

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in  
Ingegneria Meccanica



Analisi dell'influenza degli impatti del ballast sulla probabilità di cedimento di assili ferroviari per il trasporto merci

Relatore: Dott. Ing. Michele Carboni

Co-relatore: Prof. Stefano Bruni

Tesi di Laurea di:

Vito GIMIGLIANO

Matr. 740101

Anno Accademico 2012 – 2013



# INDICE

<b>SOMMARIO</b> .....	<b>VII</b>
<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Stato dell'arte</b> .....	<b>1</b>
1.1 L'assiale ferroviario e le sue criticità .....	1
1.1.1 Il treno merci .....	1
1.1.2 Il carrello Y-25 .....	2
1.1.3 L'assile ferroviario per applicazioni merci .....	4
1.1.4 Influenza di impatti e corrosione sulla vita degli assili .....	9
1.1.5 Materiali per assili e approccio "damage tolerance" .....	18
1.1.6 Il rivestimento Lursak .....	26
1.2 Scopi del lavoro di tesi .....	29
<b>2 Prove sperimentali di impatto su assili</b> .....	<b>31</b>
2.1 Prove di impatto secondo UNI EN 13261 .....	31
2.1.1 Set-up sperimentale .....	32
2.1.2 Assile nudo .....	37
2.1.3 Assile rivestito Lursak nuova .....	43
2.1.4 Assile rivestito con Lursak invecchiata .....	45
2.1.5 Assile rivestito con Lursak a bassa temperatura .....	47
2.2 Prove di impatto con sassi della massicciata .....	51
2.2.1 Assile nudo .....	57
2.2.2 Assile rivestito con LURSAK nuova .....	60
2.2.3 Assile rivestito con Lursak invecchiata .....	62
2.3 Considerazioni .....	64
<b>3 Intervalli di ispezione per assili nudi e rivestiti con Lursak</b> .....	<b>65</b>
3.1 Analisi FEM dello stato di sforzo nell'assile .....	65
3.1.1 Componente di flessione .....	66
3.1.2 Calettamenti forzati .....	70
3.2 Previsione di vita a propagazione .....	72
3.3 Probabilità di cedimento e intervalli di ispezione .....	86
<b>4 Conclusioni</b> .....	<b>89</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>92</b>

---

# INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1.1 CARRELLO MERCI A DUE ASSI .....	3
FIGURA 1.2 SALA MONTATA .....	5
FIGURA 1.3 DISEGNO ASSILE PER TRASPORTO MERCI.....	5
FIGURA 1.4 CEDIMENTI A FATICA .....	7
FIGURA 1.5 ZONE DI PROPAGAZIONE .....	8
FIGURA 1.6 TIPI DI FATICA .....	8
FIGURA 1.7 FATTORI CHE INFLUENZANO LA VITA A FATICA DI UNA STRUTTURA	9
FIGURA 1.8 SCHEMATIZZAZIONE FRETTEGGIO CORROSION .....	11
FIGURA 1.9 VISTA NEL DETTAGLIO DI INNESCO(A) E PROPAGAZIONE(B).....	11
FIGURA 1.10 ASPETTI MORFOLOGICI TIPICI DEI FENOMENI DI CORROSIONE .....	13
FIGURA 1.11 CORROSIONE DA CORRENTI DISPERSE INDOTTE DA IMPIANTO FERROVIARIO.....	14
FIGURA 1.12 ELEMENTI CARATTERISTICI DEL SISTEMA FERROVIARIO TRADIZIONALE .....	16
FIGURA 1.13 CAUSE BALLAST PROJECT .....	16
FIGURA 1.14 STRADA FERRATA TRADIZIONALE(SINISTRA), STRADA FERRATA CON LASTRE (DESTRA) .....	17
FIGURA 1.15 PERCENTUALI MASSIME CONTENUTE NEL MATERIALE.....	18
FIGURA 1.16 CARATTERISTICHE MECCANICHE MATERIALE .....	18
FIGURA 1.17 DISEGNO ASSILE PER TRASPORTO MERCI.....	23
FIGURA 1.18 CLASSI ASSILI VERNICIATI .....	24
FIGURA 1.19 ASSILE RICOPERTO CON LURSAK .....	28
FIGURA 2.1 ASSILE TAGLIATO .....	32
FIGURA 2.2 PROIETTILE NORMATO (A) PROIETTILE CON VITE (B), PROIETTILE CON PIÙ MODULI (C) .....	33
FIGURA 2.3 ANELLI CIRCOLARI .....	33
FIGURA 2.4 SET UP SPERIMENTALE.....	34
FIGURA 2.5 STRUMENTI DI MISURA VELOCITÀ PROIETTILE.....	35
FIGURA 2.6 LASER MEL M5 .....	36
FIGURA 2.7 SCHEDA ACQUISIZIONE MOD. 9239 .....	36
FIGURA 2.8 ESEMPIO DI SEGNALE LASER (A) E CONFRONTO COL PROIETTILE (B) .....	37
FIGURA 2.9 TRONCONE IMPATTO A 12J .....	38
FIGURA 2.10 SCHEMA IMPATTO A 45° .....	39
FIGURA 2.11 IMPATTO A E=12 J ANGOLO DI IMPATTO 45° .....	39
FIGURA 2.12 IMPATTO CON E=22J (A) IMPATTO CON E=32J(B) .....	40
FIGURA 2.13 IMPATTO A 45° E=32J .....	42
FIGURA 2.14 IMPRONTA SU TRONCONE RIVESTITO CON LURSAK A 12J .....	43
FIGURA 2.15 IMPRONTA SU TRONCONE RIVESTITO CON LURSAK :E=32J(A),E=32J ANGOLO INCLINAZIONE 45°(B) .....	44
FIGURA 2.16 IMPRONTA DANNO CON ENERGIA DI IMPATTO A 12J(A) ENERGIA DI IMPATTO 32J(B).....	47
FIGURA 2.17 IMPATTO A E=12J TEMPERATURA CONTROLLATA T=-25 .....	48
FIGURA 2.18 IMPRONTA CON PROVA A T=-25°C ASSILE INVECCHIATO .....	48
FIGURA 2.19 IMPRONTA CON PROVA A T=-25°C ASSILE INVECCHIATO .....	49
FIGURA 2.20 IMPRONTA CON PROVA A T=-25°C ASSILE INVECCHIATO, IMPATTO A 45°, E=32J .....	50
FIGURA 2.21 IMPRONTA CON PROVA A T=-25°C ASSILE INVECCHIATO, E=12J .....	50

FIGURA 2.22 IMPRONTA CON PROVA A T=-25°C ASSILE INVECCHIATO, E=32J .....	51
FIGURA 2.23 MACCHINA DI PROVA .....	52
FIGURA 2.24 MECCANISMO DI SPARO. (A) RACCORDO BULLONATO ALLA FLANGIA (B) MECCANISMO DI SPARO (C) MEMBRANA ROTTA DOPO SPARO .....	53
FIGURA 2.25 SABOT NEL TUBO, (A) CARICO SABOT, (B) FINE CORSA SABOT .....	54
FIGURA 2.26 SABOT, (A) SABOT CON SASSO UTILIZZATO PER UNA PROVA (B) SASSO NEL FORO.....	54
FIGURA 2.27 RENDERING DELLA STRUTTURA DI SUPPORTO DEI TRONCONI.....	55
FIGURA 2.28 PIASTRA SUPPORTO TRONCONE.....	55
FIGURA 2.29 TELECAMERA PHANTOM V210 .....	56
FIGURA 2.30 TELECAMERA, ILLUMINAZIONE, PROTEZIONE .....	56
FIGURA 2.31 FOTOGRAMMI DELL'IMPATTO NUMERO 9.....	57
FIGURA 2.32 IMPRONTE SU ASSILE NON RIVESTITO .....	58
FIGURA 2.33 COMPARATORE RAMBOLD M2/30.....	59
FIGURA 2.34 ANDAMENTO PROFONDITÀ- ENERGIA .....	60
FIGURA 2.35 IMPRONTE SU ASSILE CON RIVESTIMENTO NUOVO .....	61
FIGURA 2.36 FOTOGRAMMI DELL'IMPATTO NUMERO 26 .....	62
FIGURA 2.37 FOTOGRAMMI DELL'IMPATTO NUMERO 27 .....	62
FIGURA 2.38 IMPRONTE SU ASSILE CON RIVESTIMENTO NUOVO .....	63
FIGURA 3.1 ASSILE CARRELLO Y-25.....	66
FIGURA 3.2 APPLICAZIONE DEI VINCOLI .....	67
FIGURA 3.3 VINCOLO TIE TRA RUOTA E PORTATA .....	68
FIGURA 3.4 DEFORMATA E ANDAMENTO DELLO SFORZO LONGITUDINALE .....	69
FIGURA 3.5 PARTICOLARE SEZIONE ESTRAPOLAZIONE ANDAMENTO DEGLI SFORZI.....	69
FIGURA 3.6 ANDAMENTO DEGLI SFORZI DOVUTO AI CARICHI VERTICALI DI FLESSIONE.....	70
FIGURA 3.7 MODELLO 2D ASSIALE SIMMETRICO.....	70
FIGURA 3.8 SOLLECITAZIONE LONGITUDINALE DOVUTA AL FORZAMENTO ASSE- RUOTA .....	71
FIGURA 3.9 SEZIONI OGGETTO DELLE SIMULAZIONI.....	72
FIGURA 3.10 ANDAMENTO DEGLI SFORZI DOVUTO AL PRESS-FIT.....	72
FIGURA 3.11 COMPRESSIONE-COMPRESSIONE METODI DI PRECRICCATURA PER GENERARE SPERIMENTALMENTE SOGLIE: (A) SCHEMA DELLE PROCEDURE SPERIMENTALI IN R=0 (B) CPCA E (C) CPLR.....	74
FIGURA 3.12 RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DELL'INTERVALLO DI ISPEZIONE .....	75
FIGURA 3.13 VALORI SPERIMENTALI DI PROPAGAZIONE OTTENUTI COL METODO $\Delta K$ -DECREASING [7,8] .....	76
FIGURA 3.14 VALORI SPERIMENTALI DI PROPAGAZIONE OTTENUTI COL METODO CPLR [9].....	76
FIGURA 3.15 ANDAMENTO DELLE SOGLIE DI PROPAGAZIONE CON IL RAPPORTO DI CICLO .....	78
FIGURA 3.16 INTERPOLAZIONE DELL'EQUAZIONE DI NASGRO MEDIANTE DATI CPLR .....	79
FIGURA 3.17 INTERPOLAZIONE DELL'EQUAZIONE DI NASGRO MEDIANTE DATI $\Delta K$ -DECREASING.....	80
FIGURA 3.18 DEFINIZIONE E CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL MATERIALE (A) CPLR (B) $\Delta K$ -DECREASING .....	81

---

FIGURA 3.19 FINESTRA DI DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOMETRICO: (A) MODELLO (B) DIMENSIONI GEOMETRICHE E DIMENSIONI INIZIALI CRICCA (C) CARICO FLESSIONALE .....	81
FIGURA 3.20 SPETTRO CARATTERISTICO DELLA SEZIONE 1 .....	82
FIGURA 3.21 SPETTRO CARATTERISTICO PER LA SEZIONE 2 .....	82
FIGURA 3.22 SPETTRO CARATTERISTICO SEZIONE 3.....	83
FIGURA 3.23 FINESTRA PER LA DEFINIZIONE DEL SFORZO DOVUTO AL CALETTAMENTO DELLE RUOTE .....	83
FIGURA 3.24 PREVISIONE DI VITA PER ASSILE NON RIVESTITO NELLA SEZIONE 2 DATI CPLR (A), PREVISIONE DI VITA PER ASSILE RIVESTITO NELLA SEZIONE 2 DATI CPLR (B) .....	84
FIGURA 3.25 PREVISIONE DI VITA PER ASSILE NON RIVESTITO NELLA SEZIONE 2 DATI $\Delta K$ -DECREASING (A), PREVISIONE DI VITA PER ASSILE RIVESTITO NELLA SEZIONE 2 DATI $\Delta K$ -DECREASING (B).....	84
FIGURA 3.26 PREVISIONE DI VITA PER ASSILE NON RIVESTITO NELLA SEZIONE 2 DATI CPLR.....	85
FIGURA 3.27 A) CURVE POD PER UT E MT PROPOSTE DA BENYON E WATSON, B) CONTROLLI DURANTE LA VITA DELL'ASSILE .....	86
FIGURA 4.1 ANDAMENTO PROFONDITÀ IMPRONTE C .....	90

# INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1.1 CARATTERISTICHE MECCANICHE ACCIAIO EA 1N.....	20
TABELLA 1.2 CLASSI MATERIALI VERNICIATI.....	26
TABELLA 2.1 RIASSUNTIVO PROVE A NORMA.....	38
TABELLA 2.2 RIASSUNTO LANCI A 45° CON ENERGIA=12J .....	40
TABELLA 2.3 RIASSUNTO LANCI PERPENDICOLARI CON ENERGIA =22J .....	41
TABELLA 2.4 RIASSUNTO LANCI PERPENDICOLARI CON ENERGIA =32J .....	41
TABELLA 2.5 RIASSUNTO LANCI CON ANGOLO A 45° E=32J .....	42
TABELLA 2.6 RIASSUNTO LANCI EFFETTUATI A E=32J .....	44
TABELLA 2.7 RIASSUNTO LANCI E=32J CON ANGOLO DI IMPATTO PARI A 45° .....	45
TABELLA 2.8 CICLI TERMICI PER INVECCHIAMENTO VERNICE LURSAK .....	45
TABELLA 2.9 RIASSUNTO PROVE EFFETTUATE SU VERNICE LURSAK INVECCHIATA .....	46
TABELLA 2.10 RIASSUNTO PROVE DI IMPATTO SU VERNICE INVECCHIATA CON ANGOLO DI IMPATTO PARI A 45° .....	47
TABELLA 2.11 RIASSUNTO PROVE A T=25°C CON VERNICE NUOVA .....	49
TABELLA 2.12 RIASSUNTO SPARI A T=-25°C CON VERNICE LURSAK INVECCHIATA E ANGOLO DI IMPATTO PARI A 45° .....	50
TABELLA 2.13 RIASSUNTO LANCI A -25°C SU VERNICE LURSAK INVECCHIATA. ...	51
TABELLA 2.14 RIASSUNTIVO PROVE ASSILE NON RIVESTITO .....	59
TABELLA 2.15 RIASSUNTIVO PROVE ASSILE CON RIVESTIMENTO NUOVO. ....	61
TABELLA 2.16 RIASSUNTIVO PROVE ASSILE CON RIVESTIMENTO INVECCHIATO	63
TABELLA 3.1 VALORI DEI PARAMETRI EMPIRICI PER L'EQUAZIONE DELLE SOGLIE.....	78
TABELLA 3.2 PARAMETRI EMPIRICI EQUAZIONE DI NASGRO.....	79
TABELLA 3.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE ACCIAIO A 1N [2] .....	80
TABELLA 3.4 RIASSUNTIVO PROPAGAZIONE CRICCA NELLE TRE SEZIONI CON DATI CPLR .....	85
TABELLA 3.5 RIASSUNTIVO PROPAGAZIONE CRICCA NELLE TRE SEZIONI CON DATI ΔK-DECREASING .....	86

---





## SOMMARIO

In questo lavoro di tesi si è studiato l'effetto del rivestimento LURSAK per assili ferroviari per il trasporto merci realizzati in acciaio A1N. La vernice protettiva è innovativa in quanto permette di ottenere una protezione del componente meccanico contro corrosione e impatti. Per poter studiare il beneficio prodotto dal rivestimento si sono svolte prove sperimentali seguendo le linee guida dettate dalla norma UNI EN 13261; si sono inoltre effettuate delle prove di impatto utilizzando massicciata; entrambe le campagne sperimentali sono state effettuate su assili rivestiti e su assili non rivestiti. Si sono realizzati dei modelli ad elementi finiti per valutare lo stato di sforzo della struttura. Le informazioni derivanti dalle prove sperimentali e dalle analisi ad elementi finiti si sono utilizzate per valutare la durata della vita a propagazione degli assili in tre sezioni caratteristiche per gli assili merci. Le simulazioni di avanzamento di cricca si sono effettuate utilizzando il software AFGROW.

Infine con i dati di propagazione si è calcolata la probabilità totale di cedimento. A conclusione del lavoro si evince che la vernice LURSAK aumenta la vita degli assili realizzati in acciaio A1N e consente intervalli di ispezione più ampi rispetto agli assili non rivestiti.

Parole chiave: Assile ferroviario, Afgrow, cricca, rivestimento.

---

## ABSTRACT

This work deals with the effects of the LURSAK coating in railway axles commonly used for freight trains, realized in A1N steel. The innovative coating allows to reach a higher protection of the mechanical component against corrosion and mechanical impact. In order to evaluate the improvements produced by the coating an experimental campaign in compliance with the guidelines of the UNI EN 13261 standard has been performed. Further experimental tests of impact have been performed using ballast. Both of the experiments have been performed using coated and non-coated axles. Finite element models have been realized in order to evaluate the state of tension of the structure. The results of the experimental tests and the finite element analysis have been used for the crack growth life (crack propagation) evaluation, in the characteristic zones of the axles indicated by the standard. Crack growth simulations have been conducted by means of AFGROW software. Starting from the propagation data the total failure probability has been determined.

This work showed that not only LURSAK coating increases the time duration of A1N axles, but also (it) allows longer periods without maintenance operations.

Keywords: Railway axle, Afgrow, crack, coating.

# INTRODUZIONE

I veicoli ferroviari hanno fatto la loro comparsa nel XIX secolo e da allora sono argomento costante di ricerca, gli assili in particolare essendo un organo molto sollecitato e di fondamentale importanza nella struttura di un treno sono da decenni oggetto di studio per migliorarne le performance e l'affidabilità.

In questa tesi è stata studiata l'influenza degli impatti da ballast nei confronti della probabilità di cedimento di assili ferroviari per il trasporto merci.

L'affidabilità di questi organi meccanici rappresenta uno dei più importanti problemi riguardo la resistenza della struttura dei veicoli ferroviari.

Il lavoro di tesi fa parte del progetto SUSTRAIL che persegue i seguenti obiettivi:

- Aumento della domanda del totale dei volumi di trasporto merci
- Spostamento del trasporto merci su strada oltre i 300 km verso altri modi, quali la ferrovia

Si intuisce l'importanza che ricopre la manutenzione programmata nel capitolo costi per il raggiungimento degli obiettivi del progetto.

Nel Capitolo 1 si è analizzato lo stato dell'arte dal quale è emerso che gli assili ferroviari si rompono perché nascono le cricche causate dai pit di corrosione o dalle impronte degli impatti. Per limitare questi problemi Lucchini RS in collaborazione con Azkonobel hanno sviluppato un vernice protettiva costituita da una matrice epossidica rinforzata con fibre sintetiche, LURSAK®.

Nel Capitolo 2 si valuterà il rivestimento LURSAK effettuando delle prove sperimentali su degli spezzoni di assile merci seguendo la normativa EN UNI 13261, per poter valutare l'effetto della vernice si sono effettuati test su spezzoni:

- Non rivestiti
- Rivestiti con vernice LURSAK nuova e invecchiata a temperatura ambiente
- Rivestiti con vernice LURSAK nuova e invecchiata a temperatura  $T=-25^{\circ}\text{C}$

L'invecchiamento della vernice sarà effettuato seguendo la procedura suggerita dalla normativa D 6944-03 ASTM; l'intera procedura richiederà un mese di cicli termici.

Tutti i test si effettueranno seguendo la procedura indicata nella normativa EN 13261 realizzando un set-up sperimentale ad hoc.

Sempre nel Capitolo 2 si effettueranno prove con lancio di massicciata su tronconi non rivestiti e rivestiti con vernice LURSAK nuova ed invecchiata (in questo caso non si realizzeranno prove a  $T=-25^{\circ}\text{C}$ ), queste prove sono molto

---

interessanti in quanto non esistono in letteratura e forniscono un interessante confronto con le norme eseguite seguendo le linee guida delle normative vigenti. Nel Capitolo 3, si acquisiranno i dati dalle sperimentazioni e si procederà realizzando dei modelli di propagazione con l'ausilio del software AFGROW eseguendo le simulazioni per tre sezioni caratteristiche dell'assile; per effettuare queste analisi si è reso necessario interpolare i dati di propagazione sperimentale con l'equazione di Nasgro e creare dei modelli FEM con il software ABAQUS per ricavare l'andamento delle sollecitazioni nella struttura.

Nella seconda parte del Capitolo 3 utilizzando una routine Matlab si determinerà un piano di ispezione dell'assile considerando sia il componente non rivestito sia rivestito.

# 1 Stato dell'arte

## 1.1 L'assiale ferroviario e le sue criticità

La prima comparsa del treno risale al XIX secolo, fin dall'inizio i guasti meccanici più critici e ricorrenti riguardavano gli assili e le ruote. Gli studi sulla fatica dei componenti meccanici è iniziato dal settore ferroviario, studiando gli assili. Con il passare degli anni vi è una crescente domanda una valutazione della affidabilità di questi componenti, soprattutto considerando intervalli di ispezione di vita. La vita a fatica di un assile può superare i trenta anni, durante i quali viene regolarmente controllato mediante prove con controlli non distruttivi.

Durante il loro servizio gli assili sono soggetti a fenomeni legati a:

- danni procurati da impatti accidentali,
- corrosione dovuta a fenomeni ambientali.

### 1.1.1 Il treno merci

Il concetto di treno nasce in epoca romana dove carrelli concatenati tra loro erano trainati da bestie o schiavi. Nel 1804 si ha la prima locomotiva con ruote e binari d'acciaio destinata alla ferrovia mineraria del Galles. Nel 1830 ebbe inizio la storia della ferrovia con la realizzazione della prima linea tra Liverpool e Manchester e in Francia la tratta Saint-Etienne-Lione.

Durante la prima guerra mondiale il treno divenne il mezzo primario per la movimentazione di armi e uomini. Si sfruttava la rapidità e la potenza del treno per installare cannoni su appositi carri, capaci di sparare le salve e scomparire in pochi minuti, proteggendosi nelle gallerie dai raid aerei. Sempre in questo periodo si utilizzava il treno per allestire sui carrelli dello stesso degli ospedali itineranti.

Negli anni '50- '60 lo sviluppo ferroviario ebbe un'enorme importanza nell'economia europea, perché rese possibile l'espansione industriale, permettendo di trasportare a basso costo prodotti agricoli, industriali e minerari su lunghe distanze. La movimentazione di merci su rotaia ha un ruolo ancora di primo ordine per quanto riguarda il campo dei servizi alle imprese nel settore logistica e trasporto merci, infatti si ha la possibilità di spedire grandi volumi con un occhio rivolto all'economicità e al rispetto ambientale, si noti che se considerato in termini di tonnellate-km per unità di energia consumata il trasporto ferroviario è più efficiente rispetto ad altri mezzi di trasporto.

Nel corso del tempo sono stati realizzati innumerevoli tipologie di carri specializzati per gestire i vari tipi di merci da movimentare e per rispondere a molteplici necessità. Si hanno carri scoperti, carri pianali, refrigerati, cisterna, bisarca (trasporto auto), porta-container, ecc.

Un recente studio del Ministero dell'Ambiente stima che spostare su rotaia il trasporto merci porterebbe all'Italia un risparmio di 3 miliardi di euro annui in costi ambientali, pari al 57% dei danni causati dall'inquinamento atmosferico. Dallo studio è emerso che il trasporto su gomma costa 0.9/1 euro/km mentre il trasporto su rotaia 1.3/1.4 euro/km, lo scarto di circa 0.3 centesimi di euro a chilometro è largamente compensato dai maggiori costi ambientali che causa il trasporto su gomma.

Il trasporto ferroviario ha dei limiti, non è flessibile e a volte si è costretti ad effettuare dei trasbordi in particolare quando mittente e destinatario non hanno accesso ferroviario diretto. Questo, è un vincolo molto rilevante infatti a volte i costi di trasbordo e di trasporto fino alla ferrovia possono superare quella del servizio ferroviario stesso. Per limitare questo problema si è adottata la containerizzazione in modo da rendere più facile e rapido il trasbordo camion-carro.

### **1.1.2 Il carrello Y-25**

La sigla Y-25 indica una tipologia di carrello impiegata su treni per il trasporto merci. Questa tipologia di carri è ampiamente impiegata da molte società ferroviarie sia europee, sia asiatiche.

Il carrello è caratterizzato da una architettura costruttiva semplice e molto affidabile nel funzionamento. Nonostante ciò, sono particolarmente attive innovazione e ricerca al fine di migliorarne le caratteristiche e l'affidabilità.

Il successo di questo tipo di carrello e il suo largo impiego sono anche dovuti all'economicità della sua produzione e manutenzione. Gli operatori europei usano questo carro da trasporto merci sia con due assi, per i carichi più leggeri, che con 4 assi, per i carichi più pesanti.

La sigla Y-25 indica una tipologia di carrello UIC-ORE (Union International des Chemins de fer - Office de Recherches et d'Essais) progettato per i carri merci che circolano a velocità relativamente basse fino a 100 km/h e con un carico massimo di 25t per asse, oppure alla velocità di 120km/h con un carico di 20t per asse. Il telaio del carrello ha una struttura saldata a base di lamiera e profili in acciaio. La specifica riguardante il materiale impiegato per questi componenti è la EN 10025, mentre l'acciaio è S355J2G3 che è un acciaio con elevata lavorabilità.

Il carrello è ammortizzato ed in particolare si usano 8 coppie di molle si veda **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, ed ogni coppia è formata da una molla interna e una molla esterna. [1]

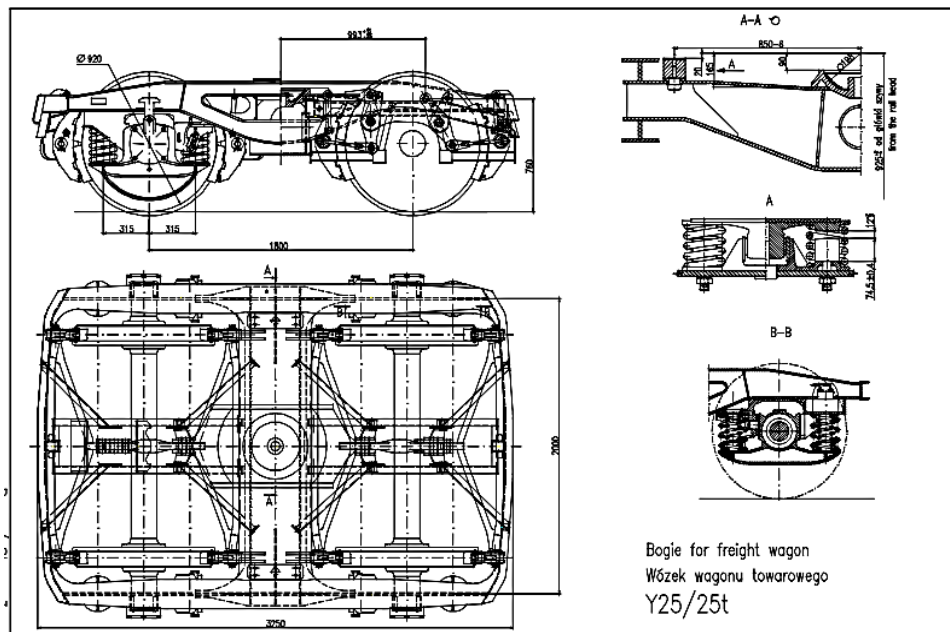


Figura 1.1 Carrello merci a due assi

Nel presente lavoro ci si occupa di effettuare una valutazione tecnica, tramite dati sperimentali e dati numerici, della tipologia di materiale utilizzato per ricoprire l'assile dei carrelli Y-25, al fine di migliorarne l'affidabilità.

Lo studio è stato svolto nell'ambito del progetto di ricerca europeo Sustrail [2] che si pone l'obiettivo di aumentare l'utilizzo del trasporto ferroviario di merci.

Gli obiettivi che si stanno perseguendo con questo progetto sono:

- Aumento della domanda del totale dei volumi di trasporto merci dal 40% (tonnellate chilometro) entro il 2030 e all'80% entro il 2050.
- Spostamento entro il 2030 del 30% del trasporto merci su strada oltre i 300km verso altri modi, quali la ferrovia, 50% entro il 2050.

I principali risultati scientifici e tecnologici attesi dal progetto europeo sono:

- Sviluppo di concetti di dinamica del veicolo ferroviario con nuovi profili delle ruote e miglioramento delle sospensioni che rispondono alle esigenze di una ferrovia a traffico misto.
- Nuovi materiali per i veicoli ad alte prestazioni di trasporto con velocità pari a 160km/h ed un aumento del carico per asse pari a 25 tonnellate.
- Strumenti di manutenzione predittiva.
- Progettazione basata sulle performance atta a minimizzare la manutenzione per il sistema.
- Ottimizzazione del sistema di monitoraggio a terra per ridurre il degrado della geometria del binario.

### **1.1.3 L'assile ferroviario per applicazioni merci**

Un veicolo ferroviario è composto da molteplici parti, tra questi si distinguono i macro componenti, questi sono:

- Cassa
- Sospensioni
- Motore
- Sala montata
- Duo o più carrelli

In questo lavoro focalizzeremo l'attenzione sull'assile, questo è il componente che collega rigidamente le due ruote. Le estremità dell'assile sono chiamate fuselli (si veda figura 1.2).



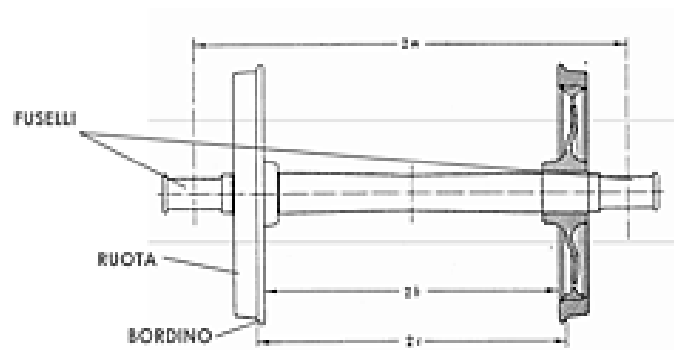


Figura 1.2 Sala montata

Gli assili, (figura 1.3) hanno un ruolo di primaria importanza per quanto riguarda la sicurezza e il confort di marcia del treno.

Un eventuale cedimento di un assile può dare luogo a incidenti con gravi conseguenze, come in Francia a Versailles (presso Meudon) nel 1842 dove si ruppe l'assile della locomotiva, in questo tragico incidente morirono tra le sessanta e le cento persone. [3] L'ultimo, in ordine di tempo (in Italia), accadde il 29 giugno 2009 a Viareggio in cui persero la vita 33 persone, esempi di cedimenti a fatica sono riportati in figura 1.4.

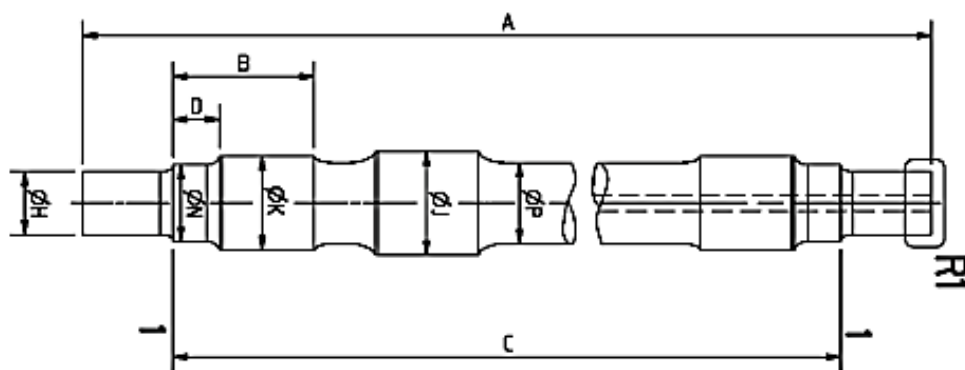


Figura 1.3 Disegno assile per trasporto merci

L'assale ferroviario ha un ruolo importante per quanto riguarda la sicurezza del treno, per questo motivo esso è oggetto di continui studi al fine di migliorare la sua progettazione elevando gli standard di sicurezza.

I possibili fenomeni che concorrono al cedimento degli assili ferroviari durante il loro esercizio sono tipicamente: corrosione, impatti e fatica.

La stima di vita di un assile sottoposto a carichi ciclici a fatica è di notevole importanza per l'industria ferroviaria, in quanto un loro eventuale cedimento può dare origine a gravi conseguenze. [3]

Oltre all'approccio classico si ha un crescente richiesta di valutazione affidabilistica degli assili, specialmente considerando gli intervalli di ispezione "safe life", che sono programmati ogni 600.000km o 12 anni di vita, e le applicazioni dell'alta velocità. [4-5]

La vita a fatica degli assili ferroviari spesso supera i 30 anni. Il primo a indagare sul fenomeno della fatica fu Wilhelm Albert nel 1829. Questi erano gli anni dello sviluppo delle reti ferroviarie e dei trasporti in generale, quindi veniva sempre più richiesta l'affidabilità dei mezzi di trasporto. Albert effettuò alcuni esperimenti di carico ripetuto su catene di acciaio. Nel 1853 Morin scrisse una perizia dove si imponeva una accurata ispezione degli assili ogni 70000km, oltre i quali erano probabili cricche in prossimità di variazioni di sezione. [6]

Nel periodo 1852-1870 un ingegnere ferroviario tedesco, Wöhler, condusse i primi esperimenti sistematici sul fenomeno della fatica per indagare sulle rotture in esercizio degli assili ferroviari. Wöhler condusse prove sia in scala reale che su provini di dimensioni ridotte ed ebbe il grande merito di definire la fatica come un fenomeno di danneggiamento progressivo del materiale che inizia con una fase di nucleazione di un microscopico cretto e che procede con una fase di propagazione del difetto a dimensioni critiche, tali da provocare la rottura per schianto. [7]



SS John P. Gaines  
24 Novembre 1943  
10 morti

Piattaforma petrolifera Alexander Kielland  
27 Marzo 1980  
123 morti

Boston  
15 Gennaio 1919  
11 morti

Figura 1.4 Cedimenti a fatica

Gli aspetti tipici di una rottura a fatica evidenziano tre stadi di sviluppo:

1. Origine da uno o più micro-cricche localizzate in regioni nelle quali sono presenti irregolarità superficiali.
2. Microcricche che diventano macro e formano superfici di frattura simili ad altopiani (in genere sono lisci e normali alla direzione della tensione principale massima) separati da creste longitudinali. Queste superfici sono chiamate linee di spiaggia e durante il ciclo di carico, si aprono e si chiudono sfregando tra loro si ha una dipendenza dal rapporto di ciclo, si veda figura 1.5.
3. La sezione restante del pezzo non riesce più a sopportare il carico e si ha il cedimento di schianto.

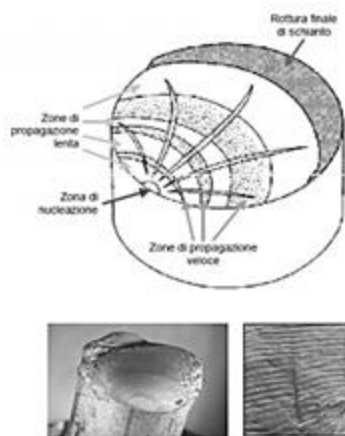


Figura 1.5 Zone di propagazione

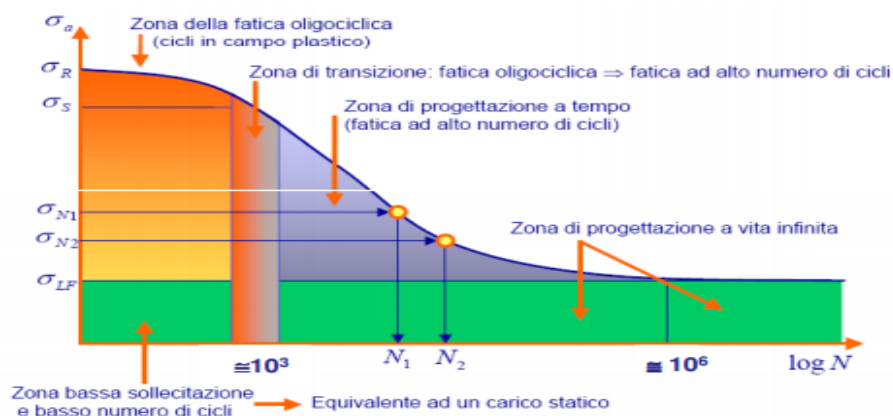


Figura 1.6 Tipi di fatica

La rottura per fatica è:

- Un fenomeno di tipo probabilistico in quanto dipende anche dai difetti introdotti dai processi tecnologici
- Un fenomeno prettamente locale, diverso ad esempio dallo snervamento causato da carico statico nel quale porzioni significative della sezione sono interessate dal fenomeno.

L'eterogeneità del materiale, lo sviluppo e l'accumulo del danno sono processi casuali che dipendono dalla probabilità di trovare cristalli più deboli nelle zone di sforzo più elevato. Sulla superficie esterna sollecitazioni elevate e

imperfezioni della struttura aumentano la probabilità di innesco del danno, questo venne confermato dall'esperienza di Wohler. Egli infatti scoprì che alcuni materiali sottoposti a fatica presentano un limite di sforzo a fatica sotto il quale il componente, dopo un determinato numero di cicli, non è soggetto ad alcuna nucleazione di cricca, si veda figura 1.6. Essendo difficile effettuare previsioni sicure sulla durata di un pezzo si ha la necessità di progettare utilizzando coefficienti di sicurezza elevati per conseguire affidabilità necessaria.



Figura 1.7 Fattori che influenzano la vita a fatica di una struttura

#### 1.1.4 Influenza di impatti e corrosione sulla vita degli assili

I fenomeni che influenzano la vita di un assile sono molti, si veda figura 1.7, ma tra i più importanti sicuramente ci sono gli impatti con ballast o ghiaccio e corrosione.

La corrosione è quel fenomeno di consumazione lenta e continua di un materiale che ha come conseguenze il peggioramento delle caratteristiche fisiche e chimiche del materiale inizialmente coinvolto. In passato il termine corrosione riguardava solo il decadimento dei materiali metallici. Oggi viene spesso impiegato per indicare anche il deterioramento di altri materiali. In questa definizione non rientra il degrado puramente meccanico come l'usura, l'abrasione, l'erosione, la cavitazione o il cedimento per fatica. Ma ci sono condizioni in cui il cedimento meccanico e quello per corrosione agiscono congiuntamente e danno luogo a particolari forme di attacco come la corrosione per abrasione, per erosione, per cavitazione o per fatica.

Nello specifico, gli assili sono soggetti a fenomeni di corrosione e fatica.

Si possono avere varie forme di corrosione:

Corrosione chimica (con reazione di ossido riduzione):

- Filiforme o lamellare (in presenza di strati di metalli diversi, o rivestimenti, ad esempio vernici).
- Infragilimento da idrogeno (blistering)

Corrosione meccanica (per effetto del carico applicato):

- Stress corrosion (corrosione sotto sforzo)

Corrosione meccanica:

- Corrosione biologica per attività metabolica di batteri

Corrosione per fatica:

- Questo tipo di corrosione si ha quando si è in presenza di combinazione simultanea di carichi variabili e ambienti corrosivi che producono una frattura per fatica superficiale. In un certo senso tutte le fratture per fatica si dovrebbero considerare come fratture per corrosione, ma le vere rotture per fatica corrosione sono quelle in ambienti aggressivi per il materiale, dove la corrosione rappresenta un punto fondamentale della nucleazione superficiale della cricca. Ovviamente la durata in esercizio di un componente soggetto a fatica corrosione è inferiore rispetto al caso di sola fatica a causa della forte riduzione della durata della fase di nucleazione.

Alla categoria della corrosione mecano-chimica appartengono tutti quei fenomeni corrosivi dove la normale azione elettrochimica di dissoluzione del metallo è accompagnata da sforzo meccanico o dinamico. L'azione combinata dei due fenomeni produce una criticizzazione del processo corrosivo.

Si può avere corrosione per sfregamento, che si verifica in seguito allo sfregamento oscillante di due superfici metalliche sottoposte a carico ed in contatto tra loro, si veda figura 1.8. I principali sistemi sottoposti a questo tipo di fenomeno sono: giunti, boccole, cuscinetti a sfera. Per evitare il fenomeno si utilizzano lubrificanti viscosi che evitino presenza di ossigeno.

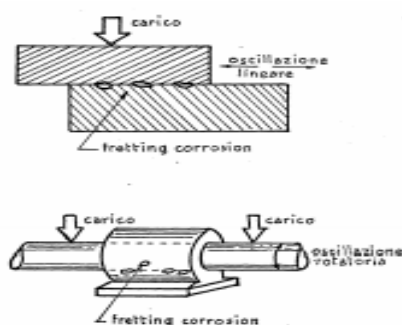


Figura 1.8 Schematizzazione fretting corrosion

La presenza di sforzi meccanici ed un ambiente aggressivo favoriscono l'attacco corrosivo. Gli sforzi meccanici variabili periodicamente generano nel metallo modificazioni strutturali. L'ambiente che permette il procedere di fenomeni elettrochimici interviene in maniera combinata. Si possono distinguere tre fasi, si veda figura 1.9, nel processo:

1. Nucleazione e raggruppamento di cricche (nucleazione)
2. Lenta propagazione (crescita)
3. Frattura

La corrosione sotto sforzo è quella modalità di danneggiamento che comporta la rottura fragile del componente per sollecitazioni di trazione piuttosto basse, quando il componente è esposto ad alcuni ambienti non particolarmente aggressivi. I principali meccanismi sono: scorrimento-dissoluzione, dove l'avanzamento della cricca avviene per dissoluzione anodica estremamente localizzata. Le pareti della cricca sono protette da un film (solitamente ossido) che a causa della deformazione del metallo, risulta interrotto all'apice della cricca.

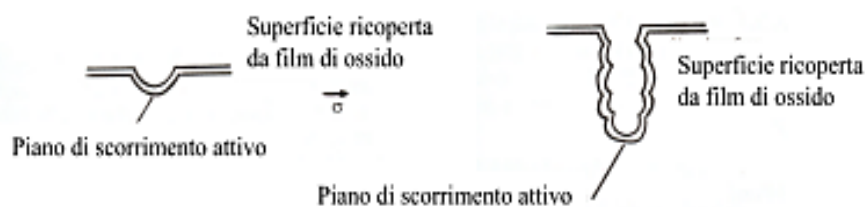


Figura 1.9 Vista nel dettaglio di innesco(a) e propagazione(b)

Le rotture per corrosione sotto sforzo sono macroscopicamente fragili. L'analisi al microscopio hanno mostrato che le cricche possono essere sia intergranulari, che transgranulari con clivaggio (la naturale tendenza di determinate strutture a separarsi, per la presenza di un'interfaccia tra due materiali diversi). Le principali variabili metallurgiche nel fenomeno della corrosione sotto sforzo sono:

- Composizione della soluzione solida: fattore che controlla la resistenza alla corrosione sotto sforzo negli ottoni, acciai inossidabili austenitici.
- Segregazione a bordo grano
- Trasformazione di fase e presenza di zone associate povere di soluto.
- Lavorazione a freddo che riduce la duttilità, e la tenacità a frattura che aumenta la velocità di SCC (stress corrosion cracking).

Si ricordi che, secondo la meccanica della frattura le modalità di sollecitazione rispetto al piano della cricca sono fondamentalmente 3: modo I, II, e III. Le prove di SCC saranno classificate in funzione del parametro tenuto costante:

- Deformazione
- Sforzo nominale
- Velocità di deformazione

Stime di varia origine indicano che l'entità dei danni, pur variando da settore a settore risulta compresa, per i Paesi industrializzati, tra il 3% e il 4% del prodotto nazionale lordo. Naturalmente nella valutazione dei danni si tiene conto del valore intrinseco dei materiali corrosi, dei costi per il loro rimpiazzo e dei costi che la corrosione richiede per la sua prevenzione come ad esempio i costi dei rivestimenti protettivi, della protezione catodica, del ricorso a sovradimensionamento o a soluzioni ridondanti, dell'impiego di materiali resistenti. In tali percentuali sono considerati i costi diretti e indiretti, extra-costi di manutenzione, perdita di prodotti da inquinanti cedimenti improvvisi. L'entità dei danni indiretti, se pur spesso di difficile valutazione può superare quella dei danni diretti.



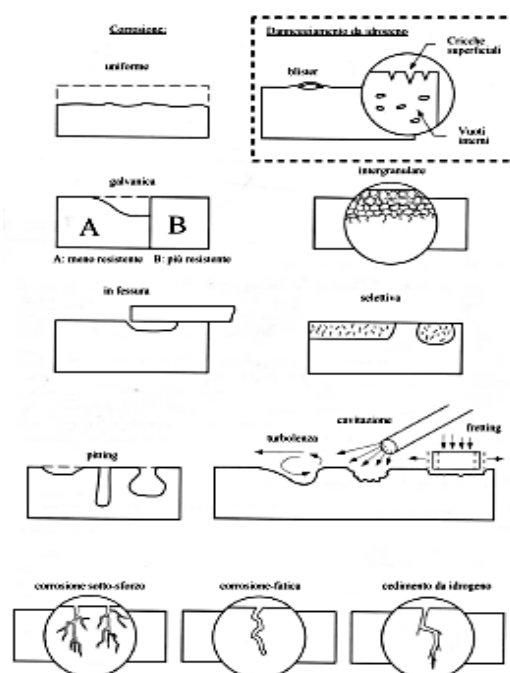


Figura 1.10 Aspetti morfologici tipici dei fenomeni di corrosione

La corrosione generalizzata, si ha quando tutta la superficie del materiale metallico è interessata dal fenomeno, questa può essere:

- uniforme: è la più diffusa e oltre alla perdita di materiale ha anche effetti distruttivi dovuti all'azione espansiva dei prodotti di corrosione
- localizzata: quando i processi corrosivi hanno luogo preferibilmente in corrispondenza della superficie del metallo. L'attacco corrosivo a volte può assumere carattere penetrante provocando perforazioni, questa forma è detta pitting. La formazione di questi attacchi è favorita dall'aumento di temperatura e dalla presenza di zone della superficie più difficilmente raggiungibili dall'ossigeno, quali quelle schermate da prodotti di corrosione o dalla presenza di interstizi, condizioni che si verificano nei punti di giunzione fra due lamiere metalliche creanti interstizi (giunti saldature incomplete, filettature). Altre volte l'attacco assume la forma di cricche. La corrosione sotto sforzo si manifesta per specifici accoppiamenti metallo-ambiente quando il materiale è soggetto ad una sollecitazione. La corrosione può riguardare particolari costituenti del materiale metallico o può

aggredivere selettivamente il bordo grano del materiale. Questo tipo di corrosione è detta intergranulare e può interessare gli acciai inossidabili austenitici e ferritici che hanno subito particolari trattamenti termici

- corrosione da correnti disperse: le cause più frequenti di questi gradienti sono gli impianti di trazione a corrente continua quali ferrovia, tram e metropolitane, si veda figura 1.11. In questi sistemi parte della corrente di ritorno alla sottostazione di alimentazione, invece di fluire attraverso le rotaie, passa nel terreno e quindi rientra alla sottostazione attraverso strutture metalliche presenti nel terreno. Su queste strutture si creano sia delle zone protette (catodiche) dove la corrente entra nella struttura metallica che delle zone di corrosione (anodiche) dove la corrente l'abbandona per tornare, attraverso il terreno, alla sottostazione. [8,9]

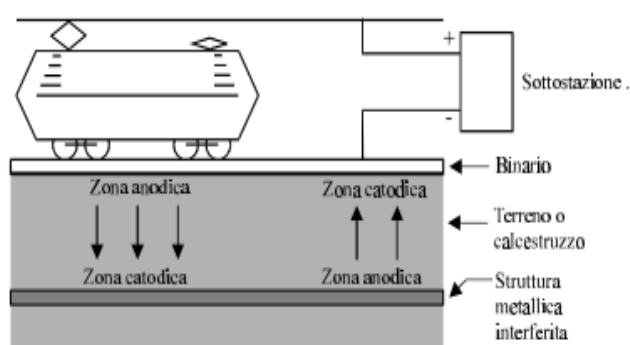


Figura 1.11 Corrosione da correnti disperse indotte da impianto ferroviario

Una delle caratteristiche che differenzia un veicolo stradale da uno ferroviario è la possibilità, che il mezzo stradale ha di muoversi con flessibilità. Il treno è costretto a muoversi nella sede limitata dalle due rotaie, infatti non si possono effettuare manovre particolari. L'organo di rotolamento del veicolo ferroviario è chiamato sala montata, figura 1.2.

La sede ferroviaria ha funzione di sostegno e di guida dei veicoli per mezzo delle rotaie.

Essa è costituita da:

- Armamento: rotaie, traverse, giunti e materiale di attacco ai sostegni.
- Massiccata o ballast: ha la funzione di ripartire i carichi sul piano di sottofondo del corpo stradale, assorbire gli sforzi indotti nel binario dalla circolazione dei treni e assorbire gli sforzi longitudinali dovuti

alla variazione di temperatura, realizzando un filtro fra binario e ambiente. [10]

Il ballast è il pietrisco, allo stato naturale o ricavato da frantumazione di rocce, usato per la formazione di massicciate ferroviarie. Il materiale in natura deve possedere buona resistenza per frantumazione e deve essere esente da fibre di amianto, deve presentare spigoli vivi, non gelive e non facilmente alterabili. Sono da evitare a questo proposito le arenarie e le rocce argillose, le fillaci e i micacisti, perché friabili e porose. Sono invece preferiti i calcari duri, le dolomie, i graniti, ottimi i basalti, le trachiti e i porfidi. Il pietrisco deve presentare, dopo la lavorazione in appositi impianti di frantumazione, vagliatura e lavaggio, una granulometria compresa tra 30 e 60mm, un contenuto di particelle fini (polveri), ed una forma spigolosa al fine di favorire l'ingranamento ed evitare cedimenti. La massicciata, interposta tra la piattaforma stradale e l'armamento, realizza lo scopo di distribuire sul corpo stradale i carichi trasmessi dalle traverse, impedire lo scorrimento delle traverse e garantire lo smaltimento delle acque meteoriche. La classificazione del pietrisco per massicciate ferroviarie è stabilita dalla norma UNI EN 13450 [11], che fornisce indicazioni per la redazione della dichiarazione di conformità CE e l'apposizione della relativa marcatura CE sui documenti di trasporto. In ambito italiano, le caratteristiche del ballast sono definite dalla specifica tecnica RFI "pietrisco per massicciata ferroviaria". [12]

La massicciata viene disposta sulla piattaforma (al di sotto del binario, ma al di sopra del rilevato) in 2 strati. Sul primo strato si sistemano i sostegni (traverse), quindi il secondo strato di ballast si interpone fra i travesti stessi in modo da coprirli parzialmente. La piattaforma è la base di appoggio della sede ferroviaria sul terreno e su di essa si estende la massicciata, si veda figura 1.12.

Si ricorre a una eventuale scudatura quando si temono cedimenti della piattaforma, ovvero quando il terreno è argilloso per non trasformarsi in poltiglia con l'acqua e non assicurare così una sufficiente stabilità, in queste condizioni si utilizza tra il binario e il suolo uno strato di sabbia o altri materiali, in modo che le acque possano defluire rapidamente. Per il raggiungimento di alte velocità si è ritenuto necessario ottenere un miglioramento della parte superiore della piattaforma con l'introduzione di un nuovo elemento strutturale (sotto-ballast) idoneo a mantenere inalterata la geometria del binario, a resistere alla sollecitazione a fatica ed ai cicli gelo-disgelo, e ad impedire la contaminazione tra la massicciata e terreno. La parte inferiore ballast può essere realizzata in misto cementato ovvero in conglomerato bituminoso, come si è attuato nella costruzione della direttissima ROMA-FIRENZE.

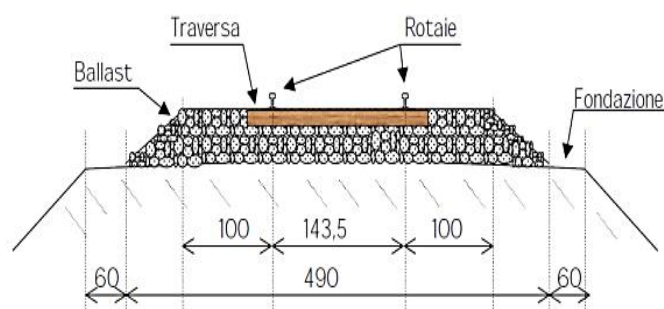


Figura 1.12 Elementi caratteristici del sistema ferroviario tradizionale

Negli ultimi anni si sono riscontrati numerosi incidenti di “ballast projection” sulle reti di tutta Europa. Gli incidenti si sono verificati anche in assenza di ghiaccio, di neve e di materiali abbandonati sul tracciato. Tutti gli incidenti sono avvenuti ad alta velocità. (230/350km/h).

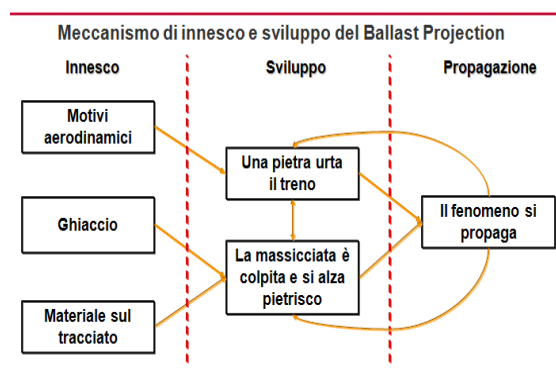


Figura 1.13 Cause Ballast project

Negli ultimi anni è aumentato l'interesse per l'aerodinamica a pavimento di treni ad alta velocità anche perché sono aumentati gli incidenti dovuti al ballast (pietre volanti della massicciata). In passato il problema era correlato con l'accumulo di neve e ghiaccio sul telaio del treno e la sua caduta e quindi impatto con il ballast causava lo spostamento delle pietre della massicciata che a volte colpivano il treno, si veda figura 1.13. Questo problema potrebbe essere minimizzato aumentando la distanza fra pavimento treno e ballast con l'abbassamento della massicciata. Negli ultimi anni incidenti da ballast si sono verificati anche in assenza di ghiaccio e neve, da ciò ne consegue che i carichi aerodinamici indotti da treni ad alta velocità sono abbastanza alti da spostare le pietre che formano il ballast. [13]

Nel 2003 durante l'ICE 3, test di omologazione per incidenti da ballast, si è verificato che tutti gli incidenti si erano verificati in assenza di ghiaccio e neve. Si ritiene che una pietra della massicciata inizia a spostarsi a causa di effetti dinamici aerodinamici e che la pietra acceleri a causa dei carichi aerodinamici creati dal treno. I danni sul treno dovuti all'impatto di suddetta pietra possono essere estremamente costosi da riparare. [14]



Figura 1.14 strada ferrata tradizionale(sinistra), strada ferrata con lastre (destra)

Il problema dell'impatto con il pietrisco non si ha solo sotto il treno ma anche sui suoi lati longitudinali, infatti la massicciata può essere catapultata dalle estremità della traversina e rimbalzare su un treno in transito in quel momento. Le pietre che colpiscono il treno possono:

- Causare danni al sottoscocca del treno soprattutto perché la pietra può raccogliere una maggiore quantità di moto dall'impatto con il treno stesso
- Le pietre spostate possono colpire delle altre e creare quindi una reazione a catena

DB, in Germania, ha abbassato il livello della massicciata di qualche centimetro sotto le traverse, questa misura assicura che la caduta di ghiaccio colpisca le traversine e non le pietre, si veda figura 1.14. Questo accorgimento funzionerebbe in modo soddisfacente se la causa degli impatti fosse solo quella del ghiaccio o della neve. Ghiaccio e neve non sono più considerati un problema rilevante per la linea ferroviaria ad alta velocità per il fenomeno del sollevamento delle pietre del ballast, non quanto lo è la velocità stessa.

### 1.1.5 Materiali per assili e approccio “damage tolerance”

La norma 13261 [15] specifica le caratteristiche degli assi in uso su reti europee. Nel documento si definiscono le caratteristiche che devono avere gli assi pieni e cavi, il caso di interesse in questo lavoro sono gli assili realizzati in acciaio A1N che è quello più usato sul campo europeo. La normativa per gli assili impiegati a una velocità operativa superiore a 200km/h impone composizione chimica e valori tali da raggiungere come da figura 1.15.

The maximum percentage contents of the various elements are given in Table 1.

**Table 1 — Limit values by product analysis (%)**

C	Si	Mn	P <sup>a</sup>	S <sup>ab</sup>	Cr	Cu	Mo	Ni	V
0,40	0,50	1,20	0,020	0,020	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06

<sup>a</sup> A maximum content of 0,025 % may be agreed at the time of enquiry and the order.  
<sup>b</sup> A minimum sulfur content may be agreed at the time of enquiry and the order according to the steelmaking process, in order to safeguard against hydrogen embrittlement.

Figura 1.15 Percentuali massime contenute nel materiale

Le caratteristiche meccaniche da raggiungere sono riportate in figura 1.16. Questi valori si devono raggiungere a metà raggio nel caso di assi solidi.

**Table 2 — Values to be achieved at mid-radius of solid axles or at mid-distance between external and internal surfaces of hollow axles**

$R_{eH}(N/mm^2)^a$	$R_m(N/mm^2)$	$A_5\%$
$\geq 320$	550-650	$\geq 22$

<sup>a</sup> If no distinctive yield strength is present, the proof stress  $R_{p0.2}$  shall be determined.

Figura 1.16 Caratteristiche meccaniche materiale

Il primo approccio Europeo standardizzato di progettazione di assili risale alla seconda metà del secolo scorso quando l’UIC (Union International des Chemins de fer) ha lanciato un gruppo di lavoro che, negli anni 70, ha tenuto la prima relazione ORE (Office de Recherches et d’Essais de l’UIC) sulle norme di progettazione degli assili per rimorchi che erano allora parte delle normative nazionali AFNOR, DIN, UNI; e internazionali, in particolare UIC 515.

Alla fine del XX secolo un lavoro intenso fu portato avanti dal CEN (European Standard Committee) che accelerò la interoperabilità delle direttive europee sulle ferrovie e quindi influenzando fortemente il design e qualità fabbricazione sia di assi che di ruote. Nel 2001 sono state realizzate norme EN in materia di progettazione di carri trainati (EN13103) e carri motrici (EN13104). Queste norme si basano su carichi convenzionali provenienti da esperienze passate e sui limiti di fatica derivati solo per il tipo di acciaio EA1N e calcolati con diversi

metodi. Questi dati sono stati raccolti in particolare dalle esperienze delle ferrovie francesi e tedesche.

A partire dal 2003, sono state rilasciate le nuove norme EN sulla qualità e la produzione di assali EN 13261, ruote EN13262 e sale montate EN 13260. Le prove sperimentali per un nuovo prodotto si effettuano sia su provini in scala ridotta che su componenti full scale in modo da verificare i limiti degli standard di progettazione.

Nelle norme vengono anche definite le dimensioni ammissibili per difetti di superficie e volumi, rilevati da controlli non distruttivi. Questi limiti di accettabilità, definiti per la fabbricazione, non sono esplicitamente correlati all'assunzione del limite di fatica per la progettazione degli assili e ruote. Per cogliere le differenze tra le norme in vigore in Nord America e in Europa occorre confrontare le condizioni di servizio a cui sono soggetti gli assili ferroviari: ci sono differenze rilevanti in termini di velocità di crociera e di carico, ciò porta a una scelta differente nella progettazione dell'assile e nella normativa di produzione.

Le ferrovie nordamericane si basano principalmente su traffico merci, con carico elevato fino a 35 t e bassa velocità circa 90 km/h. Le ferrovie europee sono principalmente orientate al traffico passeggero, che coinvolge anche treni ad alta velocità come concorrente agli aerei sul percorso regionale fino a 900km e che porta a velocità di crociera fino a 350 km/h con un carico relativamente basso (fino a 18t per i passeggeri e 25 per il trasporto di merci). Ciò significa che in Europa si ha un elevato carico dinamico e una percorrenza annua fino a 500.000km mentre nel Nord America è maggiormente legato all'alto carico e ad una relativamente minore distanza percorsa. Gli assili del Nord America sono principalmente realizzati in acciai al carbonio normalizzato con contenuto di carbonio di 0.5% mentre quelli europei sono realizzati in acciaio al carbonio normalizzato con  $C < 0.37\%$  chiamato A1N o acciaio bonificato e temprato chiamato A4T.

Per i treni ad alta velocità viene usato anche un acciaio legato ad alta resistenza. Gli assili possono essere anche cavi questi sono in uso in Europa e su progetti cinesi CRH5 e su ICE3. Le normative di progettazione del Nord America e dell'Europa si basano sullo stesso modello:

- Forze assile (a causa di masse in moto, trazione e frenata)
- Risultante del momento flettente calcolato in ogni sezione dell'assile
- Dimensionamento geometrica basata sui limiti a fatica dei materiali
- Completa ottimizzazione della geometria
- Revisione della geometria dei raccordi per il montaggio di componenti standard

Tali norme sono basate principalmente su acciaio dolce e sulla definizione della sollecitazione massima ammissibile a fatica in una determinata combinazione di

carico agente sull'assile. Accanto a questo approccio classico vi è un nuovo approccio progettuale di tolleranza dei danni per valutare il livello adeguato di sicurezza per i casi di cui sopra, non strettamente legato all'esperienza standard e al fine di definire gli intervalli di ispezione per una vita utile.

Il materiale, preso in considerazione è acciaio EA1N, è un acciaio al carbonio ampiamente utilizzato per la produzione di assili. Le proprietà meccaniche sono stati misurate come segue:

Tabella 1.1 Caratteristiche meccaniche acciaio EA1N

<b>Caratteristiche meccaniche acciaio EA1N [16]</b>	
Ultimate stress	600 [MPa]
RP02	388 [MPa]
E	206000 [MPa]
A10	27%
Rp02	364 [MPa]
Ecyc	200000 [MPa]
N	0.168472
H	1036.24 [MPa]

Le filosofie di progettazione possono essere:

- a. Safe-life
- b. Fail-safe
- c. Damage tolerance

L'approccio safe-life presuppone che il materiale del componente o della struttura è in grado di mantenersi integro per la vita prevista in fase di progetto. A fine vita il componente viene rimosso anche se non presenta danni evidenti. In questo tipo di progettazione si utilizzano coefficienti di sicurezza elevati con ordine di grandezza 4 sulla vita del componente. Grandi spessori, pesi elevati, bassi valori di sollecitazione rispetto ai valori ultimi in assenza di danneggiamento. L'adozione di questo criterio comportava vantaggi nelle operazioni di manutenzione e nella determinazione del livello delle scorte. Gli svantaggi erano dovuti al fatto che i componenti dovevano essere sostituiti nonostante la loro perfetta efficienza e che il livello delle scorte a magazzino era ugualmente notevole; inoltre, la probabilità di avere avarie infantili era alta per il gran numero di sostituzioni effettuate. Questo principio è ancora usato nei componenti in cui non è possibile individuare il danno prima che la resistenza residua del pezzo stesso sia ridotta sotto i limiti accettabili.



La filosofia fail-safe considera che il materiale in cui è realizzato il componente possiede resistenza meccanica accettabile anche dopo un suo cedimento parziale. Questo approccio è caratterizzato da coefficienti di sicurezza più bassi rispetto al safe-life e dalla necessità di piani di ispezione periodica. Secondo questo principio si ammette la possibilità dell'inizio del danno per fatica, ma la struttura è progettata in modo da contenere il danno, grazie alla sua resistenza residua nei limiti di sicurezza, sino alla sua individuazione visiva durante le operazioni di manutenzione. Con questa filosofia, quindi, una struttura lavora in presenza di un danno finché questo non raggiunge dimensioni tali da essere visto dall'operatore. Il vantaggio principale è quello dello sfruttamento più esteso dei componenti, contro un aumento di peso dovuto alla duplicazione della struttura e, di conseguenza, ad un incremento dei costi.

Un'altra filosofia di progettazione è la "damage tolerance" questa esprime l'abilità di un materiale di cui è composto un componente di essere performante rispetto alle condizioni operative di progetto anche in presenza di uno stato di danno o di difettosità. Si utilizzano bassi coefficienti di sicurezza e un uso intelligente del materiale.

Si suppone che vi sia la presenza di difetti nella struttura, indipendentemente dalle cause di questa presenza si stabilisce una dimensione di partenza dei difetti per ciascuna zona della struttura ritenuta possibile sede di cricche.

E' difficile evitare la presenza di irregolarità superficiali o difetti di esercizio come la corrosione o gli impatti. Ci sono casi in cui la formazione e propagazione di cricche di fatica non può essere evitata e la loro presenza viene tollerata in fase di progettazione. La meccanica della frattura consente di determinare i punti di possibile innesco di cricche a fatica e i tempi di propagazione necessari al raggiungimento della propagazione instabile. Ciò consente di stabilire i tempi di propagazione, quindi di ispezione del componente in modo da poter intervenire con la riparazione o sostituzione della parte danneggiata quando necessario.

I principali parametri in gioco nella damage tolerance sono tre:

- a. dimensione iniziale di cricca,
- b. minima dimensione individuale della cricca
- c. massima dimensione di cricca sopportabile dalla struttura

Queste tre grandezze sono usate per definire due differenti intervalli temporali:

- a. Un primo intervallo riguarda la propagazione dalle dimensioni iniziali e quelle minime rilevabili
- b. Il secondo intervallo considera la propagazione dal punto in cui la cricca raggiunge le minime dimensioni rilevabili fino alle condizioni teoriche di frattura del componente causate dalle elevate dimensioni della cricca di fatica.

Definiti i due intervalli, che possono essere diversi a seconda della zona critica considerata, si possono fissare i tempi di ispezione in base alle esperienze pregresse, tenendo conto della sicurezza ma anche della convenienza economica degli interventi, e partendo da una valutazione affidabile dei tempi di propagazione. Si definiscono inoltre anche gli intervalli di ispezione nei quali si monitorizza l'avanzamento della cricca di fatica e si valuta il coefficiente di sicurezza residuo definito come damage tolerance.

La soglia di ispezionabilità dipende dalla tecnica usata:

- a. walk around (danni evidenti)
- b. visual detailed inspection (uso di luci polarizzate, etc)
- c. special detailed inspections (non visibile damage rilevabili con esami agli ultrasuoni, e ai raggi X)

L'origine di questa filosofia progettuale risale alla prima metà degli anni '70 quando a seguito di vari incidenti aerei si decise di mettere mano alla metodologia progettuale. Fino ad allora, infatti, la progettazione delle strutture era basata sull'approccio safe-life.

Dall'analisi dei cedimenti prematuri risultò evidente che la causa principale era la formazione e la propagazione a fatica di cricche in punti particolarmente sollecitati. [17]

Con il progredire della conoscenza sul comportamento dei materiali sotto sollecitazione, e conoscendo le leggi della meccanica della frattura, si può stabilire, con sufficiente approssimazione, il tempo occorrente perché l'avaria si sviluppi completamente e anche il minimo intervallo di tempo per eseguire le ispezioni periodiche mediante naturalmente opportuni C.N.D., i quali assicurano un determinato rilevamento del difetto minimo. Con questa filosofia, infatti, oltre ad avere una struttura con una elevata resistenza residua, si deve avere la possibilità di identificare il danno prima che la resistenza sia ridotta al di sotto dei limiti esistenti. [18]

Le sezioni tipiche in cui i cedimenti sono più frequenti sono i calettamenti forzati fra ruote e il corpo assile in prossimità degli intagli, si veda figura 1.17.

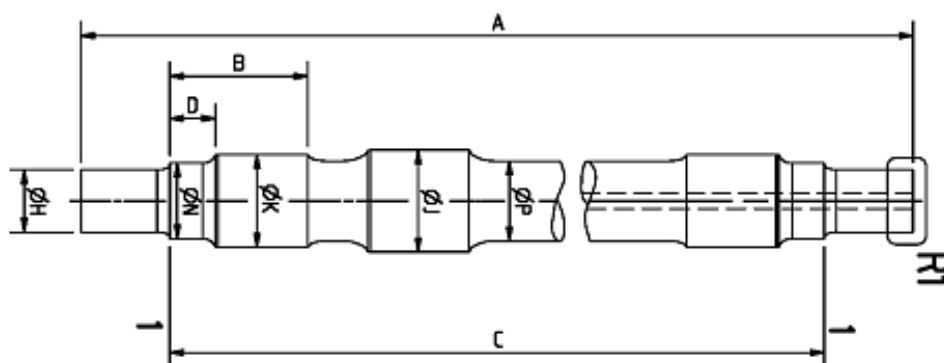


Figura 1.17 Disegno assile per trasporto merci

Detti cedimenti si presentano, in tutti i casi, in termini di rotture per fatica, e gli inneschi possono essere dovuti a diverse cause, sia alla corrosione che ai danneggiamenti dovuti agli impatti del ballast. La progettazione di assili ferroviari è regolata da raccomandazioni tecniche essenzialmente basate sull'utilizzo di acciai dolci e sulla definizione del massimo sforzo ammissibile a fatica per una data combinazione di carichi agenti sugli assili stessi. Operazioni di carattere economico richiedono che le strutture possano operare in sicurezza per tutto il periodo di servizio per il quale sono stati progettati, ma a causa di incertezze in fase di determinazione dei carichi realmente agenti e di determinazione degli sforzi si deve prevedere l'insorgere di cricche prima della fine della vita utile del componente. La sicurezza richiede che in fase di progettazione il componente resista a carichi di entità apprezzabile sotto la presenza di cricche o parti danneggiate, inoltre l'eventuale difetto deve o essere individuato prima che raggiunga una dimensione tale da essere pericolosa oppure si deve fare in modo che non raggiunga mai tale dimensione durante la vita utile. È chiaro che queste considerazioni non sono sufficienti per ovviare al problema ma sono necessarie delle ulteriori precauzioni. Queste precauzioni consistono in approfondite e tempestive ispezioni di controllo delle cricche. Se la richiesta è quella di non far sviluppare un difetto iniziale fino ad una dimensione pericolosa, le dimensioni del difetto iniziale non devono superare un certo limite e quindi l'ispezione deve avvenire prima della messa in esercizio. Se la cricca, una volta sviluppata, può crescere senza diventar pericolosa con il passare del tempo, le ispezioni dovranno essere comunque periodiche. Nel nostro specifico caso degli assili, il danno che interviene più di frequente consiste nella comparsa di cricche di fatica abbinata a fenomeni di corrosione e

impatti. In figura 1.18 si mostra il caso di una struttura realizzata con un materiale avente basso rapporto di propagazione e alta resistenza residua.

Tutti gli assili in servizio devono essere protetti contro la corrosione nelle zone dove non ci sono componenti montati che proteggono da impatti e corrosione. Per alcuni assi è necessario avere una protezione contro aggressioni meccaniche (urti, impatti). In particolare la norma 13261 indica 4 classi di protezione, si veda figura 1.18, e sono definite secondo l'uso del componente (assile) secondo la politica di manutenzione applicata:

- Classe 1: sezione di assi che sono soggetti agli agenti atmosferici e agli impatti meccanici;
- Classe 2: sezione di assi che sono soggetti all'azione di specifici prodotti corrosivi;
- Classe 3: sezioni di assi che sono soggetti alla corrosione atmosferica;
- Classe 4: assi che sono soggetti a corrosione atmosferica quando le sollecitazioni calcolate secondo norma EN 13103 e EN 13104 sono soggette a corrosione atmosferica inferiori al 60% delle tensioni ammissibili;
- Classi diverse sono consentiti sullo stesso asse.

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Coating thickness	X	X	X	-
Coating adhesion	X	X	X	-
Resistance to impacts	X	-	-	-
Resistance to gritting	X	X	X	-
Resistance to salt spray	X	X	X	-
Resistance to specific corrosive products	-	X	-	-
Coating resistance to cyclic mechanical stresses	X	X	X	-

NOTE Particular attention should be paid to the environmental impact of the paint system used. In order to avoid the emission of volatile organic components (VOC), water-based paints are recommended. In this case, the surface preparation and specific application requirements should be defined by the customer and supplier in order to meet the requirements of this standard.

Figura 1.18 Classi assili verniciati

La scelta fra queste quattro classi dovrebbe essere definita nell'ordine dato, a meno che non siano richiesti altri requisiti. Ad esempio alcune aree di un assile protetto dal rivestimento di classe 1 o di classe 3 possono essere associate anche a un rivestimento di classe 2.

Le caratteristiche minime dei requisiti dei rivestimenti protettivi di ogni area sono definite dalle proprietà elencate in tabella 1.2. Inoltre altre caratteristiche possono essere richieste a seconda di particolari condizioni di utilizzo dell'assile. I test dovrebbero essere portati avanti durante diversi giorni dopo l'applicazione del rivestimento a seconda della tipologia di pittura e delle raccomandazioni e

specifiche tecniche del produttore per la pittura stessa. In assenza di raccomandazioni può essere adottato un periodo di tempo di 14 giorni dopo l'applicazione del rivestimento.

La superficie danneggiata di assili cavi dovrebbe essere protetta contro la corrosione usando prodotti le cui proprietà sono specificate dal cliente e dal produttore dei prodotti di protezione.

Particolare attenzione va rivolta all'impatto ambientale del sistema della vernice utilizzata per evitare emissione di componenti volatili VOC.

A meno di requisiti speciali, lo spessore minimo del rivestimento dovrebbe essere tale da risultare soddisfacente durante la certificazione del prodotto "assile".

Il metodo di misurazione dovrebbe essere portato avanti secondo la metodologia 6 Ba esposta nella norma EN ISO 2808:2007, assumendo che lo spessore del rivestimento lo permetta. In caso contrario il metodo di misurazione dovrà essere concordato fra cliente e produttore dell'assile.

L'adesione è una funzione di tutte le forze adesive applicate fra rivestimento e superficie dell'assile.

Per un rivestimento di spessore fino a 250 µm, dopo incisioni e wrench test l'aspetto dovrà rispettare la classificazione 1 della norma EN ISO 2409:2007.

Per rivestimenti maggiori di 250 µm di spessore le caratteristiche dell'adesione dovranno essere concordate fra cliente e produttore.

Il pezzo per i test dovrà essere un assile o una sezione di assile coperta con il rivestimento che dovrà essere valutato.

La resistenza agli impatti è definita come l'abilità che ha un rivestimento di proteggere l'assile da danneggiamento dovuto a impatti da proiettili (come ballast ad esempio). Questa caratteristica è applicata solo alla Classe 1.

Il metodo per verificare la resistenza agli urti è di sparare un proiettile perpendicolarmente alla superficie protetta e poi studiare il danno che il rivestimento della superficie del pezzo di prova ha subito. La macchina di prova deve permettere di sparare un proiettile con le seguenti caratteristiche:

- diametro 32 mm
- angolo al vertice di 105°
- massa 60 g
- durezza (punta) Vichers 400
- velocità di uscita (all'impatto) pari a 19.4 m/s
- la prova di resistenza si effettua in due condizioni distinte: a T=-25°C e a temperatura ambiente.

Dopo l'impatto, l'aspetto della superficie rivestita dovrà essere esaminato a occhio nudo, così come l'aspetto della superficie del pezzo testato dopo la

rimozione della vernice di protezione. Ogni alterazione dovrà essere registrata e comparata secondo i criteri e le caratteristiche suggerite dalla norma EN 13261. A seguito del test nessun danno dovrà essere trovato sul rivestimento, e sulla superficie del pezzo non ci dovrà essere nessun tipo di alterazione.

### 1.1.6 Il rivestimento Lursak

I motivi che hanno portato a proteggere gli assili ferroviari con l'uso di vernici speciali sono vari, e tra questi i più importanti sono:

- 1) Le sale montate sono i principali componenti di sicurezza di un treno;
- 2) L'importanza di prevenire cricche sulla superficie degli assi;
- 3) Protezione degli assili dagli impatti che possono avviare a cricche di fatica sull'asse;
- 4) Protezione contro la corrosione;

Nel 2008 Lucchini RS ha cominciato ad affrontare i problemi di distacco di vernice dagli assi montati sotto alcuni treni ad alta velocità. Il distacco delle vernici si è verificato nonostante tutti gli assi siano stati protetti con una vernice che rispetta pienamente i requisiti della norma EN 13261.

Tabella 1.2 Classi materiali verniciati

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Coating thickness	X	X	X	-
Coating adhesion	X	X	X	-
Resistance to impacts	X	-	-	-
Resistance to gritting	X	X	X	-
Resistance to salt spray	X	X	X	-
Resistance to specific corrosive products	-	X	-	-
Coating resistance to cyclic mechanical stresses	X	X	X	-

European Standard EN 13261, Table 11 - Protective coatings  
EN 13261 - "Railway applications – Wheelsets and bogies - Axles – Product requirements"

Dal feedback dell'analisi dei treni in servizio, Lucchini RS ha concluso che la EN 13261 non tiene conto a pieno delle condizioni di servizio più severe come i casi in cui si sollevano pietre del ballast sulla strada ferrata impattando contro il treno. Altre condizioni di esercizio severe non tenute in conto da suddetta norma sono quelle a temperature estreme dove i rivestimenti tradizionali e la superficie dell'asse si possono danneggiare aumentando il rischio di fenomeni corrosivi.

Per proteggere la superficie dell'assile da condizioni di servizio straordinari, è stato sviluppato un rivestimento protettivo congiuntamente da Akzo Nobel e Lucchini RS. [19]

Lursak è stata sviluppata considerando le condizioni di esercizio che un assile incontra durante il suo servizio. Le condizioni di servizio del treno ipotizzate per la progettazione del rivestimento sono simili alle condizioni incontrate da un aereo durante la fase di decollo e di atterraggio, si crea quindi un parallelismo tra questi:

1. Presenza di turbolenze, che possono causare impatti con piccole pietre con energia elevata:
  - a. Velocità tipica di crociera di un treno ad alta velocità:  
350-450 km/h
  - b. Velocità tipica di un velivolo al decollo 200-300km/h
2. Elevato gradiente di temperatura:
  - a. Condizioni di servizio assile ferroviario: da -45°C a +90°C, a causa del riscaldamento del disco freno.
  - b. Elevato gradiente di temperatura, in fase di decollo un velivolo passa dalla temperatura del suolo a -40/-50°C
3. Resistenza agli agenti atmosferici aggressivi:
  - a. Treno: possibile presenza di acqua salata vicino al mare
  - b. Aerei: possibile presenza acqua o liquidi corrosivi

Dopo alcuni tentativi per migliorare le prestazioni del rivestimento, ma con pochi risultati, Lucchini RS decise di prendere esperienza e conoscenza del mondo aerospaziale e nel settembre 2008 si ebbe il primo contatto tra Lucchini RS e Akzo Nobel Aerospace.

Per Lucchini RS i vantaggi derivati da questa collaborazione furono molteplici:

- 1) Accesso alle tecnologie aerospaziali in grado di fornire un tasso più avanzato di conoscenza nella protezione di componenti meccanici soggetti a sollecitazioni meccaniche e chimiche;
- 2) Accesso a specifiche di materiali e a sistemi di rivestimento tipicamente utilizzati nell'industria aerospaziale per ottenere migliori prestazioni per quanto riguarda flessibilità, resistenza al calore, resistenze ad impatto e di resistenza a lunga durata;

Lursak è frutto della collaborazione fra Lucchini RS e Azko. Alla base del progetto, come già citato, c'era l'esigenza di definire un nuovo rivestimento protettivo che soddisfa completamente i requisiti (classe 1) della EN 13261, ma è anche in grado di garantire tali prestazioni sia in condizioni nuove che invecchiate in un range di temperature (-40 ° C ÷ +150 ° C).

La lursak è una vernice costituita da un materiale epossidico aerospaziale composto da 3 strati:

- Wash primer
- Primer
- Protettivo Top-coat

I tre strati hanno, di solito, uno spessore totale di 4-5 mm:

- Washprimer, di circa 10 micron, migliora l'adesione all'acciaio e protegge dalla corrosione;
- Primer, flessibile e rinforzato con fibre sintetiche aiuta ad assorbire l'energia d'urto;
- Top-coat, struttura rinforzata con le fibre, aiuta a proteggere i componenti contro graffi e urti.

Le fibre garantiscono un elevato livello di consistenza e resistenza strutturale.

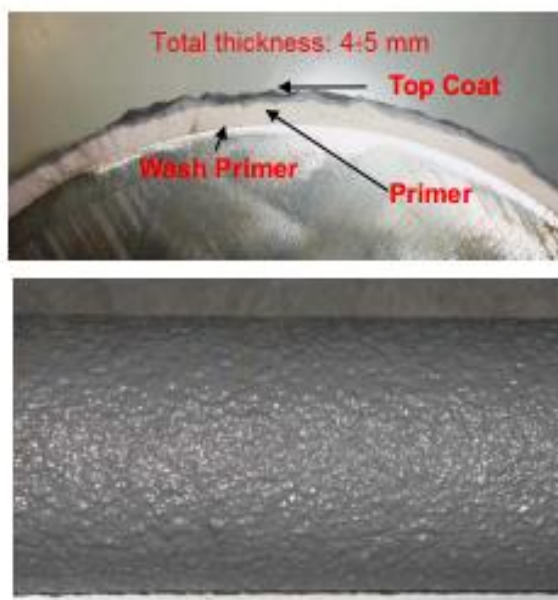


Figura 1.19 Assile ricoperto con LURSAK

L'aspetto della superficie non è liscio, come una pittura classica, ma ruvido, si veda figura 1.19.

Nel periodo 2009-2011, LURSAK è stato sottoposto ad un programma di test di laboratorio per verificarne le prestazioni in diverse condizioni estreme. Si verificò che l'avanzamento massimo di corrosione, dopo 1000 ore di lavoro era di circa 0,70 mm.

Prove di fatica eseguite su campioni di acciaio A1N coperti con rivestimento Lursak determinano la capacità del rivestimento di resistere a cicli meccanici con sollecitazioni combinate e a contatto con un prodotto corrosivo. Ciascuna



delle prove dei campioni ha completato i 5 livelli di stress richiesto (170 -> 210 MPa) senza mostrare alcun fallimento.

## **1.2 Scopi del lavoro di tesi**

Sulla base dello stato dell'arte appena descritto in questo lavoro si vogliono raggiungere due obiettivi:

- Analisi dell'efficacia protettiva della vernice LURSAK
- Determinazione degli interventi di manutenzione programmati in presenza del rivestimento LURSAK.

Per quanto riguarda la prima parte saranno eseguite delle prove sperimentali seguendo le direttive della norma EN13261, successivamente con l'utilizzo di una particolare macchina di prova si effettueranno ulteriori indagini sperimentali impiegando come impattatore non più un proiettile di prova come indicato nel documento europeo bensì ballast, avvicinandoci al fenomeno reale.

Le prove consentiranno di ottenere una risposta sulla reale protezione agli impatti che fornisce la vernice Lursak.

La ridefinizione degli intervalli di manutenzione sarà effettuata sfruttando due programmi di calcolo, AFGROW per il calcolo della propagazione delle cricche negli assili rispetto ai km di esercizio; mentre delle routine Matlab saranno utilizzate per il calcolo degli intervalli di ispezione e delle probabilità di cedimento.



## 2 Prove sperimentali

Dopo aver presentato un quadro generale relativo alla storia dei treni, esposto lo stato dell'arte riguardo ai metodi attualmente più utilizzati per limitare la corrosione e i danni da impatto sugli assili e le normative vigenti, il secondo capitolo descrive più nello specifico le prove sperimentali di impatto eseguite su assili reali prodotti in acciaio A1N.

La norma UNI EN 13261 [15] indica le specifiche e le caratteristiche che devono avere gli assili montati sui treni in circolazione lungo le reti europee. Suddetto documento detta anche le linee guida da seguire per effettuare prove di resistenza degli assili. Tra queste possono essere trovate anche le specifiche riguardanti le prove d'impatto per la validazione di nuovi assili ferroviari.

La vernice LURSAK, come illustrato nel capitolo precedentemente, è stata sviluppata per limitare i due fenomeni: corrosione e urti. La vernice ha un compito protettivo e, attraverso uno strato di materiale, limita i fenomeni di invecchiamento e danneggiamento del materiale sottostante. In questo modo, si ottengono sia vantaggi dal punto di vista economico, sia da quello della manutenzione, garantendo un abbassamento dei costi e un aumento degli standard di sicurezza e qualità.

Nella prima parte dell'attività sperimentale si sono svolte prove di impatto seguendo le normative vigenti in ambito europeo ed in particolare sono state effettuate prove su assili non rivestiti detti anche "nudi", questi sono gli assili attualmente installati sui carrelli Y-25, e su assili rivestiti con vernice LURSAK. Successivamente, si sono eseguite prove di impatto più realistiche utilizzando sassi della massiciata come proiettile e un cannone utilizzato in ambiente aeronautico per simulare gli impatti tra i volatili e i componenti di un aeromobile.

### 2.1 Prove di impatto secondo UNI EN 13261

Seguendo le indicazioni della norma UNI EN 13261 [15] per poter eseguire delle prove significative dopo che il proiettile è stato sparato perpendicolarmente alla superficie protetta viene analizzata la zona di impatto, nel caso di spezzoni di assile rivestito si provvederà innanzitutto ad analizzare lo strato superficiale della vernice LURSAK, e successivamente si provvederà a rimuoverla per valutare il cambiamento che il materiale del pezzo ha subito in prossimità della zona di impatto.

La resistenza all'impatto della vernice è valutata in due differenti condizioni ambientali:

- $T=-25^{\circ}\text{C}$

- temperatura ambiente.

Si effettueranno differenti set sperimentali per valutare l'efficacia del rivestimento sia quando quest'ultima è nuova sia quando è stata sottoposta a un ciclo di invecchiamento.

### 2.1.1 Set-up sperimentale

Le prove sperimentali sono state effettuate non colpendo con il proiettile l'intero assile bensì una sua sezione che chiameremo "troncone".

Il troncone è ricavato tagliando un assile completo in undici parti, di questi spezzoni se ne ottengono sei rivestiti e tre non rivestiti, "nudi", inoltre le due parti estreme non saranno utilizzate per le prove di impatto, si veda figura 2.1

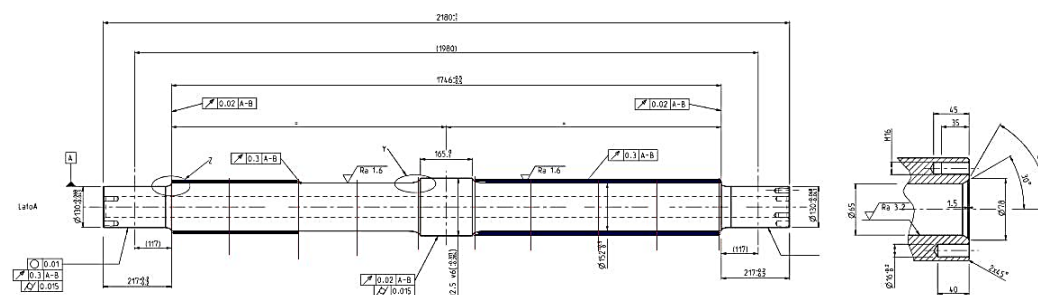


Figura 2.1 Assile tagliato

La norma UNI EN 13261 detta i parametri riguardanti la geometria e la durezza del proiettile da utilizzare durante le prove, nello specifico il proiettile deve avere le seguenti caratteristiche:

- diametro 32 mm
- angolo al vertice di 105°
- massa 60 g
- durezza (punta) Vickers 400
- velocità di uscita (all'impatto) pari a 19.4 m/s.

Volendo effettuare prove d'impatto ad energia crescente, per aumentare l'energia all'impatto del proiettile è stato costruito un proiettile modulare in modo da aumentarne la massa, ma mantenendo costante la geometria e la durezza della testa impattante del proiettile come voluto dalla normativa già citata.

Il proiettile realizzato è quello in figura 2.2.

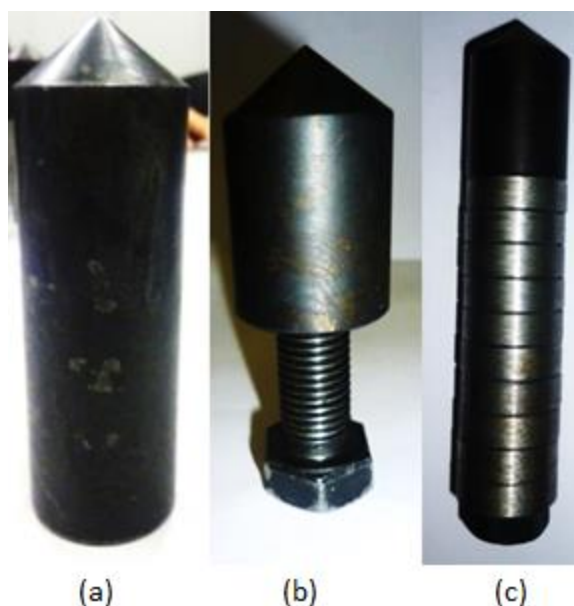


Figura 2.2 Proiettile normato (a) proiettile con vite (b), proiettile con più moduli (c)

I proiettili sono stati realizzati eseguendo una filettatura nella parte cilindrica, in modo da avere la possibilità di aggiungere gradualmente piccoli anelli, (figura 2.3 e figura 2.2c) dalle dimensioni note al fine di aumentare, sotto condizioni note, la velocità e l'energia d'impatto del proiettile. A pari altezza di lancio ovvero 4.36 m, secondo le condizioni descritte è possibile ottenere energie di impatto da 12J a 40J circa.



Figura 2.3 Anelli circolari

Per effettuare le prove di impatto normate e al fine di accertarsi che il rivestimento utilizzato sia realmente efficace e conforme alle normative vigenti, è stato realizzato un set up sperimentale ad hoc.



Figura 2.4 Set up sperimentale

Il set up sperimentale realizzato per effettuare le prove è illustrato in figura 2.4, dove si notano gli elementi che lo compongono.

Un tubo a sezione circolare, in cui scorrerà il proiettile, è stato installato verticalmente e, per renderlo più stabile e per agevolare l'accesso alla sua estremità superiore, esso è stato fissato al corrimano del piano rialzato del locale in cui sono state effettuate le prove. Questo accorgimento ha permesso di conferire maggiore stabilità al tubo e di agevolare le operazioni prova. Il tubo è stato lavorato eseguendo dei fori passanti alla distanza di 100 mm in direzione assiale lungo tutta la sua estensione in modo da facilitare l'evacuazione dell'aria

al passaggio del proiettile limitando l'attrito aria/proiettile. Per essere sicuri che le varie prove siano coerenti ed effettuate sotto le stesse condizioni al contorno, durante le varie prove è stata controllata periodicamente la perpendicolarità del tubo rispetto al troncone utilizzando una livella a bolla. L'estremità inferiore del tubo, quella vicino al troncone, è stata lavorata realizzando un'asola per consentire il passaggio di un fascio laser, si veda figura 2.5.



Figura 2.5 Strumenti di misura velocità proiettile

L'impiego di questo strumento, il laser, è importante per rilevare la velocità reale del proiettile all'impatto. Il laser a triangolazione, si veda figura 2.6, utilizzato per il rilevamento del tempo di passaggio del proiettile è LASER MEL M5, questo strumento ha campo di misura pari a  $\pm 10$  mm, ciò consente di avere il fascio a fuoco solo al passaggio del proiettile nel tubo.

Il proiettile durante la sua corsa all'interno del tubo potrebbe collidere con le pareti del tubo stesso variando la sua velocità. Inoltre, anche la resistenza dell'aria e varie turbolenze interne potrebbero fare variare l'energia reale all'impatto da quella analitica. Da ciò nasce la necessità di rilevare la velocità

del proiettile all'estremità inferiore del tubo in modo da conoscere con esattezza l'energia sviluppata dal proiettile al momento dell'impatto.

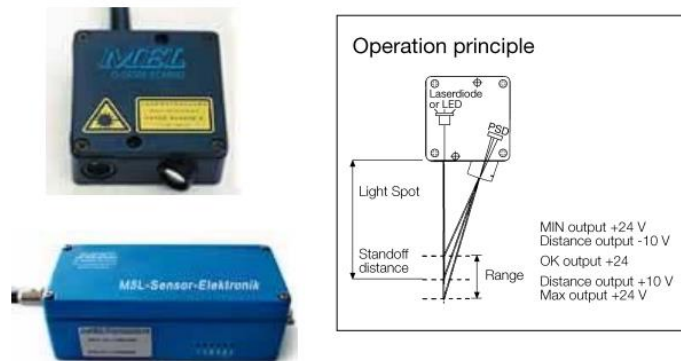


Figura 2.6 Laser MEL M5

La parte terminale del laser, la testa, da dove esce il fascio laser, è stata montata su una base magnetica che garantisce la perfetta stabilità del componente ma anche una facile regolazione dello stesso.

Si è utilizzata una scheda di acquisizione, figura 2.7, Texas Instrument modello 9239 a 4 canali, 24 bit, necessaria per l'acquisizione del segnale laser



Figura 2.7 Scheda acquisizione mod. 9239

Il segnale che si ha a monitor ha un andamento simile a quello rappresentato in figura 2.8a. Conoscendo la dimensione del proiettile e il suo tempo di passaggio davanti il fascio laser è possibile calcolare la velocità reale al momento dell'impatto e quindi anche l'energia trasferita dal proiettile al pezzo nel momento della collisione.



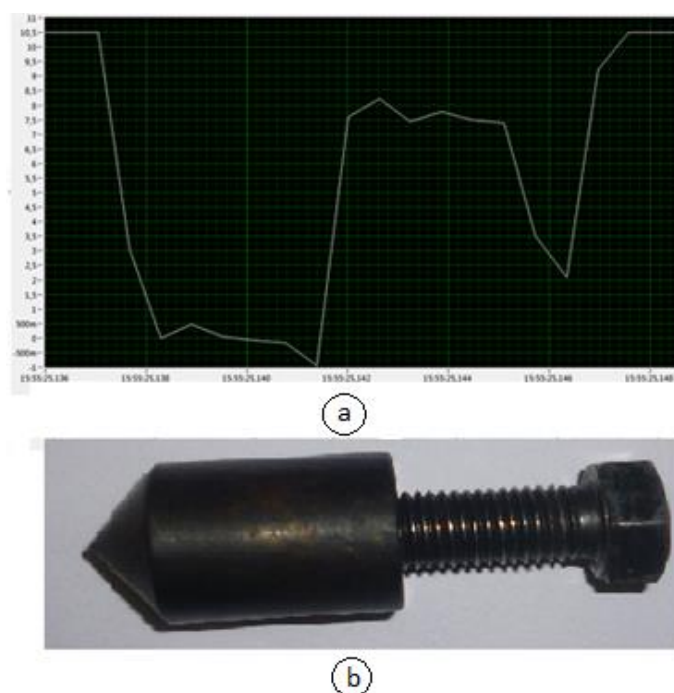


Figura 2.8 Esempio di segnale laser (a) e confronto col proiettile (b)

Dalla figura 2.8 si vede come il segnale segua effettivamente la forma del proiettile che transita davanti al fascio laser.

### 2.1.2 Assile nudo

La prima fase di prove è stata eseguita su un troncone non rivestito, impiegando una energia di impatto pari a 12J.

Successivamente sono stati realizzati dei test ad energia crescente che hanno consentito di conoscere quale sia l'energia necessaria per provocare un danneggiamento di profondità 2 mm, la dimensione di questa impronta rappresenta il massimo riportato ad oggi in letteratura, che rappresenta la dimensione limite di accettabilità di un difetto o discontinuità per un assale ferroviario.

Si è voluto ricavare qual è l'energia d'impatto necessaria per provocare difetti di 2 mm su un assile nudo in modo da poter effettuare dei test, con proiettili a pari energia, su tronconi rivestiti con vernice LURSAK. Questa serie di test, eseguiti più volte su campioni con e senza rivestimento, può infatti fornire dati utilissimi ai fini di comprendere quale sia l'effettiva efficacia per la protezione degli assili in esercizio della vernice di protezione presa in esame in questo esperimento.

Sono stati effettuate tre serie di prove a differente energia di impatto, e ciascuna di queste prove è stata ripetuta tre volte in modo da determinare la ripetibilità dell'esperimento.

I primi test effettuati sono stati quelli con energia di impatto 12J, per questi test sono stati utilizzati proiettili senza anelli circolari, si veda figura 2.8 b.

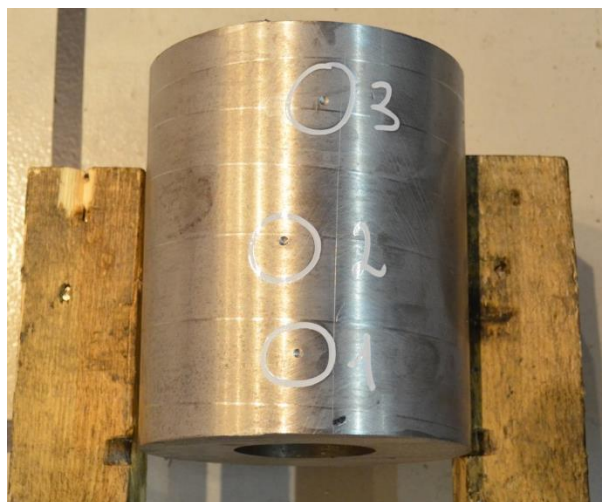


Figura 2.9 Troncone impatti a 12J

Analizzando il segnale del fascio laser è stata ricavata la velocità reale del proiettile all'impatto ed è stata anche calcolata la differenza percentuale tra la velocità reale e quella analitica.

Utilizzando un micrometro centesimale è stata misurata la profondità del danno realizzato dal proiettile. Nelle tre prove effettuate (tutte con la stessa energia d'impatto pari a 12J) la massima profondità ottenuta è stata di 0.88 mm.

In tabella 2.1 si sono riassunti i risultati delle prove a norma su assile non rivestito con energia di impatto  $E=12J$ .

Tabella 2.1 Riassuntivo prove a norma

velocità laser [m/s]	massa proiettile [kg]	velocità analitica [m/s]	energia reale [J]	energia teorica [J]	profondità impronta [mm]	diametro [mm]
8.031	0.335	9.249	10.787	14.307	0.4	3.976
8.857	0.335	9.249	13.121	14.307	0.88	4.18
8.455	0.335	9.249	11.955	14.307	0.7	4.112

Successivamente sono stati effettuati dei test con un angolo di impatto a 45°. Anche se non richiesto dalla norma UNI EN 13261, si è voluto comunque

verificare l'effetto del proiettile quando la direzione di impatto forma un angolo con il piano della superficie d'impatto allo scopo di anche realizzare dei test più vicini alla realtà. Infatti gli impatti con pietre da ballast non per forza saranno centrati sull'asse dell'assile. Nella letteratura gli impatti realizzati con proiettili di forma regolare, si distinguono in:

- Impatti normali: dove il proiettile colpisce perpendicolarmente la superficie di impatto in tali condizioni lo stato di tensione è bidimensionale a simmetria radiale;
- Impatti obliqui: il proiettile forma un angolo con la superficie di impatto in tali condizioni lo stato di tensione diventa tridimensionale. [20]

La figura 2.10 rappresenta schematicamente la condizione di impatto.

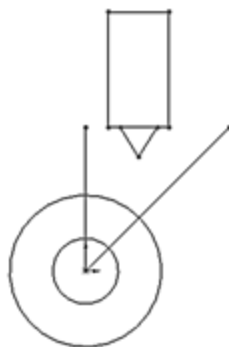


Figura 2.10 Schema impatto a 45°

Gli impatti a 45° provocano una elevata plasticizzazione del materiale come si nota in figura 2.11.



Figura 2.11 Impatti a E=12 J angolo di impatto 45°

In tabella 2.2 sono riassunti i risultati ottenuti nei lanci con angolo di impatto pari a 45°.

Tabella 2.2 Riassunto lanci a 45° con energia=12J

velocità laser [m/s]	massa proiettile [kg]	velocità analitica [m/s]	energia reale [J]	energia teorica [J]	profondità impronta [mm]	diametro [mm]
8.087	0.335	9.249	10.938	14.307	0.17	7,673/3,088
8.455	0.335	9.249	11.955	14.307	0.2	6,805/3,367
8.470	0.335	9.249	11.999	14.307		7,739/3,361

Dopo aver verificato che con una energia di impatto pari a 12J la profondità massima del danno è circa 0.88mm si è deciso di aumentare l'energia utilizzando 5 anelli interposti tra proiettile e bullone in modo da ottenere un'energia all'impatto di circa 22J.

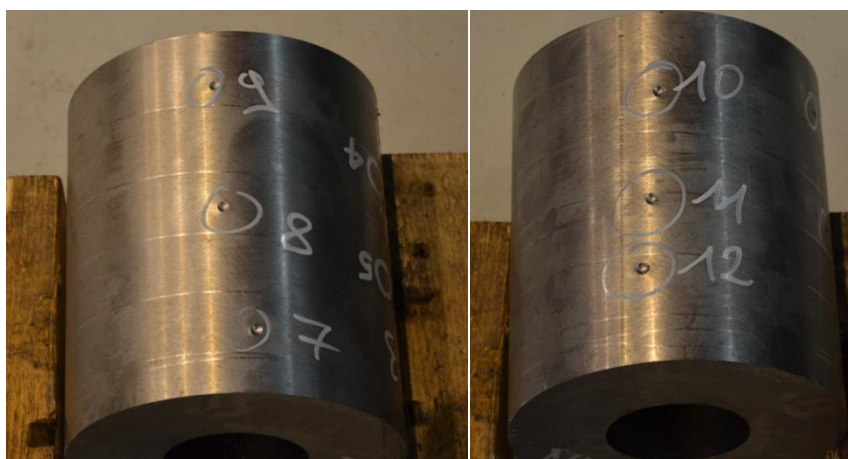


Figura 2.12 Impatti con E=22J (a) Impatti con E=32J(b)

In figura 2.12(a) si vedono le impronte dei proiettili con una energia di impatto pari a E=22J. In queste condizioni la profondità di impatto misurata è circa 0.95 mm. I risultati di quest'ultime prove sono riassunti in tabella 2.3.

Tabella 2.3 Riassunto lanci perpendicolari con energia=22J

<b>velocità laser [m/s]</b>	<b>massa proiettile [kg]</b>	<b>velocità analitica [m/s]</b>	<b>energia reale [J]</b>	<b>energia teorica [J]</b>	<b>profondità impronta [mm]</b>	<b>diametro [mm]</b>
8.333	0.654	9.249	22.708	27.973	0.9	4.758
7.895	0.654	9.249	20.381	27.973	0.95	4.792
7.500	0.654	9.249	18.394	27.973	0.85	4.52

In figura 2.12(b) si vedono i segni impressi dai proiettili con una massa aggiuntiva che permette di ottenere una energia di impatto pari a 32J. In quest'ultima prova la profondità di impatto ottenuta è di circa 1 mm. I risultati di quest'ultime prove sono stati riportati in tabella 2.4.

Tabella 2.4 Riassunto lanci perpendicolari con energia=32J

<b>velocità laser [m/s]</b>	<b>massa proiettile [kg]</b>	<b>velocità analitica [m/s]</b>	<b>energia reale [J]</b>	<b>energia teorica [J]</b>	<b>profondità impronta [mm]</b>	<b>diametro [mm]</b>
8.4214	0.924	9.249	32.762	39.521	1	5.812
8.400	0.924	9.249	32.599	39.521	0.94	5.948
8.615	0.924	9.249	34.292	39.521	0.75	5.982

Allo stesso modo, come per le prove a energia di impatto 12J, anche per le prove con energia di impatto di  $E=32J$  sono state effettuati dei test sia con l'asse di lancio normale alla superficie d'impatto, sia con l'asse di lancio inclinato di  $45^\circ$  rispetto alla superficie d'impatto.



Figura 2.13 Impatti a 45° E=32J

In tabella 2.5 sono riportati i risultati di quest'ultimo set di lanci.

Tabella 2.5 Riassunto lanci con angolo a 45° E=32J

<b>velocità laser [m/s]</b>	<b>massa proiettile [kg]</b>	<b>velocità analitica [m/s]</b>	<b>energia reale [J]</b>	<b>energia teorica [J]</b>	<b>profondità impronta [mm]</b>	<b>diametro [mm]</b>
8.402	0.924	9.249	32.615	39.521	0.52	8,482/4,919
8.400	0.924	9.249	32.599	39.521	0.46	8,134/4,685
8.615	0.924	9.249	34.292	39.521	0.42	8,149/4,699

Alla fine delle prove sperimentali eseguite secondo le norme vigenti si possono fare delle riflessioni sui risultati ottenuti e in particolare si può affermare che anche impattando il troncone con una energia circa tre volte superiore a quella indicata nella norma EN UNI 13261 [15] non si è raggiunta la profondità di impatto di 2mm, indicata in letteratura. Questo può essere dovuto al fatto che si è utilizzato un solo proiettile per tutte le prove, per motivi economici, tale dettaglio può essere particolarmente rilevante nei test che si sono eseguiti infatti si noti dalla tabella 2.1 che vi è uno sparo che ha causato un'impronta di profondità 0.88mm a E=12J quando il proiettile era stato utilizzato poco, mentre la profondità massima ottenuta con E=32J è circa 1mm quando era già stato impiegato per circa 10 lanci. Ciò può essere dovuto all'arrotondamento della punta del proiettile, per plasticizzazione, durante il procedere della campagna sperimentale.

I primi risultati che si sono ottenuti consentono di optare per un coefficiente di sicurezza 2, ciò significa che nelle simulazioni di propagazione che si effettueranno successivamente il valore di cricca iniziale da considerare sarà  $a_i=2\text{mm}$

Vista l'influenza della variazione della forma della punta del proiettile e le indicazioni di letteratura [15] riguardo alla dimensione del difetto caratteristico da impatto, si è qui deciso di adottare la profondità pari a 2 mm come valore di riferimento per la definizione della probabilità di cedimento dell'assile non rivestito (Capitolo 3).

### 2.1.3 Assile rivestito Lursak nuova

La seconda campagna di test riguarda un assile rivestito con la vernice LURSAK, il rivestimento applicato sullo spezzone di assile non ha subito alcun ciclo di invecchiamento per questo motivo lo chiameremo "nuovo".

Le prime prove realizzate su questo troncone sono state quelle indicate dalla norma UNI EN 13261. La velocità reale del proiettile era pari a 8.5 m/s mentre la velocità analitica era pari a 9.25m/s. Secondo suddetti valori è stata ottenuta una energia reale all'impatto pari a 11.94J e un'energia teorica di impatto pari a 14.35J.



Figura 2.14 Impronta su troncone rivestito con Lursak a E=12J

La profondità dell'impatto è pressoché irrilevante, infatti come si può vedere in figura 2.14, dopo l'impatto sulla superficie del troncone non si rileva nessun danno e/o cambiamento dello stato della vernice LURSAK, per questo motivo si è passati a prove a energia superiore senza effettuare ulteriori prove a con le stesse specifiche.



Figura 2.15 Impronta su troncone rivestito con Lursak :E=32J(a),E=32J angolo inclinazione 45°(b)

I test a 32J hanno provocato i danni evidenziati in figura 2.15a dove con i numeri 2-3-4 si indicano i punti di impatto proietti/assile. Si nota che la vernice LURSAK resiste perfettamente all’impatto anche se si ha un’energia all’impatto circa 2.5 volte maggiore rispetto a quella indicata nella normativa europea per le verifiche di assili verniciati. Il proiettile danneggia, in modo quasi impercettibile, solo il primo strato di vernice definito anche nel Capitolo1 come: Protettivo Top-coat.

In tabella 2.6 sono riportati i risultati dei lanci effettuati a E=32J utilizzando un troncone rivestito con vernice LURSAK nuova.

Tabella 2.6 Riassunto lanci effettuati a E=32J

velocità laser [m/s]	massa proiettile [kg]	velocità analitica [m/s]	energia reale [J]	energia teorica [J]	profondità impronta [mm]
8.400	0.924	9.249	32.599	39.521	0
8.842	0.924	9.249	36.120	39.521	0
8.268	0.924	9.249	32.599	39.521	0

In figura 2.15b si vedono gli impatti indicati con i numeri 5 e 6. Questi impatti sono stati eseguiti con un angolo di inclinazione rispetto alla normale pari a 45°. Anche in questo caso dopo un’oculata indagine visiva si è giunti alla conclusione che il danno è quasi impercettibile e limitato al primo strato di vernice. In tabella 2.7 sono riportati i risultati ottenuti a E=32J con un angolo di inclinazione pari a 45°.



Tabella 2.7 Riassunto lanci E=32J con angolo di impatto pari a 45°

velocità laser [m/s]	massa proiettile [kg]	velocità analitica [m/s]	differenza %	energia reale [J]	energia teorica [J]	profondità impronta [mm]
8.615	0.924	9.249	0.931	34.292	39.521	0
8.842	0.924	9.249	0.956	36.120	39.521	0

#### 2.1.4 Assile rivestito con Lursak invecchiata

L'obiettivo della campagna sperimentale è verificare la resistenza dell'assile nelle varie condizioni di esercizio dello stesso. Per questo motivo dopo aver effettuato prove con assili nuovi non rivestiti e assili nuovi rivestiti si è passati a test su assili con rivestimento invecchiato.

L'invecchiamento artificiale del materiale si è effettuato realizzando dei cicli termici caldo/freddo. I tronconi sono stati inseriti all'interno di una camera climatica impostando dei cicli con variazioni climatiche controllate.

Tabella 2.8 Cicli termici per invecchiamento vernice LURSAK

data	orario entrata in forno T=50°C	orario entrata in freezer T=-5°C	ore totali in forno e in freezer h
20/03/2013	8:30	16:30	8h in forno, 7.30 h freezer
21/03/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
22/03/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
23/03/2013	-	-	freezer 24h
24/03/2013	-	-	freezer 24h
25/03/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
26/03/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
27/03/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
28/03/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
29/03/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
30/03/2013	-	-	freezer 24h
31/03/2013	-	-	freezer 24h
01/04/2013	-	-	freezer 24h
02/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
03/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
04/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
05/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
06/04/2013	-	-	freezer 24h
07/04/2013	-	-	freezer 24h
08/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
09/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
10/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
11/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer

	orario entrata in forno	orario entrata in freezer	ore totali in forno e in freezer
12/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
13/04/2013	-	-	freezer 24h
14/04/2013	-	-	freezer 24h
15/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
16/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
17/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, 16 in freezer
18/04/2013	8:30	16:30	8h in forno, temperatura ambiente

I cicli termici a cui sono stati sottoposti i tronconi sono indicati in tabella 2.8. Per l'invecchiamento si è seguita la normativa ASTM D 6944 – 03 [21] che indica la procedura da seguire per ottenere informazioni sulla capacità di adesione del rivestimento se sottoposto a stress termico. [21]

Seguendo le indicazioni della normativa sopracitata si sono eseguiti circa 30 cicli, ciascuno dei quali in genere composto da 8 ore in forno a una temperatura di 50°C e 16 ore in freezer a una temperatura T= -25°C. A volte si è dovuto optare per 24 ore di freezer a T=-25°C a causa di contingenze logistiche, l'intero ciclo di invecchiamento è durato 30 giorni.

Come si è già fatto in precedenza, anche per gli assili rivestiti di vernice "invecchiata" si è effettuata una prima prova con una energia di impatto di 12J, ma anche in questo caso, come per i tronconi non invecchiati, non si è avuto alcun danno sulla vernice di protezione del componente che si è testato.

Il secondo test si è eseguito con energie di impatto teoriche pari a 32J. Impiegando energie superiori rispetto alla prima prova il difetto aumenta ma rimane contenuto, si veda figura 2.16a. In tabella 2.9 sono riassunti i valori delle prove effettuate su tronconi con vernice LURSAK invecchiata.

Tabella 2.9 Riassunto prove effettuate su vernice Lursak invecchiata

velocità laser [m/s]	massa proiettile [kg]	velocità analitica [m/s]	differenza %	energia reale [J]	energia teorica [J]	profondità impronta [mm]
8.842	0.335	9.249	0.906	11.740	14.307	0
8.485	0.924	9.249	0.956	36.120	39.521	0
8.400	0.924	9.249	0.917	33.261	39.521	0



Figura 2.16 Impronta danno con energia di impatto a 12J(a) energia di impatto 32J(b)

Anche in questo caso sono stati effettuati due spari con un angolo di inclinazione rispetto all'asse del troncone di  $45^\circ$ . I risultati ottenuti sono confrontabili a quelli causati dagli spari perpendicolari alla superficie di impatto (effettuati precedentemente) e aventi la stessa massa e quindi la stessa energia di impatto degli spari inclinati.

Anche in questa condizione, assile invecchiato, la vernice ha risposto in modo soddisfacente, infatti il danno è stato limitato al primo strato di vernice.

In tabella 2.10 si riassumono i risultati ottenuti con la vernice LURSAK invecchiata con angolo di impatto pari a  $45^\circ$ .

Tabella 2.10 Riassunto prove di impatto su vernice invecchiata con angolo di impatto pari a  $45^\circ$

velocità laser [m/s]	massa proiettile [kg]	velocità analitica [m/s]	energia reale [J]	energia teorica [J]	profondità impronta [mm]
8.889	0.924	9.249	32.599	39.521	0
8.842	0.924	9.249	36.504	39.521	0
8.615	0.924	9.249	36.120	39.521	0

### 2.1.5 Assile rivestito con Lursak a bassa temperatura

Da ultimo si sono eseguite le prove su assili rivestiti e alla temperatura di prova degli assili controllata a  $T=-25^\circ\text{C}$ . Le prove eseguite a temperatura controllata si sono svolte sia su assili che precedentemente erano stati sottoposti a invecchiamento che su assili nuovi.

I primi a essere eseguiti sono stati gli impatti con energia di impatto  $E=12\text{J}$ , anche in questo caso si è verificato che la vernice resiste senza alcun problema.

L'impronta del danno come si nota in figura 2.17 è poco visibile ad occhio nudo.



Figura 2.17 Impatto a  $E=12J$  temperatura controllata  $T=-25$

Si è impiegato quindi il proiettile da 924g, figura 2.2c, con tutti gli anelli montati per ottenere una energia di impatto pari a 32J. In questo caso la vernice non ha resistito e lo strato protettivo è stato frantumato dal proiettile, si veda figura 2.18. I motivi che hanno portato a questo comportamento della vernice possono essere i più vari tra i quali si è ipotizzato un elevato infragilimento della vernice che ha portato alla rottura.



Figura 2.18 Impronta con prova a  $T=-25^{\circ}C$  assile invecchiato

Si è continuato con le prove a 32J (Fig. 2.19) per valutare se l'evento fosse dovuto a un difetto presente sullo strato di rivestimento o un difetto di incollaggio.



Figura 2.19 Impronta con prova a  $T=-25^{\circ}\text{C}$  assile invecchiato

Anche in questo caso si è avuto un cedimento della vernice di rivestimento. Da notare come il rivestimento sia andato via fino a lasciare l'assile nudo, il secondo test è stato effettuato nella parte centrale dell'assile per essere sicuri che non si sia trattato di un cedimento dovuto al fatto che il punto di impatto fosse nella zona periferica del troncone. Nei test in cui la vernice non ha sopportato l'impatto con il proiettile si è provveduto ad asportare i frammenti intorno all'impatto in modo da poter valutare se la punta del proiettile avesse raggiunto o meno l'assile nudo. Si è utilizzata una lente per analizzare al meglio la parte di assile non più ricoperta scoprendo che l'assile non ha subito danni ed è rimasto intatto. In tabella 2.11 si riporta il riassunto dei test effettuati a temperatura  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Tabella 2.11 Riassunto prove a  $T=25^{\circ}\text{C}$  con vernice nuova

velocità laser [m/s]	massa proiettile [kg]	velocità analitica [m/s]	energia reale [J]	energia teorica [J]	profondità impronta [mm]
8.455	8.615	0.924	0.931	34.292	0
8.485	0.335	9.249	11.955	14.307	0
8.378	0.924	9.249	33.261	39.521	0

Le stesse prove sono state effettuate su un troncone che ha subito il ciclo di invecchiamento descritto nel paragrafo 2.1.3. Come nei casi precedenti sono state condotte prove a 12J e 32J. In questo caso le prime prove a essere eseguite sono quelle a  $45^{\circ}$  per avere un confronto anche con gli altri casi studiati precedentemente. In tabella 2.12 sono rappresentati i valori dei test effettuati a  $T=-25^{\circ}\text{C}$  con angolo di impatto pari a  $45^{\circ}$  con vernice invecchiata.

Tabella 2.12 Riassunto spari a  $T=-25^{\circ}\text{C}$  con vernice LURSAK invecchiata e angolo di impatto pari a  $45^{\circ}$

velocità laser [m/s]	massa proiettile [kg]	velocità analitica [m/s]	differenza %	energia reale [J]	energia teorica [J]	profondità impronta [mm]
9.081	0.924	9.249	0.931	34.292	39.521	0
8.750	0.924	9.249	0.982	38.099	39.521	0



Figura 2.20 Impronta con prova a  $T=-25^{\circ}\text{C}$  assile invecchiato, impatto a  $45^{\circ}$ ,  $E=32\text{J}$

Come si nota in figura 2.20 il danno provocato dagli impatti a  $45^{\circ}$  a  $32\text{J}$  sono trascurabili.

Si è effettuato un test a  $12\text{J}$  dove non si è rilevato alcun cedimento della vernice né tanto meno un danno rilevante, si veda figura 2.21.



Figura 2.21 Impronta con prova a  $T=-25^{\circ}\text{C}$  assile invecchiato,  $E=12\text{J}$

Si è passati quindi a realizzare test a  $32\text{J}$  con impatto perpendicolare al troncone, figura 2.22. Anche in questo caso, come nei test in cui si utilizzavano tronconi

non invecchiati, si è avuto il cedimento della vernice, ma come negli altri spari il danno non ha raggiunto l'assile.

In tabella 2.13 sono riportati i valori delle prove effettuate a temperatura  $-25^{\circ}\text{C}$  su vernice LURSAK invecchiata.

Tabella 2.13 Riassunto lanci a  $-25^{\circ}\text{C}$  su vernice LURSAK invecchiata.

velocità laser [m/s]	massa proiettile [kg]	velocità analitica [m/s]	differenza %	energia reale [J]	energia teorica [J]	profondità impronta [mm]
8.75	0.924	9.249	0.946	35.372	39.521	0
8.087	0.335	9.249	0.874	10.938	14.307	0

Tutti i test effettuati si sono svolti nel pieno rispetto della norma vigente, e hanno confermato che gli impatti anche se effettuati con una energia 2.5 volte superiore a quella prescritta dalla norma hanno dato degli esiti molto confortanti per quanto riguarda la tenuta della vernice. Infatti, anche quando la vernice ha ceduto non si è riusciti a danneggiare l'assile nudo sottostante.



Figura 2.22 Impronta con prova a  $T=-25^{\circ}\text{C}$  assile invecchiato,  $E=32\text{J}$

## 2.2 Prove di impatto con sassi della massiccata

Dopo aver eseguito le prove seguendo le direttive della normativa UNI EN 13261 [15] è stata effettuata una campagna sperimentale utilizzando alcuni sassi della massiccata al posto dei proiettili normati. Nei test con il ballast, si vuole valutare il comportamento del rivestimento nelle reali condizioni di utilizzo, in particolare si cerca di simulare sperimentalmente la situazione che si ha durante

l'impatto ballast-assile. La ragione per cui vengono eseguite tali prove è perché le prove a norma sono effettuate con un proiettile metallico a punta indurita, anche se normata è molto lontana dalla realtà e quindi si vuole verificare che essa sia effettivamente rappresentativa.

Le prove sono state effettuate con i seguenti tipi di assile:

- non rivestiti
- rivestiti con vernice LURSAK nuova
- rivestiti con vernice LURSAK invecchiata (la vernice è stata sottoposta allo stesso ciclo di invecchiamento esposto nel capitolo 2.1.3)

Le prove sono state condotte tutte a temperatura ambiente, in quanto l'elaborato set-up sperimentale non ha permesso di gestire i tronconi in modo da poter raggiungere la temperatura di  $T=-25^{\circ}\text{C}$  per effettuare delle prove anche in queste condizioni.

La macchina di prova, illustrata in figura 2.23, consiste in un cannone "spara-poli" di tipico utilizzo aeronautico ed è composta da:

- Compressore
- Serbatoio di aria
- Meccanismo di sparo
- Sabot
- Cannone
- Piastra supporto troncone
- Raccordo



Figura 2.23 Macchina di prova



Essa opera secondo il seguente principio di funzionamento: il compressore aumenta la pressione dell'aria nel serbatoio, figura 2.23a. Il raccordo, si veda figura 2.23a e figura 2.24a, collega il serbatoio al cannone contenente il meccanismo di sparo. Quest'ultimo è composto da un azionamento elettrico che movimenta un perno che rompe una membrana (figura 2.24b e c) di ottone dello spessore di 0.1 mm; la rottura della lamina determina un rapido deflusso dell'aria in pressione generando lo sparo del proiettile.



Figura 2.24 Meccanismo di sparo. (a) raccordo bullonato alla flangia (b) meccanismo di sparo (c) membrana rotta dopo sparo

La velocità del sasso in uscita dal cannone si può modulare variando la pressione all'interno del serbatoio.

Nel tubo, subito dopo la membrana, è stato inserito un sabot realizzato in poliuretano che ha il compito di trasportare il sasso lungo tutta l'estensione del cannone, figura 2.25a. Alla fine dello stesso è posizionata una seconda flangia bullonata di diametro inferiore rispetto al sabot, consentendone il bloccaggio e lasciando che il sasso prosegua la sua corsa verso il bersaglio, figura 2.25b.

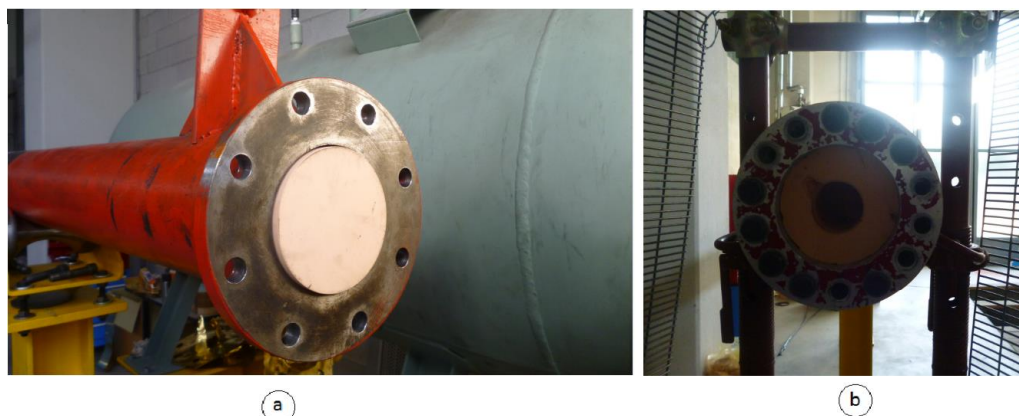


Figura 2.25 Sabot nel tubo, (a) carico sabot, (b) fine corsa sabot

Il sasso che ha la funzione di proiettile è inserito all'interno del sabot, nel foro che è stato realizzato per contenerlo fino a fine corsa nel tubo, figura 2.26b.

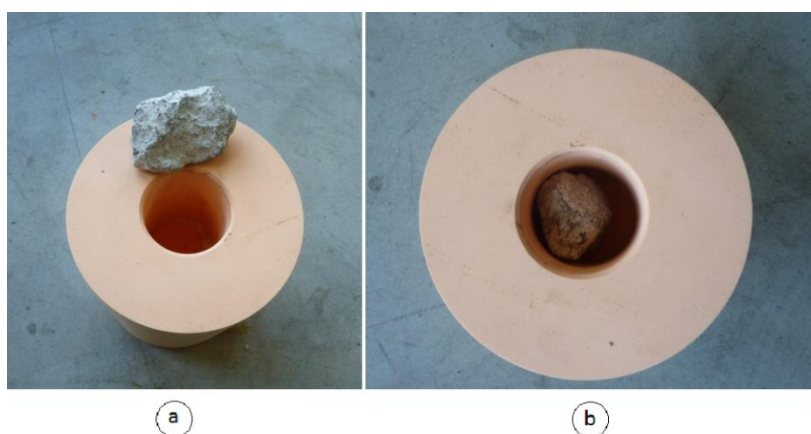


Figura 2.26 Sabot, (a) sabot con sasso utilizzato per una prova (b) sasso nel foro

La struttura che supporta il troncone di assile è stata progettata appositamente per realizzare le prove di impatto di ballast su spezzoni di assile, si veda la figura 2.27(a, b). Il sistema di bloccaggio degli spezzoni di assile è stato progettato per ottenere un rapido montaggio/smontaggio ma è anche una soluzione che consente di avere robustezza in modo che la struttura possa resistere agli impatti.

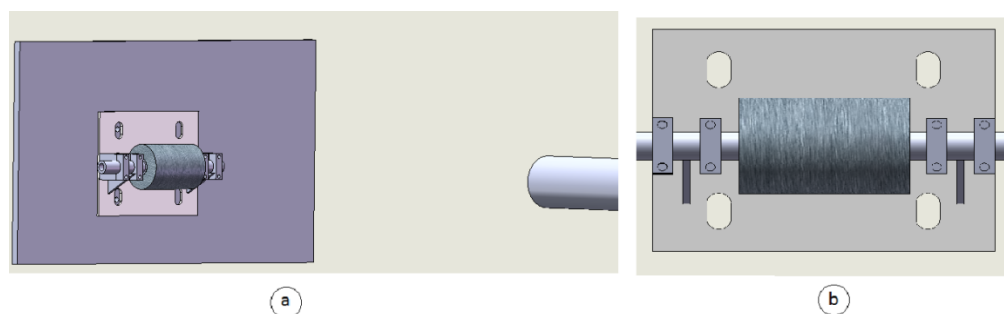


Figura 2.27 Rendering della struttura di supporto dei tronconi

La piastra portante sulla quale grava tutto il carico è installata mediante quattro bulloni M16 su una parete metallica, figura 2.28. Sulla piastra sono state realizzate delle asole che consentono la regolazione dell'altezza tra tubo, punto di uscita del sasso e assile (bersaglio), ed anche perché si volevano effettuare degli spari con angolo di impatto rispetto alla normale all'asse del troncone di  $45^\circ$ , quest'ultimi non sono stati effettuati perché non è stato possibile ottenere una elevata precisione di mira sullo spezzone di assile.

Il ballast utilizzato per le prove è un campione di massiciata che è stato donato da RFI per eseguire le prove e ciò consente di avere dei sassi conformi alla normativa vigente [12].

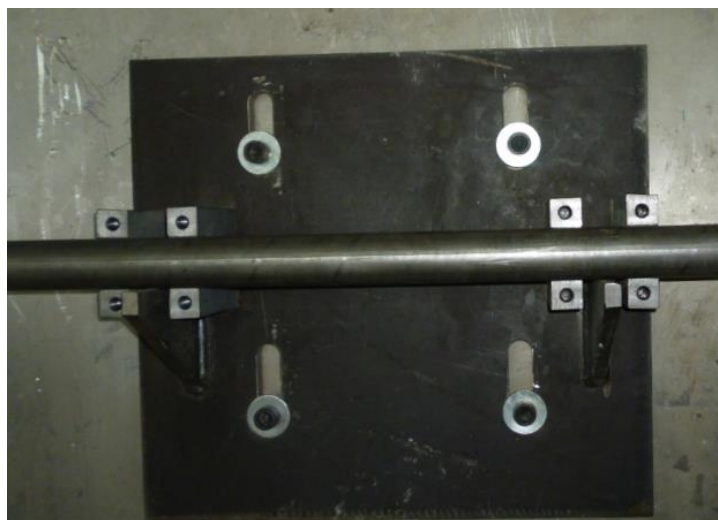


Figura 2.28 Piastra supporto troncone

La velocità di impatto è stata valutata realizzando dei video con una telecamera ad alta risoluzione PHANTOM V210, figura 2.29.



Figura 2.29 Telecamera PHANTOM V210

La telecamera lavorando con una frequenza di campionamento elevata (dell'ordine dei 16000fps) ha bisogno di una sorgente luminosa molto intensa, per questo motivo sono stati installati dei fari ad elevata potenza (10 kW), figura 2.30(a, b e c).



Figura 2.30 Telecamera, illuminazione, protezione

Infine è stato progettato e realizzato un sistema di protezione, per evitare che i frammenti dei sassi e dei sabot colpiscano gli operatori, la telecamera e il sistema di illuminazione, figura 2.30 (b e c).

### 2.2.1 Assile nudo

Il primo troncone utilizzato per le prove è stato il troncone non rivestito; i risultati ricavati da questi test verranno confrontati con quelli ottenuti dagli assili rivestiti.

Sul troncone non rivestito sono stati eseguiti complessivamente sette impatti a velocità e quindi energia crescente. In figura 2.31 si vede un esempio della sequenza di fotogrammi precedenti l'impatto tra il sasso e lo spezzone di assile.

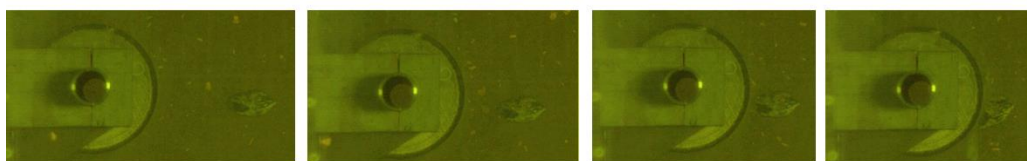


Figura 2.31 Fotogrammi dell'impatto numero 9

In figura 2.32 sono riportati i punti di impatto dei sassi sul troncone.



Figura 2.32 Impronte su assile non rivestito

Successivamente con l'ausilio di un comparatore Rambold M2/30, figura 2.33, sono state valutate le profondità delle impronte realizzate; i risultati sono riportati in tabella 2.14.



Figura 2.33 Comparatore Rambold M2/30

Tabella 2.14 Riassuntivo prove assile non rivestito

figura 2.32	m [kg]	v [m/s]	v [km/h]	E [J]	profondità [mm]
a	0.14	31.268	112.563	68.436	0
b	0.14	22.660	81.577	35.944	0
c	0.16	102.859	370.294	846.404	0.15
d	0.15	114.288	411.437	979.634	0.24
e	0.135	108.273	389.783	791.305	0.3
f	0.13	93.037	334.933	562.633	0.21
g	0.145	105.042	378.151	799.949	0.7

In tabella sono indicati:

- Prima colonna riferimento all'immagine dell'impatto
- m è la massa del sasso utilizzato per il lancio
- v è la velocità in m/s
- v è riportata anche in km/h
- E è l'energia all'impatto
- Ultima colonna rappresenta la profondità dell'impronta causata nel test.

Come si nota dai valori riportati in tabella 2.14, la dimensione della profondità non è strettamente legata all'energia di impatto, infatti vi sono impatti con energia superiore ad altri ma con profondità non altrettanto maggiore come si può apprezzare in figura 2.34.

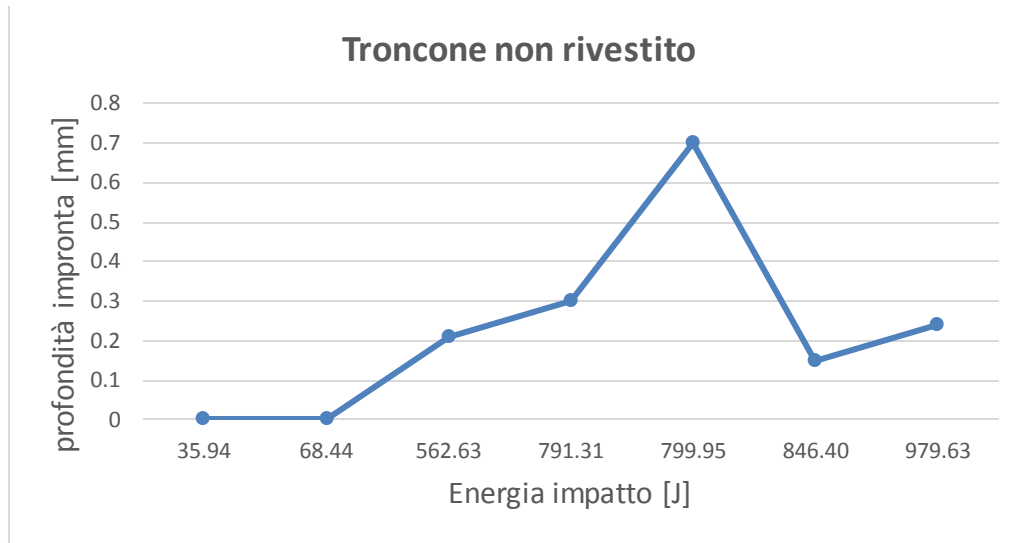


Figura 2.34 Andamento profondità- energia

La mancata proporzionalità tra energia di impatto e profondità del danno è legata a più fattori tra i quali:

- dinamica del sasso lungo la traiettoria
- geometria del sasso
- durezza del sasso

### 2.2.2 Assile rivestito con LURSAK nuova

I test con il lancio di massiccata sugli assili è continuato testando un troncone rivestito con vernice LURSAK nuova. Il troncone utilizzato in queste prove è stato impattato solo tre volte in quanto la volontà è quella di effettuare un numero maggiore di test su un troncone con rivestimento invecchiato, che determina anche una condizione più conservativa.

I lanci che sono stati effettuati hanno causato i danneggiamenti mostrati in figura 2.35.





Figura 2.35 Impronte su assile con rivestimento nuovo

Dopo aver effettuato i lanci sono state valutate le condizioni del rivestimento e solo il lancio numero 26 riportato in figura 2.35b ha danneggiato la vernice. Seguendo la norma UNI EN 13261 [15] nei casi in cui si ha rottura e/o distacco del rivestimento si rende necessaria l'asportazione della vernice e l'analisi della superficie dell'assile; se l'area di impatto non dovesse risultare integra si proseguirebbe quantificando il danno con il comparatore già impiegato per valutare le profondità dei danni sull'assile nudo.

In tabella 2.15 si riportano le grandezze che hanno caratterizzato questi lanci:

Tabella 2.15 Riassuntivo prove assile con rivestimento nuovo.

figura 2.35	m [kg]	v [m/s]	v[km/h]	E[J]	profondità impronta [mm]
a	0.10	100.843	363.033	508.460	0
b	0.11	100.843	363.033	559.307	0.45
c	0.115	69.814	251.331	280.255	0

Analizzando i video di questi lanci si è notato come ad incidere sul lancio numero 26, figura 2.35b, sia stata la traiettoria e la geometria del sasso a causare l'entità del danno.



Figura 2.36 Fotogrammi dell'impatto numero 26

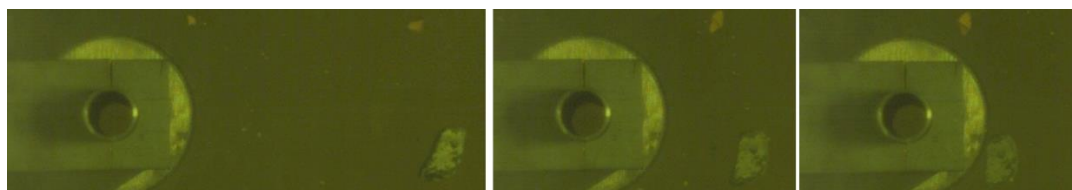


Figura 2.37 Fotogrammi dell'impatto numero 27

### 2.2.3 Assile rivestito con Lursak invecchiata

Le ultime prove che sono state effettuate riguardano la condizione più conservativa, proprio per questo motivo sono stati utilizzati due tronconi rivestiti con vernice LURSAK che ha subito il ciclo di invecchiamento descritto al capitolo 2.1.3.

Sono stati effettuati sei lanci con energia di impatto superiore a 225J.

In figura 2.38 si vedono le impronte causate dai sassi sui tronconi.

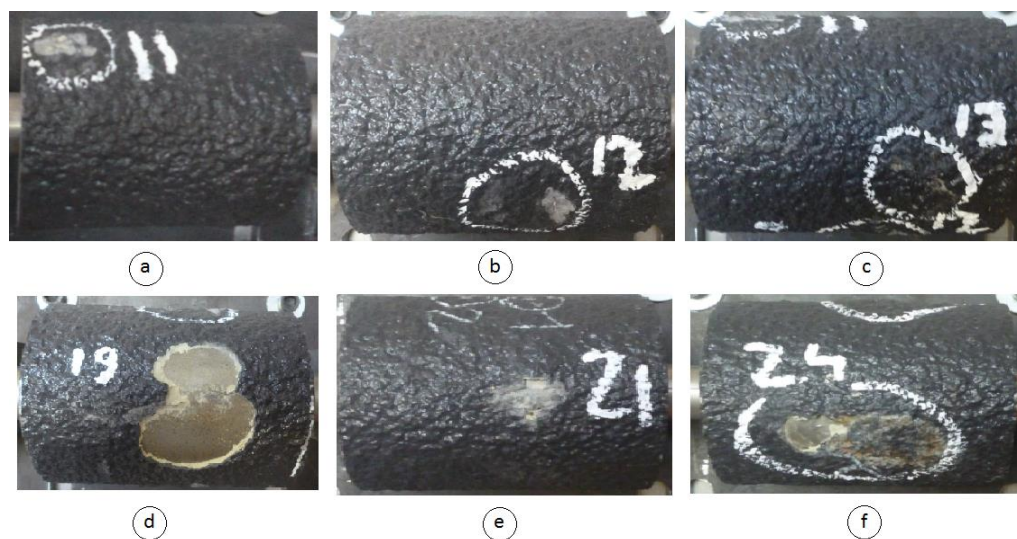


Figura 2.38 Impronte su assile con rivestimento nuovo

Lo studio delle impronte e della loro profondità è stato effettuato con un comparatore, lo stesso già utilizzato precedentemente per valutare l'avvallamento del calco dell'assile non rivestito, i risultati ottenuti dalla misurazione dei danni e dalle prove sui tronconi rivestiti con la vernice LURSAK che ha subito il ciclo di invecchiamento sono riassunti in tabella 2.16.

Tabella 2.16 Riassuntivo prove assile con rivestimento invecchiato

figura 2.38	m [kg]	v [m/s]	v [km/h]	E [J]	profondità impronta [mm]
a	0.11	75.7278	272.620	315.41	0
b	0.12	85.1872	306.674	435.41	0
c	0.05	94.9229	341.722	225.26	0
d	0.1	107.171	385.816	574.28	0.26
e	0.095	100.676	362.433	481.44	0
f	0.125	100.843	363.033	635.58	0

I risultati ottenuti dalle ultime prove sono confortanti.

La vernice come si nota dalla figura 2.38 (a, b e c) ha ceduto in tre test ma solo in un caso ha consentito al sasso di intaccare la superficie dell'assile. Nei tre casi dove si ha avuto distacco e lacerazione della vernice si è provveduto

all'eliminazione del rivestimento nella zona circostante l'impatto al fine di analizzare la superficie del troncone.

Dai test che si sono effettuati con il lancio di massicciata contro gli assili si è avuto un valore massimo della profondità di impatto su spezzoni di assile verniciato pari a 0.5 mm, mentre nel caso di assile non rivestito la profondità ottenuta è pari a 0.7 non lontana da quella ottenuta effettuando le prove a norma con un proiettile metallico dalla geometria definita. Applicando lo stesso ragionamento già visto nel caso delle prove a norma, per le simulazioni di propagazione si adotterà, per l'assile rivestito, una dimensione iniziale di cricca pari a 1 mm.

### **2.3 Considerazioni**

Dalle prove sperimentali effettuate, la prima conclusione che si può trarre è sicuramente che le prove con la massicciata mostrano, a fronte di un'energia che è circa due ordini di grandezza superiore rispetto alle prove a norma, profondità di impronta confrontabili con i test a norma. Probabilmente utilizzare un proiettile normato, nuovo ad ogni prova, risulterebbe essere più conservativo della massicciata.

Dalle prove con il cannone si evince che la soglia di energia all'impatto sopportabile dalla vernice sia circa 500 J, superato questo limite si sono verificati danni all'assile. Nelle prove a norma si è avuto distacco di vernice già a 32J con troncone invecchiato alla temperatura di -25°C, ciò consente di dire che aumentando ulteriormente l'energia all'impatto si sarebbero causati dei danni anche all'assile.

Viste le limitazioni di velocità a cui possono essere impiegati i carrelli merci, si può affermare che la vernice risulta effettivamente efficace. I test effettuati a velocità superiori, per valutare il comportamento del rivestimento nel trasporto ad alta velocità, hanno mostrato che la vernice risponde bene agli urti e ne assorbe l'energia diminuendo sensibilmente la profondità dell'impronta sull'assile. In un'ottica conservativa, i dati ricavati per l'alta velocità verranno qui adottati come input nelle simulazioni di propagazione di cricche in assili merci che vengono presentate nel Capitolo 3.

## **3 Intervalli di ispezione per assili nudi e rivestiti con Lursak**

Dopo aver effettuato i test sperimentali per individuare efficacia protettiva della vernice LURSAK, in questo capitolo verrà descritto come sono stati stimati gli intervalli di ispezione programmati sia in presenza del rivestimento sia senza vernice sull'assile. Sono stati realizzati dei modelli ad elementi finiti dai quali si vuole estrapolare il profilo degli sforzi in determinate sezioni dell'assile. L'andamento delle sollecitazioni si utilizzerà per sviluppare un modello in grado di valutare la velocità di propagazione di una eventuale cricca.

Le simulazioni di vita dell'assile sono state effettuate con il software AFGROW 4.0012.15 [22], mentre la stima degli intervalli tra due ispezioni successive è stata effettuata con l'ausilio di una routine Matlab appositamente implementata.

### **3.1 Analisi FEM dello stato di sforzo nell'assile**

Si è realizzata un'analisi FEM di un assile realizzato in acciaio A1N che si monta nel carrello Y25 per valutarne lo stato di sforzo, questa informazione è necessaria per effettuare una stima della velocità di propagazione della cricca.

E' stato modellato un assile del carrello Y-25 installato su treni merci; questa tipologia di assile è largamente impiegata dalle compagnie europee ed asiatiche, e risulta essere progettato per:

- trasportare a pieno carico massimo di 25 tonnellate
- viaggiare a una velocità massima di 120km/h.

Gli assili ferroviari longitudinalmente presentano molte variazioni di sezione: ciò è necessario in quanto devono ospitare vari componenti come ruote, freni, cuscinetti e ruote dentate per la trazione.

Le numerose discontinuità di sezione possono essere fonte di elevati fattori di sovrasollecitazione degli sforzi e a tal proposito si procede alla progettazione in modo da ottenere opportuni raggi di raccordo. Le sezioni in cui si ha concentrazione di sforzi sono anche le zone dove la probabilità di innesco di cricche è maggiore. In particolare, i fattori che influenzano l'innesco di cricche in esercizio sono:

- corrosione
- impatti accidentali con il ballast o ghiaccio.

In particolare si hanno cedimenti perché nascono le cricche dai pit di corrosione o dalle impronte degli impatti. La combinazione di maggior pericolo si ha in presenza di pit o impronta sulla transizione geometrica.

Da studi effettuati in passato e dall'esperienza si è dedotto che la zona di transizione più sollecitata è quella indicata nella figura 3.1 è indicata con la lettera T [23].

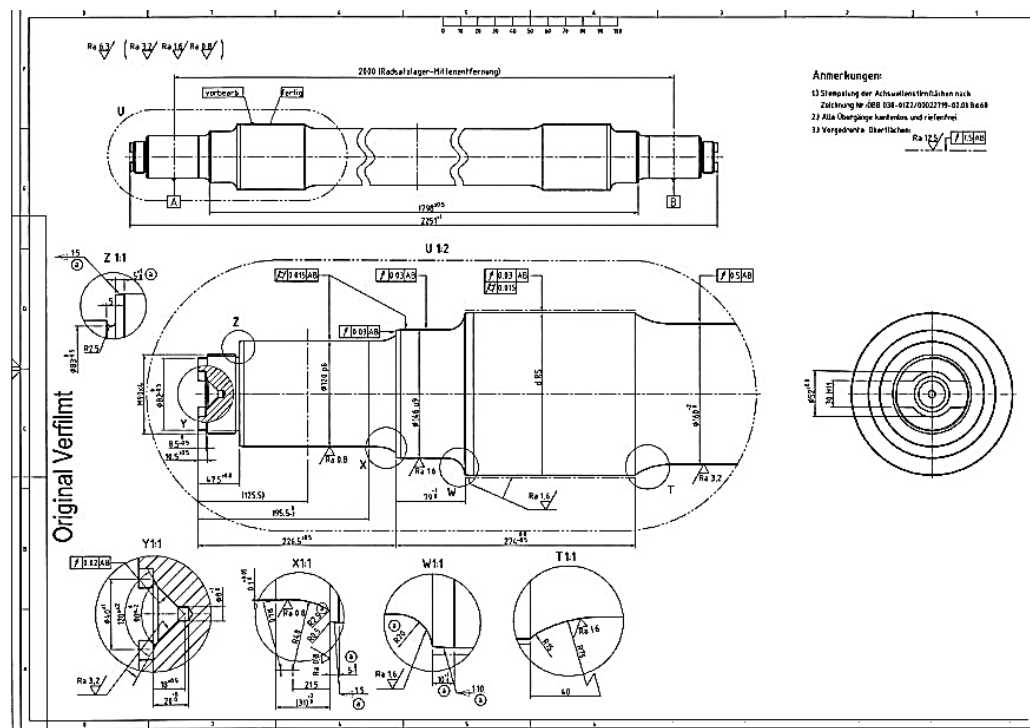


Figura 3.1 Assile carrello Y-25

Al fine di ricavare il profilo dello stato di sforzo lungo la profondità delle sezioni di interesse degli assili sono stati realizzati due modelli FEM:

- uno 3D per valutare l'effetto dei carichi verticali (momento flettente)
- uno 2D assialsimmetrico per valutare l'andamento degli sforzi dovuti al calettamento delle ruote sull'assile.

### 3.1.1 Componente di flessione

La prima analisi ad elementi finiti che si è effettuata riguarda lo stato di sforzo che si genera quando la struttura è sollecitata da carichi verticali, che vengono trasmessi dal telaio del carrello all'assile, per effettuare questo studio è stato realizzato un modello FEM 3D con il software ABAQUS 6.11 [24].

Il modello è stato creato sfruttando le simmetrie geometriche e di carico consentendo di modellare solo un quarto della struttura reale, ottenendo un'analisi più leggera dal punto di vista computazionale.

Per quanto riguarda la generazione della mesh si è preferito utilizzarne una strutturata nelle zone di interesse per avere elementi più regolari, mentre nelle altre è stata usata una mesh tipo free. Essa è stata infittita laddove si ha trasmissione del carico con elementi di dimensione caratteristica di circa 1 mm ed è stata diradata nelle zone di minore interesse. Per la mesh si sono utilizzati elementi di tipo esaedrico lineare a 8 nodi.

Il materiale è stato modellato come elastico lineare con:

- modulo elastico pari a  $E=206000$  MPa
- coefficiente di Poisson pari a  $\nu=0.3$

L'assile è stato vincolato a terra mediante vincoli di tipo cerniera- carrello nelle zone di appoggio delle ruote alle rotaie, oltre a questi sono stati utilizzati i vincoli di simmetria, si veda figura 3.2.

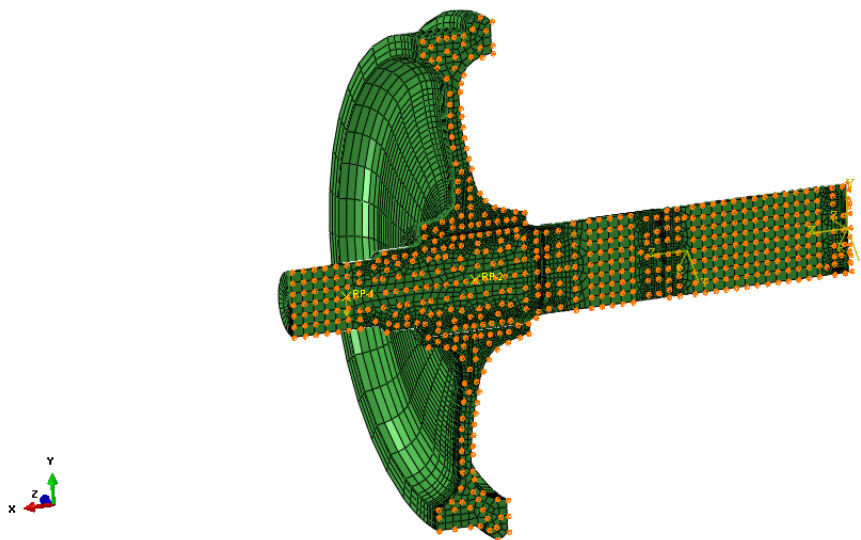


Figura 3.2 Applicazione dei vincoli

E' stato applicato un vincolo di interazione di tipo TIE per realizzare il vincolo di forzamento tra albero e ruota, si veda figura 3.3.

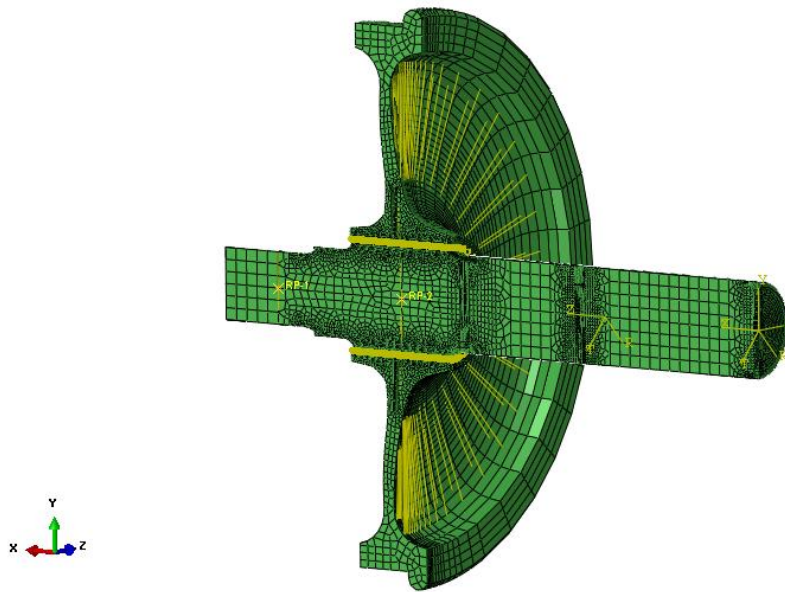


Figura 3.3 Vincolo TIE tra ruota e portata

Il carico verticale è stato applicato nella mezzeria della boccola del cuscinetto presente sul fusello, simulando così il peso della carrozza che grava sull'assile. Il valore di carico necessario per ottenere uno sforzo nominale di 10MPa è stato calcolato utilizzando le seguenti formule:

$$F = \frac{M_f}{b} = \frac{2 \cdot J \cdot \sigma_{nom}}{D \cdot b}$$

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{64}$$

dove:

- D è il diametro dell'assile in corrispondenza del corpo del cilindro (lontano dalle transizioni)
- b è la distanza tra il punto di applicazione del carico e il punto di contatto della ruota-rotai

I valori geometrici di D e b sono ricavati dal disegno costruttivo fornitoci dall'azienda che realizza l'assile.

E' stato possibile individuare il massimo valore di sforzo longitudinale superficiale sulla struttura e ricavarne l'andamento degli sforzi principali in direzione radiale, si veda figura 3.4.



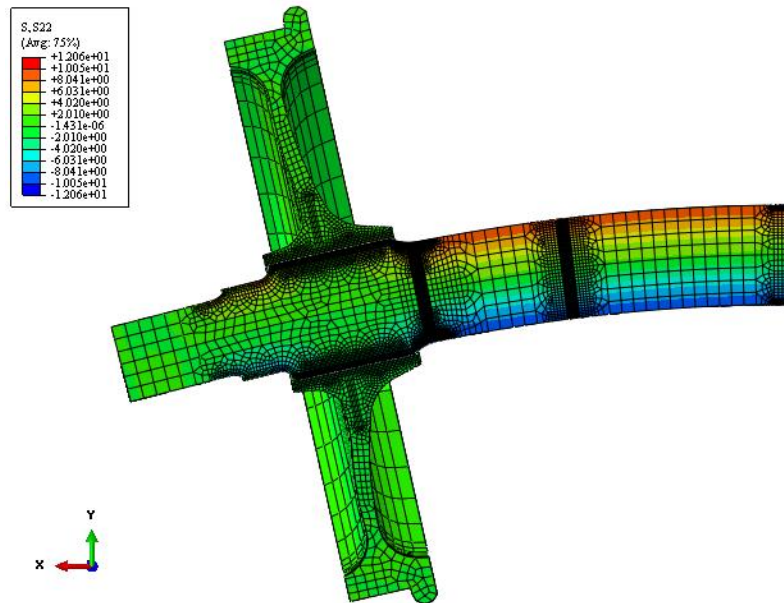


Figura 3.4 Deformata e andamento dello sforzo longitudinale

Il profilo degli sforzi è stato ricavato estrapolando i valori in coincidenza dei nodi lungo la direzione indicata in figura 3.5, questa è la stessa di quella che si utilizzerà nel modello 2D. In figura 3.6 si è rappresentato l'andamento degli sforzi in funzione della profondità.

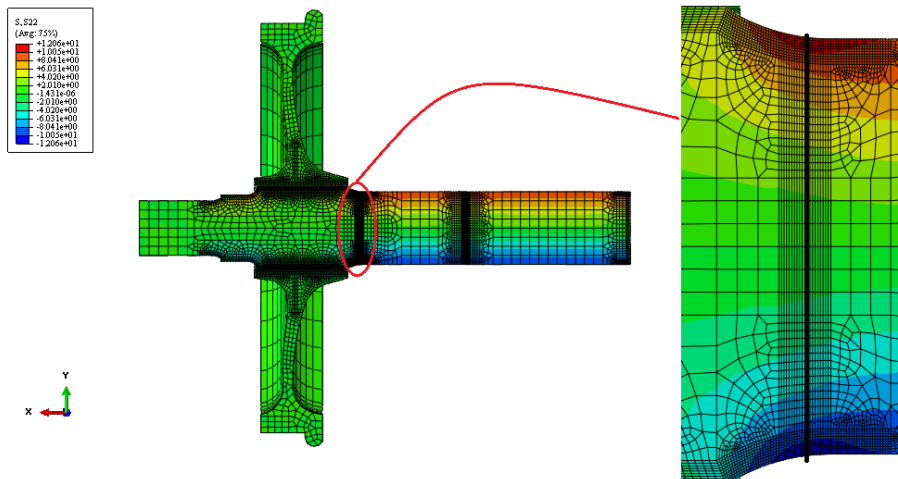


Figura 3.5 particolare sezione estrapolazione andamento degli sforzi

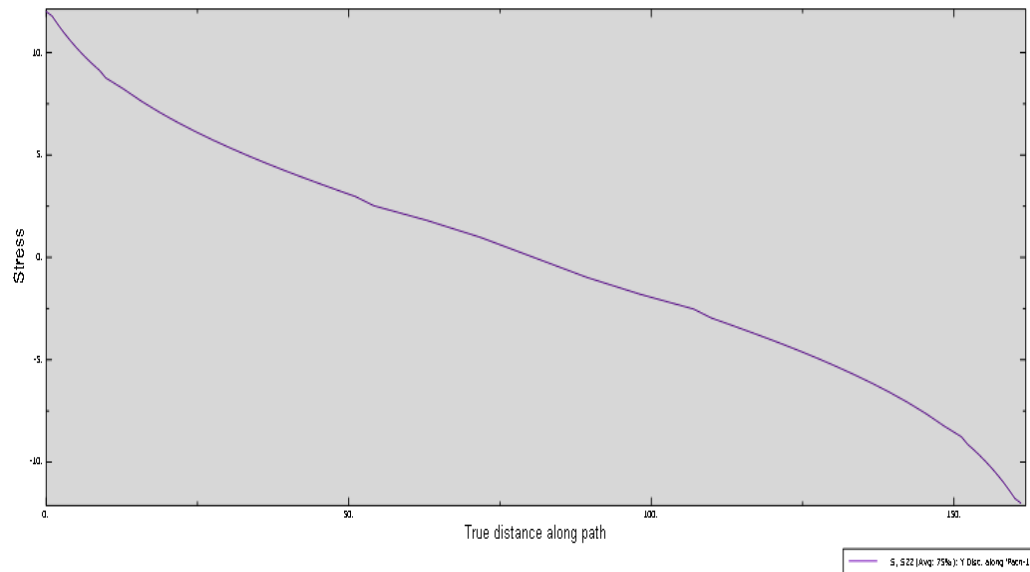


Figura 3.6 Andamento degli sforzi dovuto ai carichi verticali di flessione

### 3.1.2 Calettamenti forzati

La realizzazione del modello 2D è stata effettuata considerando che il componente meccanico che si sta studiando presenta una doppia simmetria: sia rispetto ai carichi sia rispetto alla geometria, figura 3.7.

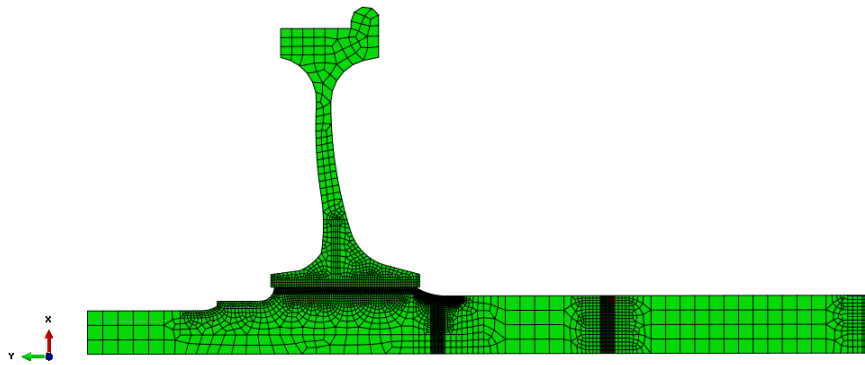


Figura 3.7 Modello 2D assialsimmetrico

La mesh è stata realizzata utilizzando elementi assialsimmetrici quadratici planari a quadrilateri a 8 nodi. La discretizzazione dell'assieme albero/ruota, anche in questo caso è stata realizzata tenendo in considerazione le zone di interesse ossia quelle maggiormente sollecitate ed in queste è stata impiegata

una mesh strutturata utilizzando elementi da 1mm; una di queste zone è la transizione T (si veda figura 3.7), mentre si sono impiegati elementi di dimensioni maggiori e una mesh free nelle zone di minore interesse.

Il materiale è modellato come elastico lineare:

- $E= 206\text{GPa}$
- $\nu=0.3$ .

Il calettamento ruota/assile è stato introdotto attraverso un accoppiamento tra superfici, “interaction surface to surface”. Il calcolo dell’interferenza necessaria tra ruota e albero è stata effettuato sfruttando le informazioni dei disegni fornitici dalle aziende che costruiscono i componenti in esame, in particolare avendo:

- dimensione nominale dell’albero 185mm
- tolleranza u6
- diametro nominale ruota 185 +0/-0.03.

Si ricava facilmente il valore di interferenza che verrà inserito nel software Abaqus 6.11 [24]:

$$I_{\max} = \text{diametro albero max} - \text{diametro minimo ruota} = 0.266\text{mm}$$

Il valore ottenuto si riferisce all’intera sezione dell’assile ma siccome si sta analizzando solo un quarto di struttura nel software si inserisce  $I_{\max}/2$ .

In figura 3.8 sono visibili gli sforzi dovuti al calettamento.

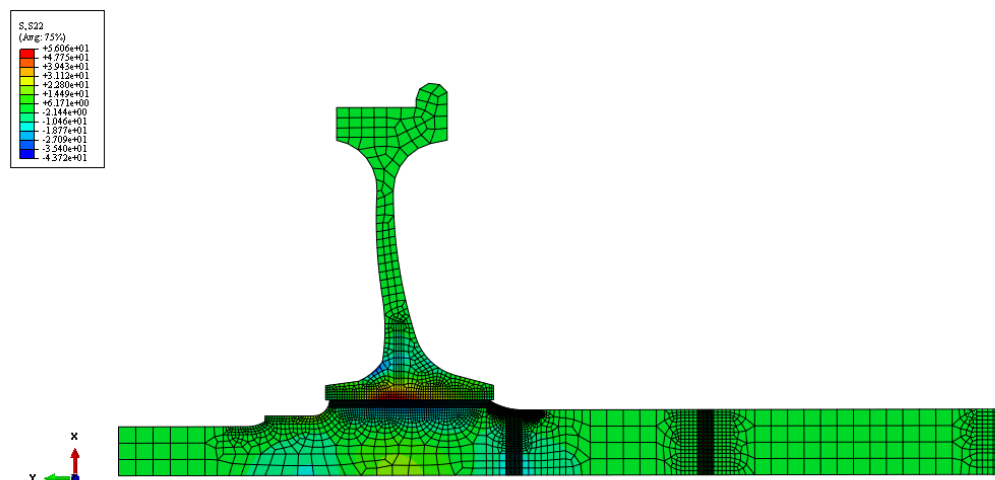


Figura 3.8 Sollecitazione longitudinale dovuta al forzamento asse-ruota

Gli sforzi principali in direzione longitudinale vengono estrapolati nella stessa direzione di quella utilizzata per il modello 3D.

Si noti che l'effetto del forzamento interessa solo la sezione 2, ma non le sezioni 1 e 3 perché troppo lontane, si veda figura 3.9. In figura 3.10 è riportato l'andamento delle sollecitazioni dovuto al calettamento delle ruote nella profondità.

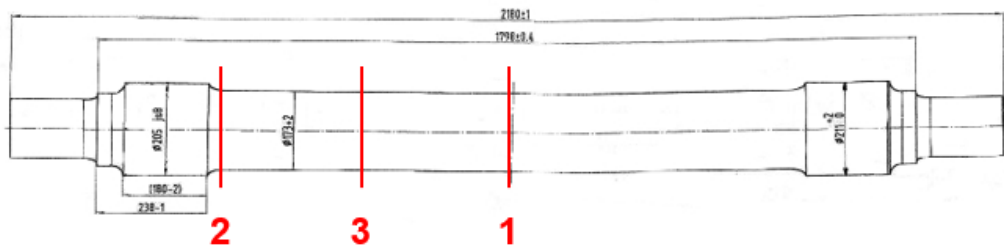


Figura 3.9 Sezioni oggetto delle simulazioni

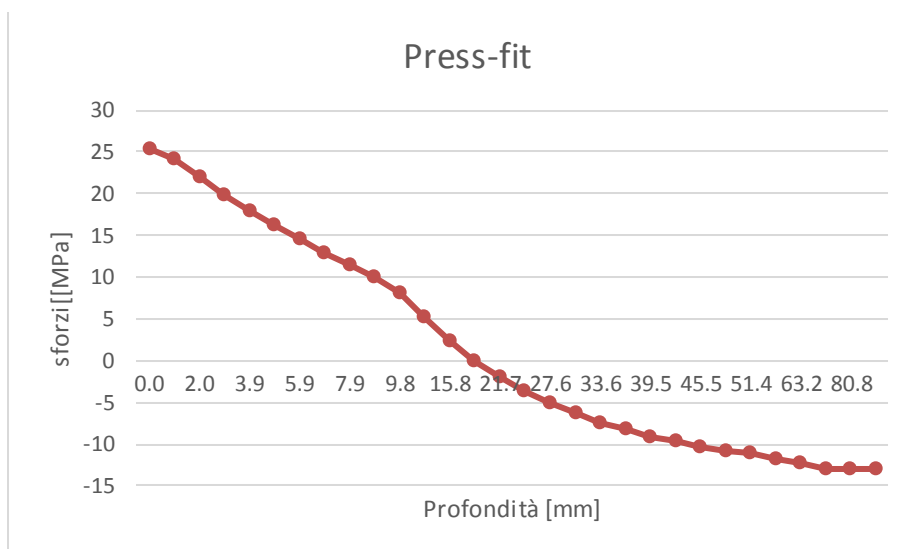


Figura 3.10 Andamento degli sforzi dovuto al press-fit

### 3.2 Previsione di vita a propagazione

Considerando la tecnica di progettazione “Damage Tolerance”, le curve di propagazione insieme ai controlli non distruttivi assumono un ruolo di primo

ordine per la valutazione e la progettazione dell'integrità strutturale di componenti in esercizio.

Le analisi di propagazione sono state effettuate sull'assile su tre sezioni differenti e in ognuna di queste sono state effettuate due simulazioni con due set di dati differenti per la caratterizzazione sperimentale del comportamento a propagazione del materiale:

- dati ricavati utilizzando la metodologia CPLR
- dati ottenuti con procedimento  $\Delta K$ -decreasing.

La metodologia tradizionale per la determinazione della soglia è il “ $\Delta K$ -decreasing”, questo approccio è ritenuto non conservativo ovvero si producono soglie di propagazione più alte rispetto a quelle naturali del materiale, anche se ancora oggi è riportato nella normativa ASTM E647 [25].

La normativa indica le linee guida da seguire per la metodologia  $\Delta K$ -decreasing, in particolare dopo aver portato il materiale a propagare ad una velocità pari a  $10^{-8}$  m/ciclo, propone la diminuzione graduale del carico. Dalla letteratura è noto che a questa velocità si ha una interazione dei carichi sulla propagazione, in particolare una plasticizzazione all'apice della cricca capace di fermare la cricca prima del tempo. [26]

La metodologia CPLR è invece basata sulla pre-cricatura in compressione e si compone dei seguenti passi:

- 1- precricatura mediante cicli di compressione-compressione in modo da ottenere cricche completamente aperte, non affette da closure e dai conseguenti effetti di interazione dei carichi che si formano all'apice degli intagli durante il ciclo di fatica.
- 2- Si fa propagare applicando dei cicli di carico di bassa entità, in modo da far propagare la cricca quel tanto che basta per uscire dalla zona di influenza dell'intaglio e della fatica in compressione precedentemente applicata.
- 3- Si esegue il test, si applica il carico di ampiezza costante per caratterizzare la parte alta della curva di propagazione questo è detto CPCA (Compression Pre-cracking Constant Amplitude), se il carico diminuisce nel tempo per caratterizzare la soglia allora il metodo è detto Compression Precracking Load Reduction o CPLR. [27]

Il fenomeno della “plasticity-induced crack closure” [28] consiste nell'avere un provino con una cricca sottoposta a sollecitazione di trazione si ha la conseguente formazione della zona plastica. Andando avanti con i cicli il materiale si rompe e procede però quello che avevo plasticizzato durante i cicli precedentemente rimane andando a formare una scia plastica. Durante la fase di scarico le parti che vengono a contatto sono quelle plastiche, si ha che la cricca

si chiude quando è ancora sottoposta a uno sforzo di trazione ciò significa che in fase di scarico ad ogni ciclo di carico la cricca si trova a passare attraverso una zona plastica lasciata dai cicli precedenti andando ad interferire con il reale avanzamento della stessa. L'effetto di closure ha anche il merito di spiegare l'effetto di R e l'effetto dei sovraccarichi. Si noti che questo fenomeno non avviene con la precricatura in compressione, si veda figura 3.11.

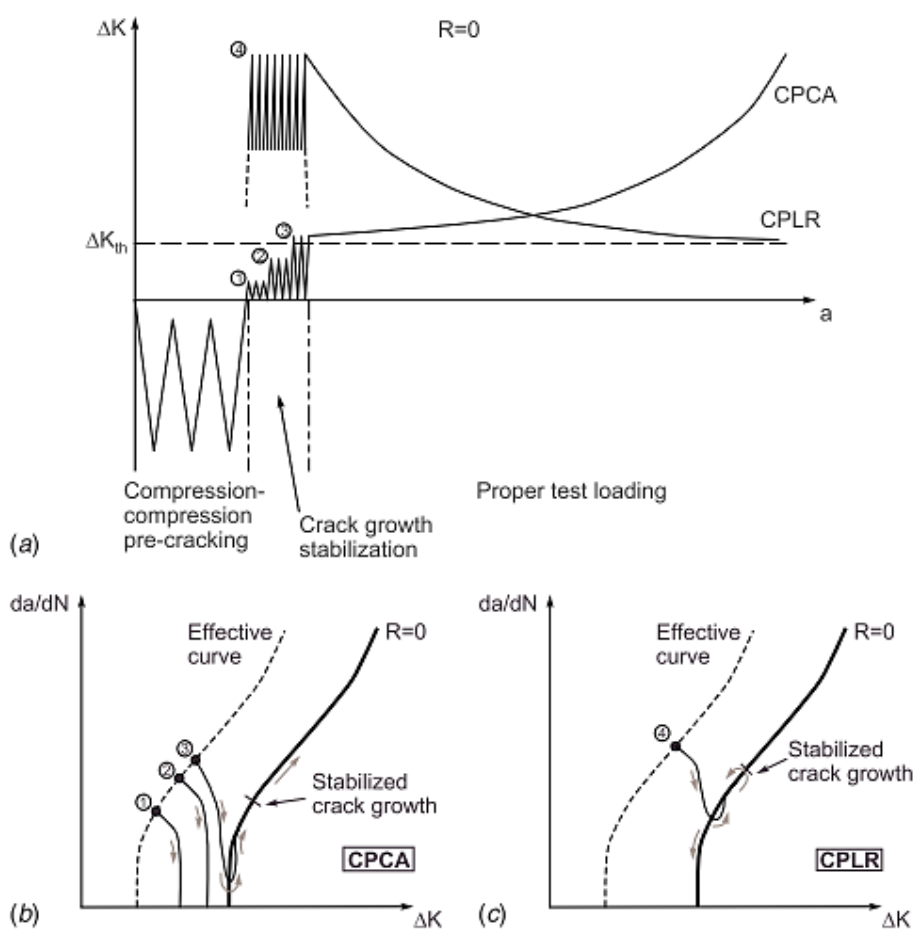


Figura 3.11 Compressione-compressione metodi di precricatura per generare sperimentalmente soglie: (a) schema delle procedure sperimentali in  $R=0$  (b)CPCA e (C) CPLR

Nel corso della vita a fatica gli assili sono sottoposti a periodici controlli, ispezionati mediante metodi CND.

L'intervallo di ispezione, si veda figura 3.12, viene definito come la distanza che può essere percorsa in sicurezza tra due ispezioni CND successive, tale intervallo è funzione di:

- Minima dimensione osservabile di cricca o difetto
- Curva di propagazione  $da/dN$
- Spettri di carico applicati alle zone di interesse per la verifica
- Andamento degli sforzi SIF (Stress Intensity Factors)
- tenacità a rottura KIC.

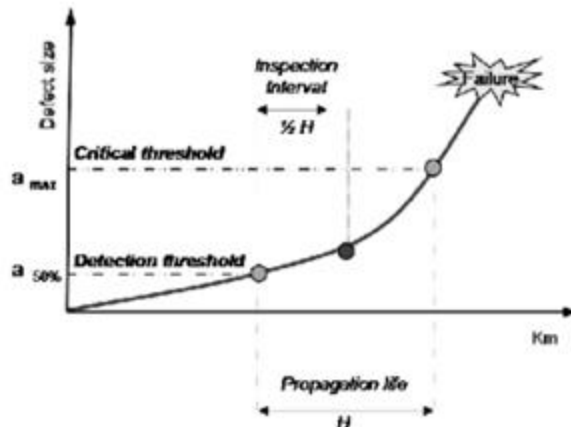


Figura 3.12 Rappresentazione schematica dell'intervallo di ispezione

La riduzione dei costi totali della sala ferroviaria è possibile ottimizzando gli intervalli di ispezione degli assili, pianificando le ispezioni periodiche per controllare lo stato della struttura. Si intuisce come sia necessario sviluppare un modello per valutare la velocità di propagazione della cricca e la stima della distanza di sicurezza tra due ispezioni successive.

Il presente lavoro si propone di calcolare gli intervalli di ispezione considerando assili ricoperti con vernice LURSAK e assili non ricoperti.

Noti i dettagli sulla propagazione della cricca:

- forma e dimensione iniziale (da conclusioni di esperimenti nel Capitolo 2)
- velocità di propagazione del materiale (argomento trattato nel paragrafo successivo)
- spettri di carico (argomento trattato nel paragrafo successivo)

si effettua una previsione sui chilometri che può percorrere l'assile prima che si raggiunga un valore critico di profondità dove l'assile è da sostituire.

Il software impiegato per le previsioni di vita è AFGROW 4.0012.15 [1], programma che essere applicato a qualsiasi struttura metallica che presenti una cricca, anche se maggiormente usato in ambito aeronautico. AFGROW consente

di simulare la propagazione di una cricca, prevedendo così la vita utile del componente.

La caratterizzazione dell'acciaio A1N è stata effettuata acquisendo da studi precedenti [7-9] i valori sperimentali da prove effettuate su provini di tipo SE(T) per differenti valori del rapporto di carico, si veda figura 3.13 dove sono rappresentati i dati ricavati con metodo  $\Delta K$ -decreasing e in figura 3.14 dove sono rappresentati i dati ricavati con metodo CPLR.

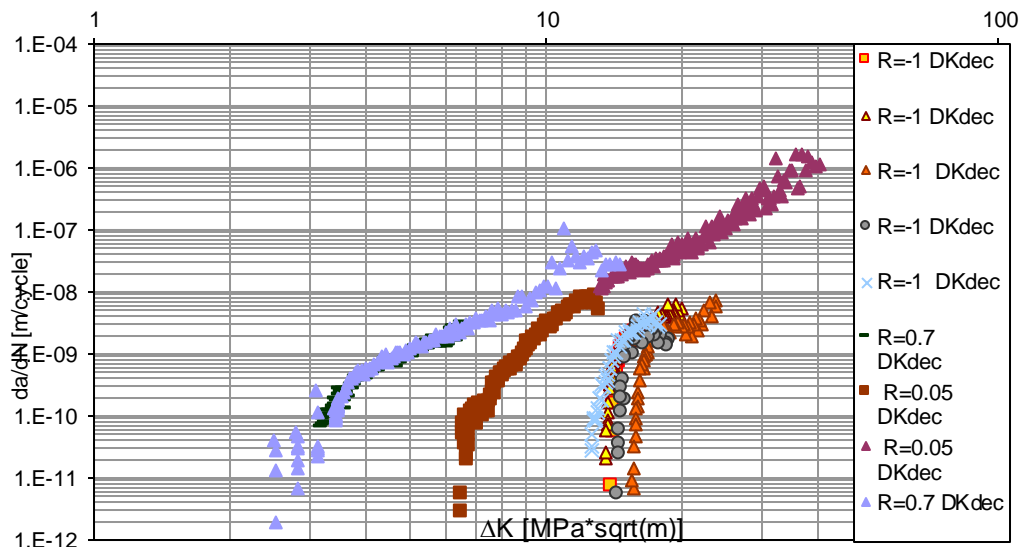


Figura 3.13 Valori sperimentali di propagazione ottenuti col metodo  $\Delta K$ -decreasing [29,30]

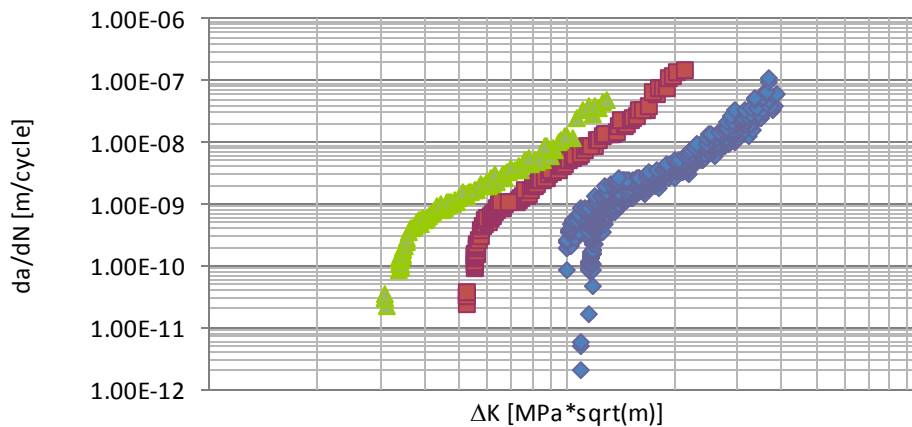


Figura 3.14 Valori sperimentali di propagazione ottenuti col metodo CPLR [31]



Il software AFGROW consente di immettere i dati relativi alle curve di propagazione e le caratteristiche meccaniche dell'acciaio per mezzo di una finestra di interfaccia detta "Tabular Lookup", questa permette di inserire i valori discreti delle curve di propagazione del materiale che il software interpola per calcolare i parametri empirici della equazione di Nasgro. Per ricavare tali valori si è realizzata una routine matlab che restituisce in output l'andamento dell'equazione di NASGRO [23] interpolandola sui dati di propagazione di un materiale a diversi rapporti di ciclo. Essa è una equazione empirica che tiene conto di diversi effetti agenti sulla velocità di propagazione in materiali metallici (rapporto di ciclo, interazione dei carichi simulando il fenomeno della "plasticity induced crack closure" [26]).

Equazione di Nasgro:

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

dove:

- p e q sono costanti caratteristiche del materiale
- C intercetta teorica con l'asse delle ordinate
- m è la pendenza
- $\Delta K_{th}$  è la soglia di propagazione
- f indica la funzione di chiusura di Newman, in particolare si occupa di tenere conto dell'effetto di closure.

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) & \text{per } R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & \text{per } -2 \leq R < 0 \\ A_0 - 2A_1 & \text{per } R < -2 \end{cases}$$

dove i coefficienti sono:

$$A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) \left[ \cos \left( \frac{\pi S_{max}}{2 \sigma_0} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

$$A_1 = (0.415 - 0.071\alpha) \frac{S_{max}}{\sigma_0}$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1$$

dove:

$\alpha$ : fattore introdotto da Newman per stati di sforzo tridimensionali;

$S_{max}$ : massimo sforzo applicato

$\sigma_0$ : valore intermedio tra il carico di snervamento e di rottura (flow-stress)

Il valore di soglia di propagazione viene calcolato tramite la seguente equazione:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_0 \frac{\sqrt{\left(\frac{a}{a+a_0}\right)}}{\left(\frac{1-f}{(1-A_0)(1-R)}\right)^{(1+C_{th}R)}}$$

dove:

$\Delta K_0$ : soglia di  $\Delta K$  per  $R=0$

$a$ : dimensione della cricca

$f$ : funzione di Newman

$a_0$ : parametro di El-Haddad e vale 0.0381 mm

$C_{th}$ : coefficiente di soglia per può assumere due valori diversi a seconda che si abbia un rapporto di ciclo positivo o negativo.

Sulla base delle equazioni sopra descritte, si è scritta una routine matlab capace di interpolare i dati sperimentali e derivare i parametri empirici. L'interpolazione dei valori delle soglie è stata quindi eseguita partendo sia dai dati CPLR, sia  $\Delta K$ -decreasing (Tab. 3.1).

Tabella 3.1 Valori dei parametri empirici per l'equazione delle soglie

	<b>CPLR</b>	<b><math>\Delta K</math>-decreasing</b>
$C_{th+}$	1.36072	1.75101
$C_{th-}$	-0.03640	-0.02607
$\Delta K_0$ [ $Mpa\sqrt{m}$ ]	5.826	7.394

In figura 3.15 si riporta l'andamento delle soglie per i dati CPLR e  $\Delta K$ -decreasing.

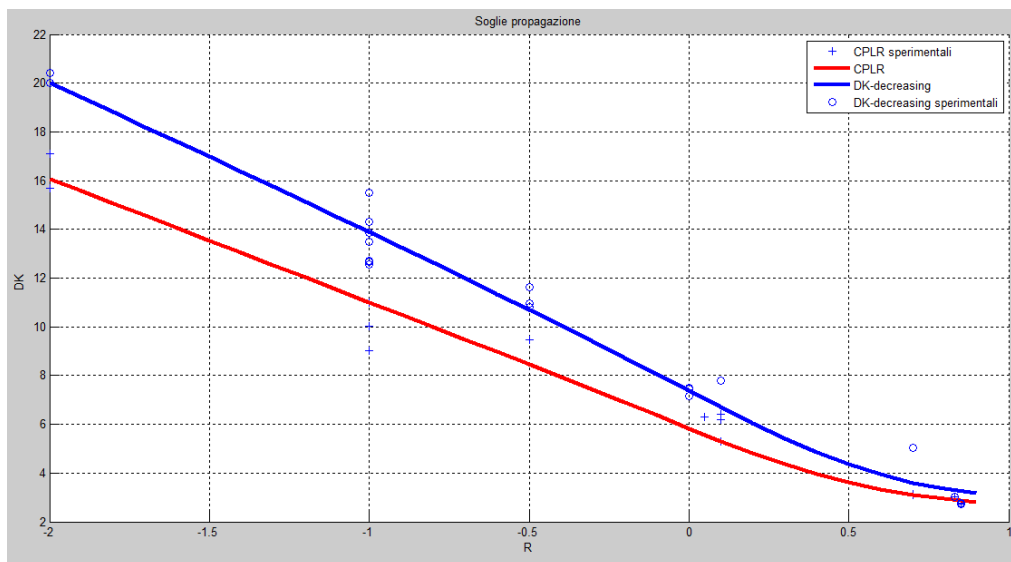


Figura 3.15 Andamento delle soglie di propagazione con il rapporto di ciclo

Il grafico 3.10 permette di osservare che la differenza tra le soglie generate con i metodi tradizionali e con i metodi di pre-cricatura in compressione aumenta considerevolmente con l'abbassarsi del rapporto di ciclo, mentre è praticamente nulla per R alti. Ciò si può spiegare ricordando che il fenomeno della closure assume sempre maggiore importanza abbassando R e quindi anche gli effetti di interazione dei carichi vengono sentiti in maniera più marcata.

Dopo aver calcolato i valori e l'andamento delle soglie si sono interpolati i dati sperimentali con l'equazione di Nasgro per ricavare i parametri empirici; avendo calcolato tutti i parametri della legge di propagazione, si veda tabella 3.2, si è calcolato il suo andamento, si veda figura 3.16 per i dati CPLR.

Tabella 3.2 Parametri empirici equazione di Nasgro

	<b>CPLR</b>	<b><math>\Delta K</math>-decreasing</b>
<b>C</b>	$2.20306 \times 10^{11}$	$1.09028 \times 10^{10}$
<b>N</b>	3.1759	2.53867
<b>P</b>	1.05	1.5

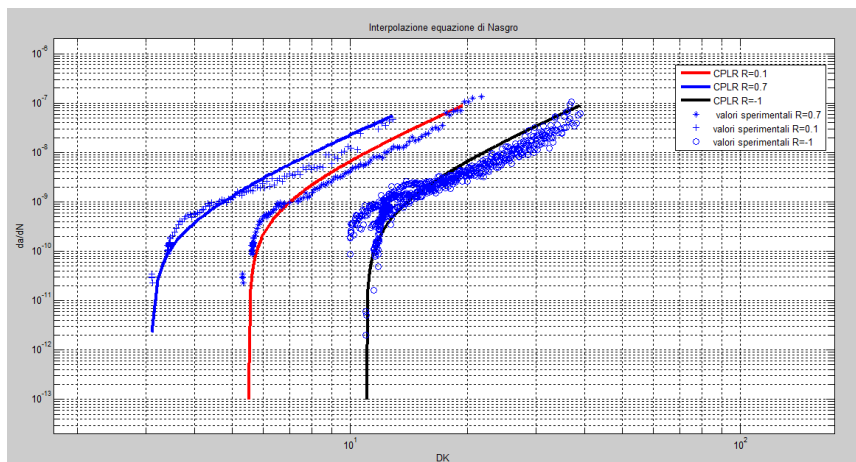


Figura 3.16 Interpolazione dell'equazione di Nasgro mediante dati CPLR

Allo stesso modo si procede con i dati sperimentali ottenuti con i valori  $\Delta k$ -decreasing, figura 3.17.

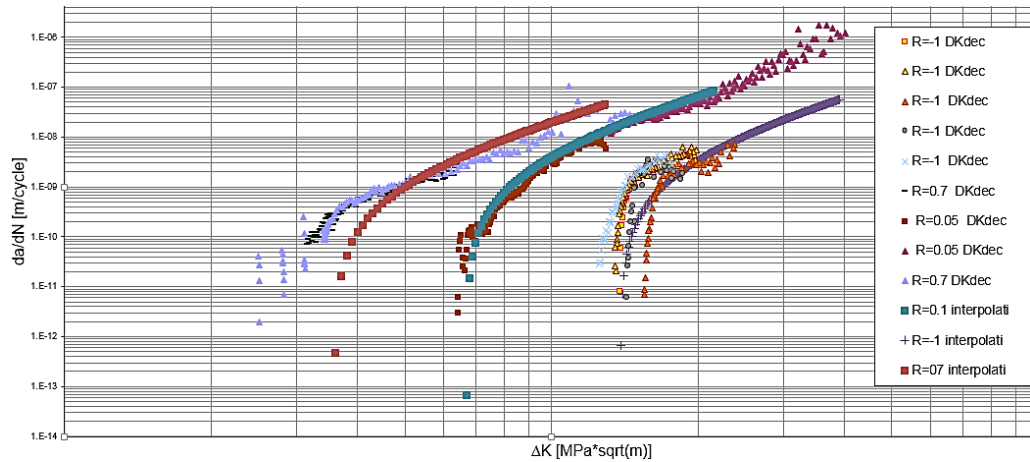


Figura 3.17 Interpolazione dell'equazione di Nasgro mediante dati  $\Delta K$ -decreasing

Avendo l'andamento delle curve di propagazione interpolate con l'equazione di Nasgro e avendo gli andamenti degli sforzi lungo le sezioni dove si vogliono effettuare le simulazioni di vita, è possibile calcolare dopo quanti cicli la cricca propaga, si procede immettendo i dati necessari nel software AFGROW.

Il primo passo per eseguire le simulazioni è riempire la scheda "Tabular lookup", si veda figura 3.18, inserendo i dati relativi alle curve di propagazione e le caratteristiche meccaniche del materiale [23], si veda la tabella 3.1; da tutti questi dati il software è in grado di estrapolare le costanti dell'equazione di Nasgro, si veda tabella 3.1 e 3.2.

Tabella 3.3 Caratteristiche meccaniche acciaio A1N [23]

<b>A1N</b>	
Ultimate Strength [MPa]	600
Young's Modulus [GPa]	206
Poisson's Ratio	0.33
Plane Stress Fracture Toughness (Kc) [MPa]	90
Plane Strain Fracture Toughness (Kic)[MPa]	52
Yield Strength [MPa]	370

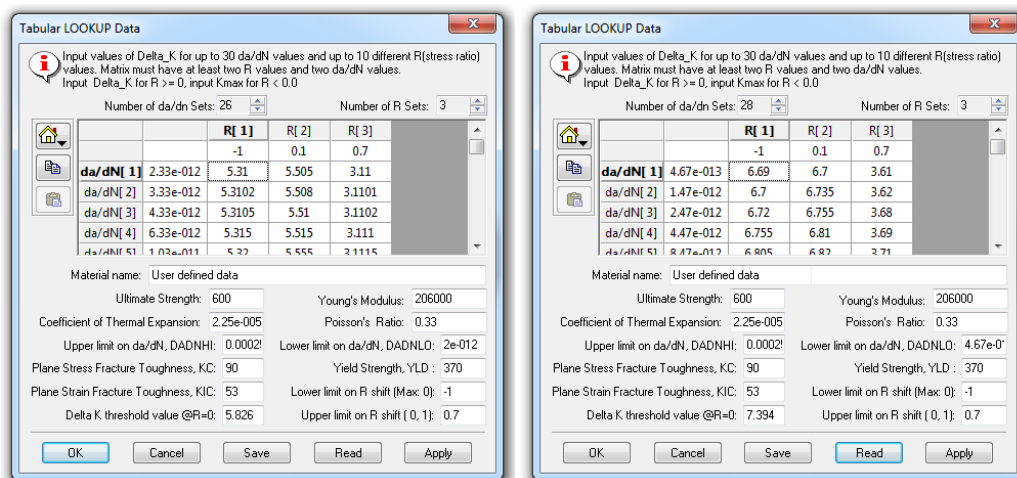


Figura 3.18 Definizione e caratteristiche meccaniche del materiale (a) CPLR (b)  $\Delta K$ -decreasing

Il modello geometrico che si è scelto per effettuare le simulazioni è “Part Through Crack in Pipe”, si veda figura 3.19, la scelta è ricaduta su questo modello perché consente di inserire le dimensioni della cricca secondo due valori geometrici, consentendo di ottenere una cricca circolare, si è inoltre inserito un diametro interno nullo per realizzare un albero pieno.

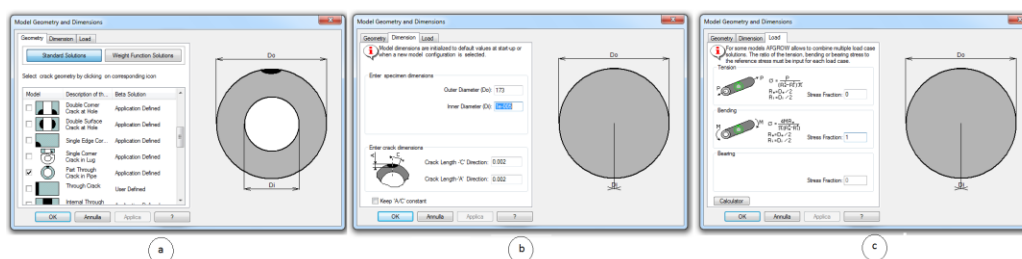


Figura 3.19 Finestra di definizione del modello geometrico: (a) modello (b) dimensioni geometriche e dimensioni iniziali cricca (c) carico flessionale

Le dimensioni geometriche dell'assile del modello AFGROW sono le stesse di quelle utilizzate per le analisi FEM e le medesime del disegno costruttivo dell'assile, si veda figura 3.1.

Si è scelto di studiare il comportamento di cricche semicircolari. La dimensione iniziale della cricca sarà differente:

- assile non rivestito:  $a_i=2\text{mm}$ , dalle prove sperimentali, nel Capitolo 2, si sono ottenute profondità di impronta pari a 1mm ma si è deciso di utilizzare un coefficiente di sicurezza pari a due,

- assile rivestito con LURSAK:  $a_i=1\text{mm}$ , dalle prove sperimentali, nel Capitolo 2, si sono ottenute profondità di impronta pari a 0.6 mm ma si è deciso di utilizzare anche in questo caso un coefficiente di sicurezza circa pari a due.

Un altro dato di cui ha bisogno il software è lo spettro di carico; questo è stato sviluppato da precedenti ricerche ed è stato determinato per mezzo di simulazioni numeriche della dinamica tenendo in considerazione la geometria delle linee guida più dannose per l'assile. Lo spettro è rappresentativo di 22659km di servizio ed è stato inoltre ricavato considerando le condizioni di utilizzo sia a pieno carico sia scarico, tutti questi dati sono stati messi insieme e si è ottenuto il risultato finale per le rispettive sezioni. In figura 3.20 è rappresentato lo spettro della sezione 1; in figura fig. 3.21 lo spettro della sezione 2 ed in figura 3.22 lo spettro della sezione3.

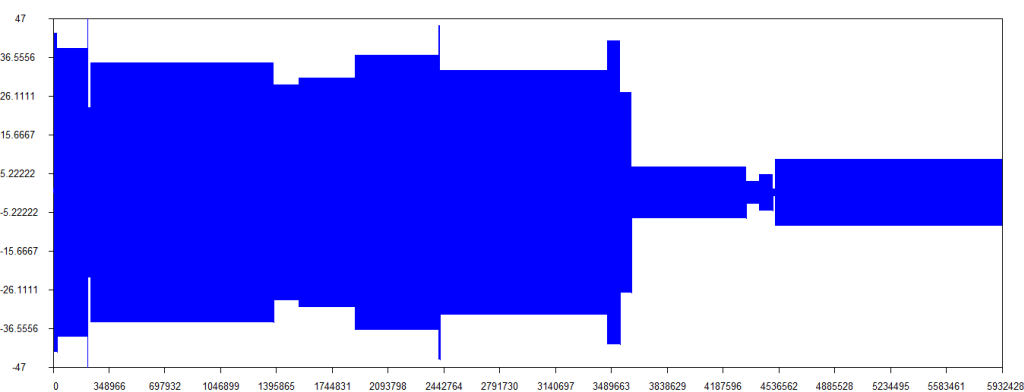


Figura 3.20 Spettro caratteristico della sezione 1

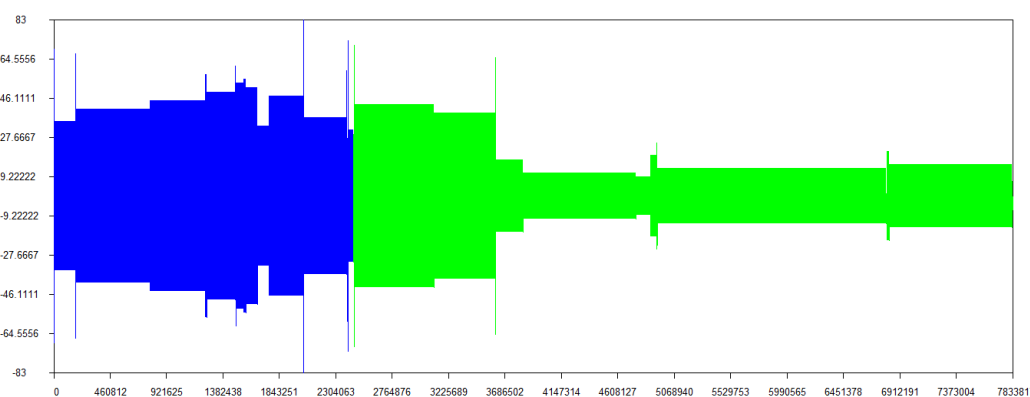


Figura 3.21 Spettro caratteristico per la sezione 2

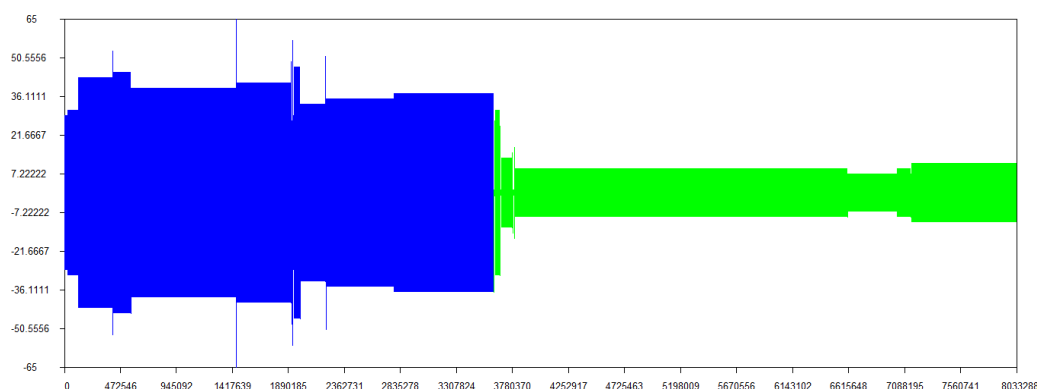


Figura 3.22 Spettro caratteristico sezione 3

Come detto, le simulazioni di previsione di vita sono state effettuate su tre sezioni distinte dell'assile ed in particolare lungo la transizione T, sezione 2, poco distante da questa la sezione 3 ed infine lungo l'asse di simmetria la sezione 1, si veda figura 3.9.

La sezione 2 richiede di sovrapporre agli sforzi nominali di esercizio anche l'effetto di concentrazione dovuto alla transizione T e quello del forzamento. Le sezioni 1 e 3, invece, vengono sollecitate solo con gli sforzi nominali di esercizio.

Il profilo di sforzo dovuto al forzamento è introdotto in AFGROW utilizzando la finestra "residual stress", figura 3.23.

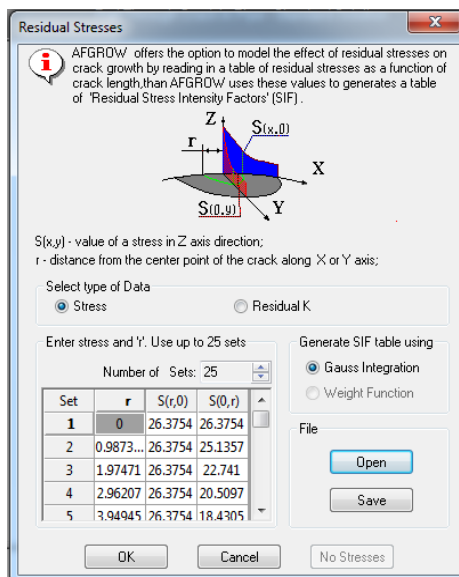


Figura 3.23 Finestra per la definizione del sforzo dovuto al calettamento delle ruote

In figura 3.24(a) si vede l'andamento della previsione di vita per l'assile non rivestito nella sezione 2 ottenuti con i dati CPLR e nella figura 3.24(b) la previsione di vita per l'assile rivestito nella sezione 2 ottenuti con i dati CPLR.

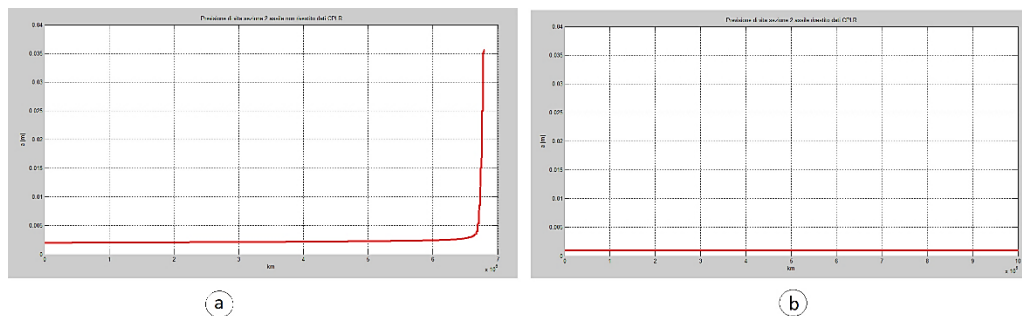


Figura 3.24 Previsione di vita per assile non rivestito nella sezione 2 dati CPLR (a), Previsione di vita per assile rivestito nella sezione 2 dati CPLR (b)

In figura 3.25(a) si vede l'andamento della previsione di vita per l'assile rivestito nella sezione 2 ottenuti con i dati  $\Delta K$ -decreasing e nella figura 3.25(b) la previsione di vita per la sezione 2 ottenuti con i dati  $\Delta K$ -decreasing.

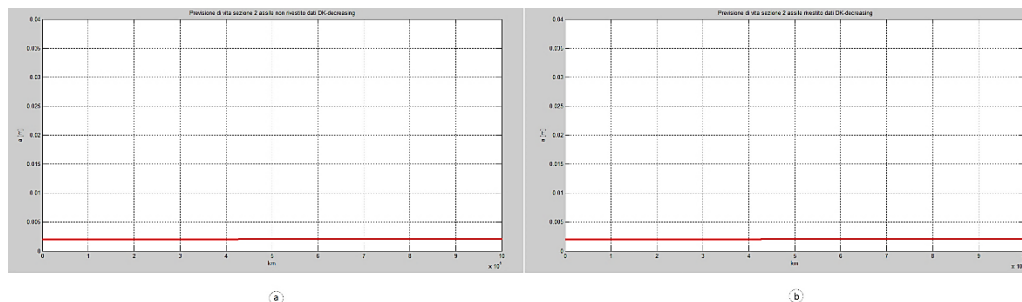


Figura 3.25 Previsione di vita per assile non rivestito nella sezione 2 dati  $\Delta K$ -decreasing (a), Previsione di vita per assile rivestito nella sezione 2 dati  $\Delta K$ -decreasing (b)

In figura 3.26 si riporta l'andamento della previsione di vita per l'assile non rivestito nella sezione 1 con dati CPLR; gli altri andamenti per le sezioni 1 e sezione 3 si evita di riportarli in quanto non si ha propagazione sia nel caso di assile non rivestito che nel caso di assile rivestito.



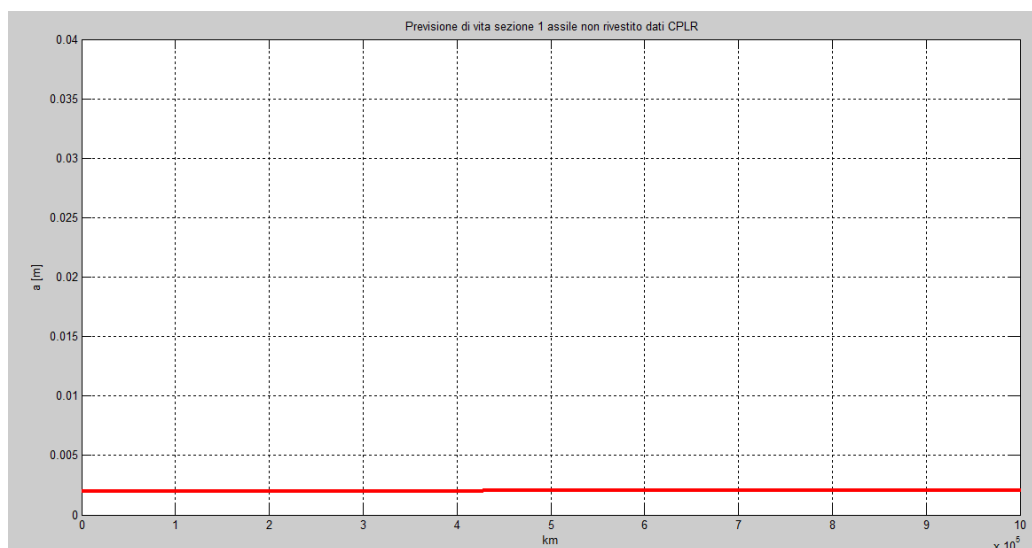


Figura 3.26 Previsione di vita per assile non rivestito nella sezione 2 dati CPLR

In tabella 3.4 si sono riassunti i risultati delle simulazioni di previsioni di vita realizzate con il software AFGROW per i dati CPLR.

Dai risultati ottenuti, si osserva che non si ha propagazione, entro  $10^7$  km, nelle sezioni 1 e 3 per entrambi gli assili, rivestito e non rivestito. Nella sezione 2, si ha invece propagazione con cedimento per l'assile nudo a circa  $6.8 \times 10^6$  km con i dati sperimentali CPLR, la stessa sezione con i dati sperimentali  $\Delta K$ -decreasing a  $10^7$  km presenta una dimensione della cricca pari ad  $a=2.54$  mm.

In tabella 3.5 sono riassunti i risultati delle simulazioni di previsioni di vita per l'assile che utilizza dati  $\Delta K$ -decreasing.

Tabella 3.4 Riassuntivo propagazione cricca nelle tre sezioni con dati CPLR

	CPLR			
	NON RIVESTITO		RIVESTITO	
	$a_i=2$ [mm]		$a_i=1$ [mm]	
	km	$a_f$ [mm]	km	$a_f$ [mm]
SEZ. 1	$10^7$	no propagazione	$10^7$	no propagazione
SEZ. 2	$6.797 \times 10^6$	30	$10^7$	no propagazione
SEZ. 3	$10^7$	no propagazione	$10^7$	no propagazione

Tabella 3.5 Riassuntivo propagazione cricca nelle tre sezioni con dati  $\Delta K$ -decreasing

	DK-decreasing			
	NON RIVESTITO		RIVESTITO	
	$a_i=2$ [mm]		$a_i=1$ [mm]	
	km	$a_f$ [mm]	km	$a_f$ [mm]
SEZ. 1	$10^7$	no propagazione	$10^7$	no propagazione
SEZ. 2	$10^7$	2.54	$10^7$	no propagazione
SEZ. 3	$10^7$	no propagazione	$10^7$	no propagazione

Si nota che nel caso di assile rivestito non si ha propagazione di cricca in nessuna sezione, ciò consente di dire che la vernice è performante e permette di diminuire le ispezioni programmate.

### 3.3 Probabilità di cedimento e intervalli di ispezione

Calcolata la vita a propagazione nelle tre sezioni è stato possibile valutare la probabilità di cedimento e gli intervalli di ispezione dell'assile. Si sono utilizzate le previsioni di vita descritte in 3.2 insieme alle curve "Probability of Detection" (POD) proposte da Benyon e Watson per l'applicazione di UT e MT su assili pieni, si veda figura 3.27a.

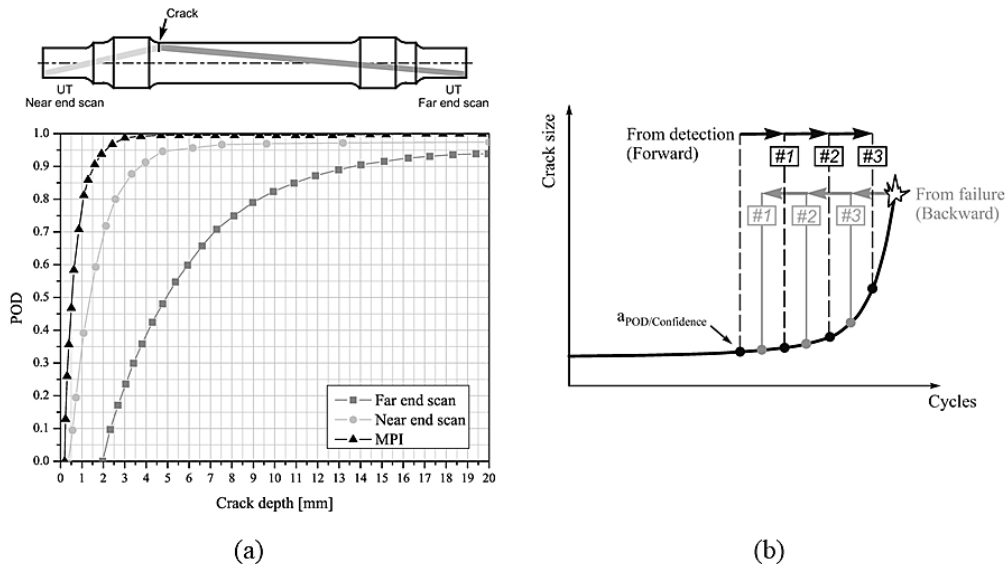


Figura 3.27 a) curve POD per UT e MT proposte da Benyon e Watson, b) controlli durante la vita dell'assile

Nel caso di assili non rivestiti le linee guida VPI impongono il controllo ogni 12 anni o ogni 600000km il servizio di manutenzione è svolto effettuando un controllo sia UT sia MT, da ciò si ricava che la  $POD_{UT+MT}$  per la singola ispezione può essere ricavata come:

$$POD_{UT+MT} = 1 - (1 - POD_{UT})(1 - POD_{MT})$$

Nel caso di assili rivestiti con vernice LURSAK si può effettuare solo il controllo UT. La  $POD_{UT}$  per la singola ispezione può essere ricavata come:

$$POD_{UT} = 1 - (1 - POD_{UT})$$

Partendo dai valori totali delle POD delle singole ispezione, si può calcolare il valore cumulata della POD per l'intera vita dell'assile ( $PC_{det}$ ) definita come:

$$PC_{DET} = 1 - \left[ \prod_i POND(a)_i \right] = 1 - \left\{ 1 - \prod_i POD(a)_i \right\}$$

dove:

- $POND$  "Probability of Non Detection" rappresenta la probabilità di non rilevare il difetto
- $i$  identifica la  $i$ -esima ispezione

La  $PC_{det}$  può essere calcolata sia in avanti sia indietro, nel caso in esame si è preferito effettuare i calcoli indietro in quanto è la soluzione più conservativa, rispetto a quella in avanti, perché posso individuare cricche più piccole, si veda figura 3.27 (b).

Il valore della  $PC_{det}$  può essere utilizzato per definire la probabilità totale di guasto  $P_f$  per l'asse considerato considerando un intervallo di ispezione ogni 600000km, si ha:

- per gli assili non rivestiti la probabilità di rottura può essere determinata come:

$$\begin{aligned} P_{f,UT+MT} &= 1 - PC_{DET,UT+MT} = \prod_i POND_{UT+MT}(a)_i \\ &= \prod_i [1 - POD_{UT+MT}(a)_i] \end{aligned}$$

- per gli assili rivestiti la probabilità di rottura può essere determinata come:

$$P_{f,UT} = 1 - PC_{DET,UT} = \prod_i POND_{UT}(a)_i = \prod_i [1 - POD_{UT}(a)_i]$$

Questo metodo ha senso finchè si ha propagazione del materiale infatti nei casi in cui non vi è propagazione non ha senso calcolare  $PC_{DET}$  e la probabilità di cedimento è automaticamente nulla.

La probabilità totale di cedimento  $P_f$  per l'asse considerato è stata calcolata solo per l'assile non rivestito nella sezione 2 e si ha:

$$\begin{aligned}P_{f,FES+MT} &= 8.0988^{-16} \\P_{f,NES+MT} &= 8.02814^{-22} \\P_{f,FES} &= 0.58106 \\P_{f,NES} &= 5.75989^{-7}\end{aligned}$$

## 4 Conclusioni

Le tematiche trattate in questa tesi hanno portato a valutare il miglioramento offerto dall'utilizzo del rivestimento LURSAK nei confronti della corrosione e degli impatti e alla corrosione che influiscono sull'integrità dell'assile ferroviario.

Il beneficio della vernice è stato valutato effettuando delle prove sperimentali su spezzoni di assile rivestito e non rivestito.

Le prove realizzate seguendo la procedura indicata nella normativa UNI EN 13261 hanno evidenziato che gli assili rivestiti con vernice LURSAK non hanno riportato alcun danno, ma in alcune prove si è avuto un cedimento limitato al solo rivestimento lasciando intatta la superficie del componente meccanico. I cedimenti del rivestimento che si sono avuti nelle prove a norma si sono verificati in una condizione di prova estremamente impegnativa per la LURSAK, in particolare si è operato a  $T=-25^{\circ}\text{C}$  ed impiegando una energia di impatto circa tre volte superiore a quella indicata nella normativa vigente. Sarebbe stato interessante proseguire con test a bassa temperatura aumentando progressivamente l'energia all'impatto per verificare l'intensità che avrebbe causato un danno anche sulla superficie dell'assile per individuare la soglia limite della vernice in queste condizioni.

Le prove che hanno visto come proiettili i sassi della massicciata e l'impiego della macchina di prova ad aria compressa detta "spara-poli" hanno evidenziato che l'energia necessaria a creare un'impronta con la stessa profondità di quella realizzata dal proiettile normato è molto superiore, circa due ordini di grandezza in più rispetto a quella in cui si è utilizzato il proiettile indicato dalla normativa UNI EN 13261.

I test con il ballast sono stati eseguiti a diversi valori di energia, al fine di valutare l'effetto della vernice anche su treni per il trasporto persone che viaggiano a velocità superiore rispetto a quelli per il trasporto merci; dalle prove effettuate si conclude che la vernice LURSAK sicuramente ha un apporto benefico per l'assile.

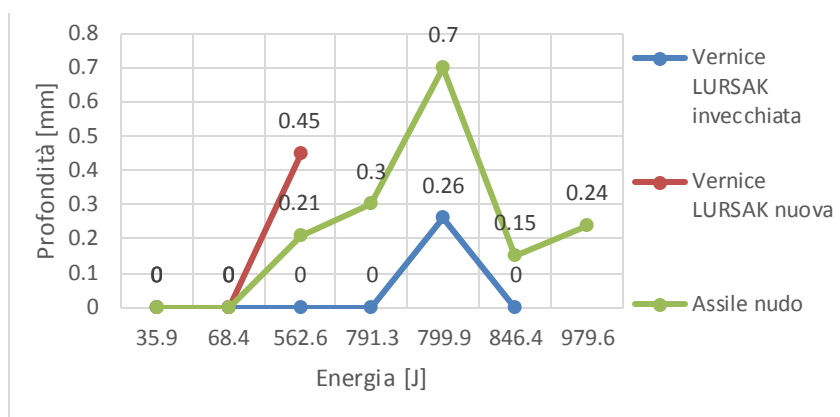


Figura 4.1 Andamento profondità impronte c

Dalla figura 4.1 riassuntiva si vede come gli assili verniciati hanno riportato una profondità di impronte sempre inferiori a quelle degli assili “nudi”, tranne in un caso in cui la dinamica dell’impatto ha causato un danno rilevante allo spezzone di assile.

Le prove con proiettile normato e quelle con la massiccata hanno fornito i parametri per effettuare una stima sulla vita a propagazione dell’assile da cui si è rilevato che si ha propagazione di cricche solo lungo la sezione 2 dell’assile non rivestito, tale sezione è indicata nella norma UNI EN 13261 con “T”. Gli inneschi di cricche in questa sezione del componente portano al collasso del componente e dalle simulazioni con il software AFGROW si è potuto quantificare dopo quanti chilometri avviene la propagazione in tale sezione:  $6.797 \times 10^6$  km. Gli assili rivestiti con vernice LURSAK consentono di ottenere una vita a propagazione infinita, infatti anche a  $10^7$  km non si hanno cedimenti in nessuna delle sezioni analizzate. Infine sono state calcolate le probabilità di rottura, determinate solo per la sezione 2 dell’assile non rivestito in quanto nelle altre sezioni data l’assenza di propagazione la probabilità a rottura che risulta essere nulla.

La probabilità totale di cedimento  $P_f$  per l’asse non rivestito lungo la sezione 2 si sono ottenuti i seguenti valori:

$$\begin{aligned}
 P_{f,FES+MT} &= 8.0988^{-16} \\
 P_{f,NES+MT} &= 8.02814^{-22} \\
 P_{f,FES} &= 0.58106 \\
 P_{f,NES} &= 5.75989^{-7}
 \end{aligned}$$

Il grande limite del rivestimento è che dopo che si è disposto sulla superficie della struttura non è possibile la sua rimozione. Per questo motivo durante la manutenzione programmata non è possibile eseguire i controlli con le particelle

magnetiche ma solo con gli ultrasuoni. L'aumento della vita dell'assile è notevole e consente di recuperare l'investimento iniziale. Questa rientra nella politica seguita dall'azienda LUCCHINI RS ossia abbassare il costo dei suoi componenti non al momento dell'acquisto ma il costo nell'intera vita dei prodotti che realizza.

Per il futuro è auspicabile ripetere le esperienze dei test con massiciata anche a basse temperature per poter verificare se l'infragilimento pregiudica le performance del rivestimento. Si ritiene altrettanto interessante effettuare delle prove sperimentali alta temperatura  $T=50^{\circ}\text{C}$  per valutare la resistenza nelle due condizioni limite.

Nel futuro si pensa di effettuare ulteriori prove sperimentali con il lancio di ballast per avere un campione più consistente di dati in quanto nelle prove con lancio di ballast sugli spezzoni di assile sono influenzate da vari fattori quali: dimensione del sasso, geometria del sasso e punto di impatto tra pietra e assile.

---

## Bibliografia

- [1] Handbook of Railway Vehicle Dynamics Edited by Simon Iwnicki
- [2] SUSTRAIL: The sustainable freight railway, url: [www.sustrail.eu](http://www.sustrail.eu)
- [3] S.P. Timoshenko. History of strength of materials. New York: Dover Publications, 1983.
- [4] SMITH, R.A. et al.: In: Proc. 13th Int. Wheelset Congress. 2001, Roma, Italy.
- [5] ZERBST, U.9 et al.: Eng. Fract. Mech. 72, 2003, 209
- [6] A. Morin. Resistance des Matériaux. 1st. 1853
- [7] S.P. Timoshenko. History of strength of materials. New York: Dover Publications, 1983
- [8] Corrosione e protezione dei materiali metallici di Pietro Pedferri ed. Polipress
- [9] L. Lazzari, P. Pedferri, 'Protezione catodica' edito nel 2000 da McGraw-Hill
- [10] Dispense corso "Costruzioni di strade, ferrovie e aeroporti" Prof. Pasquale Colonna
- [11] UNI EN 13450
- [12] Specifica RFI RFI DTC INC SP IFS 010 B
- [13] Mattias Jönsson German Aerospace Center Institute of Aerodynamics and Flow Technology, Fluid Systems Göttingen
- [14] Tielkes, T., Kaltenbach, J., H., Gautier, E., P. (2005). DeuFraKo Project Proposal v.3 AOA Aerodynamics in open Air
- [15] UNI 13261 , Railway applications - wheelsets and bogies - Axles – Product requirements, BSI. 2011.
- [16] Beretta, Carboni, Cantini, Ghidini, Application of fatigue crack growth algorithms to railway axles and comparison of two steels grades journal of rail and rapid transit- 2004
- [17] D. Colombo, M. Giglio, C. Giani, U. Mariani, Progettazione damage tolerance di una fusoliera di elicottero, Atti del Congresso IGF19 Milano, 2-4 luglio 2007.
- [18] A. F. Grandt, Fundamentals of structural integrity: damage tolerant design and nondestructive testing, Wiley, 2003
- [19] LURSAK: the new high performance axles protection. D. Sala- S. Cantini, Presentation at ESIS TC24 workgroup, London march 3-4 2011
- [20] Analisi del danno da impatto ad alta velocità su strutture composite in allumina. Università degli Studi di Cassino, Facoltà di Ingegneria Tesi di Dottorato in Ingegneria Meccanica XX Ciclo
- [21] UNI ASTM D 6944 – 03



- [22] AFGROW version 4.0012.15, Users guide and technical manual. 2009.
- [23] S. Beretta S. Cantini. Structural reliability assessment of railway axles. 2011.
- [24] ABAQUS version 6.11.2, User Documentation, Dassault Systèmes, 2011.
- [25] ASTM E647-05, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3(1), ASTM International, West Conshohocken, PA, CD-ROM version.
- [26] W. Elber, in: Damage tolerance in aircraft structure, ASTM STP 486:230-242, (1971)
- [27] Esperienze nell'applicazione di tecniche "compression pre-cracking" per prove di propagazione frattura M. Carboni, L. Patriarca, D. Regazzi Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica,
- [28] Damage tolerance in aircraft structures 486 (1971).
- [29] S. Beretta, M. Carboni, S. Cantini and A. Ghidini, Application of fatigue crack growth algorithms to railway axles and comparison of two steel grades, Proc. Inst. Mech. Eng., F J. Rail Rapid Transit, Vol. 218, 2004, pp. 317–326.
- [30] S. Beretta, M. Carboni, Variable amplitude fatigue crack growth in a mild steel for railway axles: Experiments and predictive models, Engineering Fracture Mechanics 78 (2011) 848–862.
- [31] M. Carboni, L. Patriarca, and D. Regazzi, Determination of  $K_{th}$  by compression pre-cracking in a structural steel, Journal of ASTM International, 6(9):1-13, 2009.