

**POLITECNICO DI TORINO**

**CORSO DI LAUREA  
IN INGEGNERIA MECCANICA**

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

**Valutazione dell'usura delle vie di corsa di  
impianti di sollevamento ad alta velocità  
dell'industria cartaria**



**Relatore:** Ing.Nicolò Zampieri

Prof.Nicola Bosso

Prof.Aurelio Somà

**Candidato:** Enzo Beltrandi

**Matricola:** s222196

**APRILE 2020**



Indice

---

<b>CAPITOLO 1 INTRODUZIONE</b>	<b>5</b>
<b>1.1 MERCATO DELLA SICMA</b>	<b>6</b>
<b>CAPITOLO 2 I PROCESSI DI ESTRAZIONE DELLA POLPA DI LEGNO E DI PRODUZIONE DELLA CARTA</b>	<b>7</b>
<b>2.1 ANATOMIA DELLA MACCHINA CONTINUA</b>	<b>10</b>
<b>2.2 TIPOLOGIA DI PASTA DI LEGNO</b>	<b>12</b>
<b>CAPITOLO 3 CONSUMI DI ENERGIA NEI PROCESSI DI PRODUZIONE</b>	<b>14</b>
<b>CAPITOLO 4 IL MERCATO DELLA CARTA</b>	<b>15</b>
<b>4.1 INDUSTRIA DELLA POLPA/PASTA EUROPEA</b>	<b>15</b>
<b>4.2 INDUSTRIA DELLA CARTA EUROPEA</b>	<b>16</b>
<b>4.3 ECONOMIA E OCCUPAZIONI DELLE INDUSTRIE EUROPEE DI POLPA E CARTA</b>	<b>18</b>
<b>CAPITOLO 5 TRASLO BURGO VERZUOLO</b>	<b>21</b>
<b>5.1 LOGISTICA DEL MAGAZZINO</b>	<b>21</b>
<b>5.2 COMPONENTI DEL TRASLO &amp; LORO FUNZIONAMENTO</b>	<b>22</b>
<b>5.3 INSTALLAZIONE DELLA ROTAIA &amp; SUO FUNZIONAMENTO</b>	<b>32</b>
<b>5.4 DIMENSIONAMENTO DELLA ROTAIA</b>	<b>35</b>
<b>CAPITOLO 6 GENERALITA' SULLE ROTAIE E LORO ROTTURE</b>	<b>36</b>
<b>6.1 TIPI DI ACCIAI USATI PER LE RUOTE E LE ROTAIE</b>	<b>36</b>
<b>6.2 MODALITA' DI PROPAGAZIONE DI UNA CRICCA</b>	<b>38</b>
<b>6.3 COMPONENTE ROTAIA</b>	<b>39</b>
<b>6.4 TIPICHE ROTTURE DELLE ROTAIE</b>	<b>42</b>
<b>6.5 TECNICHE PER PREVENIRE LA PROPAGAZIONE DELLA CRICCA</b>	<b>49</b>

---

---

6.6	COME INSORGE E SI PROPAGA LA CRICCA	50
6.7	SHAKEDOWN	51
6.8	DIFFERENZA TRA SHAKEDOWN & RATCHETTING	53
CAPITOLO 7 PROBLEMA RISCONTRATO SULLA ROTAIA		54
CAPITOLO 8 ANALISI DEI RISULTATI		59
8.1	DATI MOTORE	59
8.2	CINEMATICA DEL TRASLO E VALUTAZIONE DELLA COPPIA NECESSARIA	61
8.3	CALCOLO DELLA FORZA DI TRAZIONE CON APPROCCIO SEMPLIFICATO	65
8.4	DIAGRAMMA DI CORPO LIBERO DEL TRASLO NELLE VARIE SITUAZIONI	66
8.5	CALCOLO DELLE AREE E DELLE PRESSIONI HERTZIANE DI CONTATTO	68
8.6	RISULTATI HERTZ	73
8.7	RISULTATI $M$	75
8.8	TASSO D'USURA	81
8.9	RISULTATI USURA	83
CAPITOLO 9 CONCLUSIONI & SOLUZIONI		84
CAPITOLO 10 BIBLIOGRAFIA		86
INDICE DELLE IMMAGINI		88
RINGRAZIAMENTI		93

---

## Capitolo 1 INTRODUZIONE

---

Per la stesura della tesi mi sono avvalso della collaborazione dei titolari della S.I.C.M.A. spa, azienda di Mondovì che si occupa della costruzione di macchine per cartiere.

Dovendo orientare lo studio, è stato concordato con i titolari di porre la nostra attenzione su problemi legati all'usura/rottura delle saldature poste in corrispondenza della giunzione delle rotaie.

Il seguente lavoro viene descritto seguendo quattro macro-argomenti che sono:

- Mercato della carta a livello globale e il suo ciclo di produzione;
- Descrizione dell'impianto, la sua funzione nella cartiera e le sue problematiche riscontrate in esso;
- Raccolta di informazioni ed elaborazione dei dati;
- Conclusioni e possibili soluzioni.

La parte legata all'elaborazione dei dati è stata suddivisa in vari step effettuati per la valutazione della rotaia in questione.

1° step: diagrammare l'andamento della velocità in funzione del tempo del mezzo, suddividendolo in 5 fasi operative;

2° step: ricavare la caratteristica meccanica del motore adottato per il traslo, così da valutare la forza di trazione della ruota motrice, in ogni fase e in ogni senso di avanzamento;

3° step: adottare un diagramma di corpo libero per il traslo e, imponendo l'equazione alla rotazione attorno ad un punto d'appoggio, così da valutare le reazioni verticali nei punti di contatto di ogni ruota, per ogni fase operativa e per ogni verso. Il veicolo è stato scomposto in tre parti che sono:

- la ruota motrice;
- la ruota condotta;
- il corpo del traslo senza le ruote.

4° step: attraverso la teoria di Hertz, sono state stimate le aree e le pressioni hertziane (sia nel caso di contatto ellittico e sia di quello cilindrico);

5° step: adottare la mappa di Johnson per stabilire, per ogni fase operativa del traslo, l'eventuale presenza del fenomeno noto come Ratcheting;

6° step: avendo come dati d'ingresso, i valori ottenuti nei precedenti passaggi, è stata valutata l'intensità dell'usura e quantificato il tasso d'usura ad ogni singola passata;

## 1.1 MERCATO DELLA SICMA

---

Nata nel 1962, è una delle aziende leader nella costruzione di macchinari per l'industria cartaria.

L'azienda è una delle principali sul mercato anche relativamente all'assistenza post-vendita fornita alla clientela. I mercati principali della SICMA sono:

- In Europa come Spagna, Belgio, Italia, Siberia e Regno Unito
- Negli altri continenti come America del Nord ,Corea del sud

In Italia i maggiori clienti sono: Sofidel, Burgo, Cellografica di Gerosa, etc....

Di seguito elenco alcuni dei macchinari realizzati.

-Alimentatore della polpa (Pulper feeding): sistema che alimenta la linea di produzione della carta usando la polpa di cellulosa o la carta da macero;

-Sistemi automatici di taglio e rimozione fili dalle singole unità e dalle balle di cellulosa;

-Linee di alimentazione pulper con carta da macero;

-Magazzino automatico: sistema progettato per la movimentazione e lo stoccaggio di prodotti di grosse dimensioni (come cilindri per la stampa, materie prime, semi-lavorati e prodotti finiti);

-Avvolgitore per i rotoli: sistema che permette l'avvolgimento sul posto del rotolo tramite un braccio rotante che lo avvolge usando un film estendibile;

-Sistema di movimentazione e di imballaggio per i Pallet: progettato per muovere pallet che trasportano rotoli di piccole dimensioni;

-Sistema di movimentazione e immagazzinamento dei rotoli JUMBO: rotoli di grosse dimensioni e pesanti che vengono spostate tramite veicoli automatici;

-Sistemi di imballaggio per rotoli di carta TISSUE e di cartone usando film estendibile;

-Sistemi di movimentazione per rotoli di carta TISSUE

## Capitolo 2 I PROCESSI DI ESTRAZIONE DELLA POLPA DI LEGNO E DI PRODUZIONE DELLA CARTA

---

In natura sono presenti molte risorse che Madre Natura ha dato quali i metalli, l'acqua e la terra. Tra tutti questi però ce n'è uno che è di fondamentale importanza: il legno.

Esso, sin dall'antichità, è stato utilizzato come infrastruttura delle case e come mezzo di riscaldamento. Dal legno si ricava la Carta, prodotto essenziale per la vita quotidiana dell'uomo.

Basti immaginare:

- i fogli sulla quale annotiamo i nostri appunti;
- il cartone utilizzato per la spedizione di oggetti;
- la carta usata a scopo sanitario e per l'igiene personale;
- il confezionamento usato per i cibi e per le bevande;
- le banconote che si usano per comprare beni materiali;
- le pagine dei libri di lettura e dei giornali.
- Etc.

Il legno presenta la seguente composizione:

-Cellulosa(45%);

-Emicellulosa(30%);

-Lignina(23%);

-altre sostanze(2%).

Gli elementi da cui è principalmente composta la fibra di legno sono cellulosa ed emicellulosa, presenti nella corteccia. Detti elementi sono uniti alla lignina che svolge il ruolo di collante naturale.

La carta, per essere creata, ha bisogno della cellulosa, che si trova nella corteccia del legno ma in natura è unita alla lignina che svolge il ruolo di collante naturale. I processi che verranno descritti in seguito hanno lo scopo di rimuovere questa sostanza. La qualità della carta dipende dalla percentuale di lignina rimasta tra le fibre di cellulosa (perché proprio quest'ultima tende a "ingiallirla" sotto la luce del sole).

In sostanza la carta è un foglio di fibra di cellulosa con un numero di costituenti aggiunti al fine di migliorare la qualità del foglio e la sua snellezza.

I principali processi per la fabbricazione della carta sono i seguenti:

-CHIPPING: nel processo della fabbricazione della carta, i tronchi d'albero sono prima scortecciati e poi tagliati in modo da avere il truciolo o la segatura del legno, piccoli pezzi detti anche "chip" (da qui la fase chipping). In questa fase vengono usati flussi di calore e di acqua in modo da togliere, tramite azioni meccaniche o chimiche, la lignina dalle fibre di cellulosa, ottenendo così la polpa. La pasta o polpa così

---

ottenuta viene raffinata e poi sbiancata. Come ultima fase viene poi inviata in un macchinario per essere distesa, asciugata, pressata e poi arrotolata per realizzare la "bobina".



Figura 1) Tipica macchina continua presente nelle cartiere.[32]

La tela di carta viene pressata nel mezzo di rulli che provocano la fuoriuscita dell'acqua per realizzare una superficie più liscia. In seguito dei cilindri riscaldati asciugano la carta che verrà poi tagliata in piccoli rotoli e, in altre circostanze, in fogli.

La carta avvolta nella bobina è pronta per essere utilizzata e destinata agli usi specifici. Dopo la sua utilizzazione la carta può essere completamente riutilizzata e destinata ad un altro processo.

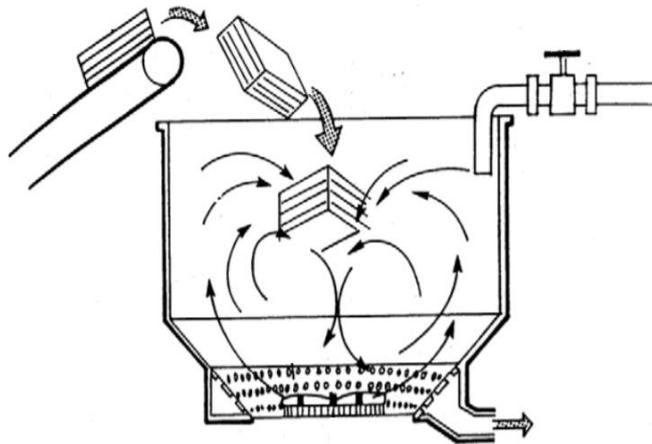


Figura 2) A sinistra, le "Chip" ottenute tramite lo scortecciamento degli alberi[34] e a destra uno schema illustrativo di come funziona uno "Spappolatore".[37]

- SPAPPOLAMENTO: fase iniziale in cui la balla di cellulosa viene inviata allo "spappolatore" (in inglese "pulper") per trasformarla nell'impasto ligneo. Il Pulper è un macchinario avente un recipiente di forma cilindrica (nella parte superiore) e una forma tronco-conica (nella parte inferiore). Nella parte inferiore è presente una girante dentata che serve per lo sminuzzamento e una palettatura che permette di convogliare il flusso d'acqua, mescolato con la cellulosa, inviato verso il centro compiendo un moto vorticoso. In questo modo si riesce a portare sul fondo del recipiente il materiale trattato.

- **RAFFINAZIONE:** fase in cui il materiale viene ulteriormente lavorato, all'interno del "raffinatore", allo scopo di ottenere un impasto uniforme e fine. Il materiale, proveniente dal Pulper, viene fatto passare tra due corpi taglienti disposti uno di fronte all'altro e poco distanti tra loro. Le fibre, durante questa operazione, oltre ad essere accorciate, subiscono una compressione e uno sforzo di taglio. Così facendo risultano più resistenti e flessibili perché si vengono a creare dei maggiori punti di contatto tra di esse. I raffinatori, in base alla forma che assumono, possono essere conici o a dischi. Questa fase è importante perché conferisce una buona qualità al prodotto.

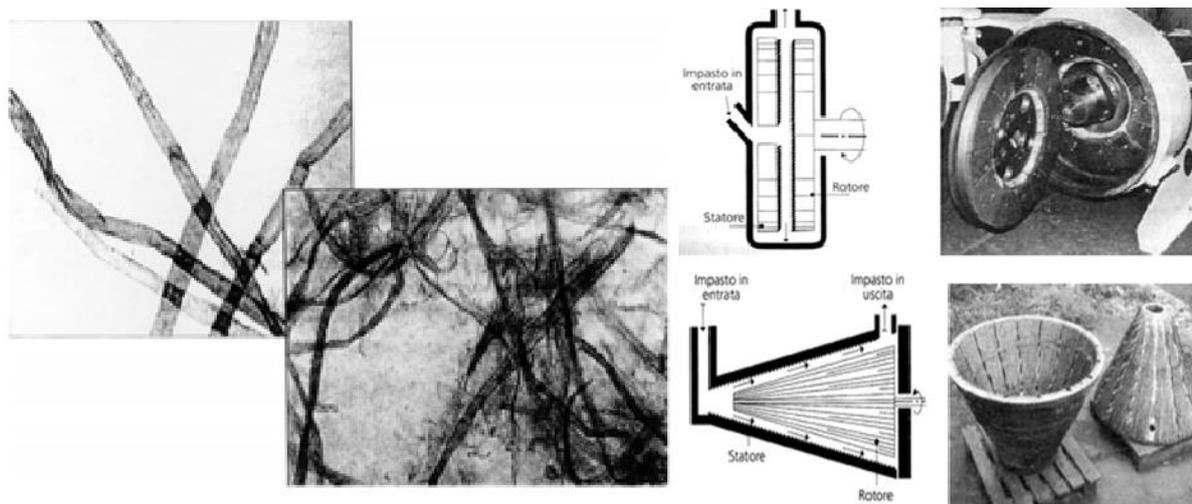


Figura 3) A sinistra, la fibra di cellulosa prima della raffinazione e dopo la raffinazione. A destra, invece, due raffinatori utilizzati per la raffinazione.[16]

- **SBIANCATURA:** il materiale viene lasciato all'interno del "tino di miscelazione" ad una temperatura di circa 60 °C in modo da sbiancare con acqua ossigenata. Sempre in questa fase, si aggiungono altre sostanze di origine minerale che possono conferire qualità come colore, lucentezza e stampabilità all'impasto. Esempio di queste sostanze sono il Carbonato di Calcio, il Caolino e il Talco. Il Carbonato è fondamentale per avere la carta "patinata": grazie ad esso la carta presenta uno strato che risulta più liscio, più opaco e i colori rendono di più.

- **EPURAZIONE:** si eliminano le impurità presenti nell'impasto (quali schegge e sabbie) adottando metodi fisici che sfruttano la differenza di peso tra l'impasto e le impurità.

- **MACCHINA CONTINUA:** è probabilmente il cuore della cartiera. Come dice il nome stesso, è una macchina che lavora un nastro continuo fatto di impasto fibroso per trasformarlo in carta.

La polpa di cellulosa viene prodotta chimicamente o meccanicamente e, il modo in cui si rimuove la lignina dalla polpa, si possono avere differenti processi di spapolamento.

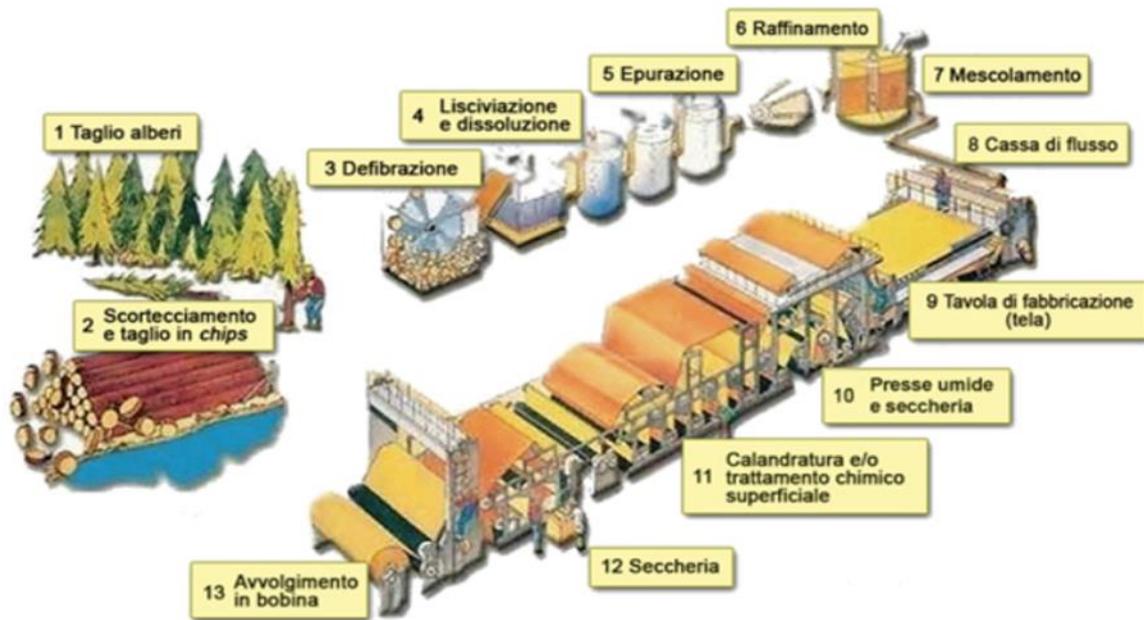


Figura 4) Schema generale del ciclo di produzione della carta.[30]

## 2.1 ANATOMIA DELLA MACCHINA CONTINUA

Date le sue dimensioni il macchinario viene suddiviso in due zone:

- zona di Feltrazione: la “Feltrazione” è un processo che consiste nell’unire le fibre di cellulosa presenti nell’impasto in contemporanea la fase di estrazione dell’acqua. Durante l’estrazione del liquido, contenuto nell’impasto, si saldano le fibre di cellulosa (presenti in sé).
- zona di Seccheria: in questa zona avvengono gli ultimi preparativi prima di realizzare la bobina di carta. Il foglio viene fatto passare tra dei rulli che lo asciugano per ridurre il contenuto dell’acqua, lo lisciano per dargli un aspetto migliore e, infine, lo arrotolano per realizzare la bobina che verrà mandata nella zona di scarico.

La macchina continua è composta da:

- Cassa d’afflusso: distribuisce in modo uniforme e regolare la portata dell’impasto che verrà poi inviata alla tela formatrice;
- Tela formatrice: in questa zona del macchinario nasce la carta, ancora intrisa d’acqua. Il nastro è mosso da due o più cilindri che lo trascinano in modo tale da ridurre l’acqua presente nell’impasto, consentendo così il compattarsi delle fibre di cellulosa;
- Essicatori: la carta proveniente dalla tela, non ancora priva d’acqua, viene ulteriormente compressa tra una serie di rulli, che prendono il nome di “pressa”. Non essendo sufficiente la sola compressione, l’acqua residua

presente nella carta viene del tutto eliminata grazie ad un ulteriore riscaldamento effettuato tramite cilindri riscaldabili che fanno evaporare l'acqua ancora presente.

- Patinatura: questa fase consente di rivestire la superficie del foglio con una patina. Questa rende il prodotto più gradevole al tatto e alla vista. Il mix di pigmenti e di leganti che vanno a riempire le microasperità del foglio ne livellano la superficie consentendo una stampa più nitida.

- Calandratura: operazione che rende la superficie della carta asciutta e liscia ma, soprattutto, riduce ulteriormente il prodotto allo spessore voluto. La calandratura consiste nel far passare il foglio in una fila alternata di cilindri di diversa durezza, in modo da conferire alla carta il grado di setosità e lucentezza desiderato. La prima calandratura potrebbe essere chiamata "lisciatura" proprio perché serve a lisciare il foglio per la prima volta. Il fatto che la carta diventi liscia è dovuto alla pressione esercitata dai rulli, mentre la lucentezza la si ottiene grazie all'attrito. Quando si comprime la carta se ne riduce lo spessore ma anche la sua tonalità di bianco e la sua opacità (aspetto non gradito dal produttore).

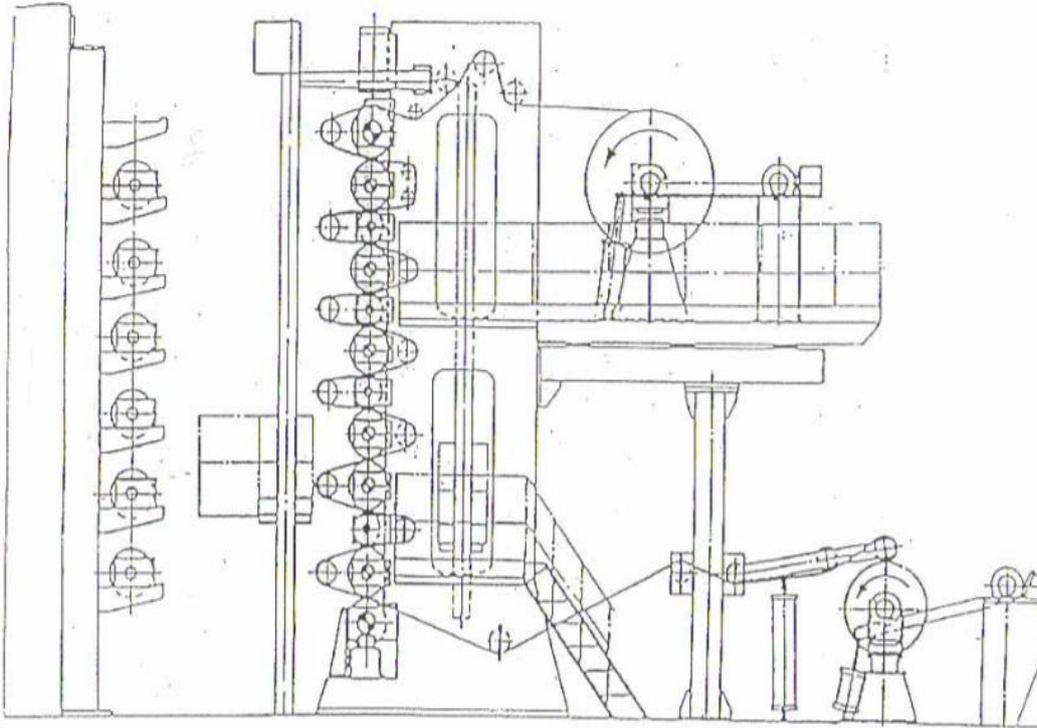


Figura 5) Layout della calandra di una macchina continua.[15]

-Avvolgimento dei rotoli: la parte terminale della macchina, è costituita dall'arrotolatore che ha la funzione di avvolgere il nastro di carta attorno ad un'anima e tagliarlo per creare la bobina che costituisce il prodotto finale. Essendo la carta prodotta con un ciclo ininterrotto, sarà necessario sostituire la bobina quando questa raggiunge le dimensioni volute.

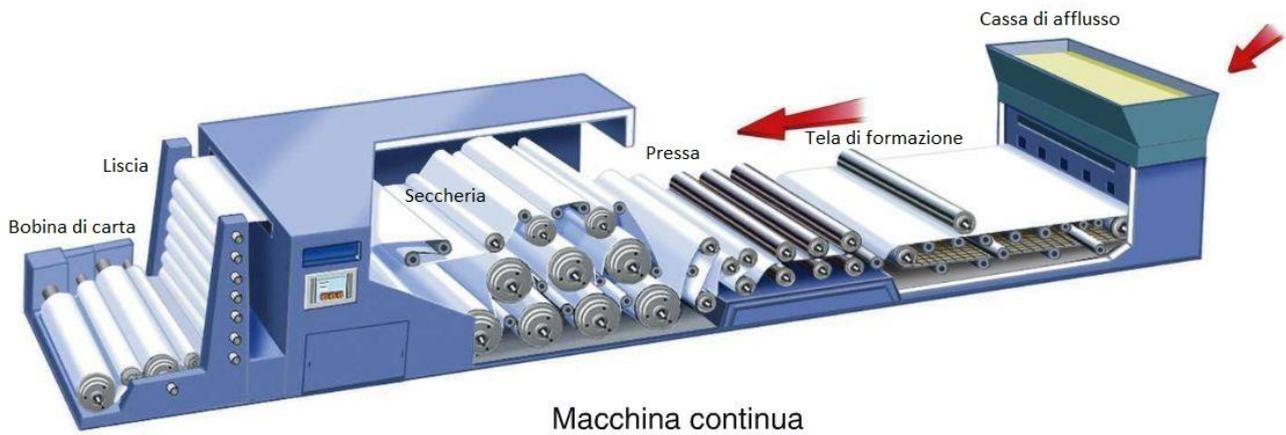


Figura 4) Schizzo generico della macchina continua. [3]

## 2.2 TIPOLOGIA DI PASTA DI LEGNO

La polpa di cellulosa viene prodotta chimicamente o meccanicamente e, il modo in cui si rimuove la lignina dalla polpa, si possono avere differenti processi di spappolamento.

### -PASTA CHIMICA

La pasta chimica viene prodotta tramite due processi che sono:

-processo al solfato (anche noto come processo “Kraft”) che consiste nell’estrarre la polpa di cellulosa tramite un bagno di soda caustica NaOH. Questa tecnica viene usata per realizzare una polpa con caratteristiche meccaniche buone con la quale viene realizzata la carta per l’imballaggio (cioè il cartone).

-processo al solfito: consente, tramite un ambiente prevalentemente acido, di avere la cellulosa al solfito. La cellulosa viene fatta cuocere usando del vapore ad alta temperatura, in modo che la lignina presente nella fibra si sciolga chimicamente. La sostanza in questione è il Solfito di Calcio “CaSO<sub>3</sub>” da cui l’origine del nome del processo. Come fase finale abbiamo una lavorazione meccanica atta alla liberazione della fibra cellulosa.

Inoltre, quando si produce la pasta del legno bisogna separare le fibre di cellulosa dai liscivii (“liquors” in inglese) perché, uniti con le acque, possono essere bruciati nell’impianto di recupero per la combustione.

### -PASTA MECCANICA

La pasta meccanica viene prodotta tramite processo meccanico (Groundwood pulping) che consiste nel lasciare la lignina, la quale viene macinata meccanicamente tra due dischi fatti di pietra naturale. Le proprietà della polpa ottenute da questo processo non sono buone quanto quelle ottenute dal processo chimico a causa del fatto che la macinazione ha lo svantaggio di danneggiare la fibra di legno. Proprio per questo motivo si

utilizza questo processo per realizzare la carta da giornale o per gli elenchi telefonici che non richiedono una qualità di carta particolarmente pregiata.

-CTMP (Chemical Thermal Mechanic Pulp)

Questo è un processo che consente di produrre una carta patinata di qualità migliore in termine di resistenza. Come si evince dal nome, la pasta viene prima trattata chimicamente e poi si impiega l'uso promiscuo del vapore (come azione termica) e di rulli rotanti che agiscono meccanicamente. La qualità di quest'ultima è superiore rispetto a quella trattata meccanicamente ma la pasta chimica

---

## Capitolo 3    CONSUMI    DI    ENERGIA    NEI PROCESSI DI PRODUZIONE

---

Gli impianti che usano il trattamento meccanico consumano più energia rispetto agli impianti che usano il processo KRAFT ma utilizzano meno acqua rispetto a quest'ultimo. Il processo Kraft, dato che usa sostanze contenenti zolfo, ha un impatto sull'ambiente non indifferente e, in termini di efficienza, solo il 50% del legno usato viene effettivamente convertito in polpa. Parlando di impatto ambientale, le cartiere, oltre a consumare tante risorse come acqua, legno, combustibili fossili ed elettricità, tendono a emettere sostanze nocive come anidride carbonica CO<sub>2</sub>, anidride solforosa SO<sub>2</sub> e ossidi d'azoto NO<sub>x</sub> che possono rendere acida la pioggia, innalzare la temperatura dell'ambiente e creare problemi di salute. Altro tasto dolente, per quanto riguarda gli inquinanti prodotti da questi impianti è l'immissione di cloro e/o biossido di cloro nelle acque, dovuto al suo uso nello sbiancare l'impasto di cellulosa. Inoltre, questo elemento chimico è pericoloso in quanto, un'eccessiva quantità di cloro, in forma gassosa, può causare irritazione alle vie respiratorie dei bambini e degli anziani. Invece, in forma liquida, può ustionare la pelle. Le autorità ambientali di alcuni paesi hanno imposto rigide restrizioni sullo scarico di sostanze organiche clorate, misurandole con l'indice AOX (acronimo di "Absorbable Organic Halides"), che indica la quantità di sostanze come lo iodio, il cloro e il bromo. In alcuni paesi europei occidentali, l'uso del cloro e del diossido di cloro per questi impianti è stato totalmente rimpiazzato con l'idrogeno, il perossido d'idrogeno (noto come acqua ossigenata) e l'ozono in modo da ridurre la contaminazione delle acque. Queste sostanze hanno un'altra caratteristica importante, cioè quella di non attaccare l'habitat naturale degli esseri marini, cosa che, invece, il cloro e i suoi derivati fanno.

Tuttavia, il progredire delle tecnologie è volto a rendere i metodi di lavorazione della carta più performanti in termini energetici, di riciclo e di ecosostenibilità con particolare attenzione alla riduzione delle emissioni degli inquinanti. Le cartiere moderne sono diventate le più grandi consumatrici e, nel contempo, produttrici di energia rinnovabile e fanno affidamento sui biocombustibili (circa il 50 % dell'energia primaria proviene dalle biomasse).

## Capitolo 4 IL MERCATO DELLA CARTA

Negli ultimi anni il mercato della carta ha subito un drastico calo delle vendite a causa dell'avvento dei dispositivi elettronici che hanno rimpiazzato l'uso quotidiano di questo materiale e dei suoi derivati, basti pensare al dispositivo elettronico Kindle che permette di leggere riviste/libri. Ciononostante, rimane uno dei più importanti mercati.

### 4.1 INDUSTRIA DELLA POLPA/PASTA EUROPEA

L'Europa è ai primi posti nella produzione mondiale della polpa e della carta e, in termini di consumo risulta essere il terzo consumatore più grande dopo Nord America e Asia. Essendo le foreste sviluppate pressochè ovunque nel nostro continente, ecco che la produzione di carta è diffusa in molti stati europei: oltre a Svezia e Finlandia che detengono il primato, l'industria cartaria è sviluppata anche in Francia, Portogallo, Spagna, Austria, Germania e Polonia.

Come accennato pocanzi, i principali produttori di carta sono:

Svezia e Finlandia, terre ricche di foreste. Questi paesi sono anche i maggiori produttori di polpa di legno che costituisce la materia prima nel processo di produzione.

La polpa si distingue in

- POLPA DI LEGNO DOLCE, ricavata dalle conifere
- POLPA DI LEGNO DURO, ricavata dalle latifoglie.

Nel settore della produzione di polpa di legno duro una piccola fetta di mercato è detenuta dalla Spagna e dal Portogallo.

Svezia e Finlandia sono le maggiori produttrici di polpa di legno dolce.

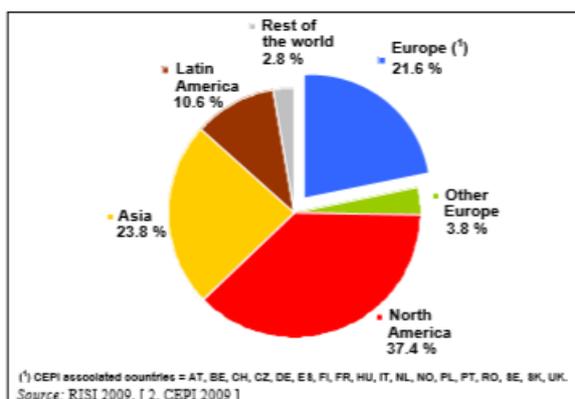


Figura 6) Andamento della produzione della Polpa a livello mondiale nel 2008.[10]

Nel 2008 la Finlandia e la Svezia producevano all'incirca 23,7 milioni di tonnellate annue di pasta mentre gli altri paesi europei insieme producevano circa 13,8 milioni di tonnellate (33% della produzione totale). I quattro più grandi mercati di questo settore sono Italia, Germania, Francia e il Regno Unito.

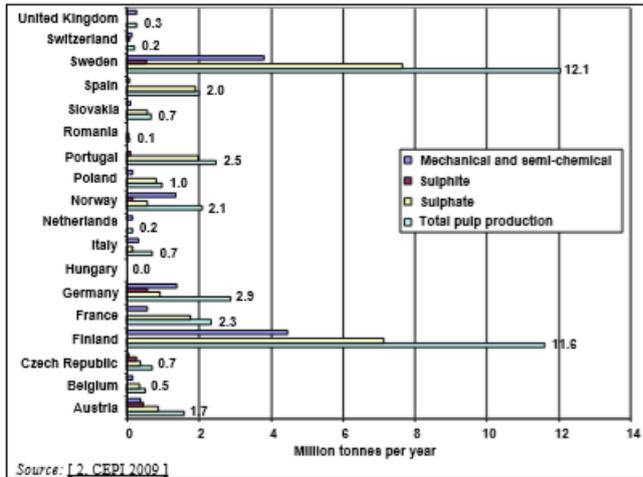


Figura 7) Quantità di tonnellate annue prodotte dai vari paesi europei. Inoltre, sono rappresentati i processi maggiormente utilizzati [10].

Dal seguente grafico notiamo che il processo al solfato è quello più utilizzato nella produzione della polpa, di seguito abbiamo i processi meccanici e termo-meccanici e, per ultimo abbiamo il processo chimico che adotta il solfito.

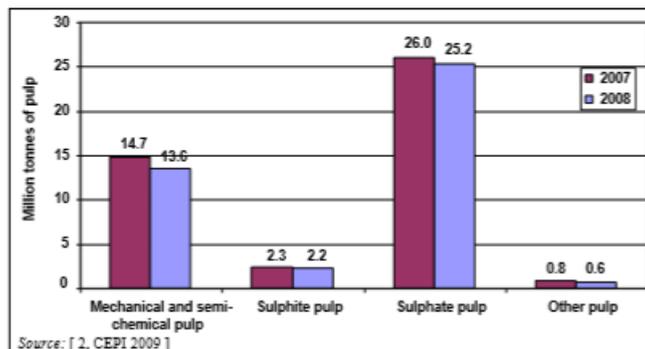


Figura 8) Il grafico spiega quali sono i processi maggiormente utilizzati e le tonnellate prodotte rispettivamente nel 2007 e nel 2008. [10]

## 4.2 INDUSTRIA DELLA CARTA EUROPEA

Nel 2008, i più grandi produttori mondiali di carta e di tavole sono stati Asia (40,2%), Nord America (24,5%) e Europa (25,3%).

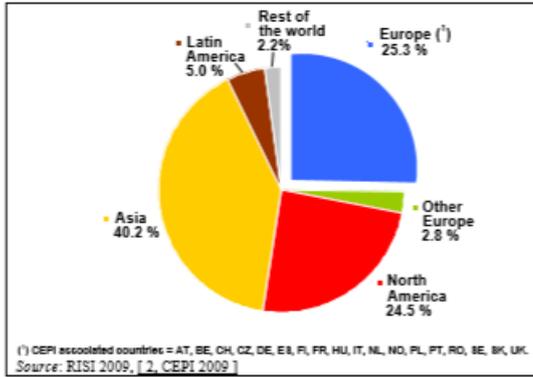


Figura 9) Produzione della Carta a livello mondiale.[10]

Della totalità della carta prodotta il 48% è dedicato alla carta grafica, il 40,7% alla carta per imballaggio, il 6,8% per uso sanitario e domestico, il 4,5% per altri prodotti.

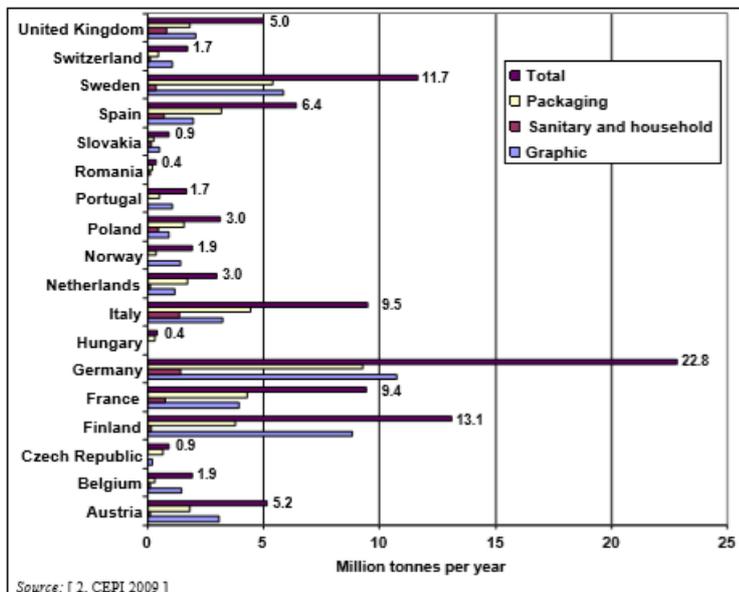


Figura 10) Distribuzione dell'industria cartaria tra gli stati europei.[10]

A partire dagli anni 90, la produzione di carta delle industrie europee ha avuto un aumento medio del 2-3%. A livello europeo, in termini di produzione di carta e cartone, l'Italia si colloca in quarta posizione (9,5%) dopo Svezia (11,7%), Germania (22,8%) e Finlandia (13,1%). L'uso sempre più frequente delle fibre riciclate ha causato la delocalizzazione di questo settore nei paesi dei più grandi consumatori come Germania, Francia e Regno Unito e Spagna.

I fogli per lo stampo e per la scrittura contenenti legno sono principalmente prodotti in Finlandia e in Germania, che contano assieme il 60% della produzione totale. Nella fabbricazione della carta da stampo ecosostenibile e da scrivere, Germania, Francia, Finlandia, Austria, Italia e Svezia giocano un ruolo importante in Europa. I maggior produttori di materie grezze sono Germania, Francia; Spagna, Italia e Svezia.

Tutti loro rappresentano il 60% della produzione totale. La produzione a base di fibre riciclate è cresciuta più rapidamente della produzione che usa le fibre vergini. I cartoni vengono creati usando, come materiale grezzo, sia la fibra riciclata e sia quella vergine. In generale, la carta a base di fibre riciclate, viene fornita da: Germania, Italia, Paesi Bassi e Francia, mentre la carta fatta di fibre vergini, con la quale si produce il cartone pieghevole e l'imballaggio delle bevande, proviene principalmente dai paesi nordici.

La produzione della carta igienica è concentrata in cinque paesi che sono Germania, Italia, Regno Unito, Francia e Spagna che producono il 75% della produzione totale europea.

Nel 2008, il numero di cartiere in Europa erano in totale 887, molte delle quali sono collocate in Italia, Germania, Francia, Spagna e nel Regno Unito.

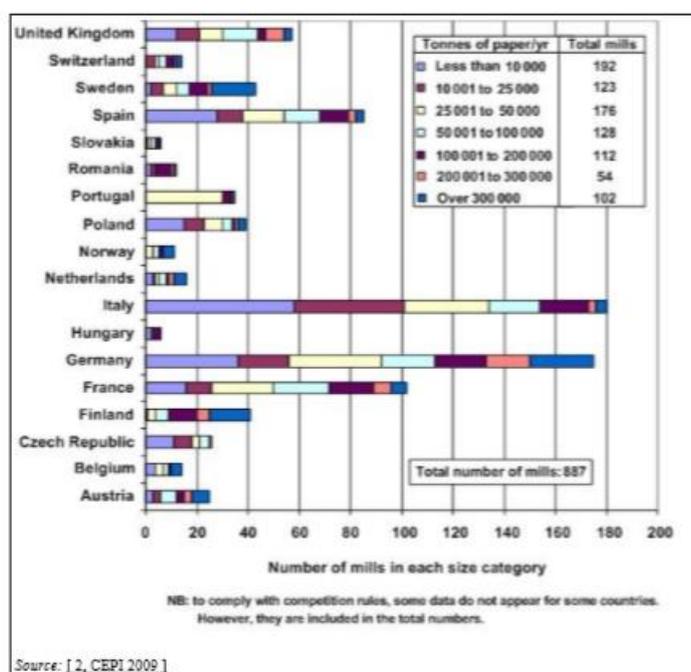


Figura 11) Numero di cartiere attive nel 2008.[10]

### 4.3 ECONOMIA E OCCUPAZIONI DELLE INDUSTRIE EUROPEE DI POLPA E CARTA

Molte compagnie sono cresciute investendo nell'innovazione per raggiungere una maggiore capacità produttiva. Nel 2011 la Cina era la più grande produttrice mondiale di carta dopo l'unione europea (circa 98,9 milioni di tonnellate) mentre gli Stati Uniti producevano 79,8 milioni di tonnellate. Il Sud America, in particolar modo il Brasile, è diventato leader nel mercato della produzione della polpa.

L'industria della carta europea è tuttora competitiva con le altre nazioni del mondo nonostante gli alti costi di produzione. Come in molti altri settori però, l'aumento dei costi di produzione e delle materie prime hanno

determinato la nascita di altre cartiere nei paesi in via di sviluppo come l'America latina o in Cina presentando delle sfide per l'industria della carta e della pasta europea.

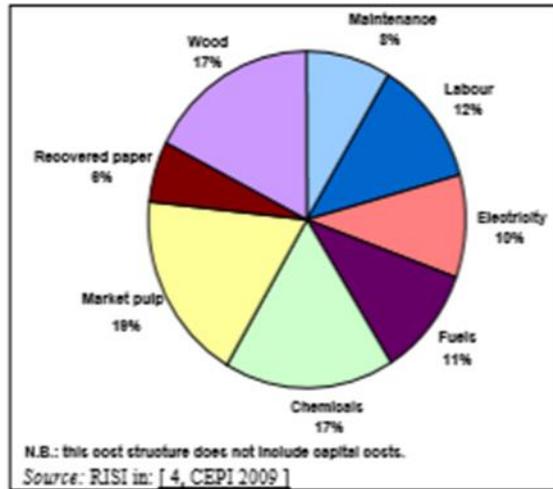


Figura 12)Questo grafico ci spiega quanto contribuisco ogni fattore al costo di della Carta e della Polpa.[10]

Per quanto riguarda i vari prodotti cartacei, il prezzo tende sempre a diminuire nel lungo termine ma la sua fluttuazione non è la stessa per tutti i prodotti di carta e di polpa. Più una società è vicina al commercio al dettaglio e al consumatore finale, minori saranno le variazioni di prezzo del prodotto. Tipico esempio potrebbe essere il prezzo della polpa che è più volatile rispetto a quello della carta Tissue.

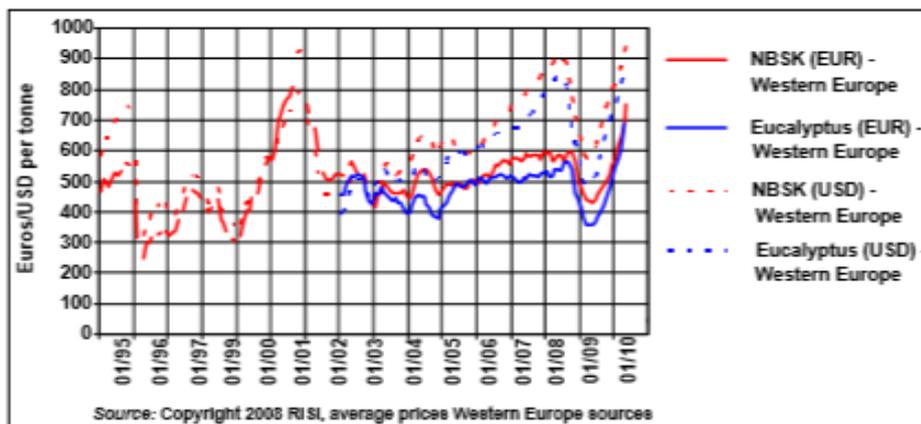


Figura 13)Andamento del mercato della Polpa.[10]

Il prezzo della carta riciclata ha subito un enorme sviluppo in termini di variazione di prezzo negli ultimi tre anni ed è oramai commercializzata su scala globale. Dal 2007, il prezzo del legno è rimasto praticamente inalterato in Europa, anche se c'è stata una maggior richiesta, soprattutto riguardo ai pini e alle betulle. La richiesta è causata dalla costante necessità di produrre energia rinnovabile proveniente dalle biomasse. Le variazioni dei prezzi sono state a volte causate da un aumento dei dazi stabiliti dalla Russia. Questa misura ha colpito principalmente la Finlandia ma ha portato, in generale, una ripercussione in tutto il continente europeo sul prezzo d'acquisto del legname.

Le industrie della carta e della polpa sono diventate delle consumatrici di energia. In media, il 21% del costo della produzione proviene dall'uso dei combustibili e dell'elettricità, e si sono apportate delle migliorie che hanno portato dei benefici ambientali e competitivi, questo a causa del fatto che i prezzi per l'uso dell'elettricità e dei combustibili sono aumentati.

I produttori che comandano nel mercato della polpa sono gli Stati Uniti, il Canada, la Svezia, il Giappone e la Finlandia, anche se stanno emergendo rapidamente paesi del Sud-America come il Brasile e il Cile che sono in via di sviluppo.

Anche questo mercato ha subito un brutto colpo da parte della crisi economica del 2008 tanto che è iniziato un declino nel consumo per molte classi di carta.

## Capitolo 5 TRASLO BURGO VERZUOLO

Il traslo-elevatore è un macchinario adibito al trasporto di due rotoli di carta patinata da 4000 Kg che raggiunge una velocità di spostamento di 100 m/min. L'impianto, situato in uno dei due corridoi del magazzino, in condizioni di riposo, è formato da due traslo-elevatori appoggiati alle estremità di una rotaia BURBACK A100 (tipologia di rotaia impiegata per le vie di corsa di carroponti). Ai lati del corridoio ci sono le scaffalature che consentono di depositare e sostenere i rotoli.

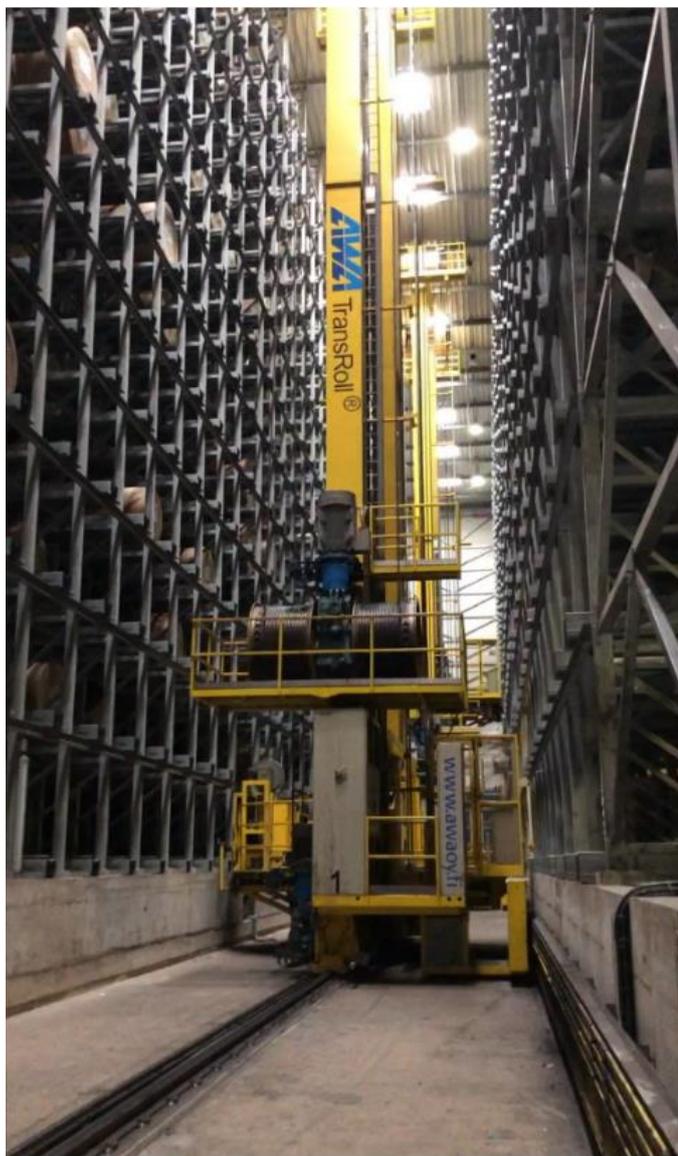


Figura 14) Il traslo-elevatore presente nella cartiera di Verzuolo(CN) della BURGO.

### 5.1 LOGISTICA DEL MAGAZZINO

Il magazzino è stato progettato per movimentare 120 rotoli all'ora ed è composto da due corridoi e, in corrispondenza di ciascuno essi, ci sono due traslo. Essendoci quattro traslo, due caricano e gli altri due scaricano (quindi, in ogni corridoio, vengono mossi 60 rotoli all'ora). I rotoli di carta entrano nel magazzino da un corridoio secondario, presente al sesto piano del reparto di immagazzinamento dello stabilimento, tramite un piccolo nastro-trasportatore. Invece, quando i rotoli lasciano la loro postazione, escono da un altro corridoio situato al primo piano (sottostante all'altro). Anche in quest'ultimo è presente un piccolo nastro-trasportatore che facilita il trasporto del rotolo che sarà mandato al punto di carico/scarico merci.



Figura 15) A sinistra, il corridoio d'ingresso del magazzino situato al sesto piano. A destra, il corridoio d'uscita del magazzino al primo piano.

Le fasi logistiche di questo magazzino automatico sono le seguenti:

- 1° fase: il traslo si muove in direzione del corridoio d'entrata e preleva l'unità in arrivo;
- 2° fase: il traslo si muove verso un'altra zona del magazzino e scarica il/i rotolo/i;
- 3° fase: il traslo si muove diretto ad un'altra postazione e preleva il/i rotolo/i;
- 4° fase: il traslo scorre sulla rotaia per andare a scaricare i rotoli nel corridoio d'uscita.

---

## 5.2 COMPONENTI DEL TRASLO & LORO FUNZIONAMENTO

---

Il traslo-elevatore è composto da:

- carrello inferiore che scorre lungo una rotaia usando due ruote di cui una motrice e l'altra folle (figura 16);
- due colonne portanti (figura 17-1) che sostengono la piattaforma per trasportare i rotoli a differenti livelli e che conferiscono rigidità alla macchina;
- una piattaforma dove è presente il motore usato per il sollevamento verticale del carico (figura 17-2);
- una trave di supporto orizzontale che tiene unite le due colonne in alto (figura 17-3);
- due piattaforme di servizio usate per eventuali controlli di manutenzione e di controllo del sistema (figura 17-4);
- una piattaforma dove è presente la postazione di controllo (figura 17-5);
- una piattaforma, sollevata da un sistema di funi e di pulegge, che scorre su due rotaie poste lungo i due alberi (figura 18-A);
- una tavola girevole, sostenuta dalla piattaforma, che consente la rotazione di 180° del "TR-vehicle" e, quindi, di sfruttare le scaffalature ai lati del corridoio (figura 18-A);

-un "satellite" (TR-vehicle) programmato con il preciso compito di CARICARE/SCARICARE i rotoli di carta all'interno della scaffalatura (figura 18-B).

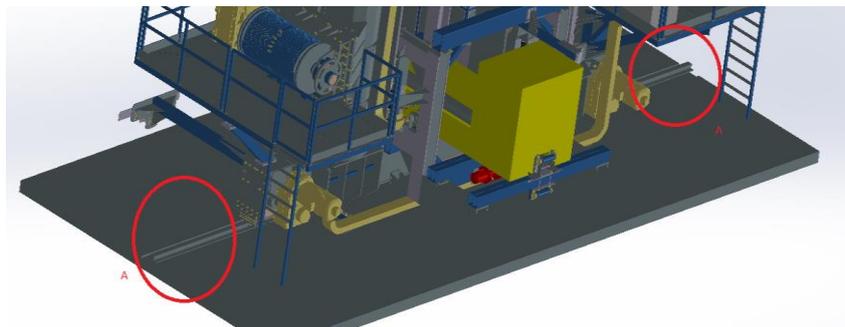


Figura 16) Vista del Carrello inferiore sostenuto dalla rotaia "A".

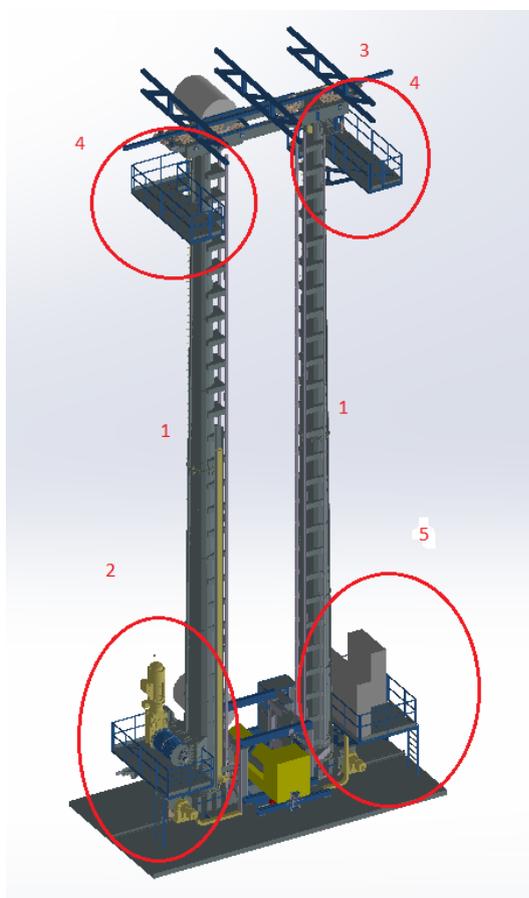


Figura 17) Vista del modello del Traslo.

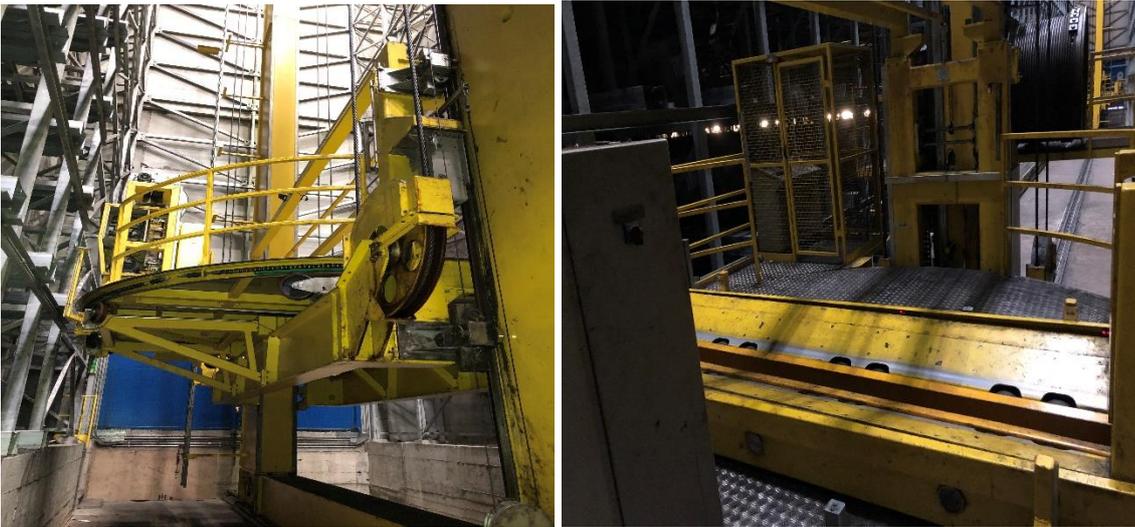


Figura 18-A) Piattaforma di sollevamento assemblato con la tavola rotante. 16-B) La Navetta che carica/scarica i pesanti rotoli di carta all'interno del magazzino.

Il sistema viene mosso da un unico motore elettrico che mette in rotazione una delle due ruote (quella posteriore) mentre l'altra ruota è folle. Entrambe hanno anche la funzione di supporto, scaricando le forze esercitate dall'imponente struttura sulla rotaia.

Il traslo può operare con due differenti modalità di controllo:

- semi-automatico: l'operatore invia la posizione dei rotoli al traslo da una postazione al di fuori del traslo stesso;
- manuale: l'operatore comanda l'intero sistema dall'apposita postazione situata sulla piattaforma di sollevamento.

Un encoder permette di rilevare la posizione del traslo lungo la rotaia di fermare il traslo in corrispondenza del canale dove è allocato il carico.



Figura 19) A sinistra, l'encoder assoluto che ingrana con una cremagliera per avere un riferimento e fermarsi nella giusta posizione. A destra, la cremagliera messa a lato della rotaia.

Oltre all'encoder, è presente un sensore ad infrarossi, montato sulla tavola rotante, che proietta un segnale in avanti. In ogni postazione del magazzino c'è un dischetto catarifrangente che riflette il fascio emesso dal sensore così da far combaciare la guida del satellite con quella dello slot (è un ulteriore sistema di sicurezza che garantisce il perfetto allineamento tra la locazione dei rotoli e la navetta del traslo). Quando il catarifrangente riflette il segnale e lo rinvia al sensore, il satellite si mette in moto scorrendo lungo le guide della tavola rotante e si inserirà nel canale dello scaffale per prelevare/scaricare il carico.



Figura 20) A sinistra, il sensore ad infrarossi montato sulla tavola rotante usato per l'allineamento. A destra il dischetto catarifrangente che proietta indietro il fascio ad infrarossi al sensore.

Inoltre, è presente un altro motore che consente la traslazione verticale della piattaforma mentre il satellite si muove per conto proprio.

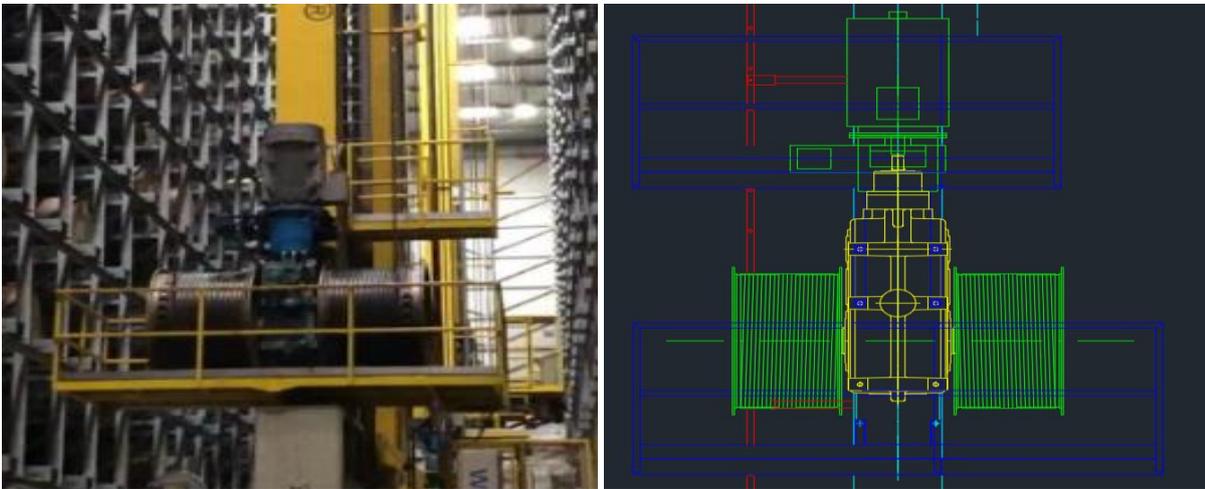


Figura 21) Il motore per il sollevamento mette in rotazione il verricello così da sollevare la tavola rotante tramite il sistema di funi e pulegge.

Il motore elettrico è collegato a due verricelli laterali formati da funi d'acciaio, le quali passano attraverso delle pulegge folli presenti sulla struttura. Ciascuna fune è solidale ad un capofisso che la mette in tensione.

Le funi d'acciaio passano attorno alle pulegge folli montate sulle travi superiori del sistema mentre le altre due situate sulla piattaforma servono, oltre che per la traslazione verticale, anche per il rinvio delle funi verso l'alto.

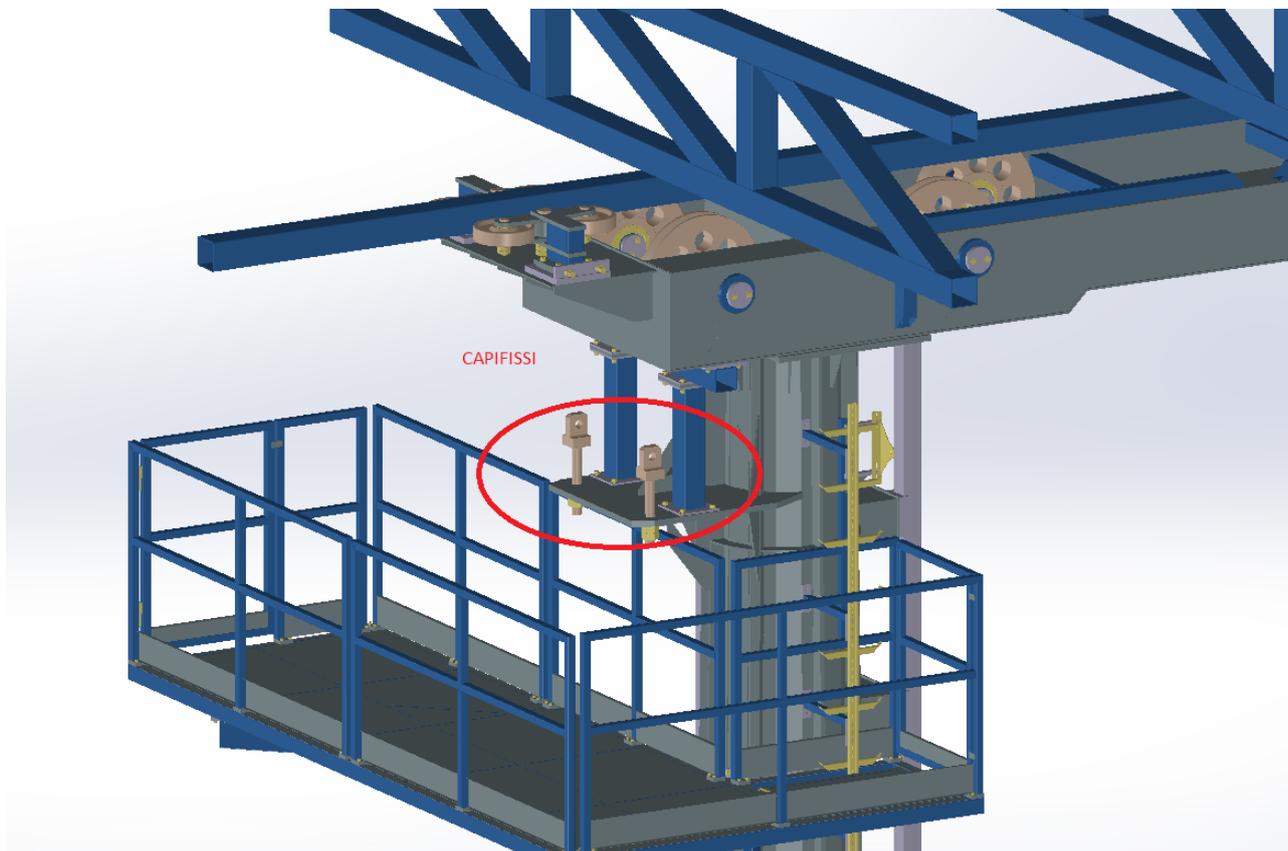


Figura 22) La presenza dei capifissi è di estrema importanza dato che permettono di mettere in tensione il filo.



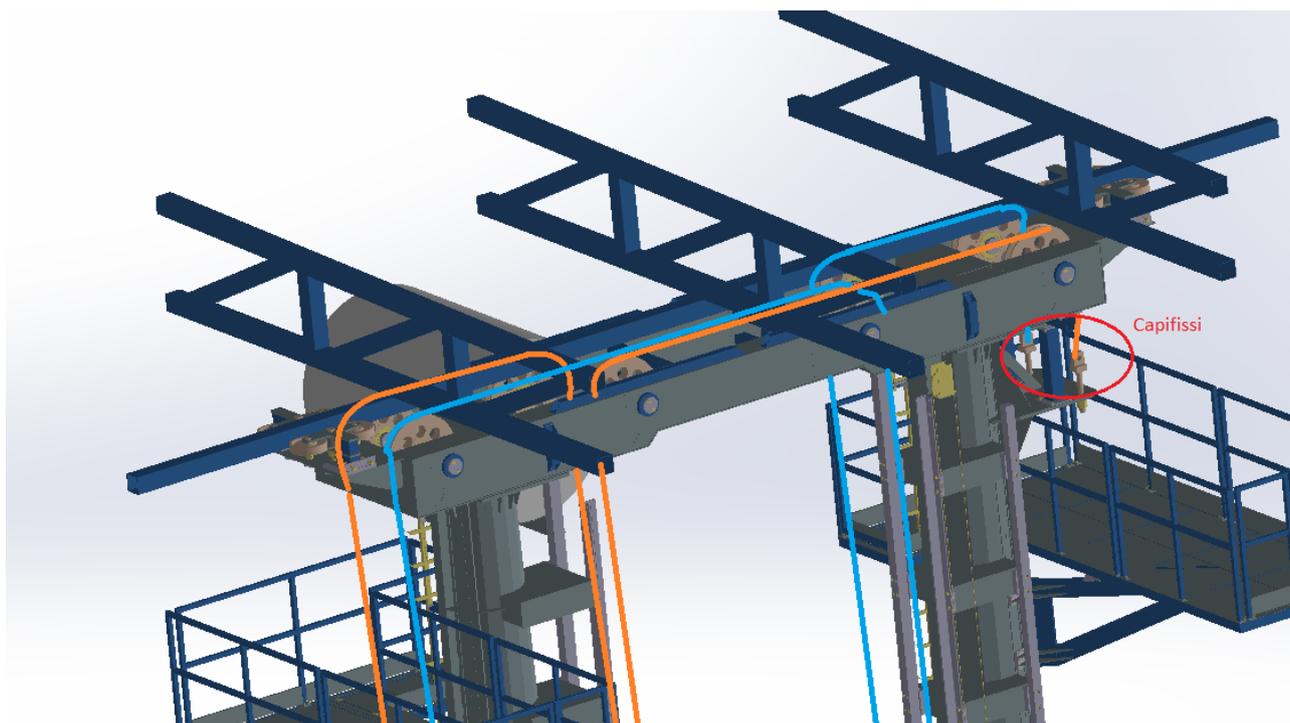


Figura 23) Sistema di sollevamento tramite le funi d'acciaio. Essendo due le funi, sono state evidenziate con due colori solo per distinguere uno dall'altro.

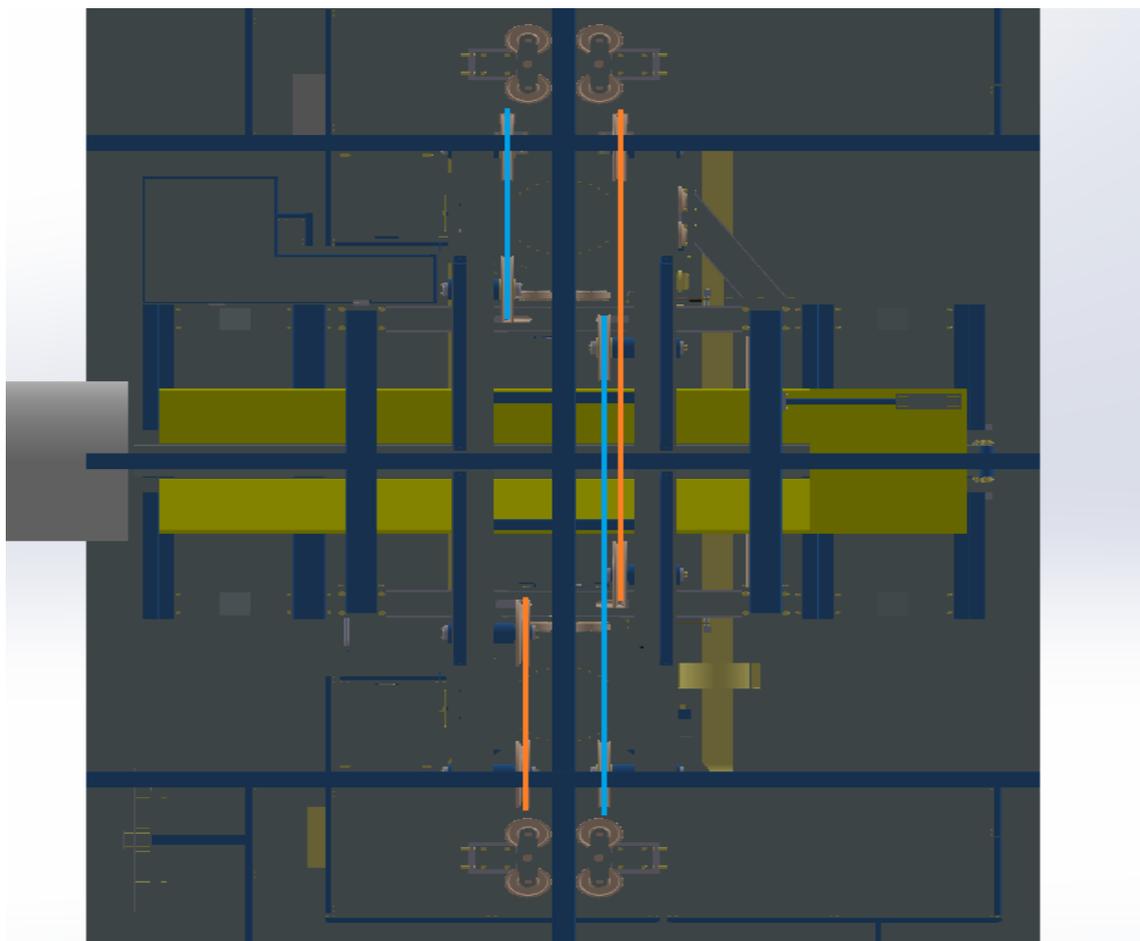


Figura 24) Vista dall'alto del traslo e del sistema di sollevamento tramite le funi.

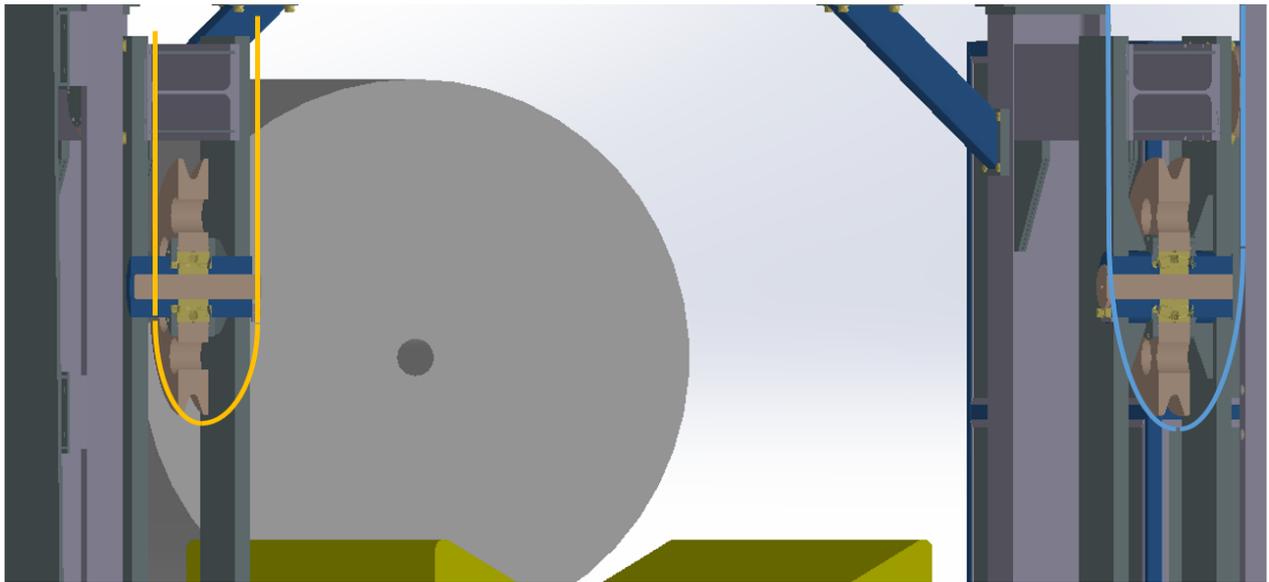


Figura 25) Vista della piattaforma sollevata tramite il rinvio delle funi grazie alle pulegge montate su di essa.

Lungo le colonne del traslo, ci sono delle travi che svolgono la funzione di rotaia di guida per le ruote montate sulla piattaforma. Esse, in pratica, facilitano lo scorrimento verticale rendendolo più stabile ed evitano che la piattaforma si ribalti.

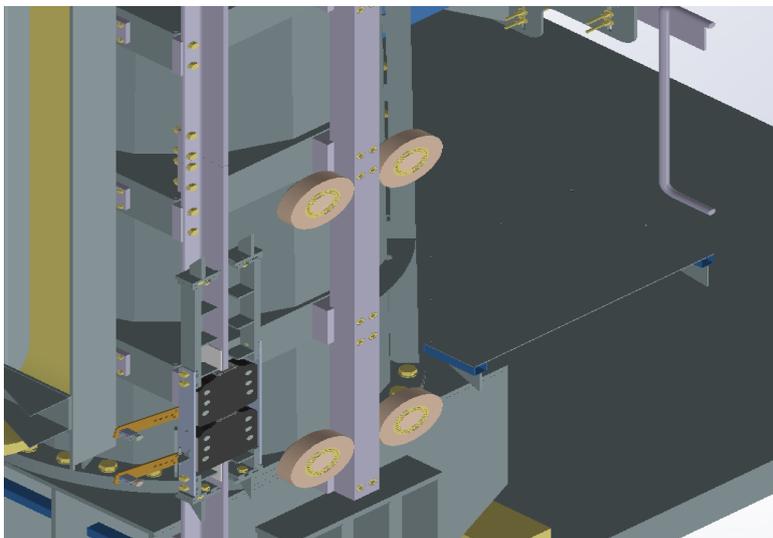


Figura 26) Trave che svolge il ruolo di guida per le ruote montate sulla piattaforma.

Quando il traslo trasporta il lotto di rotoli, si hanno in contemporanea due movimenti attivi (quello orizzontale e quello verticale) mentre il terzo movimento (l'ingresso/l'uscita del satellite) avviene solamente quando il sistema è completamente fermo e quando le guide della tavola rotante e della postazione sono perfettamente allineate.

Il satellite è un componente che ha una propria CPU di comando e un proprio motore per l'avanzamento. Quindi viene alimentato da un filo proveniente da un "svolgicavo" che è un filo elettrico arrotolato in una bobina. La corrente viene fornita tramite dei contatti striscianti.



Figura 27) Il svolgicavo che, collegato alla navetta, dà corrente.

Ai piedi del carrello inferiore ci sono quattro ruote di contrasto (due per la ruota motrice e due per la ruota folle) che intervengono nel caso in cui il macchinario tenda a sviare dalla rotaia. Esse sono disposte in modo tale che si venga a creare, tra le loro superfici laterali e la parte superiore laterale della rotaia, una luce di circa uno o due millimetri. Se il sistema scorre esattamente in linea con la rotaia, allora le ruote di contrasto, ovviamente, non intervengono ma se ciò non accadesse, allora una delle due ruote interverrà raddrizzando il percorso fatto dal traslo così da evitare eventuali sbandamenti.



Figura 28) Ruota di contrasto presente sul traslo.

Sempre a lato del traslo, ci sono le blindosbarre che portano l'energia elettrica/tensione ai motori presenti su di esso.



Figura 27) Blindosbarre situate lungo la parete del corridoio.

Ovviamente, esiste una seconda rotaia, fissata sul soffitto del capannone, che svolge il ruolo di sostegno alle ruote superiori (situate alle estremità alte dei due alberi) e impedisce che il traslo si ribalti lateralmente.

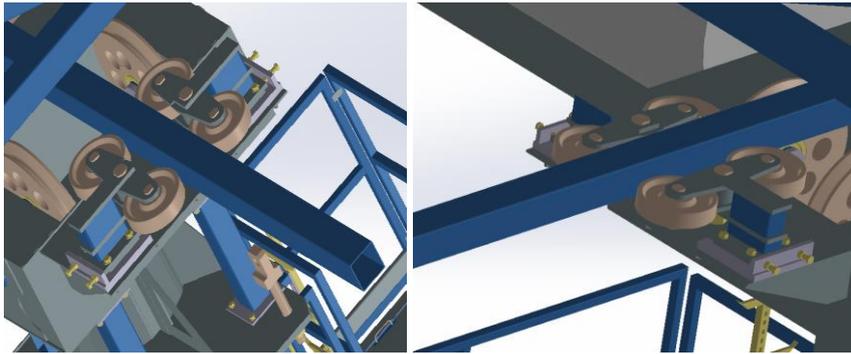


Figura 28) Viste differenti della trave superiore che funge da sostegno per le ruote.

Alle estremità della rotaia ci sono dei respingenti (Buffer) che contrastano le forze d'impatto creati dai traslo e che scaricano l'impulso a terra. Essi vengono progettati in modo tale da resistere ad un urto generato da una velocità pari al 70% della velocità massima. Inoltre fanno da fermo ai traslo, nel caso si dovesse spegnere l'intero sistema.

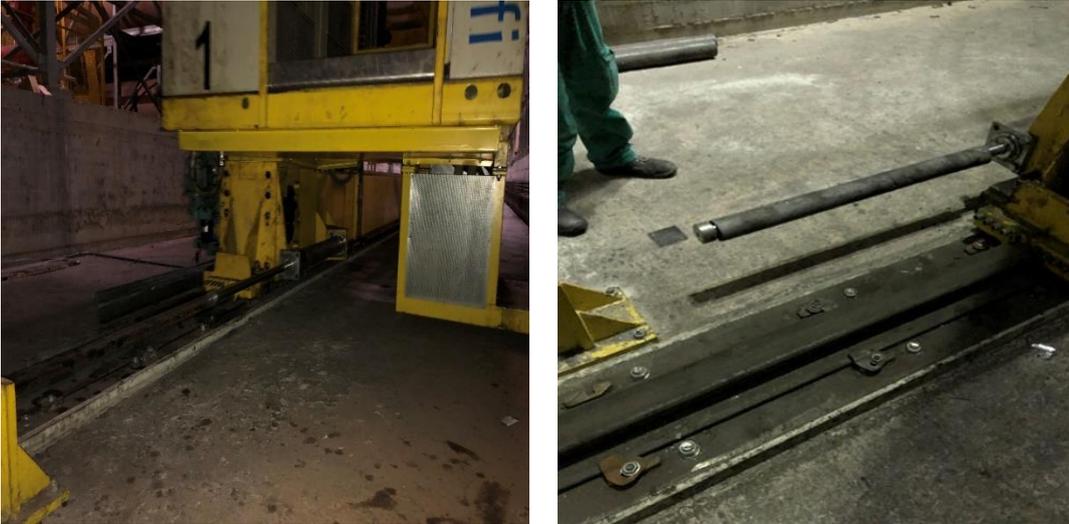


Figura 29) Buffer installato a lato della rotaia. Il pistone, montato sul carrello inferiore, va a trasmettere l'impulso al buffer nella fase di ritorno del traslo.

Le ruote sono realizzate in acciaio C40 e vengono indurite mediante tempra ad induzione, che consente di innalzare di tanto i loro carichi di rottura (circa 5 volte il carico di rottura precedente del materiale).

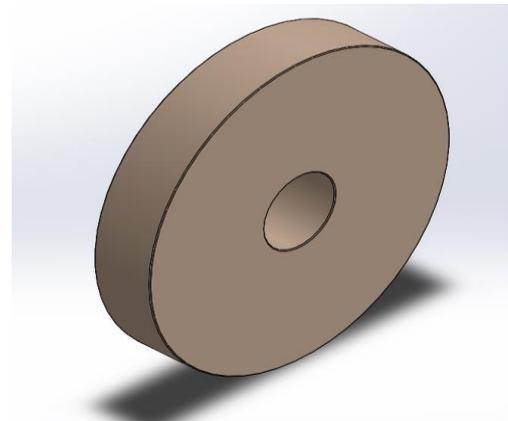


Figura 30) Disegno 3d della ruota di sostegno.

### 5.3 INSTALLAZIONE DELLA ROTAIA & SUO FUNZIONAMENTO

La messa in opera della rotaia è avvenuta nel 2016.

Per la messa in opera della rotaia d'appoggio della Burback A100 si eseguono le prossime fasi:

-si crea una trincea nel basamento dell'edificio così da installare una piattaforma metallica di spessore pari a 20 mm, nota come "soletta", formata da una fila di piastre rettangolari metalliche;



Figura 23) Fase iniziale in cui si crea la trincea per creare la base d'appoggio e la disposizione della piattabanda/soletta.

-si allinea la rotaia in modo che vengano rispettate le distanze orizzontali rispetto agli scaffali, ciò consente di segnare le posizioni dei fori per l'inserimento delle viti ancoranti. Dopo aver fatto i fori/buchi, si passa all'allineamento verticale ottenuta regolando le viti (il tondino verticale presente all'estremità serve come riferimento per un buon allineamento orizzontale del piatto nella trincea);

-la trincea viene riempita di cemento in modo da riempirla completamente e realizzare un pavimento resistente alle infiltrazioni d'acqua e alle sollecitazioni trasmesse dalla rotaia;

-si posiziona il pad sulla soletta e poi si posiziona la rotaia. In questa fase si usano le clip per serrare la rotaia sulla soletta;

-le estremità delle due rotaie sono posizionate in modo da avere una luce di 10 mm;

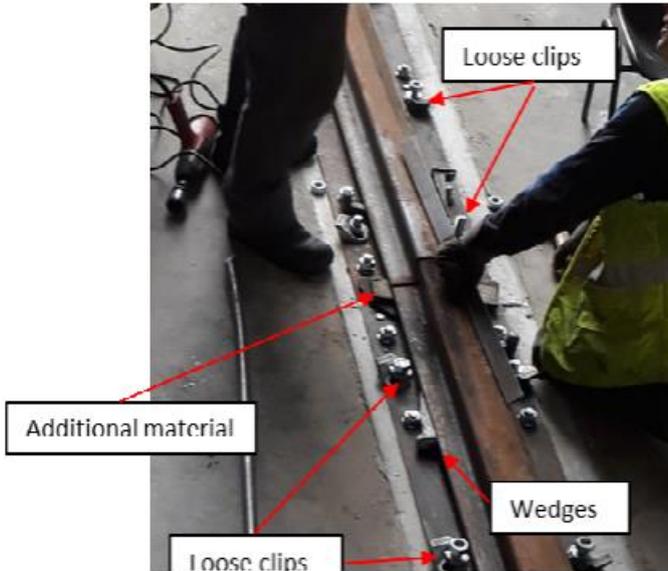


Figura 29) Fase di allineamento delle due rotaie.

-Le sezioni della rotaia da saldare sono lucidate in modo da rimuovere eventuali impurità come ruggine e grasso;

-si svitano le 4 clip usate per bloccare la rotaia;

-si usano dei cunei che consentono di allineare il più possibile le teste delle rotaie;



- si saldano le teste delle due rotaie;

Viene usato un “pad” elastomerico di Neoprene spesso 2 mm che consente di ridurre/ammortizzare le eventuali vibrazioni trasmesse durante il tragitto del traslo. Il pad può deformarsi in modo che né la rotaia e né la piattabanda (soleplate) si danneggino. Questo elemento, infatti, evita il contatto diretto del piede d'appoggio della rotaia con il piatto metallico usato in fase di allineamento e questa soluzione si è rivelata valida per la riduzione delle rotture. Infine, questo spessore di gomma contribuisce a ridurre i problemi di rilievo con la pavimentazione non sempre perfettamente regolare.

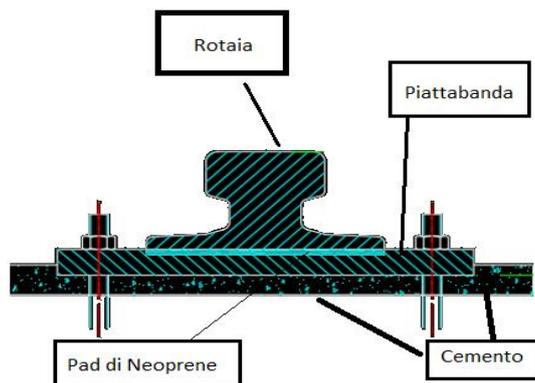


Figura 30) Disposizione dei componenti della rotaia.

Dopo aver appoggiato il tappeto elastomerico sulla piattaforma, si procede all'imbullonatura/serraggio della rotaia al pavimento tramite un sistema di clip che si incuneano a lato del basamento della rotaia, mantenendo ferma la rotaia sul pad. Sull'estremità bassa della clip c'è un tassello di gomma che evita il contatto diretto

con il piede laterale del profilato. Delle viti M24x300 fanno da ancoraggio della rotaia sul suolo mentre le viti M20X100 servono solo come riferimento per l'installazione della piattabanda.

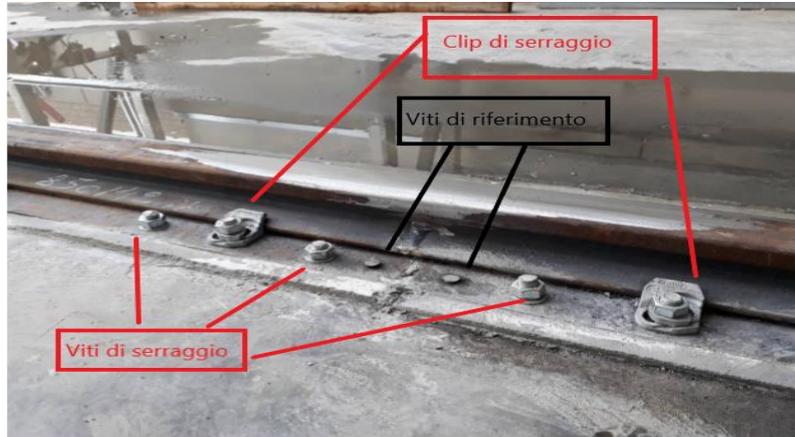


Figura 31) Vista finale della rotaia.

#### 5.4 DIMENSIONAMENTO DELLA ROTAIA

In fase di progetto, si cerca di scegliere la rotaia più idonea possibile in modo da soddisfare le esigenze del cliente ma anche in modo che non ceda sotto l'eccessivo peso esercitato dal veicolo sul profilato.

In genere:

- se il carico complessivo è al di sotto delle 30 tonnellate, allora vengono normalmente impiegate rotaie Vignole;
- oltre le 30 tonnellate, la scelta ricade sulle rotaie Burbach.

---

# Capitolo 6 GENERALITA' SULLE ROTAIE E LORO ROTTURE

---

---

## 6.1 TIPI DI ACCIAI USATI PER LE RUOTE E LE ROTAIE

---

Il macchinario, analizzato in questa tesi, ha caratteristiche riconducibili a quelle di sistemi ferroviari e per questa ragione i materiali impiegati sono gli stessi. Per la realizzazione delle rotaie si usano differenti acciai quali:

- acciai al Manganese: acciai con struttura austenitica. Presentano un alto contenuto di Manganese (con tenori di Manganese oltre il 12% e percentuali di Carbonio poco superiori a 1%) grazie al quale aumentano le caratteristiche meccaniche, come il carico di snervamento, e la resistenza all'usura. Oltre a essere amagnetici, presentano una forte capacità di deformazione plastica a caldo ed elevata capacità di incrudimento. Il carbonio, ovviamente, aumenta il carico di rottura/snervamento mentre il Manganese ha la capacità di essere un elemento gammageno/austenitizzante (cioè che stabilizza l'austenite a temperatura ambiente) ed è un ottimo desolforante e disossidante. Un esempio di acciaio al Manganese è quello Hadfield. Questi acciai, se sottoposti a urti superficiali, tendono a diventare estremamente duri con il principale vantaggio di rimanere teneri e duttili internamente. Altro vantaggio da non trascurare è il basso coefficiente di dilatazione termica che essi presentano. Come aspetto negativo, invece, presentano lo svantaggio di essere piuttosto difficili da lavorare con macchine utensili.
- acciai Martensitici: sono acciai molto duri ma presentano l'inconveniente di essere estremamente fragili. Presentano una struttura martensitica (da qui il nome di acciai martensitici). Si ottiene la Martensite grazie ad un brusco raffreddamento. Sono poco raccomandati per la realizzazione delle ruote e delle rotaie proprio per il fatto che sono poco tenaci agli urti.

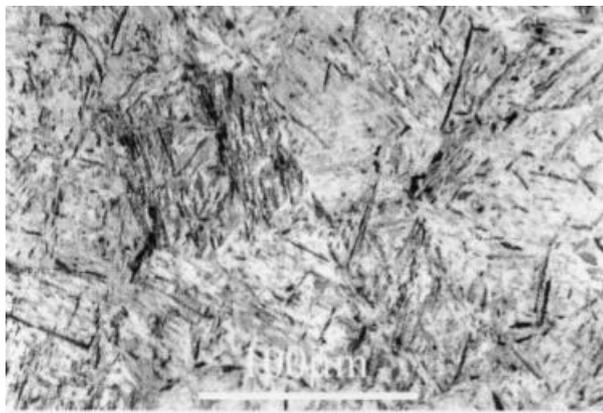


Figura 32) Esempio di struttura martensitica.[6]

- acciai Perlitici: presentano una microstruttura formata da un'alternanza di cementite ( $Fe_3C$ ) in forma lamellare e ferrite alfa ( $Fe\alpha$ ) ottenuta tramite un lento raffreddamento. L'aver una fase dura unita ad una matrice morbida, permette di avere un materiale con una buona resistenza alla deformazione e alla propagazione della cricca. Questi tipi di leghe raggiungono un carico di rottura pari o oltre i 1200 MPa. La resistenza è data dalla presenza di cementite mentre la ferrite conferisce tenacità e duttilità al materiale. Vengono impiegati per la produzione di trafilati ma non sono adatti a sopportare torsioni perché si innescherebbero fenomeni di tipo metallurgico come la “delaminazione” (che consiste in una propagazione della cricca in direzione longitudinale della rotaia). L'insorgere di questo problema potrebbe essere causato dalla decomposizione della cementite, durante il processo di trafilatura, in ferrite alfa sovrassatura di carbonio. Tutto ciò porta ad una disomogeneità di resistenza meccanica. Essendoci delle modifiche in termini di caratteristiche meccaniche, le cricche tendono ad innescarsi nelle zone più deboli in termini di resistenza meccanica.
- acciai Bainitici: la struttura di questo acciaio è composta da ferrite alfa e carburi di ferro ( $Fe_3C$ ) con forma aghiforme. Questi tipi di acciai tendono ad avere un carico di rottura che non supera i 1000 MPa. Comparandolo all'acciaio perlitico, è più duro e più tenace. Esistono due tipologie di Bainite che sono quella superiore (dove le lamelle di cementite, all'interno del grano austenitico, sono orientate parallelamente a quest'ultimo) e quella inferiore (in cui sono presenti i precipitati di cementite all'interno del grano austenitico inclinati di circa  $60^\circ$ ).

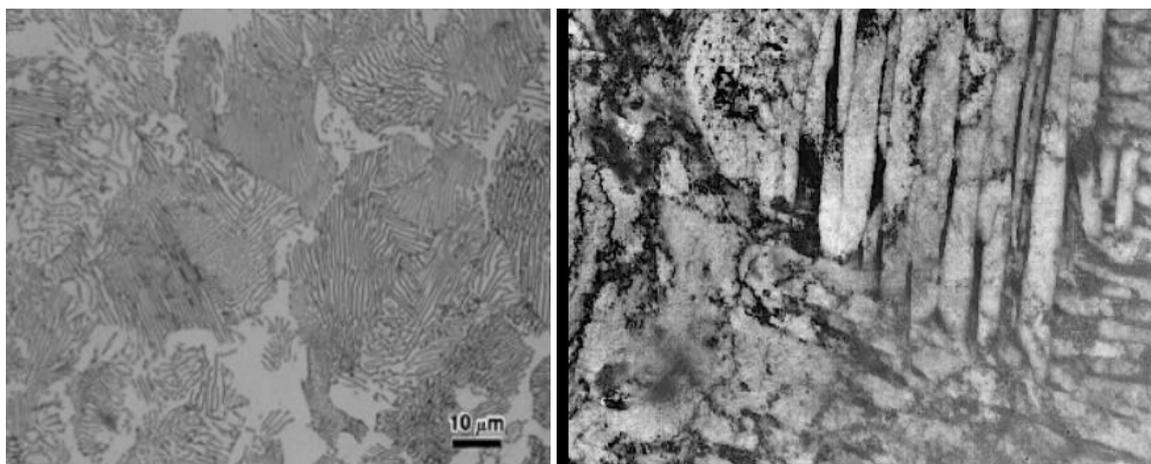


Figura 33) A sinistra, una struttura perlitica mentre a destra una struttura bainitica[38]

Gli acciai Bainitici presentano una resistenza a fatica e una resistenza allo snervamento più alta rispetto a quelli Perlitici e anche in termini di tenacità alla frattura ( $K_{IC}$ ) sono migliori rispetto a quest'ultimi (quasi il doppio). Parlando in termini di resistenza all'usura sono migliori, però, i perlitici rispetto che i bainitici. Alla fine di questo breve elenco di leghe ferrose, la classe dei perlitici risulta appropriata per questo campo

dell'ingegneria perché si opta per un materiale con un buon compromesso tra saldabilità, resistenza all'usura, resilienza e carico di snervamento.

## 6.2 MODALITA' DI PROPAGAZIONE DI UNA CRICCA

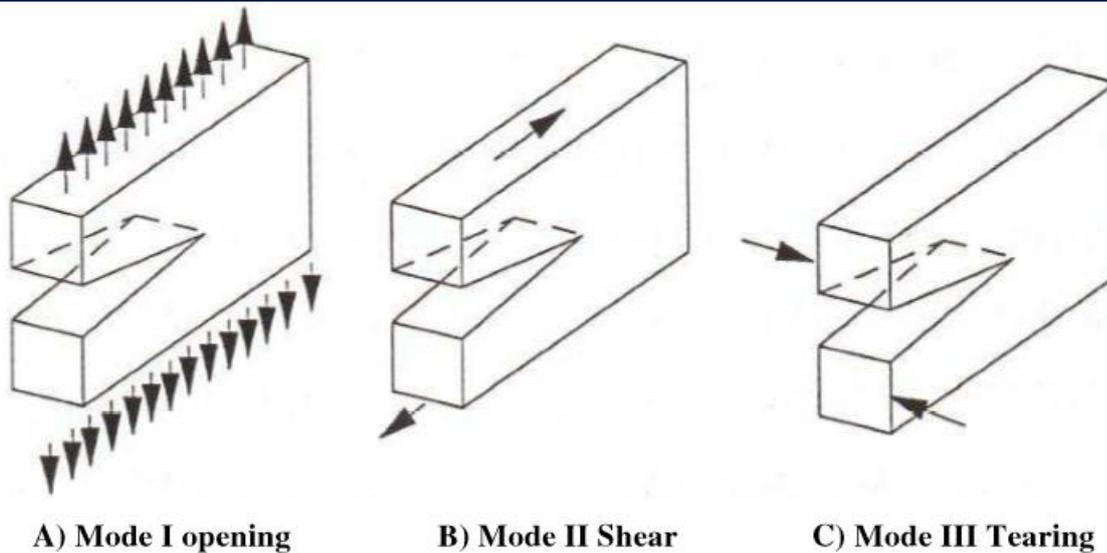


Figura 34) Modalità di propagazione della cricca.[8]

1°modo: Opening

Le tensioni sono dirette ortogonalmente alla direzione della cricca. Ovviamente questo tipo di tensione se fosse di trazione (come in figura) tende a propagarsi. Nel caso invece fossero di compressione, la cricca si chiude e non si ha la sua propagazione. Gran parte delle rotture dovute alla propagazione delle cricche sono riconducibili a questa.

2°modo: Shear

Le tensioni sono dirette in direzione parallele e longitudinali alla cricca e fanno sì che si abbia uno scorrimento tra lo strato superiore e lo strato inferiore.

3°modo: Tearing

Le tensioni sono dirette ortogonalmente alla propagazione della cricca. La propagazione della cricca è simile allo strappo di un foglio.

Il carico dovuto al passaggio del corpo volvente (ruota) genera uno stato di tensione multiassiale. In questo caso, la cricca tende a propagarsi principalmente nei modi 2 e 3 mentre il modo 1 difficilmente avverrà dato che il carico è totalmente di compressione (e quindi non di trazione). Anche se il modo 1 non contribuisce in modo rilevante alla crescita della cricca, dobbiamo tenere conto quando la testa della rotaia è coperta da qualche sostanza liquida. Un esempio potrebbe essere quando essa è in un ambiente umido e ciò potrebbe risultare pericoloso dato che il fluido ha la tendenza ad inserirsi/infiltrarsi nelle piccole asperità (fessure)

generate dalle cricche, esercitando una pressione piuttosto alta alle estremità della parete interna della cricca tale da far propagare la cricca al passaggio della ruota.

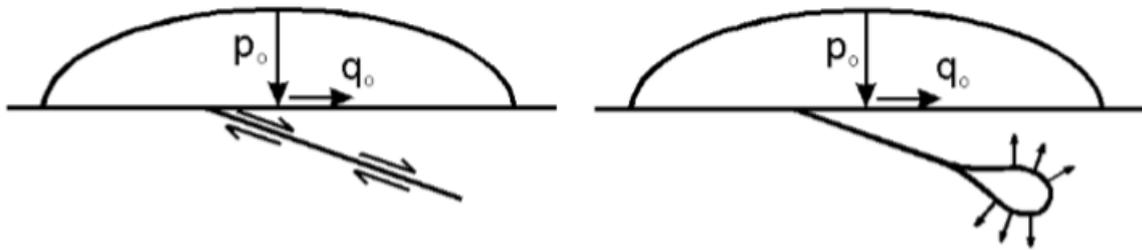


Figura 35) Illustrazione rappresenta il modo in cui un liquido agisce e contribuisce a causare la propagazione di una cricca, questo a causa della deformazione provocata dal passaggio della ruota.[8]

### 6.3 COMPONENTE ROTAIA

La rotaia, essenzialmente, è formata da tre parti che sono.

- FUNGO (comunemente detta TESTA): è a contatto con la ruota del veicolo. Deve essere abbastanza spessa da resistere all'usura.
- BASE: scarica la forza esercitata dal mezzo sul terreno d'appoggio.
- ANIMA (in inglese "WEB"): a metà della rotaia. Conferisce alla rotaia una buona rigidità alla flessione.

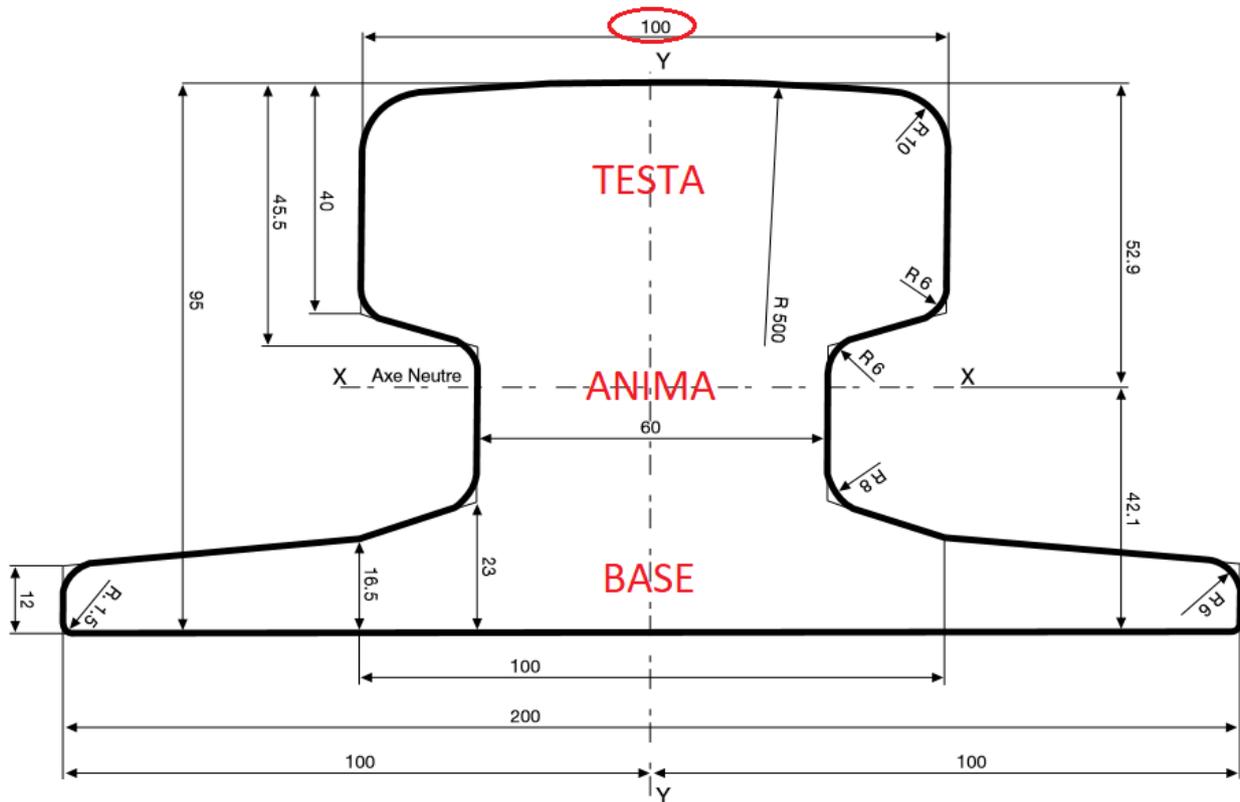


Figura 36) Sezione quotata seguendo la norma tedesca DIN 536 di una rotaia BURBACK A100 con indicate le sue componenti.[18]

La denominazione “A100” indica la larghezza della testa della rotaia.

Si fa un'ulteriore distinzione nella testa della rotaia, dato che la maggior parte dei problemi si trova esattamente in questa zona.

-CORONA: parte centrale che svolge il ruolo di pista principale dove rotola la ruota della rotaia. Esattamente in questa zona possono apparire alcuni difetti superficiali come gli Squats, gli Head Check, i White Etching Layer e gli Spalling.

-SPALLA: parte laterale della rotaia. In questa zona tendono a crearsi i Gauge Corner Crack/Check e gli Spalling;

-ANGOLO: (in letteratura anglosassone, “Gauge corner”) unisce la parte superiore con la parte laterale della rotaia. Insorgono, come difetti, le “Tongue Lippings” e gli “Shelling” in questa zona;

-GAUGE FACE: parte laterale che viene usata per evitare il deragliamento del veicolo. Esempio, se il treno tende a fuoriuscire dalla testa della rotaia, allora il bordino delle sue ruote si appoggeranno su quel lato, mantenendolo sulla rotaia. Nel caso in esame, la ruota non ha alcun bordino ma presenta una lieve bombatura sulla superficie di rotolamento. Chi svolge il ruolo di “contrasto” sono le due ruote poste ai lati della rotaia che ristabiliscono la corretta direzione del traslo.

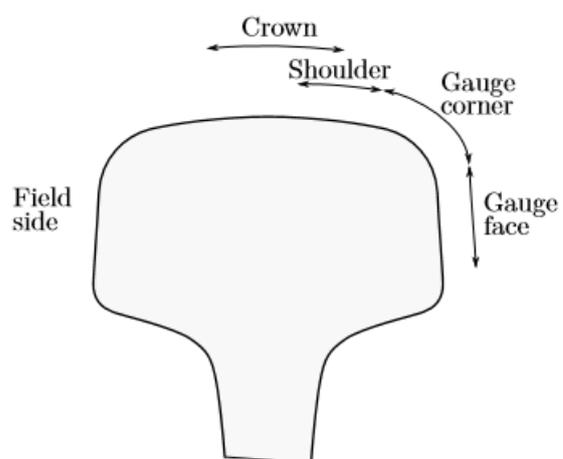


Figura 37) Rappresentazione delle componenti della TESTA della rotaia. [12]

## 6.4 TIPICHE ROTTURE DELLE ROTAIE

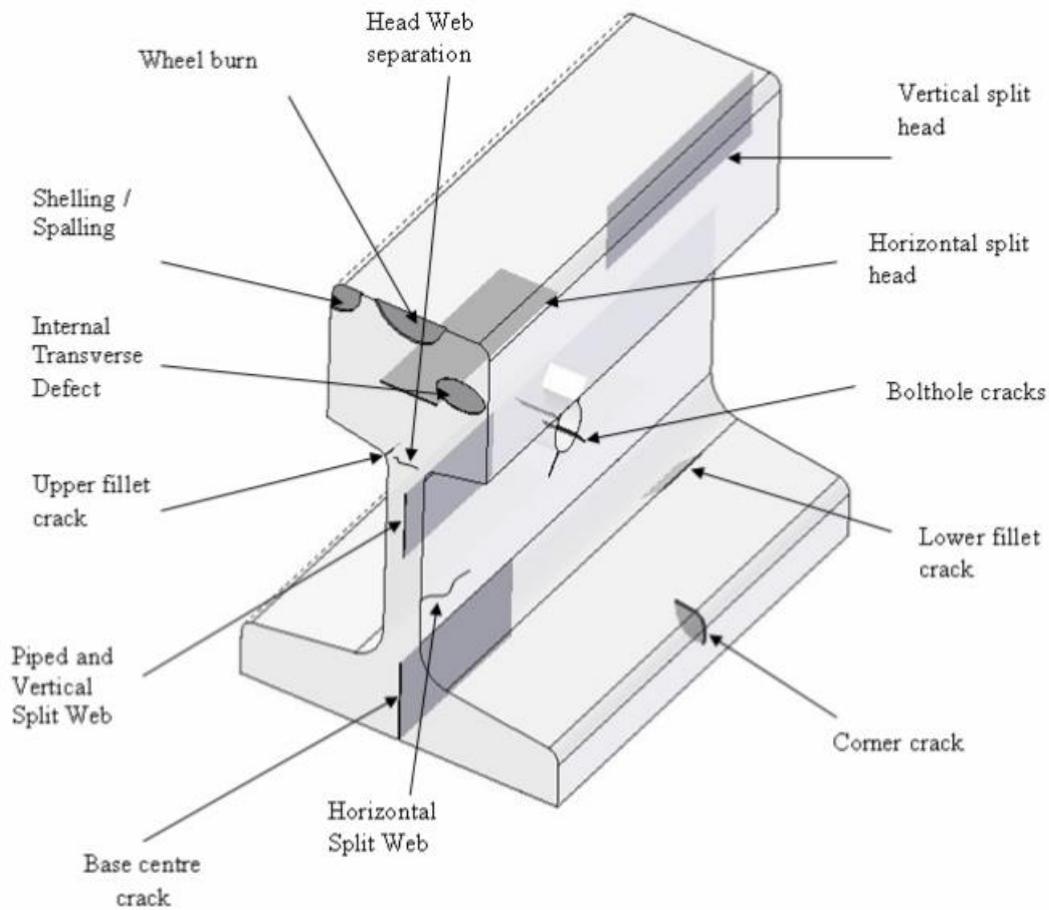


Figura 38) disegno qualitativo di dove potrebbero essere i vari difetti in una rotaia. [35]

Head checks (gauge corner cracking-GCC): sono i difetti più comuni presenti sulle rotaie. Esse sono delle cricche superficiali che si sviluppano sulla spalla della rotaia e sono causate da una combinazione di alte tensioni sia normali e sia tangenziali nel punto di contatto ruota e rotaia. Si fa una distinzione tra gli Head Checks e i Gauge corner cracking in base a dove insorgono rispetto al bordo. Se la cricca si trova al di sotto dei 10 mm dal bordo, allora è un gauge corner cracking, oltre questa distanza invece è un Head Checks. Sono comunque la stessa identica cosa, generate dalla stessa causa, con l'unica differenza che sono situate in punti differenti. I Gauge Corner Cracking appaiono quando ci sono delle forze tangenziali piuttosto alte che si instaurano quando il veicolo percorre una curva. L'inclinazione assunta da questa cricca dipende da quanto è grande la forza trasversale rispetto alla forza longitudinale

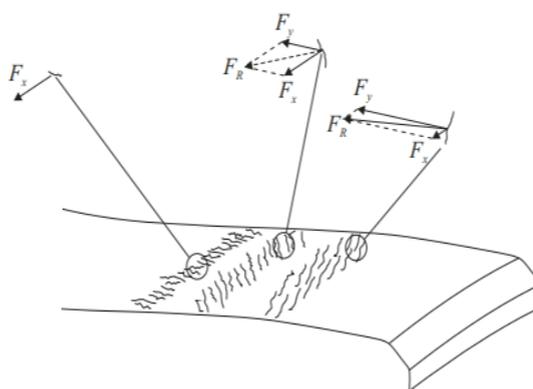
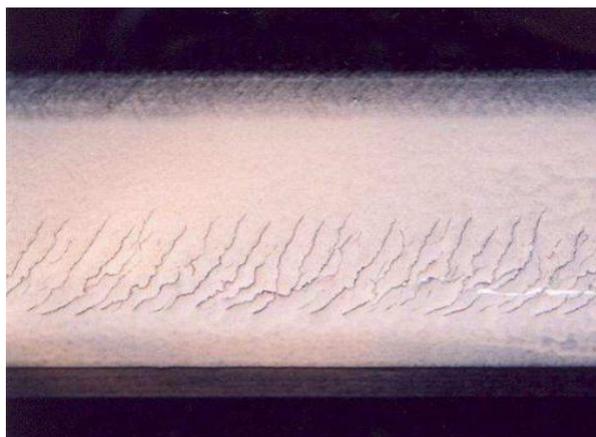


Figura 39) A sinistra, una tipica Gauge Corner cracking: si presentano come una fila di cricche sottili inclinate di 20 o 30°. [33]  
A destra abbiamo come sono inclinate le cricche in rapporto/funzione della forza trasversale e della forza longitudinale.

Squat: è un difetto superficiale comunemente presente nelle rotaie e nelle aree dove si esercitano delle grandi forze di trazione. Essa è caratterizzata da un avvallamento situato, in genere, al centro della testa della rotaia o sulla spalla (addirittura in un punto saldato della rotaia perché la struttura in sé ha subito una modifica interna del materiale a causa dell'alta temperatura raggiunta tramite il processo di saldatura). Tra l'altro si può notare la presenza di un punto nero che sta ad indicare l'inizio di questo fenomeno. Tutto ciò è dovuto ad una propagazione della cricca sottopelle che corrisponde ad un indebolimento del carico di rottura del materiale ma tende a svilupparsi gradualmente (ordine dei mesi o, addirittura, anni). La causa di questo difetto è l'eccessivo carico verticale applicato dalla ruota sulla rotaia.

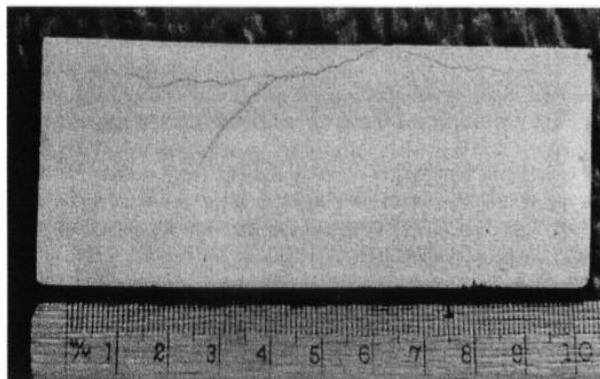


Figura 40) Immagine di uno Squat [11] e di come esso tende a propagarsi sotto la superficie della rotaia [6].

Wheel Burns defects: Questi difetti sono causati dallo slittamento della ruota sulla rotaia e ciò comporta un aumento della temperatura della superficie di contatto. A seguito di ciò, lo strato si raffredda velocemente e si ha una trasformazione martensitica. Ovviamente questo fatto comporta la formazione di una fase molto dura e fragile. Questo potrebbe causare l'innesco di una cricca che, in casi estremi, potrebbe addirittura propagarsi al di sotto della corona. Si potrebbe andare incontro a questo evento quando il veicolo effettua

delle manovre repentine (come, per esempio, una accelerazione troppo brusca della ruota motrice) oppure il coefficiente di aderenza si è abbassato a causa di una qualche contaminazione della rotaia.

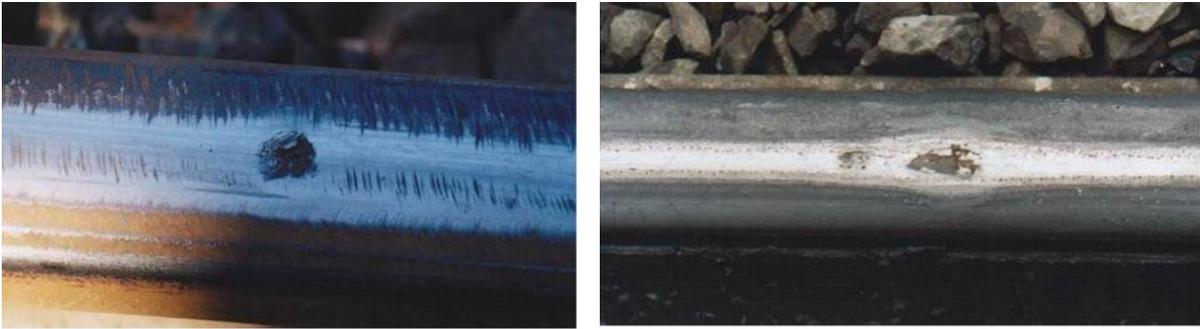


Figura 41) Esempi di Wheel Burns di piccola e media entità. Queste tendono solamente a far saltare o a rompere la superficie bruciata/imbrunita. Notiamo che, quando il Wheel Burns è di piccola entità, assomiglia ad un piccolo Squats (infatti si presentano sempre con una zona nera).[39]



Figura 42) Esempio di un Wheel Burns di dimensioni grosse.[39]

Se non si fa attenzione a questo fenomeno, si potrebbe avere una rottura verticale che attraversa per intero la rotaia.



Figura 43) esempio di frattura causata da un eccessivo strato martensitico talmente fragile da dar via ad una propagazione totalmente verticale.[23]

Spalling (flaking): Tradotto in italiano sarebbe “frammentazione”, non a caso, questo difetto corrisponde a dei piccoli crateri superficiali che avvengono sulla testa della rotaia. Ogni singolo cratere va poco in

profondità. Quando il veicolo passa sopra a questa zona, il contatto che avviene tra ruota e rotaia viene perturbato e questo si traduce in vibrazioni per la struttura.



Figura 44) A sinistra un esempio di Spalling [4]. Il difetto si propaga in direzione longitudinale alla rotaia e si presenta come una fila di piccoli crateri. [41]

Ovviamente, se non si prendono delle precauzioni contro questo difetto, si potrebbero avere dei problemi strutturali della rotaia. Il fatto che questi crateri sono poco distanti tra di loro, potrebbe creare un percorso preferenziale per la cricca.

Shelling: difetto che insorge sulla testa della rotaia (sia al centro che ai bordi). Ha una forma che ricorda vagamente il guscio della cozza (infatti il termine proviene dalla parola inglese "shell"). E' un fenomeno sub-superficiale della rotaia causato dalle alte tensioni di contatto e tende a insorgere attorno alle inclusioni interne (come la presenza di seconde fasi non-metalliche).

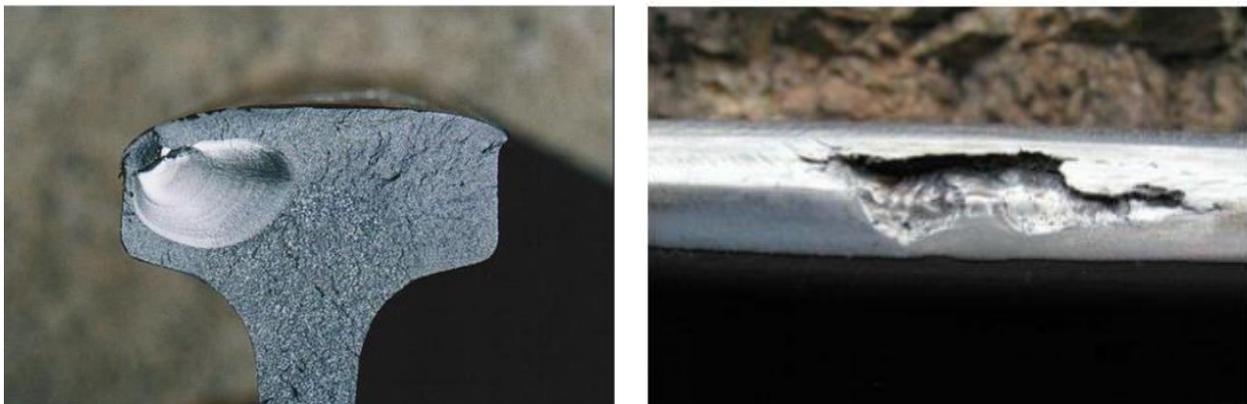


Figura 45) A sinistra, la tipica forma di rottura nota come Shelling [13] e a destra la spaccatura che si vede dall'esterno.[11]

Lo Shelling e lo Spalling sembrano la stessa cosa ma non lo sono affatto per alcuni dettagli. Lo Spalling è una frattura localizzata mentre lo Shelling è distribuito ma soprattutto esso nuclea all'interno della rotaia. Una prima distinzione potrebbe essere fatta in base al luogo in cui insorgono. Lo Spalling insorge sul bordo oppure in mezzo alla corona ma è più un fenomeno superficiale. Inoltre, tende ad avanzare al di sotto della superficie della rotaia piuttosto che avanzare in direzione della profondità. Lo Shelling, invece, nasce in

presenza delle inclusioni non-metalliche presenti nella rotaia. Questa rottura avviene più in profondità rispetto allo Spalling e il fattore responsabile di tutto ciò è una pressione hertziana eccessivamente alta.

Quindi la differenza tra i due è che lo Spalling è una frattura superficiale mentre lo Shelling è situato più in profondità rispetto all'altro e il suo innesco avviene in presenza di inclusioni. Cosa li accomuna sono le tensioni di contatto che sono molto alte, tali da causare questi cedimenti che, se non individuati prima, possono portare al deragliamento del traslo.

Tongue Lippings: letteralmente “bordi di lingua”. Sono delle sottili scaglie o, come dice il nome stesso, delle lingue di metallo provenienti dalla zona di passaggio della ruota sulla rotaia. Esse tendono a svilupparsi sul fianco della rotaia a causa di una cricca situata lungo il bordo della rotaia sottopelle.



Figura 46) esempi di Tongue lippings [4].



Figura 47) Presenza di Tongue lippings sui bordi di una rotaia di un'altra cartiera.

W.E.L.(White Etching Layer): tradotto in italiano sarebbe “strato bianco d'attacco” ed è un fenomeno di tipo termo-meccanico che coinvolge sia la rotaia ma ,soprattutto , la ruota. Consiste in un riscaldamento del materiale generato dall'attrito nel punto di contatto tra ruota e rotaia, che comporta una modifica della microstruttura dell'acciaio. Avviene tutto ciò quando il mezzo frena oppure quando la ruota slitta (o scorre) sulla rotaia. Dopo che il mezzo si è fermato, la ruota surriscaldata si raffredderà in maniera rapida, formando uno strato bianco, sottile e fragile che non è nient'altro che martensite. Affinché avvenga questa trasformazione involontaria/non voluta, la temperatura del materiale deve essere approssimativamente maggiore di 780°C

così da avere Austenite ( $Fe_\gamma$ ) e poi ,per avere martensite ,è necessario un rapido raffreddamento (al di sotto dei  $200^\circ C$ ). Questa tipologia di difetto non porta alla rottura della rotaia ma potrebbe fare da innesco

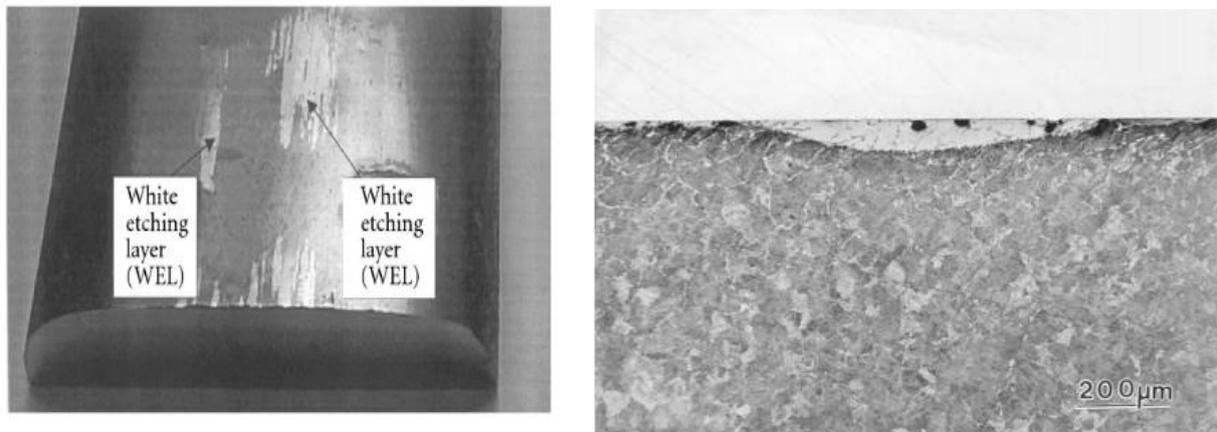


Figura 48) Esempi tipici di WEL sulla testa della rotaia. Essendo una fase dura e fragile rispetto al materiale composto della rotaia circostante, potrebbe innescare una cricca oppure creare un piccolo avvallamento dopo che è stata rimossa. [40]

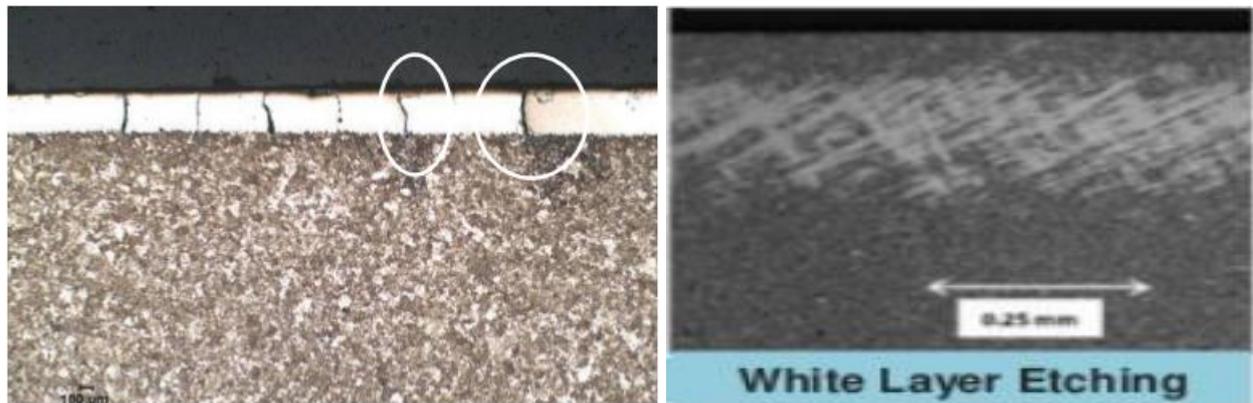


Figura 49) esempio di innesco cricca attraverso lo strato bianco della Martensite.[39]

PLASTIC FLOW: questa non è una vera e propria rottura ma, bensì, una deformazione plastica della rotaia. E' una deformazione plastica che riduce di altezza la testa del profilo e fa espandere lateralmente la rotaia. Tutto questo è causato da grandi pressioni di contatto ma, soprattutto, da una scorretta scelta del tipo di acciaio. Una possibile soluzione potrebbe essere quello di usare un acciaio, avente un carico di snervamento più alto o con un allungamento a rottura più basso possibile, in modo da fermare l'avanzamento del bordo della rotaia.

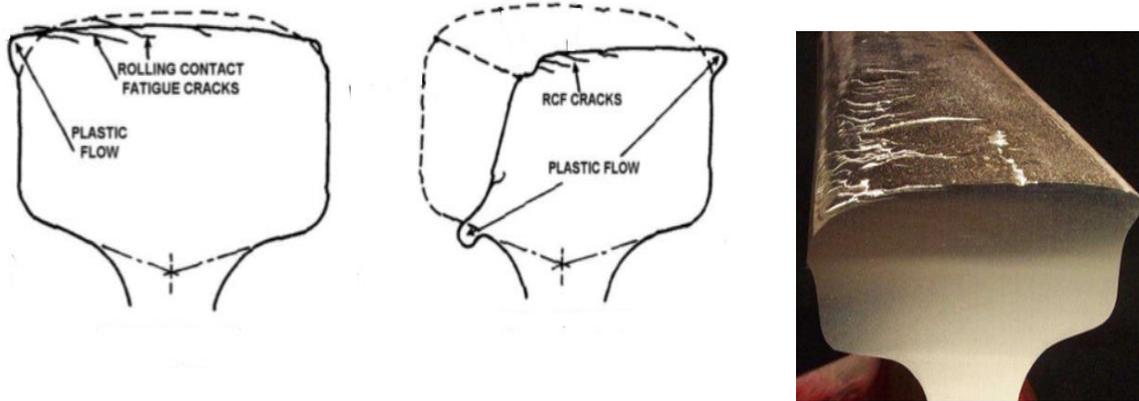


Figura 50) Esempio di Plastic Flow. [11] A destra si nota una dilatazione laterale della testa ai bordi. [11]

TACHE OVALE: dal francese “macchia ovale”. E’ un difetto trasversale situato al centro della testa, ad una profondità di circa 10-15 mm, causato probabilmente da una eccessiva quantità di idrogeno intrappolato/presente nella rotaia (o nella saldatura). Durante il ciclo di produzione del “blumo”, si effettua un trattamento termico noto come “deidrogenazione”, che consiste nel mantenere la sua temperatura, poco al di sopra dei 180 °C, per un po’ di tempo (circa due ore), così da far fuoriuscire tutto l’idrogeno imprigionato al suo interno. Se questo processo termico non è sufficiente, l’idrogeno tende a collocarsi nei bordi del grano o nelle inclusioni e si lega con altri atomi di idrogeno (così da dar vita ad idrogeno molecolare “H<sub>2</sub>”). Quando insorge questo difetto, tende a propagarsi lungo il piano verticale del mezzo. La rottura di questo difetto si propaga grazie alle sollecitazioni termiche, alle tensioni residue e quelle dovute a momenti flettenti. Le tensioni generate dal contatto tra ruota e rotaia non contribuiscono in particolar modo a questo fenomeno dato che questo difetto insorge dal cuore della rotaia. Vengono individuati tramite sensore ad ultrasuoni.

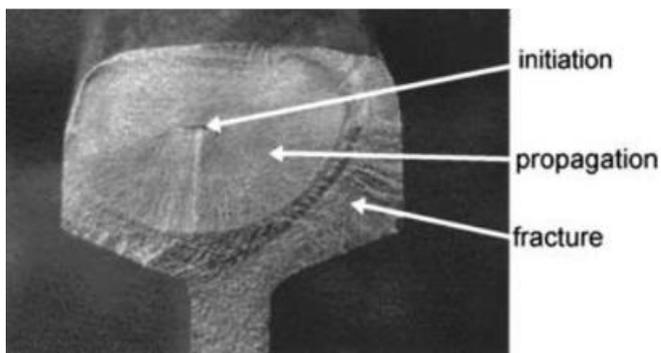


Figura 51) Tache ovale: al centro della testa, notiamo la nucleazione del difetto. Poi, a causa di altre tensioni di trazione dovute al ciclo di lavoro, a quelle generate da sbalzi termici e da quelle dovute a momenti flettenti variabili, tende ad avanzare fino a che non si ha la completa frattura della rotaia. Possiamo notare la zona di nucleazione che presenta un aspetto lucente e liscio mentre, al di fuori di questa zona, la superficie si presenta ruvida. [42]

USURA: questo fenomeno appare ogni volta che c'è un rotolamento (o strisciamento) relativo tra due corpi come, nel caso in esame, tra le ruote del traslo e la rotaia. Il suo contributo diventa rilevante/importante quando, oltre ad avere una forza normale e una forza tangenziale elevata, si hanno elevati valori di scorrimento. Infatti, la cresta superficiale della rotaia, evidenziata nelle foto, è completamente lucida. Si vede chiaramente che c'è un qualche problema legato all'usura.



Figura 52) Queste due immagini mostrano la “pista” ,completamente lucida, lasciata dal traslo sulla testa (si notano le scaglie d'acciaio a lato provenienti dalla testa).

## 6.5 TECNICHE PER PREVENIRE LA PROPAGAZIONE DELLA CRICCA

Esistono vari modi per prevenire la propagazione della cricca sulla superficie della rotaia che consistono nel lavorare, tramite appositi macchinari, la testa della rotaia. Esse permettono di prolungare l'uso della rotaia e di ridurre i costi di mantenimento. Queste tecniche sono:

rettifica/fresatura: consiste nell'andare a spianare ulteriormente la testa della rotaia così da avere una nuova superficie esente da cricche e da varie irregolarità. La rettifica consiste nel profilare la superficie della testa della rotaia in modo da rimuovere l'eventuale presenza di difetti che, se trascurati, potrebbero portare in un prossimo futuro al collasso della rotaia.



Figura 53) esempio di fresatura della superficie della rotaia.[4]

-la smerigliatura: consiste nel passare una mola smerigliatrice sulla testa e per rimuovere lo strato superiore della rotaia. Questo metodo è meno invasivo rispetto alla rettifica.



Figura 54) esempio di smerigliatura che consiste nel mettere a contatto un disco che ruota ad una certa velocità e che trasla in direzione longitudinale alla rotaia [4].

## 6.6 COME INSORGE E SI PROPAGA LA CRICCA

Nella prima fase, quando la cricca insorge, tende a svilupparsi lentamente sulla superficie in direzione della deformazione plastica (con un'angolazione di circa  $15^\circ$  o  $25^\circ$  rispetto alla superficie di rotolamento). La propagazione del difetto è dovuta sia al “ratcheting” sia alle deformazioni plastiche ridotte dalle elevate tensioni superficiali.

Nella seconda fase, in un ambiente secco, la cricca si propaga perché la tensione all'apice della cricca è alta e la velocità con la quale avanza aumenta (ordine di grandezza 3mm in profondità). Invece, in un ambiente umido, la cricca si dilaga più in profondità (si parla addirittura di 7 o 15 mm).

Nella terza fase, una volta che la cricca ha raggiunto una profondità di circa 8 o 15 mm dalla “cresta”, essa non avanzerà più a causa delle sollecitazioni causate dal contatto di rotolamento ma, bensì, da altrettante

tensioni come quelle termiche, di flessione e quelle residue createsi durante il ciclo di lavorazione. Saranno queste a dirci se la cricca proseguirà in profondità della rotaia o se sarà diretta in superficie.

Come quarta ed ultima fase, la cricca si è talmente propagata a tal punto che la sezione resistente residua non è più in grado di sostenere i carichi di esercizio e si ha quindi una frattura fragile della rotaia.

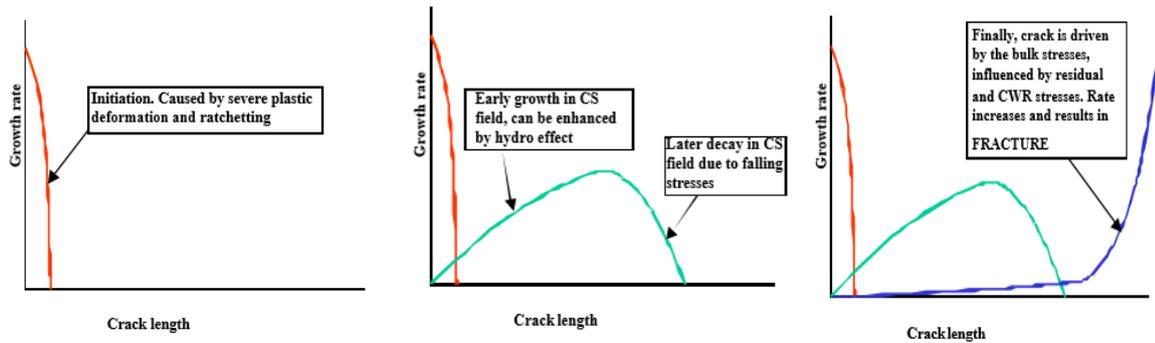


Figura 55)Grafico qualitativo delle fasi di propagazione della cricca e da cosa è qual è la causa scatenante.[21]

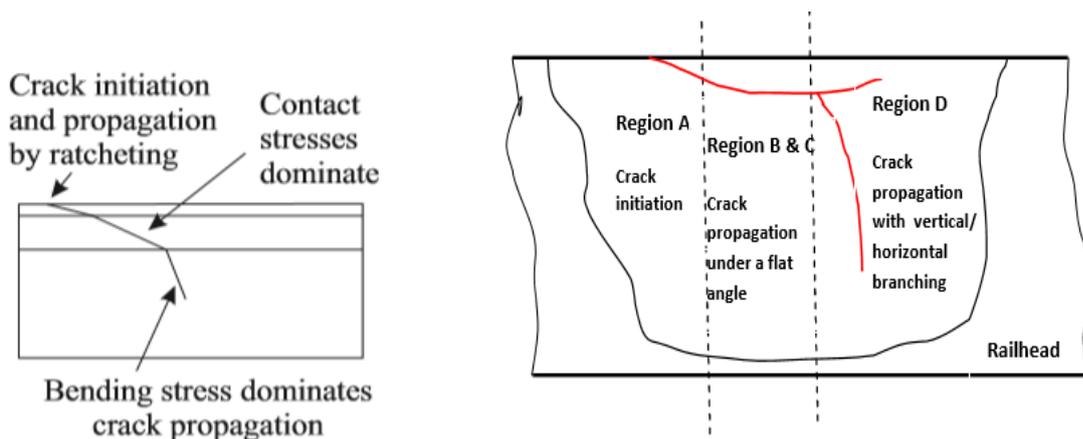


Figura 56)A sinistra, uno schizzo qualitativo di quali siano le cause che portano la cricca a nucleare e a propagare. A destra vediamo come si orienta la cricca all'interno della rotaia. [13]

## 6.7 SHAKEDOWN

Esistono quattro tipologie di risposte elasto-plastiche dovute a carichi di cicli-ripetuti:

- Perfectly Elastic: la massima tensione raggiunta dal singolo ciclo non supera il carico di snervamento. Il comportamento assunto dal materiale è puramente elastico e non si ha accumulo di deformazioni.
- Elastic Shakedown: rappresenta il limite sotto la quale non si verifica la deformazione plastica dovuta al ripetitivo carico (al rotolamento). Si ha una prima apparizione del flusso plastico da qualche parte all'interno della rotaia. Comunque, a causa dello sviluppo delle tensioni residue, si viene a creare uno stato ciclico di regime perfettamente elastico. Per questo motivo questa tipologia di risposta è nominata Elastic Shakedown. La tensione massima supera il carico di snervamento ma, in fase di scarico, la risposta del materiale è ancora di tipo elastica.

c) Plastic Shakedown: essendo il componente sottoposto a carichi più alti, si supera il limite elastico dello shakedown. Ogni ciclo di tensione porta ad una deformazione elastica e plastica(elasto-plastica). Nella condizione di regime si presenta uno stato di deformazione ciclicamente chiuso, che corrisponde ad una plasticità ciclica. Per questo motivo, questa risposta viene chiamata "Plastic Shakedown".

d) Ratchetting (o Incremental collapse): la tensione ha superato il limite plastico di shakedown e, ad ogni ciclo di carico, corrisponde una deformazione plastica che si accumula man mano che aumentano i cicli. Questa risposta è quella deleteria per la resistenza strutturale del materiale. Infatti, i meccanismi d'usura e del degrado superficiale della rotaia sono attribuiti a questo comportamento. Il materiale "criccato" tende a deformarsi fino a che non avviene la sua rottura. Oltre a ciò, il materiale potrebbe essere danneggiato con l'eventuale presenza di detriti d'usura che potrebbero fare da indentazione oppure i continui cicli di carico possono generare altri difetti simili a delle crepe che possono propagarsi sia in profondità o in superficie (ad esempio, lungo la testa della rotaia, possono nascere delle cricche superficiali ed oblique che crescono ad ogni ciclo).



## 6.8 DIFFERENZA TRA SHAKEDOWN & RATCHETTING

Shakedown: Se il carico ciclico applicato è più grande del limite elastico (o del primo carico di snervamento) ma inferiore del limite del carico di rottura, allora si ottiene quello che è conosciuto come shakedown, dove la deformazione plastica cessa dopo un numero di cicli iniziali e la risposta riassume un comportamento puramente elastico con la presenza di tensioni residue.

Ratchetting: Il materiale può sopportare un po' di incrudimento ma non all'infinito. Questa rottura si verifica quando il materiale, con la quale è fatta la rotaia, accumula tanta deformazione fino ad un valore critico. Dopo di che si ha il suo cedimento, dato che il materiale si è deformato fin troppo. Se la tensione del carico ciclico applicato è più grande del "shakedown limit" la risposta risulterà sempre plastica e, conseguenza di ciò, si avrà sempre un accumulo della deformazione (in una direzione).

In parole semplici, il Ratcheting è lo stadio ultimo dello Shakedown, cioè quando la cricca si propaga ogni qualvolta che lo strato di materiale viene sollecitato tramite questo contatto.

La causa principale del cedimento delle rotaie, sia in ambito ferroviario sia in ambito del trasporto pesante, è dovuta essenzialmente alla "fatica" che si crea lungo la testa di essa. La teoria che lega il rotolamento di un corpo e la fatica è noto come Rolling Contact Fatigue (abbreviato "RCF").

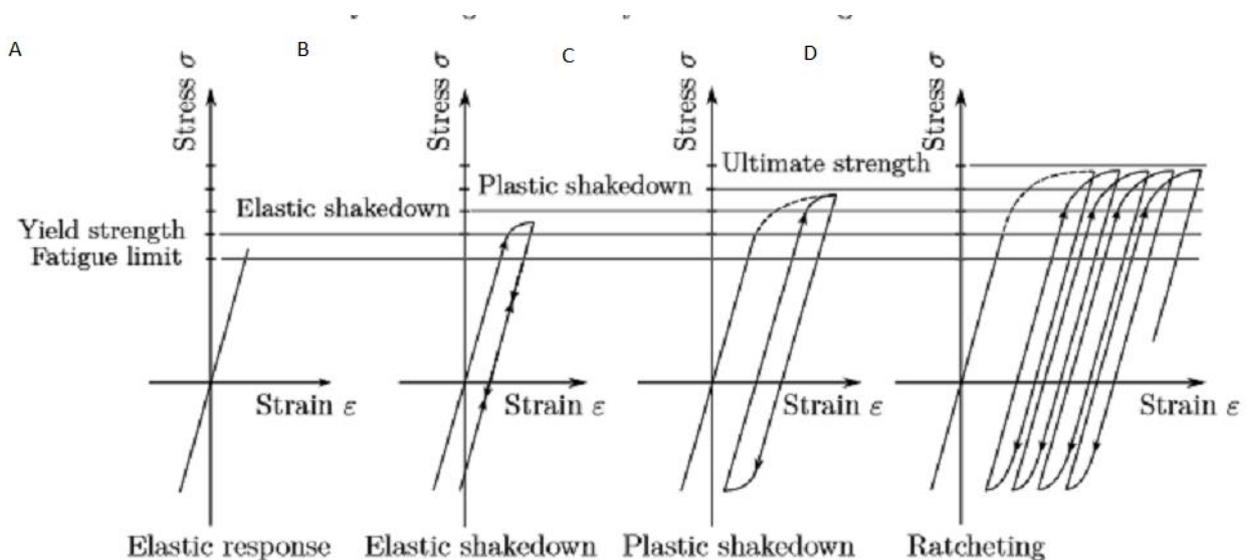


Figura 57) Diagramma Tensione-deformazione. In base al valore della tensione raggiunto, il materiale risponderà in un certo modo. [12]

## Capitolo 7 PROBLEMA RISCONTRATO SULLA ROTAIA

Con la presente tesi, sono state scattate delle fotografie ritraenti la giunta della rotaia dello stabilimento di Verzuolo della BURGO precedentemente recuperata con una saldatura.



Figura 58)Foto che ritraggono la rottura propagata lungo tutto il cordone della giunta.

La rotaia presenta una netta frattura nella giunta saldata che parte dalla parte superiore e tende a propagarsi verso la base di quest'ultima trasversalmente.

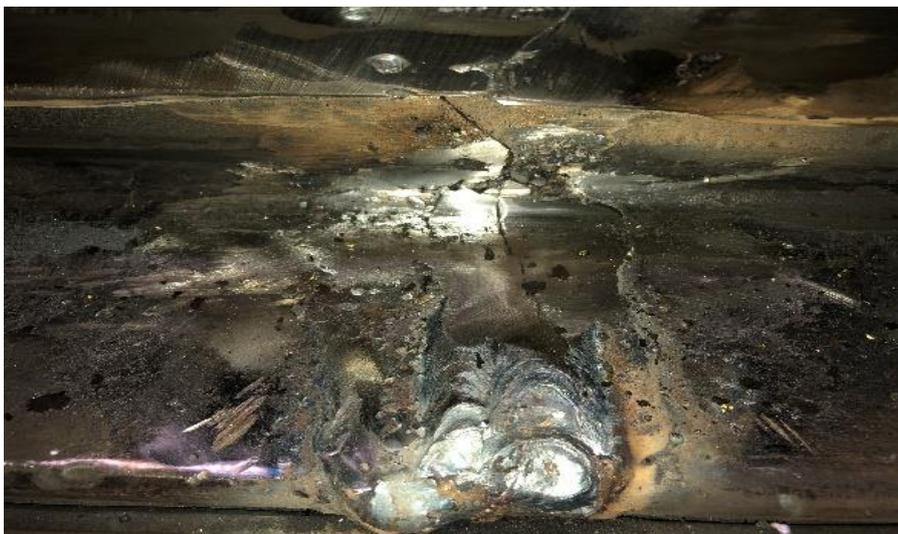


Figura 59)Altra foto ritraente la rottura della rotaia da un'altra angolazione.

Tutto ciò avviene a metà della rotaia, in corrispondenza del punto in cui il traslo si ferma e scarica i rotoli per inviarli alla zona di scarico merci. Se non si fa nulla al riguardo, potrebbe creare il collasso di una parte della rotaia e, di conseguenza, vedere l'intero traslo uscire e creare ingenti danni. La rottura è dovuta al

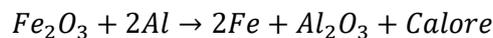
mancato serraggio delle viti in corrispondenza del canale di scarico. Quindi, essendo quest'ultime poco tirate, la rotaia era meno bloccata ed è più soggetta a vibrazioni causate dal passaggio del traslo.

Per ovviare a questo problema si potrebbe optare per le seguenti soluzioni:

- sostituire totalmente la rotaia ma che risulterebbe costoso per l'azienda;
- profilare la testa della rotaia in modo da rigenerare la superficie d'appoggio di quest'ultima ed eventualmente togliere possibili cricche e difetti presenti sulla testa (in modo da prevenire possibili problemi). Così facendo si prolunga di molto la vita utile della rotaia ma non è applicabile dato che il macchinario che effettua questa operazione è piuttosto ingombrante.

Per la realizzazione della giunta termica è stato adottato, come processo di fusione, l'Alluminotermia per la sua semplicità e il tempo di impiego che esso impiega. Dopo che è insorto il problema della cricca, gli addetti alla manutenzione della rotaia hanno recuperato la parte danneggiata risaldandola con una saldatura a filo continuo, in modo da non creare ulteriori impedimenti al traslo e riavvitato le viti che bloccano la rotaia.

L'Alluminotermia è un processo di saldatura che consiste nel fondere le estremità di due rotaie consecutive facendo sciogliere un lingotto di alluminio tramite un cannello. La reazione avviene all'interno di un crogiolo riempito di materiale refrattario in modo da contenere la fonte di calore sviluppatasi in questo processo e l'eventuale fuoriuscita del materiale fuso. Il cannello, oltre a dar via alla reazione chimica, serve da preriscaldamento dello stampo. In cima viene posto un imbuto per un miglior travaso. Questo processo chimico è noto come "processo Goldschmidt" ed è una reazione chimica fortemente esotermica che viene riportata di seguito:



Perché avvenga la seguente reazione, bisogna usare la "termite" che è una miscela di polvere incendiabile che, se riscaldato, riesce a raggiungere temperature oltre i 3000 °C. La polvere in questione è un mix di magnesio e alluminio. Alla fine della saldatura, l'alluminio, essendo un forte ossidante, si è unito all'ossigeno presente nell'ossido di ferro presente sulle teste delle due rotaie e si è trasformato in una scoria che verrà successivamente rimossa. Rimuovendo lo stampo avremo, come risultato finale, l'unione delle due rotaie tramite il Ferro puro. Ovviamente, prima di effettuare questa saldatura, bisogna prima pulire le teste delle rotaie dalla presenza di impurità e avvicinarle in modo da ridurre lo spazio vuoto tra una rotaia e un'altra. Il principale vantaggio di quest'ultimo è che non occorre una mano esperta di saldatura come accade con il filo continuo. Possono sfortunatamente verificarsi dei difetti di tipo strutturale alla fine di questo processo. Un esempio sono le possibili presenze di "soffiature" che non sono altro che delle inclusioni gassose presenti nel materiale refrattario del crogiolo (si potrebbe avere ciò perché il crogiolo ha un po' di umidità presente in sé ed è per questo che bisogna essiccare). Un altro possibile difetto potrebbe essere la presenza di "inclusioni di scoria" che avvengono quando il tappo auto-fondente del crogiolo si è fuso prima ancora che la colata si sia solidificata (cioè il metallo fuso fuoriesce dal crogiolo presentando nella parte bassa di sé, il ferro, mentre in alto si presenta la scoria di alluminio essendo questa più leggera). Avviene tutto ciò perché

l'Alluminotermia non è ancora completata e sia il gas e sia la scoria rimangono intrappolati all'interno dell'acciaio solidificato.

Saldatura a filo continuo: tecnica che sfrutta la continua fusione di un filo conduttore in tensione, avvolto in una bobina e accompagnata da una portata di gas inerte proveniente da una bombola. Il gas ha la principale funzione di proteggere il cordone di saldatura dalla presenza di ossigeno circostante a quel punto. I gas utilizzati per questa tecnica sono l'anidride carbonica "CO<sub>2</sub>" e l'Argon "Ar". L'Argon è un gas nobile che non reagisce ed è più pesante dell'aria, ideale per spostare la massa d'aria circostante al bagno di fusione. L'anidride carbonica, mescolata assieme all'Argon, permette una maggiore profondità di saldatura del giunto ma è sconsigliabile quando si deve saldare acciai fortemente legati o acciai delle quali si deve avere un occhio di riguardo al tenore di carbonio e di altri elementi chimici. Lo svantaggio è il dover lavorare in un ambiente chiuso, perché la presenza di agenti esterni come il vento fa sì che i gas di protezione vengano spostati dalla zona di saldatura e non favoriscano più la protezione voluta.



Figura 60) Confronto tra una giunta realizzata con l'alluminotermia e un'altra usando la saldatura a filo continuo. Si riesce a riconoscerle in base alla morfologia della linea di giunzione. In quella di sinistra, si nota uno strato uniforme del cordone (caratteristico dell'alluminotermia), mentre a destra, è inconfondibile la tipica linea di giunzione realizzata con il filo continuo (tra l'altro si vedono piccoli schizzi solidificati in basso).

La saldabilità è la tendenza di un materiale a produrre una certa microstruttura e un certo comportamento meccanico simile al materiale di base. Si pone particolare attenzione a questa tecnica perché potrebbe creare un cordone di saldatura difettoso e, quindi, essere un punto debole per la rotaia.

Un aspetto da non trascurare è il tipo di acciaio utilizzato per la saldatura. Infatti, un acciaio fortemente legato risulta non idoneo per un processo di saldatura mentre un acciaio basso/medio legato potrebbe essere adatto.

Un parametro per capire se un acciaio è facilmente saldabile o meno è il "Carbonio equivalente" dato dalla seguente formula empirica:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Più il  $C_{eq}$  è alto e più risulta difficile la saldabilità. Se il  $C_{eq}$  è inferiore a 0,25%, allora è possibile saldare l'acciaio. Se fosse maggiore a 0,5% allora la lega non è saldabile. Nel caso in cui risultasse nel mezzo a questi due valori è ancora possibile saldare a patto di prendere delle particolari precauzioni. I valori 0,25% e 0,5% sono di riferimento, cioè che altre norme tecniche potrebbero considerare questi valori da 0,25% a 0,2% e

0,5% a 0,6%). Il motivo per cui è stata fatta questa breve descrizione sulla saldabilità e sul parametro  $C_{eq}$  è perché, se la saldatura non viene effettuata in maniera corretta o il materiale adottato non è idoneo, possono avvenire delle cricche interne al cordone di saldatura. Si fa, di seguito, la distinzione tra:

- Cricche a caldo: nella zona saldata si formano delle crepe generatesi durante la solidificazione. La colpa potrebbe essere attribuita alla presenza di impurezze come il fosforo e/o lo zolfo che, avendo una temperature di fusione molto bassa rispetto all'acciaio, tendono a solidificarsi per ultimi e a lasciare dei vuoti.
- Cricche a freddo: appaiono quando è avvenuta la completa solidificazione del giunto saldato. Probabilmente sono dovute dalla presenza di idrogeno, di tensioni residue e da seconde fasi particolarmente fragili.

Quando si è presentata la cricca, si è intervenuto recuperando lo strato danneggiato saldandolo e molandolo in modo da togliere eventuali sbavature nate dalla saldatura.



Figura 61) Foto rappresentante la giunta recuperata grazie ad una saldatura a filo. Si nota il segno della molatura sulla corona della rotaia per renderla più liscia.

Un altro grosso problema che è stato riscontrato è l'eccessiva usura che si ha sulla corona della rotaia che è evidente dalla presenza di pezzi d'acciaio a forma di scaglie. Probabilmente è causata sia da una forza di trazione eccessivamente elevata ma, soprattutto da una forza peso



Figura 62) La presenza di queste scaglie denota l'eccessiva usura da parte del contatto tra ruote e rotaia.

---

## Capitolo 8 ANALISI DEI RISULTATI

---

Per la valutazione delle forze agenti sulle rispettive ruote, è stato necessario modellare l'intero traslo in tre differenti corpi. Tutto ciò viene fatto per trovare il baricentro dell'intero sistema, utile per individuare il punto dove applicare la forza peso e la forza d'inerzia (quest'ultima presente durante le fasi di accelerazioni/decelerazione). La velocità massima dell'impianto è stata ottenuta tramite la normativa tecnica "F.E.M. 9.851" (come anche l'accelerazione). Durante questa fase si è imposto un coefficiente d'arresto che interviene sull'accelerazione del traslo in caso di emergenza/guasto. La ruota 1 viene messa in rotazione dal motore asincrono tramite un riduttore a ruote dentate coniche. Invece, La ruota 2 è folle (serve solo d'appoggio).

---

### 8.1 DATI MOTORE

---

Innanzitutto, il motoriduttore usato per lo spostamento del traslo è formato da:

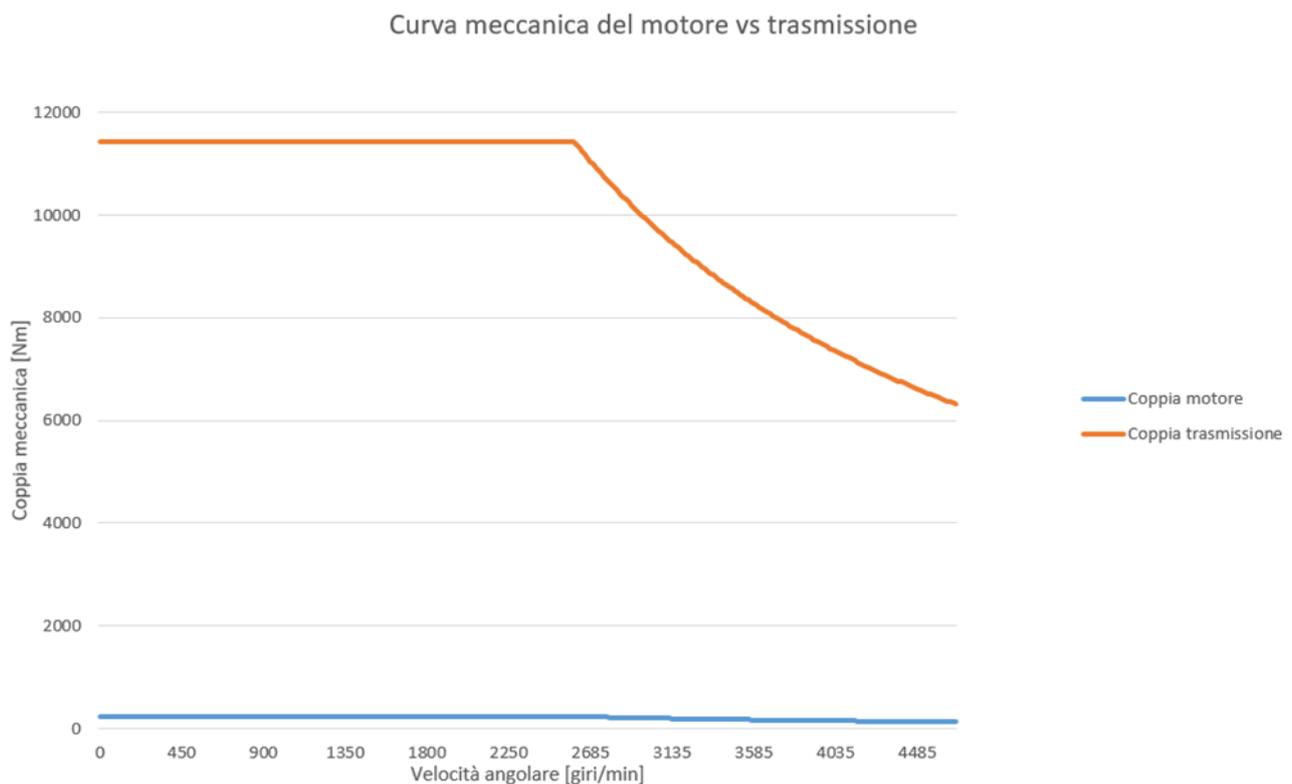
- un SEW eurodrive KA127T AM200 che è un riduttore a denti conici con rapporto di trasmissione ( $i$ ) pari a 47,58 ;
- un motore asincrono trifase della ABB modello "3GAA202420-AEK" con i seguenti dati:
  - Potenza nominale( $P_n$ ): 37 kW;
  - Coppia nominale all'albero ( $C_n$ ): 240 Nm;
  - Coppia massima all'albero ( $C_{MAX}$ ): 360 Nm;
  - Coppia di frenata all'albero ( $C_{brake}$ ): 250 Nm;
  - Numero di giri all'albero nominale ( $n_n$ ): 1475 Rpm;
  - Rendimento ( $\eta_{mot}$ ): 93,4%;
  - Rapporto di trasmissione ( $i$ ) : 47,58;
  - Frequenza di alimentazione ( $f$ ): 87 Hz;
  - Numero di poli magnetici ( $p$ ) : 4;
  - Collegato a stella; (per questo la frequenza è di circa 87 Hz e non 50 Hz);
  - Corrente nominale: 54 Ampere;
  - Rapporto tra la Corrente di spunto e la corrente nominale( $I_s/I_n$ ): 7,10 ;
  - Tensione nominale ( $V_n$ ): 500 Volt;
  - Fattore di Potenza( $\cos \varphi$ ): 0,85;

Il motore trascina l'albero d'ingresso del riduttore e mette in rotazione l'albero d'uscita collegato alla ruota del traslo. La Coppia nominale qua sopra indicata è costante, rispetto al numero di giri, fino ad una frequenza pari a 87 Hertz (che rappresenterebbe il "punto di ginocchio" del motore). Oltre questo valore, per motivi di

---

regolazione (deflussaggio), la coppia decresce con andamento iperbolico in funzione del numero di giri (potenza costante). L'albero all'uscita della trasmissione, che è collegato direttamente alla ruota del traslo, ha un numero di giri molto basso (pari a 31 rpm) perché ci permette di avere una coppia piuttosto elevata all'uscita, ideale per mettere in moto un sistema di grosse dimensioni e per vincere grandi inerzie. Il rendimento  $\eta_{rid}$  del solo riduttore è stato assunto pari a 1 per motivi di semplicità di calcolo e poi perché non vogliamo depurare la coppia all'uscita della ruota motrice e, di conseguenza, non ridurre la forza tangenziale  $F_1$ . In genere, se non viene dato il corretto valore del rendimento, viene ipotizzato pari a "0,9", in modo da considerare una frazione di potenza persa per attrito e quant'altro.

Bisogna a questo punto, riportare l'andamento della coppia motrice "Cm" in funzione del numero di giri (o della velocità angolare). La coppia massima è il massimo valore che il nostro motore può fornire (in genere è compreso tra l'1,5 o le 2,5 volte la coppia nominale) ma questo corrisponderebbe anche essere in condizioni limite con la stabilità del motore. (sono in corrispondenza del massimo scorrimento, guardare figura). Essendo il motore controllato a sua volta da un inverter, la coppia massima coincide con la coppia di spunto ed assumere il seguente andamento.



La coppia di frenatura è la coppia adottata in caso di una qualsiasi emergenza, una scelta non consigliata dato che si surriscalderebbe troppo il componente e le guaine dei fili non li isolerebbero più a dovere. Tra le coppie qui sopra elencate, ci interessa per i nostri calcoli la coppia nominale che sarebbe il valore fornitoci dall'albero/all'uscita del motore in condizioni tali da non surriscaldarsi troppo. Quindi, quando il traslo avanza ad una velocità normale, il motore applica una coppia di 240 Nm ad un numero di giri di 1475 giri al

minuto che, a loro volta, verranno modificati in base al rapporto di trasmissione del riduttore. Con questi dati è possibile calcolare le grandezze e d'uscita (come la coppia e la velocità angolare) del riduttore utili per la valutazione delle forze agenti sul sistema.

$$i = \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}}$$
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{C_{out}\omega_{out}}{C_{in}\omega_{in}} = \frac{C_{out}}{C_{in}i}$$
$$C_{out} = \eta C_{in}i$$

I dati d'uscita sono i seguenti:

- Coppia nominale esercitata sulla ruota: 11419,2 Nm ;
- Coppia di spunto esercitata sulla ruota :17128,8 Nm;
- Numero di giri della ruota :31 rpm che corrispondono ad una velocità angolare di circa 3,25 rad/sec.

Inoltre, è importante sapere la velocità angolare dell'albero-motore perché possiamo capire in che punto della caratteristica del motore ci troviamo (cioè se siamo in un tratto a coppia costante o nel tratto a potenza costante). Il punto che delimita i due campi di funzionamento è chiamato "punto di ginocchio" che corrisponde ad un numero di giri pari a 2598 giri al minuto (riconvertendoli in Hertz si ottiene 87 Hz). Il punto di funzionamento viene dato dalla velocità impostata, cioè i 100 m/min che, riconvertendolo in numero di giri del motore è di circa 2163,6 rpm e quindi, essendo al di sotto del numero di giri del "ginocchio", possiamo confermare che il motore lavora a coppia costante.

## 8.2 CINEMATICA DEL TRASLO E VALUTAZIONE DELLA COPPIA NECESSARIA

In fase di realizzazione, la ditta SEW ha progettato il motoriduttore in modo tale che l'impianto viaggiasse ad una velocità massima di 120 m/min (cioè 2 m/s) ma, essendo l'impianto vecchio, la BURGO/SICMA ha deciso di abbassare questa velocità a 100 m/min. La rotaia dove si trova il traslo è lunga circa 77 metri ma, essendo la posizione di carico/scarico dei rotoli il punto dove si ha la cricca del giunto saldato, che è esattamente a metà di esso, andremo a diagrammare il tutto in questo tratto della rotaia. L'accelerazione dell'impianto è di  $0,5 \text{ m/s}^2$  ma, in caso di emergenza, diventa  $1 \text{ m/s}^2$  (si è usato un coefficiente di sicurezza pari a 2 che moltiplica l'accelerazione di normale funzionamento). Nei nostri calcoli è stata considerata una accelerazione pari a 0,5 perché è il valore più frequente in condizioni normali. Conoscendo l'accelerazione e la velocità massima si ricava il tempo impiegato al traslo per raggiungere la velocità di 100 m/min. Dal momento in cui l'impianto parte da una certa posizione fino alla sua destinazione, ci sarà un tratto in cui accelera per arrivare alla velocità dei 100 m/min, poi un tratto/arco di tempo in cui avanza a velocità costante (e quindi l'accelerazione è nulla) e, alla fine, un tratto dove il motore esercita una coppia resistente (frenata rigenerativa) in modo da decelerare per l'arresto e permettere il carico/scarico dei rotoli.

Questo step serve per diagrammare le velocità e le accelerazioni del macchinario ad ogni istante del suo tragitto. Ad esempio, con l'andamento della velocità è possibile calcolare le potenze perse per l'effetto ventilante mentre con quello dell'accelerazione è possibile distinguere in che tratto è presente o meno la forza d'inerzia.

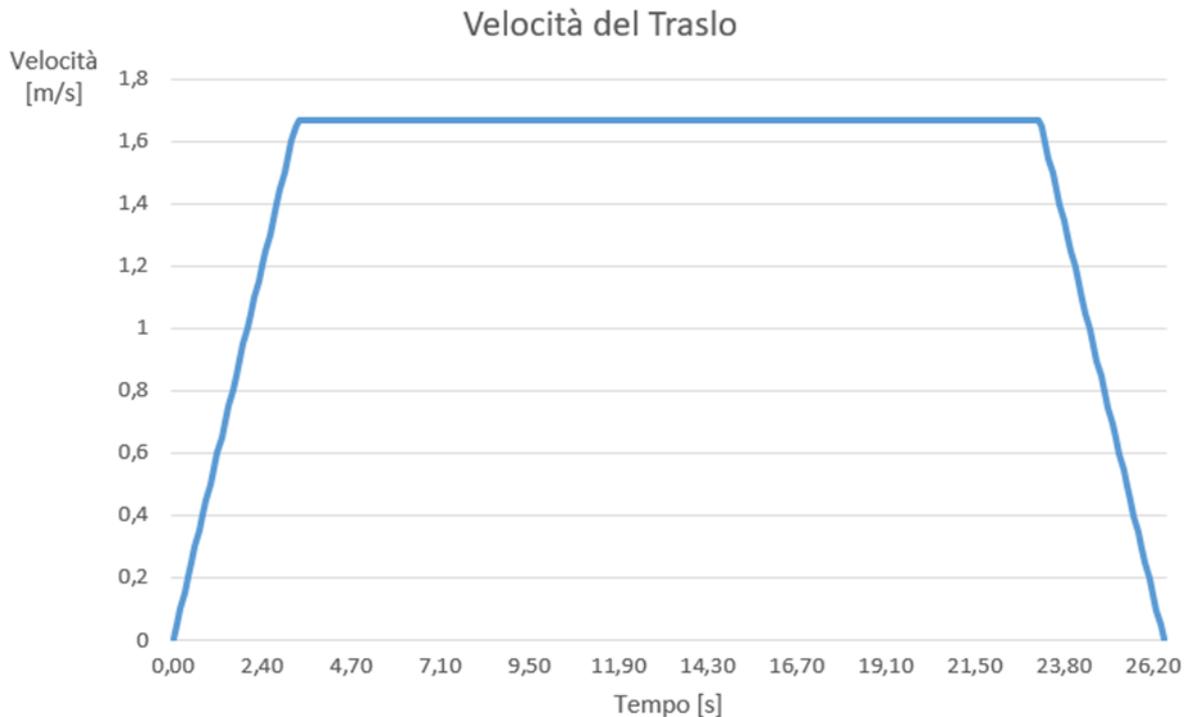
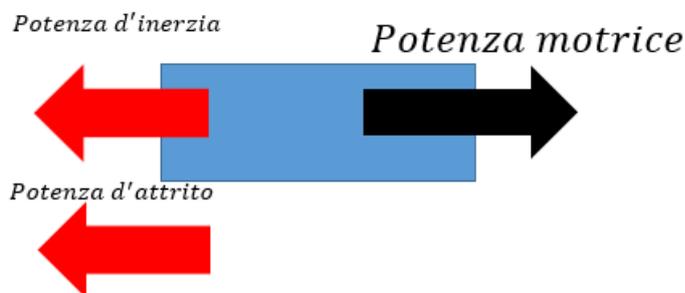


Figura 63) Andamento della velocità del traslo.

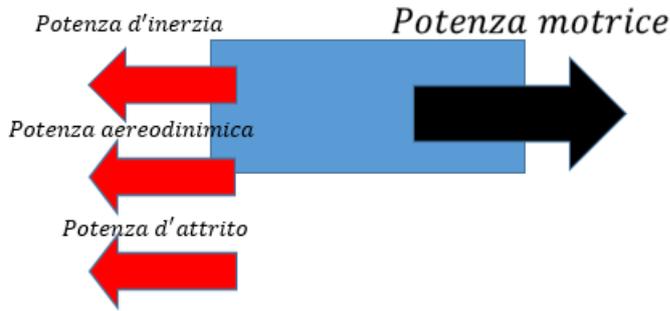
Dal grafico rappresentato in figura [61] si distinguono cinque fasi operative in cui lavora il traslo, che sono:

-fase statica: il sistema è fermo;

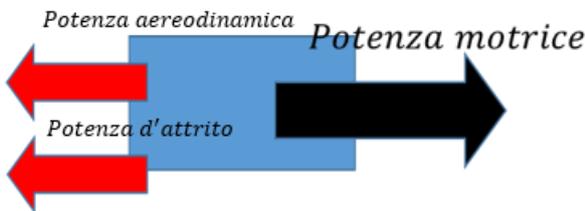
-fase di spunto: il motore genera, per un brevissimo istante (circa 30 centesimi di secondo), una coppia più alta rispetto a quella nominale in modo da vincere l'inerzia dell'intero sistema e gli attriti tra le ruote e la rotaia (la coppia di spunto è 1,5 volte maggiore della coppia nominale);



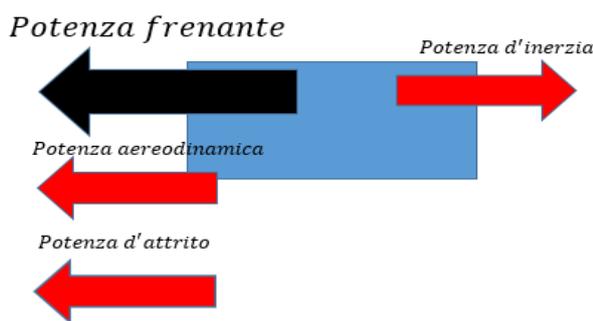
-fase in accelerazione: il motore applica una coppia in modo da vincere tutti i carichi resistenti e far muovere il sistema. La coppia è piuttosto alta a causa del fatto che entrano in gioco varie forze che si oppongono alla traslazione del traslo quali la forza d'inerzia, la forza d'attrito e la forza aerodinamica generata dall'interazione tra il mezzo e l'aria circostante;



-fase a velocità costante: il motore applica una coppia ridotta rispetto alla fase precedente dato che le forze d'inerzia sono nulle in questa fase. Le uniche forze resistenti alla quale deve vincere il motore sono quelle dovute all'aerodinamicità e all'attrito presente tra ruota-rotai;



-fase in decelerazione: il motore applica una coppia non più motrice ma una coppia resistente opposta in modo da rallentare e, eventualmente, fermarsi. In quest'ultima fase, la coppia erogata dal motore per frenare il tutto è bassa rispetto alla fase a velocità costante per il semplice fatto che viene in aiuto la forza aerodinamica, la quale tende sempre ad opporsi alla velocità del mezzo all'interno del fluido, e la forza d'attrito che si oppone sempre allo spostamento del corpo. Le uniche forze da vincere sono quelle legate all'inerzia del sistema.



Questa fase permette di capire, innanzitutto, se il motore lavora nel campo della coppia costante o in quella a potenza costante ma anche di quantificare la coppia che effettivamente il motore deve erogare per far sì che il traslo vinca tutti i possibili carichi resistenti in ogni fase cinematica. Tra le possibili resistenze abbiamo:

-quelle perse a causa dell'attrito presente nei cuscinetti delle ruote e nelle varie trasmissioni meccaniche. La forza d'attrito può essere espressa con la seguente equazione:

$$Forza_{attrito,dinamico} = 0,005 * Peso_{traslo}$$

Si utilizza questa formula quando il traslo non è in condizione di quiete. Quando è nello stato di quiete allora la formula diventa:

$$Forza_{attrito,statico} = 0,01 * Peso_{traslo}$$

Ovviamente questa forza tende sempre ad opporsi allo spostamento del traslo;

-quelle perse a causa dell'attrito aereodinamico che si ha quando il mezzo si muove all'interno di un fluido.

Dovremmo usare una formula simile a quella descritta da Eiffel ma ciò risulterebbe complicato e inutile perché l'area frontale del veicolo in questione presenta varie forme geometriche difficili da quantificare e poi perché la velocità raggiunta dal traslo non è paragonabile a quella di un'automobile (velocità massima del traslo è di 1,67 m/s mentre quella di un veicolo stradale va oltre i 100 km/h).

Grazie all'esperienza dell'azienda, è comunque possibile quantificare questa forza con la seguente equazione:

$$Forza_{aereodinamica} = 0,008 * Peso_{traslo}$$

Questa forza si oppone sempre allo spostamento del veicolo. Il parametro "0,008" racchiude in sé alcune considerazioni come la bassa velocità del traslo e la geometria complessa del veicolo. Perché questa formula risulti accettabile, le velocità devono essere espresse in metri al secondo e la forza peso espressa in Newton. -quelle perse per via dell'inerzia del sistema.

Questa forza appare ogni volta che c'è un'accelerazione e si oppone sempre a quest'ultima. Questa forza non appare quando il sistema avanza a velocità costante.

Dopo aver calcolato tutte queste forze, queste sono tutte moltiplicate per la velocità (in m/s) in modo da ottenere la rispettiva potenza e, a seconda della fase cinematica, si determina la potenza totale erogata dal motore in quell'istante. La potenza viene quindi divisa per la velocità angolare della ruota motrice  $\omega$  in modo da ottenere la coppia effettivamente trasmessa dalla ruota sulla rotaia.

$$C_{eff} = \frac{Potenza_{motrice}}{\omega_{motrice}} = \frac{\sum Potenze_{vincoli}}{\omega_{motrice}}$$

Non abbiamo la massa di ogni singola ruota ma, avendo le loro geometrie, possiamo ipotizzare che la densità di entrambe sia pari a  $7800 \text{ Kg}/\text{m}^3$ .

$$m_{ruota} = \rho_{ruota} V_{ruota} = \rho_{ruota} \frac{\pi}{4} (D_{esterno}^2 - D_{interno}^2) L$$

Sapendo che il diametro esterno della ruota vale 700 mm, il diametro interno vale 165 mm e che lo spessore "L" vale 126 mm, a conti fatti è possibile stimare una massa della ruota di circa 357 Kg.

Questo calcolo è effettuato perché si vuole considerare la coppia d'inerzia della ruota motrice che interviene nel caso in cui la ruota accelera o decelera.

Scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione attorno al centro della ruota e ricordando che la coppia d'inerzia si oppone sempre alle accelerazioni angolari (ovviamente diventa nulla quando la ruota rotola a velocità angolare costante).

$$C_{motrice} - I_{ruota}\ddot{\theta} - F_1 \frac{D}{2} = 0 \quad F_1 = \frac{C_{motrice} - I_{ruota}\ddot{\theta}}{D/2}$$

Si può addirittura non considerare la coppia d'inerzia perché la massa che entra in gioco è trascurabile rispetto alla massa dell'intero impianto (parliamo di 357 Kg in confronto a 59150 Kg).

---

### 8.3 CALCOLO DELLA FORZA DI TRAZIONE CON APPROCCIO SEMPLIFICATO

---

E' possibile ottenere risultati attendibili anche non considerando alcuni termini come l'inerzia delle ruote durante il percorso del traslo e la potenza persa per l'effetto aerodinamico del traslo.

Quindi, quando si calcola la coppia che il motore deve erogare, non si considera più la potenza legata all'attrito aereodinamico.

$$C_{motrice,semplificata} = \frac{Potenza_{inerzia} + Potenza_{attrito}}{\omega_{motrice}}$$

Si semplifica, grazie a questa assunzione, l'equilibrio alla rotazione della ruota motrice dove non si considera più la coppia d'inerzia.

$$F_{motrice} = \frac{C_{semplificata}}{D/2}$$

Si effettua questa semplificazione perché si vuole calcolare la forza di trazione esercitata dalla ruota motrice e capire se essa è soggetta a slittamento. Inoltre si vuole calcolare il parametro  $\mu$  (rapporto tra carico tangenziale e carico normale agente sull'area di contatto) da inserire nella mappa di Johnson, così da valutare se c'è il rischio di avere problemi di Ratcheting oppure no. Si osserva, inoltre, che la forza di trazione tende a variare lungo il tragitto del macchinario evidenziando come il motore agisca sul sistema.

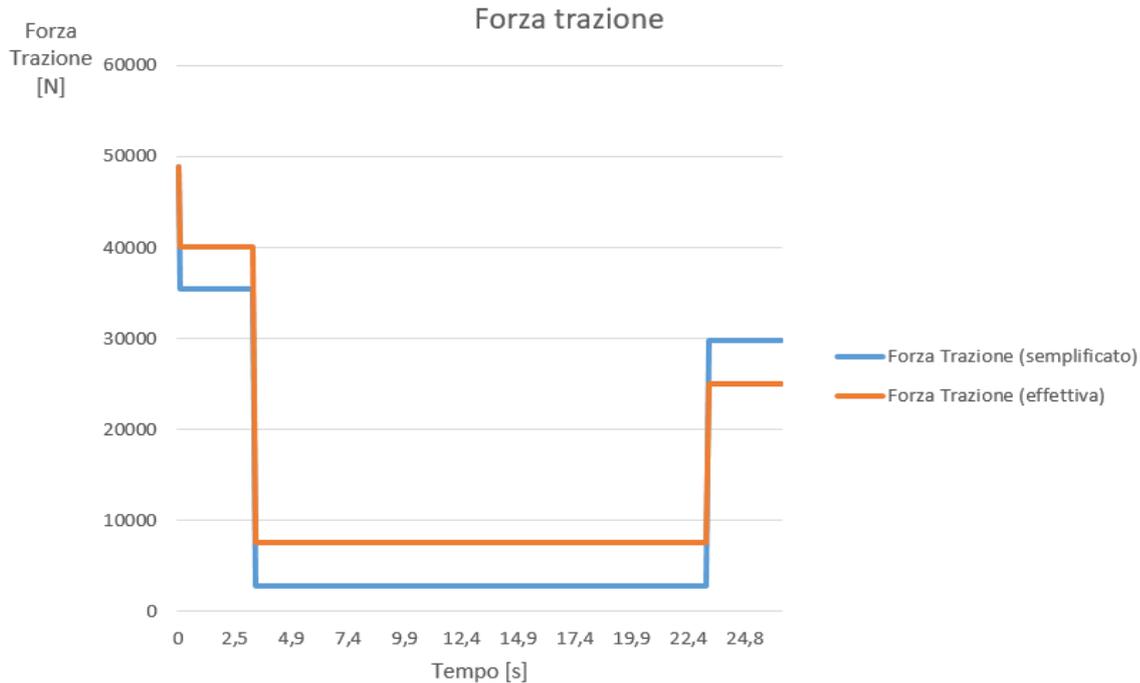


Figura 64) Andamento della forza di trazione della ruota motrice. I gradini rappresentano il passaggio da una fase cinematica ad un'altra. Per esempio, prima dei 3 secondi, il motore applica una forza di trazione piuttosto alta (perché sta accelerando), ma per i prossimi 20 secondi circa, il motore ha calato drasticamente la forza di trazione, dato che sta viaggiando a velocità costante.

#### 8.4 DIAGRAMMA DI CORPO LIBERO DEL TRASLO NELLE VARIE SITUAZIONI

Per la valutazione delle forze agenti sulle rispettive ruote, è stato necessario modellare l'intero traslo in tre differenti corpi. Tutto ciò viene fatto per trovare il baricentro del traslo, non considerando le ruote, utile per individuare il punto dove applicare la forza peso e la forza d'inerzia (quest'ultima utile durante le fasi di accelerazioni/decelerazione).

Per calcolare i valori delle reazioni esercitate dalle due ruote si impone l'equilibrio alla traslazione verticale e l'equilibrio alla rotazione attorno ad un polo che corrisponde al punto di contatto della ruota 1. Inoltre, conoscendo le varie distanze come il passo delle ruote e l'altezza dove si trova il baricentro, è possibile calcolare i valori delle forze di reazione.

Le equazioni adottate sono le seguenti:

$$V_2 P - m_{traslo} g X_{g,traslo} + m_{traslo} \ddot{x} (Y_{g,traslo} - R_{ruota}) - C_{r,2} + C_{m,1} = 0$$

$$V_2 = \frac{m_{traslo} g X_{g,traslo} + C_{r,2} - C_{m,1} - m_{traslo} \ddot{x} (Y_{g,traslo} - R_{ruota})}{P}$$

$$V_2 + V_1 - m_{traslo} g = 0$$

$$V_1 = m_{traslo} g - V_2$$

Dove  $V_1$  e  $V_2$  sono le reazioni verticali nei vincoli del traslo. La coppia  $C_{r,2}$  è quella presente nella ruota condotta che tende ad opporsi (generalmente è causata dall'attrito che si ha nel cuscinetto) ma è stata trascurata per semplicità mentre la  $C_{m,1}$  è la coppia applicata dal motore sulla ruota motrice. Ottenuto il valore della reazione  $V_2$ , si ottiene l'altra reazione  $V_1$  tramite l'equazione alla traslazione. Sommando rispettivamente i valori delle reazioni  $V_1$  e  $V_2$  e i pesi delle ruote si ottiene la forza esercitata dal traslo sulla rotaia.

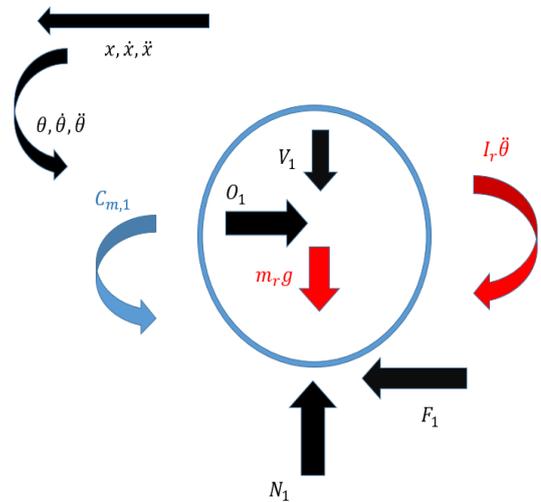


Figura 65) Esempio di diagramma di corpo libero della ruota motrice con le convenzioni già stabilite. Con i vettori rossi vengono rappresentati le grandezze dipendenti dalla massa. Le nere sono le eventuali forze agenti sul sistema mentre quella blu rappresenta la coppia motrice.

Sempre parlando di diagrammi di corpo libero, i calcoli delle reazioni e delle forze sono state fatte considerando la piattaforma girevole la più alta possibile in modo da innalzare la quota del baricentro dell'intero veicolo in modo da considerare nella condizione peggiore possibile dato che, a parità di accelerazione e di massa, una quota più alta corrisponderebbe ad avere un momento ribaltante maggiore.

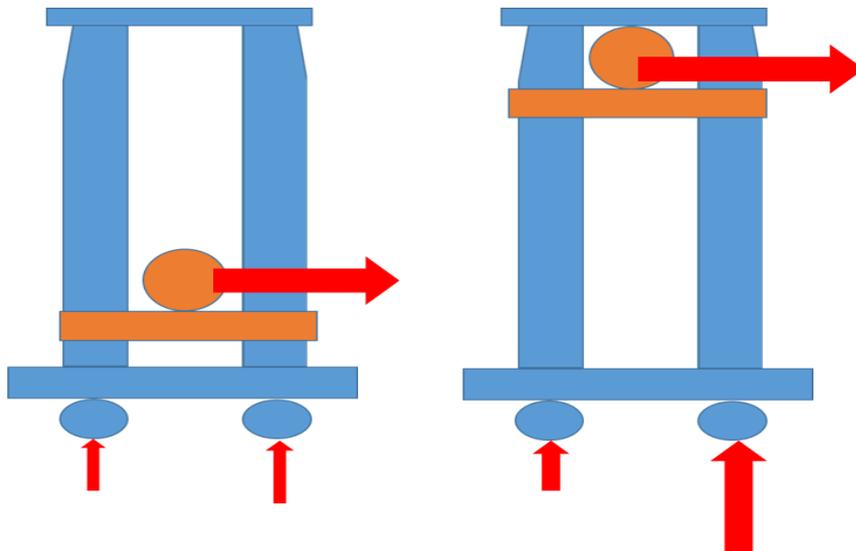


Figura 66) Ragionamento sull'altezza della piattaforma girevole. Ipotizzando che il traslo si sposti verso sinistra, se la tavola si trova ad una quota bassa, il momento ribaltante generato dall'inerzia del sistema sarà basso. Se durante il tragitto, la piattaforma si trova in alto, la coppia d'inerzia generata da quest'ultimo sarà più alta. Quindi, per i nostri calcoli, si è ipotizzato di trovarci nella condizione più sfavorevole, cioè quando il carico è totalmente sollevato.

Il diagramma di corpo libero della ruota condotta risulta piuttosto semplice essendo una ruota di sostegno del macchinario. La forza tangenziale è orientata in modo tale che la ruota si metta a ruotare mentre la forza normale è rivolta sempre in su perché è la reazione che viene ricevuta dalla rotaia.

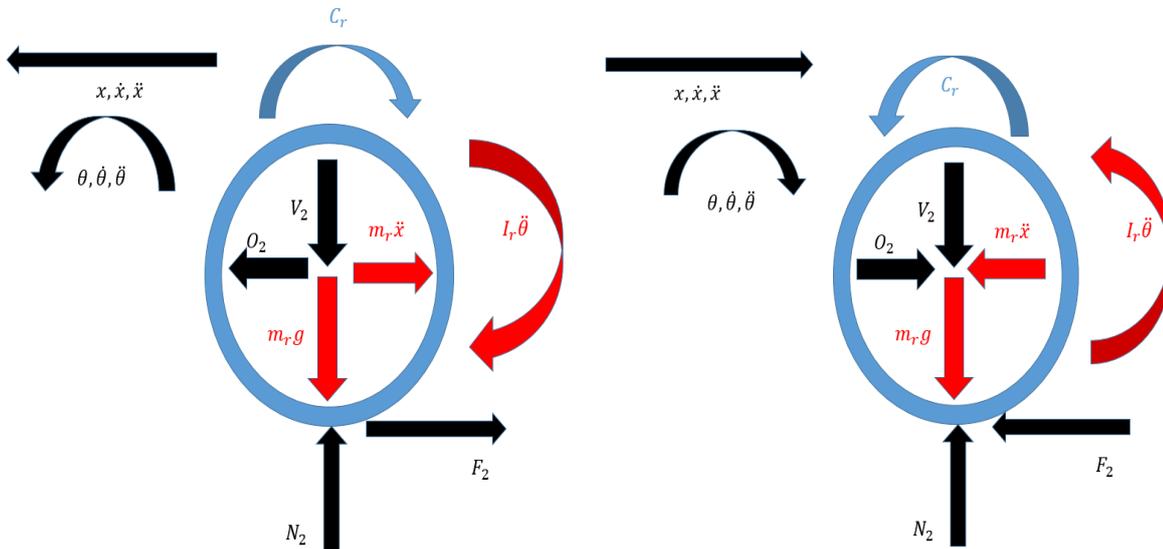


Figura 67) diagrammi di corpo libero della ruota condotta. A sinistra, il caso in cui il traslo avanza a sinistra, mentre a destra il caso opposto. Le forze  $O_2$  e  $V_2$  sono le forze di reazione che si ha tra nel cuscinetto della ruota.

## 8.5 CALCOLO DELLE AREE E DELLE PRESSIONI HERTZIANE DI CONTATTO

Il passo successivo è quello di stimare, oltre le aree di contatto che si vengono a creare tra le singole ruote e la rotaia, anche le pressioni che si raggiungono usando la teoria di Hertz. Le possibili aree che avremo sono:  
 -contatto ellittico: l'impronta lasciata è quella di un'ellisse ed avremo questa tipologia di area quando la ruota e la rotaia sono completamente nuove,

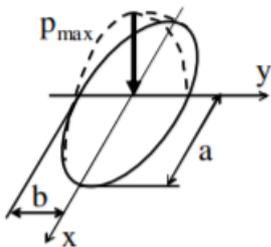


Figura 68)Disegno qualitativo di un contatto ellittico.[36]

-contatto cilindrico: l'impronta lasciata dai due corpi volventi sono di forma rettangolare e le pressioni che si raggiungono sono più basse rispetto al precedente caso. Questa tipologia di contatto si presenta quando i profili sono usurati.

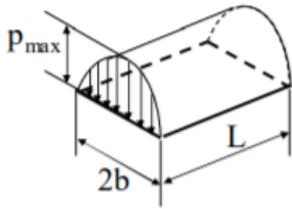
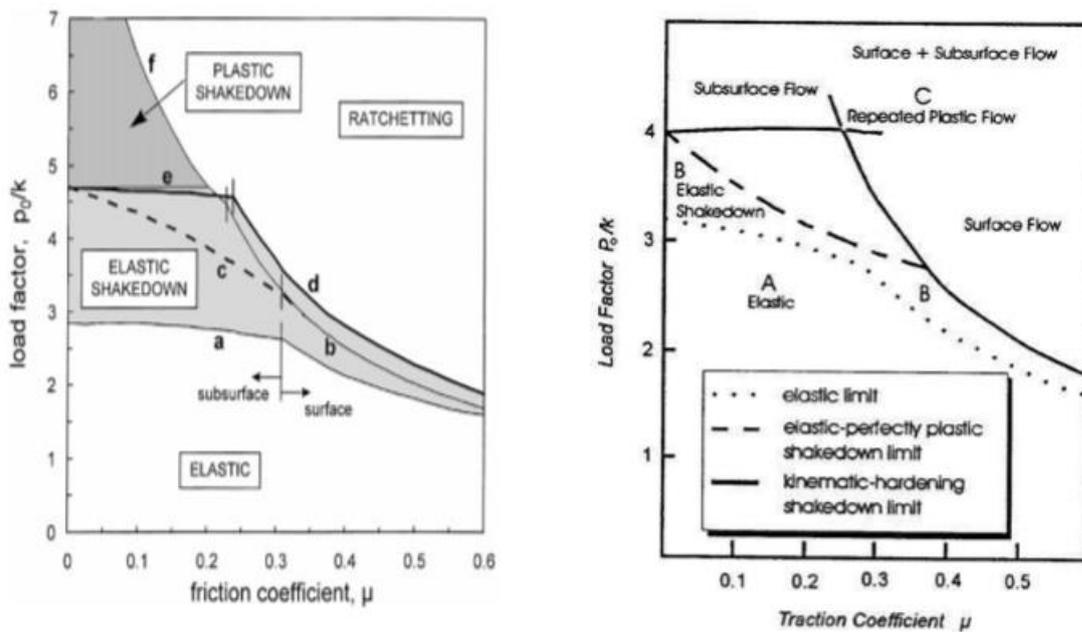


Figura 69) Disegno qualitativo di un contatto cilindrico.[36]

All'inizio, essendo sia la rotaia e sia la ruota nuove, si calcolano le aree e le pressioni usando la teoria di Hertz nel caso di contatto di tipo ellittico ma, a causa dell'usura, si ha un progressivo cambio della forma dell'impronta e si adotta il caso di contatto cilindrico.

Per la valutazione dello stato della rotaia è stata impiegata la mappa di Johnson che, in base alle condizioni di lavoro e di sollecitazioni della rotaia, permette di stabilire se insorgono dei problemi legati, per esempio, al Ratcheting. In base al tipo di contatto Hertziano si devono impiegare due mappe differenti.



Destra[11]

Delle due mappe si utilizza il grafico di destra che è quello utilizzato nelle norme tecniche ferroviarie, mentre quello di sinistra è un caso particolare (cioè quando il contatto è di tipo ellittico).

Il coefficiente di aderenza che si ha tra ruota-rotaia viene ipotizzato pari a “0,3”, essendo un valore tipico riscontrato nel mondo ferroviario (il valore proposto potrebbe addirittura essere pari a “0,4” ma ciò dipende da alcuni fattori come la durezza dei rispettivi materiali, dallo stato di lubrificazione presente tra i due corpi e/o dalla natura degli stessi materiali e dalla condizione cinematica). Inoltre, è importante conoscere questo coefficiente tra i due corpi in contatto perché si riesce a stabilire a priori dove può insorgere la cricca. Se il coefficiente d'attrito è al di sotto di questo valore, si innescherà la cricca in profondità della superficie, invece nel caso opposto, allora la cricca si presenterà in superficie.

Condition of Rail Surface	Traction Coefficient
Dry Rail (Clean)	0.25-0.30
Dry Rail (with Sand)	0.25-0.33
Wet Rail (Clean)	0.18-0.2
Wet Rail (with Sand)	0.22-0.25
Greasy Rail	0.15-0.18
Moisture on Rail	0.09-0.15
Sleet on Rail	0.15
Sleet on Rail (with sand)	0.2
Light Snow on Rail	0.1
Light Snow on Rail (with Sand)	0.15
Wet Leaves on Rail	0.07

Figura 70) Tabella dei tipici valori di coefficienti di aderenza in ambito ferroviario.[6]

Il Traction coefficient “ $\mu$ ” è il rapporto tra la forza Tangenziale che si ha sul piano d'appoggio del traslo sulla rotaia e la forza Normale applicata dalla rispettiva ruota. Questo parametro rappresenta, in sostanza, l'attrito d'aderenza che si ha in quel preciso istante. Viene calcolato come:

$$\mu = \frac{|T|}{N} = \frac{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}}{N}$$

Dove :

- $T_x$  forza d'attrito longitudinale;
- $T_y$  forza d'attrito trasversale;
- $N$  forza normale;

In questo caso però, dato che il nostro macchinario scorre lungo una rotaia esente da alcuna curva, la forza  $T$  viene semplificata come:

$$T = T_x$$

L'altro parametro adimensionale trattato è il “ $v$ ”, noto come “Load Factor”, definito come il rapporto tra la pressione massima di contatto e il carico di snervamento tangenziale “ $k_e$ ” (in letteratura inglese “Shear Stress Yield”).

$$v = \frac{p_0}{k_e}$$

Il coefficiente  $v$  può cambiare formula in base al tipo di impronta lasciata dal corpo rotolante. Nel caso l'impronta fosse quella di una ellisse (o di un cerchio), il  $v$  è uguale a:

$$v = \frac{3N}{(2\pi abk_e)}$$

Dove  $a$  e  $b$  sono rispettivamente il semiasse maggiore e minore dell'impronta. Nel caso avessimo un'impronta cilindrica allora  $v$  assume la seguente formula:

$$v = \frac{2N}{(\pi bLk_e)}$$

Tutto ciò dipende dalla geometria dell'impronta che altera rispettivamente il valore della pressione massima  $p_0$ . Il parametro  $k_e$  non è nient'altro che il carico di snervamento  $R_{P0,2}$  del materiale più tenero sottoposto ad uno stato di tensione più complesso. Esso è dettato dalla seguente relazione:

$$k_e = \frac{R_{P0,2}}{\sqrt{3}} \text{ oppure } k_e = 0,577 * R_{P0,2}$$

Si utilizza questa relazione perché rappresenta l'ipotesi di rottura formulata da Von Mises e soprattutto perché il materiale ha un comportamento duttile. Inoltre, bisogna immaginare che, al passaggio delle ruote, le fibre sottostanti alla superficie della Burbach vengono deformate ciclicamente e questo, alla lunga, va a causare problemi di fatica.

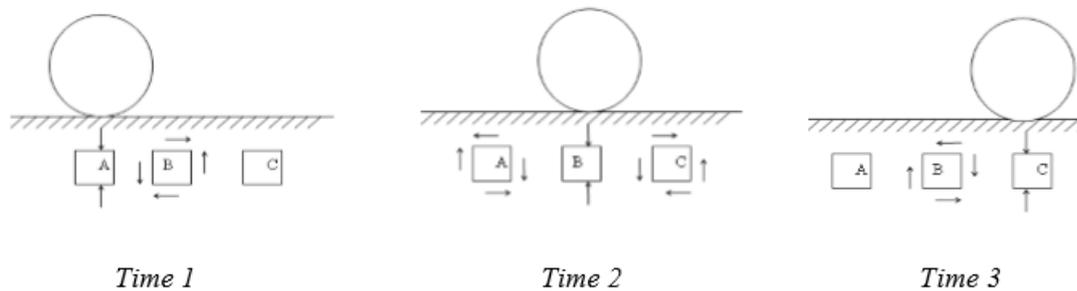


Figura 71) Rappresentazione dello stato di sollecitazione dello strato sottostante la superficie. Gli strati adiacenti al punto di contatto della ruota, sono soggetti a degli sforzi di taglio. Nel frattempo, quello in corrispondenza del punto d'appoggio del corpo volvente, è totalmente compresso. [7]

Le curve dei due differenti grafici sono state ottenute prendendo le coordinate di tre punti (appartenenti ad essi) ed usati come punti d'interpolazione per trovare i coefficienti dei monomi appartenenti alle rispettive parabole. Le linee in questione vengono interpolate con delle parabole perché il grado di approssimazione è accettabile.

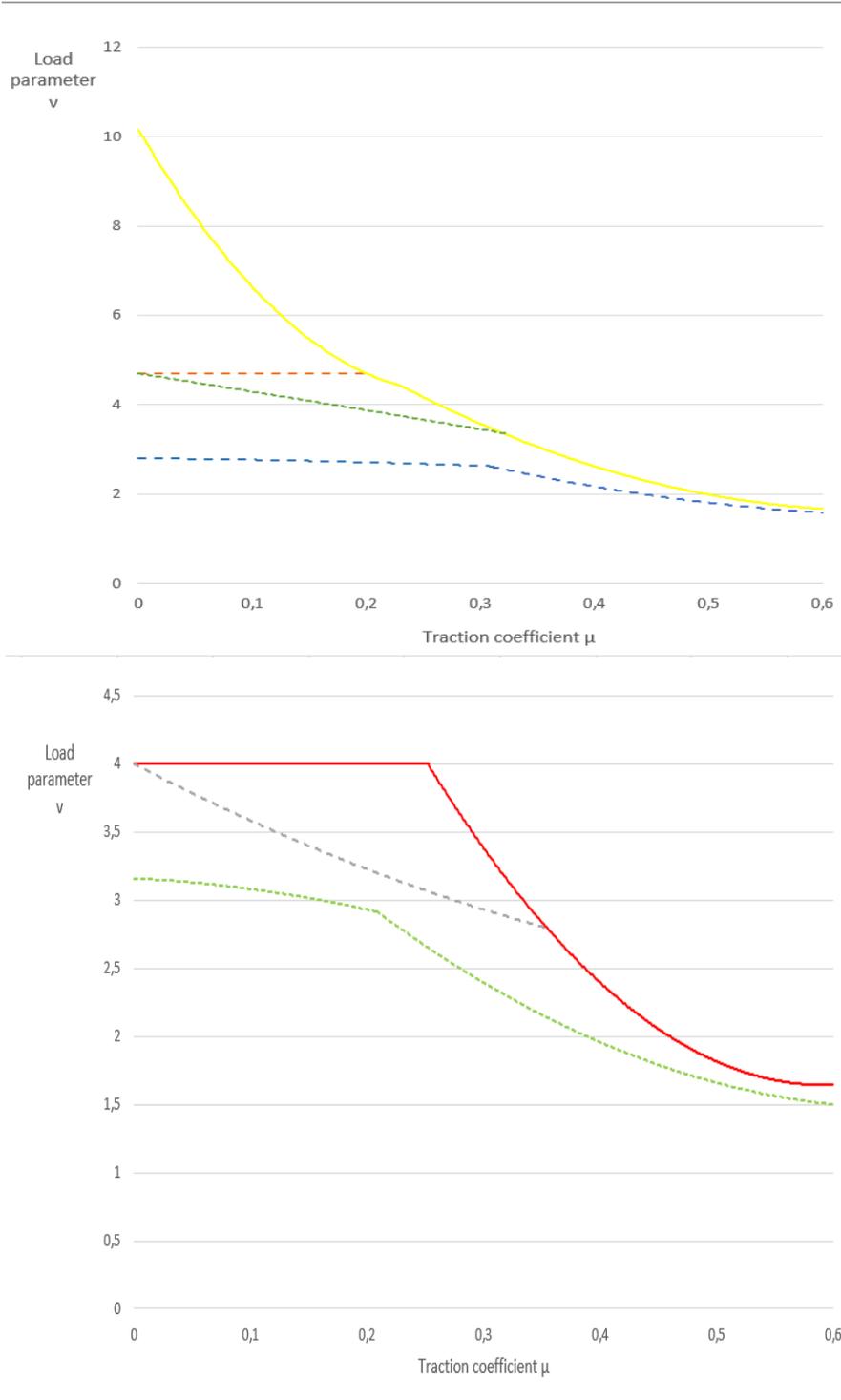


Figura 72) Mappe di Johnson ottenute interpolando con delle parabole.

## 8.6 RISULTATI HERTZ

Queste tabelle sono riferite alla parte inerente al contatto hertziano per ogni caso ed entrambe le direzioni.

CONTATTO NUOVO				
AVANZAM-SINISTRA	SPUNTO	ACCELERAZIONE	VELOCITA' COSTANTE	DECELLERAZIONE
AREA CONTATTO [mm <sup>2</sup> ]	309,75	309,58	285,30	259,95
PRESSIONE MASSIMA [MPa]	1738,15	1737,68	1668,16	1592,31
PRESSIONE MEDIA [MPa]	1158,77	1158,45	1112,11	1061,54
AVANZAM-DESTRA				
AREA CONTATTO [mm <sup>2</sup> ]	259,44	259,63	285	309,29
PRESSIONE MASSIMA [MPa]	1590,76	1591,33	1667,27	1736,86
PRESSIONE MEDIA [MPa]	1060,51	1060,89	1111,51	1157,91

CONTATTO CILINDRICO (ROTAIA USURATA 2019 L=52,3mm)				
AVANZAM-SINISTRA	SPUNTO	ACCELERAZIONE	VELOCITA' COSTANTE	DECELLERAZIONE
AREA CONTATTO [mm <sup>2</sup> ]	540,21	539,99	507,02	473,67
PRESSIONE MASSIMA [MPa]	845,96	845,62	795,38	741,75

Valutazione dell'usura delle vie di corsa di impianti di sollevamento ad alta velocità dell'industria cartaria

PRESSIONE MEDIA [MPa]	664,42	664,15	624,69	582,57
<b>AVANZAM-DESTRA</b>	SPUNTO	ACCELERAZIONE	VELOCITA' COSTANTE	DECELLERAZIONE
AREA CONTATTO [mm <sup>2</sup> ]	472,98	473,23	507,51	539,61
PRESSIONE MASSIMA [MPa]	740,67	741,07	794,74	845,02
PRESSIONE MEDIA [MPa]	581,72	581,03	624,19	663,68

CONTATTO CILINDRICO (ROTAIA COMPLETAMENTE USURATA L=100mm)				
<b>AVANZAM-SINISTRA</b>	SPUNTO	ACCELERAZIONE	VELOCITA' COSTANTE	DECELLERAZIONE
AREA CONTATTO [mm <sup>2</sup> ]	1026,44	1026,01	965,06	899,99
PRESSIONE MASSIMA [MPa]	613,72	613,46	577,02	538,11
PRESSIONE MEDIA [MPa]	482,01	481,81	453,19	422,63
<b>AVANZAM-DESTRA</b>				
AREA CONTATTO [mm <sup>2</sup> ]	898,68	899,16	964,29	1025,29
PRESSIONE MASSIMA [MPa]	537,33	537,62	576,56	613,03
PRESSIONE MEDIA [MPa]	422,02	422,25	452,83	481,47

---

## 8.7 RISULTATI $\mu$

---

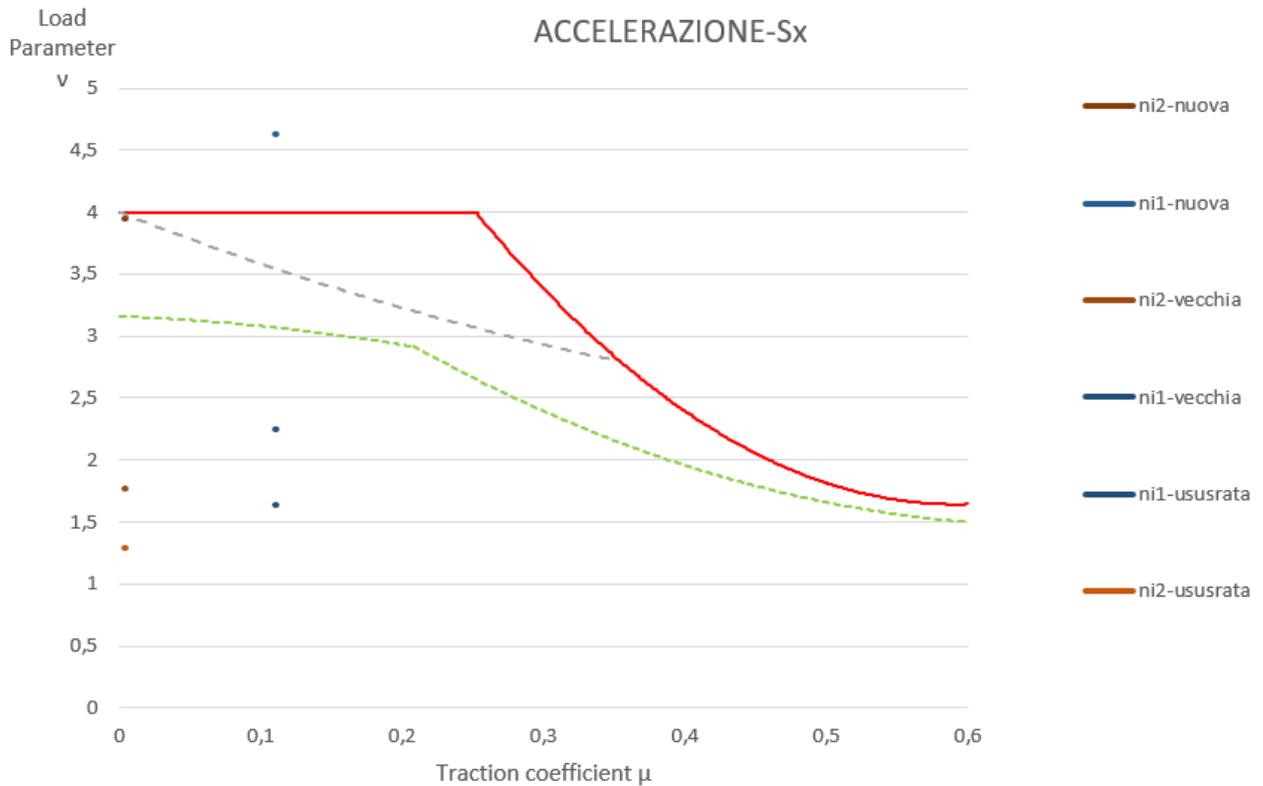
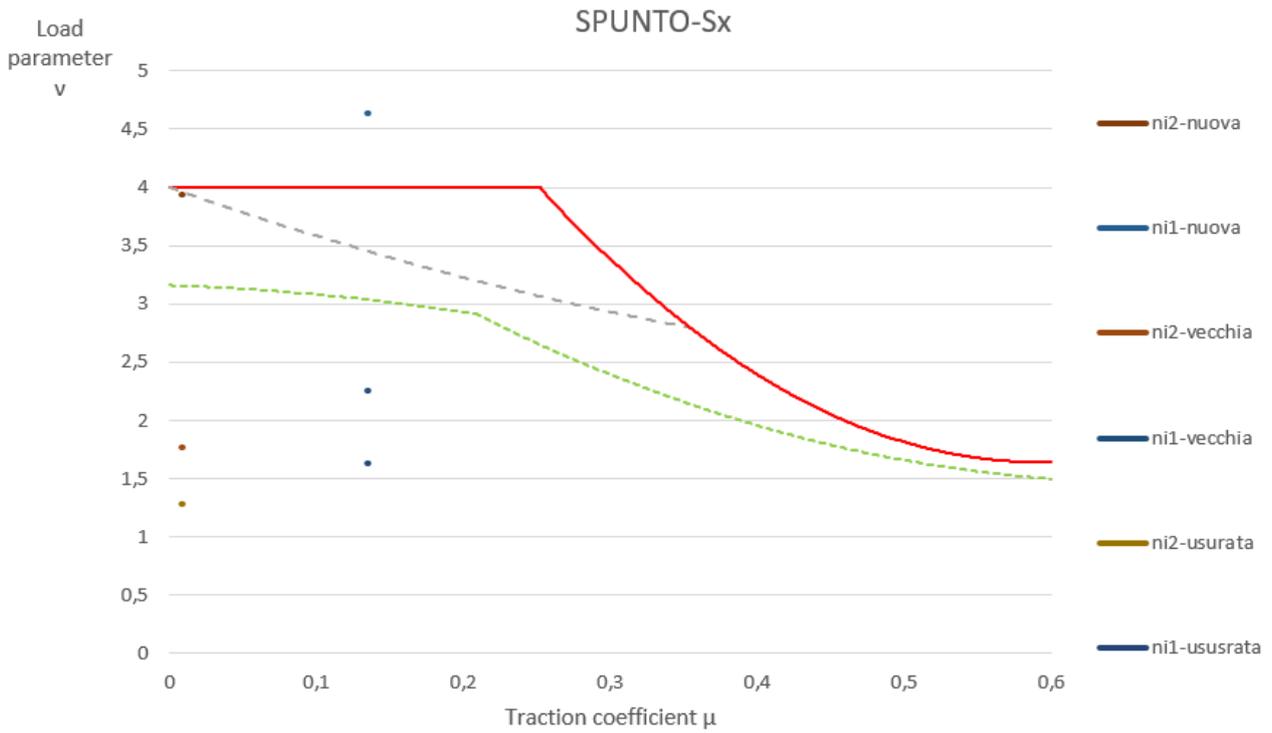
-Conoscendo il coefficiente di aderenza limite tipico tra ruota-rotai e calcolando il rapporto tra la forza tangenziale "F" e la forza normale "N" della ruota motrice, è stato verificato che la ruota, nella fase più critica, non slittasse;

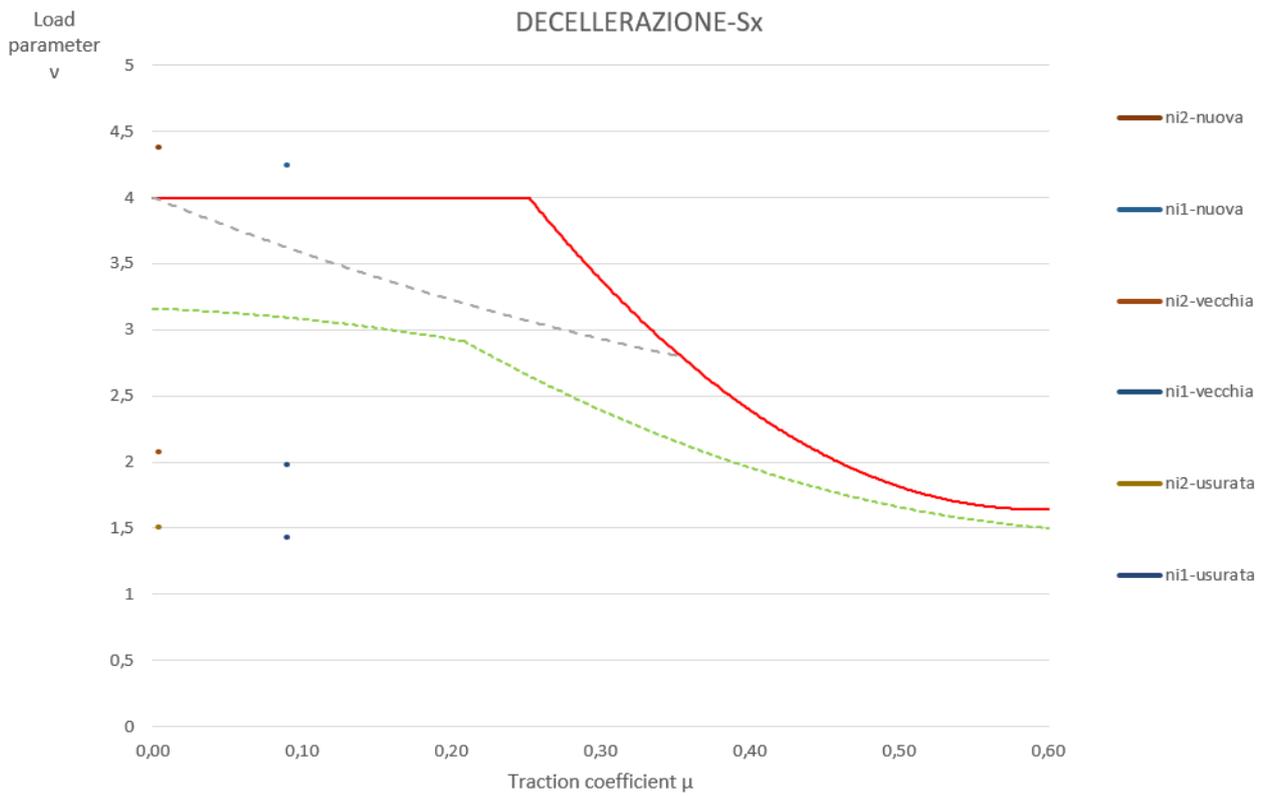
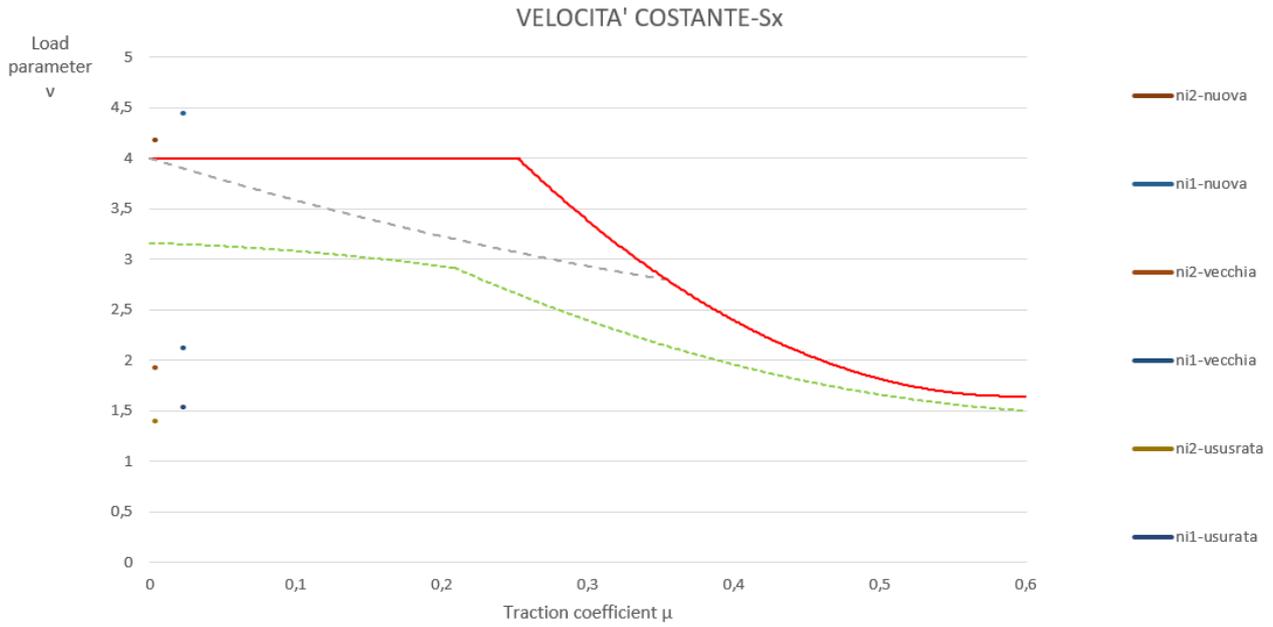
$$\mu_{motrice} = \frac{F_{motrice}}{N_{motrice}} < \mu_{aderenza} = 0,3$$

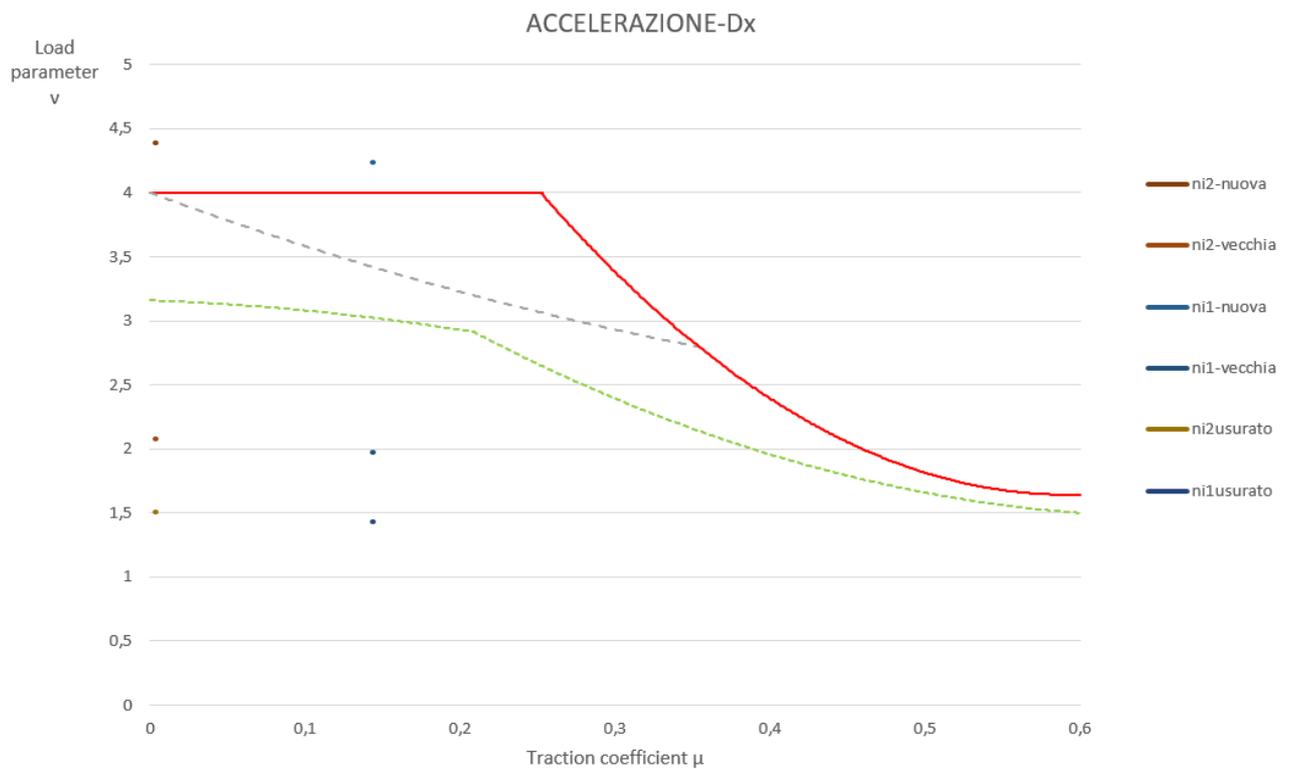
Sono state verificate le condizioni di aderenza solo della ruota motrice e tabulati i suoi valori, dato che quella condotta viene solo trascinata e, di conseguenza, il suo coefficiente d'attrito risulta ben lontano dal valore di aderenza limite.

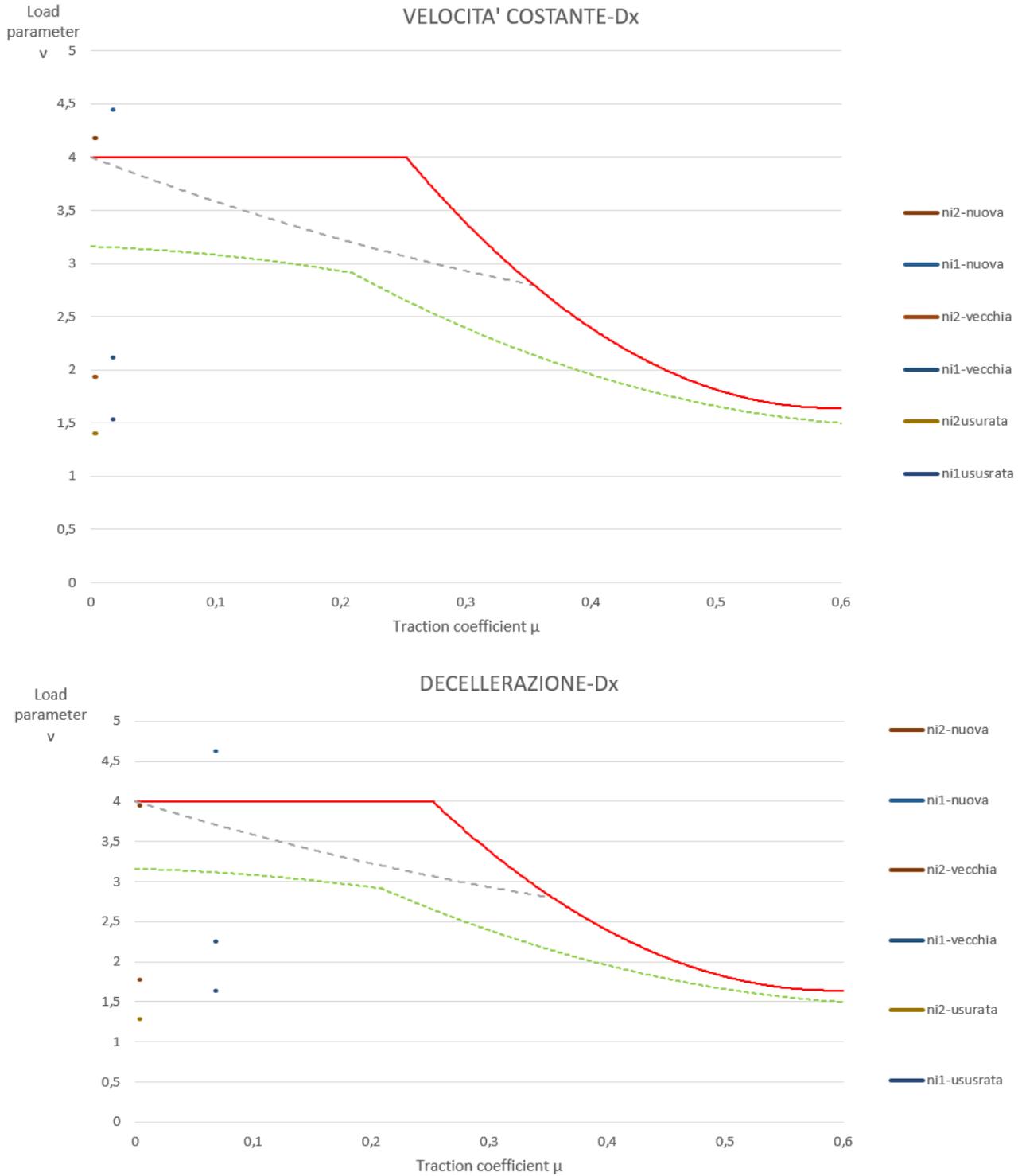
AVANZAM-SINISTRA	SPUNTO	ACCELERAZIONE	VELOCITA' COSTANTE	DECELLERAZIONE
Tempo[s]	0-0,03	0,03-3,33	3,33-23,16	23,16-26,5
Velocità[m/s]	0	0-1,67	1,67	1,67-0
Velocità angolare[rad/s]	0	0-4,76	4,76	4,76-0
Accelerazione[m/s <sup>2</sup> ]	0,5	0,5	0	-0,5
Acc.angolare[rad/sec <sup>2</sup> ]	1,43	1,43	0	-1,43
Coppia effettiva[Nm]	17129	14059,54	2640,19	8779,17
Forza tangenziale[N]	48845,83	40075,86	7543,4	24989,07
Forza normale[N]	358927,9	358964,7	317620,1	276275,5
Coeff. Aderenza	0,136	0,112	0,024	0,091
AVANZAM-DESTRA	SPUNTO	ACCELERAZIONE	VELOCITA' COSTANTE	DECELLERAZIONE
Tempo [s]	0-0,03	0,03-3,33	3,33-23,16	23,16-26,5
Velocità [m/s]	0	0-1,67	1,67	1,67-0
Velocità angolare [rad/s]	0	0-4,76	4,76	4,76-0
Accelerazione [m/s <sup>2</sup> ]	0,5	0,5	0	-0,5
Acc.angolare [rad/sec <sup>2</sup> ]	1,43	1,43	0	-1,43
Coppia effettiva [Nm]	17129	14059,54	2640,19	8779,17
Forza tangenziale [N]	48845,83	40075,86	7543,4	24989,07
Forza normale [N]	275141,76	275104,96	316449,55	357794,142
Coeff. Aderenza	0,178	0,145	0,024	0,07

Di seguito si riportano le mappe di Johnson di tutti i casi, con all'interno i punti di funzionamento delle due ruote.









Guardando le mappe, possiamo affermare che inizialmente c'è l'insorgenza del ratcheting, ma che, grazie al fatto che la rotaia e la ruota cambia geometria a causa dell'usura, i punti di funzionamento passano dalla zona di pericolo alla zona di sicurezza.

## 8.8 TASSO D'USURA

Come ultimo fondamentale step di calcolo, ci si è occupati di quantificare il tasso d'usura della rotaia, dove si vede chiaramente dalle immagini che c'è un grosso contributo dovuta a quest'ultima. Questo fenomeno ha un forte legame con la teoria della RCF. Non a caso, la propagazione della cricca dipende anche dall'usura perché incentiva la rimozione del materiale sulla superficie della rotaia. Se si ha un alto tasso d'usura, i problemi legati alla RCF potrebbero essere ostacolati da quest'ultima e essere utile contro la propagazione delle cricche. E' ovvio che se questo valore è troppo alto, si rischia di vedere il deterioramento della rotaia in maniera precoce e bisogna porre attenzione a quest'altro problema oltre che al RCF.

L'usura, se è eccessiva, porta alla modifica del profilo della rotaia e, conseguentemente, all'insorgere di fenomeni vibratori e anche al cedimento/caduta/deragliamento del veicolo. Nel caso in cui

La formula che si utilizza in questo capitolo per il calcolo del tasso d'usura è basata sull'energia dissipata nell'area di contatto tra ruota e rotaia. Il Wear number "W" viene definito nel seguente modo:

$$W = \frac{T\gamma}{A} = \frac{T_x\xi + T_y\eta}{A}$$

Dove:

A: l'area di contatto calcolata tramite la teoria di Hertz [mm<sup>2</sup>];

Tγ: la forza tangenziale risultante agente nell'area di contatto tra ruota e rotaia[N];

ξ: fattore di scorrimento longitudinale;

η: fattore di scorrimento trasversale;

T<sub>x</sub>: la forza tangenziale longitudinale [N];

T<sub>y</sub>: la forza tangenziale trasversale [N];

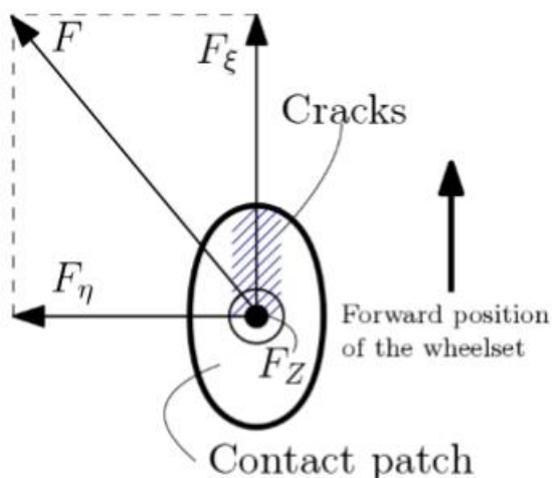


Figura 73) Tipico esempio di zona di aderenza con le forze agenti.[22]

Dato che il mezzo in questione viaggia sempre avanti e indietro lungo la rotaia, possiamo trascurare la parte trasversale dato che non ci sono spostamenti laterali o sbandamenti. Una piccola pecca di come è stato formulato il numero d'usura  $W$  è che non tiene conto del moto di rotazione (cioè di un termine che lega la coppia applicata  $C_z$  moltiplicata per un fattore di scorrimento alla rotazione  $\varphi_z$ )

La formula diventerà solo più:

$$W = \frac{T_x \xi}{A}$$

Il parametro  $\xi$  viene espresso nel seguente modo:

$$\xi = \frac{\omega r_{ruota} - V_{slip}}{\omega r_{ruota}}$$

A numeratore, abbiamo la velocità di strisciamento mentre a denominatore la velocità di avanzamento del veicolo. Lo scorrimento può assumere valore positivo nel caso di trazione e diventa negativo nel caso di frenata.

Il parametro  $\xi$  viene ipotizzato compreso tra 2%-3% perché, all'interno del circuito elettronico del traslo, c'è un dispositivo che mantiene costante lo scorrimento al 3%. Nel caso in cui si superasse questo valore, il dispositivo invia un segnale di retro-azione al motore tale da rallentare la ruota, in modo da riportare il valore al disotto del 3%.

In base al valore "W", possiamo suddividere i tassi d'usura in tre livelli:

- Regime dolce("mild"): se il  $W$  è inferiore a  $10,4 \text{ N/mm}^2$ ;
- Regime Moderato("Severe"): se  $W$  è compreso tra  $10,4 \text{ N/mm}^2$  e  $77,2 \text{ N/mm}^2$ ;
- Regime Catastrofico("Catastrophic"): se  $W$  è oltre i  $77,2 \text{ N/mm}^2$ .

Ad ogni regime, si associa una relazione che correla il tasso d'usura (wear rate) con il numero d'usura.

Questo capitolo ci permette di capire quale tipo di fenomeno è più preponderante. Nel caso in cui il numero d'usura è nel regime "dolce", allora la rotaia è soggetta principalmente dal fenomeno della RCF, mentre se siamo nel regime "moderato" o "catastrofico" allora il fenomeno che prevale è quello dell'usura.

## 8.9 RISULTATI USURA

### DATI RUOTA 1

CONTATTO NUOVO					
AVANZAM-SINISTRA	F <sub>x</sub> /A	W(ξ=2%)	W(ξ=3%)	WEAR RATE(ξ=2%)	WEAR RATE(ξ=3%)
SPUNTO	157,70	3,15	4,73	16,72	25,07
ACCELERAZIONE	129,45	2,59	3,88	13,72	20,58
VELOCITA' COSTANTE	26,44	0,53	0,79	2,80	4,20
DECELLERAZIONE	96,13	1,92	2,88	10,19	15,28

CONTATTO NUOVO					
AVANZAM-DESTRA	F <sub>x</sub> /A	W(ξ=2%)	W(ξ=3%)	WEAR RATE(ξ=2%)	WEAR RATE(ξ=3%)
SPUNTO	188,27	3,76	5,65	19,96	29,93
ACCELERAZIONE	154,36	3,09	4,63	16,36	24,54
VELOCITA' COSTANTE	26,47	0,53	0,79	2,81	4,21
DECELLERAZIONE	80,80	1,61	2,42	8,56	12,85

CONTATTO CILINDRICO (ROTAIA USURATA 2019 L=52,63mm)					
AVANZAM-SINISTRA	F <sub>x</sub> /A	W(ξ=2%)	W(ξ=3%)	WEAR RATE(ξ=2%)	WEAR RATE(ξ=3%)
SPUNTO	90,42	1,81	2,71	9,58	14,38
ACCELERAZIONE	74,22	1,48	2,23	7,87	11,80
VELOCITA' COSTANTE	14,85	0,30	0,44	1,57	2,36
DECELLERAZIONE	52,76	1,05	1,58	4,91	8,39

CONTATTO CILINDRICO (ROTAIA USURATA 2019 L=52,63mm)					
AVANZAM-DESTRA	F <sub>x</sub> /A	W(ξ=2%)	W(ξ=3%)	WEAR RATE(ξ=2%)	WEAR RATE(ξ=3%)
SPUNTO	103,27	2,06	3,1	10,95	16,42
ACCELERAZIONE	84,69	1,69	2,54	8,98	13,46
VELOCITA' COSTANTE	14,86	0,30	0,45	1,57	2,36
DECELLERAZIONE	46,31	0,93	1,39	4,91	7,36

CONTATTO CILINDRICO (ROTAIA COMPLETAMENTE USURATA L=100mm)					
AVANZAM-SINISTRA	F <sub>x</sub> /A	W(ξ=2%)	W(ξ=3%)	WEAR RATE(ξ=2%)	WEAR RATE(ξ=3%)
SPUNTO	47,59	0,95	1,43	5,04	7,57
ACCELERAZIONE	39,06	0,78	1,17	4,14	6,21
VELOCITA' COSTANTE	7,82	0,16	0,23	0,83	1,24
DECELLERAZIONE	27,77	0,55	0,83	2,94	4,41

CONTATTO CILINDRICO (ROTAIA COMPLETAMENTE USURATA L=100mm)					
AVANZAM-DESTRA	F <sub>x</sub> /A	W(ξ=2%)	W(ξ=3%)	WEAR RATE(ξ=2%)	WEAR RATE(ξ=3%)
SPUNTO	54,35	1,09	1,63	5,76	8,64
ACCELERAZIONE	44,57	0,89	1,34	4,72	7,09
VELOCITA' COSTANTE	7,82	0,16	0,23	0,83	1,24
DECELLERAZIONE	24,37	0,49	0,73	2,58	3,87

## Capitolo 9 CONCLUSIONI & SOLUZIONI

Dai dati raccolti ed elaborati, è possibile concludere che non ci sono problemi legati alla nucleazione e propagazione delle cricche se non all'inizio. Infatti, si vede chiaramente che, quando la rotaia e le ruote nuove, si presenta un elevato rischio di "Ratcheting". Man mano che le ruote e la rotaia si usurano, allora questo fenomeno tende a rallentare. La verifica dell'usura è stata fatta perché dalle foto dell'impianto, si evidenziano problemi legati ad essa. La rottura della giunta è avvenuta a causa del mancato serraggio delle viti in corrispondenza del carico/scarico merci. Ulteriori possibili cause potrebbero essere:

- il motore fornisce delle coppie non regolari (picchi elevati): quando il traslo trasporta il carico, il motore emette una certa coppia che è correlata alla corrente ma, probabilmente, quest'ultima non è costante;
- il processo di saldatura non eseguito in maniera corretta: una possibilità potrebbe essere che il modo in cui è stata eseguita l'esecuzione non sia stata fatta da manuale;
- dei disallineamenti presenti lungo le vie di corsa: lungo la rotaia potrebbero esserci dei disallineamenti (anche se pur piccoli);
- vibrazioni indotte dal traslo causate dai profili usurati (elevata conicità equivalente): il fatto di avere una ruota motrice e una condotta fa sì che si crei una piccola inclinazione, in direzione longitudinale, sulla testa della rotaia perché la forza di trazione generata da quella motrice tende a "scalfire" maggiormente la corona della rotaia.

Una possibile soluzione potrebbe essere quello di aumentare il diametro delle ruote perché così facendo si aumenta l'area di contatto con la conseguente riduzione delle pressioni Hertziane di contatto. Il problema è l'ingombro. A parità di velocità di spostamento, se aumento il raggio della ruota, diminuisco la velocità di rotazione ma aumento la coppia esercitata dal motoriduttore sulla ruota. Di conseguenza, la potenza meccanica rimane costante.

Il PLC(CPU) montato sul traslo potrebbe essere obsoleto, quindi, con il passare degli anni, potrebbe aver perso il valore dello scorrimento  $\xi$  di riferimento. Quando sono stati effettuati calcoli con  $\xi$  compreso tra il 2 o il 3% potrebbe darsi che la ruota accidentalmente slitti più del solito e il sistema di retroazione non lo rilevi. Potrebbero esserci dei picchi di corrente che si traducono in picchi di coppia e questo non è attualmente misurabile con i dati disponibili.

Un'altra soluzione potrebbe essere la scelta del tipo di acciaio utilizzato per la rotaia. Gli acciai migliori nel campo ferroviario sono quelli perlitici e quelli bainitici. I bainitici hanno dei carichi di rottura più alti di quelli perlitici ma non sono resistenti da un punto di vista dell'usura, mentre i perlitici sono eccellenti da un punto di vista dell'usura e anche meccanicamente presentano un buon comportamento. Per evitare problemi sulla rotaia come il Ratcheting o la propagazione della cricca all'interno di sé, dobbiamo puntare a materiali con un carico di snervamento il più alto possibile (così da abbassare il  $v$ ).

## Capitolo 10 **Bibliografia**

---

- [1] [www.sicma.com](http://www.sicma.com) ;
  - [2] [www.burgo.com](http://www.burgo.com) ;
  - [3] <https://prezi.com/p/wnokiv7vao3y/la-fabbricazione-della-carta-macchina-continua/> ;
  - [4] <http://railmeasurement.com/railhead-damage/> ;
  - [5] <http://bettonialluminotermiche.com/> ;
  - [6] "Surface Metallurgy and RollingContact Fatigue of Rail", Robert Ian Carroll,M. Eng. December 2005, The University of Sheffield. ;
  - [7] "Theoretical and Experimental approach to Rolling Contact Fatigue in high-speed railways". J. Kuszczak, L. Reis, B. Li and M. Freitas ;
  - [8] "Rolling contact fatigue,wear and broken rail derailments" Eric Magel,Peter Mutton, Anders Ekberg, Ajay Kapoor ;
  - [9] "Il processo di produzione delle paste chimiche e il loro trattamento" di Baldi Fabrizio-8° Corso di Tecnologia per Tecnici Cartari-edizione 2000/2001 ;
  - [10]"Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board"-JRC SCIENCE AND POLICY REPORTS- Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) Michael Suhr, Gabriele Klein, Ioanna Kourti, Miguel Rodrigo Gonzalo, Germán Giner Santonja, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho ;
  - [11] "Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review", U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, Final Report November 2011 ;
  - [12] "Influence of rail, wheel and track geometries on wheel and rail degradation" Kalle Karttunen, Department of Applied Mechanics, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden 2015 ;
  - [13] "ROLLING CONTACT FATIGUE IN RAILS – AN OVERVIEW " By Laloo Singh ;
  - [14] "Shakedown theory and the design of unbound pavements" ROAD & TRANSPORT RESERACH Vol.2 N°4 December 1993 I.F.Collins, A.P. Wang and L.R. Saunders ;
  - [15] "Le caratteristiche della Calandra" di Caldana Davide, 10° Corso di Tecnologia per Tecnici Cartari edizione 2002/2003 ;
  - [16] "Principi ed effetti della raffinazione sulla superficie" di Fornero Fabio, 11° corso di Tecnologia per tecnici cartari edizione 2003/2004 ;
  - [17] "Rail Engineering International" ;
-

- [18] "A100 RAIL" DIN 536, EMRAILS The australian rail stockist ;
- [19] "Nature of delamination cracks in pearlitic steels" Masaki Tanaka, Hayato Saito, Motoki Yasumaru, Kenji Higashida ;
- [20] "Rolling contact fatigue defects in freight car wheels" Sergey M.Zakharov, Irina G. Goryacheva;
- [21] "Rolling Contact Fatigue of Rails: what remains to be done?" R.A.Smith, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London ;
- [22] "On estimating the risk of wheel damage for wagons with paper rolls considering various dynamic conditions" Master of Science Thesis by Robin Prevolnik ;
- [23] "Rail Defects Handbook" Engineering Manual Track TMC226 ;
- [24] "INVESTIGATION OF SURFACE RATCHETTING DUE TO RAIL/WHEEL CONTACT" Chapter 2: Literature Review, Munidasa Widhana, Pathiranaage Isuru, Udara Wickramasinghe, Bachelor of Science of Engineering (Mechanical and Manufacturing Engineering);
- [25] "Wheel-rail interface handbook" edited by R.Lewis and U. Olofsson;
- [26] "Rail Squat Defects" Malcolm Kerr, Andrew Wilson, RailCorp ;
- [27] <https://new.abb.com/products/3GAA202420-AEG/m3aa-200mlb-4> ;
- [28] <https://www.sew-eurodrive.it/os/catalog/products/gears/standalonegear/default.aspx> ;
- [29] [http://www.sitographics.it/stampa\\_carta-formati.html](http://www.sitographics.it/stampa_carta-formati.html) ;
- [30] <http://www.chimicare.org/curiosita/la-chimica-delle-piante/da-cose-fatto-il-legno/>;
- [31] <https://comunicazzione.wordpress.com/2013/06/25/la-piu-grande-cartiera-del-mondo-made-in-china/>;
- [32] "Study on White Etching Layer in R260Mn rail steel by thermo-mechanical simulation" Hephzibah Murugan;
- [33] [https://it.123rf.com/photo\\_82999381\\_texture-di-pacciamatura-priorit%C3%A0-bassa-naturale-dei-chip-di-legno.html](https://it.123rf.com/photo_82999381_texture-di-pacciamatura-priorit%C3%A0-bassa-naturale-dei-chip-di-legno.html);
- [34] "Derailment of iron ore train" M03544, Australian Government, Australian Transport Safety Bureau, 3 december 2015;
- [35] "Appunti per le lezioni di ELEMENTI DI COSTRUZIONE DI MACCHINE" parte 1, Teresa Berrutti, Massimo Rossetto;
- [36] "La preparazione dell'impasto" di Alessandro Pelazza, 11° corso di Tecnologia per tecnici cartari edizione 2003/2004 ;
- [37] "Acciai e leghe non ferrose, Walter Nicodemi, Zanichelli, 2000 ;
- [38] "Surface defects in rails" TMC 227, Version 1.2, Andrew Wilson, Malcolm Kerr;
-

[39] “Investigation of white etching layer on rails by optical microscopy, electron microscopy, X-ray and synchrotron X-ray diffraction” W.Osterle, H.Rooch, A.Pyzalla, L.Wang, Materials Science and Engineering, Elsevier 16-10-2000;

[40] <https://www.linmag.com/en/process-en> ;

[41] <https://www.ukessays.com/essays/engineering/study-rail-structure-risk-analysis-failure-3391.php>;

## Indice delle Immagini

Figura 1) Tipica macchina continua presente nelle cartiere.[32]	8
Figura 2) A sinistra, le “Chip” ottenute tramite lo scortecciamento degli alberi[34] e a destra uno schema illustrativo di come funziona uno “Spappolatore”.[37]	8
Figura 3) A sinistra, la fibra di cellulosa prima della raffinazione e dopo la raffinazione. A destra, invece, due raffinatori utilizzati per la raffinazione.[16]	9
Figura 4) Schema generale del ciclo di produzione della carta.[30]	10
Figura 5) Layout della calandra di una macchina continua.[15]	11
Figura 6) Andamento della produzione della Polpa a livello mondiale nel 2008.[10]	15
Figura 7) Quantità di tonnellate annue prodotte dai vari paesi europei. Inoltre, sono rappresentati i processi maggiormente utilizzati [10].	16
Figura 8) Il grafico spiega quali sono i processi maggiormente utilizzati e le tonnellate prodotte rispettivamente nel 2007 e nel 2008. [10]	16
Figura 9) Produzione della Carta a livello mondiale.[10]	17
Figura 10) Distribuzione dell'industria cartaria tra gli stati europei.[10]	17
Figura 11) Numero di cartiere attive nel 2008.[10]	18
Figura 12) Questo grafico ci spiega quanto contribuisce ogni fattore al costo di della Carta e della Polpa.[10]	19
Figura 13) Andamento del mercato della Polpa.[10]	19
Figura 14) Il traslo-elevatore presente nella cartiera di Verzuolo(CN)	21
Figura 15) A sinistra, il corridoio d'ingresso del magazzino situato al sesto piano. A destra, il corridoio d'uscita del magazzino al primo piano.	22
Figura 16) Vista del Carrello inferiore sostenuto dalla rotaia “A”.	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
Figura 17) Vista del modello del traslo.	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>

Figura 18-A)Piattaforma di sollevamento assemblato con la tavola rotante. 16-B) La Navetta che carica/scarica i pesanti rotoli di carta all'interno del magazzino. _____	24
Figura 19)A sinistra, l'encoder assoluto che ingrana con una cremagliera per avere un riferimento e fermarsi nella giusta posizione. A destra, la cremagliera messa a lato della rotaia. _____	24
Figura 20)A sinistra, il sensore ad infrarossi montato sulla tavola rotante usato per l'allineamento. A destra il dischetto catarifrangente che proietta indietro il fascio ad infrarossi al sensore. _____	25
Figura 21) Il motore per il sollevamento mette in rotazione il verricello così da sollevare la tavola rotante tramite il sistema di funi e pulegge. _____	25
Figura 22)La presenza dei capifissi è di estrema importanza dato che permettono di mettere in tensione il filo. ____	26
Figura 23)Sistema di sollevamento tramite le funi d'acciaio. Essendo due le funi, sono state evidenziate con due colori solo per distinguere uno dall'altro. _____	28
Figura 24)Vista dall'alto del traslo e del sistema di sollevamento tramite le funi. _____	28
Figura 25) Vista della piattaforma sollevata tramite il rinvio delle funi grazie alle pulegge montate su di essa. ____	29
Figura 26)Trave che svolge il ruolo di guida per le ruote montate sulla piattaforma. _____	29
Figura 27) Il svolgicavo che, collegato alla navetta, dà corrente. _____	30
Figura 28) Ruota di contrasto presente sul traslo. _____	30
Figura 29) Fase di allineamento delle due rotaie. _____	33
Figura 30)Disposizione dei componenti della rotaia. _____	34
Figura 31)Vista finale della rotaia. _____	35
Figura 32) Esempio di struttura martensitica.[6] _____	36
Figura 33)A sinistra, una struttura perlitica mentre a destra una struttura bainitica[38] _____	37
Figura 34) Modalità di propagazione della cricca.[8] _____	38
Figura 35)Illustrazione rappresenta il modo in cui un liquido agisce e contribuisce a causare la propagazione di una cricca, questo a causa della deformazione provocata dal passaggio della ruota.[8] _____	39
Figura 36)Sezione quotata seguendo la norma tedesca DIN 536 di una rotaia BURBACK A100 con indicate le sue componenti.[18] _____	40
Figura 37)Rappresentazione delle componenti della TESTA della rotaia. [12] _____	41
Figura 38)disegno qualitativo di dove potrebbero essere i vari difetti in una rotaia. [35] _____	42
Figura 39) A sinistra, una tipica Gauge Corner cracking: si presentano come una fila di cricche sottili inclinate di 20 o 30°.[33] _____	43
Figura 40)Immagine di uno Squat [11] e di come esso tende a propagarsi sotto la superficie della rotaia [6]. _____	43
Figura 41)Esempi di Wheel Burns di piccola e media entità. Queste tendono solamente a far saltare o a rompere la superficie bruciata/imbrunita. Notiamo che, quando il Wheel Burns è di piccola entità, assomiglia ad un piccolo Squats (infatti si presentano sempre con una zona nera).[39] _____	44
Figura 42) Esempio di un Wheel Burns di dimensioni grosse.[39] _____	44
Figura 43)esempio di frattura causata da un eccessivo strato martensitico talmente fragile da dar via ad una propagazione totalmente verticale.[23] _____	44

Figura 44)A sinistra un esempio di Spalling [4]. Il difetto si propaga in direzione longitudinale alla rotaia e si presenta come una fila di piccoli crateri. [41]	45
Figura 45)A sinistra, la tipica forma di rottura nota come Shelling [13] e a destra la spaccatura che si vede dall'esterno.[11]	45
Figura 46)esempi di Tongue lippings [4].	46
Figura 47)Presenza di Tongue lippings sui bordi di una rotaia di un'altra cartiera.	46
Figura 48) Esempi tipici di WEL sulla testa della rotaia. Essendo una fase dura e fragile rispetto al materiale composto della rotaia circostante, potrebbe innescare una cricca oppure creare un piccolo avvallamento dopo che è stata rimossa. [40]	47
Figura 49)esempio di innesco cricca attraverso lo strato bianco della Martensite.[39]	47
Figura 50)Esempio di Plastic Flow. [11] A destra si nota una dilatazione laterale della testa ai bordi. [11]	48
Figura 51)Tache ovale: al centro della testa, notiamo la nucleazione del difetto. Poi, a causa di altre tensioni di trazione dovute al ciclo di lavoro, a quelle generate da sbalzi termici e da quelle dovute a momenti flettenti variabili, tende ad avanzare fino a che non si ha la completa frattura della rotaia. Possiamo notare la zona di nucleazione che presenta un aspetto lucente e liscio mentre, al di fuori di questa zona, la superficie si presenta ruvida. [42]	48
Figura 52) Queste due immagini mostrano la "pista", completamente lucida, lasciata dal traslo sulla testa (si notano le scaglie d'acciaio a lato provenienti dalla testa).	49
Figura 53)esempio di fresatura della superficie della rotaia.[4]	50
Figura 54)esempio di smerigliatura che consiste nel mettere a contatto un disco che ruota ad una certa velocità e che trasla in direzione longitudinale alla rotaia [4].	50
Figura 55)Grafico qualitativo delle fasi di propagazione della cricca e da cosa è qual è la causa scatenante.[21]	51
Figura 56)A sinistra, uno schizzo qualitativo di quali siano le cause che portano la cricca a nucleare e a propagare. A destra vediamo come si orienta la cricca all'interno della rotaia. [13]	51
Figura 57) Diagramma Tensione-deformazione. In base al valore della tensione raggiunto, il materiale risponderà in un certo modo. [12]	53
Figura 58)Foto che ritraggono la rottura propagata lungo tutto il cordone della giunta.	54
Figura 59)Altra foto ritraente la rottura della rotaia da un'altra angolazione.	54
Figura 60) Confronto tra una giunta realizzata con l'alluminotermia e un'altra usando la saldatura a filo continuo. Si riesce a riconoscerle in base alla morfologia della linea di giunzione. In quella di sinistra, si nota uno strato uniforme del cordone (caratteristico dell'alluminotermia), mentre a destra, è inconfondibile la tipica linea di giunzione realizzata con il filo continuo (tra l'altro si vedono piccoli schizzi solidificati in basso).	56
Figura 61) Foto rappresentante la giunta recuperata grazie ad una saldatura a filo. Si nota il segno della molatura sulla corona della rotaia per renderla più liscia.	57
Figura 62)La presenza di queste scaglie denota l'eccessiva usura da parte del contatto tra ruote e rotaia.	58
Figura 63) Andamento della velocità del traslo.	62
Figura 64) Andamento della forza di trazione della ruota motrice. I gradini rappresentano il passaggio da una fase cinematica ad un'altra. Per esempio, prima dei 3 secondi, il motore applica una forza di trazione piuttosto alta	

---

<i>(perché sta accelerando), ma per i prossimi 20 secondi circa, il motore ha calato drasticamente la forza di trazione, dato che sta viaggiando a velocità costante. _____</i>	66
<i>Figura 65) Esempio di diagramma di corpo libero della ruota motrice con le convenzioni già stabilite. Con i vettori rossi vengono rappresentati le grandezze dipendenti dalla massa. Le nere sono le eventuali forze agenti sul sistema mentre quella blu rappresenta la coppia motrice. _____</i>	67
<i>Figura 66) Ragionamento sull'altezza della piattaforma girevole. Ipotizzando che il traslo si sposti verso sinistra, se la tavola si trova ad una quota bassa, il momento ribaltante generato dall'inerzia del sistema sarà basso. Se durante il tragitto, la piattaforma si trova in alto, la coppia d'inerzia generata da quest'ultimo sarà più alta. Quindi, per i nostri calcoli, si è ipotizzato di trovarci nella condizione più sfavorevole, cioè quando il carico è totalmente sollevato. ____</i>	67
<i>Figura 67) diagrammi di corpo libero della ruota condotta. A sinistra, il caso in cui il traslo avanza a sinistra, mentre a destra il caso opposto. Le forze <math>O_2</math> e <math>V_2</math> sono le forze di reazione che si ha tra nel cuscinetto della ruota. _____</i>	68
<i>Figura 68) Disegno qualitativo di un contatto ellittico.[36] _____</i>	68
<i>Figura 69) Disegno qualitativo di un contatto cilindrico.[36] _____</i>	69
<i>Figura 70) Tabella dei tipici valori di coefficienti di aderenza in ambito ferroviario.[6] _____</i>	70
<i>Figura 71) Rappresentazione dello stato di sollecitazione dello strato sottostante la superficie. Gli strati adiacenti al punto di contatto della ruota, sono soggetti a degli sforzi di taglio. Nel frattempo, quello in corrispondenza del punto d'appoggio del corpo volvente, è totalmente compresso. [7] _____</i>	71
<i>Figura 72) Mappe di Johnson ottenute interpolando con delle parabole. _____</i>	72
<i>Figura 73) Tipico esempio di zona di aderenza con le forze agenti.[22] _____</i>	81



## RINGRAZIAMENTI

---

Questo percorso è finalmente giunto al termine. Se sono qui il merito è anche di mio padre Enrico, mia madre Maura, mia sorella Martina che mi hanno sopportato e sostenuto nei momenti più difficili. Ovviamente devo questo successo anche a tre persone importanti che sono mia nonna Mariangela, le mie zie Vivi e Chicca che mi hanno sempre voluto bene e che da lassù mi guardano. Volevo ringraziare anche l'ingegnere Zampieri per il suo costante impegno nell'avermi supportato per la realizzazione di questa tesi.

Un ringraziamento infine al titolare della S.I.C.M.A. Sig. Michele Bertolino e agli ingegneri Curone, Olivero e Camperi per la loro gentile collaborazione.