversa tra loro. Tutto ciò rende problematico il lavoro di ingegneri e progettisti che devono accelerare il processo di sviluppo, incrementando nel frattempo l'affidabilità del veicolo.

In questa tesi è stato delineato un processo per poter accelerare lo sviluppo di trattrici agricole attraverso l'adozione di test accelerati. Tale processo è stato applicato ad una trattrice di nuova produzione della CNH, un entry-level per l'azienda.

Sono stati preparati dei questionari per definire l'utilizzo del trattore. Successivamente è stato strumentato un trattore con gli estensimetri per misurare i carichi correlabili all'utilizzo della macchina. I questionari hanno permesso di definire una campagna di misure che coprisse tutti i principali utilizzi della trattrice e successivamente di definire le sollecitazioni che incontrerebbe la trattrice nell'arco della sua vita durante un utilizzo più intenso del 95% della popolazione.

Successivamente è stato definito un test accelerato che consentisse di replicare le sollecitazioni target. Sono stati utilizzati dei proving grounds automobilistici utilizzati da anni con gli autoveicoli. Sono state definite le condizioni di prova ed il numero delle ripetizioni per

ciascuna di essa. Il test ottenuto con i soli proving grounds non ha consentito di accelerare le prove in quanto in alcuni canali le ampiezze massime dei cicli dei loadspectra sono notevolmente più basse di quelle target. Come conseguenza si sono dovute effettuare un numero alto di ripetizioni per ottenere un danneggiamento equivalente. I canali più critici sono quelli corrispondenti ai carichi orizzontali dell'assale anteriore ed ai carichi dei bracci superiori dell'attacco a tre punti. Questo è probabilmente dovuto alla difficoltà di replicare i carichi assiali derivati dall'iterazione tra suolo e attrezzo. Introducendo nelle condizioni di prova due operazioni di campo, è stato possibile ottenere un fattore di accelerazione pari a 3. Tale fattore di accelerazione è molto più basso di quello usualmente ricavabile per gli autoveicoli. Questo è dovuto alla non completa riproduzione dei carichi e alla ridotta velocità di percorrenza che riduce la frequenza con la quale vengono incontrate le asperità del manto stradale. Inoltre la matrice target calcolata è sovrastimata in quanto:

- le matrici di rainflow sono state calcolate da loading-histories misurate durante il solo utilizzo della macchina, senza tenere conto dei tempi morti nei quali la struttura non viene stressata, come ad esempio nel cambio attrezzo o nell'utilizzo del trattore come stazione di potenza stazionaria (i. e. utilizzo di unifeed). Per stimare i tempi di non utilizzo sarebbe necessario strumentare diverse macchine e monitorare il loro utilizzo.
- per ciascuna macrocategoria è stata considerata l'operazione più danneggiante, cosa che non è vera, ma è in favore della sicurezza. Si potrebbe avere una stima più precisa della matrice di rainflow target aumentando il grado di dettaglio

richiesto ai clienti con il questionario, ma in tal modo potrebbe incrementare l'imprecisione delle risposte.

Alla luce di ciò è chiaro che la matrice target calcolata sintetizza l'utilizzo di un tempo maggiore di 10 anni e quindi il fattore di accelerazione globale del test è in qualche modo maggiore di quello qui presentato.

Gli sviluppi futuri di tale attività si concentreranno sull'incremento del fattore di accelerazione globale. Questo potrebbe essere ottenuto, sviluppando un apposito carro freno che consenta di replicare lo spettro dei carichi in fase di aratura. Attualmente la maggior parte dei carri freni disponibili non riescono ad introdurre frenate impulsive in quanto vengono utilizzati prevalentemente per prove di durata. Inoltre per migliorare la stima, occorre definire in maniera più precisa le sollecitazioni target e di conseguenza conoscere più nel dettaglio l'utilizzo della macchina. Ciò può essere svolto esclusivamente attraverso degli avanzati sistemi di data-logging, attualmente installati nei trattori per monitorare e memorizzare le informazioni provenienti dai sensori con lo scopo di fornire informazioni sul malfunzionamento di alcuni componenti.

Un'ulteriore strada per accelerare lo sviluppo della trattrice è l'adozione di software multibody per simularne il comportamento in diversi scenari, in tal modo risulterà possibile sia ricavare le sollecitazioni in numerose condizioni che simulare tali test. Questa soluzione non è ancora sufficientemente affidabile da poter validare una trattrice. I software negli ultimi anni sono migliorati considerevolmente, e in futuro potrebbero consentire di ridurre sempre più il numero di test richiesti per la delibera di una trattrice o di un suo componente.

5 Bibliografia

- Anthes, R. J. (1997). Modified rainflow counting keeping the load sequence. *International Journal of Fatigue*, 19(7), 529–535.
- ASTM. (2010a). *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing* (No. E606 - 04e1) (pp. 1–14).
- ASTM. (2010b). *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data* (No. ASTM E739 - 10) (pp. 1–14).
- Barsom, J. M. (1971). Effect of cyclic stress form on corrosion fatigue crack propagation below K_{Isc}. *Engineering Fracture Mechanics*, 3(1), 15–18.
- Basquin, O. H. (1910). The exponential law of endurance tests. *Proc. ASTM* (Vol. 10, pp. 625–630).
- Bastenaire, F. (1975). Estimation et prévision statistiques de la résistance et de la durée de vie des matériaux en fatigue. *Journées d'Etude sur la Fatigue*.
- Benson, R., & Sadhneni, R. (2010). Fatigue Based Damage Analysis with Correlation to Customer Duty Cycle Using Design Reliability and Confidence. *SAE Technical Paper*, 2010-01-0200.
- Braccesi, C., Cianetti, F., & Pioli, D. (2005). Optimisation of the process of experimental sign off of a vehicle. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 12(3), 193 – 206.
- Broek, D. (1989). *The Practical Use of Fracture Mechanics*. New York: Springer.
- Campean, I., & Brunson, D. (2000). Design Verification Using Customer Correlated Life Modelling. *The Global Vehicle: Reliability of Automotive Systems and Components* (p. 71-93). Birmingham.

- Cost, T. B. (1969). *Cumulative Structural Damage Testing*. (No. TP 4711). Naval Weapons Center.
- Curtis, A. J., Tinling, N. G., & Abstein, H. T. (1971). *Selection and performance of vibration tests* (No. SVM 8) (pp. 1–224). The shock and vibration information center.
- Deitrick, R. E. (1972). *Confidence in production units based on qualification vibration* (No. The Shock and Vibration Bulletin, Part 3, n° 42, 1972) (pp. 99–110). Naval Research Lab Washington DC Shock and Vibration Information Center.
- Dodds, C. J., Vidwans, S., Rajendra, G., & Subbarao, H. N. (2011). *Product Validation Using Customer Correlated Service Data*. *SAE Technical Paper, 2011-26-0111*.
- Dowling, N. E. (2007). *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. New York: Prentice Hall.
- Downing, S. D., & Socie, D. (1982). Simple rainflow counting algorithms. *International Journal of Fatigue*, 4, 31–40.
- Dressler, K., Gründer, B., Hack, M., & Köttingen, V. B. (1996). Extrapolation of rainflow matrices. *SAE Technical Paper, 960569*, 1–10.
- Dressler, K., Hack, M., & Krüger, W. (1997). Stochastic Reconstruction of Loading Histories from a Rainflow Matrix. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 77(3), 217–226.
- Dressler, K., Speckert, M., Müller, R., & Weber, C. (2009). *Customer loads correlation in truck engineering* (No. 151) (pp. 1–21). Kaiserslautern: Fraunhofer - ITWM.
- Ensor, D., & Cook, C. (2007). Derivation of Durability Targets and Procedures Based on Real World Usage. *SAE Technical Paper, 2007-26-074*.

- Ensor, D., Cook, C., & Birtles, M. (2005). Optimising Simulation and Test Techniques for Efficient Vehicle Durability Design and Development, *2005-26-042*, 1–9.
- Epanechnikov, V. A. (1969). Nonparametric estimation of a multidimensional probability density. *Teoriya Veroyatnostei i ee Primeneniya*, *14*(1), 156–161.
- Garcia, C., Araan, J., & Ruiz, S. (2010). Design of reliable accelerated test programs based on real market use, *2010-36-0029*, 1–14.
- Hughes, S., Jones, R. P., & Burrows, A. J. (2005). Application of System Modeling to Road Load Data Synthesis for Automobile Product Development. *ASME Conference Proceedings*, *2005*(42142), 31–40.
- Johannesson, P., & Thomas, J. J. (2001). Extrapolation of rainfall matrices. *Extremes*, *4*(3), 241–262.
- Karlsson, M. (2007). *Load Modelling for Fatigue Assessment of Vehicles: A Statistical Approach* (PhD). Chalmers Univ. of Technology, Göteborg.
- Kenefeck, M. N. (1982). *Variable load fatigue tenth report: speed of testing and the exclusion of low and high stress peaks* (No. 1982/1). The Motor Industry Research Association, MIRA Report.
- Kim, D. C., Ryu, I. H., & Kim, K. U. (2001). Analysis of tractor transmission and driving axle loads. *Transactions of the ASAE*, *44*(4), 751–757.
- LA VERNE ROOT. (1969). *Fatigue design of electronic equipment* (No. The shock and vibration bulletin, 40) (pp. 97–101).
- Ledesma, R., Jenaway, L., Wang, Y., & Shih, S. (2005). Development of Accelerated Durability Tests for Commercial Vehicle Suspension Components. *SAE Technical Paper*, *2005-01-3565*.
- Lee, Y.-L. (2005). *Fatigue testing and analysis: theory and practice*. Butterworth-Heinemann.

- Manson, S. S., & Halford, G. R. (1981). Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for testing cumulative fatigue damage. *International Journal of Fracture*, 17(2), 169–192.
- Matsuishi, M., & Endo, T. (1968). Fatigue of metals subjected to varying stress - Fatigue lives under random loading. *Kyushu District Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers* (pp. 37–40).
- Mattetti M., Molari G., Pesce M., Grillo M., Forte M., Sedoni E. (2012). Evaluation Of The Frequency Response Of Tractor Cab Angular Movements. *Transactions of the ASABE*, In press.
- Miller, R. E. (2000). *Optimization: foundations and applications*. John Wiley & Sons.
- Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 12, 159–164.
- Molari, G., Mattetti, M., Falagario, A., & Sedoni, E. (2011). Tractor accelerated structural testing by means of the rainflow method. *Solutions for Intelligent and Sustainable Farming* (pp. 217–222). Germany: VDI.
- Molari, M., Mattetti, M., Pesce, M., Grillo, M., Forte, M., & Sedoni, E. (2011). Evaluation of a Tractor's Driving Performance on the Road. *Transactions of the ASABE*, 54(1), 13–23.
- Nelson, D. V. (1978). *Cumulative fatigue damage in metals* (PhD). Stanford University.
- Oelmann, B. (2002). Determination of load spectra for durability approval of car drive lines. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 25(12), 1121–1125.
- Olofsson, M. (2000). *Evaluation of Estimates of Extreme Fatigue Load – Enhanced by Data from Questionnaires*. Licentiate of Engineering Thesis (Master). Chalmers - Göteborg University.

- Palmgren, A. (1924). Die Lebensdauer von Kugellagern. *Zeitschrift des Vereinesdeutscher Ingenieure*, 68(14), 339–341.
- Peterson, R. (1959). Analytical approach to stress concentration effects in aircraft materials. *US Air Force-WADC Symposium on Fatigue of Metals, Technical Report 59* (Vol. 507, p. 273).
- Petrucci, G. (2010). *Lezioni di costruzioni di macchine*. Università di Palermo.
- Renius, K. T. (1977). Application of cumulative damage theory to agricultural tractor design elements. *Konstruktion*, 29(3), 85–93.
- Roth, J. S. (1998). *Statistical modeling of rainflow histograms* (Master). University of Illinois.
- Rupp, A., Masieri, A., & Dornbusch, T. (2005). Durability transfer concept for the monitoring of the load and stress conditions on vehicles.
- Rychlik, I. (1987). A new definition of the rainflow cycle counting method. *International Journal of Fatigue*, 9(2), 119–121.
- Schijve, J. (2009). *Fatigue of Structures and Materials*. New York: Springer.
- Schütz, D., Klätschke, H., Steinhilber, H., Heuler, P., & Schütz, W. (1990). Standardized load sequences for car wheel suspension components (CARLOS). *Report FB-191, LBF Darmstadt, TF-2695, IABG Ottobrunn*.
- Schutz, W. (1974a). Fatigue life prediction of aircraft structures—past, present and future. *Engineering Fracture Mechanics*, 6(4), 745–762.
- Schutz, W. (1974b). Fatigue life prediction of aircraft structures—past, present and future. *Engineering Fracture Mechanics*, 6, 745–762.
- Scott, D. W. (1992). *Multivariate density estimation: theory, practice, and visualization*. New York: John Wiley & Sons.

-
- Shanley, F. R. (1955). A proposed mechanism of fatigue failure. Colloquium on fatigue, New York: Springer.
- Shin, Y. S., & Lukens, R. W. (1983). Probability-Based High-Cycle Fatigue Life Prediction. *Random Fatigue Life Prediction*, 72, 73–88.
- Socie, D. (2001). Modelling expected service usage from short-term loading measurements. *International Journal of Materials and Product Technology*, 16(4-5), 295–303.
- Socie, D., & Pompetzki, M. (2004). Modeling Variability in Service Loading Spectra. *Journal of ASTM International*, 1(2), 46–57.
- Tedford, J. D., Carse, A. M., & Crossland, B. (1973). Comparison of component and small specimen block load fatigue test data. *Engineering Fracture Mechanics*, 5(2), 241–258.
- Thomas, J. J., Perroud, G., Bignonnet, A., & Monnet, D. (1999). Fatigue design and reliability in the automotive industry. *European Structural Integrity Society, Volume 23*, 1–11.
- Thomas, S. (1997). Prediction uncertainties at variable amplitude fatigue. *International Journal of Fatigue*, 19(93), 295–302.
- Wirsching, P. H. (1983). *Statistical summaries of fatigue data for design purposes* (No. Contractor Report 3697) (p. 62). NASA.

Dopo tre anni di fatiche è doveroso tirare le somme sul trascorso da dottorando. È stata sicuramente una delle migliori esperienze che abbia mai avuto e sarò infinitamente grato al professore Molari che me lo ha segnalato. Ho notevolmente migliorato le mie conoscenze tecniche che difficilmente avrei ottenuto lavorando in un'azienda in virtù delle tempistiche ridotte. Quando mi decisi di tentare, non mi sarei mai immaginato cosa significasse fare un progetto di ricerca tutto mio e di studiare una cosa che poche persone al mondo fanno. Mi stimolava molto l'idea di poter fare un lavoro secondo i miei canoni e di sviluppare le mie idee che un'azienda potesse utilizzare. L'euforia iniziale si spense quasi subito. Mi trovai a vagare nel vuoto studiando parecchie cose di cui molti dei quali si rivelarono poco utili alla tesi. Certi giorni furono parecchio demoralizzati: senza un risultato e senza neppure aver capito qualcosa di utile. L'umore era terra e la sensazione di non essere adatto era sempre dietro l'angolo. D'altro canto questo faceva diventare il tutto una sfida. Ma pian piano con impegno l'attività si stava delineando nel dettaglio, i risultati arriveranno ed anche le soddisfazioni. Vorrei ringraziare tutte le persone che in questo processo mi hanno in qualche modo supportato, che in quei giorni non mi hanno spinto a distrarmi giusto per quella sera per uscire anche solo per bere una birra o che in qualche modo mi hanno fatto vedere dei progressi anche quando non riuscivo a vederne. Tra questi una menzione d'onore per il professore Giovanni Molari che mi ha sempre spronato a stimolato in tutto quello che volevo fare, dandomi la più totale libertà nello sviluppare quello a cui ero interessato. I miei genitori che mi hanno reso fiero di quello che sono diventato oggi. Non possono mancare i compagni storici dell'università: Marco, Matteo, Domenico, Rosario Piccolo, Rosario Grande e Gennaro. Ringrazio il Dr. Dressler ed il Dr.

Bitsch per avermi dato la possibilità di visitare il loro dipartimento all'ITWM. Un grazie tutto speciale anche alle persone che ho conosciuto durante il mio periodo in Germania, dove ho fatto delle grandi amicizie. Tra questi Matthias nonché il mio special guitarist con quale abbiamo fatto tante follie insieme ad Annette, Alì ed i ragazzi del loro dipartimento. Un grazie anche agli italianissimi Irene, Ilaria, Alberto e Federico, i colleghi Oliver, Sebastian, Reinhard, Urs, Katia e tutti gli altri che non ho menzionato. Ed infine un grande grazie anche alla mia coinquilina Nikita che era sempre lì a farmi sorridere tutte le volte che la nostalgia di casa prendeva il sopravvento.

Infine si ringrazia l'ing. Sedoni, l'ing. Vertua, l'ing Walker e tutto il personale CNH per la disponibilità ed il supporto nella realizzazione di questa tesi.

È stato veramente bello fare il dottorato, spero davvero che questo lavoro possa essere in qualche modo utile a qualche studente, ricercatore o professionista dei test accelerati.