

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di laurea in  
Ingegneria Meccanica



*Monitoraggio strutturale e previsioni di vita di assili rullati  
realizzati in un acciaio di media resistenza.*

Relatore: Dott. Ing. Michele Carboni  
Correlatore: Dott. Ing. Davide Crivelli

Tesi di Laurea di:  
Giacomo Cunati (755787)

Anno accademico 2012-2013









# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	III
<b>Elenco delle tabelle</b>	VII
<b>Sommario</b>	IX
<b>Abstract</b>	XI
<b>1 - Stato dell'arte</b>	1
1.1 Introduzione	1
1.1.1 Casi storici e giudiziari	2
1.2 Cricche negli assili ferroviari e normative	7
1.3 Scopo del lavoro	9
1.4 La progettazione di assili secondo la Damage Tolerance	10
1.4.1 Meccanica della frattura	12
1.4.1.1 Rottura a fatica	12
1.4.1.2 S.I.F. – Stress Intensity Factor	15
1.4.1.3 Propagazione stabile. Legge di Paris	18
1.4.1.4 Equazioni di Nasgro	22
1.4.1.5 La zona plastica	24
1.4.1.6 Crack Closure	26
1.4.1.7 Effetti di interazione del carico	27
1.4.1.8 La ricerca delle caratteristiche del materiale:	
CPLR vs $\Delta K$ decreasing	29
1.4.1.9 Effetti degli sforzi residui	30
1.5 CND e monitoraggio strutturale per assili ferroviari	32
1.5.1 Gli ultrasuoni (UT – Ultrasonic testing)	32
1.5.2 Le particelle magnetiche (MT - Magnetic Testing)	33
1.5.3 L'emissione acustica (AE)	34
1.5.3.1 Il fenomeno sonoro	35
1.5.3.2 I parametri dell'emissione acustica	39
1.5.3.3 Forme di propagazione	41
1.5.3.4 Attenuazione	46
1.5.3.5 L'AE utilizzata per lo studio del danneggiamento a fatica e dell'integrità strutturale	47

1.5.3.6 La normativa . . . . .	52
<b>2 - Prova di propagazione di cricca su assile rullato</b>	<b>57</b>
2.1 Il banco prova e il ciclo di carico . . . . .	58
2.2 Ultrasuoni Standard . . . . .	62
2.3 Ultrasuoni Phased Array . . . . .	65
2.4 Fotografie con l'ausilio del microscopio elettronico . . . . .	69
2.5 Repliche . . . . .	71
<b>3 - Monitoraggio strutturale con l'AE . . . . .</b>	<b>75</b>
3.1 I risultati . . . . .	80
<b>4 - Analisi degli sforzi in un assile . . . . .</b>	<b>89</b>
4.1 Analisi FEM . . . . .	89
4.1.1 Effetti del momento flettente . . . . .	89
4.1.2 Effetti dell'accoppiamento forzato . . . . .	94
4.2 Misurazione degli sforzi residui . . . . .	99
4.2.1 I principi della diffrattometria . . . . .	100
4.2.2 Strumenti utilizzati . . . . .	102
4.2.3 I risultati. . . . .	106
<b>5 Previsione di vita . . . . .</b>	<b>115</b>
5.1 Definizione del comportamento a propagazione del materiale . . . . .	115
5.2 Creazione del modello in AFGROW. . . . .	118
5.3 I risultati . . . . .	120
<b>Conclusioni . . . . .</b>	<b>123</b>
<b>Allegati . . . . .</b>	<b>125</b>
<b>Bibliografia . . . . .</b>	<b>137</b>
<b>Ringraziamenti . . . . .</b>	<b>141</b>

## Elenco delle figure

Figura 1.1 Assile ferroviario montato su una sala ferroviaria . . . . .	2
Figura 1.2: Fotografia d'epoca della Locomotion . . . . .	3
Figura 1.3: Immagine aerea del disastro di Viareggio . . . . .	5
Figura 1.4: Particolare della sezione dell'assile fratturatosi di Viareggio	6
Figura 1.5 Andamento POD – dimensione del difetto . . . . .	11
Figura 1.6 Esempio risultato di Wöhler . . . . .	13
Figura 1.7 Risultato di Wöhler in un grafico doppio logaritmico . . . . .	13
Figura 1.8 Slip bands . . . . .	14
Figura 1.9 Formazione cricche . . . . .	14
Figura 1.10 Modi di propagazione cricca . . . . .	16
Figura 1.11 Propagazione per una generica cricca d'assile . . . . .	16
Figura 1.12 Stato di sforzo lastra piana . . . . .	17
Figura 1.13 Spettro di carico sinusoidale . . . . .	19
Figura 1.14 Tipiche curve di Paris . . . . .	20
Figura 1.15 Fenomeno del fanning . . . . .	22
Figura 1.16 Zona plastica . . . . .	25
Figura 1.17 Variazione della sezione plastica . . . . .	26
Figura 1.18 Fenomeno della chiusura della cricca . . . . .	26
Figura 1.19 Zona crack closure nel grafico del SIF . . . . .	27
Figura 1.20 Effetti dei sovraccarichi sulla durata di un pezzo . . . . .	28
Figura 1.21 Variazioni della zona plastica per effetto dei sovraccarichi	28
Figura 1.22 Provino per la determinazione del $K_{Ic}$ . . . . .	29
Figura 1.23 Cricca in sezione . . . . .	31
Figura 1.24 Funzionamento del MT . . . . .	33
Figura 1.25 Schematizzazione di un'onda sonora . . . . .	37
Figura 1.26 Parametri caratteristici di un segnale AE. . . . .	39
Figura 1.27 Segnale AE tipico ed evidenziazione parametri . . . . .	40
Figura 1.28 Le frequenze di un segnale AE . . . . .	41
Figura 1.29 Onde di Lamb . . . . .	42
Figura 1.30 Onde di Rayleigh . . . . .	43
Figura 1.31 Leggi di Snell . . . . .	44
Figura 1.32 Rifrazione – riflessione di un raggio incidente . . . . .	44
Figura 1.33 Rifrazione in diversi materiali . . . . .	45
Figura 1.34 Scomposizione di un raggio sonoro incidente . . . . .	46
Figura 1.35 Le rilevazioni AE durante la propagazione di cricca. . . . .	48
Figura 1.36 Effetto Kaiser . . . . .	50
Figura 1.37 Andamento del numero di AE in funzione della sollecitazione	52

Figura 1.38 Test di Hsu – Nielsen sull’assile . . . . .	53
Figura 2.1 Assile in analisi . . . . .	57
Figura 2.2 Sezione dell’assile criccato . . . . .	58
Figura 2.3 Creazione del ciclo di carico a blocchi . . . . .	59
Figura 2.4 Spettro di carico . . . . .	59
Figura 2.5 Il banco assili del Politecnico di Milano – Dip. di Meccanica	60
Figura 2.6 Schermata del software LUCCHINI CRS per le prove assili	61
Figura 2.7 Il Sensore nel tassello Plexiglass . . . . .	63
Figura 2.8 Centralina e sensore durante il controllo. . . . .	63
Figura 2.9 Andamento delle misurazioni UT . . . . .	65
Figura 2.10 Centralina e sensore Phased Array durante un controllo	66
Figura 2.11 Principio per il calcolo della grandezza di cricca. . . . .	67
Figura 2.12 Esempio di report . . . . .	67
Figura 2.13 Andamento delle misurazioni Phased Array . . . . .	69
Figura 2.14 Interazione microscopio – assile. . . . .	69
Figura 2.15 Lucidatura della superficie . . . . .	70
Figura 2.16 Fotografie cricca A_dex. Dal XIIV al LXIV spettro . . . . .	70
Figura 2.17 Repliche cricca A_dex. Dal XIIV al LXIV spettro . . . . .	71
Figura 2.18 Misurazioni delle propagazioni di cricche in A e B . . . . .	72
Figura 3.1 Componentistica AE a terra . . . . .	75
Figura 3.2 A – assile montato sul banco senza componentistica AE B – componentistica AE montata sull’assile . . . . .	75
Figura 3.3 Disegno assieme strumentazione a CAD . . . . .	76
Figura 3.4 Confronto CAD – reale . . . . .	76
Figura 3.5 Schermata per la visualizzazione dell’acquisizione . . . . .	77
Figura 3.6 A sinistra una sonda con emissione normale A destra una sonda ad emissione inclinata . . . . .	78
Figura 3.7 Contatto strisciante . . . . .	79
Figura 3.8 Confronto rilevazioni AE tra il I e il LXIV spettro . . . . .	80
Figura 3.9 Aumento del numero di eventi AE all’aumentare del raggio	81
Figura 3.10 A – III e IV. B – VI e VII. C – XI e XII. D – XIV e XV . . . . .	82
Figura 3.11 XXVI, XXVII e XXVIII spettro . . . . .	83
Figura 3.12 Andamento del numero di eventi evidenziando lo spettro di partenza di una serie . . . . .	83
Figura 3.13 A - XLII e XLIII spettro. B – LVI, LVII, LVIII e ILX . . . . .	84
Figura 3.14 Andamento del numero di eventi AE . . . . .	85
Figura 3.15 Andamento della cumulata eventi AE . . . . .	86
Figura 3.16 Confronto Phased Array e cumulata eventi AE . . . . .	86

Figura 3.17 Andamento dell'ampiezza media . . . . .	87
Figura 3.18 Andamento dell'energia media . . . . .	87
Figura 4.1 Sezione per la rivoluzione . . . . .	89
Figura 4.2 Mesh della sezione e dettaglio mesh strutturata	90
Figura 4.3 Modello CAD per la simulazione . . . . .	91
Figura 4.4 Andamento degli sforzi di Von Mises nell'assile . . . . .	92
Figura 4.5 a – S11; b – S33 . . . . .	92
Figura 4.6 Componente S22 . . . . .	93
Figura 4.7 Andamento degli sforzi in direzione assiale . . . . .	93
Figura 4.8 Asse y di riferimento . . . . .	94
Figura 4.9 Modellazione dell'accoppiamento forzato in Abaqus . . . . .	95
Figura 4.10 Andamento degli sforzi di Von Mises nell'assile per l'interferenza . . . . .	96
Figura 4.11 A – sforzi radiali. B – assiali. C – circonferenziali . . . . .	97
Figura 4.12 Andamento degli sforzi assiali per il press – fit . . . . .	98
Figura 4.13 Il diffrattometro montato sull'assile . . . . .	99
Figura 4.14 Insieme delle onde elettromagnetiche . . . . .	100
Figura 4.15 Legge di Bragg . . . . .	101
Figura 4.16 Configurazione misure . . . . .	102
Figura 4.17 Il diffrattometro e i sistemi ausiliari . . . . .	103
Figura 4.18 L'elettropulitura nel punto A . . . . .	104
Figura 4.19 Schermata del software Xtronic durante una misurazione	105
Figura 4.20 Risultati del diffrattometro in un punto. . . . .	106
Figura 4.21 Posizione delle misurazioni . . . . .	107
Figura 4.22 Misurazioni in profondità . . . . .	107
Figura 4.23 Misure diffrattometriche nel punto A . . . . .	109
Figura 4.24 Deterioramento della qualità delle misurazioni . . . . .	110
Figura 4.25 Misurazioni diffrattometriche nel punto M2 . . . . .	111
Figura 4.26 Andamento sforzi residui assiali nei pressi delle cricche	112
Figura 4.27 Andamento sforzi residui assiali nei pressi delle cricche (assile R2) . . . . .	113
Figura 5.1 Andamenti $dK_{th} / R$ per i diversi set di dati . . . . .	116
Figura 5.2 Confronto soglie . . . . .	117
Figura 5.3 Curve di propagazione per i diversi set di dati . . . . .	118
Figura 5.4 Modellazione geometria in Afgrow . . . . .	118
Figura 5.5 Spettro in Afgrow . . . . .	119
Figura 5.6 Confronto simulazioni Afgrow e misurazioni Phased Array	120

Figura 5.7 Forme di propagazione senza (A) e con sforzi residui (B) 121

## Elenco delle tabelle

Tabella 2.1 Spettro di carico . . . . .	60
Tabella 2.2 Misurazioni UT . . . . .	64
Tabella 2.3 Misurazioni Phased array . . . . .	68
Tabella 3.1 Caratteristiche meccaniche del contatto strisciante . . . . .	79
Tabella 4.1 Valori degli sforzi in 3 punti di interesse. . . . .	94
Tabella 4.2 Valori degli sforzi in 5 punti di interesse. . . . .	98
Tabella 4.3 Risultati mediati . . . . .	111
Tabella 5.1 Parametri delle curve interpolanti . . . . .	117
Tabella 5.2 Caratteristiche meccaniche A4T . . . . .	119





# Sommario

In questo elaborato si è studiata la propagazione di una cricca in un assile ferroviario sfruttando i più comuni controlli non distruttivi e ipotizzando l'utilizzo dell'emissione acustica come forma di monitoraggio strutturale del componente.

Utilizzando un assile (in acciaio A4T di media resistenza) rullato a freddo ci si è dunque interfacciati con un componente dalle caratteristiche meccaniche più complesse, che, per quanto riguarda la propagazione di un difetto, assume comportamenti peculiari rispetto ad un assile comune non rullato.

Vengono prodotti modelli ad elementi finiti e vengono effettuate misurazioni degli stress residui per descrivere lo stato di sforzo nella sezione del difetto creato artificialmente e, per poter confrontare e studiare i risultati ottenuti dai test, si è infine prodotto un modello di previsione in grado di stimare la velocità di propagazione della cricca.

*Parole chiave: assile ferroviario, controlli non distruttivi, cricca, tensioni residue, modello di propagazione, emissione acustica.*



# Abstract

In this thesis has been studied the propagation of a crack in a railway axles, taking advantage of the most non destructive tests and assuming the use of acoustic emission as a form of monitoring component's integrity.

The railway axle studied, built with steel A4T, has been rolled: this fact means that the mechanical characteristics are more complex than ones of a railway axle not rolled, above all for the propagation of a crack.

Finite element models and measurements of residual stresses are done to describe the stress state in the section where the defect has been created artificially and, with the purpose to analyzing the results obtained from the tests, it is finally produced a prediction model capable of estimating crack's speed of propagation.

*Keyword: railway axles, non destructive tests, crack, residual stresses, propagation model, acoustic emission.*



# 1 - Stato dell'arte

## 1.1 Introduzione

Tutti noi, chi più chi meno, usufruiamo o abbiamo usufruito di un servizio ferroviario, per spostarci. Diritto di ogni passeggero è sicuramente quello di viaggiare in totale sicurezza. E questo diritto deve essere sempre tutelato. Al di fuori di ogni dubbio è nell'interesse di tutta, si spera, la società che non si verifichino disastri ferroviari. Del resto grandi sono i valori in gioco: vite umane e enormi riscontri economici (la produzione del treno, il costo del servizio, la costruzione e il mantenimento di strutture dedicate, il tempo di milioni di lavoratori che ogni giorno scelgono di spostarsi su ferrovia, ecc...). E' evidente quindi come il livello di attenzione nei confronti della sicurezza dei treni non debba mai diminuire.

Dopo anni di sviluppo della tecnologia, di esperienza e di incremento della coscienza e della responsabilità umana, si è arrivati alla situazione odierna dove le società, che hanno in gestione mezzi di locomozione su ferrovia, devono sottostare a normative europee e leggi che regolarizzano standard di sicurezza pretesi da RFI – rete ferroviaria italiana[1].

Si immagini ora di non essere più semplici passeggeri, ma di essere degli amministratori delegati di importanti imprese ferroviarie. Sia per etica del lavoro che per le sopracitate normative europee è necessario effettuare controlli a carattere periodico sulle sale ferroviarie (figura 1.1) che immettiamo in circolazione. L'operazione risulta costosa in quanto è necessario un fermo macchina. Oltre alla mancata "produzione" che ciò comporta ci sono costi sulle attrezzature, le infrastrutture e la manodopera per effettuare i controlli da effettuare. Queste ispezioni di natura periodica inoltre non assicurano un monitoraggio costante, indubbiamente più sicuro. Le principali imprese ferroviarie generalmente subappaltano il lavoro di manutenzione ad imprese correlate che si assumono il ruolo di garanti della sicurezza del mezzo e delle sue componenti meccaniche. Sarebbe dunque molto positivo, per economicità e sicurezza, diminuire fortemente questi costi e garantire comunque, o in forma maggiore, la sicurezza del passeggero.

Nello specifico si studia il comportamento dell'assile, parte critica dell'intero sistema meccanico che identifica una carrozza ferroviaria; si tratta di quel componente sul quale vengono montate le ruote e sul quale si scarica il peso del treno (ovviamente si fa riferimento alla quota parte di struttura sorretta da un singolo assile); è un componente rotante.

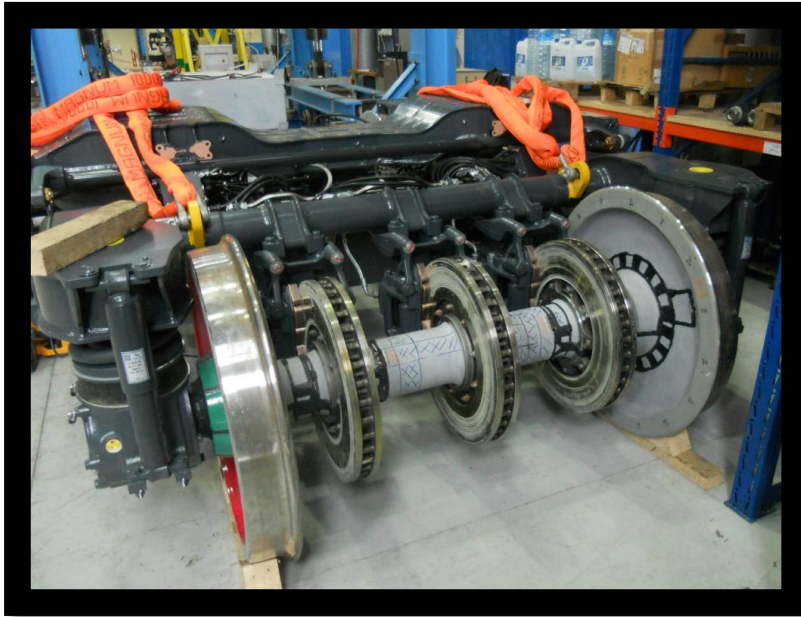


Figura 1.1 Assile ferroviario montato su una sala ferroviaria.

### 1.1.1 Casi storici e giudiziari

Il primo report per il mantenimento della sicurezza di un assile ferroviario fu steso dalla "British Railways Inspectorate" datato 1840[2] e evidenziava il diritto dei passeggeri di aspettarsi il massimo grado di sicurezza, dato l'alto rischio di incidenti mortali. All'epoca si percepiva l'importanza di questa nuova tecnologia ed era dunque necessario tutelarla; rovinosi disastri non avrebbero di sicuro giovato. Il documento in questione è datato l'anno dopo l'apparizione della motrice *Rocket*. Questo testo ammetteva in realtà che già in quegli anni il massimo grado di sicurezza era lontano dall'essere ottenuto. Molti incidenti dell'epoca potevano essere evitati con un'adatta manutenzione.

Il trasporto su ferrovia trovò la sua alba con la rivoluzione industriale inglese. Macchine a vapore furono concepite, o meglio teorizzate, sul finire del XVIII secolo. Produrre una così alta quantità di energia in quegli anni non era particolarmente semplice.

Nel 1801 Richard Trevithick riuscì a costruire una locomotiva automotrice (locomotiva *Coalbrookdale*) adatta per il traino di carrelli, che venne impiegata con successo nelle miniere di Merthy-Tydwil sempre in Galles.

Il 27 settembre 1825 la *Locomotion* n.1 trainò il primo treno commerciale della storia, sulla tratta tra Stockton-on-Tees e Darlington. Sia la locomotiva che la tratta erano state progettate dalla stessa persona: George Stephenson. Il treno era composto dalla motrice, dalla prima carrozza passeggeri vera e propria (chiamata *Experiment*, sulla quale viaggiavano le persone più facoltose dell'epoca, diciamo l'odierna prima classe) e da carri da miniera su cui venivano caricati i passeggeri comuni; la velocità media era di circa 9 km all'ora (figura 1.2).

Solo 4 anni dopo la *Rocket* del '29 raggiunse i 48 km/h.

I successi delle motrici di George Stephenson e del figlio Robert, cioè la *Blucher* del 1814, *Locomotion* del 1825, e in seguito la *Rocket*, 1829 portarono la neonata tecnica ferroviaria a fiorire e diffondersi.

Il 3 ottobre del 1839 la ferrovia faceva la sua apparizione in Italia, con l'inaugurazione della tratta Napoli-Portici.

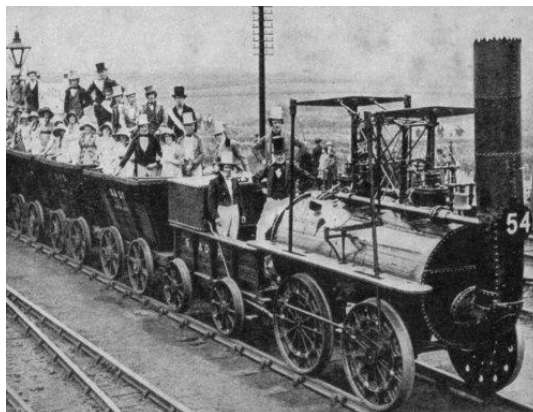


Figura 1.2: Fotografia d'epoca della Locomotion.

Uno dei primi incidenti riguardanti gli assili ferroviari avvenne l'8 maggio del 1842 a Versailles. Incidente dal gravissimo bilancio di 55 morti. All'epoca il capotreno chiudeva a chiave i passeggeri nelle carrozze e questo fu uno dei motivi per un così alto numero di vittime.

Arrivando agli ultimi due decenni, in Italia, l'agenzia nazionale per la sicurezza ferroviaria ha rilevato quattro gravi incidenti causati dalla rottura di un assile (tutti accaduti in meno di dieci anni): il 18 gennaio 2004 a Fidenza, il 26 marzo 2004 ad Albate Camerlata in Lombardia, il 26 marzo 2008 a Castello e il 29 giugno 2009 a Viareggio.

L'incidente di Albate Camerlata: il 26 marzo 2004, due vagoni e la motrice di un treno passeggeri deragliarono ad Albate Camerlata lungo la linea Milano - Como - Chiasso.

*“Le indagini tecniche dimostrarono che l'incidente era stato causato dalla rottura di un assile: l'asse era minato da una profonda cricca propagata a fatica sfuggita ai controlli. La carrozza, però, non era di una società privata ma di Trenitalia. Gli esperti fecero presente, in quella circostanza, che sarebbe stato necessario sostituire gli assi dello stesso tipo, o almeno sottoporli a controlli più frequenti e rigorosi con le sonde a ultrasuoni”.*

Così racconta l'Espresso nel 2009[3].

L'incidente di Castello: il 26 marzo 2008 la seconda carrozza del treno Intercity 704, proveniente da Napoli e diretto a Bologna, uscì dai binari alla stazione fiorentina di Castello.

*“Il treno non aveva ancora preso velocità e i passeggeri quasi non si accorsero del deragliamento. Non ci furono feriti. I tecnici delle Ferrovie e gli investigatori della Polizia Ferroviaria costatarono che la ruota di uno dei carrelli era uscita dal binario e supposero sin dall'inizio che l'incidente fosse stato causato da un cedimento strutturale dell'asse del carrello....*

*... E anche in quel caso fu rilevata la presenza di una vasta frattura (o cricca), che aveva minato gran parte del diametro dell'asse. Fino al colpo di grazia, presumibilmente causato dal passaggio dell'Intercity sugli scambi. Quella cricca*



*poteva e doveva essere rilevata durante gli interventi di manutenzione e i controlli con gli apparecchi ad ultrasuoni.”*

Testo estratto da un articolo dell'epoca del quotidiano Repubblica[4].

*L'incidente di Viareggio*: il 29 giugno 2009 deragliò il treno merci 50325 Trecate - Gricignano. Questa fu la causa di un incidente ancora più devastante di un, già terribile, deragliamento ferroviario: in uno dei vagoni deragliati veniva trasportato gas GPL. La cisterna si forò durante l'incidente innescando un incendio di vastissime proporzioni che interessò tutta la stazione di Viareggio e l'area circostante (figura 1.3).



Figura 1.3: Immagine aerea del disastro di Viareggio.

*“In attesa delle conclusioni ufficiali delle commissioni di inchiesta la probabile causa dell'incidente è attribuibile al cedimento strutturale di un asse del carrello del primo carro-cisterna deragliato. Le fotografie sembrano confermare il fatto dato che la sezione fratturata mostra la classica propagazione di una cricca per fatica (figura 1.4), con linee di spiaggia per il 90% della sua superficie.”*

*“32 furono le vittime dell'incidente e lo stesso numero di persone, assieme a 9 società, vengono indagate penalmente”* racconta ulteriormente l'articolo del periodico *Il Tirreno*[5].

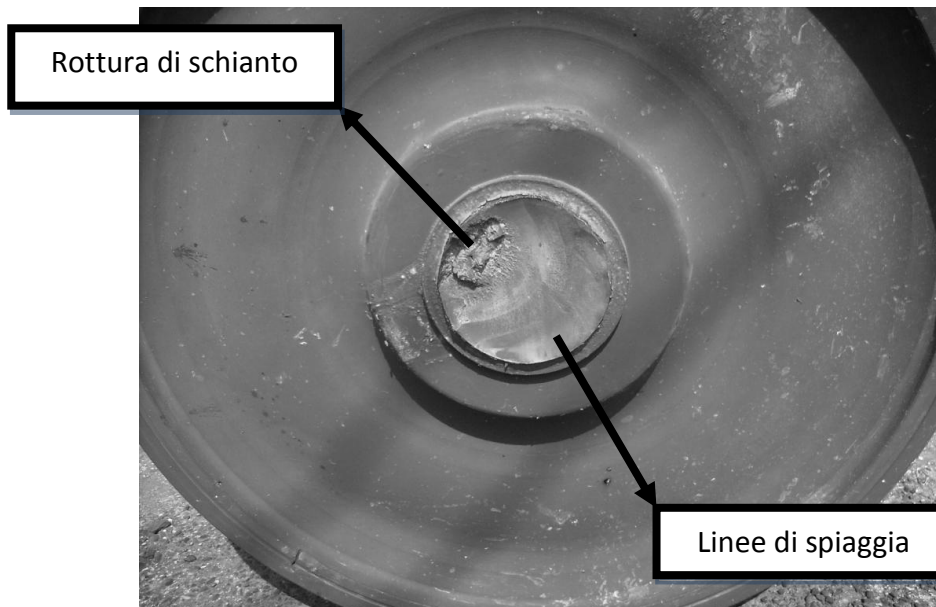


Figura 1.4: Particolare della sezione dell'assile fratturatosi di Viareggio.

Non si vuole scendere nel dettaglio giudiziario, ma si fa presente che i processi penali sono ancora in svolgimento. Per quanto riguarda l'incidente di Castello ad esempio, i due tecnici che eseguirono l'ultimo controllo nell'officina bolognese di Trenitalia, sono stati indagati per violazione dell'articolo 450 del codice penale "Delitti colposi di pericolo". L'accusa infatti sostiene che l'incidente sarebbe potuto avvenire a velocità molto più alta, in realtà ridotta poiché il treno era in procinto di uscire dalla stazione, causando morti e feriti.

Il codice penale italiano regola e condanna chiunque causi disastri ferroviari; non eseguire correttamente un controllo e/o la manutenzione sui componenti meccanici è previsto come reato penale e viene inserito nel codice tra le omissioni colpose.

Gli articoli del codice penale in questione citano:

*"Articolo 430. Disastro ferroviario. Chiunque cagiona un disastro ferroviario è punito con la reclusione da cinque a quindici anni."*

*"Articolo 450. Delitti colposi di pericolo. Chiunque, con la propria azione od omissione colposa, fa sorgere o persistere il pericolo di un disastro ferroviario, di un'inondazione, di un naufragio, o della sommersione di una nave o di un altro"*

*edificio natante, è punito con la reclusione fino a due anni. La reclusione non è inferiore a un anno se il colpevole ha trasgredito ad una particolare ingiunzione dell'Autorità diretta alla rimozione del pericolo.”[6]*

Dopo l'incidente di Viareggio l'UNIFE – The European Rail Industry Association unita con l'European Railway Agency creò una task force per discutere eventuali proposte e per migliorare le misure cautelative per la riduzione di incidenti ferroviari, con particolare attenzione alla questione assili: analisi del problema, analisi delle cause, proposte di soluzioni al problema, proposte di nuove misure di controllo (particolarmente improntate sul controllo ultrasonoro), valutare lo stato di sicurezza e le normative nei vari paesi europei.

Il lavoro è ancora in corso (vari progetti sono stati costituiti. Si menziona a titolo di esempio il progetto Euraxles[7], Widem[8], Sustrail[9], Maraxil[10]).

## **1.2 Cricche negli assili ferroviari e normative**

Gli assili ferroviari, così come le ruote, vengono progettati in base ai soli limiti di fatica e su normative ormai da considerarsi datate[11]. Questo soprattutto per le normative europee EN e le americane AAR (Association of American Railroads)[12].

La prima normativa europea ne è un esempio lampante. Costituita nella seconda metà del XX secolo quando la UIC (Union International des Chemins de fer) compose negli anni 70 un team di ingegneri che redasse una prima guida sulla costruzione degli assili. Questo report fu alla base di normative nazionali e internazionali.

Alla fine del secolo molti furono gli sforzi impiegati dalla CEN (European Standard Committee) che coinvolse in unico progetto molti studiosi al fine di creare le prime normative EN sulla progettazione e la costruzione di ruote e assili ferroviari.

Nel 2001 vengono quindi pubblicate le norme EN sulla produzione di assili ferroviari sia per quelli della motrice (EN 13104) che quelli del rimorchio (EN 13103). Queste normative sono state redatte considerando carichi convenzionali basati sull'esperienza. Vengono anche considerate però le prove di fatica

sugli acciai A1N (è un acciaio al Carbonio C40 normalizzato) e l'A4T (25CrMo4), tipici per la costruzione di assili. Infatti gli assili del Nord America, ad esempio, sono realizzati in acciaio al carbonio normalizzato (tenore di C attorno allo 0,5%) mentre quelli europei hanno un tenore di carbonio approssimativamente attorno allo 0,37%. Per i treni ad alta velocità vengono utilizzati invece acciai ad alta resistenza, coinvolgendo anche assili cavi (per il pendolino viene utilizzato il 30NiCrMoV12 oppure per il tedesco ICE InterCity Express – treno ad alta velocità viene usato il 34CrNiMo6).

Nel 2003 sono state costituite nuove normative per gli assili (EN13261), le ruote (EN 13262) e le sale montate (EN 13260). Le normative definiscono anche la dimensione ammissibile dei difetti superficiali, oltre che per quelli volumetrici.

Tra Europa e Nord America le condizioni di servizio differiscono: varia sia la velocità di crociera che lo spettro di carico. Per le ferrovie americane infatti il traffico di merci su rotaia è ben più caratteristico che il trasporto di persone, tipico europeo. Nel primo caso quindi i carichi sono ben più alti (fino a 35 tonnellate) e minori velocità. Discorso totalmente inverso per la tipologia chiave del treno europeo, con carichi più snelli ma velocità ben più elevate (fino ai 350km/h delle linee t.a.v.). In Europa le distanze percorse sono generalmente maggiori (fino a 500000km).

Allo stato attuale ci sono delle linee guida VPI[13] per la manutenzione dei treni merci europei. Le VPI (VPILF) possono essere identificate come un manuale di manutenzione, una raccomandazione, redatto dalle VPI Germania, VPI Austria e VAP Svizzera. Viene riconosciuto anche dalle autorità tedesche, austriache e svizzere.

Le VPILF comprendono però solo i tipi dei carri merci più importanti e più comuni ed i loro componenti. Il proprietario del carro deve indicare sempre all'officina le sue disposizioni di manutenzione sotto la propria responsabilità. Questa prerogativa riguarda anche carri merci che nel passato sono stati riparati secondo altre normative.

*“Nonostante tutto le dovute precauzioni non si può dare una garanzia per l'esattezza, l'attualità e la completezza della VPILF. Una responsabilità per danni, dovuta all'utilizzo della VPILF, viene quindi esclusa.”*[14]

Le VPIFL sono solo delle direttive, delle regole generali, che hanno grande valenza tecnica. Le VPIFL suggeriscono controlli ogni 600000km, oppure ogni 12 anni, con particelle magnetiche e ultrasuoni (a fronte di una vita di progetto di almeno 30000000km). Gli operatori privati, che garantiscono la sicurezza del treno con opportuna certificazione, tendono, in sicurezza, a rendere più frequenti questi controlli, eseguendo anche controlli ultrasonori standard.

Una direttiva fissa e generalizzata a garanzia di sicurezza vera e propria ancora non è presente; troppe sono le variabili in gioco, sia per quanto riguarda i percorsi di carico, le tipologie di treno, le diverse geometrie le differenti caratteristiche meccaniche e ambientali.

Per la progettazione di assili ferroviari sia in Europa come in Nord America vengono valutate le forze sull'assile e la conseguente risultante del momento flettente in ogni sezione. Si calcola così lo sforzo risultante in ognuna di queste, considerando la vicinanza ad eventuali intagli o calettamenti forzati, e su questa base viene quindi dimensionata la sezione considerando i limiti di fatica del materiale scelto. Una volta ottenuto un dimensionamento primordiale si raffina il progetto iterativamente fino alla miglior ottimizzazione possibile del componente.

### **1.3 Scopo del lavoro**

*Con questo elaborato si vuole analizzare a fondo il problema delle propagazioni di cricche negli assili ferroviari e viene ipotizzata una nuova applicazione del controllo non distruttivo (CND) dell'emissione acustica AE. Lo scopo è quello di rilevare in tempo reale la nascita e la crescita di difettosità pericolose all'interno di un assile ferroviario, si vuole effettuare cioè un monitoraggio strutturale in tempo reale.*

*L'assile studiato è stato lavorato con un processo di rullatura atto ad aumentare la sua resistenza alla fatica; questa tipologia di assile è stata costruita a scopi accademici e ben poco esiste in letteratura per quanto riguarda la propagazione di cricche in assili rullati. Si andranno a valutare gli effetti di questa lavorazione sulla resistenza a fatica del componente.*

L'assile in questione viene testato per monitorare il comportamento della propagazione di un difetto per fatica. Questo monitoraggio dell'integrità strutturale avviene con diversi controlli non distruttivi presentati singolarmente, coi risultati, in seguito.

Si utilizza quindi la metodologia di progettazione della Damage Tolerance (DT)[15], tipica per tutti quei componenti che compromessa la funzionalità possono portare ad incidenti catastrofici con perdita di vite umane, per generare modelli di propagazione di difetti nell'assile.

## **1.4 La progettazione di assili secondo la damage tolerance**

Si è spiegato nella sezione 1.2 che allo stato attuale gli assili vengono progettati in base ai soli limiti di fatica. Questo metodo è molto restrittivo in quanto non considera la presenza di eventuali difetti nel materiale, corrosioni, danneggiamenti per impatto ecc... L'approccio è quindi di tipo Safe Life e non di Damage Tolerance. Quest'ultima, introdotta precedentemente, prende in considerazione e persino tollera la presenza di difetti e di cricche di fatica al di fuori delle cause che li hanno generati; posti nei luoghi più probabili vengono studiate, valutandone i tempi di propagazione. Effettuati i calcoli di propagazione si garantisce l'integrità strutturale con un programma di ispezione opportuno. L'intervallo di ispezione identifica quel numero di cicli, lasso di tempo o numero di chilometri percorsi che possono essere percorsi in sicurezza tra due ispezioni differenti con i controlli non distruttivi. Riassumendo quindi l'integrità strutturale di un componente in servizio si basa su due livelli di sicurezza:

- I CND che permettono di rilevare difetti e che quindi possono identificare componenti da riparare o da scartare eventualmente (sia in fase di produzione sia in fase di servizio);
- La progettazione Damage Tolerance (solo in fase di servizio) che gestisce i danneggiamenti evoluti da difetti non rilevati dai CND in fase di produzione oppure di difetti naturalmente creatisi in servizio.

La definizione di controllo non distruttivo stessa in letteratura richiama il concetto di "probabilità di individuare un difetto" di una data dimensione sotto specifiche condizioni e procedure[16]. E' noto che i controlli non distruttivi devono scontrarsi con la natura statistica del problema (fattore umano, condizioni

ambientali - accessibilità, temperatura, condizioni di lavoro – corretta applicazione del CND scelto, variabilità del materiale, performance della strumentazione, geometria del componente ...) . Viene definita una curva POD – Probability of Detection, il quale, confrontata con la dimensione del difetto, ha un andamento tipico mostrato in figura 1.5.

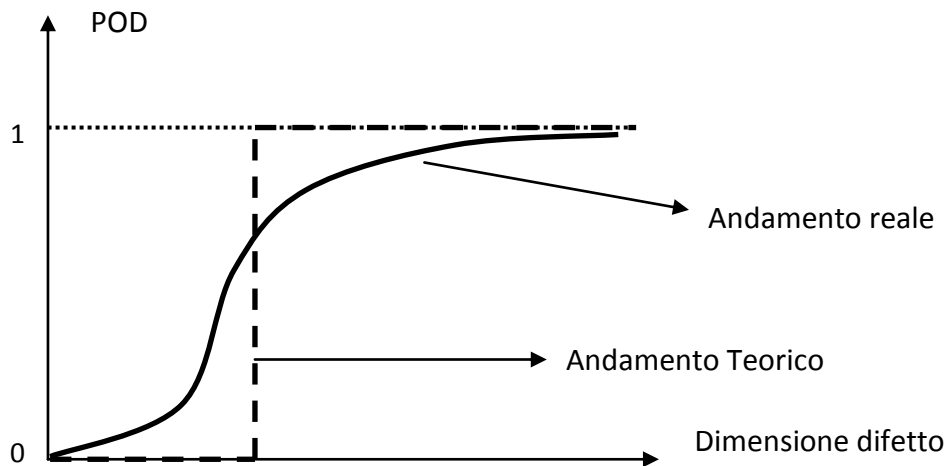


Figura 1.5 Andamento POD – dimensione del difetto.

Il parametro *dimensione del difetto* fa riferimento alla lunghezza, allo spessore e al diametro. Ci sono molti altri parametri in gioco tra cui il materiale, la geometria complessiva del difetto, tipologia (corrosione, fatica ...), influenze ambientali e umane. Queste variabili devono essere considerate dall'operatore che ricerca i difetti e giustificano la diversità tra i due andamenti (teorico vs reale): come si può notare il 100% non viene sempre raggiunto sulle curve ottenute da test. Queste curve vengono tracciate considerando il più grande difetto non rilevato e non il più piccolo difetto rilevato.

Il problema statistico è in forte opposizione con la richiesta di individuare un intervallo di ispezione preciso. Ammesso quindi che non vi è, e mai vi sarà, causa il gran numero di variabili in gioco, la certezza di una previsione rigorosa della propagazione di una cricca è bene produrre almeno un modello ed è grazie a questa logica che viene creata la DT.

Per lo studio di questa nuova filosofia di progettazione della Damage Tolerance bisogna approfondire quella branca della meccanica che studia l'evoluzione dei

difetti all'interno di componenti sollecitati con carico variabile nel tempo: la meccanica della frattura.

### **1.4.1 Meccanica della frattura**

La meccanica della frattura è quel campo della meccanica che studia la formazione e la propagazione dei difetti nei materiali quando l'oggetto è soggetto a forze esterne. Questa disciplina, sviluppata nel periodo compreso tra il 1920 e il 1950 per spiegare le rotture fragili di certi componenti, venne estesa anche al concetto di rottura instabile, sia fragile che duttile.

Dopo il 1950 nacque il concetto di propagazione per fatica fenomeno iniziato ad essere studiato per la prevenzione di disastri aerei. Data l'incredibile importanza di questa disciplina si è cercato di comprendere a fondo la meccanica della frattura e di sviluppare teorie sempre più precise ed affidabili: capire come si possa rompere un oggetto del resto è il primo passo da compiere affinché si impedisca una rottura.

#### **1.4.1.1 Rottura a fatica**

Sebbene il fenomeno della rottura a fatica sia noto dal XIX secolo ancora oggi è la causa principale del cedimento di componenti meccanici. August Wöhler fece i primi studi proprio su assili ferroviari progettati per resistere a carichi ben maggiori di quelli che li portavano a rottura. Si intuì la differenza tra l'applicazione di un carico statico e di uno variabile nel tempo. Lo studio di Wöhler portò alla costituzione di interessanti diagrammi che relazionano l'ampiezza massima del ciclo di sollecitazione con il numero di cicli che il pezzo sopporta prima di giungere a cedimento; le curve trovate avevano una forma del tipo evidenziato nelle figure 1.6 e 1.7.

Risulta facilmente intuibile che maggiore è l'intensità del carico alternato imposto minore è la durata del componente. Del resto il termine fatica deriva dal verbo latino *fatigare* cioè affaticare.



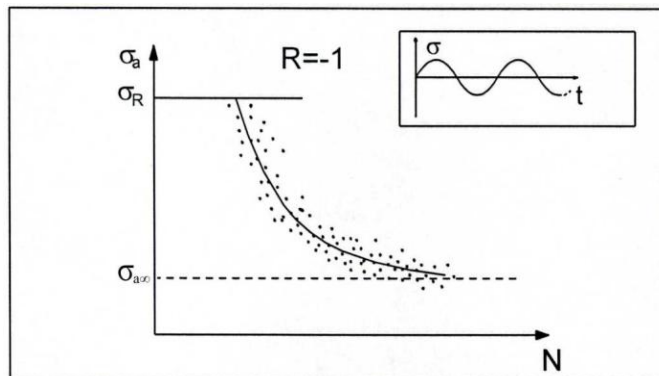


Figura 1.6 Esempio risultato di Wöhler.

Che in scala doppio logaritmica appaiono:

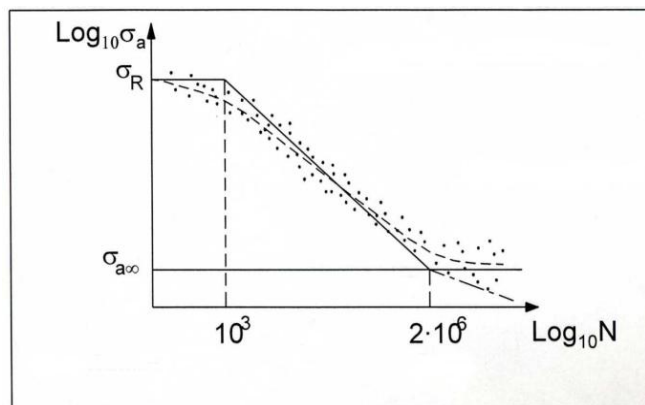


Figura 1.7 Risultato di Wöhler in un grafico doppio logaritmico.

Si è specificato che le prove venissero eseguite con rapporto di carico  $R = -1$  (puramente alternato); con questa dicitura si intende un carico che non ha componente costante, o meglio, media: il carico è periodico e perfettamente alternato. L'influenza del carico medio sulla vita di un pezzo complica eccessivamente la trattazione e per questo verrà effettuata in seguito. La pericolosità della frattura per fatica consiste nel fatto che il componente raggiunge il cedimento anche per bassi carichi, molto minori dello sforzo massimo di snervamento, e inoltre la rottura avviene internamente al materiale senza sostanziali deformazioni macroscopiche del pezzo. Si deve quindi iniziare a prendere confidenza con il fatto che un difetto, durante la sua evoluzione, segua diverse fasi: la nucleazione, ovvero il processo di formazione della cricca, la propagazione stabile per cui le dimensioni variano secondo una certa legge lineare, e la fase

di propagazione instabile che porta all'inevitabile schianto. La prima fase è quella che spesso richiede la maggior quantità di tempo.

La nucleazione della cricca avviene per micro - plasticizzazioni sulla superficie del pezzo: i cristalli superficiali si allineano nella direzione di massimo sforzo tangenziale (massimo piano di scorrimento -  $45^\circ$  i materiali duttili) e vengono create le *slip bands* (figura 1.8) cioè una quantità di cristalli superficiali del materiale allineati lungo una direzione. In figura 1.9 viene evidenziato come esse si sviluppano.

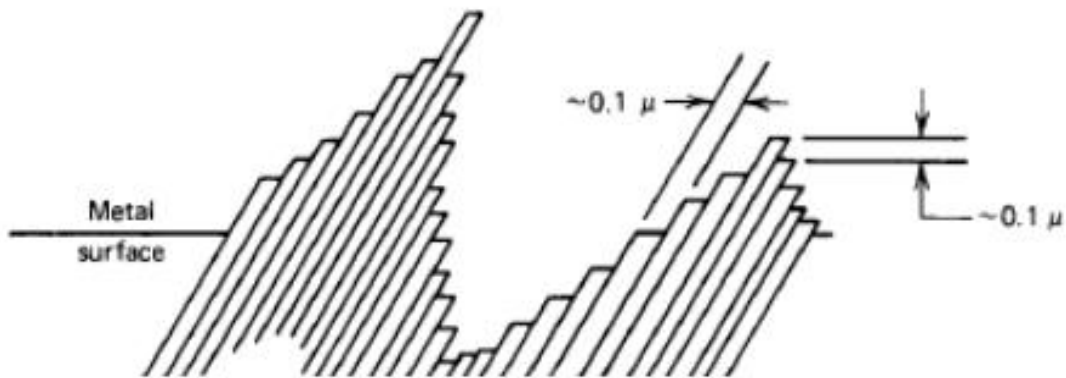


Figura 1.8 Slip bands.

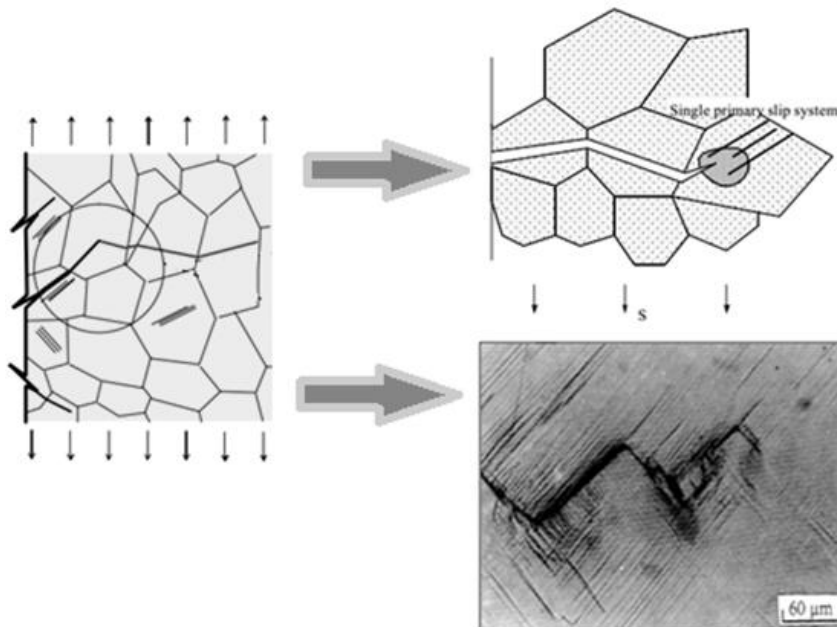


Figura 1.9 Formazione cricche.

Questo processo può essere favorito in presenza di difetti superficiali derivati dalle lavorazioni con macchine utensili. Dopo la creazione di queste bande di scorrimento le stesse iniziano a scorrere le une sulle altre: ecco la formazione di microcricche. Una volta che una micro-cricca incontra un nuovo grano adiacente i bordi inducono la cricca ad avanzare perpendicolarmente alla direzione del carico. Questo perché i grani interni al materiali sono orientati in ben altro modo rispetto a quelli in superficie. La propagazione della cricca può avvenire sia ai bordi dei cristalli (intergranulare) che all'interno dei cristalli (transgranulare). Inoltre più i grani sono piccoli maggiore saranno alti i valori degli sforzi a bordo grano e di conseguenza più facilmente potrà generarsi una cricca.

Non è presente un netto distacco tra la fase di nucleazione e quella di propagazione: le prime velocità di propagazione sono molto basse. Si può però asserire che la prima fase di propagazione incomincia quando la geometria assunta dal difetto è tale che la concentrazione degli sforzi che essa determina raggiunge un valore critico per quel materiale.

I diagrammi di Wöhler ci permettono anche di riconoscere due macrotipologie, due zone in cui la progettazione di componenti meccanici deve tenere conto di differenti aspetti: la zona a LCF – low cycle fatigue, caratterizzata da un basso numeri di cicli e in cui si entra nel campo plastico, e la zona HCF – high cycle fatigue, ovvero la progettazione per alto numero di cicli e, in definitiva, la volontà di progettare per vita infinita (caso in cui rientrano gli assili ferroviari).

#### **1.4.1.2 S.I.F. – Stress Intensity Factor**

Si parte dalla meccanica lineare elastica (LEFM) che descrive il comportamento dei materiali elastico lineari (la EPFM descrive quella dei materiali a comportamento elasto – plastico e la meccanica della frattura visco - elastica descrive i materiali a comportamento visco - elastico appunto) .

Per procedere nella trattazione sono necessarie alcune ipotesi:

- Linearità tra sforzi e deformazioni;
- Piccoli spostamenti;
- Presenza di un difetto sufficientemente grande;

- Bassa plasticità della zona nell'intorno dell'apice della cricca in relazione alla lunghezza della stessa.

La velocità di propagazione della cricca (aumento infinitesimo all'aumento di  $n$  numero di cicli campione) sarà intuitivamente dipendente anche dal materiale e dalla geometria della cricca stessa.

Diverse possono essere le tipologie di carichi che sollecitano la nucleazione di una cricca e questi vengono presentati in figura 1.10.

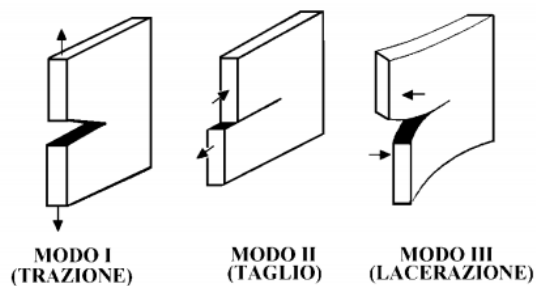


Figura 1.10 Modi di propagazione cricca.

Il modo I risulta essere il più studiato in quanto il più pericoloso (la pura trazione, la trazione alternata di una flessione degli organi rotanti ecc...). Ovviamente il tutto è relativo alla funzione che il componente deve svolgere. Nel caso della propagazione di cricche per assili si può osservare che le cricche vengono generate con il modo II e poi tendono rapidamente ad assumere un comportamento simile (la cricca si indirizza durante la propagazione) al modo I (figura 1.16).

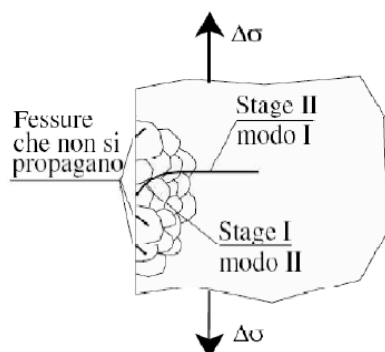


Figura 1.11 Propagazione per una generica cricca d'assile.

Come si è spiegato precedentemente la creazione delle slip bands può essere spiegato proprio con il II modo di apertura di una cricca dal momento che le slip bands scrono le une sulle altre. Raggiunta la stabilità si passa dal comportamento II a quello del modo I. Inutile dilungarsi su tutti e tre i modi di propagazione in questa trattazione che ha come scopo l'analisi di una cricca di un asile ferroviario.

La meccanica della frattura suggerisce quindi che non è più sufficiente calcolare un valore di sforzo idealmente massimo all'interno del componente per entrare in un qualsivoglia criterio di resistenza statico o dinamico che sia. Prendiamo una lastra piana (figura 1.12).

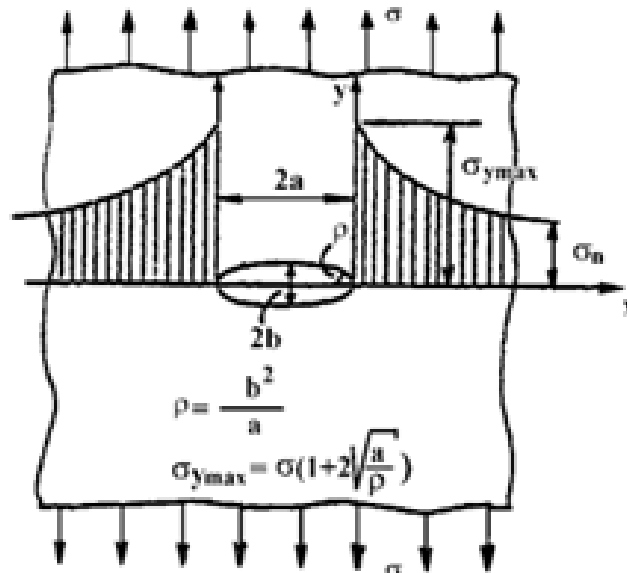


Figura 1.12 Stato di sforzo lastra piana.

- $K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} = 1 + 2 \cdot \frac{a}{b}$  [1.1]

- $\rho = \frac{b^2}{a}$  [1.2]

Come già indicato dalle equazioni 1.1 e 1.2 risulta evidente che se  $b$  tende a zero (raggio dell'apice della cricca allo stesso modo sarebbe infinitesimo) il  $K_t$  risulta essere infinito. Infinito come allora l'ampiezza degli sforzi. La cosa non ha

evidentemente senso; infatti si è verificato sperimentalmente che a certi valori di carico e per certe dimensioni del difetto la propagazione è stabile oppure non vi è affatto né propagazione né rottura.

E' necessario prendere in considerazione un nuovo termine che descriva, alla luce della presenza di un difetto, lo stato di sollecitazione del componente: questo è il SIF – Stress intensity factor. E' questo fattore di intensificazione degli sforzi che si assocerà alla distribuzione di sforzo nell'intorno dell'apice della cricca.

Il fattore di intensificazione degli sforzi ha equazione:

$$K_I = \beta \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad [1.3]$$

K ha come unità di misura [  $Mpa \cdot \sqrt{m}$  ].  $\beta$  fattore di forma adimensionale che tiene conto della geometria del corpo criccato. In letteratura ci sono, a seconda della forma diverse, differenti modi per calcolarlo.  $\sigma$  è lo sforzo nominale. Similmente si possono trovare le espressioni per il II e del III modo.

#### 1.4.1.3 Propagazione Stabile. Legge di Paris

L'analisi dell'evoluzione della cricca, la sua propagazione, rinchiude in se stessa il problema del continuo aggiornamento nel tempo.

Il SIF, che viene utilizzato nei criteri di resistenza, incrementa all'aumentare della dimensione del difetto. E' necessario quindi confrontarsi con una nuova quantità: la velocità di propagazione della cricca.

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad [1.4]$$

La dimensione della cricca aumenta in relazione ad una VARIAZIONE del fattore di intensificazione, definita:

- $\Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta\sigma \cdot \beta \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad [1.5]$

- $K_{min} = \sigma_{min} \cdot \beta \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad [1.6]$

- $K_{max} = \sigma_{max} \cdot \beta \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad [1.7]$

Può essere utile a questo punto della trattazione spendere due parole sul rapporto di carico o rapporto nominale di ciclo  $R$ . Il parametro  $R$  risulta utile per comprendere in maniera immediata la tipologia di carico e la relazione tra la quota parte di carico alternato con quella di carico medio che caratterizzano un qualsivoglia spettro di carico (in figura 1.13 uno spettro di carico sinusoidale).

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = K_{min}/K_{max} = 1 - \Delta K/K_{max} \quad [1.8]$$

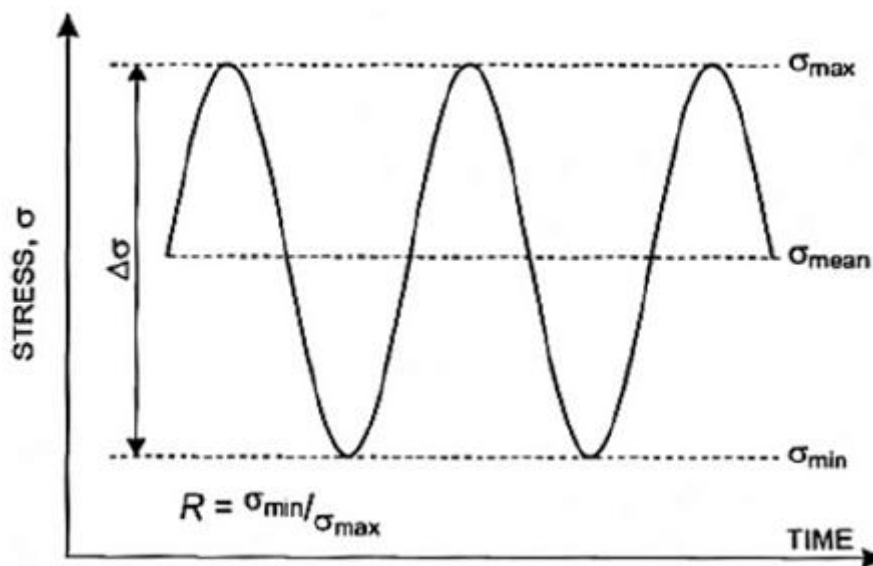


Figura 1.13 Spettro di carico sinusoidale.

$R$  potrà quindi variare tra meno infinito e più infinito.

Paris stabilì il legame tra la velocità di propagazione della cricca al variare del SIF:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad [1.9]$$

Questa equazione interpolante (ne esistono di altre tipologie in letteratura) è descrittiva di un comportamento tipico della cricca nelle varie prove di fatica: identifica il tratto di propagazione stabile caratterizzato da un andamento lineare nel diagramma doppio logaritmico.  $C$  ed  $m$  sono costanti empiriche.

In forma doppio logaritmica troviamo:

$$\log(da/dN) = \log(C) + m \cdot \log(\Delta K) \quad [1.10]$$

Dove  $m$  è il coefficiente della retta. Si prenda visione di questa retta nella seguente figura 1.14 dove viene riportato il tipico andamento delle curve di Paris.

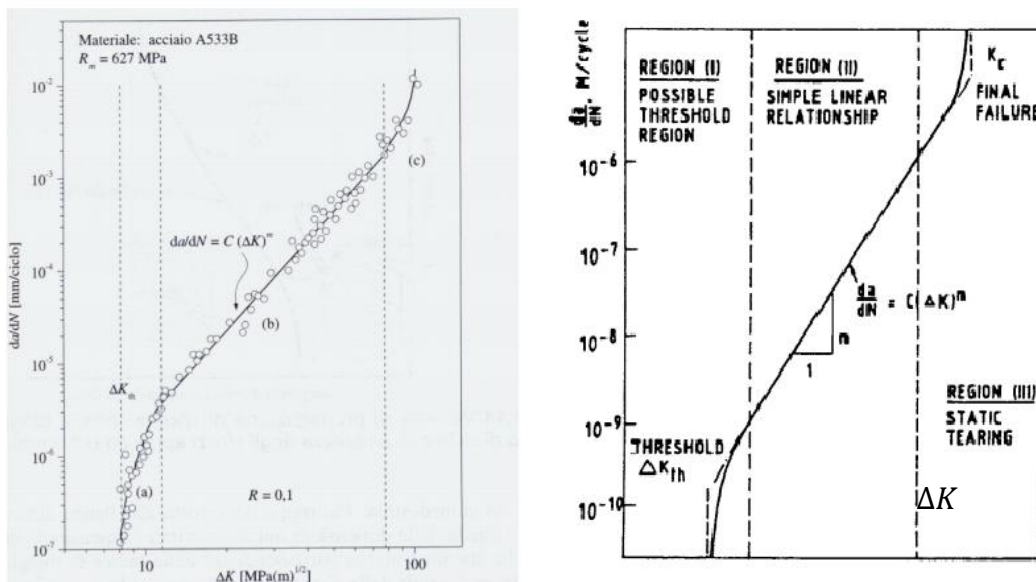


Figura 1.14 Tipiche curve di Paris.

In questa curva possono essere riconosciute anche altre due zone che caratterizzano come già descritto il comportamento evolutivo di un difetto. La prima regione presenta un asintoto verticale chiamato valore di soglia o *threshold* ( $\Delta K_{th}$ ). Sotto questo valore si può ipotizzare che non sono apprezzabili le velocità di propagazione della cricca (siamo su ordini inferiori a  $10^{-10}$  m/ciclo).

Si analizzi ora l'ultima regione, quella cioè che descrive la propagazione instabile: al crescere di  $\Delta K$  anche la velocità di propagazione aumenta rapidamente fino allo schianto. Considerando ancora una volta l'ipotesi di limitata plasticizzazione nell'intorno della cricca (ipotesi della LFM) è possibile asserire che la curva tende asintoticamente al valore di tenacità a frattura  $K_c$  (Final failure).

D'altronde è questo l'obiettivo: in presenza di una cricca quanto può ancora resistere il pezzo senza rompersi? Con l'equazione di Paris basta eseguire un'integrazione per rispondere alla domanda.



In letteratura esistono, come già detto, altre forme di equazione interpolante oltre a quella di Paris per la descrizione della crescita a fatica di una cricca. Essenzialmente sono metodi sempre più ricercati per interpolare nel miglior modo possibile i dati risultati dai test – prove a fatica. Come per Paris l'integrazione permette di ottenere la vita residua del pezzo.

La prima ad essere citata è l'equazione di *Paris modificata*. Questa considera anche il comportamento delle microcricche, cioè vengono inserite nel modello anche le più basse velocità di propagazione della cricca. Infatti non è detto che sotto il valore di soglia non si generino cricche; queste possono nucleare ma successivamente non propagare: la velocità di propagazione tenda ad abbassarsi fino o ad estinguersi oppure a raggiungere il valore di soglia. Il valore di soglia diventa un parametro attivo dell'equazione.

L'equazione di Paris modificata assume la forma:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad [1.11]$$

Forman cerca di coinvolgere in un unico modello anche il rapporto di ciclo R, poiché, a diverse R, le curve di Paris tendono a traslare e ad assumere forme più schiacciate, mantenendo però lo stesso coefficiente angolare per quanto riguarda la zona di propagazione stabile.

Al variare del diverso rapporto di carico, a pari  $\Delta K$ , varia la velocità di propagazione: per un certo R la cricca può propagare stabilmente per un altro può essere già in propagazione instabile. Stesso discorso nell'intorno dei  $\Delta K$  di soglia dove però a seconda dei rapporti di carico R, sempre a pari  $\Delta K$ , una cricca può propagare o no.

Questa traslazione delle linee di propagazione secondo il rapporto di carico viene riconosciuto con il fenomeno di *fanning* (figura 1.15).

L'equazione interpolante di Forman è in forma:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot \Delta K^m}{(1-R) \cdot K_c - \Delta K} \quad [1.12]$$

Con  $K_c$  il valore asintotico identificante la rottura instabile. Si include così anche il terzo tratto della curva.

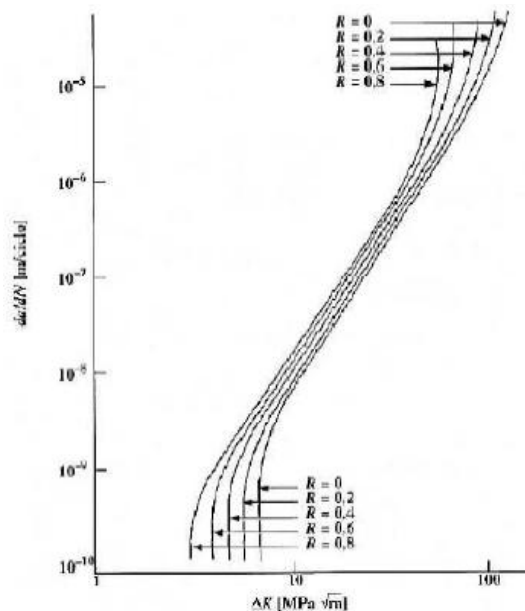


Figura 1.15 Fenomeno del fanning.

#### 1.4.1.4 Equazioni di Nasgro

Ulteriore formulazione per descrivere la velocità di propagazione della cricca è quella definita l'equazione di NASGRO (capitolo 5 - inserita all'interno del software AFGROW sviluppato dall'aeronautica militare USA. Il modello utilizzato dal programma prevede in realtà l'utilizzo di una versione che prevede un unico  $C_{th}$  per il calcolo del  $\Delta K_{th}$ ; parametri spiegati di seguito)[17]. Ricavata dagli studiosi Forman e Newman è un'equazione a carattere empirico che modella il comportamento della cricca in tutta le fasi della sua propagazione.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \left[ \left( \frac{1-f}{1-R} \right) \cdot \Delta K \right]^m \cdot \left( 1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p \left/ \left( 1 - \frac{\Delta K_{max}}{K_{crit}} \right)^q \right. \quad [1.13]$$

Dove q e p sono caratteristiche del materiale ottenute sperimentalmente. C, m e  $\Delta K_{th}$  come per l'equazione di Paris sono: intercetta con l'asse delle ordinate, pendenza e valore di soglia per la propagazione, sempre costanti empiriche.

"f" è la *funzione chiusura* di Newman che tiene conto del fenomeno della closure. Questa viene definita:

$$f = \frac{K_{Op}}{K_{max}} = \begin{cases} \bullet & = \max(R, A_0 + A_1R + A_2R^2 + A_3R^3) & \text{Per } R \geq 0; \\ \bullet & = A_0 + A_1R & \text{Per } -2 \leq R < 0; \\ \bullet & = A_0 - 2A_1 & \text{Per } R < -2; \end{cases}$$

I coefficienti  $A_0, A_1, A_2, A_3$  sono:

$$\begin{aligned} A_0 &= (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) \cdot \left[ \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{S_{max}}{\sigma_0}\right) \right]^{1/\alpha} \\ A_1 &= (0.415 - 0.071\alpha) \cdot \frac{S_{max}}{\sigma_0} \\ A_2 &= 1 - A_0 - A_1 - A_3 \\ A_3 &= 2A_0 + A_1 - 1 \end{aligned}$$

$\alpha$  è il fattore creato da Newman nel caso di un'analisi per stati di sforzi tridimensionali (si assume  $\alpha = 2,5$ ).  $S_{max}$  è il massimo sforzo applicato e invece  $\sigma_0$  è il *flow-stress*, ovvero un valore intermedio tra il carico di rottura e quello di snervamento (empiricamente il rapporto tra i due è uguale a 0,3). Resta da determinare il  $\Delta K_{th}$  che nell'equazione di NASGRO viene calcolato tramite le relazioni [1.14]:

$$\begin{aligned} \text{Per } R < 0: \quad \Delta K_{th} &= \Delta K_1 \cdot \left( \frac{1-R}{1-f[R]} \right)^{(1+RC_{th}^-)} / (1 - A_0)^{(C_{th}^+ - RC_{th}^-)} \\ & \hspace{20em} [1.14] \\ \text{Per } R \geq 0: \quad \Delta K_{th} &= \Delta K_1 \cdot \left( \frac{1-R}{1-f[R]} \right)^{(1+RC_{th}^+)} / (1 - A_0)^{(1 - RC_{th}^+)} \end{aligned}$$

Dove  $\Delta K_0$  è il valore di soglia per  $R = 0$ , a dimensione della cricca e  $a_0$  è il parametro di El-Haddad, pari a 0,0381mm. Ulteriore valore da definire è  $C_{th}$ , il coefficiente di soglia; quest'ultimo parametro assume due valori differenti a seconda della positività – negatività del rapporto di ciclo  $R$ .

Anche il  $K_{Icr}$  ha la sua propria definizione; questo considera lo stato di sforzo grazie al rapporto  $t / t_0$  :

$$\frac{K_C}{K_{IC}} = 1 + B_K e^{-\left(A_K \frac{t}{t_0}\right)^2} \quad [1.15]$$

$$\text{con } t_0 = 2.5 \cdot \frac{K_{IC}}{\sigma_{sn}}$$

$K_{Icr}$  è la tenacità a frattura in deformazione piana invece  $A_K$  e  $B_K$  sono costanti caratteristiche del materiale. Per  $t = t_0$  si raggiunge la condizione di sforzo piano.

#### 1.4.1.5 La zona plastica

È intuibile che all'apice della cricca e nel suo intorno, zona soggetta ad una chiara intensificazione degli sforzi come già spiegato, si può avere un passaggio dal campo elastico, ipotesi su cui abbiamo basato tutta la trattazione, a pura plasticità. Questo fatto può essere dedotto dalla logica della meccanica classica, secondo il quale lo sforzo all'apice della cricca tende ad infinito. Non viene raggiunta un'intensità di sforzo infinita ovviamente quindi l'unica conseguenza logica è che venga creata una zona plasticizzata. La dimensione di questa zona dipenderà dalla tipologia del materiale e dalla forma geometrica della cricca stessa, oltre, chiaramente, la tipologia dello stato di sforzo. Si può ipotizzare che all'apice della cricca sia presente uno stato di sforzo che tende ad essere piano (superficie scarica), invece, verso l'interno si riconosce uno stato di deformazione piana. La geometria di questa zona può essere descritta da un raggio lungo la direzione  $x$  (figura 1.16)  $r_p$ . Questo raggio viene definito come la distanza tra l'apice della cricca e il punto in cui viene raggiunto un valore di sforzo teorico equivalente pari allo sforzo limite di snervamento (figura 1.16 - segmento CB). Lo sforzo equivalente viene calcolato o con il criterio di Guest Tresca o con Von Mises.

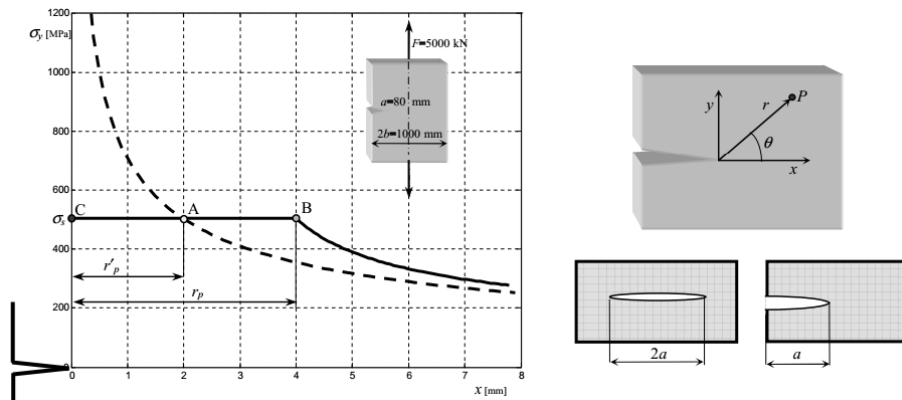


Figura 1.16 Zona plastica.

Le equazioni che descrivono il campo degli sforzi intorno all'apice della cricca sono:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= 0 \\ \sigma_x &= \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot x}} \\ \sigma_z &= 0 \quad \text{oppure} \quad \sigma_z = \nu \cdot (\sigma_x - \sigma_y) = 2\nu \left( \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot x}} \right) \end{aligned}$$

$\sigma_z$  assume due espressioni diverse a seconda di stato di sforzo piano oppure stato di deformazione piana ( $\epsilon_z = 0$ ). Esplicitando  $x$  e sostituendolo con l'incognita  $r_p$  e sostituendo ancora lo sforzo equivalente con quello di snervamento nei due casi, troviamo:

- $r'_p = \left[ \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_s}} \right]^2$  [1.16]

- $r_p = \left[ \frac{K_I \cdot (1-2\nu)}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_s}} \right]^2$  [1.17]

La meccanica della frattura lineare elastica è valida se la zona plastica è piccola rispetto alla dimensione della cricca e allo spessore del provino.

Solo in questo caso è possibile studiare il fenomeno con il solo parametro  $K$ . Questo perché vogliamo cercare un  $K$  critico da confrontare con il  $K$  limite per quel materiale trovato dalle prove. Lo stato di deformazione piana è il caso più pericoloso: la zona limitrofa a quella plastica è soggetta ad una tensione in di-

reazione  $z$  negativa che stressa ulteriormente a trazione il materiale e quindi facilita la propagazione della cricca. L'aspetto della zona plastica secondo le due diverse situazioni per il modo I viene presentato in figura 1.17.

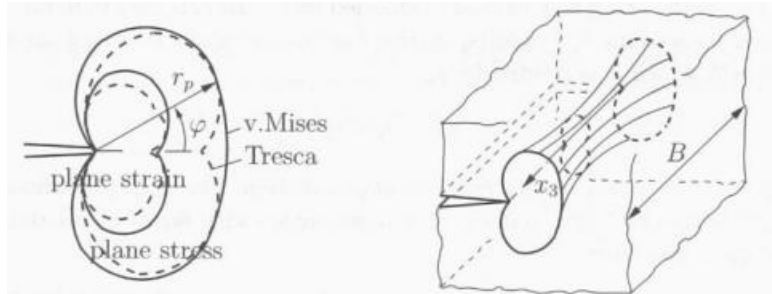


Figura 1.17 Variazione della sezione plastica.

#### 1.4.1.6 Crack Closure

Ci si vuole soffermare su un fenomeno che caratterizza il comportamento di una cricca durante un percorso di carico variabile. Si è analizzato a fondo il comportamento di una cricca soggetta a trazione, potendo quindi estrapolare molte informazioni utili allo studio del comportamento di una cricca su un assile, ma un assile ferroviario tipicamente lavora a flessione: la cricca viene ciclicamente soggetta a trazione ma anche a compressione. Come si comporta la cricca quando viene spinta a chiudersi?

Wolf Elber[18] nel 1970 studiò il fenomeno della crack closure, secondo il quale una cricca, sottoposta a una sollecitazione di TRAZIONE ma in fase di SCARICO, è già chiusa prima ancora che il carico raggiunga il valore zero (figura 1.18). Questo fenomeno è spiegabile unicamente con i modelli di plasticità e, più precisamente, con i modelli di plasticità cinematici[19].

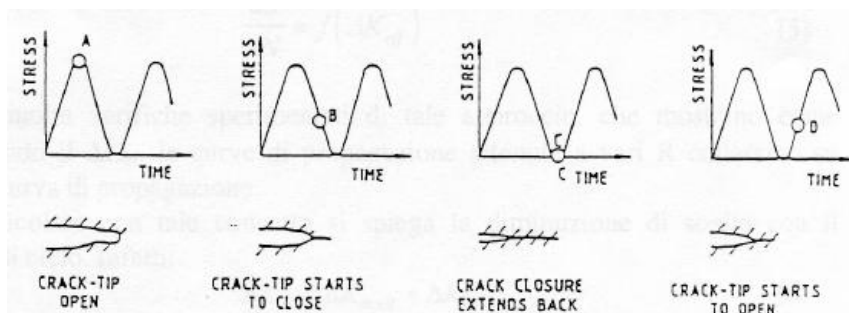


Figura 1.18 Fenomeno della chiusura della cricca.

Nasce il concetto di *crack opening stress*, cioè quel valore di sforzo che permette l'apertura completa della cricca. Perché una cricca possa propagare questo valore  $\sigma_{op}$  da cui  $K_{op}$  dev'essere superato (figura 1.19). Ecco che allora perde di senso la variazione  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  a favore di una variazione più coerente per il calcolo della vita del componente:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad [1.18]$$

Lo studio della propagazione diventerà quindi:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K_{eff}) \quad [1.19]$$

Il rapporto di carico R influisce sul fenomeno. All'aumentare di questo l'effetto della crack closure diminuisce.

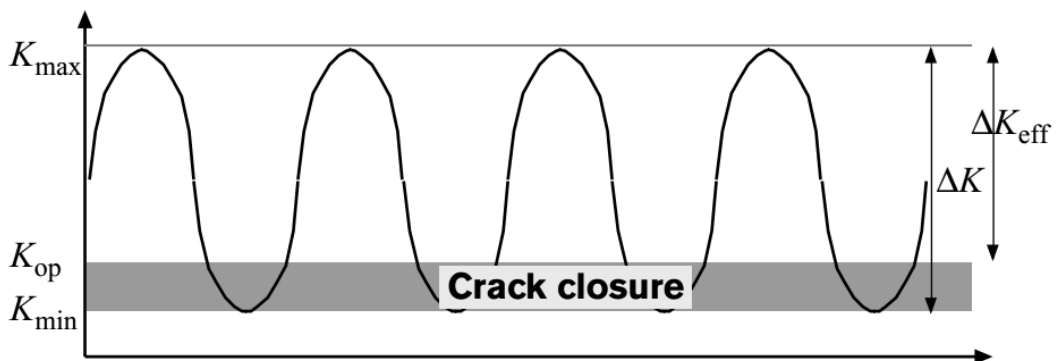


Figura 1.19 Zona crack closure nel grafico del SIF.

#### 1.4.1.7 Effetti di interazione del carico

Alla fine degli anni '60 si osservò che dopo l'applicazione di un singolo sovraccarico la cricca diminuiva la propria velocità di crescita. Il fenomeno fu chiamato "ritardo", conseguenza diretta del fenomeno di closure. Allo stesso modo si vide che un sottocarico tende ad accelerare la propagazione della cricca.

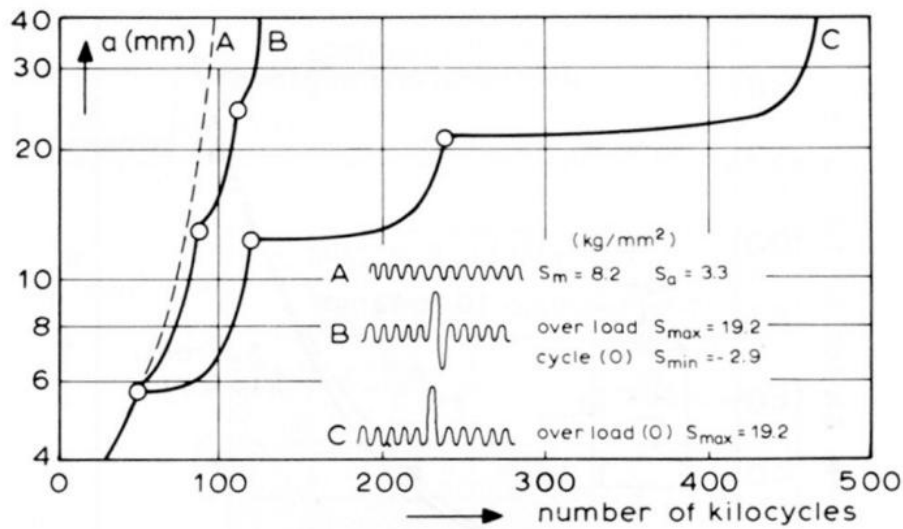


Figura 1.20 Effetti dei sovraccarichi sulla durata di un pezzo.

Come è reso evidente in figura 1.20 il sovraccarico singolo caratteristico del percorso di carico C permette di rallentare considerevolmente la velocità di propagazione della cricca: ogni volta che vi è il sovraccarico la pendenza della curva cambia in maniera drastica. Stesso effetto ma di minore intensità se accompagnato al sovraccarico è presente un semiciclo simmetrico a compressione. E' addirittura possibile con un sovraccarico arrestare la crescita della cricca a fatica. Il "ritardo" della propagazione della cricca sarà tanto grande quanto maggiore è la dimensione della zona plastica formatasi per il sovraccarico (figura 1.21 - tipico per provini di piccolo spessore oppure per materiali a basso carico di snervamento).

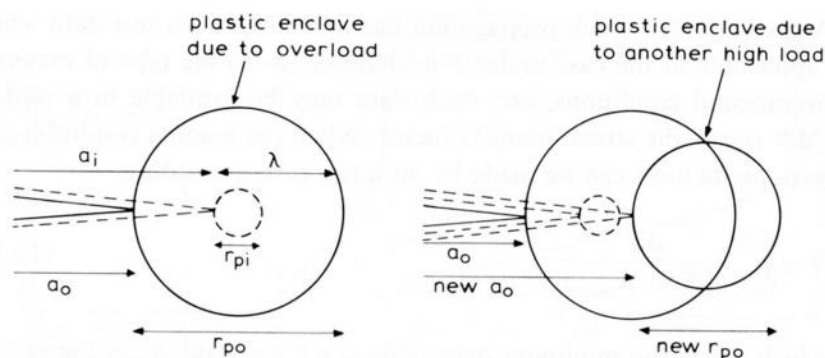


Figura 1.21 Variazioni della zona plastica per effetto dei sovraccarichi.



Il fenomeno del ritardo (rallentamento della propagazione) si manifesterà finché la cricca non supera la zona di sovraccarico. Quando ciò avviene l'andamento della curva ritorna parallelo a quello di una sollecitazione puramente alternata (figura 1.20).

Bisogna però considerare che sovraccarichi troppo frequenti eliminano l'effetto vantaggioso del ritardo della propagazione (*delayed propagation*). Un singolo sovraccarico di compressione invece (*underload*) causa un'accelerazione della velocità di propagazione.

#### 1.4.1.8 La ricerca delle caratteristiche del materiale: CPLR vs $\Delta K$ decreasing

Nelle sezioni precedenti si è spiegato come viene modellata la propagazione di un difetto. Per studiare un componente di un dato materiale è dunque necessario ricercare le costanti descriventi il comportamento di quel materiale ( $C$ ,  $m$ ,  $p$ ,  $q$ ,  $C_{th}$  negativo e positivo e  $\Delta K_1$ ). Vengono effettuate prove a fatica con diversi provini (figura 1.22) per misurare i vari  $dA/dN$  legati ai  $\Delta K$ .

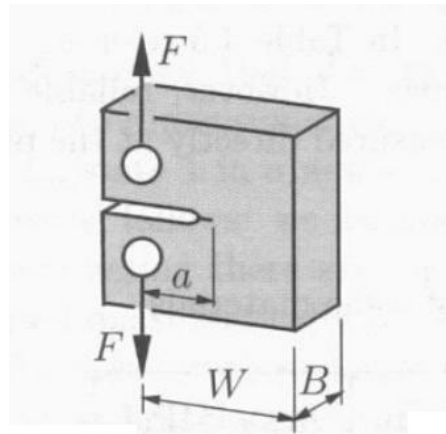


Figura 1.22 Provino per la determinazione del  $K_I$ .

Vengono usate due distinte forme di test: uno chiamato  $\Delta K$  decreasing e un altro, studiato molto più recentemente, chiamato CPLR "compression pre-cracking load reduction"[20]. Sono forme che restituiscono valori di soglia differenti e caratteristica dei test CPLR è restituire valori di soglia più bassi. Gene-

ralmente invece i punti nella parte di propagazione stabile del Paris sono confrontabili.

I provini (figura 1.22) con cui vengono effettuati i test sono elettroerosi tutti allo stesso modo. Ma una cricca artificiale è ben diversa da una naturale, molto più sottile e acuta. Nei test CPLR si va a generare una pre - cricatura sfruttando un ciclo di carico compressivo con rapporto di ciclo di  $R = 10$ . Creata la cricca naturale si procede a variare  $R$  secondo i propri propositi fino ad un  $dA / dN$  pari a un nanometro per ciclo ( $10^{-9}$  m / ciclo). La cricca è piccola e diminuendo il carico è possibile quindi rallentarla per trovare altri punti sperimentali  $dA/dN - \Delta K$  fino alle soglie. Inoltre con questa tipologia di pre - cricatura si è studiato che non vengono generate scie plastiche che compromettono il comportamento della propagazione.

Con i test del  $\Delta K$  di decreasing tutto ciò non avviene. Il rapporto di carico  $R$  è costante e la cricca viene portata fino alla velocità di  $10^{-8}$  m / ciclo. Quando si vuole diminuire la velocità per andare a ricercare le soglie i risultati sono condizionati dalle dimensioni della cricca stessa e dalle microplasticizzazioni.

I due valori di soglia trovati per un generico  $R$  e un generico materiale costituiscono un dominio in cui sicuramente è presente il valore di soglia reale del materiale.

#### 1.4.1.9 Effetti degli sforzi residui

L'assile sui cui si è voluto esaminare la propagazione di una cricca ha subito, nel suo ciclo di produzione, una rullatura a freddo. E' quindi doveroso capire come degli sforzi residui possano condizionare l'evoluzione di una cricca.

Si utilizza la sovrapposizione degli effetti per relazionare quindi lo stato di sforzo delle tensioni residue con le sollecitazioni risultanti dai carichi. Si deve calcolare un nuovo fattore di intensificazione degli sforzi:

$$\Delta K_{tot} = K_{app} + K_{res} \quad [1.20]$$

Con  $K_{app}$  il SIF calcolato considerando il carico applicato e  $K_{res}$  il SIF calcolato tenendo conto della presenza di tensioni residue. Possiamo quindi creare un mo-

dello dello stato di sforzo nei due punti di maggior interesse A e B, cioè un punto della cricca in superficie e il punto della cricca più interno nella sezione:

- $K_A = (F_A \cdot \sigma_{nom} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}) \cdot \cos \vartheta$
- $K_B = (F_B \cdot \sigma_{nom} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}) \cdot \cos \vartheta + (F'_B \cdot \sigma_{nom} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}) \cdot \sin \vartheta$

$\vartheta$  è l'angolo di rotazione dell'assile e  $K_A$  e  $K_B$  sono i fattori di intensificazione degli sforzi nei punti indicati in figura 1.23.

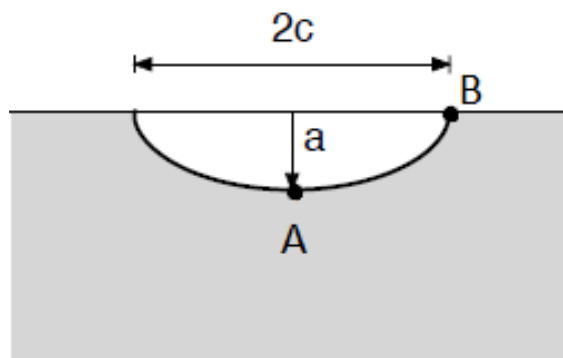


Figura 1.23 Cricca in sezione.

$F_A$  e  $F_B$  sono funzioni della geometria in riferimento ad uno sforzo nominale applicato ( $\sigma_{nom}$ ) e  $F'_B$  si riferisce ad un assile ruotato di  $\pi/2$ .

Ulteriori termini possono essere considerati, quelli cioè che tengono conto delle tensioni per il calettamento sia delle ruote che del cambio. Effetti che non possono essere trascurati.

E' importante analizzare correttamente lo stato di sforzo sull'assile, considerando tutti gli effetti presenti (capitolo 4), proprio per ottenere una previsione di durata il più accurata possibile (capitolo 5).

Sforzi residui a compressione hanno un effetto benefico sulla vita residua di un assile.

## 1.5 CND e monitoraggio strutturale per assili ferroviari

In accordo con la Damage tolerance vengono di seguito riportati le metodologie di CND utilizzate per rilevare la presenza e studiarne l'evoluzione dei difetti all'interno degli assili.

Gli ultrasuoni standard e le particelle magnetiche sono i controlli suggeriti anche dalle VPI. L'utilizzo dell'emissione acustica viene proposto per la prima volta.

### 1.5.1 Gli ultrasuoni (UT – Ultrasonic Testing)

Il controllo ad ultrasuoni sfrutta la riflessione delle onde sonore nel momento in cui esse incontrano un ostacolo durante la loro propagazione all'interno di un materiale (caratteristiche spiegate nella sezione 1.5.3.3). In questo CND generalmente vengono utilizzate frequenze tra i 3kHz e i 20MHz.

La propagazione acustica composta da parte longitudinale e trasversale propaga nel materiale (acciaio) finché non raggiunge materiali a differente impedenza. Dinanzi al diverso comportamento acustico l'onda sonora propagante viene rifratta e riflessa. Nel controllo per gli assili tra acciaio e aria si ha una fortissima differenza di impedenze: l'impedenza nell'acciaio è più alta di quella in aria. Questo comporta una quasi completa riflessione dell'onda sonora; solo una piccola quota parte di onda viene rifratta e continua in aria con una pressione irrisoria.

Le sonde sono basate sul fenomeno della piezoelettricità; applicando una differenza di potenziale si contraggono o si espandono generando un'onda di pressione, viceversa se colpite da un'onda di pressione determinando una differenza di potenziale. Una centralina acquisisce e mostra a monitor i segnali rilevati dalla sonda.

Con questo CND si cerca quindi di interpretare i segnali che percepisce la sonda, il principio di funzionamento è paragonabile con quello dei sonar, o al sistema di orientamento dei pipistrelli. Segnali inaspettati possono identificare la presenza di un difetto. Una volta individuato un difetto si può capirne la di-

mensione generica analizzando l'energia dell'eco di riflessione, poiché più il difetto è esteso maggiore sarà la superficie riflettente.

### 1.5.2 Le particelle magnetiche (MT – Magnetic Testing)

Con il CND delle particelle magnetiche si crea un campo magnetico nel pezzo che si vuole analizzare (si controlla solo una certa area per volta). Sulla superficie del pezzo vengono spruzzate particelle ferromagnetiche che in prossimità di un difetto vengono attratte. Non è necessario che le particelle entrino nella discontinuità se quest'ultima risulta essere in superficie.

In questo CND diventa fondamentale il parametro  $\mu$  – permeabilità magnetica, che descrive quanto più facilmente il materiale si lasci o meno magnetizzare.

Il campo magnetico creato nel pezzo, facendo passare una corrente elettrica nel pezzo oppure immergendo il componente in un campo magnetico, si trasferisce anche nell'intorno del difetto: ecco quindi che le particelle (composte da magnetite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ne verranno attratte (figura 1.24).

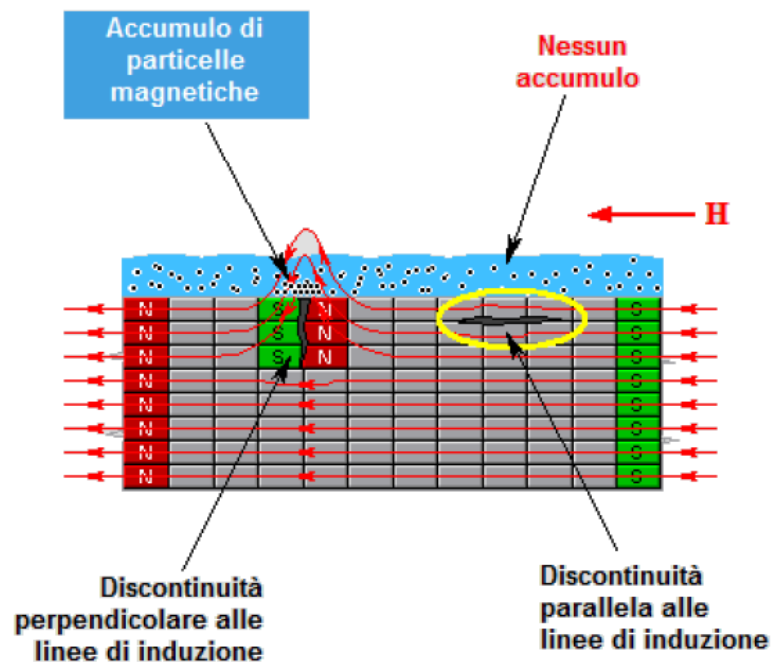


Figura 1.24 Funzionamento del MT.

E' necessario però studiare il possibile orientamento del difetto. Se il difetto infatti avesse lo stesso orientamento del flusso magnetico il difetto non verrebbe rilevato (la rilevazione è possibile fino a 40° – 60° rispetto alle linee di induzione).

Sono due i metodi di applicazione di questo CND:

- Metodo diretto;
- Metodo residuo.

Nel primo caso le particelle magnetiche vengono applicate nello stesso momento in cui viene magnetizzato il pezzo. L'osservazione quindi deve essere simultanea. Per quanto riguarda il metodo residuo il rilevatore viene applicato dopo la magnetizzazione che viene effettuata sfruttando il magnetismo residuo. Il tempo è sì meno sensibile ma permette un maggior tempo per la valutazione.

I rilevatori possono essere sia colorati che fluorescenti e posti sul pezzo a secco oppure in sospensione in un liquido.

### **1.5.3 L'emissione acustica (AE)**

Al sotto capitolo 1.3 è stato presentato l'obiettivo di questo elaborato: utilizzare la tecnologia dell'emissione acustica (Acoustic Emission – AE) per effettuare un monitoraggio in tempo reale dell'integrità strutturale di un assile di una sala ferroviaria. E' quindi necessario comprendere più a fondo la natura di questo controllo non distruttivo.

L'emissione acustica è un CND strettamente connesso con il controllo ad ultrasuoni; se però quest'ultimo viene identificato come un metodo "attivo" (il suono viene generato da una sonda e si indaga la risposta) l'AE è al contrario un metodo passivo: un difetto che si genera o propaga in un pezzo emette una certa quantità di energia sotto forma di vibrazione sonora. Il sensore rileva queste onde. L'operatore dovrà poi interpretare i risultati.

Questa tipologia di esame permette di rilevare cricche, corrosioni, incrinature, deformazioni ecc.. in modo rapido fin dal momento dell'insorgere dell'anomalia. L' esame può essere effettuato mentre la struttura, o il pezzo in analisi, è ope-

rativo. Le proprietà degli strumenti utilizzati permettono le rilevazioni di piccolissime quantità di energia; questo è importante per l'individuazione anche di difetti microscopici. Con opportune tecniche può anche essere individuata il luogo in cui è situata la sorgente dell'emissione acustica nel pezzo.

Uno dei grandi vantaggi risiede nel fatto che il metodo riconosce solo difetti varianti nel tempo. Questo è importante perché in un pezzo sono presenti anche altri difetti che però non propagando possono non influire sull'integrità strutturale. E' intuitivo che la pericolosità è determinata solo da quei difetti che possono crescere e determinare di conseguenza la rottura del componente.

### **1.5.3.1 Il fenomeno sonoro**

Le onde sonore, le stesse che ci permettono di ascoltare una persona, una canzone e i vari suoni che ci circondano, sono il risultato di una combinazione di onde meccaniche ad opera di una sorgente vibrante, detta sorgente sonora.

Qualunque fenomeno che determina uno "spostamento d'aria", avente caratteristiche fisiche opportune (non ogni spostamento d'aria viene poi da noi "sentito" come evento sonoro, questo a causa delle differenti frequenze sonore udibili dal nostro orecchio), genera in realtà un suono, e non obbligatoriamente il mezzo in cui propaga deve essere l'aria. I suoni possono propagare in acqua come in materiali solidi. Del resto, se si pone attenzione, sott'acqua i suoni generati più lontani da noi vengono percepiti più distintamente; un altro esempio che permette di comprendere quanto asserito richiama gli indiani d'America: perché essi ponevano l'orecchio sui binari della ferrovia? Le onde sonore del treno propagano molto più velocemente e con meno attenuazione sul ferro che in aria. Potevano così capire se un treno fosse in arrivo.

La propagazione di queste onde elastiche è il fenomeno ondulatorio vero e proprio e verrà d'ora in poi chiamato onda sonora.

In fisica un'onda è una perturbazione che si propaga nello spazio e che può trasportare energia da un punto ad un altro. L'onda sonora è un particolare tipo di onda per il quale la perturbazione viene identificata da una variazione di pressione indotta dal corpo vibrante nel mezzo circostante. Tale variazione di pres-

sione è in grado di propagarsi nel mezzo come una successione di rarefazioni e condensazioni (cioè di variazioni di densità).

Durante la propagazione ciò che avanza è il fronte d'onda, riconosciuto con queste variazioni di pressione, e non le molecole che costituiscono il mezzo; esse subiscono spostamenti oscillatori dai loro punti di equilibrio. La densità del mezzo varia solo localmente. Le zone di compressione - decompressione invece si spostano nel mezzo con una velocità dipendente dalle caratteristiche del mezzo stesso, in particolare dalla sua comprimibilità. L'oscillazione locale delle molecole avviene nella stessa direzione di propagazione dell'onda: tecnicamente si dice che l'onda sonora è un'onda longitudinale. Se il mezzo fosse un solido la propagazione dell'onda elastica potrebbe avere anche una *componente trasversale* perché nei solidi queste ultime sono favorite dalla presenza di forze intermolecolari differenti rispetto a quelle presenti nei liquidi. I fluidi infatti non permettono il passaggio di sforzi di taglio, cosa che, come è risaputo, è possibile nei solidi. Se ci si concentra sul mezzo è possibile, punto per punto nello spazio, e istante per istante nel tempo, misurare la differenza di pressione dell'aria rispetto alla normale pressione atmosferica. Questa differenza è detta pressione acustica. L'insieme delle pressioni acustiche locali in tutto lo spazio formerà un "campo di pressione". È il caso di sottolineare fin dall'inizio che la pressione acustica rappresenta una piccola "increspatura" rispetto al valore standard di pressione atmosferica: anche nel caso di suoni estremamente intensi, il suo valore è di circa mille volte inferiore a quello della pressione atmosferica.

I parametri che descrivono un'onda sonora sono (gli altri parametri per ora non considerati, come la velocità di propagazione, sono poi deducibili):

- il *periodo*  $T$  della perturbazione, che è il tempo che intercorre tra l'istante in cui, in un punto prefissato, si verifica la massima pressione e l'istante in cui questa situazione si verifica nuovamente nello stesso punto; più semplicemente, nel caso della molecola di riferimento, è il tempo che essa impiega a compiere un'oscillazione completa attorno alla sua posizione di equilibrio;
- la *frequenza*  $f$  dell'onda, cioè il numero di volte in cui avviene l'oscillazione di una molecola, nell'unità di tempo;



- la *lunghezza d'onda*  $\lambda$ : la distanza che intercorre, in un certo istante, tra due zone consecutive di maggior addensamento (zone scure), zone nelle quali la pressione acustica è massima;
- l'*ampiezza* dell'oscillazione, cioè lo spostamento massimo delle molecole rispetto alla loro condizione di riposo; scopriremo che essa è strettamente legata al massimo valore che può raggiungere la pressione acustica.

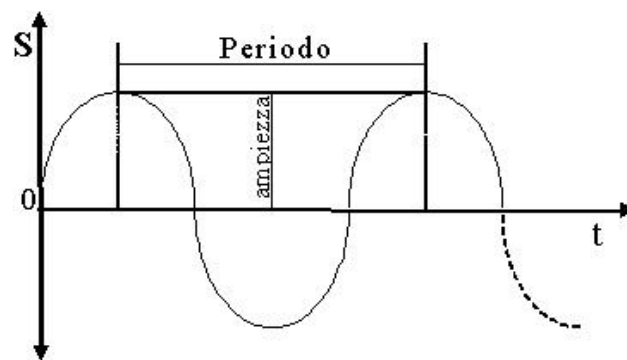


Figura 1.25 Schematizzazione di un'onda sonora.

In questa rappresentazione (figura 1.25) si evidenzia con un grafico cartesiano (il tempo ( $t$ ) sull'asse delle ascisse e gli spostamenti delle particelle ( $s$ ) su quello delle ordinate). Il tracciato esemplifica gli spostamenti delle particelle: all'inizio, la particella si sposta dal suo punto di riposo (asse delle ascisse) fino al culmine del movimento oscillatorio, rappresentato dal ramo crescente di parabola che giunge al punto di massimo parabolico. Poi la particella inizia un nuovo spostamento in direzione opposta, passando per il punto di riposo e continuando per inerzia fino ad un nuovo culmine simmetrico al precedente, questo movimento è rappresentato dal ramo decrescente che, intersecando l'asse delle ascisse, prosegue in fase negativa fino al minimo parabolico. Infine, la particella ritorna indietro e ripete nuovamente la sequenza di spostamenti, così come fa il tracciato del grafico.

La *velocità* con cui la perturbazione avanza nel mezzo viene definita come il rapporto tra  $\lambda$  e  $T$ . Si noti che questa velocità non coincide affatto con la velocità con cui si muovono le singole molecole. Essa è sempre diretta nel senso della

propagazione dei fronti di pressione, mentre quella delle molecole cambia verso ad ogni periodo.

Esistono oscillazioni che possono essere ben più complesse. Pur essendo periodiche certe onde possono avere una forma non sinusoidale. In particolare possono essere costituite dalla sovrapposizione di più onde sinusoidali di frequenza opportuna. Inoltre possono essere non periodiche anche se in realtà tutte le onde in natura lo sono in un certo senso, avendo un inizio ed una fine sia come durata temporale che come estensione spaziale, tuttavia, normalmente si considera periodica un'onda se la sua durata nel tempo è molto maggiore del tempo periodo.

Esistono tre diverse tipologie di onde sonore e ognuna è identificabile da un particolare andamento grafico:

- Le onde semplici: onde dal tracciato regolare: Per questa tipologia di onde i picchi sono speculari alle valli e quindi il segnale intero assume il caratteristico andamento sinusoidale dotata di periodicità;
- Le onde complesse: sono sempre onde dal tracciato regolare, in quanto i picchi sono speculari alle valli, ma la loro forma risulta più complessa della precedente perché presenta diverse anomalie nelle curve. Le caratteristiche sono: la periodicità e il grafico non sinusoidale;
- Le onde aperiodiche: sono onde non regolari per il quale la traiettoria ha forma caotica. Sono caratterizzate dall'assoluta irregolarità del grafico e dall'aperiodicità; con questa tipologia di onda sonora vengono identificati i rumori.

Per una descrizione delle onde semplici i parametri di frequenza e d'ampiezza sono sufficienti, mentre le onde aperiodiche non possono essere descritte da alcun parametro. Invece nella descrizione delle onde complesse sono utili sia la frequenza che l'ampiezza, ma date le anomalie del tracciato questi due semplici parametri da soli non sono esaurienti. Per interpretare questi segnali bisogna ricorrere alla scomposizione dell'onda in una serie d'onde semplici, che sono invece analizzabili con le normali già presentate. Le onde semplici o formanti, ottenute dalla scomposizione di un'onda complessa, sono dette armoniche e nel loro insieme costituiscono quello che è chiamato spettro dell'onda sonora.

Una caratteristica molto importante delle armoniche è che le loro frequenze corrispondono sempre a multipli interi della frequenza dell'onda complessa, e sono indicate con  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ , ecc. con il pedice che corrisponde al rapporto tra la frequenza dell'onda fondamentale e quella dell'armonica.

In tutti i casi può essere effettuata un'analisi spettrale dell'onda, cioè misurare la frequenza e l'ampiezza di ciascuna senoide che costituisce l'onda periodica complessa. Ciò che si "misura" è chiamato spettro in frequenza dell'onda. La differenza consiste nel fatto che, mentre nel caso di suoni periodici lo spettro non cambia nel tempo, per i suoni non periodici lo spettro cambia nel tempo, costringendoci ad adoperare una variabile in più nella descrizione matematica.

### 1.5.3.2 I Parametri dell'emissione acustica[21]

Hit: un segnale che supera il valore di soglia (threshold) e avvia l'acquisizione del sistema. E' il parametro principale per il conteggio e il riconoscimento delle attività AE. In figura 1.26 la Duration identifica lo stesso hit. Associato ad ogni picchio viene registrato un count. L'insieme dei picchi che si presentano prima del picco massimo viene chiamato count to peak. Quelli dopo formano il count - count to peak.

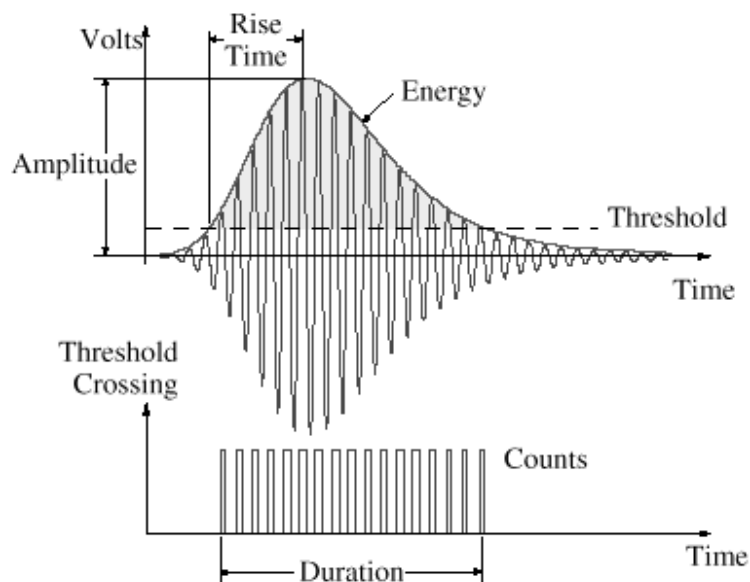


Figura 1.26 Parametri caratteristici di un segnale AE.

Count: numero di volte lungo la durata dell'hit in cui il segnale supera il valore di soglia. Valore strettamente connesso alla frequenza del segnale e al valore di soglia.

Ampiezza (amplitude): espressa in Volt o in Decibel identifica l'intensità del picco massimo. Questo valore sarà strettamente connesso con la magnitudo dell'evento sorgente.

Durata (duration): un intervallo di tempo delineato dal primo superamento del valore di soglia (trigger) all'ultimo punto rilevato all'interno sopra il threshold dell'ultimo count che supera il valore di soglia. La durata ha un valore massimo da assegnare al sistema di registrazione. Questo è per evitare anche che un hit abbia durata infinita. Prendere visione della figura 1.27.

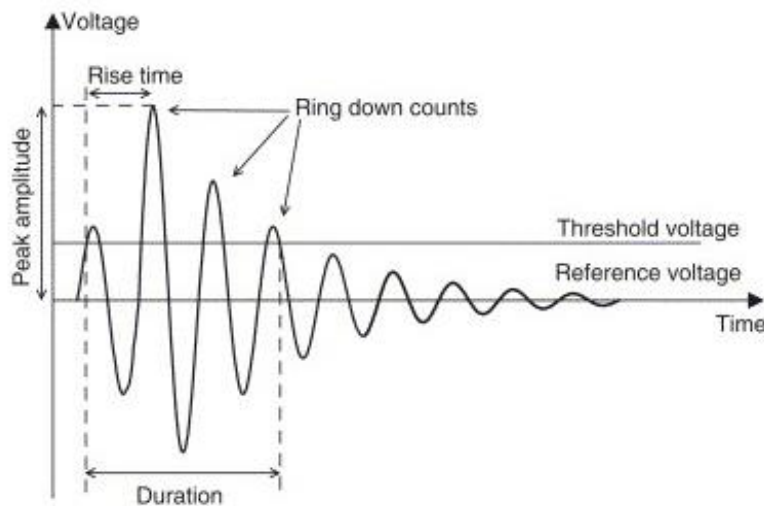


Figura 1.27 Segnale AE tipico ed evidenziazione parametri.

Tempo di crescita (rise time): intervallo di tempo dal primo punto che riconosce la presenza di un hit al picco di massima ampiezza. Può essere strettamente connesso alla tipologia di frattura.

Energia: area sottesa dalla curva che sviluppa il segnale con il limite inferiore del valore di soglia (figura 1.26).

Passando al dominio delle frequenze con la trasformata di Fourier si possono ottenere altri due parametri significativi:

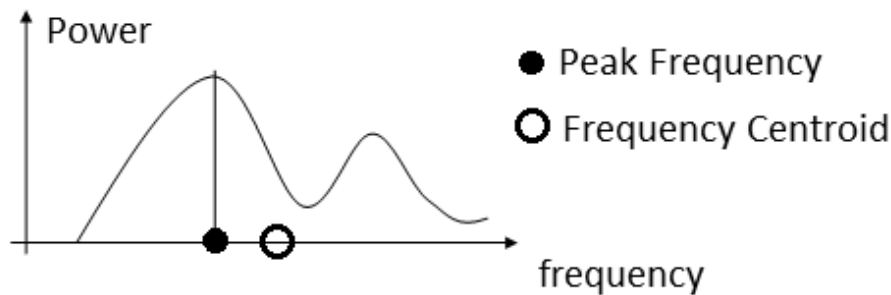


Figura 1.28 Le frequenze di un segnale AE.

Baricentro della frequenza (figura 1.28): una frequenza calcolata [KHz] risultante di una somma di ampiezze di frequenze diviso per una somma di ampiezze;

Frequenza di picco (figura 1.28): nel dominio delle frequenze rappresenta il punto in cui si presenta il picco massimo [KHz].

### 1.5.3.3 Forme di propagazione

Dopo che un'onda acustica è stata generata questa propaga all'interno del componente fino ai sensori che la assimilano. Ci sono diversi modi perché un'onda propaghi e molti effetti che alterino il suo comportamento. Bisogna infatti considerare sempre velocità di propagazione, attenuazioni e riflessioni.

In un solido la velocità di propagazione sonora è dipendente dalla densità e dalle proprietà elastiche del materiale stesso. In alcuni casi può anche essere strettamente dipendente dalla geometria in cui il mezzo si propaga. In materiali anisotropi importante diventa anche la direzione di propagazione.

L'onda longitudinale ha velocità:

$$v_l = \sqrt{E/\rho} \quad [2.2]$$

Cioè è direttamente proporzionale al modulo elastico e inversamente proporzionale alla densità. Per quanto riguarda le onde trasversali invece:

$$v_t = \sqrt{G/\rho} \quad [2.3]$$

Al posto del modulo elastico viene usato più intuitivamente il modulo elastico tangenziale (modulo di scorrimento). Le onde trasversali risultano più lente di quelle longitudinali.

Per lo studio degli ultrasuoni propaganti in un materiale diventa fondamentale anche la profonda comprensione di tutte le tipologie di onde propaganti. Oltre alle onde longitudinali e trasversali ci sono anche quelle superficiali. Vengono identificate con onde di Rayleigh[22] quelle onde che si muovono unicamente sulle superfici del componente. Identificare la velocità delle onde di Rayleigh è complesso ma in buona approssimazione si può calcolare la loro velocità con l'equazione:

$$v_R = v_t \cdot \left( \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \right) \quad [2.4]$$

Le onde di Rayleigh anche se identificate come superficiali hanno anche una componente interna nello spessore, ma l'ampiezza decresce proprio con questo. Però per spessori molto sottili l'onda di Rayleigh può trasferirsi a tutto il componente su tutto lo spessore; vengono così identificate le onde di Lamb (figura 1.29).

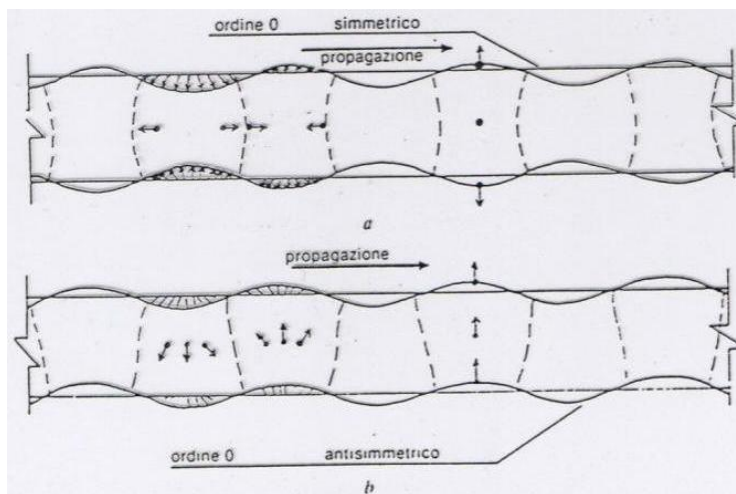


Figura 1.29 Onde di Lamb.

Fisicamente le onde di Rayleigh (figura 1.30) si presentano come un'oscillazione degli atomi superficiali attorno alla loro condizione di equilibrio; possono essere pensate come le onde superficiali marine.

In un'approssimazione ancora più generica si può definire la velocità di propagazione di queste onde con la relazione:

$$v_R \cong 0.98 \cdot v_t \quad [2.5]$$

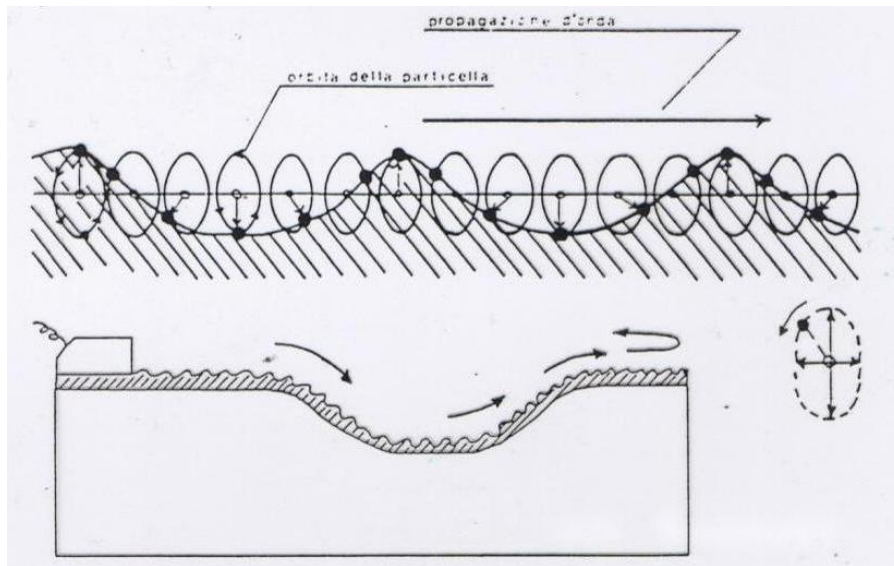


Figura 1.30 Onde di Rayleigh.

Per descrivere la propagazione di un'onda sonora all'interno di un materiale bisogna definire una nuova grandezza: l'impedenza acustica. Questa è definita come:

$$z = \rho \cdot c \quad [2.6]$$

In  $[\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2)]$  con  $\rho$  densità del materiale e  $c$  velocità di propagazione. Il suono si propaga nel medesimo modo in materiali diversi a patto che pari sia l'impedenza acustica (diventano quindi confrontabili anche materiali estremamente diversi).

Si immagina un'onda sonora propagare in un tubo a sezione piena; quando l'onda arriva alla fine del materiale cosa succede? Prosegue propagandosi in aria o torna indietro nel materiale?

La risposta giusta è: entrambe. Più i materiali hanno impedenza acustica diversa più intensa sarà la componente riflessa rispetto a quella rifratta.

Come per la luce, o in generale per le onde di natura elettromagnetica, le onde acustiche nel pezzo si riflettono e si rifrangono. I due fenomeni per l'emissione acustica seguono a loro volta le leggi di Snell (figura 1.31).

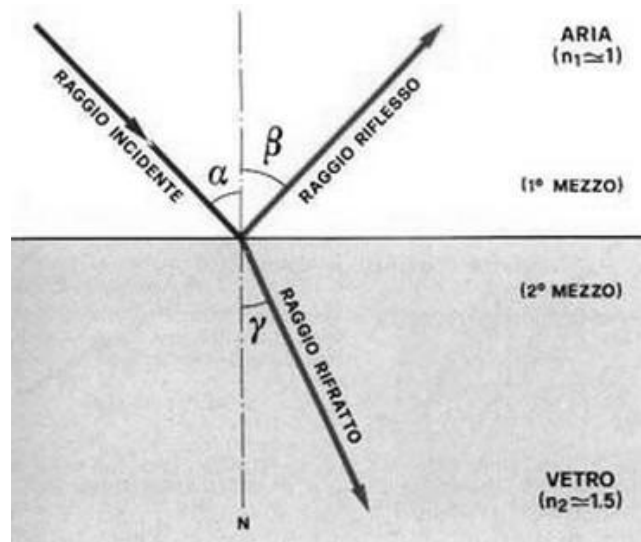


Figura 1.31 Leggi di Snell.

I° legge:  $\alpha = \beta$

II° legge:  $\sin \alpha = \frac{v_{inc}}{v_{refr}} \cdot \sin \gamma$

Vi sono due situazioni che devono essere considerate evidenziate in figura 1.32 e 1.33.

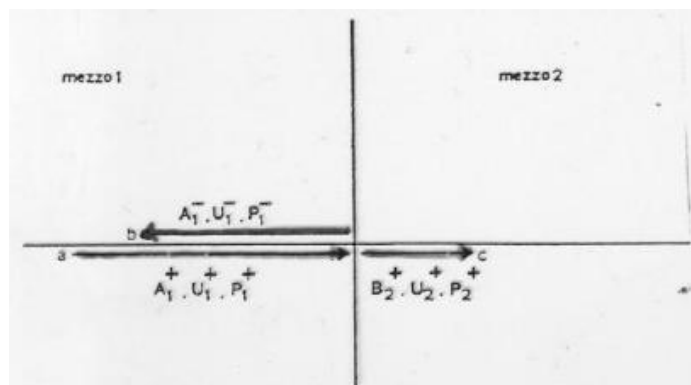


Figura 1.32 Rifrazione – riflessione di un raggio incidente.



Raggio incidente diretto come la normale alla superficie: sia la parte riflessa che la parte rifratta si propagano anch'esse sulla normale. I legami tra le onde, quindi tra le pressioni, viene descritto dalle relazioni:

$$R = \frac{P_1^-}{P_1^+} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$

$$T = \frac{P_2^+}{P_1^+} = \frac{2 \cdot z_2}{z_2 + z_1}$$

Ricaviamo ciò che viene descritto graficamente in figura 1.33: se  $Z_A < Z_B$  (ad esempio passaggio da acqua a acciaio) si ha un innalzamento della pressione e dall'acqua il segnale continua la propagazione nell'acciaio aumentando la sua intensità. Viceversa non si verifica questo comportamento: l'intensità dalla parte rifratta in acqua è decisamente minore.

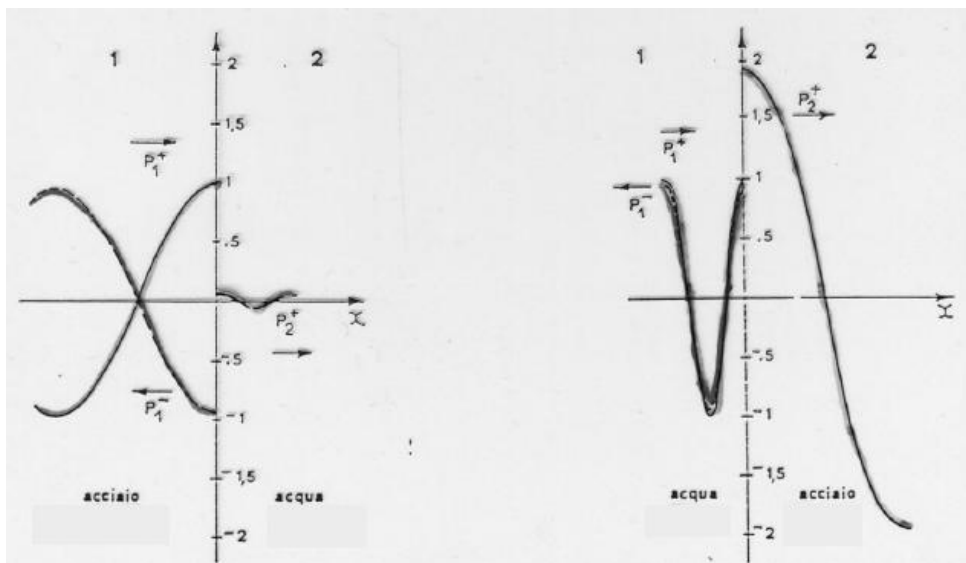


Figura 1.33 Rifrazione in diversi materiali.

Nel caso di raggio impattante inclinato bisogna differenziare il comportamento di un'onda elettromagnetica da quello di un'onda sonora: sono infatti presenti sia componenti trasversali che longitudinali in quest'ultima forma (figura 1.34). Si parla di birifrangenza sia del raggio riflesso che di raggio rifratto. La parte longitudinale viene deviata maggiormente di quello trasversale.

Si possono ulteriormente riconoscere due angoli critici: il primo ( $\alpha_{RLong} = 90^\circ$ ) riconosce la totale riflessione della componente longitudinale; con il secondo angolo critico ( $\alpha_{Rtrasv} = 90^\circ$ ) si percepisce invece quell'angolo per cui tutto il raggio viene riflesso.

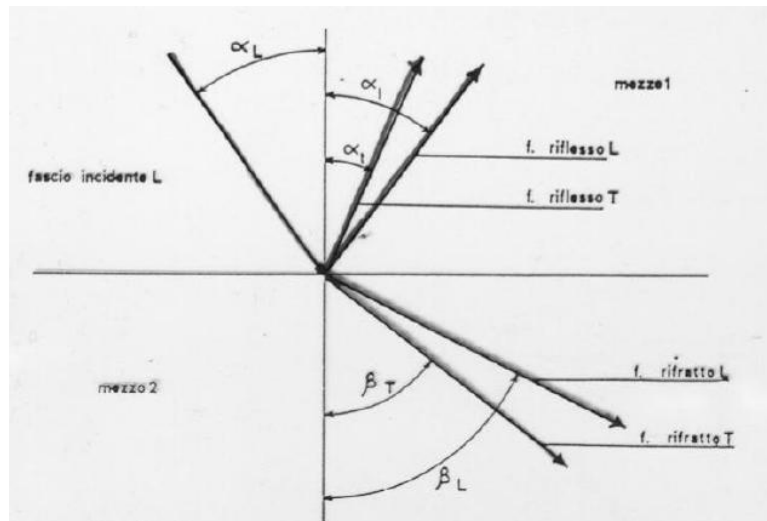


Figura 1.34 Scomposizione di un raggio sonoro incidente.

#### 1.5.3.4 Attenuazione

È la diminuzione dell'ampiezza dell'onda sonora al crescere della distanza di propagazione. L'attenuazione inoltre cambia anche la forma d'onda e quindi il campo delle frequenze.

L'ampiezza di un'emissione acustica può essere indicata attraverso il legame:

$$A = 20 \log \frac{V_{sig}}{V_{ref}} \quad [2.7]$$

A espresso in Decibel [dB].  $V_{sig}$  è il voltaggio del segnale misurato mentre  $V_{ref}$  è un arbitrario voltaggio scelto. L'attenuazione di conseguenza viene riferita in dB per unità di lunghezza della propagazione. Ad esempio per un materiale caratterizzato da un'attenuazione di 10dB / m attenuerà un segnale di 6dB in 0,6 metri.

Quattro sono le tipologie di attenuazione di un segnale:

1. Assorbimento interno, cioè quando l'energia acustica viene convertita in energia termica; questa tipologia è caratterizzata da un'attenuazione di forma logaritmica. Più alte sono le frequenze più intenso sarà l'effetto di attenuazione;
2. Diffusione geometrica: propagando dalla sorgente viene coinvolta una regione sempre più grande all'interno del materiale. Per la conservazione dell'energia l'ampiezza dell'onda deve diminuire all'aumentare della regione coinvolta. L'energia non viene persa ma semplicemente distribuita, e, per la maggior parte dei casi, questa tipologia di attenuazione si amplifica all'aumentare del raggio  $r$  che descrive la regione coinvolta. E' questa la principale causa di attenuazione nell'intorno della sorgente;
3. Dissipazione dell'energia acustica nei mezzi adiacenti. Tipico dei contenitori in pressione e dei componenti a contatto con fluidi;
4. Dispersione, cioè quel fenomeno che valuta il sommarsi \ sottrarsi delle onde acustiche fra loro; per un corpo non dispersivo la velocità è costante per tutte le frequenze;

In maniera approssimata ma più efficace può essere definita una legge generale di attenuazione descritta in funzione della pressione:

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad [2.8]$$

Con  $\alpha$  chiamato coefficiente di attenuazione. Questo valore sarà dipendente dal materiale: più basso per i materiali metallici e più alto per quelli plastici.

### **1.5.3.5 L'AE utilizzata per lo studio del danneggiamento a fatica e dell'integrità strutturale**

Le emissioni AE sono onde di energia (propagazioni sonore) prodotte da ridistribuzioni delle strutture cristalline interne al pezzo \ sistema meccanico. La causa di queste generazioni di energia può essere imputata a nucleazioni e propagazioni di cricche, ossidazioni, movimenti delle dislocazioni, o urti superficiali.

Lo svantaggio dell'AE è che le strumentazioni attualmente commercializzate possono solo stimare qualitativamente quanto grande sia il difetto e quanto, in futuro, esso propagherà.

La tecnica AE tradizionale cattura solamente certi parametri. Le rilevazioni AE sono sicuramente correlate con la formazione del difetto o dei cedimenti.

L'utilizzo del metodo dell'emissione acustica, come controllo non distruttivo, è decisamente interessante per quanto riguarda i test di propagazione a fatica. La prima parvenza di un segnale AE potrebbe indicare la nucleazione di una cricca. Durante i test di propagazione a fatica, se vengono inseriti i dati in un grafico, considerando numero di cicli e la cumulata del conteggio di eventi AE scopriamo tre zone caratteristiche:

1. corrisponde ai primi cicli del test, prima ancora che la curva ciclica sforzi-deformazioni si stabilizzi; le rilevazioni ottenute sono inerenti al moto delle dislocazioni;
2. Questa zona è inerente ai riconoscimenti delle vere e proprie nucleazioni delle cricche, con la micro creazione delle stesse.
3. Questa corrisponde alla propagazione della cricca vera e propria. In figura 1.35 si possono visualizzare queste 3 aree e l'evoluzione in funzione del rapporto di carico.

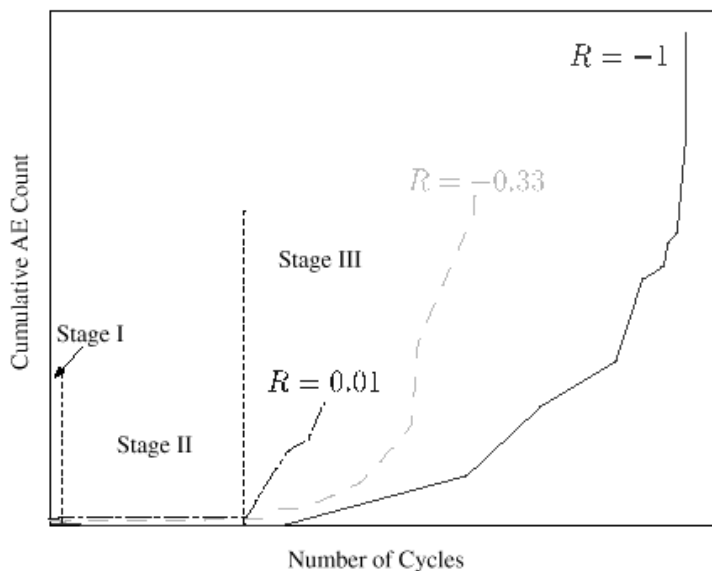


Figura 1.35 Le rilevazioni AE durante la propagazione di cricca.

Un sistema simile all'acoustic emission viene già utilizzato per un problema non prettamente ingegneristico, quanto biologico: la rilevazione e lo studio dei ter-

remoti. Tutti i sismometri nel mondo possono essere visti come sonde pronte ad ascoltare quello che accade nella crosta terrestre. Con un'opportuna interpolazione delle risposte si può calcolare il luogo dell'epicentro, posizione e profondità[23].

Un metodo per creare un AE in un corpo metallico è utilizzando una matita a mina classica e facendo rompere un piccolo pezzo di mina sul pezzo stesso. Questa viene chiamata sorgente di Hsu – Nielsen, metodo standard. La forma d'onda creata dalla rottura della mina nel pezzo è molto simile a quella di una propagazione di una cricca. In metalli e nel vetro la matita di Hsu - Nielsen genera eventi AE con un rise time di circa un nanosecondo. Un centinaio di nanosecondi è invece il rise time che caratterizza un AE generica. Per i terremoti il rise time è ancora più grande.

Meccanismi di danneggiamento singoli come un incremento di una cricca per fatica producono segnali discreti, caratterizzati cioè da un inizio e da una fine. Il segnale verrà rilevato finché la sorgente resta attiva. Può capitare che una serie di sorgenti discrete creino un segnale continuo o prossimo alla continuità.

I trasduttori dei fenomeni AE sono sensori piezoelettrici molto sensibili. I sensori più comuni per l'applicazione del metodo sono i sensori a risonanza, che sono particolarmente sensibili a date frequenze.

Nel caso, frequente, che il segnale risulti molto debole viene utilizzato un pre-amplificatore per intensificare la potenza del segnale. La sua funzione raddoppia nel caso in cui si vogliono eliminare effetti di disturbo indesiderati. Queste due parti possono anche essere fuse in un unico strumento.

Uno dei problemi principali, se non il più arduo da risolvere, è l'elevata presenza di rumore. Vibrazioni meccaniche e strutturali possono inficiare in ogni momento la misura. La presenza di motori o sistemi idraulici, contatti striscianti ecc... rende decisamente ostico avere un segnale pulito con ciò che è di interesse. In una possibile applicazione su un assile reale di un treno in funziona bisognerebbe raffrontarsi sempre con la possibilità di urti di oggetti estranei (sassi, pioggia ecc...).

Gli stessi sensori, amplificatori e cablaggi possono distorcere o attenuare una misura. Correlato a questo nuovo CND non c'è ancora una catalogazione rigida per cui a differente tipologia di sorgente di AE venga associato una AE tipica. La causa principale di questa mancanza è l'estesa quantità di valori in gioco.

Interessanti le applicazioni di questa tecnologia in campo edile; l'obiettivo ancora una volta è la ricerca di quella condizione di stress per cui avviene la rottura del materiale.

Dalla misurazione dell'attività acustica causata da un generico carico P si vuole risalire al reale valore di P indipendentemente dalla durata e dall'entità del carico applicato nei cicli precedenti. Il fenomeno esplicita le proprietà dei materiali per i quali la cumulata dell'AE può aumentare solo se aumenta il carico.

L'effetto di Kaiser (figura 1.36) è veritiero soprattutto per un materiale vergine; man mano che il materiale si deteriora e presenta instabilità interne l'effetto Kaiser perde di intensità.

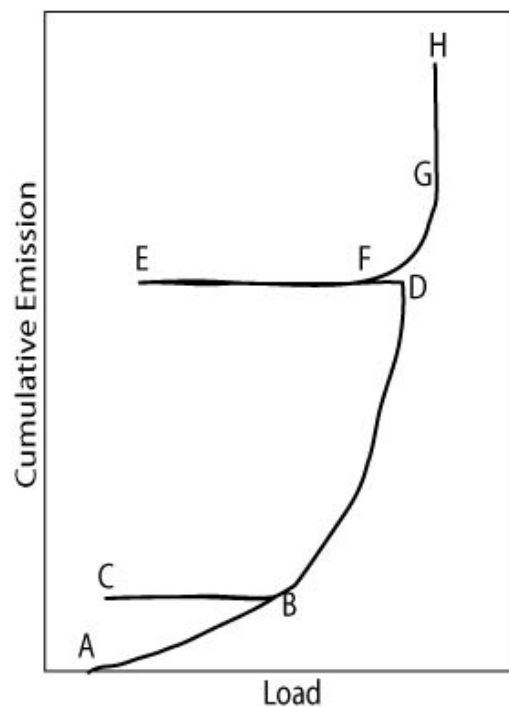


Figura 1.36 Effetto Kaiser.

Si analizzi ciò che succede in figura 1.36: all'aumentare del carico AB si ha una risposta nell'emissione acustica. Se il carico viene rimosso e applicato ancora una volta, prima che vi siano nuove risposte nell'emissione acustica, l'intensità del carico dovrà superare il valore del carico precedente (BCB). Segnali AE continueranno ad essere prodotti fino a D, con il carico che continua ad aumentare. Se si scaricasse la struttura ancora una volta la risposta dell'emissione acustica diventerebbe nulla.

Ad alti valori di carico però si può manifestare un'attività AE anche se non si è giunti al valore di carico precedente (F contro D). Questo effetto viene denominato *felicity ratio*. Questo fenomeno può essere descritto matematicamente:

$$Felicity Ratio = \frac{P_F}{P_D} \quad [2.1]$$

In forma generale la *felicity ratio* viene descritta se al posto della  $P_F$  si inserisce  $P_{AE}$  ovvero il carico per il quale inizia a generarsi emissione acustica, e un  $P_{1st}$  al posto di  $P_D$  inteso come massimo carico raggiunto.

In un stato stabile o intatto della struttura questo valore vale circa 1, o assume valori maggiori di 1 (figura 1.36 tratto BCB). In caso di strutture già danneggiate questo valore assume valori minori di 1 (tratti DEF). E' necessario correlare il comportamento delle rotture con i parametri AE, tenendo in considerazione i modi di propagazione tipici delle cricche (sezione 1.4.1.2).

In figura 1.37 viene presentata un'interpretazione grafica semplice. Eliminato il rumore e presupponendo che il segnale AE in ingresso sia strettamente connesso al fenomeno di danneggiamento del componente, è possibile effettuare un'analisi grafica in funzione dell'andamento delle rilevazioni AE e del carico; l'attività AE aumenterà in maniera significativa all'aumentare del danneggiamento. Questo incremento nell'andamento delle rilevazioni AE è identificabile in un punto singolo e viene chiamato "ginocchio" della curva. Qualitativamente è quindi possibile creare un modello predittivo statico in funzione di questo punto critico.

A supporto dell'argomentazione sopra eseguita si visioni la figura 1.37 riguardante le rilevazioni AE per un cilindro in pressione.

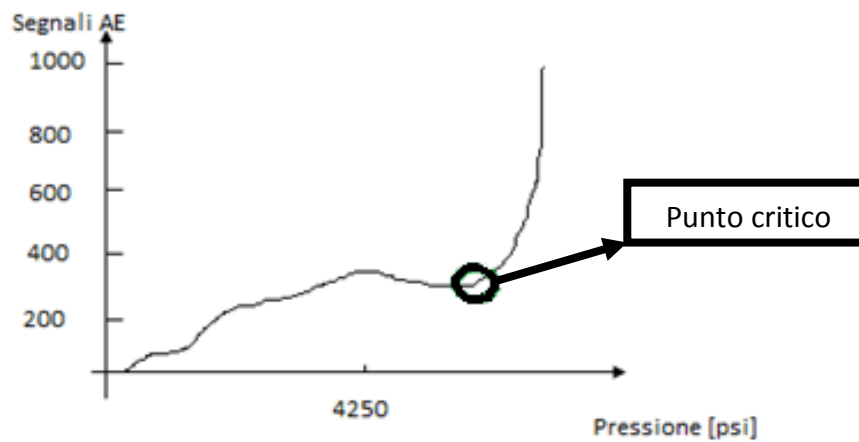


Figura 1.37 Andamento del numero di AE in funzione della sollecitazione.

Seppur semplice questo approccio ha come grande limite il fatto di non aiutare in presenza di multipli difetti o multiple cause di danneggiamento (i punti critici andrebbero a confondersi e la curva risulterebbe fortemente irregolare).

### 1.5.3.6 La normativa[24]

*“The term “acoustic emission” is used to describe the spontaneous elastic energy released by a process in the form of transient elastic waves”*

La tecnologia AE può essere usata come tecnica di monitoraggio indipendente, o a supporto di altre tecnologie, per l'analisi delle condizioni di un adatto sistema meccanica o pezzo. La tecnica AE può essere utilizzata in forma permanente, semi – permanente o portatile a seconda delle differenti analisi. La tecnologia prevede l'uso di opportuni strumenti di misura quali trasduttori, amplificatori, filtri e sistemi informatici per l'acquisizione dati.

La normativa assegna alla tecnologia AE il seguente scopo:

*“This International standard specifies the general principles require for the application of acoustic emission (AE) to condition monitoring and diagnostics of machinery and associated components and covers structure-borne measurements only.”*

Le AE secondo normativa vengono definite come onde propaganti dovute al rilascio di energia da sorgenti localizzate all'interno o sulla superficie del pezzo. I



segnali in acquisizione però saranno resi spuri e soggetti ad interpretazione per via di vari rumori di fondo, incertezze o falsi segnali.

Come analisi della strumentazione la normativa prevede l'utilizzo della "sorgente di Hsu – Nielsen": viene utilizzata una matita con mina 2H dal diametro di 0,5mm di lunghezza di 3mm con tolleranza di 5 decimi (la matita è caratterizzata da un cappuccio in teflon). Questa mina viene fatta rompere sul pezzo (figura 1.38). L'azione genererà emissione acustica utile per la fase di test.

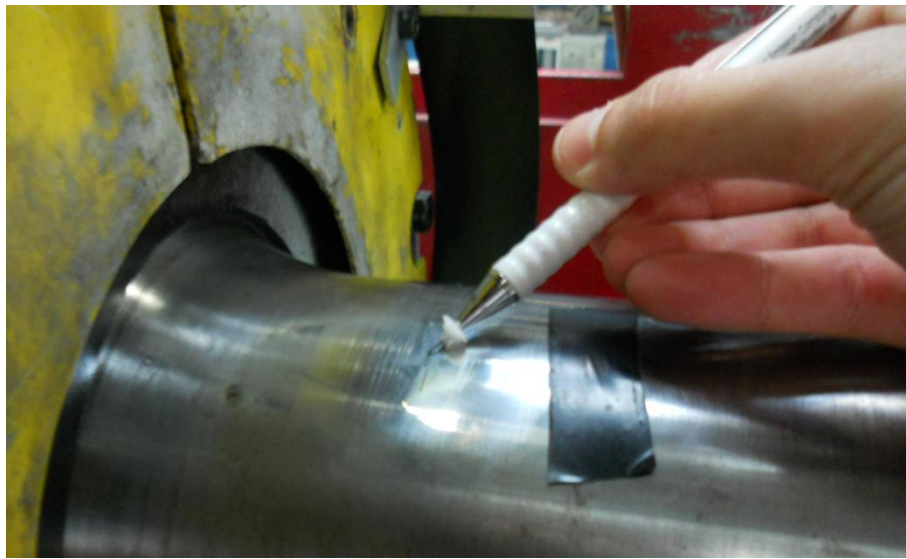


Figura 1.38 Test di Hsu – Nielsen sull'assile.

La normativa riconosce il range di onde generate all'interno del pezzo frequenze tra i 20kHz e 1MHz. Le onde sonore vengono riconosciute e tramutate in segnale elettrico grazie ai trasduttori, costituiti di un materiale in grado di produrre elettricità se sottoposto a deformazione e viceversa.

La normativa riconosce tra i vantaggi di questo metodo:

- Non invasività;
- Analisi in tempo reale;
- Con gli opportuni strumenti è in grado di rilevare difetti gravi prima di molto altri metodi;
- Permette di monitorare le performance dinamiche;

- Può essere applicato facilmente a pezzi che si muovono a grandi velocità;
- Permette di rilevare anche fenomeni di corrosione, deformazioni e incrinature.

I limiti del metodo messi in evidenza sono l'attenuazione dell'intensità delle onde acustiche propaganti, l'alta suscettibilità ai rumori di fondo e la complessità dell'interpretazione dei risultati (accoppiamento rilevazione AE con eventuali difetti).

Tra le principali cause dei rumori di sottofondo vi sono: i rumori elettrici, il rumore del contorno (aria, gas o anche corpi solidi, nel caso di analisi di sistemi in movimento – es: misurazioni su una macchina in movimento; durante la fase di test pezzi di sabbia potrebbero impattare sul pezzo in analisi e generare AE), rumore di background operativo (per esempio nella fase di test di tubi e recipienti il liquido al loro interno potrebbe generare AE), e rumore di background meccanico.

Punto fondamentale diventa lo studio dell'accoppiamento componente in analisi - sensore.

Si deve cercare di mantenere la superficie su cui applicare il sensore il più pulita e adatta possibile, quindi è necessario eliminare vernici, eventuali ossidazioni, o difetti che possano inficiare l'operato del sensore. Questo diventa profondamente obbligatorio nel qual caso si opti per un accoppiamento sensore – pezzo a secco (sconsigliato in ogni caso). Per verificare l'accoppiamento possono essere effettuate prove la sorgente di Hsu - Nielsen.

L'interfaccia tra sensore e pezzo è bene sempre sia composta da grasso o olio, sostanze che permettono la propagazione delle onde acustiche. Già lo spessore di questo strato va ad inficiare sul rendimento della misurazione.

Lo scopo è eliminare del tutto la presenza di aria, anche solo di bolle, all'interfaccia sensore – pezzo, perché in questo caso la propagazione delle onde verrebbe totalmente arrestata.

Al fine di sintetizzare correttamente un esame ad emissione acustica la normativa prevede la conoscenza di un certo quantitativo di informazioni di base:

- Identificazione nome e numero delle macchine utilizzate;
- Report dettagliato sulle condizioni di lavoro (carico, velocità, temperatura, ecc...);
- Storico delle azioni sul pezzo, dei difetti e dei cedimenti;
- Storico di eventuali altre rilevazioni AE.



## 2 - Prova di propagazione di cricca su assile rullato

In questo capitolo verrà descritto come è avvenuto il monitoraggio strutturale con i diversi CND durante la prova di propagazione.

L'assile in questione non è realmente installabile su qualsivoglia sala montata, ma è stato prodotto proprio per condurre questa tipologia di test. Costruito in acciaio A4T (25CrMo4 acciaio bonificato e temprato) l'assile (in figura 2.1) presenta una sezione ridotta e lavorata ulteriormente per rullatura a freddo; questa lavorazione meccanica senza asportazione di truciolo induce sforzi di compressione residui agenti nei primi millimetri di spessore (capitolo 4) e migliora la finitura superficiale. Questi vanno a migliorare la resistenza a fatica del componente. La rullatura viene oggi utilizzata per gli assili della alta velocità delle linee russe. Nello specifico è stata eseguita con un rullo di 85mm, spessore 5mm e raccordo di 2,5mm (ovvero un profilo a forma semicircolare). Forza costante applicata di 7kN con un avanzamento di 0,15mm / ciclo. La frequenza di lavoro è stata impostata a 4Hz.

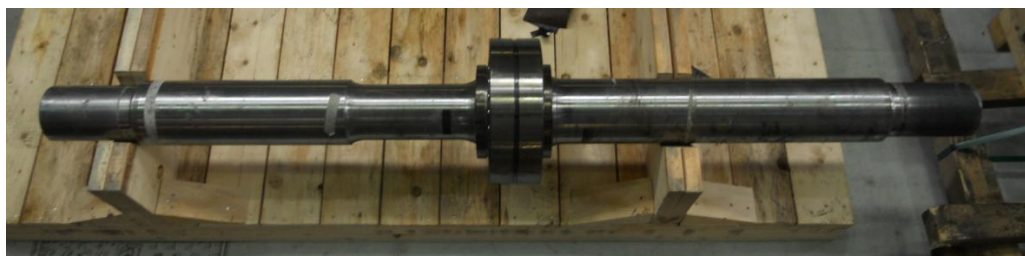
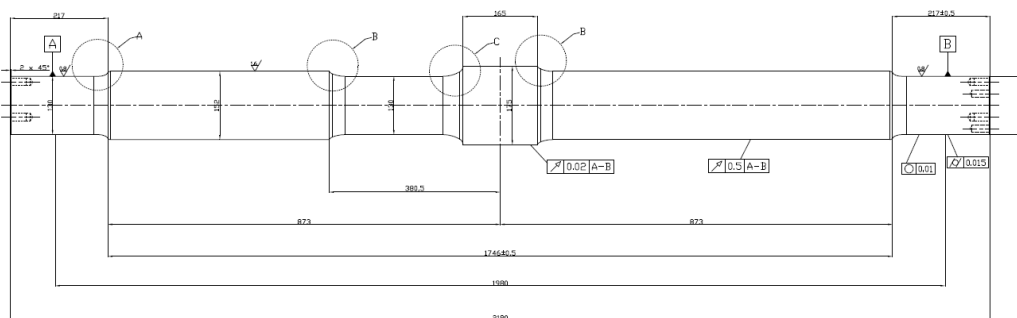


Figura 2.1 Assile in analisi.

Per il disegno tecnico completo si suggerisce al lettore di verificare l'allegato A.

L'assile presenta due cricche già create per elettroerosione collocate a 180° l'una dall'altra; a forma semi - circonferenziale possiedono raggio pari a 4mm (R4) (figura 2.2).

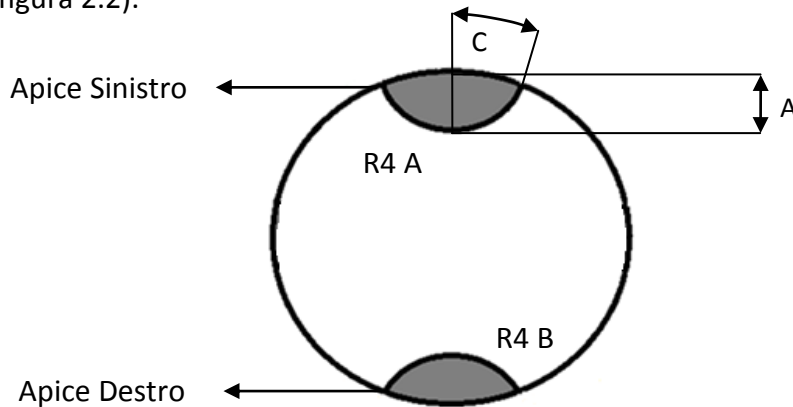


Figura 2.2 Sezione dell'assile criccato.

## 2.1 Il banco prova e il ciclo di carico

Il ciclo di carico è stato ricavato dalle misurazioni su una linea ferroviaria reale, privato dei cicli a minore intensità di carico. Questo "taglio" è stato eseguito per diminuire la durata del test (figura 2.3 - figura 2.4).

L'assile viene montato in una speciale gabbia e unito a diverse parti: un motore che lo mette in moto, un martinetto idraulico al centro da 500kN, che ha il compito di generare la forza che grava sull'assile (sistema gestito attraverso una cella di carico. Per il collegamento attuatore – assile si utilizza un cuscinetto a cilindri ad olio) e a due supporti con ulteriori cuscinetti (figura 2.5). L'assile è dunque soggetto ad una flessione rotante su tre punti.

Ogni spettro di carico corrisponde a circa 57000km percorsi.

Questo ciclo è stato eseguito 64 volte (equivalente a 3640000km), per un periodo compreso tra l'11 gennaio 2013 e il 20 febbraio dello stesso anno. Con un numero variabile di spettri in serie l'assile è stato fatto partire 24 volte.

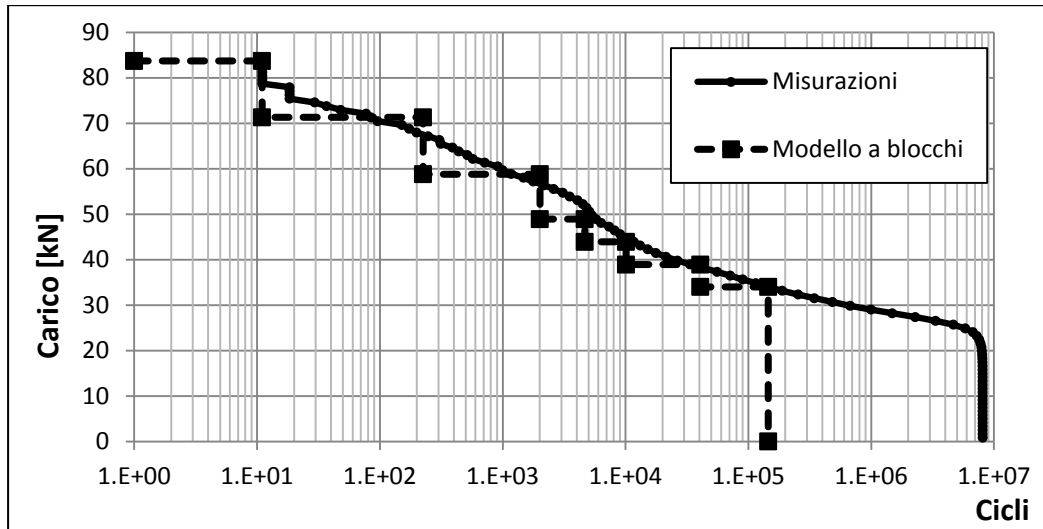


Figura 2.3 Creazione del ciclo di carico a blocchi.

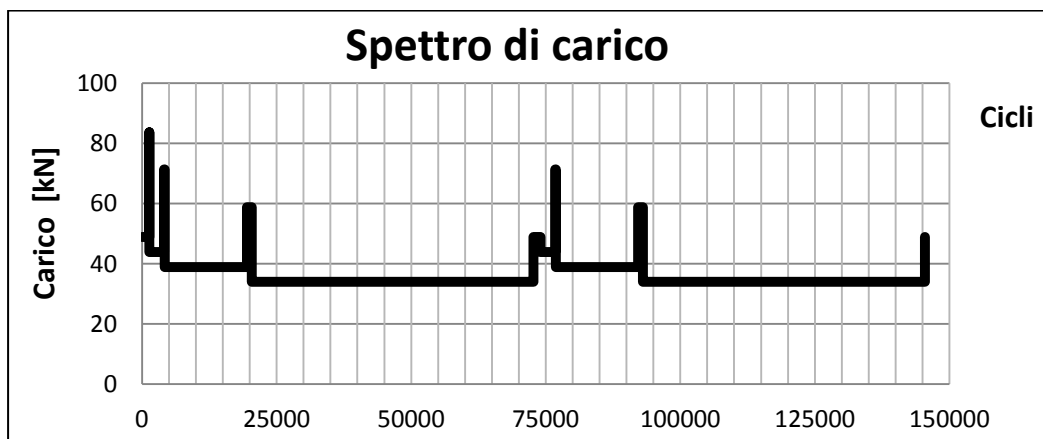


Figura 2.4 Spettro di carico.

Inizialmente era previsto l'utilizzo di un ciclo di carico con velocità massima di rotazione 509 rpm. In fase di set up si è appreso che a questa velocità di regime viene generato troppo rumore che va a disturbare le rilevazioni AE.

Si è quindi utilizzato un ulteriore spettro di carico che riducesse il contributo del rumore nelle misurazioni e che avesse una durata minore di dieci ore per ogni ripetizione. Ulteriore premura è stata quella di mantenere la coppia motore erogata più stabile e bassa possibile. Lo spettro di carico eseguito viene inserito nella tabella 2.1.

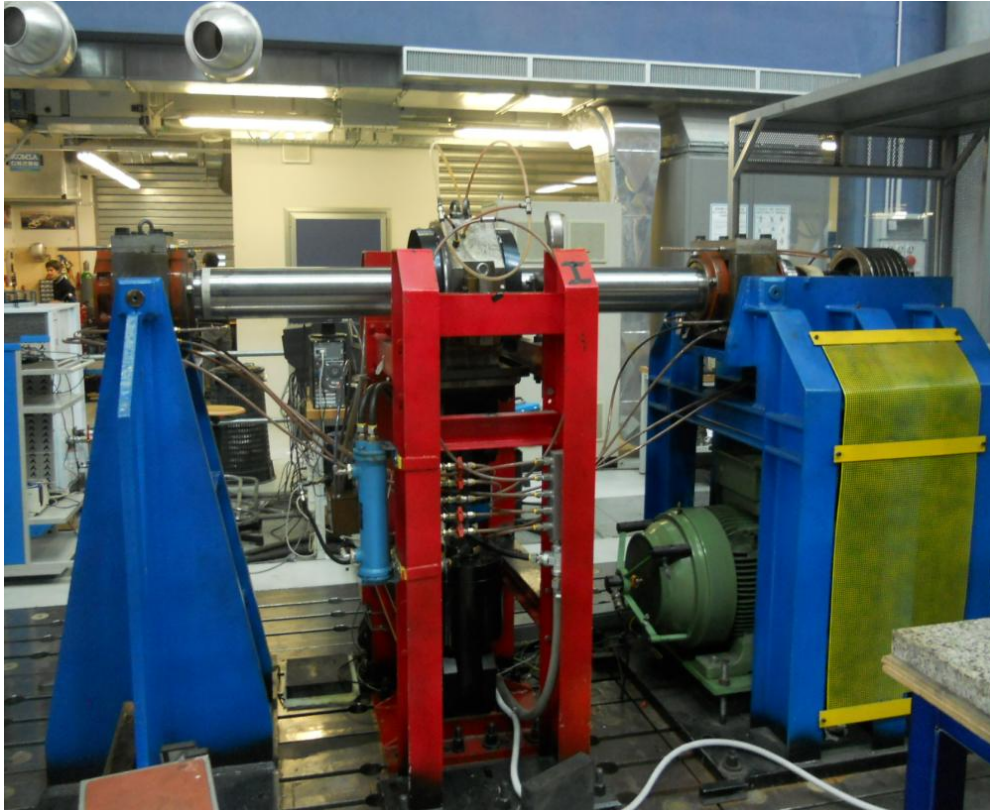


Figura 2.5 Il banco assili del Politecnico di Milano – Dip. di Meccanica.

Tabella 2.1 Spettro di carico.

<b>Giri</b>	<b>Carico [kN]</b>	<b>Rpm Test</b>	<b>Rpm Precedente</b>	<b>Sforzi [Mpa]</b>
1328	48.9	280	509	94.0
11	83.7	107	509	160.8
2726	43.9	280	100	84.4
107	71.3	107	509	137.0
15305	38.9	280	100	74.8
893	58.8	107	509	113.0
52347	34	280	100	65.3
1328	48.9	280	509	94.0
2726	43.9	280	509	84.4
107	71.3	107	509	137.0
15305	38.9	280	100	74.8
893	58.8	107	509	113.0
52347	34	280	100	65.3
0	48.9	280	509	94.0



Il banco prova utilizza un equipaggiamento e un software dedicato creato per i test su assili; sempre sotto controllo i valori di spostamento dell'assile nella direzione di carico e l'intensità del carico stesso. In figura 2.6 viene presentata l'interfaccia del software del banco prova per assili.

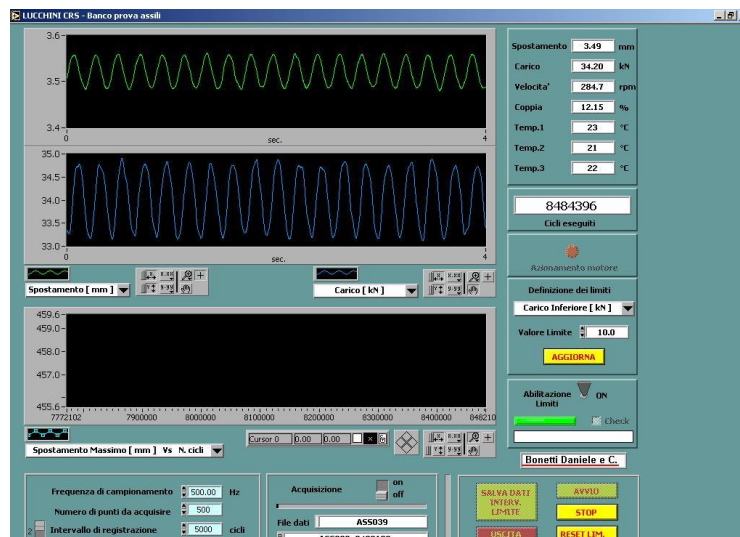


Figura 2.6 Schermata del software LUCCHINI CRS per le prove assili.

Il software permette di gestire il banco assile in due modalità: nel primo caso si ha una rotazione “libera” con una velocità di rotazione decisa in tempo reale dall’operatore; nel secondo caso invece è possibile far eseguire all’assile interi spettri di carico. Dalla schermata si può prendere visione, anche in forma grafica, dei principali valori descrittivi il test: numeri di cicli eseguiti, velocità di rotazione, spostamento, carico e temperature. Il sistema di sicurezza prevede dei limiti, minore e maggiore, per quanto riguarda carico, velocità di rotazione e deflessione. Superati questi limiti l’intero sistema viene forzatamente arrestato. Tra i diversi parametri controllati viene registrata anche la temperatura del cuscinetto centrale e delle boccole laterali: regolata da un refrigeratore questa non deve infatti superare i 25° centigradi.

La stessa struttura che racchiude il banco prova è dotata di sensori per rilevare la chiusura. Risulta impossibile azionare il motore se questi ultimi non risultino attivati.

Viene evidenziata un'eccentricità dell'assile minore del decimo di millimetro e una tolleranza del carico (impostato dal controllo) di  $\pm 1\text{kN}$ .

Si può prendere visione anche del grafico "rapporto di coppia motore": termine che descrive il legame tra coppia erogata e coppia massima erogabile. Grazie a questo parametro si controlla la stabilità della coppia (necessità sopra riportata). Attraverso precedenti test condotti sul banco sono state ricavate tutte quelle velocità per cui la coppia è stabile (basso numero e intensità delle oscillazioni) e con rapporto di coppia motore al di sotto del 15% (con questi parametri sono state decise le velocità di 107 e 280 rpm).

Ad ogni arresto sono stati eseguiti i seguenti CND:

- UT standard (controllo dell'apice A della cricca);
- UT con phased array (controllo dell'apice A della cricca);
- Fotografie al microscopio (controllo dell'apice C della cricca);
- Repliche (controllo dell'apice C della cricca).

## 2.2 Ultrasuoni Standard

Controllo non distruttivo utilizzato anche dalle imprese manutentive degli assili ferroviari in uso sul circuito (oltre alle particelle magnetiche). Si rimanda al capitolo 1 per la teoria base degli ultrasuoni e del controllo non distruttivo.

Viene utilizzata una sonda tradizionale a cristallo con raggio di rifrazione a  $45^\circ$  in acciaio: sonda ATM45/4 (Gilardoni. Dimensione del cristallo 8x9mm, frequenza 4MHz – ATM. Angolata Trasversale Miniatura). La centralina in dotazione al Politecnico di Milano è una Gilardoni RDG500[25]. Per migliorare il contatto sonda – superficie cilindrica dell'assile viene utilizzato un tassello in plexiglass (figura 2.7), che permette un contatto continuo fra le due parti, ma che come controindicazione attenua il segnale sonoro. Grasso viene interposto tra le aree di contatto plexiglass - sonda e plexiglass - assile al fine di garantire l'assenza di micro vuoti d'aria: in questo modo si ottiene una propagazione dell'onda sonora continua. In centralina viene visualizzato, come output, un ecogramma chiamato A - Scan e successivamente si va a misurare il guadagno in dB: quest'ultimo indica l'amplificazione necessaria a portare l'ampiezza del segnale sonoro all'80% dello schermo. Ad una propagazione del difetto aumen-

ta la superficie impattante dell'onda sonora e di conseguenza ci si aspetta una diminuzione del guadagno necessario.

Viene impostata una velocità di propagazione pari a 3230m/s, cioè circa la velocità di propagazione delle onde trasversali nell'acciaio.

Conoscendo lo spessore dell'assile della parte rullata ( $\varnothing 130$ ), si tara la centralina a 200mm (annullando la distanza di percorrenza del ritorno).

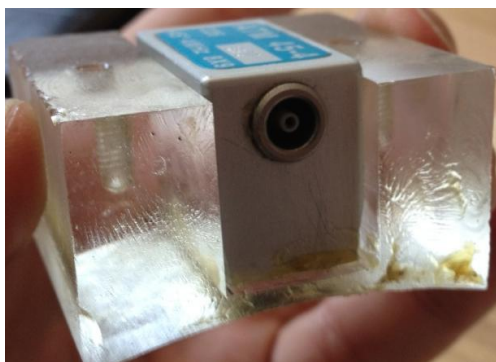


Figura 2.7 Il Sensore nel tassello Plexiglass.

Il difetto deve essere rilevato alla distanza di:

$$130 / \cos 45^\circ = 183.84 [mm]$$

Impostato un guadagno di partenza in ogni singola ispezione si va a cercare il minimo guadagno ottenibile. All'accensione della spia gialla (figura 2.8) il guadagno viene diminuito.



Figura 2.8 Centralina e sensore durante il controllo.

Legati al controllo ultrasonoro vi sono problemi di cui è bene prendere confidenza:

- presenza di una zona di turbolenza (di Fresnel), ossia quella porzione prossima alla sonda in cui il metodo non è in grado di rilevare difetti;
- limite del campo di utilizzo della sonda (per la divergenza del fascio sonoro e la sua focalizzazione viene garantito un buon funzionamento di quest'ultimo in una certa lunghezza).

In tabella 2.2 vengono mostrati i risultati delle misurazioni.

Tabella 2.2 Misurazioni UT.

	N° di spettri	cricca A 4mm	cricca B 4mm
		US STD (Gain) A	US STD (Gain) B
<b>11-gen</b>	1	68,5	68
<b>14-gen</b>	2	68,5	68,5
<b>15-gen</b>	4	67,5	67
<b>16-gen</b>	5	68	67,5
<b>17-gen</b>	7	67	68,5
<b>18-gen</b>	10	68	67,5
<b>21-gen</b>	12	67,5	67,5
<b>22-gen</b>	13	68	68
<b>23-gen</b>	15	67,5	68
<b>24-gen</b>	18	66,5	67
<b>25-gen</b>	20	67,5	67
<b>29-gen</b>	22	67	67,5
<b>30-gen</b>	25	67	67,5
<b>01-feb</b>	28	68	68
<b>04-feb</b>	29	67,5	67,5
<b>05-feb</b>	31	67	66,5
<b>06-feb</b>	33	68	68
<b>07-feb</b>	35	67,5	67
<b>08-feb</b>	41	67,5	67
<b>11-feb</b>	43	67,5	67
<b>12-feb</b>	45	67	67,5
<b>13-feb</b>	49	67	66,5
<b>15-feb</b>	55	66,5	67
<b>18-feb</b>	60	67	67,5
<b>20-feb</b>	64	67	67

Il 1 febbraio è stata eseguita una lucidatura superficiale nei pressi delle cricche.

Inserendo i risultati in un opportuno diagramma (figura 2.9) si rende evidente una diminuzione del guadagno all'aumentare della propagazione della cricca; risultato sicuramente coerente con le aspettative di un aumento dell'area riflettente.

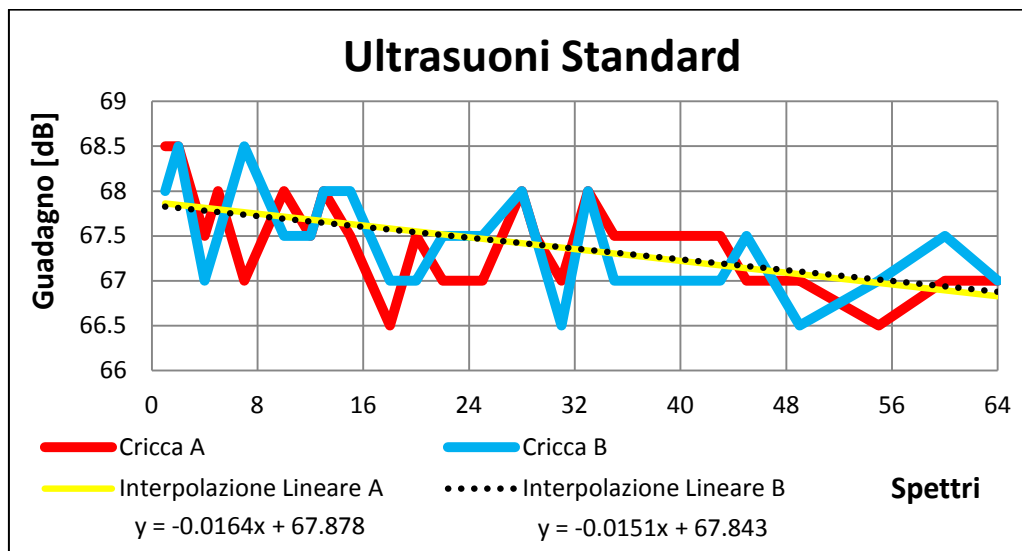


Figura 2.9 Andamento delle misurazioni UT.

Si estrapola la retta che approssima linearmente l'andamento delle misurazioni: questa ha evidentemente coefficiente angolare negativo. Questa operazione viene effettuata sia per la cricca A che per la cricca B.

E' quindi stata registrata una diminuzione media del guadagno di circa 1 dB: secondo gli ultrasuoni STD vi è stata quindi una propagazione delle due cricche.

Con questo metodo non è stato possibile dimensionare la cricca in quanto non si dispone di un'opportuna calibrazione tra guadagno e area riflettente (geometria del difetto).

### 2.3 Ultrasuoni Phased Array

Ulteriore controllo non distruttivo che come principio di funzionamento utilizza gli ultrasuoni. La centralina è una Harfang X32[26] equipaggiata anch'essa con una sonda a 45°, 32 cristalli e frequenza nominale di funzionamento pari a 5MHz. Non viene utilizzato il plexiglass precedente, ma una speciale interfaccia

sonda – assile sempre in plexiglass in dotazione allo strumento: l’aderenza viene comunque garantita dal grasso e dall’ampio raggio esterno dell’assile rispetto alle dimensioni della sonda. Il phased array si basa su acquisizioni S – scan (mappature settoriali) tali per cui si può ottenere una visione in sezione dei difetti.

*“Un trasduttore phased array è semplicemente un trasduttore che contiene un numero di elementi separati in un solo alloggiamento, e il phasing si riferisce a come quegli elementi sono sollecitati in sequenza”[27].*

I 32 elementi indipendenti della sonda vengono sollecitati in modo che i fasci si combinino fra loro e formino un singolo fronte d’onda. In ricezione si ha il fenomeno opposto in modo con la scomposizione del segnale in input in diverse parti, che poi ricostruite formano un’unica immagine. Il grande vantaggio è una mappatura nello spessore della sezione ispezionata.

In figura 2.10 viene inserita un’immagine chiarificatrice di come sono stati condotti i controlli con Phased Array sull’assile.

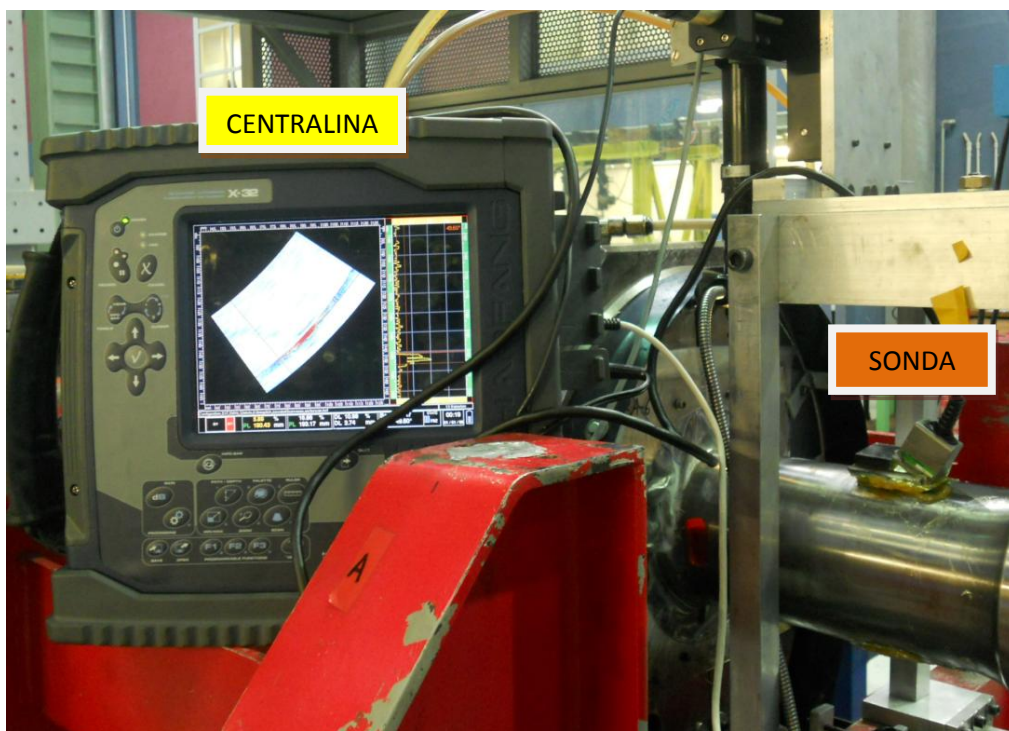


Figura 2.10 Centralina e sensore Phased Array durante un controllo.

Per analizzare la propagazione del difetto si utilizza il fenomeno della diffrazione dell'apice: individuata la sezione in cui è presente la cricca si possono visualizzare due segnali. Entrambi vengono generati dalla cricca e rispettivamente: uno generata dall'apice della cricca (minor energia sonora) e l'altra che arriva dalla base della cricca stessa (maggior energia sonora). Se questi due segnali si allontanano si ha un aumento della cricca (figura 2.11). Così facendo è possibile calcolare direttamente l'entità della propagazione.

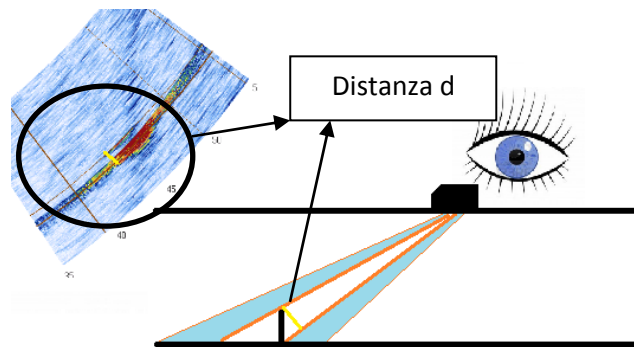


Figura 2.11 Principio per il calcolo della grandezza di cricca.

La centralina Phased Array (PA) produce un report in cui vengono inseriti tutte le caratteristiche specifiche della misurazione (figura 2.12).

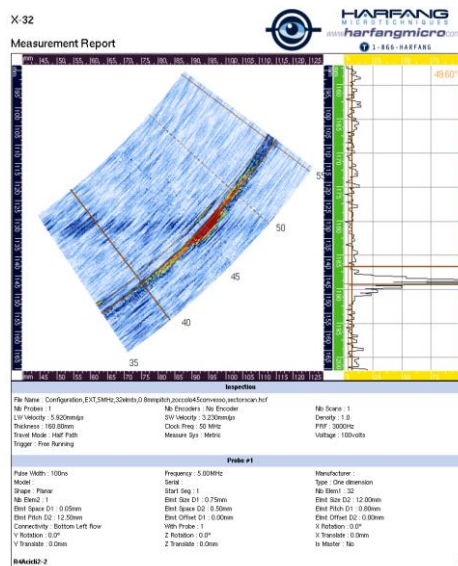


Figura 2.12 Esempio di report.

Le misurazioni ottenute (si prende come riferimento il centro geometrico delle superfici evidenziate in rosso) sono riportate in tabella 2.3:

Tabella 2.3 Misurazioni Phased array.

	N° di spettri	[mm]	[mm]
		US PA A	US PA B
<b>11-gen</b>	1	4.21	4.13
<b>14-gen</b>	2	4.21	3.87
<b>15-gen</b>	4	4.21	3.87
<b>16-gen</b>	5	4.35	4.38
<b>17-gen</b>	7	3.69	3.87
<b>18-gen</b>	10	4.08	4.18
<b>21-gen</b>	12	4.06	4.48
<b>22-gen</b>	13	3.69	4.58
<b>23-gen</b>	15	4.42	3.93
<b>24-gen</b>	18	4.06	3.87
<b>25-gen</b>	20	4.06	4.43
<b>29-gen</b>	22	4.68	4.06
<b>30-gen</b>	25	4.42	4.24
<b>01-feb</b>	28	4.60	4.64
<b>04-feb</b>	29	4.60	4.78
<b>05-feb</b>	31	4.74	4.06
<b>06-feb</b>	33	4.60	4.43
<b>07-feb</b>	35	4.79	4.43
<b>08-feb</b>	41	4.60	4.60
<b>11-feb</b>	43	4.42	4.60
<b>12-feb</b>	45	4.97	4.96
<b>13-feb</b>	49	4.60	4.60
<b>15-feb</b>	55	4.79	4.78
<b>18-feb</b>	60	4.60	4.24
<b>20-feb</b>	64	4.97	4.96

I dati sopra inseriti vengono raccolti in un opportuno diagramma (figura 2.13). Si può vedere come anche con questa tecnologia venga misurato una propagazione della cricca: i coefficienti angolari delle retti interpolanti sono positivi. Per entrambe le cricche una propagazione nell'ordine di 0.8mm.



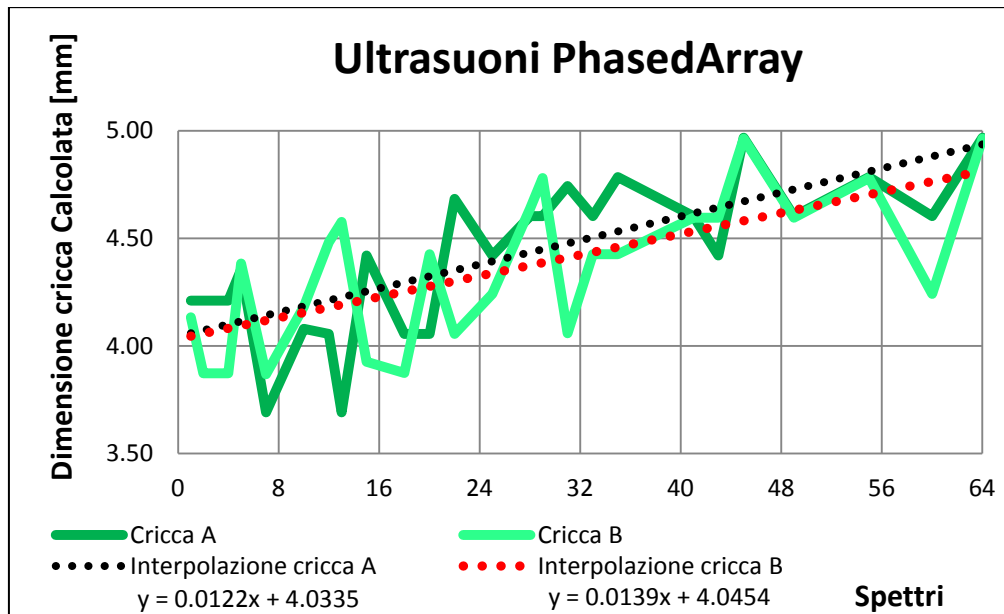


Figura 2.13 Andamento delle misurazioni Phased Array.

## 2.4 Fotografie con l'ausilio del microscopio elettronico

Metodo diretto che consiste nel fotografare con un microscopio ottico la parte superficiale delle cricche (figura 2.14).

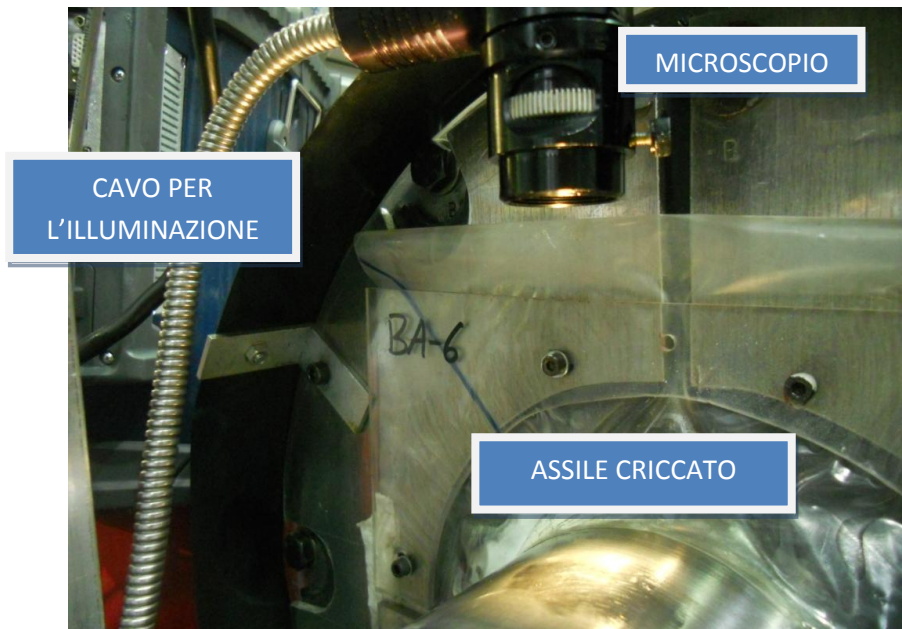


Figura 2.14 Interazione microscopio – assile.

A causa della difficile interpretazione dei risultati si è cercato di lucidare la superficie occupata dalle cricche con carta abrasiva 1000 (figura 2.15). L'operazione non ha ottenuto completamente il risultato sperato. Si ricorda che la superficie è sottoposta a sforzi di compressione: la propagazione della cricca deve avvenire in forma più incisiva all'interno dell'assile e non superficialmente, dove le cricche tendono a restare chiuse.



Figura 2.15 Lucidatura della superficie.

In figura 2.16 viene inserito un esempio su come appaiono prima del test e alla fine dei 64 spettri le cricche visualizzate dal microscopio elettronico:

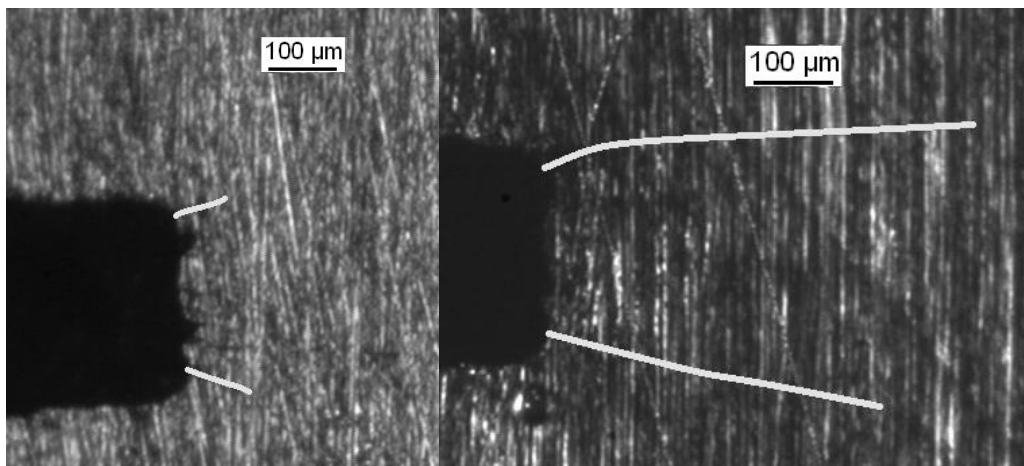


Figura 2.16 Fotografie cricca A\_dex. Dal XIIV al LXIV spettro.

Questa tipologia di controllo non si è dimostrata efficace data la poca qualità delle immagini ottenute.

## 2.5 Repliche

Per ovviare al problema della scarsa qualità delle foto eseguite con il microscopio elettronico si è optato, dal 18° spettro in poi, per procedere con questo ulteriore controllo non distruttivo: l'uso delle repliche in acetato. Il metodo consiste nel creare un negativo della parte superficiale della cricca. Viene utilizzata una pellicola di acetato posta con acetone ancora liquido sulla cricca (passaggio molto rapido e che richiede un certo livello di manualità). Soffiando sull'acetato l'acetone evapora e l'acetato viene "spinto" contro l'assile. Finito questo procedimento l'acetato dev'essere posto su un provino: utilizzando un microscopio si può quindi analizzare e fotografare agevolmente il risultato. Vengono eseguite costantemente repliche per tutti i quattro apici superficiali (2 per cricca – figura 2.2).

A titolo d'esempio nella figura successiva (figura 2.17) si può prendere visione delle repliche dall'inizio delle rilevazioni (XVIII spettro) alla fine dei 64 spettri.

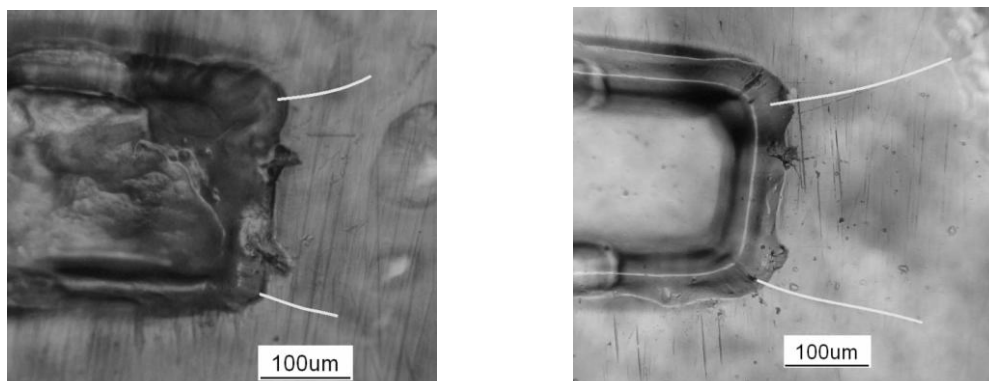


Figura 2.17 Repliche cricca A\_dex. Dal XIIV al LXIV spettro.

Le repliche evidenziano senza possibilità di essere smentite una tangibile propagazione delle cricche. E' necessario però premettere che il metodo, non avendo una risoluzione elevata, non evidenzia le parti più sottili delle cricche. Inoltre, come già spiegato, il processo di rullatura, determinando in superficie uno stato di sforzo compressivo, contribuisce a mantenere chiuse su loro stesse le cricche in superficie, rendendole ulteriormente invisibili.

Data la geometria variabile delle cricche le misurazioni vengono effettuate prendendo come riferimento iniziale la parete della cavità ottenuta per elet-

troerosione e, come riferimento finale, la parallela che si interseca con l'estremo della cricca.

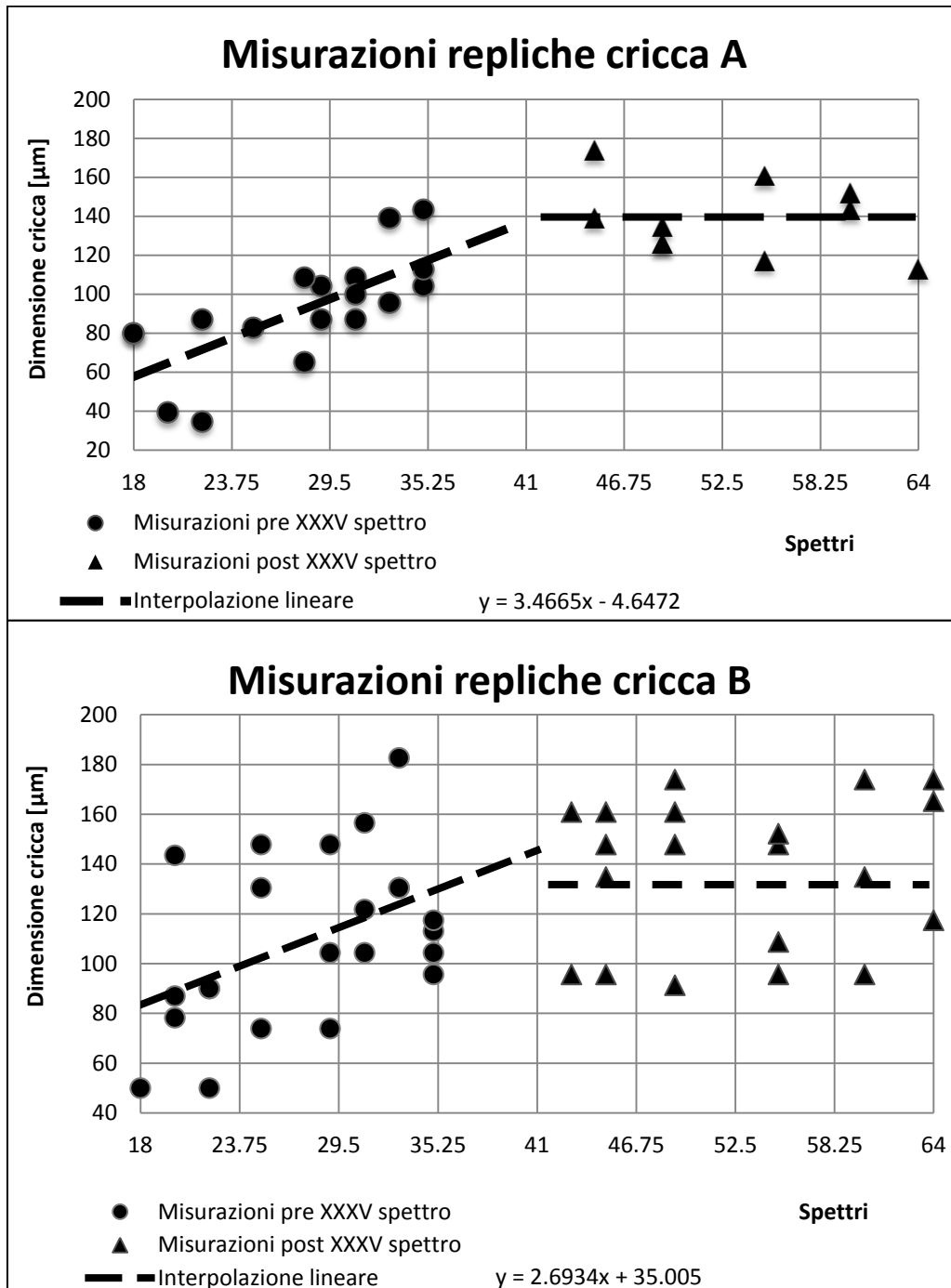


Figura 2.18 Misurazioni delle propagazioni di cricche in A e B.

In figura 2.18 è possibile prendere visione degli andamenti delle misurazioni così eseguite: è evidente un aumento delle dimensioni della cricca anche secondo questo controllo non distruttivo. L'apogeo viene considerato sinistro o destro secondo la visuale di figura 2.2. L'andamento delle misurazioni mostra un comportamento diviso in due parti: la prima in cui la cricca propaga durante i primi 40 spettri, la seconda in cui la cricca mantiene dimensione costante. Questo tipo di risultato era atteso: la cricca superficialmente non viene fatta propagare a causa degli sforzi di compressione superficiali imposti dalla rullatura. Questo fatto può essere identificato con l'effetto di notch: il processo di elettroerosione per la creazione delle cricche artificiali ha determinato un rilassamento degli sforzi residui in un'area intorno alla lavorazione. La cricca ha potuto propagare in superficie finché non ha raggiunto un'area in cui gli sforzi residui determinati dalla rullatura sono rimasti intatti.



### 3 - Monitoraggio strutturale con l'AE

L'impiego dell'emissione acustica è avvenuto lungo tutta la durata del test a fatica sull'assile (tutti i 64 spettri). È stato creato un set up ottimale per effettuare l'acquisizione (figura 3.1). L'intera strumentazione doveva seguire determinate specifiche, sia della parte rotante connessa direttamente all'assile, sia della parte a terra per la registrazione dei dati. La strumentazione è composta da:

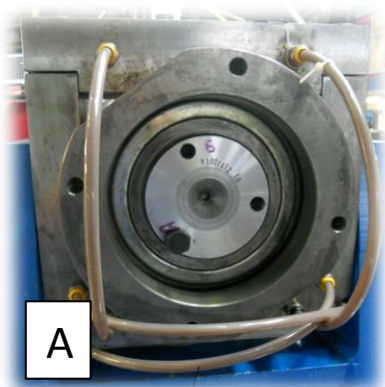
#### Componenti a terra:

- Blocco d'acquisizione;
- Scheda d'acquisizione;
- Computer e software di acquisizione "Vallen";
- Cablaggio.

#### Componenti rotanti:

Supporto dedicato, preamplificatore, sensore acustico, linguetta bloccante, viti, contatto strisciante più cablaggio (figura 3.2).

**PRIMA:**



**DOPO:**

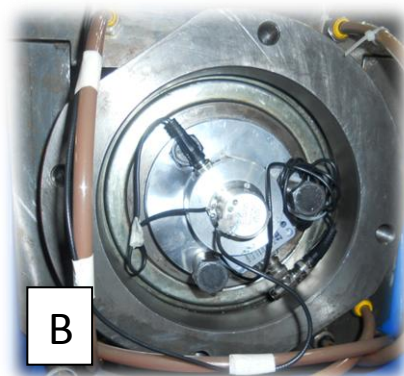


Figura 3.2 A – assile montato sul banco senza componentistica AE. B – componentistica AE montata sull'assile.



Figura 3.1 Componentistica AE a terra.

Il supporto dedicato e la linguetta sono stati pensati, ingegnerizzati e prodotti esclusivamente per questo progetto. E' stato utilizzato un software CAD per la modellazione 3D del componente, con analisi dell'assemblato per la valutazione degli ingombri (figura 3.3). Le parti rotanti dovevano essere ben salde, e il più possibile concentriche; caratteristica fondamentale per il contatto strisciante.

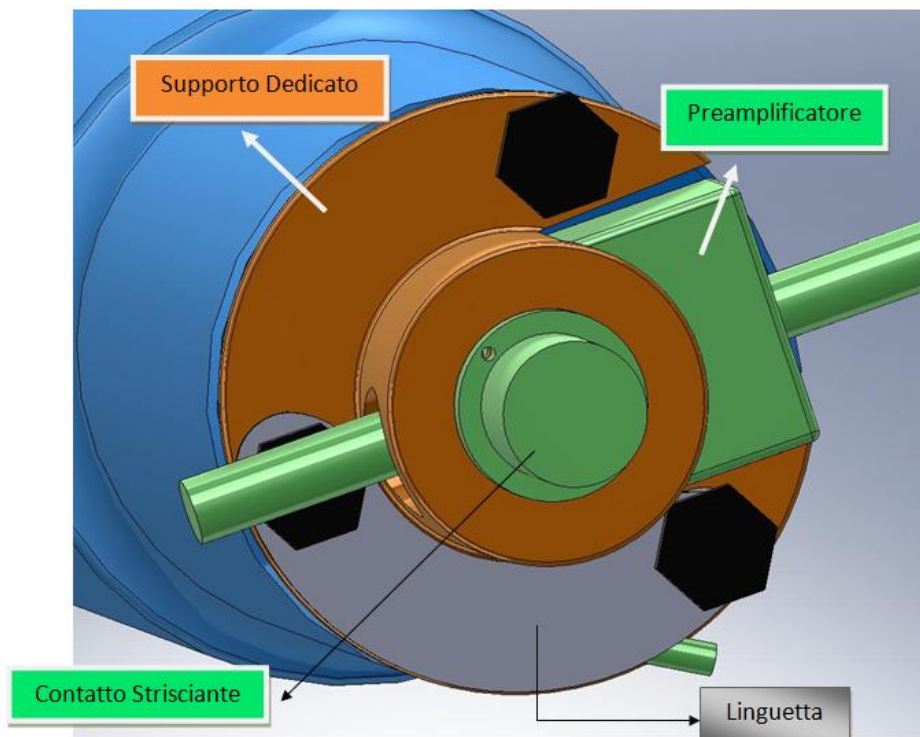


Figura 3.3 Disegno assieme strumentazione a CAD.

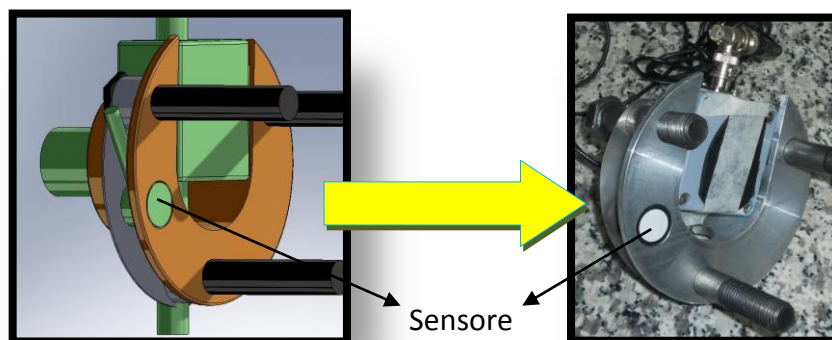


Figura 3.4 Confronto CAD – reale.



Il prodotto (figura 3.4) soddisfa tutte queste caratteristiche e in più garantisce la possibilità di una rapida e semplice opera manutentiva. Caso tipico di intervento manutentivo è il cambio del grasso sull'interfaccia assile - sensore acustico (avvenuto una volta dopo il 12° spettro, successivamente non è stato necessario; prima del lancio degli spettri di carico seguenti è stato valutato il corretto funzionamento dell'acquisizione).

E' stata creata una seconda versione più adatta in caso di aumento di carico (modifica essenziale per prove Staircase). Essa infatti, andando in battuta con il cuscinetto, blocca la possibilità dell'assile di inflettersi pericolosamente.

Tra gli allegati (B e C) a fine elaborato si può prendere visione delle tavole tecniche dei tre pezzi prodotti.

Il software di acquisizione in dotazione è diviso in più parti; quelle più interessanti per l'acquisizione AE sono la parte di controllo e la parte di visualizzazione. Nella prima vengono impostati tutti parametri necessari in input al calcolatore. Quelli che vengono riportati sono: il numero di canali (1 in cui entrano contemporaneamente le rilevazioni AE e il carico sull'assile assegnato dalla cella di carico) e il campo di frequenze misurate (230KHz – 850KHz). Nella sezione Visual invece possono essere visualizzati i vari hit sonori (i segnali AE). Vi è la possibilità di esportare i dati in file in un formato più maneggevole (come il .txt).

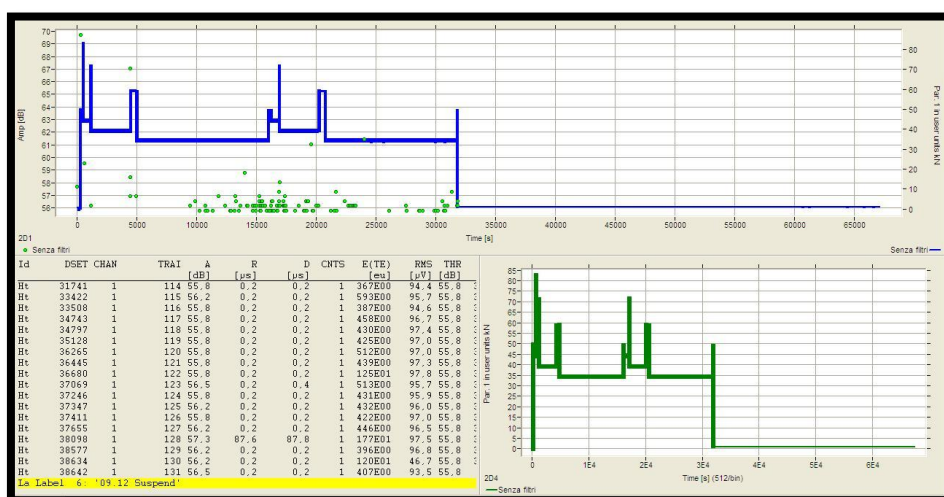


Figura 3.5 Schermata per la visualizzazione dell'acquisizione.

Così è come appare (figura 3.5) l'interfaccia *Vallen Visual* del secondo spettro di carico: si possono notare la correlazione tra il carico (linea blu – segnale acquisito direttamente dalla centralina di comando del banco) con gli hit misurati (punti verdi), nella tabella in basso a sinistra tutte le informazioni utili per ogni hit registrato (ampiezza, energia, durata, rise time, ecc...) e infine un ulteriore grafico esplicativo della forma dello spettro di carico.

Il sensore della marca Vallen System è il modello V5 150-M[28]. 150kHz è la frequenza di risonanza e questo modello richiede l'uso di un preamplificatore: l'AEP4. Il preamplificatore è necessario in quanto le grandezze in uscita dal sensore sono molto piccole. Il contatto strisciante genera molto rumore. Si cerca quindi di amplificare il più possibile il segnale in uscita dal sensore in modo che esso prevalga sul rumore prodotto dal contatto strisciante.

La sonda utilizza il fenomeno della piezoelettricità sia per generare ultrasuoni che per registrarli. Questo fenomeno, caratteristico di pochi materiali (si cita il quarzo), permette al materiale a cui si applica un differenza di potenziale di deformarsi, o meglio, contrarsi o dilatarsi. Il fenomeno funziona anche viceversa: se il materiale si contrae allora si polarizza anche elettricamente.

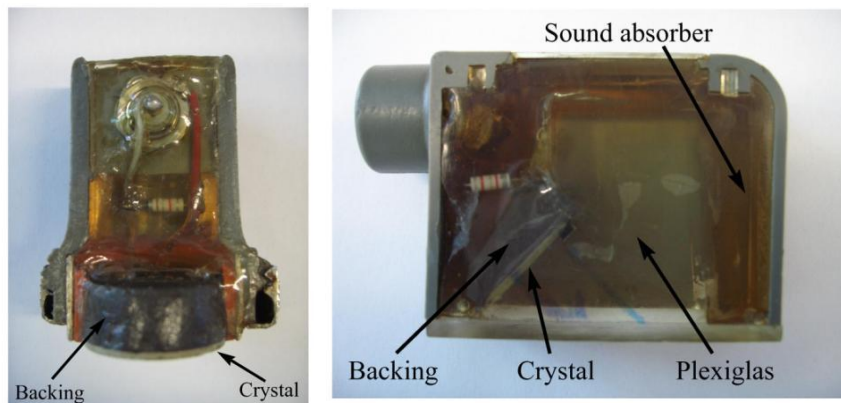


Figura 3.6 A sinistra una sonda con emissione normale. A destra una sonda ad emissione inclinata.

Bisogna distinguere la sonda ad emissione normale con una ad emissione inclinata (figura 3.6). Nel primo caso le pastiglie piezoelettriche sono direttamente a contatto con la superficie in analisi, salvo opportuni materiali per favorire

l'accoppiamento e la mancanza di bolle d'aria (grassi ed oli). Nel secondo invece le pastiglie risultano annegate all'interno di un opportuna matrice (spesso plexiglass). Per l'emissione acustica si usa una sonda del primo tipo citato.

È necessario un preamplificatore che lavori in un dominio di frequenze da 3 a 2000 kHz, valori assolutamente adatti al campo di frequenze utilizzato per l'acquisizione (230KHz – 850KHz).

Il contatto strisciante (slip ring) in dotazione al Politecnico di Milano utilizzato è della marca Michigan Scientific[29] e le caratteristiche garantite dal fornitore sono indicate nella tabella 3.1.

Tabella 3.1 Caratteristiche meccaniche del contatto strisciante.

	<b>S4</b>
Circuits	4
Current Capacity per Circuit	500 mA
Temperature Range*	-40°F to 250°F (-40°C to 121°C)
RPM Rating	12,000
Maximum Peak Noise**	0.1Ω
Weight	3.9 oz. (111 g)
Length "A" (see back)	1.3 in (33 mm)
*For operation below 0°F, specify low temperature lubricant.	
** Resistance variation across slip ring contact	

Sul catalogo dell'azienda è possibile visionare anche il disegno tecnico del componente in questione (figura 3.7).

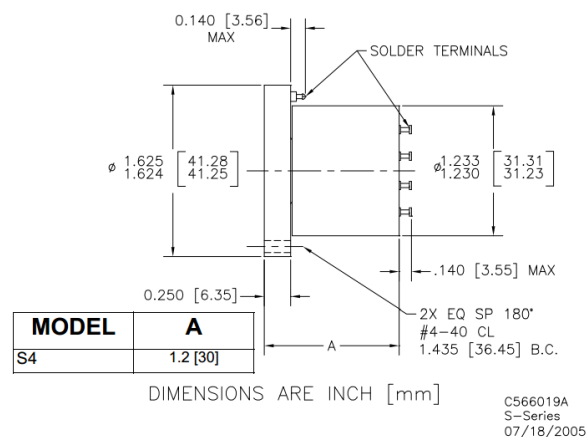


Figura 3.7 Contatto strisciante.

L'assile in analisi viene fatto ruotare alla velocità massima di 280 rpm durante il test, velocità agevolmente supportata dal contatto strisciante che garantisce ottime prestazioni fino ai 12000 rpm.

## 3.1 I risultati

Per interpretare i risultati delle misurazioni si è utilizzato principalmente il software Excel. Si ricorda che sono stati esclusi tutti i valori al di sotto dei 55,8 dB, direttamente nelle impostazioni del software di acquisizione, in modo da eliminare al minimo le contaminazioni di rumori esterni (ulteriore contromisura adottata in unione alle variazioni di velocità dello spettro di carico – capitolo 2).

Nell'arco dei 64 spettri analizzati sono stati rilevati 437268 hit, valutati su 9307072 cicli, percorsi in 563 ore circa (8,8 ore per spettro); in allegato D viene riportata una tabella che lega tutte queste grandezze spettro per spettro.

Interessante effettuare a priori un confronto (figura 3.8) tra le misurazioni del I spettro e dell'ultimo (il LXIV); ogni punto verde viene identificato con un hit.

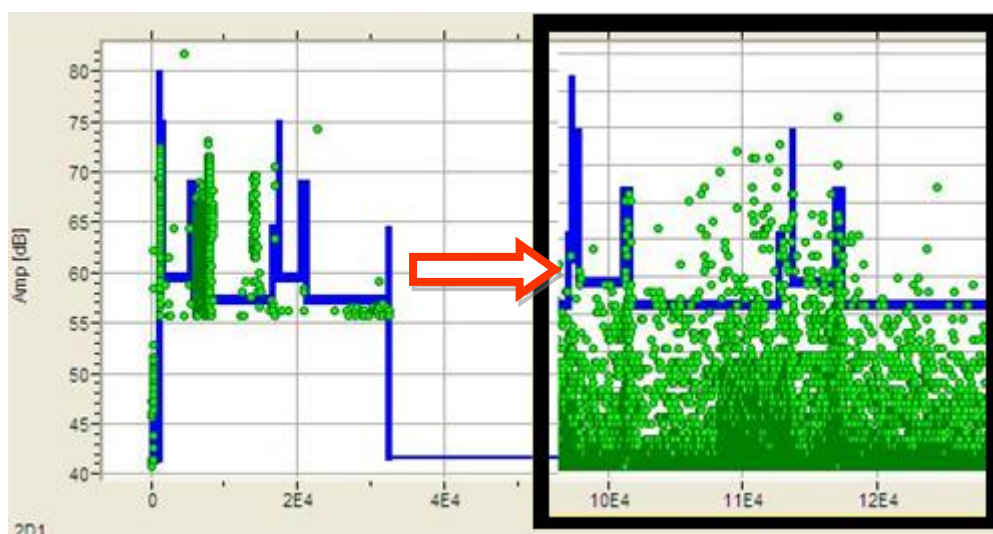


Figura 3.8 Confronto rilevazioni AE tra il I e il LXIV spettro.

Come risulta evidente il numero di rilevazioni AE è aumentato considerevolmente. Un risultato del genere era prevedibile: all'aumentare della propagazione il fronte della cricca aumenta per dimensione e velocità. Per una propagazione ulteriore viene coinvolto più materiale e quindi vi è un numero mag-

giore di eventi AE (figura 3.9). Inoltre dato che aumenta anche la velocità di propagazione si registreranno in una fissa finestra temporale più eventi.

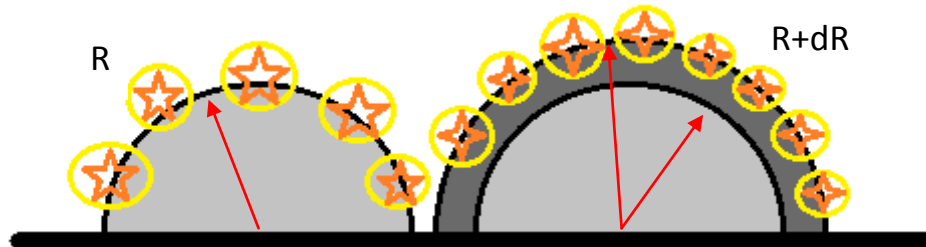


Figura 3.9 Aumento del numero di eventi AE all'aumentare del raggio.

Ovviamente non è solo questo il fattore ad incidere sul numero di AE.

Si ricorda che il numero di eventi non corrisponde unicamente ad una rottura del materiale: vi possono essere anche segnali derivanti dal riordinamento del reticolo cristallino (queste però sono di intensità minore) e per fenomeni di micro - scorrimento delle dislocazioni del reticolo. Estremamente interessante a questo proposito è visionare la fisionomia dei grafici durante i primi spettri di carico (dal IV al XV spettro). Si può riconoscere un comportamento univoco: un aumento sensibile delle misurazioni AE nei passaggi tra i differenti livelli della sequenza di carico (figura 3.10).

Utilizzando gli altri CND fino al XV ciclo non vengono evidenziate possibili cricche generatesi dai difetti artificiali A e B. Assumendo dunque che non vi sia ancora stata la formazione di una cricca visibile le rilevazioni AE potrebbero indicare comunque la formazione di una pre - cricatura, il passaggio cioè dalla cricca artificiale prodotta per erosione a quella naturale.

Dalla figura 3.10 è possibile notare un aumento generale, con il procedere degli spettri, di eventi AE anche in quei periodi non caratterizzati da aumenti o diminuzioni del carico.

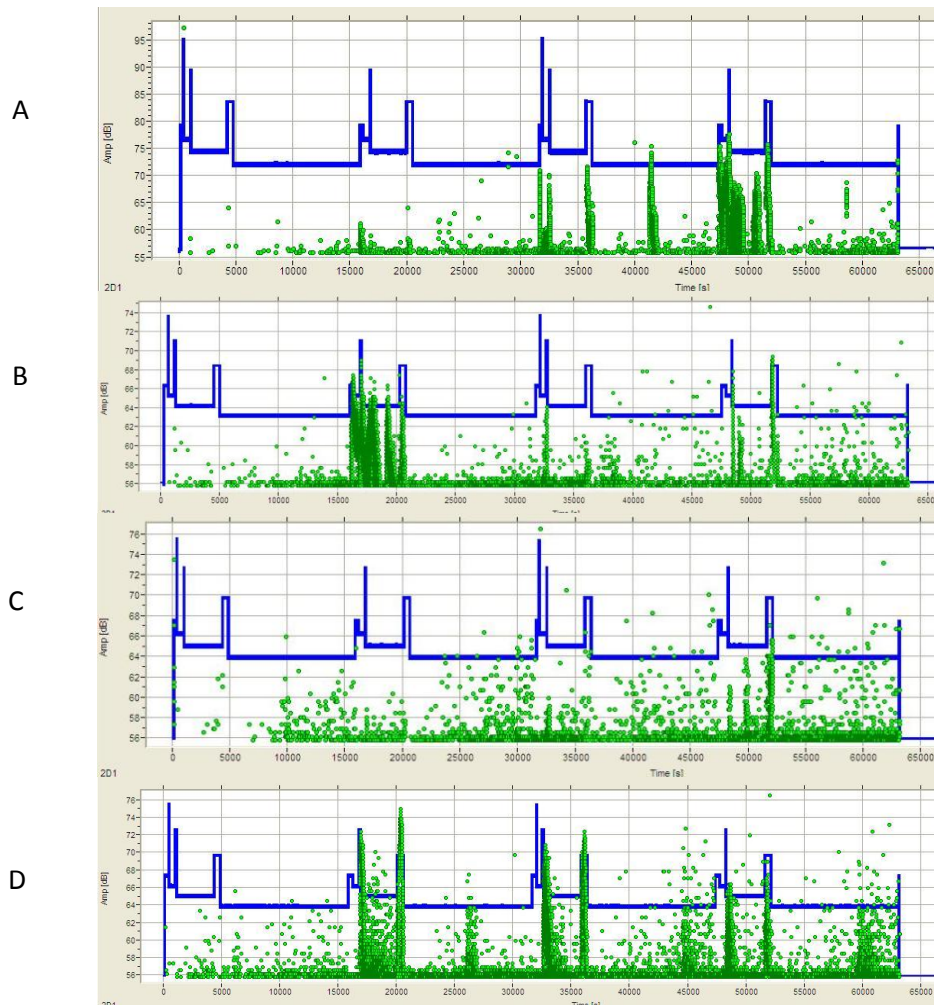


Figura 3.10 A – III e IV. B – VI e VII. C – XI e XII. D – XIV e XV.

Dal XVI spettro a seguire gli eventi AE si configurano in ordine sempre più sparso. Per aumentare la possibilità e la velocità di propagazione della cricca in tempi più ristretti si è cercato di sollecitare l'assile con più spettri di seguito; per questo motivo questa seconda fase è caratterizzata da una risposta dell'emissione acustica che rileva minori eventi nel primo spettro di carico rispetto agli altri (figura 3.11 e 3.12).



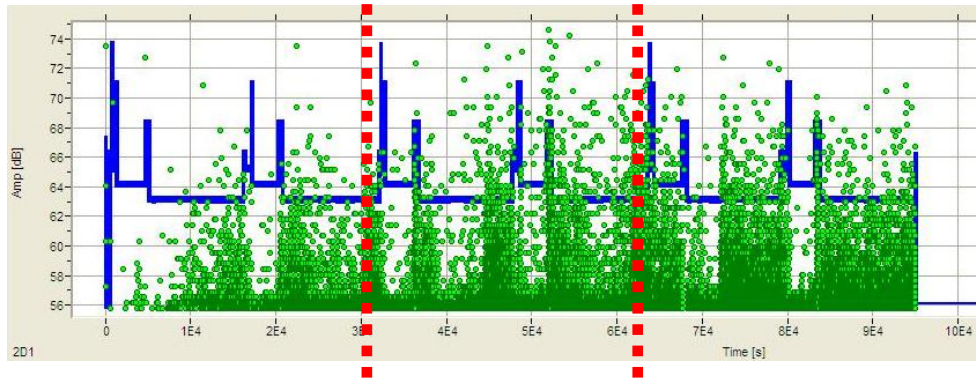


Figura 3.11 XXVI, XXVII e XXVIII spettro.

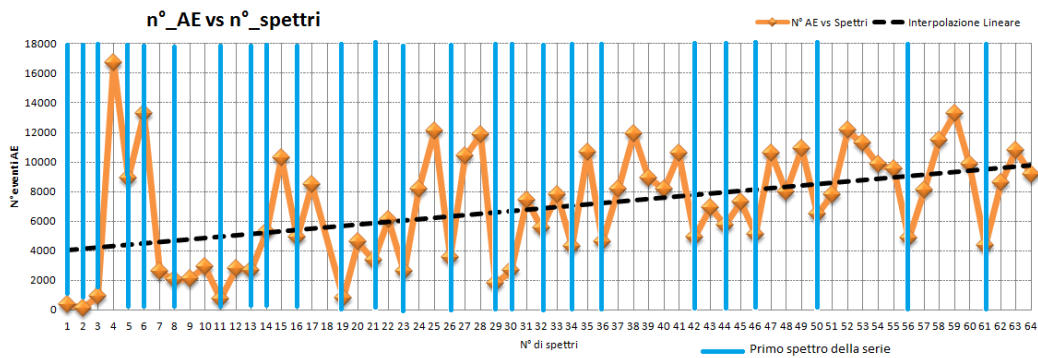


Figura 3.12 Andamento del numero di eventi evidenziando lo spettro di partenza di una serie.

È possibile indagare più a fondo sulla questione con ulteriori test ma la spiegazione più plausibile è che l'emissione acustica aumenti con l'aumento di temperatura (dell'olio dei cuscinetti, dell'assile ...).

Con l'emissione acustica però si può confermare ciò che è stato documentato nella sezione 1.4.1.7 riguardante gli effetti dell'interazione del carico: la propagazione di una cricca riduce in maniera intensa il suo progredire al susseguirsi di un sovraccarico. Si veda infatti dai grafici sopra riportati che il numero di eventi AE risultano indebolirsi a seguito del sovraccarico per poi riprendere di densità a poco a poco.

Nella fase finale del test, vengono riportati gli ultimi spettri (figura 3.13), e si evidenzia l'aumento di eventi AE auspicato. Inoltre nella figura 3.13 B sono state

evidenziate le zone maggiormente “scariche” di eventi AE; si osservi che queste zone avvengono proprio successivamente ad un sovraccarico dell’assile.

Per ogni spettro viene ri - generato su excel il grafico in output dal Visual Vallen e calcolati:

- Numero di eventi;
- Ampiezza media [dB];
- Energia media [eu =  $10^{-14}V^2s$  ];



Figura 3.13 A - XLII e XLIII spettro. B – LVI, LVII, LVIII e ILX.

Oltre ad aver imposto il limite di un’intensità minima pari a 55,8 dB di un generico hit AE per l’acquisizione, si è deciso di eliminare tutti quei segnali che avessero:

- Rise time > 1000µm;
- Duration > 10000µm;
- Carico < 30kN.

Le prime due limitazioni vengono giustificate dall’ipotesi che la propagazione di una cricca emette un evento AE molto simile a quello generato dal test di Hsu – Nielsen (sezione 1.4.3.4). La terza invece è garante della selezione di eventi AE



generati durante i test veri e propri, dove mai il carico è inferiore a 30kN appunto (tabella 2.1 Spettri di carico). Vengono contati il numero di eventi misurati per ogni spettro e contestualizzati lungo tutta la durata del test; il risultato viene inserito in figura 3.14.

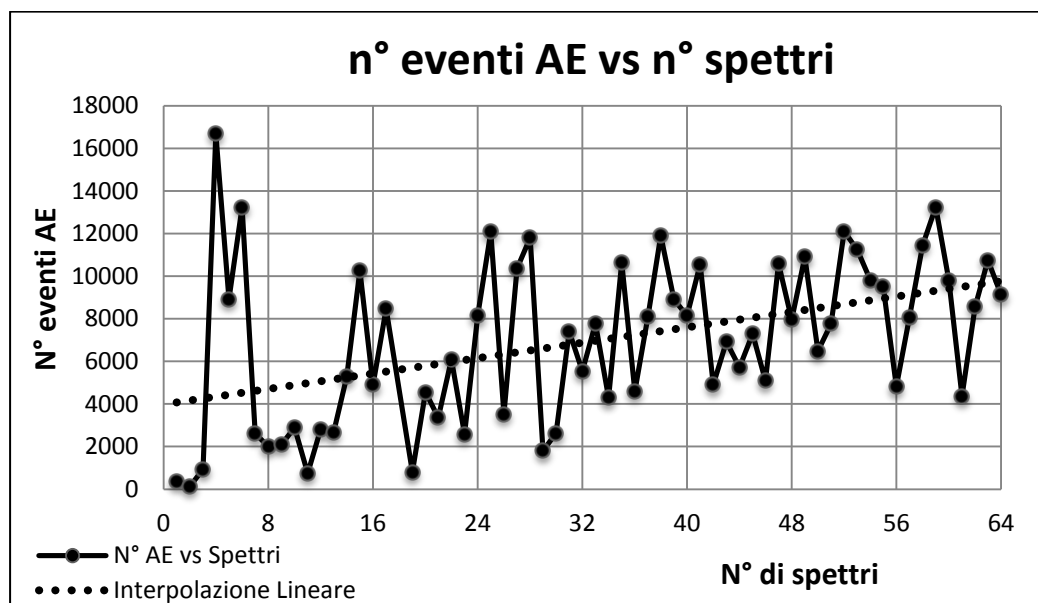


Figura 3.14 Andamento del numero di eventi AE.

Nei primi 20 spettri di carico i valori sono decisamente alti (lo saranno anche per l'energia e l'intensità del segnale) quindi si può supporre ancora una volta che essi indichino la pre - cricca della assile. Come ci si aspettava il numero di eventi è mediamente aumentato al susseguirsi degli spettri: la linea interpolante, a coefficiente angolare positivo, denota un aumento medio di circa 6000 eventi per spettro. Si evidenzia una deviazione standard di 3810 eventi, quindi vi è senza dubbio una elevata dispersione dei dati. In letteratura vengono spesso analizzati gli andamenti delle cumulate per quanto riguarda l'incremento degli eventi AE[30]. Gli ingegneri Oliveira e Marques dell'università di Porto, data la grande quantità di disturbi nella misurazione, hanno ipotizzato uno studio quantitativo delle diverse misurazioni AE, e non uno studio qualitativo dei singoli segnali. Questo approccio viene suggerito anche da ASTM – International[31] per l'analisi dell'AE in strutture sollecitate. L'andamento della cumulata per la propagazione a fatica viene inserita in figura 3.15 e può essere confrontata con la figura 1.35.

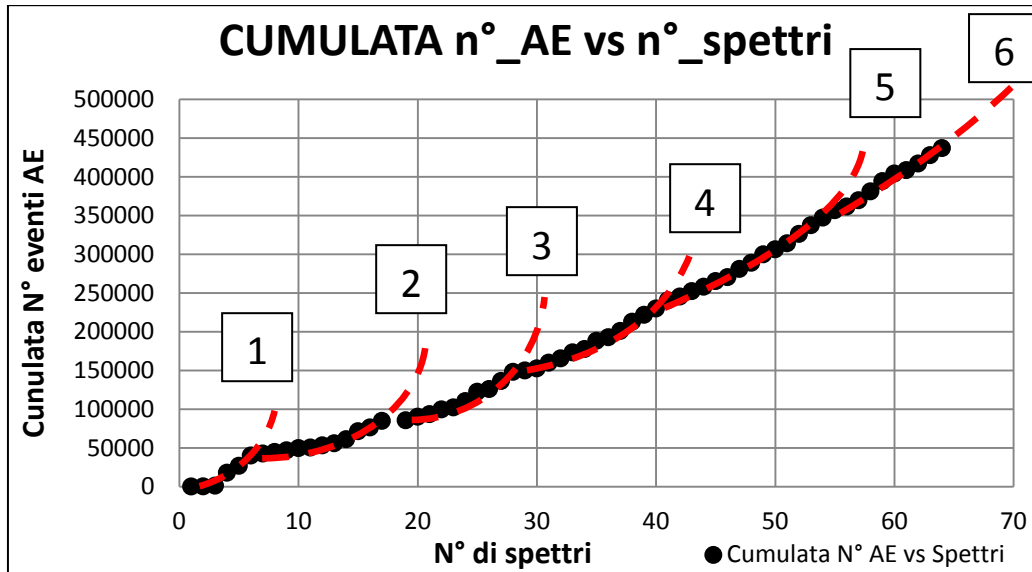


Figura 3.15 Andamento della cumulata eventi AE.

L'andamento della cumulata è molto interessante proprio perché evidenzia i diversi step di propagazione della cricca. Si confronta la cumulata degli eventi AE con i risultati phased array (figura 3.16) evidenziando la propagazione della cricca.

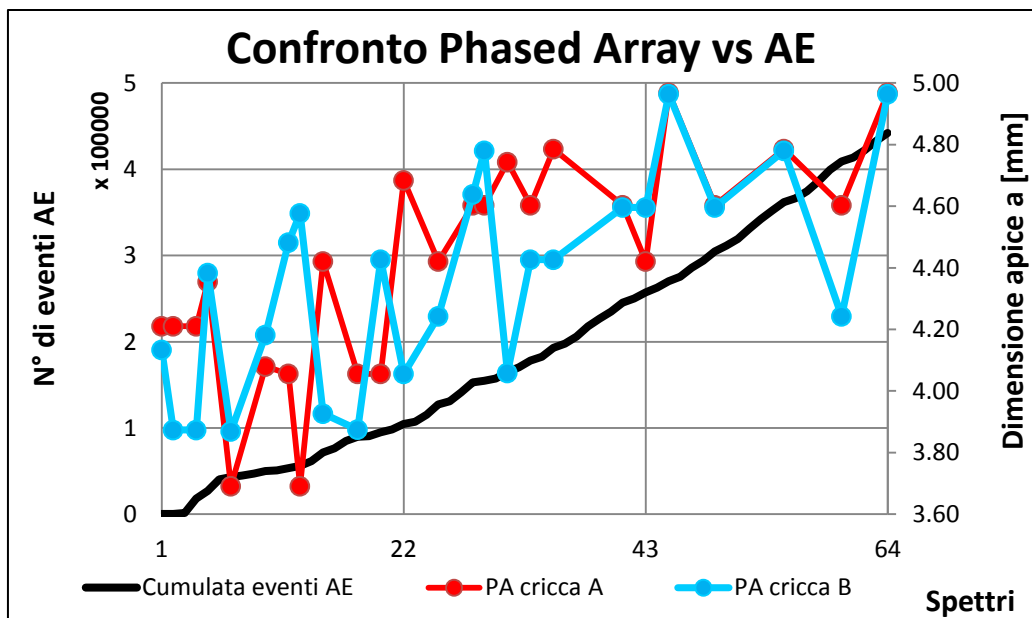


Figura 3.16 Confronto Phased Array e cumulata eventi AE.

Ulteriori analisi possono essere eseguite studiando il grafico che relaziona le ampiezze medie degli eventi misurati per ogni spettro con il numero di spettri eseguiti (figura 3.17).

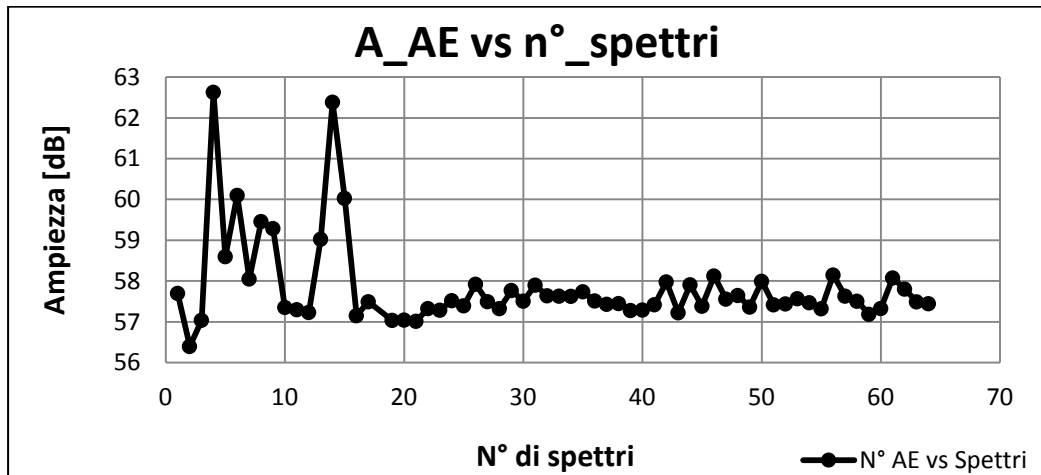


Figura 3.17 Andamento dell'ampiezza media.

L'ampiezza media dei segnali non è aumentata nel tempo. A partire dal XVI spettro si è stabilizzata sui 57,5 dB. La variazione dell'ampiezza media nei primi 20 spettri può indicare la pre - criccatura già precedentemente citata.

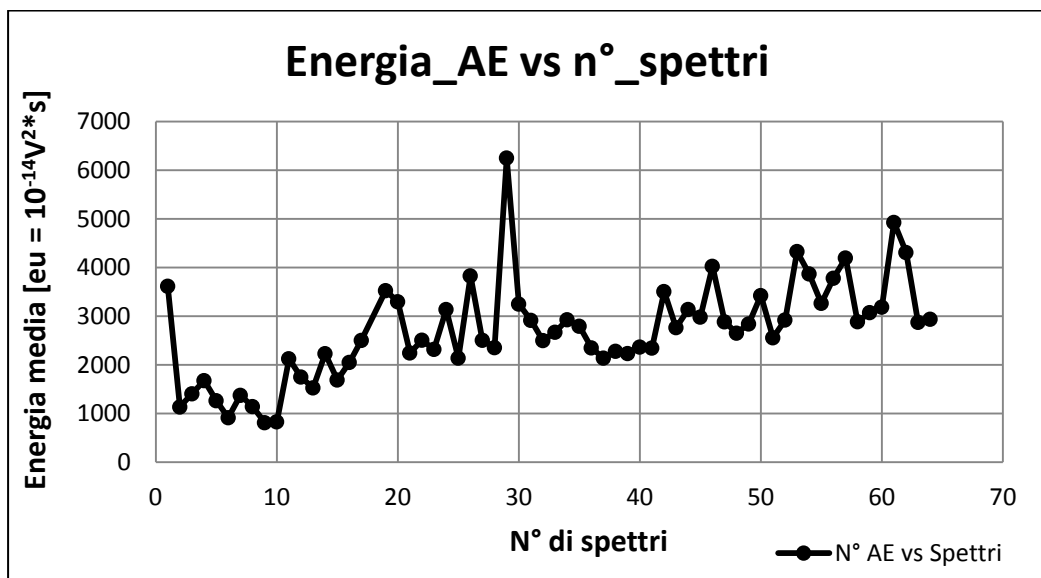


Figura 3.18 Andamento dell'energia media.

Viene valutato infine, per quanto riguarda l'analisi della totalità degli eventi AE, l'andamento dell'energia media delle misurazione per spettro (figura 3.18). L'energia media considera l'ampiezza del segnale e il numero di eventi.

Anche questa correttamente ha un andamento crescente coerente con la teoria.

## 4 - Analisi degli sforzi in un assile

In questo capitolo si vuole determinare lo stato di sollecitazione dell'assile durante il test. Gli sforzi nell'assile sono determinati da:

- ✓ il momento flettente generato dal carico;
- ✓ calettamenti di cuscinetti \ ruote;
- ✓ gli sforzi residui del processo di rullatura a freddo.

Per ricavare gli sforzi totali può essere utilizzato il principio di sovrapposizione degli effetti e quindi calcolare indipendentemente i tre contributi. Per i primi due contributi, ovvero lo stato di sollecitazione nell'assile causato dal momento flettente generato dal carico e quello generato dal calettamento dei cuscinetti, si produce un'analisi FEM con il software ABAQUS 6.11.

Gli sforzi residui dovuti al processo di rullatura a freddo vengono misurati sperimentalmente attraverso la diffrattometria (le misurazioni verranno effettuate con il cuscinetto già calettato sull'assile, di conseguenza verrà misurata la risultante di questi due contributi).

### 4.1 Analisi FEM

#### 4.1.1 Effetti del momento flettente

L'assile è stato modellato in Abaqus partendo da una sezione bidimensionale che rivolta genera il modello 3D (figura 4.1).

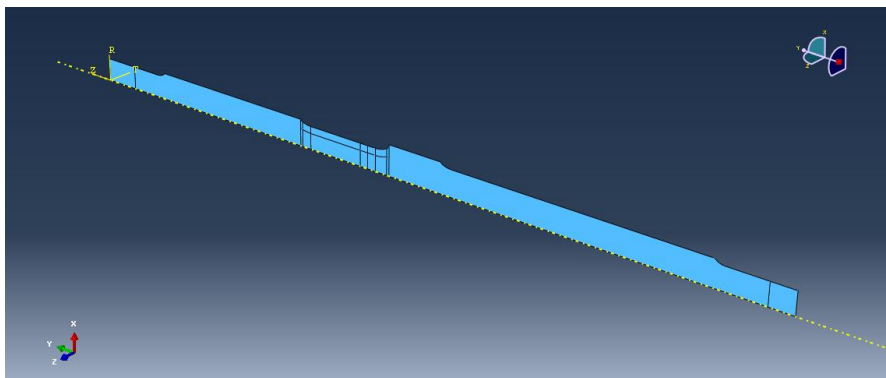


Figura 4.1 Sezione per la rivoluzione.

Si può notare nella zona rullata la presenza di ulteriori linee (partitions): saranno utili per la creazione della mesh; questo passaggio avviene prima della rivoluzione della sezione. La mesh in questa regione, cioè fino a 20mm di profondità, viene infittita imponendo una dimensione degli elementi finiti di 1mm. Al centro di questa regione si deve immaginare la presenza della cricca, posta a 70mm dall'inizio della parte centrale dell'assile a 150mm di diametro.

In questa regione di interesse viene utilizzata una *mesh structured*, proprio per garantire una maggiore regolarità degli sforzi tra un elemento ed un altro. In tutte le restanti parti viene impostata una *mesh free* con la quale Abaqus ha una maggior libertà di creazione dell'elemento finito. In figura 4.2 viene evidenziato come appare la mesh del componente.

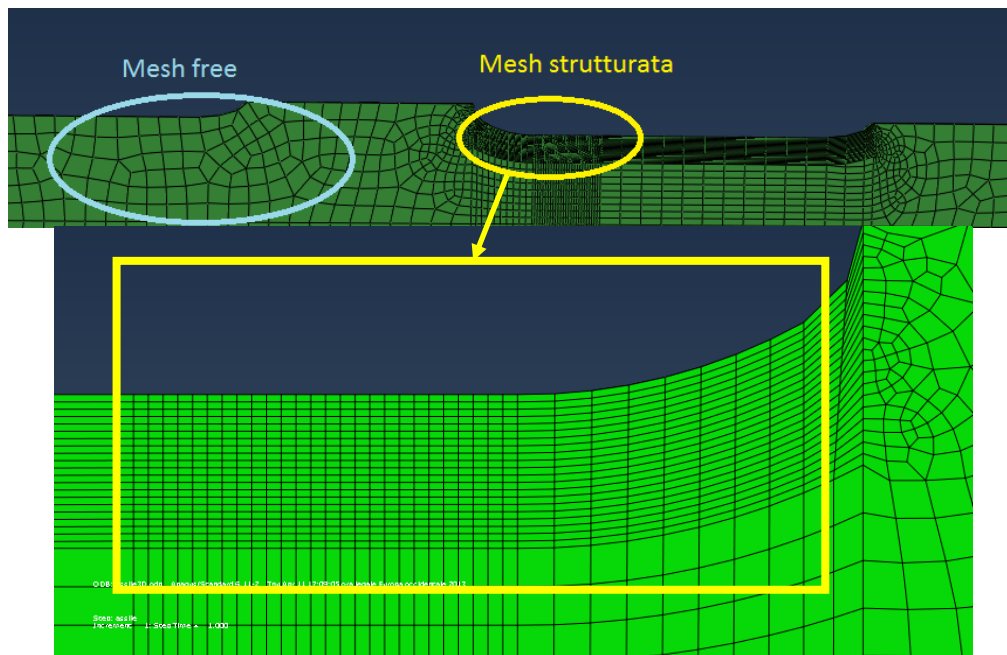


Figura 4.2 Mesh della sezione e dettaglio mesh strutturata.

Viene assegnato il carico (puntiforme, assegnato al centro della regione dove è calettato il cuscinetto dell'attuatore), i vincoli (cerniera e carrello al centro della regione in cui sono calettati i cuscinetti laterali) e il materiale (206Gpa e coefficiente di Poisson pari 0,33). È sfruttata la simmetria dell' assile generando la parte con una rotazione della sezione di 180° - figura 4.3 - e non di 360° (in questo modo viene alleggerito il software durante il calcolo degli sforzi).

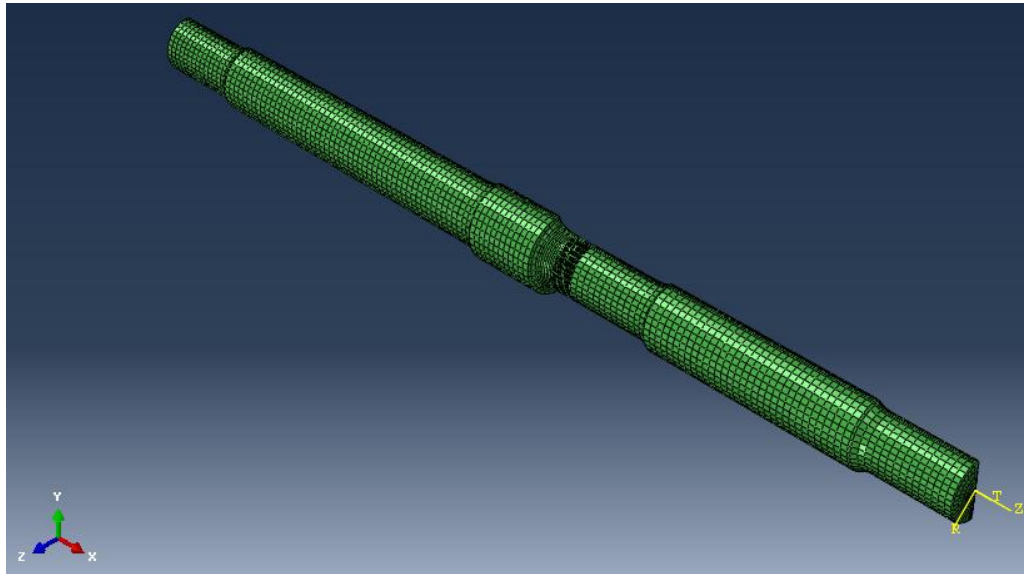


Figura 4.3 Modello CAD per la simulazione.

Il carico imposto è stato impostato tale che al centro della cricca, in superficie, vi sia uno sforzo assiale (cioè in direzione di apertura della cricca) pari a 100MPa.

Per una sezione circolare il  $\sigma_f$  è pari a:

$$\sigma_f = \frac{32 \cdot M_f}{\pi \cdot D^3} \quad [4.1]$$

$$M_f = F / b \quad [4.2]$$

Dove F, in questo caso, è pari alla reazione vincolare nel carrello (uguale a quella nella cerniera) e b pari al braccio (829mm distanza cricca – vincolo). Tenendo conto che il modello è solo metà ricaviamo dai calcoli analitici una forza pari a 26018N per ottenere sulla cricca una sollecitazione di 100Mpa in direzione assiale. In abaqus S22 identificherà la direzione assiale, S11 quella radiale e S33 quella circonferenziale.

Come ulteriore verifica della buona riuscita del calcolo FEM si analizzerà l'andamento del momento flettente, assicurandosi che abbia la tipica geometria a “doppia farfalla” in direzione assiale.

L'analisi col calcolatore restituisce lo stato di sollecitazione evidenziato in figura 4.4; tutti gli sforzi aventi modulo maggiore di 100Mpa sono stati colorati in grigio.

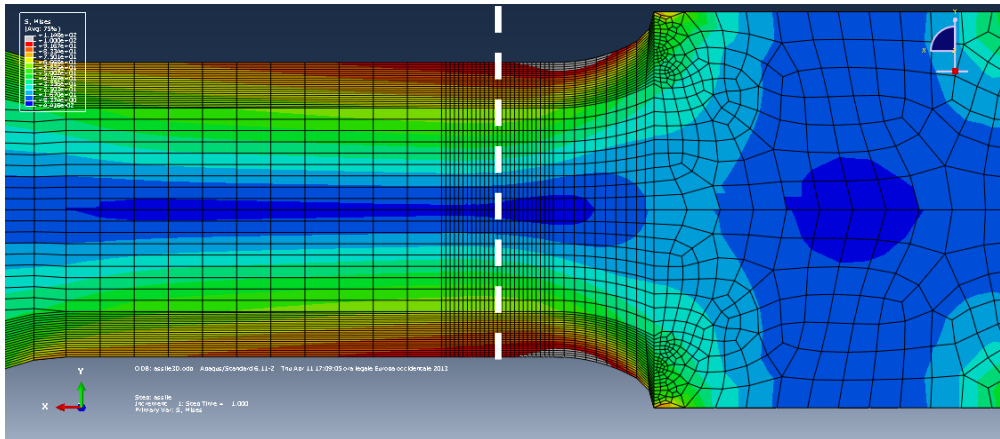


Figura 4.4 Andamento degli sforzi di Von Mises nell'assile (la linea bianca tratteggiata evidenzia la posizione della cricca).

Lo stato di sforzo nelle tre direzioni principali S11, S22, S33 risulta essere da aspettativa (figura 4.5 a, b); ovvero la zona risulta scarica delle componenti S11 e S33 (radiale e circonferenziale).

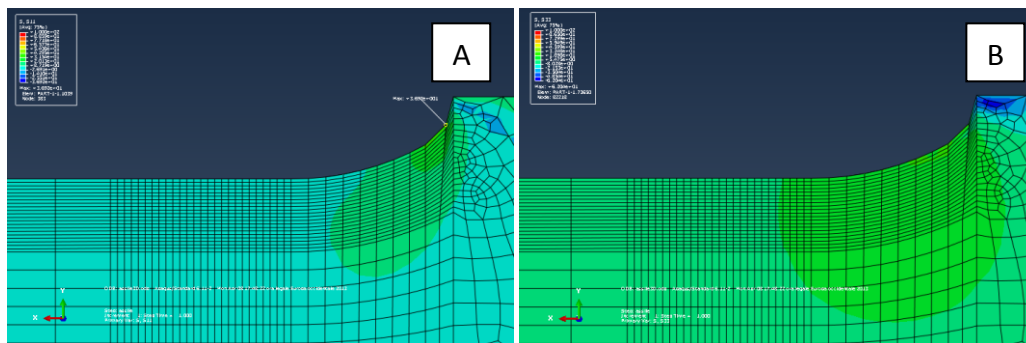


Figura 4.5 a – S11; b – S33 (la linea bianca tratteggiata evidenzia la posizione della cricca).

Come si poteva presupporre l'unica componente che influisca sulla zona interessata, e che per altro è alla causa dell'apertura della cricca secondo il modo I (sezione 1.4.1.2), è la componente assiale S22 (figura 4.6).



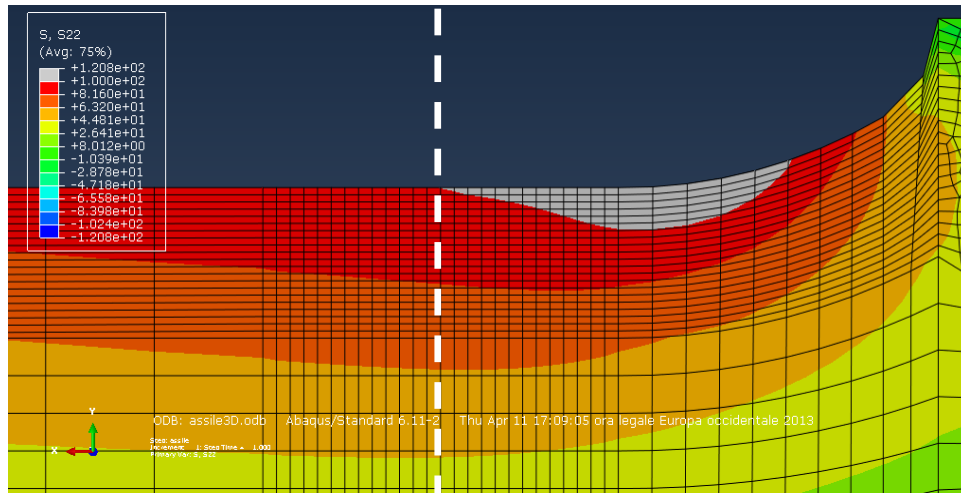


Figura 4.6 Componente S22 (la linea bianca tratteggiata evidenzia la posizione della cricca).

Come si può notare la regione grigia inizia proprio dove è presente la cricca. Questo può essere utilizzato come verifica di un corretto calcolo del carico.

Il software restituisce il valore di sforzo per ogni direzione principale, in ogni nodo, e, prendendo in considerazione solo le componenti in direzione assiale, si ricava l'andamento di figura 4.7.

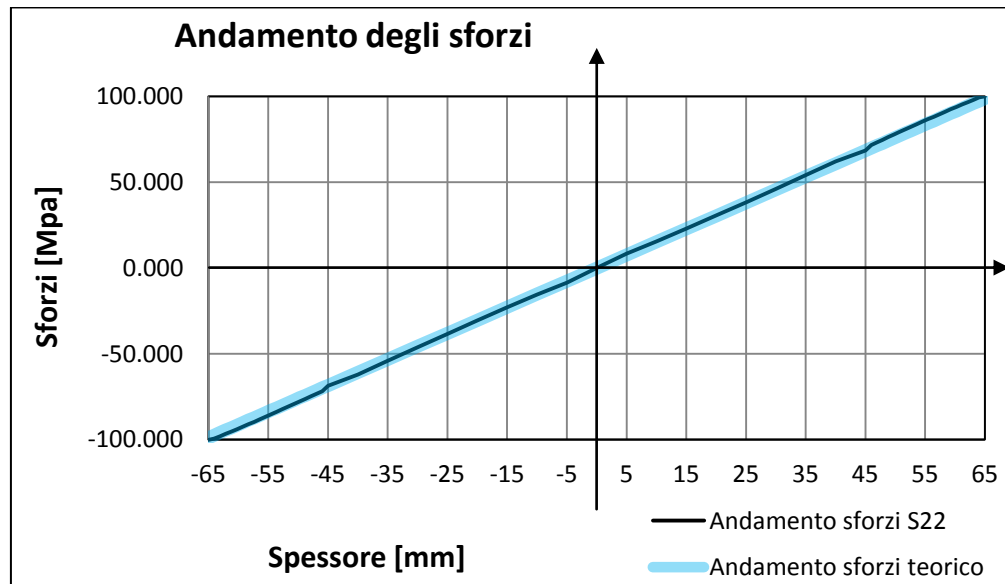


Figura 4.7 Andamento degli sforzi in direzione assiale.

Di seguito si inseriscono i valori restituiti da Abaqus e il calcolo teorico degli sforzi assiali I tre punti considerati sono gli estremi della sezione (figura 4.8), che come da aspettativa risultano uguali e opposti, e un punto al centro sull'asse neutro, che risulta giustamente scarico. Gli stessi valori tra calcolo teorico e FEM risultano simili.

Tabella 4.1 Valori degli sforzi in 3 punti di interesse.

Y	Spessore	Mpa	Mpa teorico
65	0,00	100,069	98,87
0,00	65,00	0,000	0,00
-65,00	130,00	-100,069	-98,87

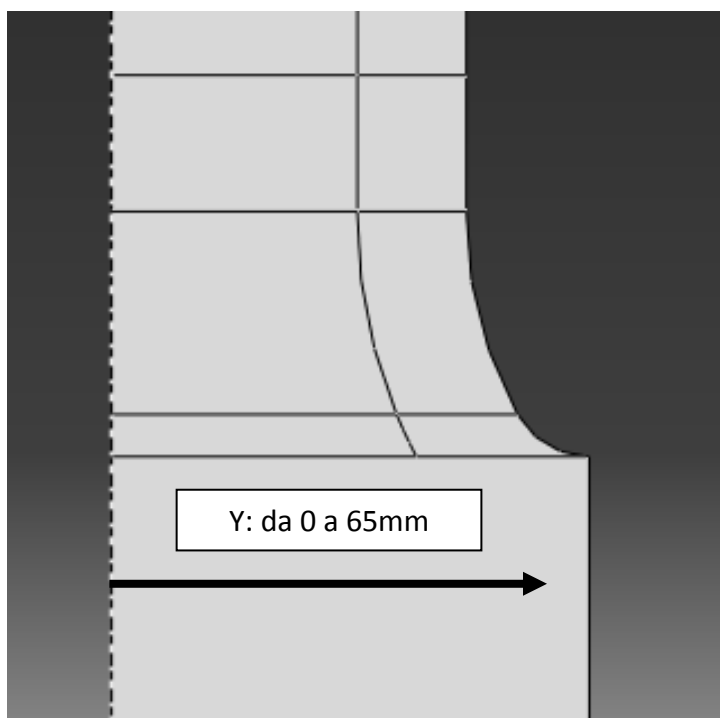


Figura 4.8 Asse y di riferimento.

### 4.1.2 Effetti dell'accoppiamento forzato

Si vogliono ora analizzare gli effetti del calettamento del cuscinetto al centro dell'assile sfruttando sempre il software Abaqus 6.11.

Non è necessario in questo caso manovrare una geometria tridimensionale, ma, data la natura assialsimmetrica del problema, è sufficiente modellare in due dimensioni l'assile stesso.

Deve essere disegnata in Abaqus una nuova parte: quest'ultima acquisisce le sembianze del cuscinetto e, nella creazione del modello, verrà posta in interferenza con l'assile. Il calettamento del cuscinetto inoltre può simulare anche gli effetti che genera il montaggio delle ruote in un assile reale.

Si impone un'interferenza di 0,3mm (figura 4.9) che, in questo modello bidimensionale però, deve essere divisa in due: l'interferenza inserita nel software sarà dunque pari a 0,15mm.

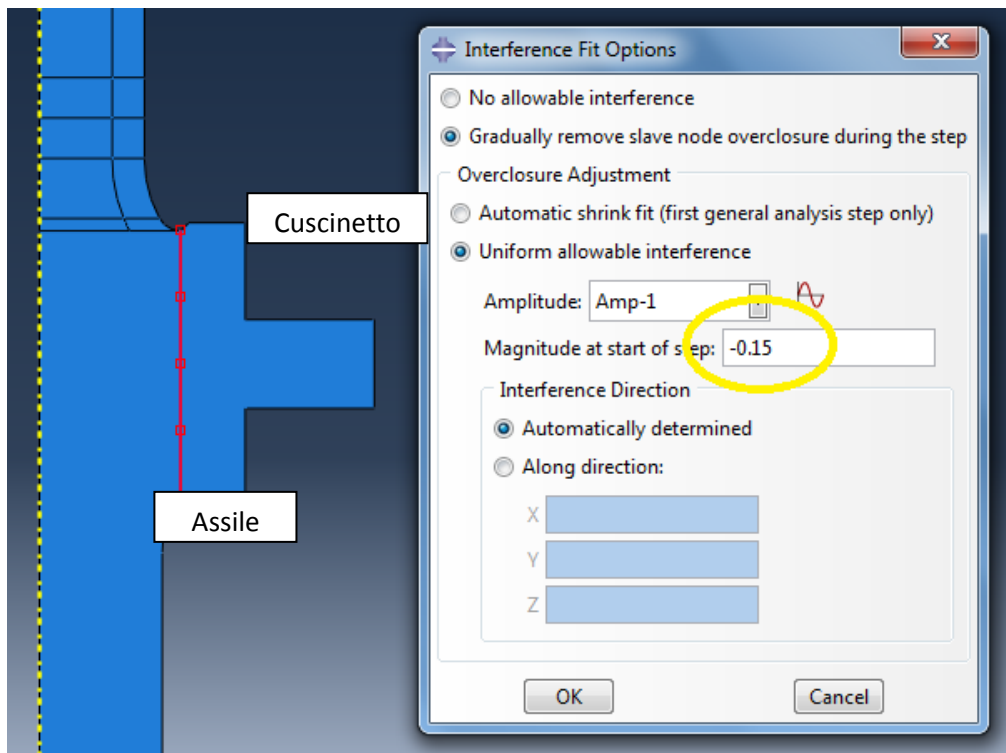


Figura 4.9 Modellazione dell'accoppiamento forzato in Abaqus.

Abaqus restituisce valori di sforzo decisamente bassi all'intorno della cricca (figure 4.10 e 4.11).

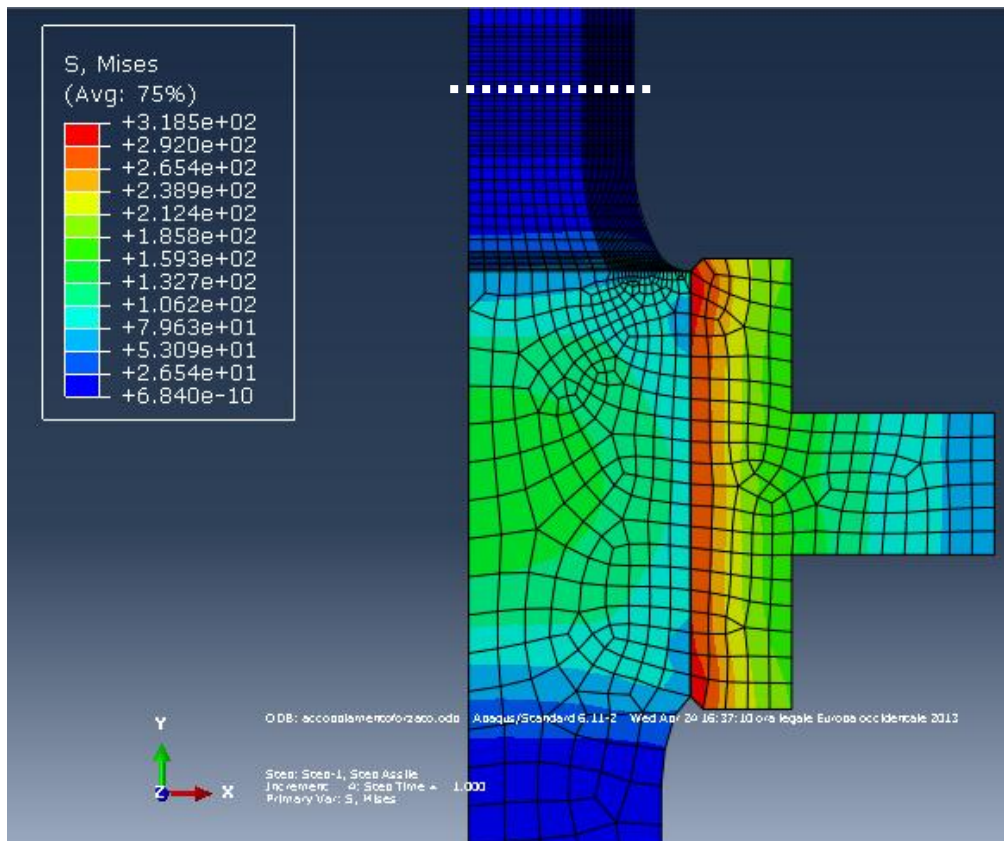


Figura 4.10 Andamento degli sforzi di Von Mises nell'assile per l'interferenza (la linea bianca tratteggiata evidenzia la posizione della cricca).

Si osservi in figura 4.11 C come appaiono gli sforzi circonferenziali nelle due parti.

L'assile, compresso dal calettamento, ha uno stato di sforzo principalmente di compressione appunto; al contrario risulta totalmente tratta la parte che modella il cuscinetto o la ruota. Questo sicuramente dimostra ulteriormente che è stata effettuata un'analisi corretta.

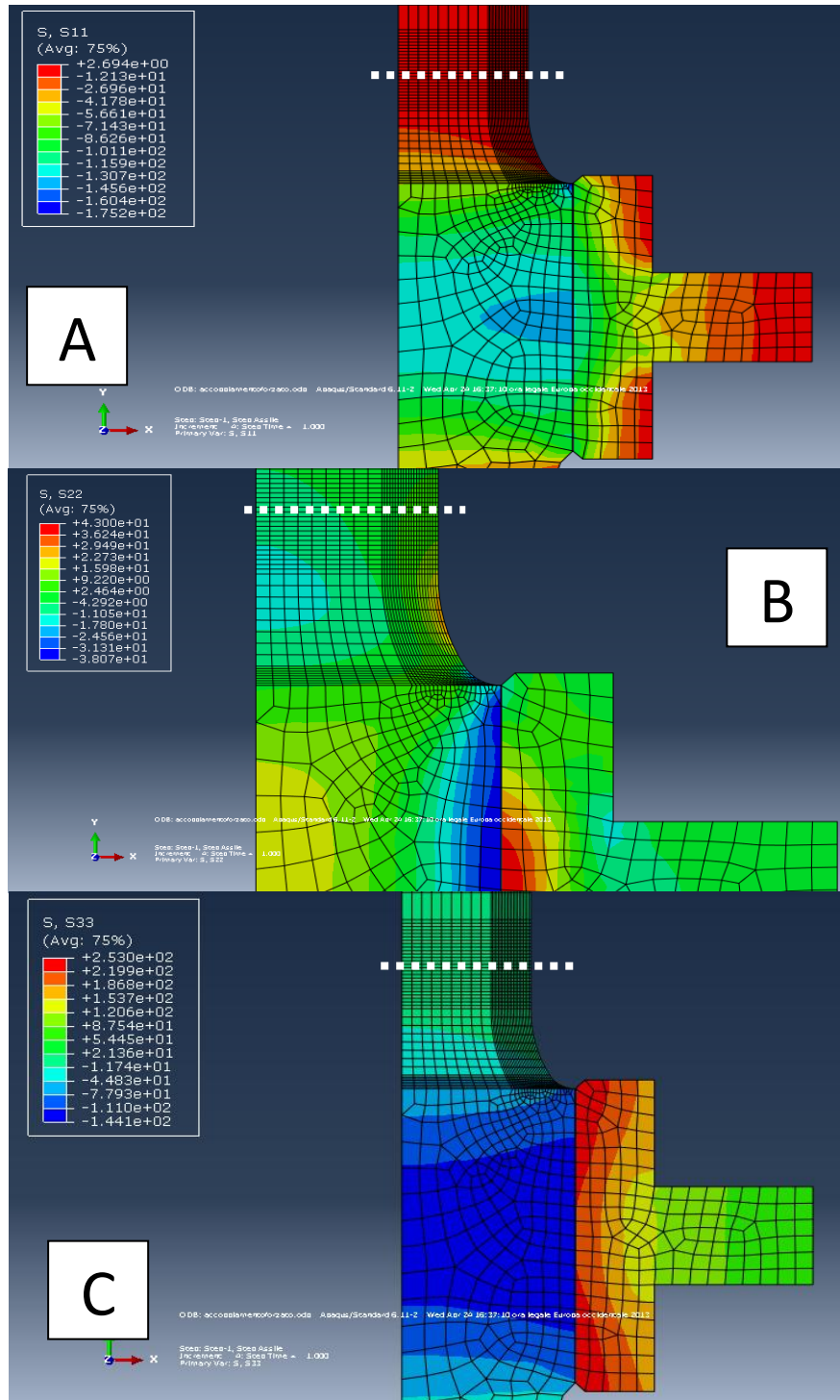


Figura 4.11 A – sforzi radiali. B – assiali. C – circonferenziali (la linea bianca tratteggiata evidenzia la posizione della cricca).

Come è stato detto precedentemente lo scopo dell'analisi è il ritrovamento dello stato di sforzo in direzione assiale nella sezione della cricca (figura 4.12).

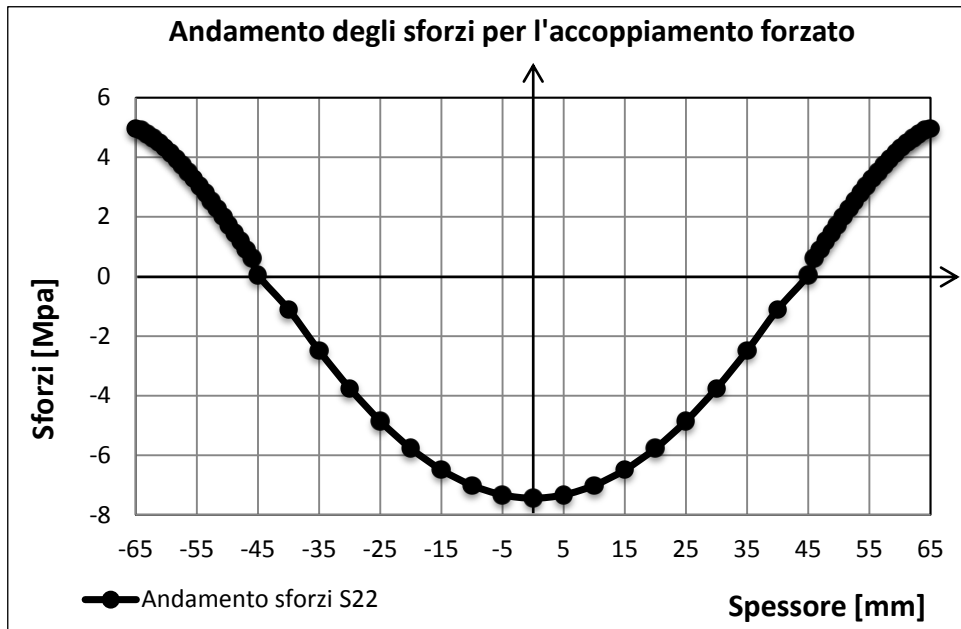


Figura 4.12 Andamento degli sforzi assiali per il press – fit.

Poiché la sezione della cricca è posizionata distante a circa settanta millimetri dal calettamento forzato gli effetti di quest'ultimo si sono già diradati sufficientemente. Gli sforzi a trazione risultano, come da aspettativa, bassi. Essendo il problema assialsimmetrico la totalità degli sforzi lungo tutto lo spessore è stata ritrovata per simmetria; l'analisi infatti era stata prodotta considerando solo 65mm di profondità (metà sezione).

Prendendo in riferimento la figura 4.8 vengono evidenziati i valori delle sollecitazioni di 5 punti interessanti (tabella 4.2).

Tabella 4.2 Valori degli sforzi in 5 punti di interesse.

y	Spessore	[Mpa]
65	0,00	4,970
45,00	20,00	0,047
0,00	65,00	-7,438
-45,00	110,00	0,047
-65,00	130,00	4,970

Agli estremi risulta evidente una bassa presenza di sforzi trattivi che si annullano poco a poco lungo lo spessore fino a circa 20mm. Dopo gli sforzi divengono a compressione aumentando fino alla mezzeria dell'assile e raggiungendo il modulo massimo di circa 7,5 Mpa.

Si è voluta eseguire questa modellazione per completezza della trattazione. I valori sopradescritti non verranno presi in considerazione poiché le misurazione con il diffrattometro descritte a breve vengono effettuate con il cuscinetto calettato: queste comprendono già il contributo del press – fit.

### 4.2 Misurazione degli sforzi residui

Sempre nel tentativo di ricercare il reale andamento degli sforzi all'interno dell'assile vengono misurate le sollecitazioni interne residue con il metodo della diffrattometria a raggi X (figura 4.13).



Figura 4.13 Il diffrattometro montato sull'assile.

Si ricorda infatti che al fine di migliorare il comportamento e il rendimento dell'assile, quest'ultimo è stato sottoposto, durante il suo ciclo tecnologico, a un processo di rullatura (in questo caso in una zona limitata). La rullatura equivale ad un trattamento superficiale ed, inducendo elevati sforzi di compressione, va ad inficiare positivamente sulla resistenza a fatica dell'assile.

### 4.2.1 I principi della diffrattometria

La diffrattometria è un metodo non distruttivo per la misurazione delle tensioni di componenti metallici. Si basa sull'utilizzo di fasci concentrati di raggi X, onde elettromagnetiche (la stessa natura della luce – figura 4.14) con lunghezza d'onda  $\lambda$  particolarmente bassa (compresa tra  $6 \times 10^{-12}$  e  $10^{-9}$  m); queste lunghezze d'onda sono dello stesso ordine di grandezza delle distanze atomiche all'interno del reticolo cristallino dei metalli. I raggi X non vengono influenzati ne da campi magnetici ne campi elettrici e hanno la proprietà di essere diffratti dai reticoli cristallini (presenti in tutti i metalli).

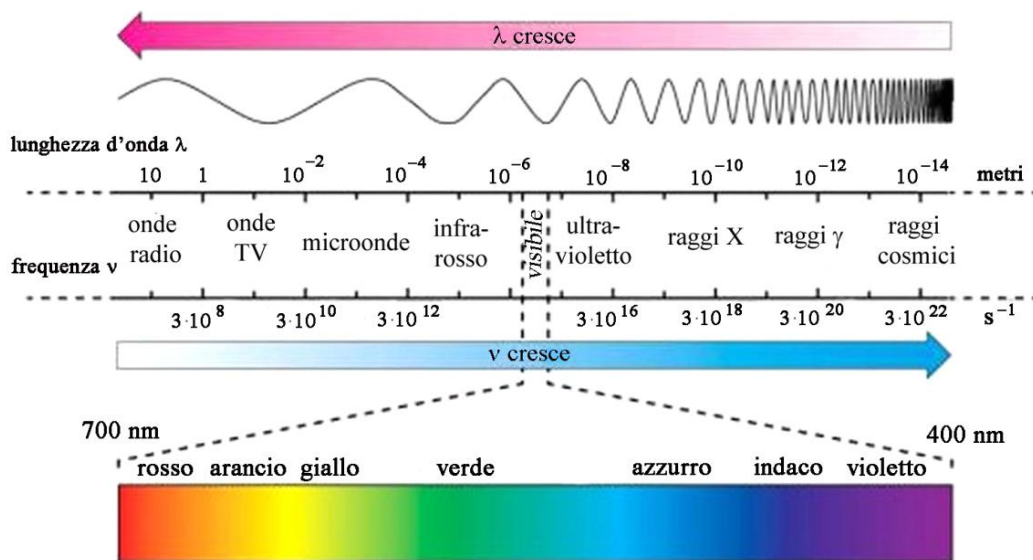


Figura 4.14 Insieme delle onde elettromagnetiche.

La bassa energia che caratterizza le onde dei raggi X non permette una grande penetrazione all'interno del materiale.

La diffrazione è un fenomeno che può essere descritto dalla legge di Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \vartheta \quad [4.3]$$

Dove  $n$  è un numero intero e definisce l'ordine di diffrazione e  $d$  è la distanza interplanare dei piani cristallini, con  $\vartheta$  angolo di Bragg (figura 4.15). I piani cristallini e la loro direzione vengono descritti dagli indici di Miller.



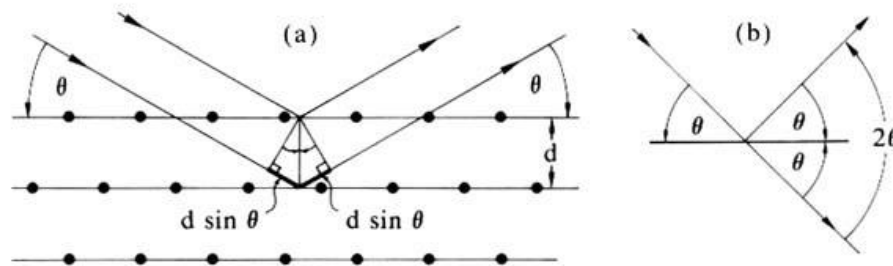
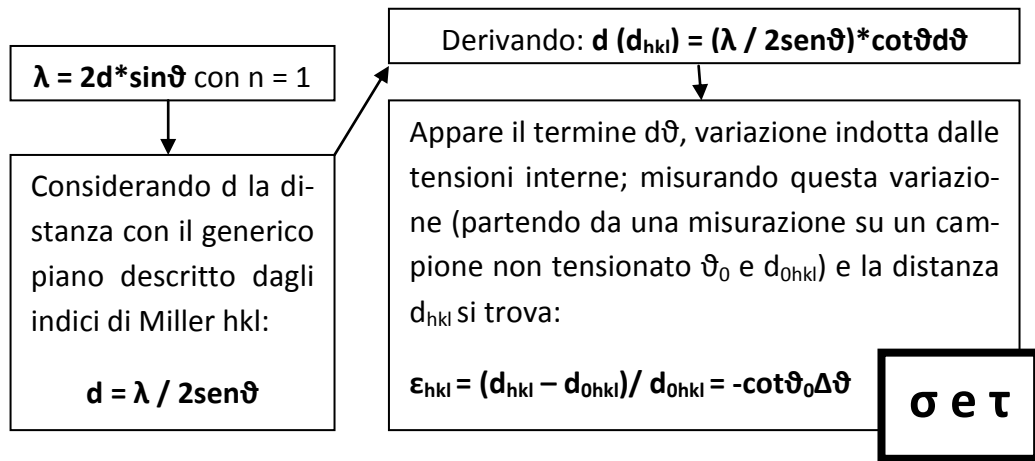


Figura 4.15 Legge di Bragg.

La legge di Bragg stabilisce che i raggi X vengono riflessi specularmente da piani paralleli di atomi. I raggi X così riflessi devono però sommarsi costruttivamente; ecco perché nella legge è inserito il parametro “n”. Poiché  $\text{sen} \vartheta \leq 1$  ne consegue che  $\lambda \leq 2d$  e viene dunque fissato il massimo valore della lunghezza d’onda accettabile perché valga la legge (ecco perché solo i raggi X vanno bene per lo scopo). Si avrà quindi diffrazione solo per certi angoli. Il metodo si basa sul fatto che quando il materiale è sollecitato da tensioni residue la distanza interplanare “d” varia in funzione dell’entità dello stress; allo stesso modo varia il modulo dell’angolo di Bragg  $\vartheta$  e quindi valutando le variazioni di quest’ultimo si può risalire all’entità degli sforzi. Il principio che governa il metodo viene descritto brevemente nel diagramma a seguire:



Effettuando inoltre tre serie di misure, facendo variare opportunamente gli angoli incidenti del collimatore, possono essere calcolati gli sforzi e le direzioni principali. Con il diffrattometro vengono misurate due grandezze: l’angolo per il

quale si verifica il picco di diffrazione e l'ampiezza di questo picco (di solito è misurata a metà del picco e viene chiamata FWHM, Full Width at Half Maximum). Se la prima entità è strettamente connessa all'intensità degli sforzi residui, la seconda descrive invece le distorsioni dei grani cristallini, la densità delle dislocazioni e i micro - sforzi residui del II tipo[32], ossia quelle sollecitazioni che coinvolgono piccoli volumi di materiale (generalmente pochi grani).

Per la prima misurazione si posiziona il rilevatore nella posizione che dovrebbe dare il picco della diffrazione ( $\psi = 0 \rightarrow \vartheta \approx \vartheta_0$ ), e successivamente si fa variare l'inclinazione del collimatore in modo da determinare i picchi dell'angolo  $\vartheta$  (figura 4.16).

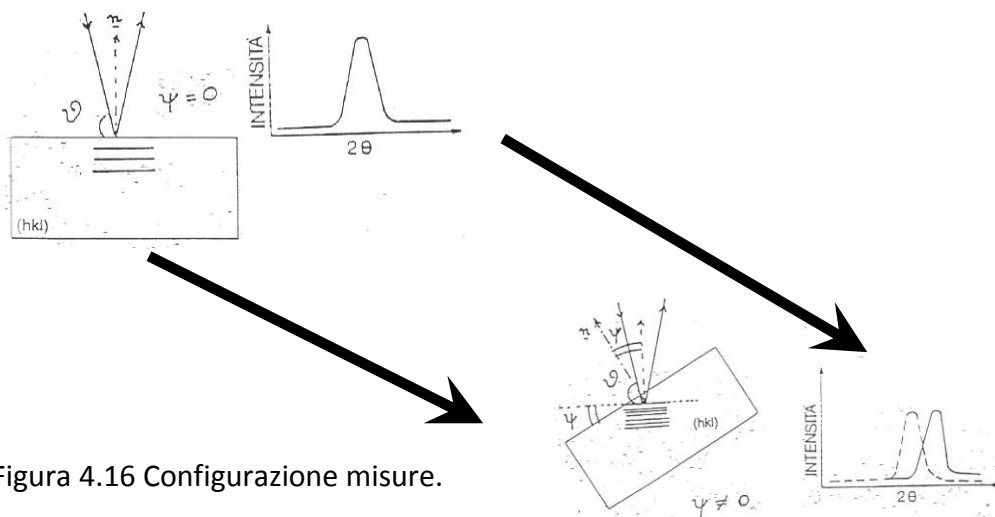


Figura 4.16 Configurazione misure.

### 4.2.2 Strumenti utilizzati

Il diffrattometro portatile utilizzato è un XStress 3000 unito al software Xtronic 0.22 r 1969 – 2010, prodotto dalla Stresstech group[33] (figura 4.17).

Montato un tubo di Cromo, adatto per l'analisi di acciai, il generatore arriva fino a 30kV e 6,7mA per la generazione dei raggi X. Il generatore è dotato di un sistema di raffreddamento integrato.

Per le misurazioni in profondità è necessario asportare il materiale. L'intensità dei raggi X decresce esponenzialmente in un materiale; se si volessero misurare

le tensioni residue in profondità, aggiungendo che i raggi dovrebbero percorrere due volte lo spessore, non ci sarebbe abbastanza energia residua per la misurazione. Per mantenere inalterato lo stato di sforzo residuo del componente è bene procedere con tecniche di lavorazione neutrali come l'elettropulitura o le lavorazioni chimiche. Non è possibile interagire direttamente con una semplice foratura.



Figura 4.17 Il diffrattometro e i sistemi ausiliari.

Per asportare il materiale si è utilizzata l'elettropulitrice Struers Movipol – 3[34]. Il principio di questa lavorazione può essere definito come “processo galvanico di deposizione al contrario”: il materiale, invece di essere depositato su una superficie per applicare un rivestimento, viene rimosso. Si lavora effettuando una foratura per elettroerosione. Un tubo viene usato come elettrodo e attraverso questo viene pompato il dielettrico, soluzione presentata a breve, che favorisce la lavorazione e mantiene la zona di lavoro libera dagli sfridi prodotti (figura 4.18).

Viene utilizzata una soluzione di etanolo (70%), glicerina (10%) e acido perclo-rico (20%). Il generatore assicura al circuito un potenziale di 50 – 60 V con va-lori corrente pari a 0,5 o 1 Ampere (valori dipendenti dalla profondità).

All’inizio si asporta materiale con attacchi da un minuto; si raggiunge una pro-fondità di 0,02mm per volta. Successivamente, per accelerare il processo, si conducono attacchi più lunghi, di circa 5 minuti, così da asportare fino a 3 de-cimi di millimetro per volta.



Figura 4.18 L’elettropulitura nel punto A.

Una misurazione, per un singolo punto, assume nel software Xtronic, in dota-zione col diffrattometro, la forma in figura 4.19. Si possono osservare oltre alle misurazioni sui diversi angoli anche le caratteristiche del generatore di raggi X.

Importante operazione come prima analisi sull’attendibilità della misurazione è il confronto grafico degli andamenti gaussiani che indicano l’angolo di Bragg e la misura degli sforzi.

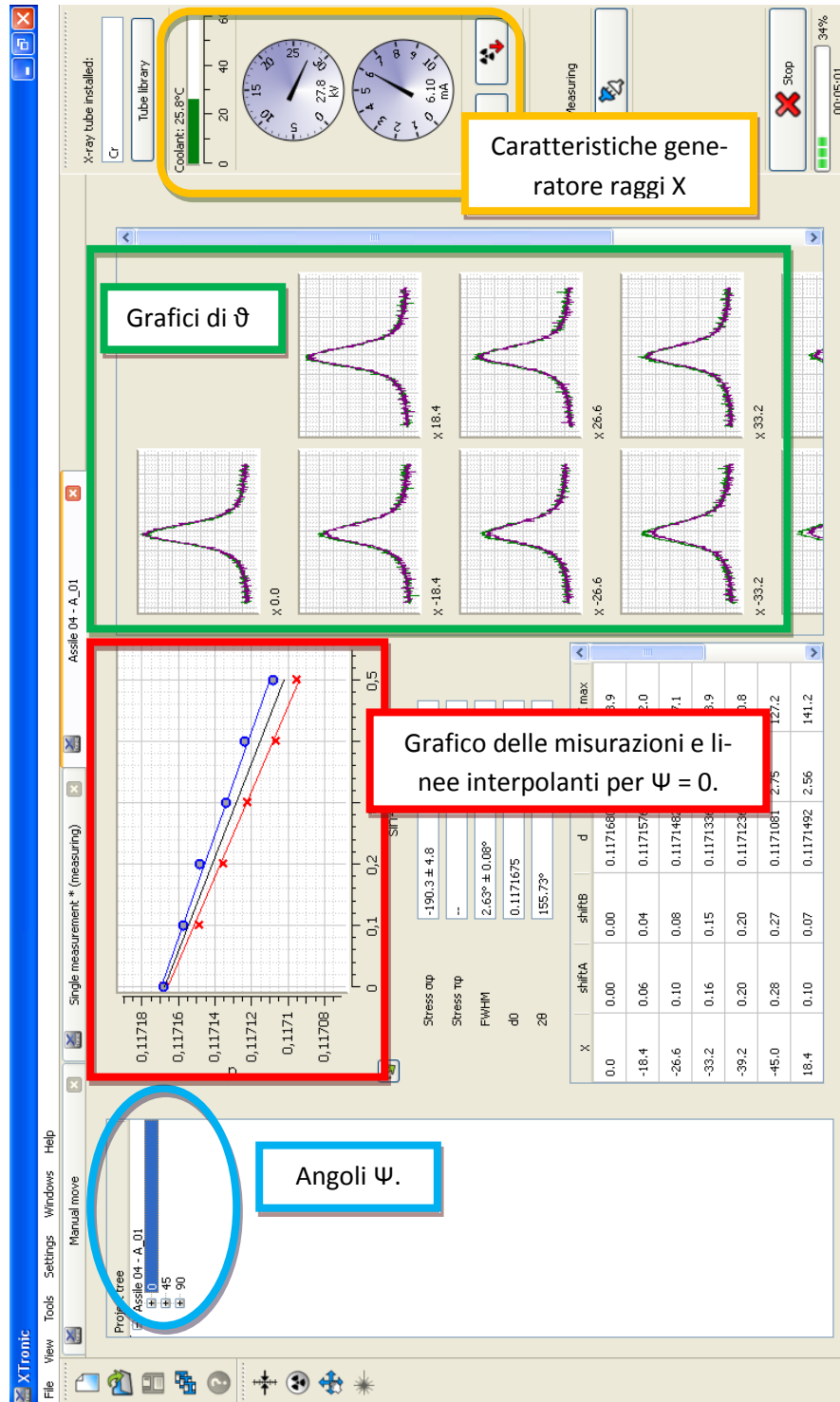


Figura 4.19 Schermata del software Xtronic durante una misurazione.

Si prenda ad esempio la misurazione del punto A per  $\Psi = 0$ . Il fascio viene fatto variare di  $\pm 45^\circ$ . In questo range vengono imposte 11 direzioni (5 da 0 a  $-45^\circ$  a 0, 1 in  $0^\circ$  e 5 da 0 a  $+45^\circ$ ) del fascio per l'analisi di un punto. In questo caso quindi il collimatore del fascio si ritroverà attivo a:  $0^\circ, \pm 18.4^\circ, \pm 26.6^\circ, \pm 33.2^\circ, \pm 39.2^\circ$  e  $\pm 45^\circ$ .

Il risultato complessivo per la misurazione in un punto appare a monitor come in figura 4.20.

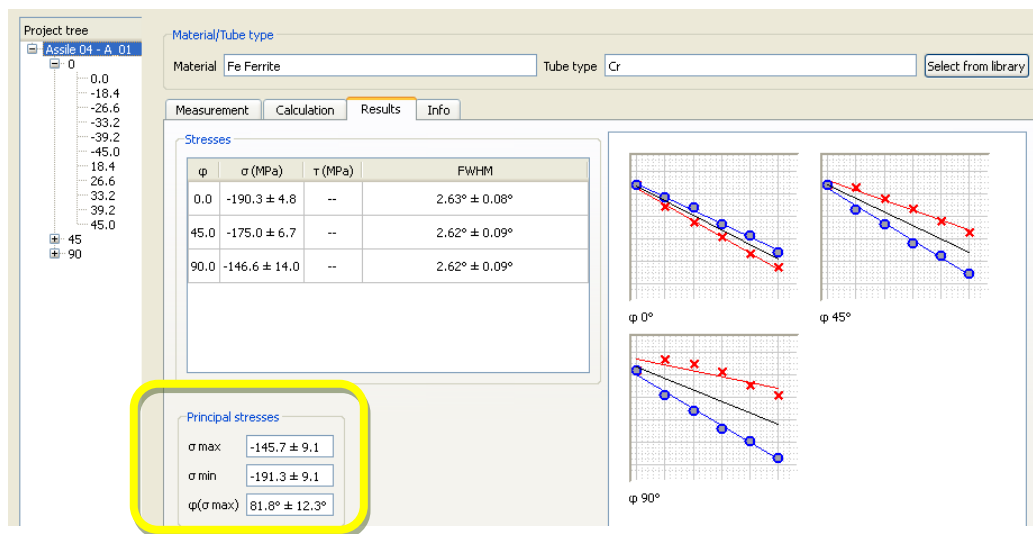


Figura 4.20 Risultati del diffrattometro in un punto.

Sono dunque evidenti gli sforzi per  $\Psi = 0^\circ, \Psi = 45^\circ$  e  $\Psi = 90^\circ$  con il loro scarto. Il programma inoltre calcola immediatamente gli sforzi principali (figura 4.20 - Riquadro giallo in basso).

### 4.2.3 I risultati

Sull'assile in analisi sono state effettuate misurazioni in 12 differenti punti posti in superficie; 6 punti situati lungo la zona rullata per diverse angolazioni, gli altri 6, a coppie, in prossimità delle cricche (R4A, R4B e una delle due cricche da 1mm). Queste misurazioni sono state effettuate anche prima del test.

E' possibile prendere visione della collocazione dei punti studiati in figura 4.21.

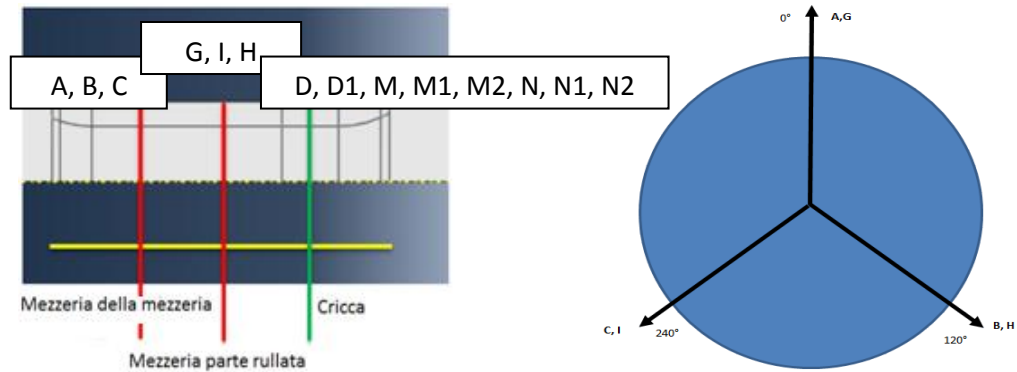


Figura 4.21 Posizione delle misurazioni.

I due punti che compongono la coppia descrivente l'entità delle tensioni residue nell'intorno della cricca vengono posti:

- M, N e D: posti oltre l'apice della cricca, lungo l'ideale linea che indicherebbe il prolungamento della micro cavità;
- M1, N1, D1: posti adiacenti alla micro cavità, il più vicino possibile, lungo il fianco;
- M2, N2: punti sempre adiacenti alla micro cavità ma mantenuti alla distanza minima per poter effettuare correttamente la misurazione, evitando cioè il contatto diffrattometro – cuscinetto (figura 4.22).



Figura 4.22 Misurazioni in profondità.

Si sottolinea che i punti N sono in prossimità della cricca B, invece i punti M vengono posti adiacenti alla cricca A.

Non viene evidenziata una sostanziale differenza tra gli sforzi superficiali confrontando i risultati prima (sono state effettuate delle misurazioni nei punti scelti) e dopo il test (allegato E). Dopo i 64 spettri si ammette che non ci sia stato un sostanziale rilassamento degli sforzi medi con il test di fatica.

Per la misura delle tensioni residue all'interno dell'assile, si è deciso di scavare, e misurare nel mentre, in 4 punti: A e B (in mezzeria della sezione rullata) e in prossimità delle due cricche R4 nei punti M2 e N2. Il diffrattometro viene installato sull'assile in modo che quando  $\Psi = 90^\circ$  gli sforzi misurati sono prossimi a quelli circonferenziali. Invece si identificano gli sforzi assiali quando il diffrattometro effettua la misura per  $\Psi = 0^\circ$ .

Questo fatto viene reso evidente in figura 4.23 dove vengono inseriti per il punto A gli andamenti degli sforzi misurati a  $0^\circ$ , a  $45^\circ$  e a  $90^\circ$ . Questi andamenti vengono confrontati con quelli degli sforzi principali.

Si ricorda che le misurazioni effettuate col diffrattometro perdono di senso o, meglio, di affidabilità all'aumentare della profondità; questo perché il foro effettuato con elettropulitura ha un profilo conico e molto irregolare. Riconoscere e misurare il punto più basso (azione effettuata con un comparatore) e successivamente posizionare il diffrattometro su questo punto sono azioni che intrinsecamente aggiungono incertezza nel risultato, fatto da tenere in considerazione. Ecco perché superati i 5 decimi di millimetro di profondità gli andamenti confrontati si separano significativamente (figura 4.24).



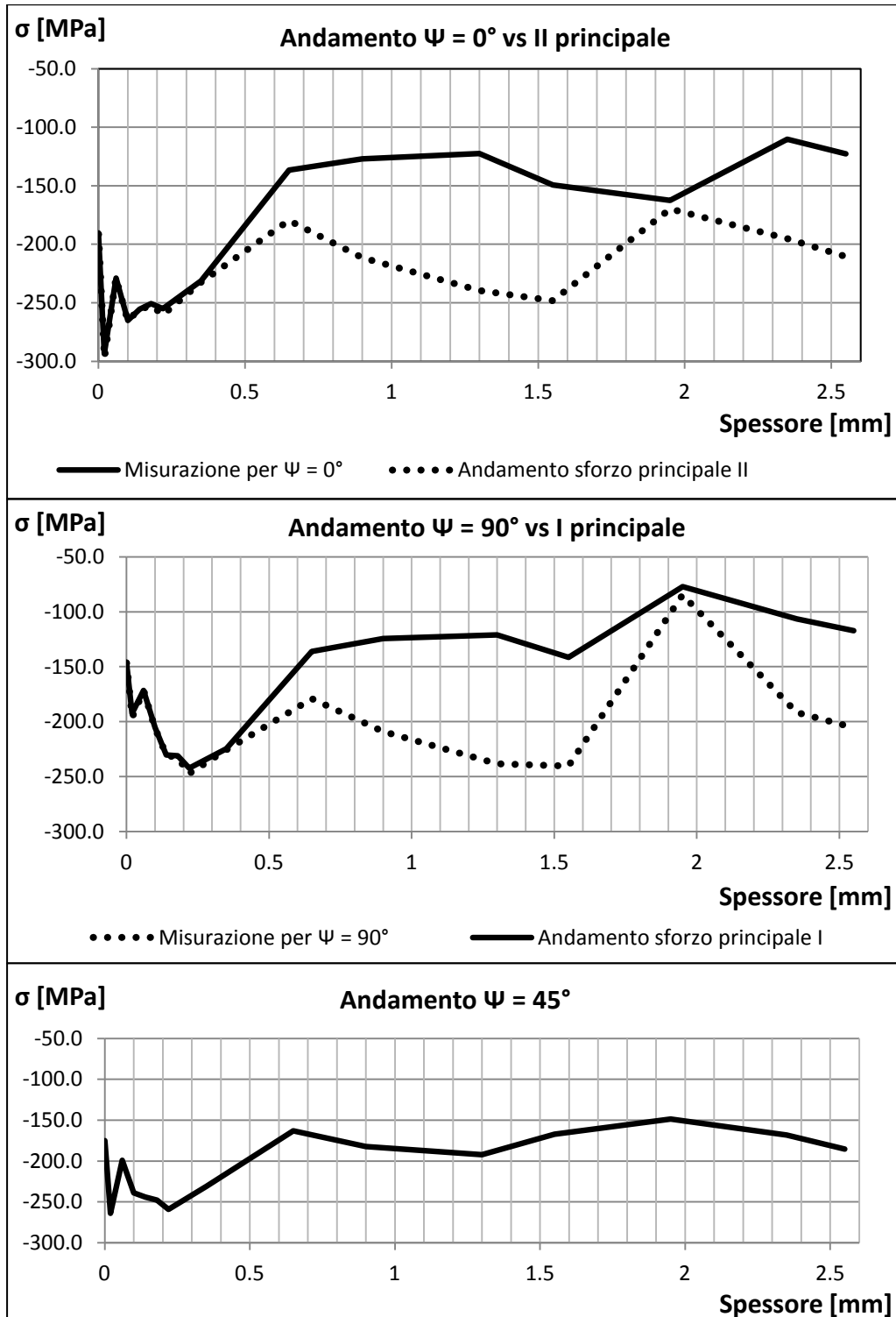


Figura 4.23 Misure diffrattometriche nel punto A.

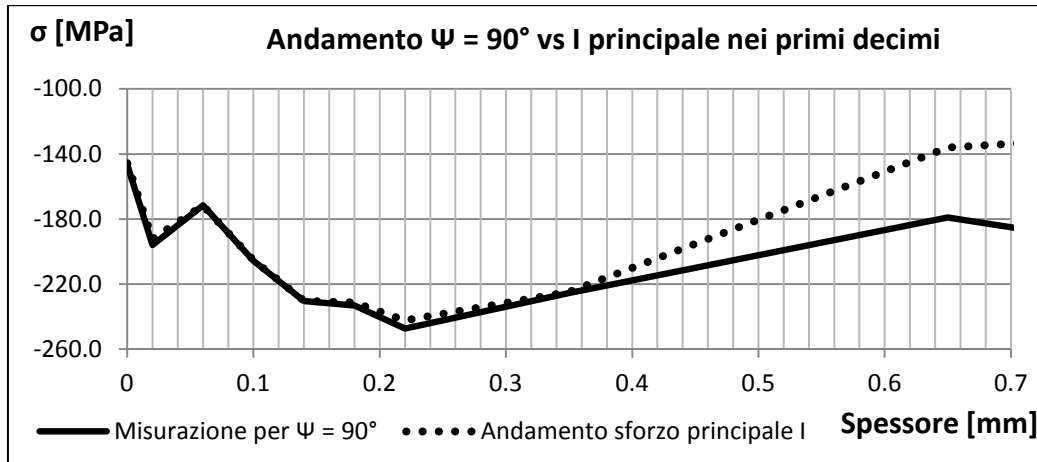
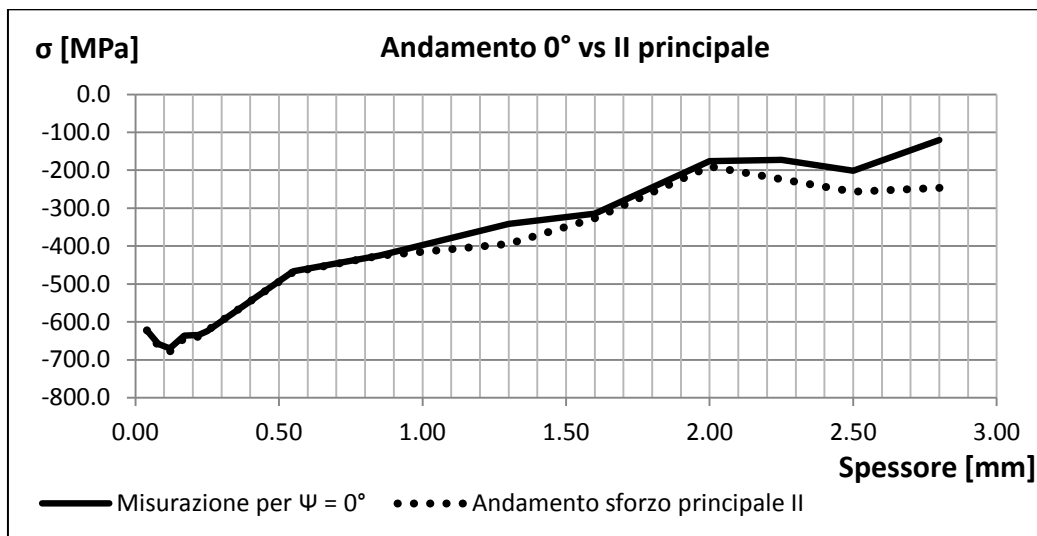


Figura 4.24 Deterioramento della qualità delle misurazioni.

Dalle misurazioni risulta evidente che il processo di rullatura rilascia sforzi residui di compressione maggiori in direzione assiale (mediamente risultano per tutti i punti A, B, M2 e N2 infatti più elevati i moduli delle misurazioni per  $\Psi = 0^\circ$  - misurazione sforzi assiali).

Si inseriscono gli stessi grafici di figura 4.25 per il punto M2 cioè uno vicino alla cricca A, e si sottolinea che anche in questo caso sono presenti gli stessi problemi sopra citati. L'intensità degli sforzi di compressione in questo punto sono molto più elevati rispetto a quelli misurati nel punto A. Non viene inserita la misurazione a  $45^\circ$ , poco interessante.



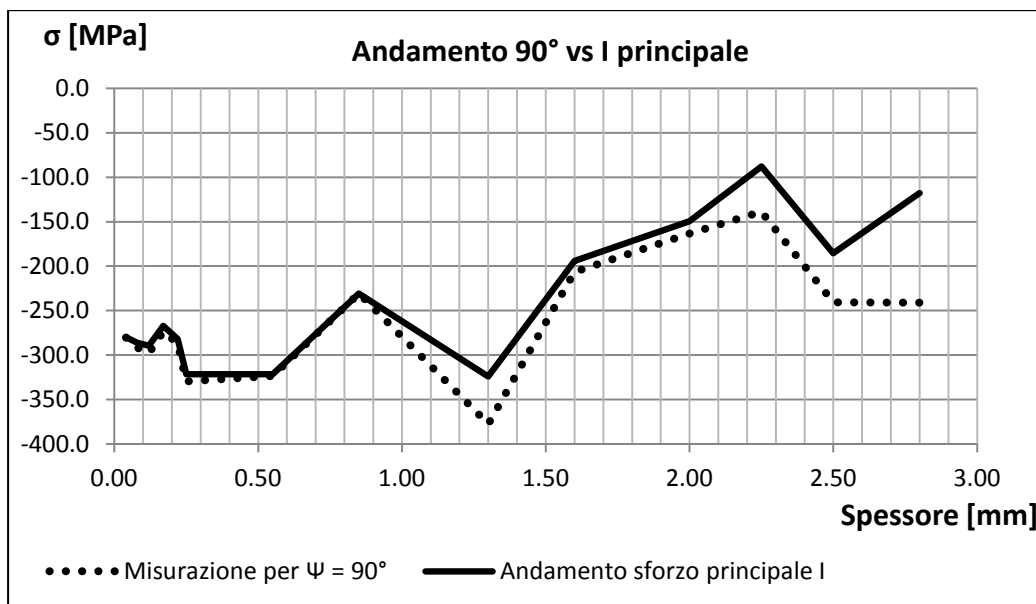


Figura 4.25 Misurazioni diffrattometriche nel punto M2.

Si può prendere visione dei risultati delle 4 misurazioni in profondità nell'allegato F. Mediando i risultati delle misurazioni sulla mezzeria (punti A e B) e quelli sulla cricca (punti M2 e N2), si ricava un andamento (figura 4.26) degli sforzi in profondità di validità generale (tabella 4.3).

Tabella 4.3 Risultati mediati.

Mezzeria		Cricca	
[mm]	[Mpa]	[mm]	[Mpa]
0	-234,15	0,04	-613
0,02	-312,95	0,08	-633,5
0,06	-313,15	0,12	-641,9
0,10	-372	0,17	-637,6
0,14	-371,4	0,22	-603,1
0,18	-359	0,25	-619,2
0,22	-356,15	0,5	-462,45
0,40	-290,45	0,9	-411,9
0,70	-222,1	1,3	-357,1
1,00	-245,85	1,65	-357,4
1,35	-287,75	2	-290,1
1,60	-298,9	2,3	-278,05
1,95	-243,7	2,65	-258,35
2,35	-235,65		

Si noti come l'intensità degli sforzi compressivi che rilascia il processo di rullatura nell'assile è decisamente maggiore nelle sezioni vicino alla cricca rispetto a quelle centrali.

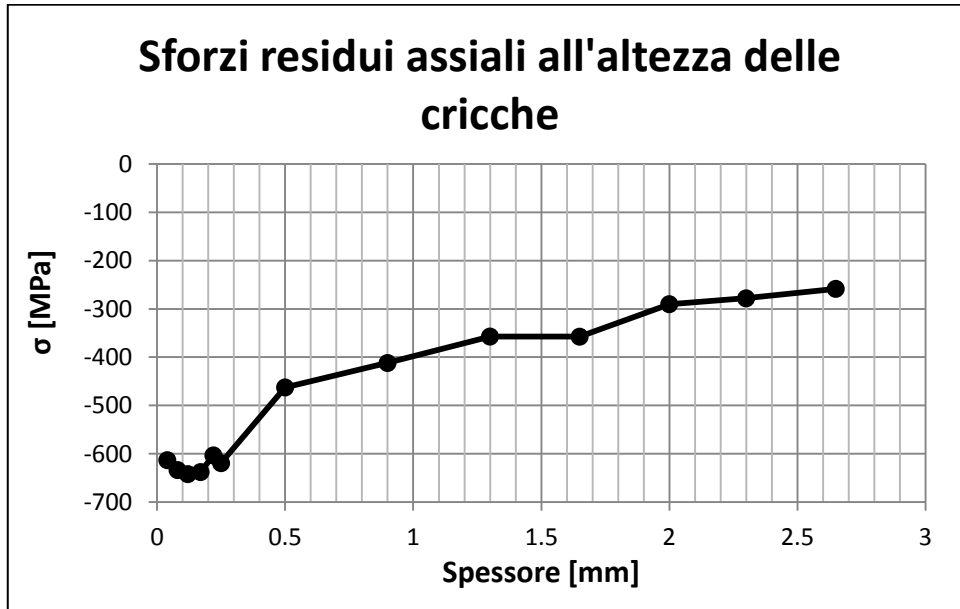


Figura 4.26 Andamento sforzi residui assiali nei pressi delle cricche.

Verranno utilizzati questi valori per la previsione di vita inserita nel capitolo successivo.

Si possono ottenere tutti i rapporti di carico per le diverse profondità. Vengono presentati i due casi estremi:

- Per  $r = 0,12$  mm della cricca, massimi sforzi residui;
- Per  $r > 3.2$  mm punto in cui si suppone si annulli l'effetto della rullatura.

Nel primo caso il rapporto di carico  $R$  varierà tra 1.668 e 1.2265. Nel secondo caso  $R = -1$ .

È stata eseguita la stessa tipologia di misurazione per un altro assile rullato a freddo caratterizzato da cricche artificiali di 2mm di raggio (in questo caso la cricca non propagò). A supporto della validità delle misurazioni precedentemente riportate vengono riportate le misure in profondità di un punto nei pressi delle cricche (figura 4.27).

Confrontando i due risultati è possibile dire che il processo di rullatura conferisce lo stesso andamento degli sforzi residui.

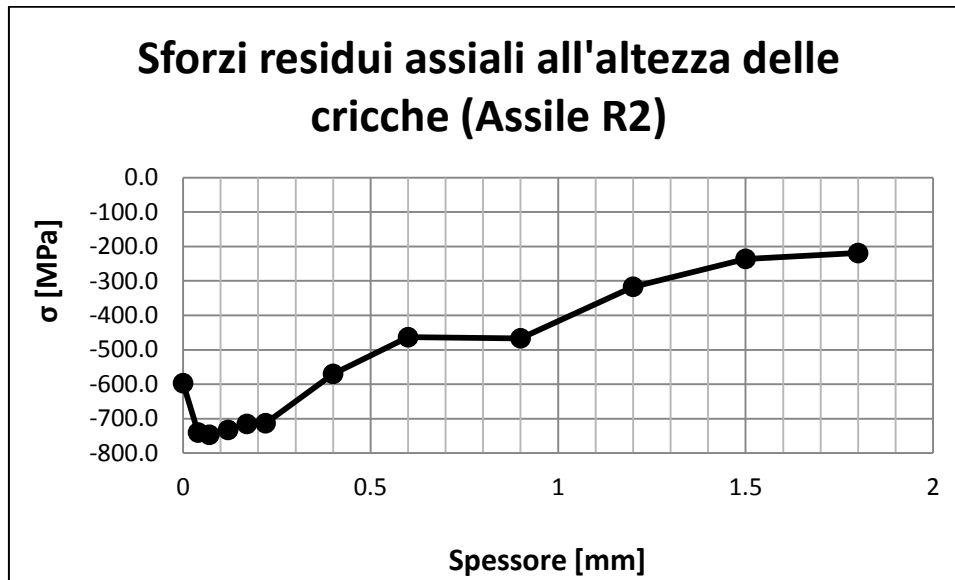


Figura 4.27 Andamento sforzi residui assiali nei pressi delle cricche (assile R2).



## 5 - Previsione di vita

In questo capitolo si vuole procedere con una previsione di durata dell'assile rullato attraverso il software AFGROW 4.0012.15. Il programma in questione viene utilizzato principalmente per l'analisi di componenti meccanici nel campo aerospaziale, ma è applicabile a qualsivoglia struttura metallica o componente meccanico metallico in cui è presente un difetto. I risultati ottenuti verranno confrontati con quelli sperimentali ottenuti dalle varie tipologie di misurazione di propagazione delle cricche.

La stima della vita a fatica di un assile è intuitivamente di grande importanza per la prevenzione dei disastri ferroviari. Nel caso in cui non si facesse un monitoraggio strutturale dell'assile, una accurata previsione può determinare la frequenza con cui effettuare i controlli non distruttivi sull'assile: può cioè determinare l'intervallo di ispezione.

Il software AFGROW utilizzato per riuscire in quest'intento richiede in input l'andamento degli sforzi nella sezione criccata e la geometria della cricca. Il modello viene creato dal software utilizzando l'equazione di NASGRO presentata alla sezione 1.4.1.4.

### 5.1 Definizione del comportamento a propagazione del materiale

I punti sperimentali già disponibili riguardano sia le soglie che i punti di propagazione  $dA/dN$ , derivati sia da test CPLR sia da test  $\Delta K$  decreasing (sezione 1.4.1.8). Per i primi sono stati considerati  $R = -2, -1$  e  $0.1$ ; per i dati  $\Delta K$  decreasing, sono stati ricavati punti a  $R = -2, -1, -0.5$  e  $0.1$ . Per la ricerca delle curve di soglia sono stati utilizzati anche dati ricavati per  $R = 0.7$  e  $R = 0.75$ .

Utilizzando il Software Matlab si processano i dati per ricavare, utilizzando il metodo dei minimi quadrati, i coefficienti che descrivono il materiale:  $\Delta K_1$ ,  $C_{th}$  sia quello positivo che quello negativo,  $C$ ,  $m$  e  $p$  delle curve di Paris [equazioni 1.13, 1.14]. Si ipotizza una  $q = 0$ ; si ricorda infatti che questo parametro descrive il tratto finale della curva, poco importante per l'analisi che si va a produrre. Bisogna però tenere in considerazione che questa ipotesi condiziona la mi-

nimizzazione per le altre tre costanti (prepotentemente sul coefficiente angolare m).

L'analisi dei valori di soglia restituisce gli andamenti in funzione di R in figura 5.1 e si ricavano i valori  $\Delta K_1$ ,  $C_{th}$  negativo e positivo.

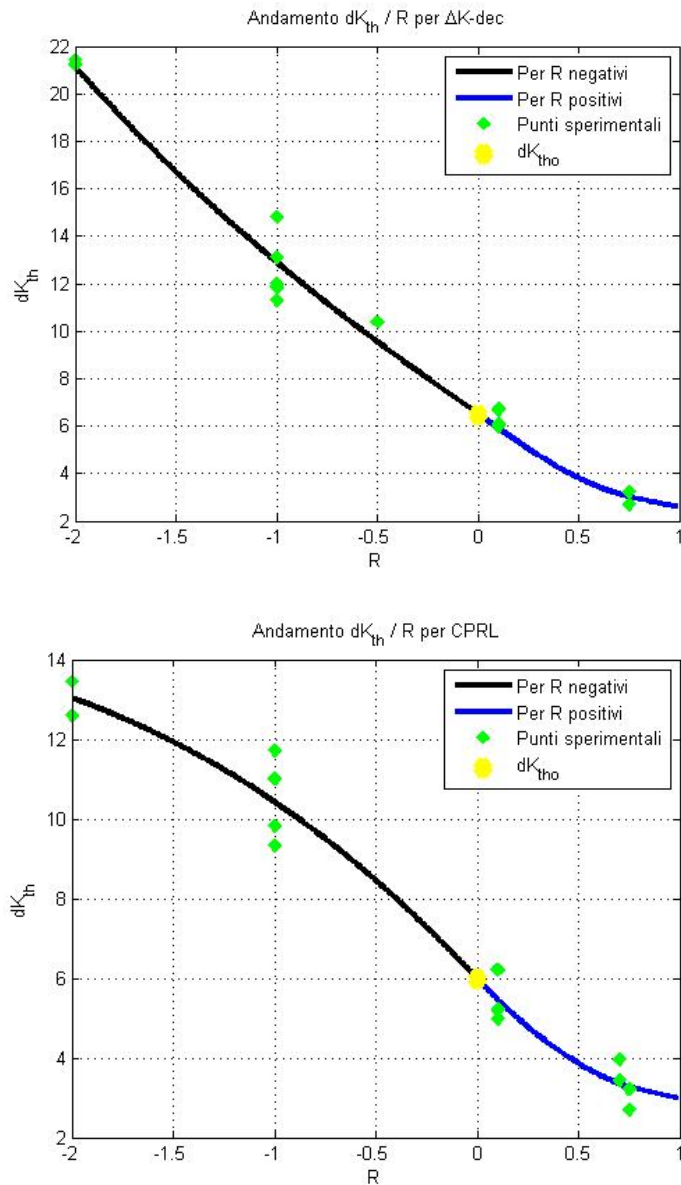


Figura 5.1 Andamenti  $dK_{th} / R$  per i diversi set di dati.



Confrontati i due andamenti è possibile vedere come le soglie calcolate con i dati CPLR siano generalmente più basse per  $R < 0$  (figura 5.2), confrontabili nel resto del dominio. Le soglie CPLR garantiscono quindi un calcolo di previsione della vita più conservativo: si intuisce che il componente raggiungerà la rottura prima nelle previsioni con dati CPLR. Questo differenziarsi del comportamento è stato spiegato alla sezione 1.4.1.8 e in breve è causato dalla diversa metodologia con cui vengono ricavati i dati CPLR su quelli  $\Delta K$  decreasing.

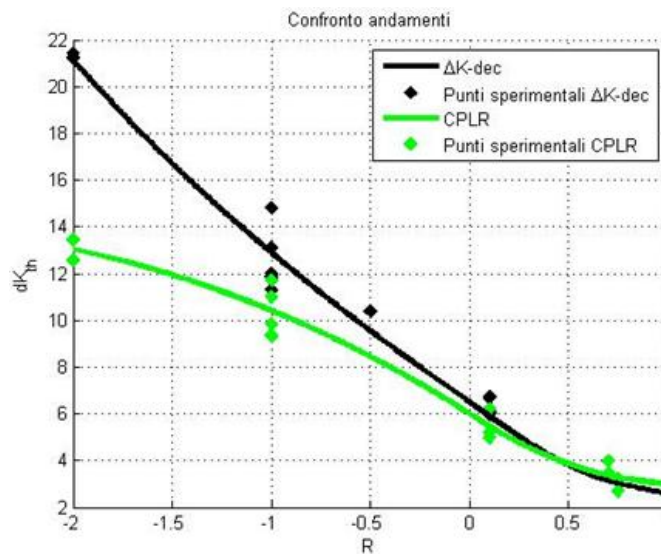


Figura 5.2 Confronto soglie.

Da questo risultato si procede ricercando le curve di Paris, per ogni rapporto di carico, che descrivono il comportamento del materiale.

Matlab restituisce i valori inseriti in tabella 5.1.

Tabella 5.1 Parametri delle curve interpolanti.

	$\Delta K_{dec}$	CPRL
<b>dk1</b>	2.600505	2.977532
<b>Cthneg</b>	-0.14099	0.077053
<b>Cthpos</b>	1.855742	1.177937
<b>dk0</b>	6.502683	5.989885
<b>C</b>	2.05E-11	
<b>m</b>	2.83981	
<b>p</b>	0.7312252	

Con questi valori è possibile ora ricavare gli andamenti delle curve di propagazione per i differenti rapporti di carico R (figura 5.3 – in formato continuo le linee di propagazione CPLR e in formato tratteggiato quelle  $\Delta K$  decreasing).

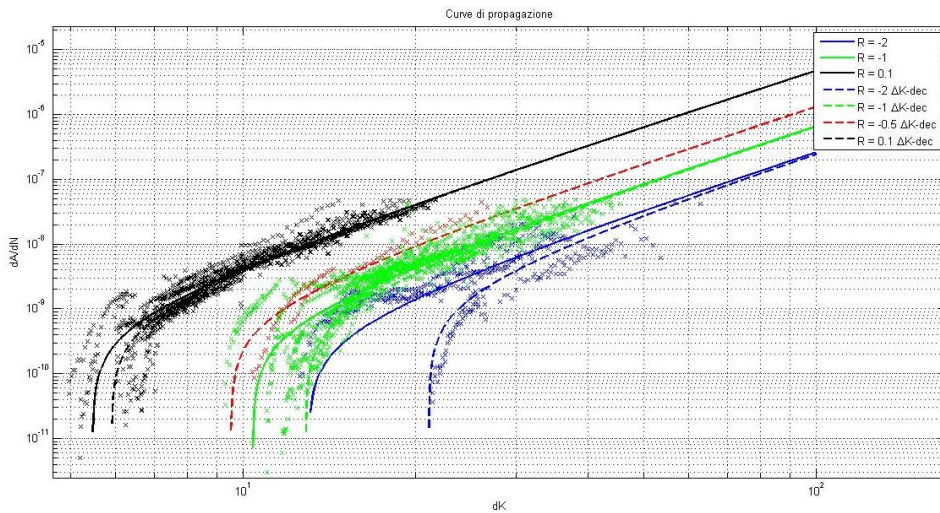


Figura 5.3 Curve di propagazione per i diversi set di dati.

Si evidenzia il fenomeno del fanning spiegato alla sezione 1.4.1.3.

## 5.2 Creazione del modello in Afgrow

Per prima cosa viene creato il modello geometrico (“Part through crack in pipe – model classic”). Viene generata solo una delle due cricche e come raggio di partenza verrà imposto quello nominale pari a 4mm (figura 5.4).

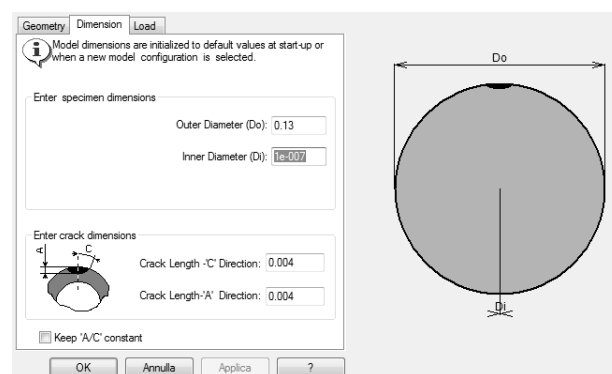


Figura 5.4 Modellazione geometria in Afgrow.

Si passa all’inserimento dei dati del materiale attraverso la “tabular lookup”. Sfruttando l’elaborazione delle curve di propagazione spiegata nella sezione precedente (5.1), vengono inseriti i valori dei diversi  $dK$  per 21  $da/dN$  (punti equidistanti nel grafico doppio logaritmico compresi tra  $10^{-12}$  e  $10^{-7}$  m/ciclo) e per i differenti rapporti di carico  $R$ .

Il Software per  $R < 0$  richiede però il  $K_{max}$  associato al  $dA/dN$ . La relazione tra i due è banale:

$$K_{max} = \Delta K / (1 - R) \quad [5.1]$$

Vengono anche inseriti tutti i parametri necessari alla descrizione completa dell’A4T (tabella 5.5) ricavati da una precedente tesi di laurea[35].

Tabelle 5.2 Caratteristiche meccaniche A4T.

Ultimate Strength [Mpa]	740
Modulo di Young [N/mm <sup>2</sup> ]	206000
Coeff. Poisson	0.33
Kc [Mpa*(m) <sup>1/2</sup> ]	100
Kic [Mpa*(m) <sup>1/2</sup> ]	73
Yield Strength [Mpa]	580
Lover limit (dA/dN)	2.00E-12
Upper limit (dA/dN)	8.00E-07

Ulteriore valore in input è la tipologia di carico: uno spettro a 13 livelli (capitolo 2 – figura 5.5), lo stesso applicato all’assile durante il test full scale presentato al capitolo 2.

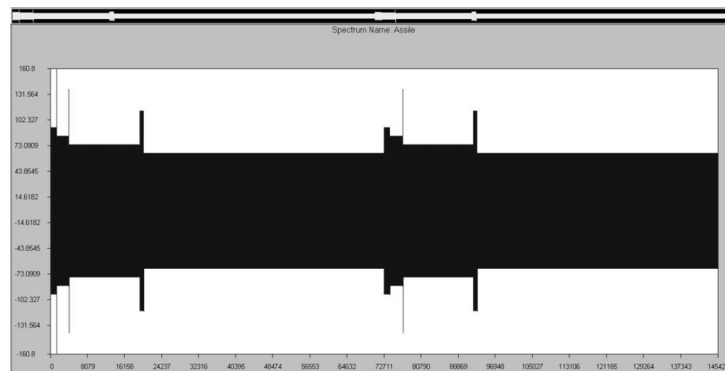


Figura 5.5 Spettro in Afgrow.

La simulazione verrà arrestata quando o la dimensione di A o quella di C raggiungerà 30 mm (figura 2.2).

### 5.3 I risultati

Sono state effettuate previsioni di vita sia a meno dei carichi residui (capitolo 4) sia considerandoli. La geometria della cricca di partenza ha raggio nominale pari a 4mm, e vengono effettuate verifiche utilizzando i dati CPLR e  $\Delta K$  decreasing separati. I risultati sono stati confrontati con le misurazioni Phased Array (Figura 5.6).

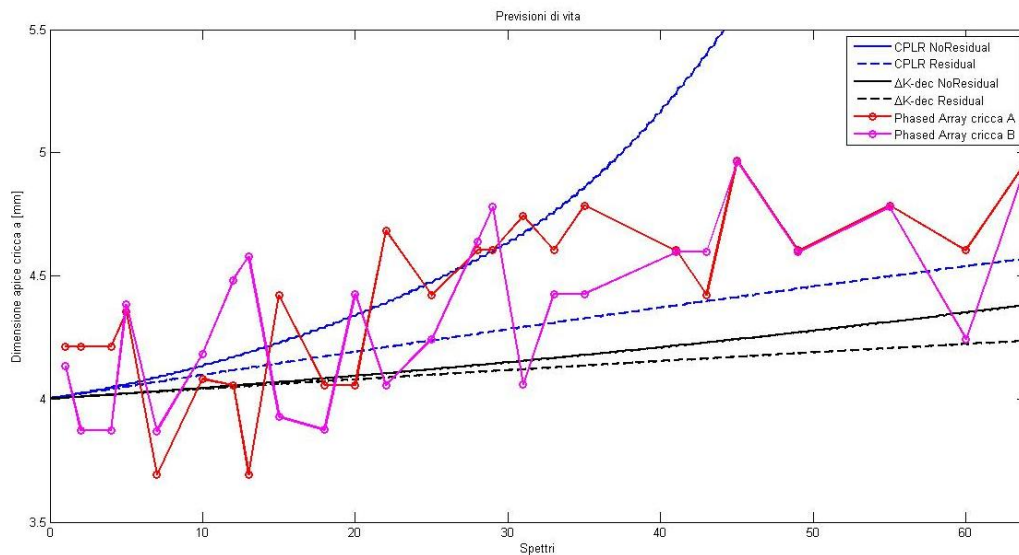


Figura 5.6 Confronto simulazioni Afgrow e misurazioni Phased Array.

Il risultato prodotto dal software è confrontabile con quello delle misurazioni Phased Array per la propagazione di cricca. Inoltre l'andamento CPLR e  $\Delta K$  decreasing creano due risultati contrastanti: il primo, a favore di sicurezza, anticipa la propagazione della cricca e, nel caso si considerino gli sforzi residui, modella in maniera approssimativamente corretta l'evoluzione della cricca; i secondi invece non risultano efficaci, non riconoscendo la possibilità di una propagazione di 0,8mm della cricca nell'assile in così pochi spettri.

Il software considera le differenti forme di propagazione a seconda della presenza degli sforzi residui o meno; Afgrow restituisce anche quest'informazione evidenziando

però una totale assenza di propagazione dell'apice C nel caso vengano considerati gli sforzi residui: la cricca continua a propagare radialmente fino al cedimento di schianto.

Le forme di propagazione suggerite dal software vengono mostrate in figura 5.7.

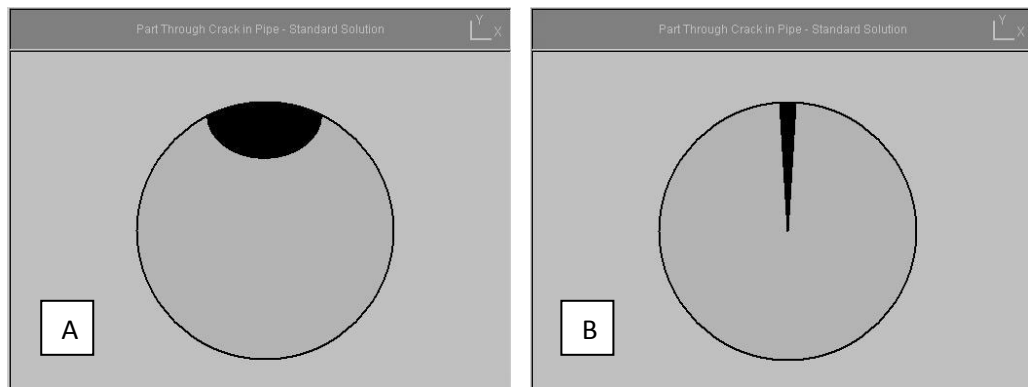


Figura 5.7 Forme di propagazione senza (A) e con sforzi residui (B).

Per quale dimensione della cricca si ha propagazione o meno, considerando la presenza degli sforzi residui per la rullatura a freddo?

Per rispondere a questa domanda sono state effettuate diverse simulazioni e il risultato ottenuto è stato:

- Dimensione minima per la propagazione con dati CPLR = 0.003208m;
- Dimensione minima per la propagazione con dati  $\Delta K_{dec}$  = 0.003293m.

Anche in questo caso è possibile verificare che i dati CPLR restituiscono simulazioni più conservative.



## Conclusioni

Nel presente elaborato è stato valutato il comportamento per quanto riguarda la propagazione di un difetto all'interno di un assile rullato a freddo prodotto in acciaio A4T.

L'utilizzo dei controlli non distruttivi standard ha rilevato una propagazione del difetto sia per gli apici superficiali sia per l'apice in direzione radiale. La propagazione è avvenuta in due forme distinte per diversa tipologia di apice.

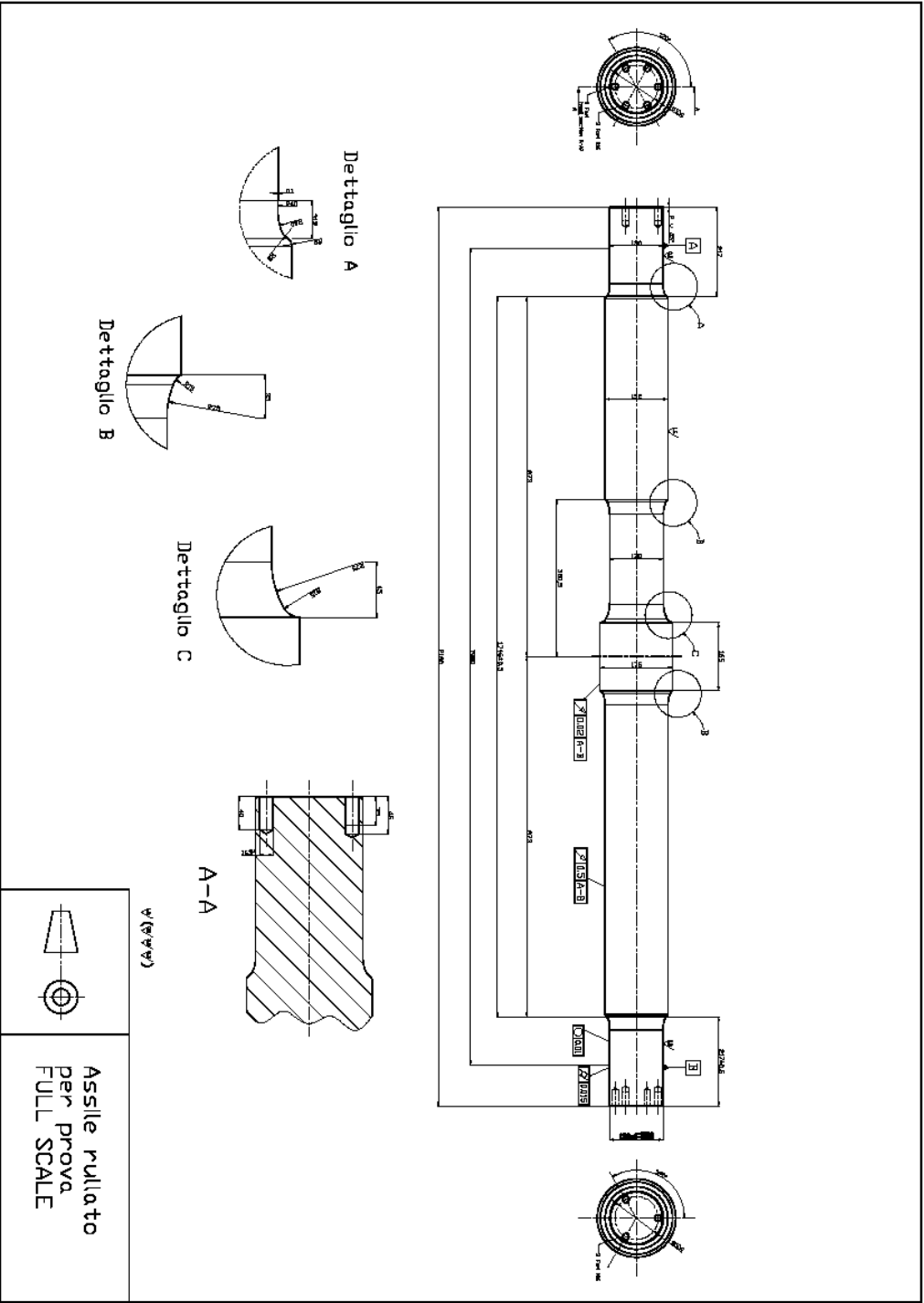
Il processo di rullatura che ha generato sforzi residui di compressione apporta un sostanzioso beneficio, finché le dimensioni del difetto non superino il volume di materiale compresso. Il fatto che la cricca abbia propagato durante i test viene confermato dalle previsioni di vita con dati CPRL: viene quindi risaltata la miglior attendibilità di questa tipologia di test per lo studio delle caratteristiche meccaniche del materiale (soprattutto per quanto riguarda le soglie di propagazione) rispetto alla modalità  $\Delta K$  decreasing.

L'utilizzo, non ancora approfondito in forma bibliografica, dell'emissione acustica per l'analisi di un componente dinamico ha sicuramente dato segnali ottimistici poiché anche in questo caso i risultati ottenuti sono in accordo con l'avvenuta propagazione della cricca. Moltissime sono ancora le incognite legate all'utilizzo di questo controllo non distruttivo ma i risultati ottenuti dimostrano che in futuro l'AE potrebbe presentarsi come valida possibilità di monitoraggio in tempo reale di un sistema meccanico in movimento. Futuri test, magari su assili di treni reali in esercizio, potrebbero dimostrare ulteriormente le capacità dell'emissione acustica di valutarne l'integrità strutturale.

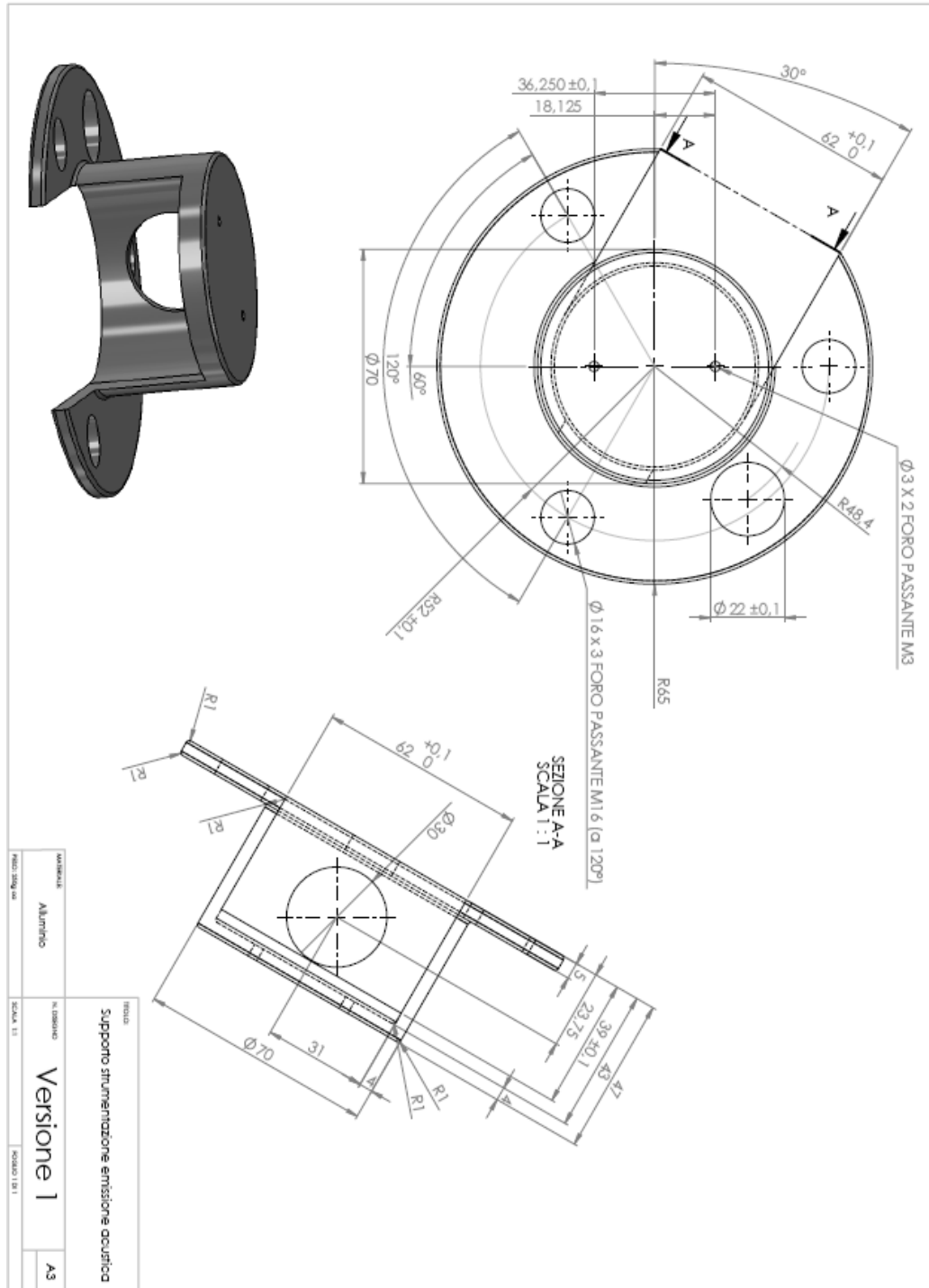




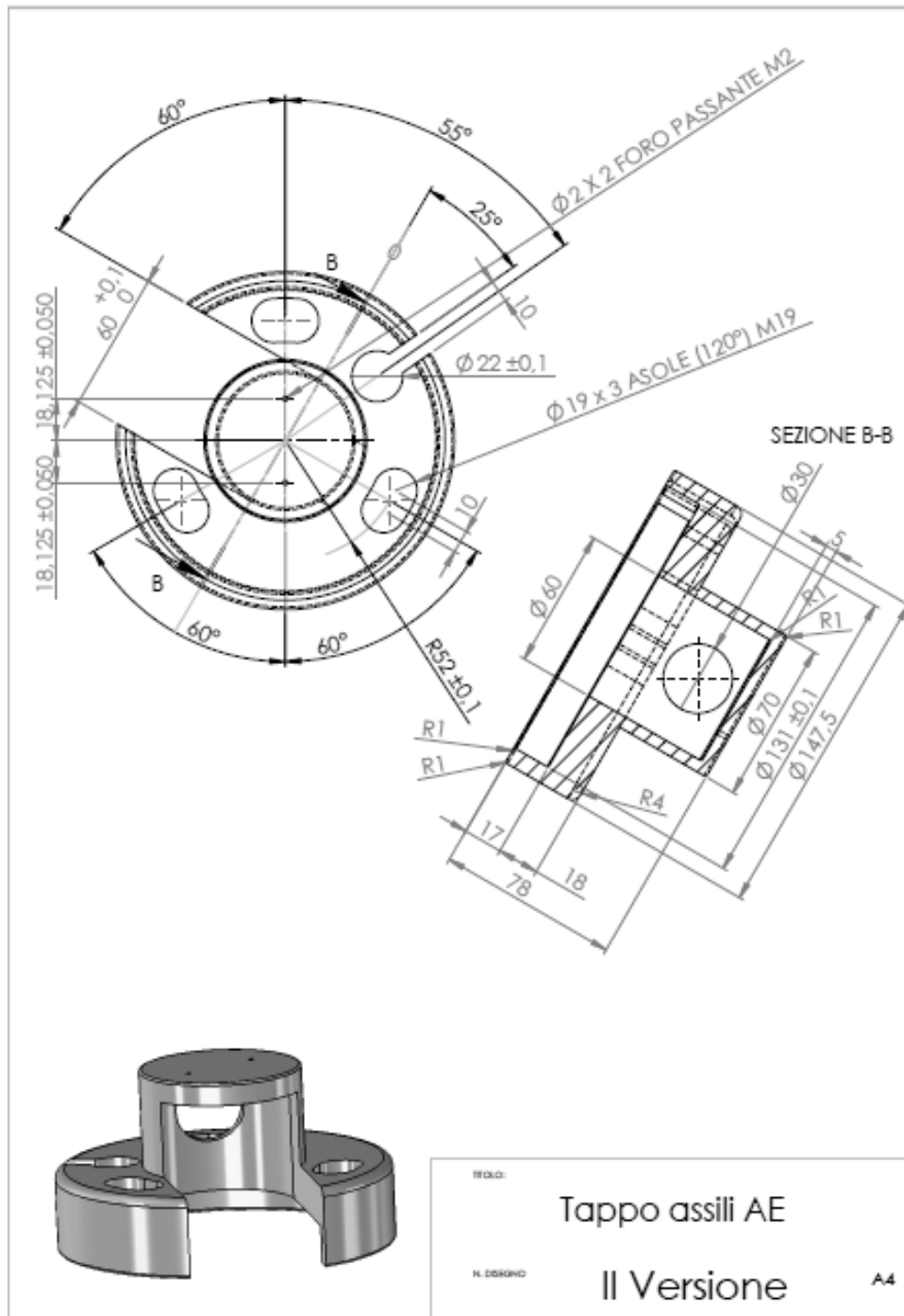
# Allegato A - Assile



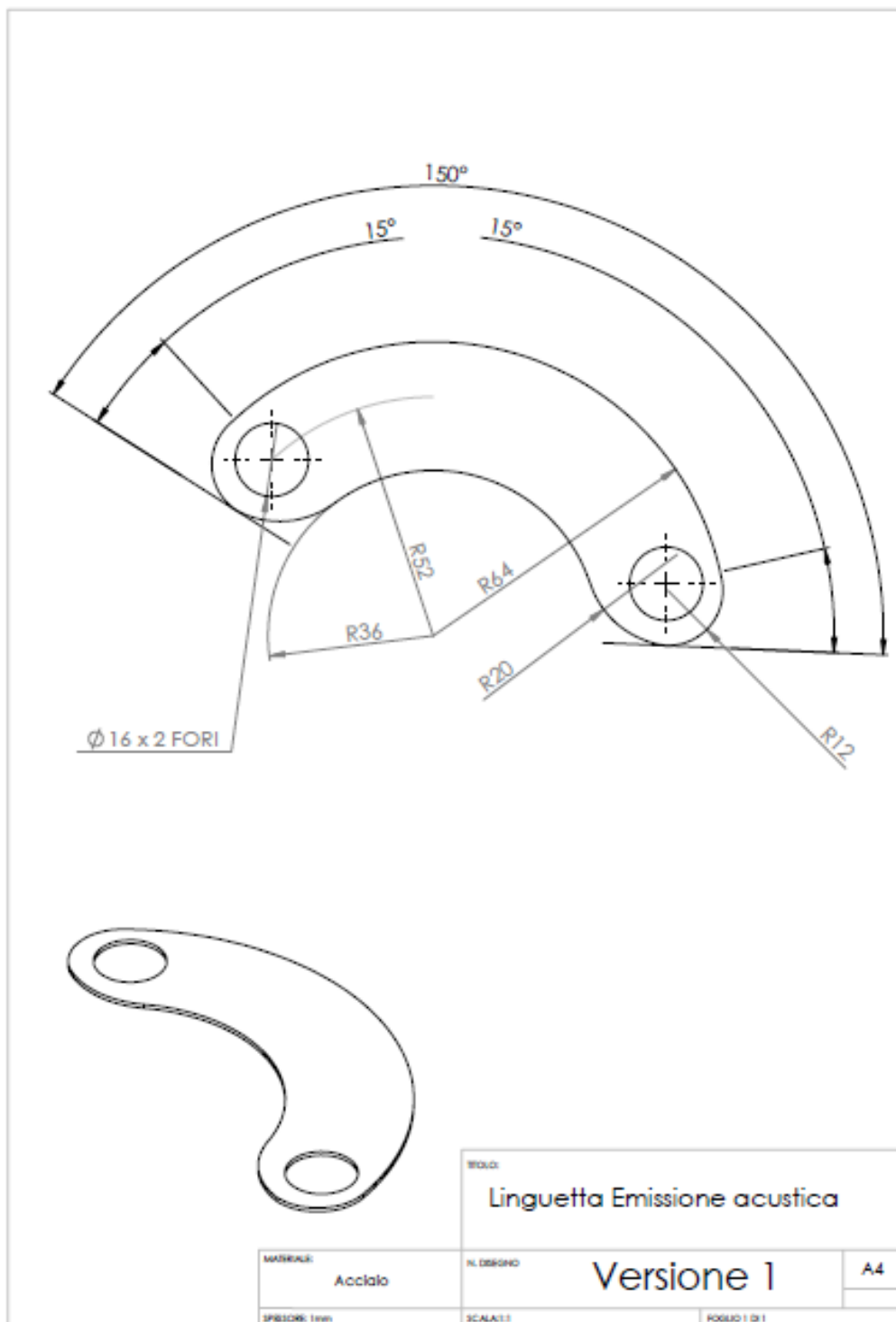
# Allegato B – Supporto dedicato



## Il versione



# Allegato C - Linguetta



## Allegato D – Tabella equivalenze

n. spettri	n. cicli	Tempo [h]	n. spettri	n. cicli	Tempo [h]
1	145423	9	34	4944382	299
2	290846	18	35	5089805	308
3	436269	26	36	5235228	317
4	581692	35	37	5380651	326
5	727115	44	38	5526074	334
6	872538	53	39	5671497	343
7	1017961	62	40	5816920	352
8	1163384	70	41	5962343	361
9	1308807	79	42	6107766	370
10	1454230	88	43	6253189	378
11	1599653	97	44	6398612	387
12	1745076	106	45	6544035	396
13	1890499	114	46	6689458	405
14	2035922	123	47	6834881	414
15	2181345	132	48	6980304	422
16	2326768	141	49	7125727	431
17	2472191	150	50	7271150	440
19	2763037	167	51	7416573	449
20	2908460	176	52	7561996	458
21	3053883	185	53	7707419	466
22	3199306	194	54	7852842	475
23	3344729	202	55	7998265	484
24	3490152	211	56	8143688	493
25	3635575	220	57	8289111	502
26	3780998	229	58	8434534	510
27	3926421	238	59	8579957	519
28	4071844	246	60	8725380	528
29	4217267	255	61	8870803	537
30	4362690	264	62	9016226	546
31	4508113	273	63	9161649	554
32	4653536	282	64	9307072	563
33	4798959	290			

# Allegato E – Risultati diffrattometro superficiali


Prima dei 64 spettri.

POLITECNICO DI MILANO		Dipartimento di Meccanica		DM/AMMOD.08.006 Agg. 1 13/06/2012												
		Area Analisi Materiali (Sottoarea Diffrattometria)														
<b>Risultati analisi diffrattometriche " Tensioni Residue"</b>																
Anno: 2012	N° Progressivo ingresso campioni:	Richiedente: Beretta		Data Rapporto:												
				Rapporto di prova:												
Campione	Direzione 0°			Direzione 45°			Direzione 90°			Sforzi principali						
	Posiz. Misura	Sforzo [Mpa]	Scarto (+/-) [Mpa]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+/-) [°]	Sigma 1 [Mpa]	Sigma 2 [Mpa]	Phi [°]		
Assile rullato 04	A	-346,1	11,3	2,74	0,10	-266,0	3,4	2,71	0,09	-174,1	13,0	2,69	0,10	-173,9	-346,3	88,0
	B	-340,0	6,7	2,720	0,110	-233,9	8,3	2,72	0,11	-158,0	14,3	2,70	0,08	-156,7	-341,3	-85,3
	C	-342,4	8,9	2,740	0,090	-265,5	3,5	2,71	0,09	-184,9	9,7	2,66	0,17	-184,5	-342,7	-87,4
	G	-533,8	12,2	2,730	0,230	-460,6	11,4	2,74	0,09	-365,3	10,8	2,71	0,08	-364,5	-534,5	86,3
	H	-519,9	10,1	2,77	0,120	-426,0	9,6	2,72	0,09	-342,8	11,7	2,69	0,09	-342,6	-520,1	-88,3
	I	-510,5	9,8	2,800	0,120	-402,8	4,6	2,74	0,09	-337,2	10,2	2,71	0,06	-334,7	-513,0	-83,2
	D	-554,7	29,1	2,73	0,01											
	D1	-351,7	33,5	2,69	0,03											
	E	-743,1	25,3	2,74	0,03											
	E1	-122,3	22,3	2,81	0,02											

Analisi eseguita secondo : NPL - Measurement Good Practice Guide N. 52 " Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction". Issue 2 - ISSN 1744-3911 See

<b>Apparecchiatura utilizzata:</b>	Diffrattometro Xstress 3000 - AST Stresstech	<b>Metodo di calcolo:</b>	Cross Correlation
<b>Parametri utilizzati:</b>	X-Ray tube: Cr Filters: Kβ Collimator Ø [mm]: 2 Phi Oscill.: 0 Note: La misura dei punti D.D1.E.E1 è stata fatta con una inclinazione di 18°, 20° ed assialmente per motivi di ingombri nella movimentazione del Coniometro	Tube voltage [kV]: 30 Diffraction angle [°]: 156,4 Exp Time [sec]: 20 N° Phi Oscill.: 0 Material data:	Tube current [mA]: 6,7 Target: Ferrite Poisson's ratio: 0,3 Incl. [°]: + 45°, 18°, 20° Psi-Oscill.: 0

Dopo i 64 spettri.

POLITECNICO DI MILANO		Dipartimento di Meccanica		DWI/AMOD.08.006		13/06/2012																		
		Area Analisi Materiali (Sottoarea Diffrazione)		Agg. 1																				
Risultati analisi diffrattometriche " Tensioni Residue"																								
Anno: 2013 N° Progressivo ingresso campioni:				Rapporto di prova:																				
Richiedente: Beretta				Data Rapporto:																				
Campioni		Direzione 0°			Direzione 45°			Direzione 90°																
Posiz. Misura	Storzo [Mpa]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Storzo [Mpa]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	Storzo [Mpa]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Storzo [Mpa]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Phi [°]	Scarto [°]	
A	190.3	4.8	2.63	0.06	6.7	2.62	0.09	-146.6	14.0	2.62	0.09	-145.7	9.1	-191.3	9.1	81.8	12.3							
B	-276.2	7.7	2.66	0.10	8.5	2.65	0.12	-140.3	17.7	2.64	0.10	-139.6	11.9	-277.0	11.9	85.7	5.3							
C	-282.4	6.1	2.68	0.01	8.2	2.67	0.09	-138.1	17.5	2.64	0.10	-137.0	11.4	-283.4	11.4	85.1	4.8							
G	-345.3	9.4	2.70	0.08	8.1	2.67	0.08	-302.2	13.4	2.67	0.06	-301.9	10.1	-345.6	10.1	-85.4	15.0							
H	-498.3	9.8	2.75	0.11	10.7	2.71	0.09	-349.5	10.0	2.68	0.07	-349.5	8.6	-498.4	8.6	89.1	4.9							
I	-449.1	7.7	2.74	0.10	18.3	2.71	0.08	-302.2	23.5	2.69	0.09	-302.1	15.2	-449.3	15.2	88.0	8.6							
D	-200.1	18.5	2.7	0.03																				
D1	22.0	16.1	2.65	0.2																				
E																								
E1																								
M	-494.3	20.0	2.41	0.02																				
M1	-205.7	28.4	2.42	0.02																				
N	-420.4	18.7	2.40	0.02																				
N1	-263.3	36.3	2.05	0.02																				

Analisi eseguita secondo : NPL - Measurement Good Practice Guide N. 52 " Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction" - Issue 2 - ISSN 1744-3911 September 2005

**Apparecchiatura utilizzata:** Diffrattometro Xstress 3000 - AST Stresstech

**Parametri utilizzati:** X-Ray tube: Cr  
 Tube voltage [kV]: 30  
 Tube current [mA]: 6.7  
 Filters: Kβ  
 Diffraction angle [°]: 156.4  
 Young's mod [Mpa]: 211000  
 Collimator Ø [mm]: 2  
 Exp Time [sec]: 20  
 N° Incl.: 6/6  
 Target: Ferrite  
 Poisson's ratio: 0.3  
 Phi Oscill.: 0  
 N° Phi Oscill.: 0  
 Material data:

Note: La misura dei punti M, M1, N, N1 è stata fatta con una inclinazione di 20° ed assialmente per motivi di ingombri nella movimentazione del Goniometro

# Allegato F – Risultati diffrattometro in profondità

POLITECNICO DI MILANO		Dipartimento di Meccanica		DMH/MMD/08.007		13/06/201														
		Area Analisi Materiali (Sotoura Diffrattometria)		Aeq. 1																
Risultati analisi diffrattometriche " Tensioni Residue" con asportazione elettrolitica																				
Anno: 2013 N° Progressivo ingresso campioni:				Rapporto di prova:																
Richiedente: Beretta				Data Rapporto:																
Campioni																				
Identificazione	Posizione Misura	Profondità [mm]	Direzione 0°			Direzione 45°			Direzione 90°			Sforzi principali								
			Sforzo [Mpa]	Scarto (+/-) [Mpa]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+/-) [°]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	Sforzo (+/-) [Mpa]	Scarto (+/-) [Mpa]	Phi [°]	Scarto [°]						
04_01	A	0	-190,3	4,8	2,63	0,06	-175,0	6,1	2,62	0,09	-145,7	3,1	-191,3	3,1	81,8	12,3				
04_01		0,02	-293,4	3,5	2,37	0,08	-264,1	10,6	2,54	0,06	-195,0	8,5	2,43	0,05	-237,1	8,3	73,2	6,4		
04_02		0,06	-238,8	3,3	2,53	0,03	-193,0	6,8	2,50	0,06	-171,6	4,2	2,47	0,03	-171,6	6,3	-228,8	6,3	-88,0	8,5
04_03		0,10	-265,1	10,8	2,58	0,11	-238,3	4,1	2,54	0,09	-205,7	11,5	2,46	0,04	-205,4	3,6	-265,3	3,6	26,6	8,5
04_04		0,14	-255,5	18,0	2,55	0,09	-244,2	11,5	2,52	0,07	-230,5	4,0	2,49	0,05	-230,4	11,3	-255,6	11,3	87,3	33,5
04_05		0,18	-250,6	14,6	2,49	0,09	-247,9	4,3	2,46	0,07	-233,1	11,2	2,44	0,05	-231,2	11,4	-252,5	11,4	72,5	26,5
04_06		0,22	-255,0	17,1	2,37	0,10	-253,2	10,8	2,31	0,08	-247,4	13,8	2,32	0,06	-242,4	15,4	-260,1	15,4	57,1	33,2
04_07		0,35	-231,4	10,3	2,27	0,09	-230,3	12,2	2,30	0,06	-225,5	11,5	2,30	0,10	-224,7	11,0	-232,3	11,0	70,1	31,1
04_08		0,65	-136,6	8,8	2,04	0,07	-162,9	15,1	2,02	0,07	-179,0	13,2	2,01	0,06	-136,0	10,0	-173,7	10,0	6,8	21,9
04_09		0,9	-126,9	14,4	1,93	0,06	-162,4	14,1	1,92	0,04	-208,3	17,8	1,92	0,05	-124,4	14,4	-211,4	14,4	3,7	11,6
04_10		1,3	-122,4	17,5	1,86	0,07	-192,4	16,3	1,88	0,06	-238,3	17,3	1,81	0,03	-121,1	15,3	-233,5	15,3	5,9	10,0
04_11		1,55	-143,2	19,0	1,86	0,11	-167,1	17,0	1,83	0,11	-240,5	26,2	1,92	0,10	-141,5	20,8	-248,3	20,8	15,7	11,7
04_12		1,95	-162,4	33,2	1,88	0,17	-148,7	25,2	1,90	0,13	-244,6	26,7	1,85	0,11	-171,1	30,6	-163,8	30,6	73,5	13,7
04_13		2,35	-110,2	19,2	1,73	0,08	-168,2	18,4	1,71	0,11	-191,6	14,8	1,75	0,12	-106,6	15,7	-195,1	15,7	11,5	13,5
04_14		2,55	-122,6	14,8	1,75	0,18	-185,5	13,8	1,82	0,15	-205,5	26,8	1,93	0,12	-117,3	13,8	-210,5	13,8	13,8	14,3
04_15																				



Risultati analisi diffrattometriche " Tensioni Residue" con asportazione elettrolitica

Anno: 2013		N° Progressivo ingresso campioni:		Richiedente: Beretta		Data Rapporto:		Rapporto di prova:												
Campioni		Direzione 0°				Direzione 90°				Sforzi principali										
Identificazione	Posizione Misura	Profondità z [mm]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+) [Mpa]	FWHM [°]	Scarto (+) [Mpa]	Scarto (+) [°]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+) [Mpa]	FWHM [°]	Scarto (+) [Mpa]	Scarto (+) [°]	Sigma 1 [Mpa]	Scarto (+) [Mpa]	Sigma 2 [Mpa]	Scarto (+) [Mpa]	Phi [°]	Scarto [°]		
	Azelle Rollato 04	0	-276,2	7,7	2,66	0,10	-218,5	8,5	2,65	0,12	-140,3	17,7	2,64	0,10	-133,6	11,3	-277,0	11,3	85,7	5,3
04_01		0,02	-326,9	10,2	2,52	0,07	-263,9	5,4	2,43	0,07	-165,2	6,2	2,44	0,05	-163,2	7,3	-328,8	7,3	83,8	2,8
04_02		0,06	-390,8	11,4	2,59	0,09	-301,3	5,4	2,55	0,06	-181,1	7,8	2,43	0,04	-180,4	8,5	-337,5	8,5	86,7	2,3
04_03		0,10	-478,3	12,8	2,63	0,11	-343,6	4,1	2,58	0,08	-229,2	8,1	2,54	0,04	-228,8	9,3	-476,7	9,3	-87,7	2,0
04_04		0,14	-487,2	16,6	2,61	0,11	-367,6	6,0	2,56	0,09	-253,4	12,9	2,52	0,04	-253,3	12,9	-487,2	12,9	-89,3	3,0
04_05		0,18	-468,8	15,5	2,60	0,11	-374,6	6,2	2,56	0,08	-254,7	10,9	2,50	0,04	-253,9	11,6	-465,5	11,6	86,6	3,0
04_06		0,22	-451,2	24,5	2,40	0,07	-380,7	18,0	2,40	0,04	-284,3	5,3	2,35	0,08	-283,4	15,5	-452,2	15,5	85,6	7,4
04_07		0,45	-348,2	8,2	2,21	0,10	-283,2	11,7	2,17	0,06	-204,8	21,5	2,15	0,07	-204,5	14,1	-348,6	14,1	87,4	6,5
04_08		0,80	-258,7	16,4	1,97	0,08	-262,5	13,0	1,98	0,08	-245,0	14,0	2,00	0,08	-233,2	15,3	-264,5	15,3	61,4	29,1
04_09		1,05	-264,0	17,4	1,98	0,07	-273,6	19,1	1,99	0,07	-221,1	31,6	1,99	0,06	-204,8	24,7	-280,3	24,7	62,3	15,9
04_10		1,40	-289,9	21,3	1,93	0,09	-247,5	22,8	1,94	0,07	-293,5	16,8	1,94	0,08	-247,5	23,2	-336,0	23,2	-43,8	8,8
04_11		1,65	-287,2	17,2	1,92	0,05	-326,7	15,9	1,94	0,09	-348,2	16,1	1,89	0,10	-285,9	15,6	-343,5	15,6	8,2	17,8
04_12		1,95	-310,9	21,4	1,91	0,11	-263,7	21,2	1,93	0,08	-256,8	24,8	1,89	0,08	-250,1	21,9	-317,6	21,9	-71,7	20,1
04_13		2,10	-234,3	19,3	1,97	0,07	-283,2	12,7	1,94	0,08	-316,4	16,6	1,95	0,13	-293,6	16,5	-317,2	16,5	5,4	12,6
04_14		2,35	-250,8	15,2	1,85	0,08	-276,0	28,9	1,87	0,11	-257,0	13,0	1,80	0,11	-231,5	23,8	-276,2	23,8	41,0	14,1
04_15																				

Analisi eseguita secondo: MPL - Measurement Good Practice Guide N. 52 " Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction" - Issue 2 - ISSN 1744-3911 September 2005

Apparecchiatura utilizzata	Diffrattometro Xstress 3000 - AST Stretech	Metodo di calcolo:	Cross Correlation
Parametri utilizzati:	X-Ray tube: Cr Filters: Kβ Collimator Ø [mm]: 1 - 2 Phi Oscill.: 0	Tube current [mA]: 6,7 Young's mod [Mpa]: 211000 N° Incl.: 8/6 Material data:	Target: Ferrite Poisson's ratio: 0,3 Incl. [°]: + - 45
	X-Ray tube: Cr Filters: Kβ Collimator Ø [mm]: 1 - 2 Phi Oscill.: 0	Tube voltage [kV]: 30 Diffraction angle [°]: 156,4 Exp Time [sec]: 30 - 20 N° Phi Oscill.: 0	Geometry: Psi Expr. E/(1+ω): Psi-Oscill.: 0



Risultati analisi diffrattometriche " Tensioni Residue" con asportazione elettolitica

Anno: 2013 N° Progressivo ingresso campioni:

Richiedente: Beretta

Data Rapporto:

Rapporto di prova:

Campioni	Direzione 0°				Direzione 45°				Direzione 90°				Sforzi principali							
	Posizione Micura	Sforzo [Mpa]	Scarto (+) [Mpa]	F'wHM [°]	Scarto (+) [°]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+) [Mpa]	F'wHM [°]	Scarto (+) [°]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+) [Mpa]	F'wHM [°]	Scarto (+) [°]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+) [Mpa]	F'wHM [°]	Scarto (+) [°]	Phi [°]	Scarto [°]	
Azalee Fullato 04	M2	0	non misurate																	
04_01		0,04	-622,0	23,7	2,60	0,03	-436,0	16,3	2,68	0,07	-280,4	8,6	2,63	0,06	-279,7	18,9	-622,7	18,9	-87,5	3,7
04_02		0,08	-657,8	34,3	2,59	0,02	-429,4	11,0	2,70	0,10	-291,7	6,8	2,62	0,05	-286,2	21,5	-663,4	21,5	-83,0	3,1
04_03		0,12	-669,6	42,4	2,57	0,02	-427,4	13,3	2,63	0,09	-297,7	5,9	2,61	0,05	-289,4	26,3	-677,9	26,3	-81,6	3,7
04_04		0,17	-636,1	47,3	2,50	0,02	-406,5	17,3	2,64	0,09	-273,6	3,4	2,57	0,07	-267,3	29,2	-642,5	29,2	-82,5	4,4
04_05		0,22	-634,3	55,7	2,50	0,03	-417,5	14,1	2,63	0,09	-287,1	11,0	2,58	0,06	-281,8	34,8	-659,6	34,8	-83,0	5,0
04_06		0,25	-624,4	22,1	2,32	0,06	-428,0	10,1	2,42	0,10	-323,6	5,0	2,37	0,07	-321,7	14,1	-623,3	14,1	-80,8	2,7
04_07		0,55	-466,7	33,8	2,18	0,05	-377,0	14,3	2,23	0,07	-323,6	8,8	2,25	0,09	-321,4	21,5	-468,9	21,5	-83,0	8,7
04_08		0,85	-425,3	46,1	2,00	0,04	-323,4	46,4	1,98	0,06	-230,8	37,2	2,00	0,05	-230,7	36,3	-425,4	36,3	-88,6	16,2
04_09		1,30	-341,2	30,6	2,09	0,07	-389,5	20,2	2,11	0,05	-377,5	45,5	2,11	0,04	-324,0	36,2	-394,4	36,2	-29,6	24,1
04_10		1,60	-314,6	19,7	1,88	0,07	-221,7	50,3	1,89	0,07	-206,5	48,9	1,88	0,04	-194,0	38,4	-327,1	38,4	-72,2	20,9
04_11		2,00	-175,0	49,6	1,87	0,04	-150,3	52,8	1,86	0,06	-163,3	53,5	1,87	0,06	-149,3	57,0	-190,0	57,0	54,1	56,4
04_12		2,25	-172,6	35,1	1,73	0,04	-221,5	39,4	1,73	0,05	-158,9	41,5	1,74	0,05	-87,9	42,9	-233,6	42,9	52,2	12,2
04_13		2,50	-201,2	25,6	1,72	0,06	-191,3	49,0	1,67	0,07	-240,8	34,8	1,70	0,06	-185,3	39,1	-256,7	39,1	28,1	27,9
04_14		2,80	-120,0	36,7	1,66	0,05	-198,7	32,9	1,69	0,04	-241,1	30,2	1,68	0,05	-117,8	29,7	-246,3	29,7	1,5	17,7

Analisi eseguita secondo: NPL - Measurement Good Practice Guide N. 52 " Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction" - Issue 2 - ISSN 1744-3911 September 2005

Apparecchiatura utilizzata: Diffrattometro Xstress 3000 - AST Stresstech

Parametri utilizzati: X-Ray tube: Cr

Filters: Kβ

Collimator Ø [mm]: 2 - 1

Exp Time [sec]: 20 - 30

N° Incl.: 6/6

Tube voltage [kV]: 30

Diffraction angle [°]: 156,4

Young's mod [Mpa]: 211000

Poisson's ratio: 0,3

Target: Ferrite

Incl. [°] + - 45

Geometry: Psi

Exp. E/(1+ν):

Psi-Oscill.: 0

Metodo di calcolo: Cross Correlation

Tube current [mA]: 6,7

Young's mod [Mpa]: 211000

Poisson's ratio: 0,3

Target: Ferrite

Incl. [°] + - 45

Geometry: Psi

Exp. E/(1+ν):

Psi-Oscill.: 0



Risultati analisi diffrattometriche " Tensioni Residue" con asportazione elettrolitica

Anno: 2013 N° Progressivo ingresso campioni:

Richiedente: Beretta

Data Rapporto:

Rapporto di prova:

Campioni	Direzione 0°				Direzione 45°				Direzione 90°				Sforzi principali							
	Posizione Misura	Sforzo [Mpa]	Scarto (+/-) [Mpa]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+/-) [Mpa]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	Sforzo [Mpa]	Scarto (+/-) [Mpa]	FWHM [°]	Scarto (+/-) [°]	Sigma 1 [Mpa]	Scarto (+/-) [Mpa]	Sigma 2 [Mpa]	Scarto (+/-) [Mpa]	Phi [°]	Scarto [°]	
Azelle Polistiro 04	M2	0	Non misurate																	
04_01		0,04	-602,6	40,7	2,62	0,02	-418,7	4,1	2,72	0,03	-265,6	14,5	2,65	0,05	-264,3	26,5	-603,3	26,5	-87,4	3,7
04_02		0,08	-601,1	35,3	2,61	0,02	-416,2	11,0	2,70	0,08	-287,7	6,8	2,63	0,06	-285,1	22,1	-603,6	22,1	-84,3	3,8
04_03		0,12	-600,3	30,7	2,60	0,02	-403,2	7,4	2,63	0,11	-285,8	12,1	2,62	0,07	-280,8	20,2	-605,3	20,2	-82,3	3,2
04_04		0,17	-628,5	47,3	2,56	0,03	-423,8	16,5	2,63	0,03	-234,4	8,0	2,53	0,04	-230,2	23,5	-632,7	23,5	-83,6	4,8
04_05		0,22	-566,4	65,8	2,50	0,02	-414,0	13,3	2,63	0,08	-276,0	10,4	2,57	0,05	-275,8	40,8	-566,6	40,8	-88,6	7,1
04_06		0,25	-606,8	41,3	2,33	0,06	-412,0	16,2	2,40	0,12	-316,6	13,9	2,34	0,05	-308,4	27,3	-615,1	27,3	-80,5	5,0
04_07		0,40	-479,2	40,2	2,19	0,07	-368,1	10,4	2,25	0,03	-282,7	19,3	2,30	0,10	-281,8	27,5	-480,0	27,5	-86,3	7,1
04_08		0,65	-415,3	80,4	2,07	0,05	-383,3	30,9	2,12	0,07	-240,8	45,6	2,11	0,05	-224,7	57,8	-432,0	57,8	73,8	14,7
04_09		1,10	-361,6	46,6	1,94	0,05	-319,0	30,5	1,95	0,05	-304,3	24,5	1,99	0,05	-301,1	33,6	-364,8	33,6	-77,0	34,2
04_10		1,35	-235,6	25,3	1,92	0,06	-318,0	33,5	1,93	0,06	-267,4	47,5	1,91	0,04	-183,1	42,7	-319,80	42,70	38,3	11,9
04_11		1,70	-262,2	67,5	1,89	0,07	-385,1	43,8	1,84	0,04	-205,0	65,5	1,83	0,05	-79,5	65,2	-387,7	65,2	50,3	8,9
04_12		1,95	-313,8	33,9	1,84	0,09	-171,8	82,7	1,85	0,07	-242,4	55,8	1,82	0,08	-166,0	63,6	-330,2	63,6	-54,3	11,1
04_13		2,30	-837,5	53,0	1,72	0,08	-152,9	93,0	1,73	0,07	-247,6	51,5	1,72	0,09	-152,7	79,7	-332,5	79,7	-43,4	11,9
04_14		2,65	-212,2	48,7	1,78	0,06	-115,7	72,2	1,84	0,06	-164,9	47,0	1,82	0,10	-111,3	63,8	-265,2	63,8	-54,0	15,1

Analisi eseguita secondo: NPL - Measurement Good Practice Guide N. 52 " Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction" - Issue 2 - ISSN 1744-3311 September 2005

Apparecchiatura utilizzata: Diffrattometro Xstress 3000 - AST Stresstech

Parametri utilizzati: X-Ray tube: Cr Tube voltage [kV]: 30 Target: Ferrite

Filter: Kβ Young's mod [Mpa]: 211000 Poisson's ratio: 0,3

Collimator Ø [mm]: 2 - 1 Exp Time [sec]: 20 - 30 N° Incl.: 6/6 Incl. [°] + - 45 Psi-Oscill.: 0

Metodo di calcolo: Cross Correlation

Tube current [mA]: 6,7

Young's mod [Mpa]: 211000

Poisson's ratio: 0,3

Geometry: Psi

Exp. E[1+ew]:

Psi-Oscill.: 0



# Bibliografia

- [1] Insieme di regole tecniche e di sicurezza adottate dalla RFI – rete ferroviaria italiana. [www.rfi.it](http://www.rfi.it).
- [2] Peter R. Lewis, Alistair Nisbet. *Wheels to disaster! The Oxford train wreck of Christmas eve 1874*.
- [3] Quotadiano “L’Espresso”. *Treni merci, già 5 anni fa l’allarme*.
- [4] Quotidiano “Repubblica”. *Quell’ incidente di Firenze che sembrava anticipare il disastro di Viareggio*.
- [5] Ittirreno.it. *Strage di Viareggio, la procura chiede il rinvio a giudizio di 32 persone*.
- [6] Codice penale italiano. Articoli 430 e 450.
- [7] EURAXLES: European axles. 2011. [www.euraxles.eu](http://www.euraxles.eu).
- [8] WIDEM: Wheelset Integrated Design and effective maintenance. 2005 – 2008. [www.widem.org](http://www.widem.org)
- [9] SUSTRAIL: The sustainable freight railway: designing the freight vehicle – track system for higher delivered tonnage with improve availability at reduced cost. (2011). [www.sustrail.eu](http://www.sustrail.eu)
- [10] MARAXIL: Manufacturing railway axles with improve lifetime. 2011. [www.maraxil.mecc.polimi.it](http://www.maraxil.mecc.polimi.it)
- [11] S. Beretta S. Cantini. *Structural reliability assessment of railway axles*. 2011.
- [12] [www.aar.org](http://www.aar.org)
- [13] VPI – Vereinigung Der Privatgüterwagen Interessenten – documento tradotto in italiano.
- [14] VPI – Vereinigung Der Privatgüterwagen Interessenten. VPI01 – indicazioni legali.
- [15] M. Carboni. *Progettazione “Damage Tolerant”*.
- [16] Rummel WD. *Recommended practice for a demonstration of non-destructive evaluation (NDE) reliability on aircraft production parts*.
- [17] AFGROW version 4.0012.15, *Users guide and tecnica manual*. 2009
- [18] *Damage tolerance in aircraft structures* 486 (1971).
- [19] M. Filippini S. Foletti P. Davoli A. Bernasconi. *Comportamento meccanico dei materiali*. McGraw – Hill, 2005.

- [20] M. Carboni, D. Regazzi, L. Patriarca. *Determination of  $\Delta K_{th}$  by Compression Pre-Cracking in a Structural Steel*. Paper ID JAI102617
- [21] Tomoki Shiotami - *Parameter Analysis for the acoustic emission*.
- [22] M. Carboni. Appunti del corso "controlli non distruttivi". Aa 2011 - 2012
- [23] William H. PROSSER. *Acoustic emission*.
- [24] ISO 22096 - *Condition monitoring and diagnostic of machines – Acoustic Emission*.
- [25] Gilardoni S.p.a., *Modo d'uso rilevatore ultrasonoro digitale universale Gilardoni RDG 500*
- [26] Harfang Microtechniques Inc., X-32 User's Manual (Version 2.33R), Quebec City. 2006.
- [27] <http://www.qicomposites.com>
- [28] [www.vallen.de](http://www.vallen.de)
- [29] [www.michsci.com](http://www.michsci.com)
- [30] R. de Oliveira, A.T. Marques, Departamento de Engenharia Mecanica e Gestao Industrial (DEMEGI), Porto, Portugal. *Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks*. 2007.
- [31] ASTM International, designation E 569 – 07, *Standard practice for acoustic emission monitoring of structures during controller stimulation*.
- [32] Mario Guagliano, *L'applicazione della diffrattometria dei raggi X per l'analisi del cedimento dei componenti meccanici*.
- [33] Catalogo scaricabile sul sito internet [www.stresstechgroup.com](http://www.stresstechgroup.com)
- [34] Catalogo scaricabile sul sito internet [www.struers.com](http://www.struers.com) per la versione aggiornata (V) dell'elettropulitrice.
- [35] Tesi di laurea di Alessandro Corno, *Influenza del processo di rullatura sulla vita utile degli assili ferroviari*. 2011 - 2012







# Ringraziamenti

Ringraziamenti al dipartimento di costruzione e progettazione di macchine del Politecnico di Milano. Al prof. Michele Carboni, a Davide Crivelli, a Daniele Regazzi, al personale dell'edificio C4 e del laboratorio Grandi Macchine. Un ringraziamento speciale a Mauro De Mori.

I miei ringraziamenti più forti, sentiti e sinceri vanno ai miei genitori. Persone stupende. Re e regina.

Tutto il lavoro di questi anni e di questo elaborato vengono dedicati però ad una sola persona.

Per te.

