

**POLITECNICO DI MILANO**

**Scuola di Ingegneria Civile e Ambientale**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile  
Infrastrutture di Trasporto**



**MANUTENZIONE PREVENTIVA SU CARRI MERCI FERROVIARI:  
NUOVO APPROCCIO ALL' OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO**

**Relatore: Prof. Roberto Maja**

**Tesi di Laurea di:**

**Sara Gioletta**

**Matr. N. 876045**

**Anno Accademico 2017-2018**



# Indice Generale

Indice delle Figure.....	3
Indice delle Tabelle .....	5
Sommario.....	6
Abstract.....	7
Capitolo 1: Trasporto merci in ambito ferroviario.....	8
1.1    VTG Rail Europe.....	10
1.1.1    Differenze tra i tipi di traffico.....	10
1.1.2    Gestione della manutenzione .....	12
1.2    Tipi di carri .....	13
1.2.1    Carri intermodali .....	13
1.2.2    Carri cisterna .....	15
1.2.3    Componenti fondamentali.....	15
Capitolo 2: Manutenzione in generale.....	18
2.1    Politiche manutentive.....	21
2.1.1    Manutenzione correttiva .....	23
2.1.2    Manutenzione preventiva.....	24
2.2    Scelta della politica manutentiva.....	33
2.3    Manutenzione dei carri ferroviari.....	37
2.3.1    Manutenzione preventiva in ambito ferroviario .....	38
2.3.2    Entità del distanziamento tra riparazioni cicliche.....	40
2.3.3    Altri elementi da cui dipende la buona riuscita della manutenzione .....	42
Capitolo 3: Analisi dell'aspetto tecnico: individuazione degli elementi più critici dal punto di vista dei guasti.....	44
3.1    Analisi dei guasti .....	44
3.2    Analisi della durata della vita utile delle soole freno.....	48

3.2.1	Valutazione della vita utile sulla base del monitoraggio di alcuni treni .....	48
3.2.2	Analisi di un campione di carri .....	50
3.2.3	Studi teorici .....	54
3.2.4	Progetto Europe Train.....	63
3.3	Elementi da cui dipende l'usura delle suole .....	67
Capitolo 4: Sviluppo di un modello economico per la valutazione del distanziamento ottimo .....		69
4.1	Struttura del modello.....	70
4.2	Valutazione dei costi .....	72
4.3	Valutazione del numero di guasti atteso .....	74
4.4	Nozioni di affidabilità .....	75
4.4.1	Elementi di affidabilità nel discreto .....	76
4.4.2	Elementi di affidabilità nel continuo.....	81
4.4.3	Espressione analitica della legge di affidabilità .....	84
4.5	Determinazione delle grandezze affidabilistiche nel caso in esame .....	87
Capitolo 5: Taratura del modello .....		89
5.1	Scelta del soggetto per la taratura.....	89
5.2	Definizione dei dati in ingresso .....	91
5.2.1	Valutazione dei costi .....	91
5.2.2	Valutazione del numero di guasti atteso .....	93
5.3	Modello per treno completo: struttura .....	98
5.4	Taratura su treno completo .....	101
Capitolo 6: Applicazione del modello .....		103
6.1	Valutazione dei costi .....	103
6.2	Definizione delle condizioni di manutenzione.....	105
6.3	Calcolo del tempo ottimo di intervallo manutentivo .....	108
Conclusioni e possibili ulteriori sviluppi.....		114
Bibliografia .....		116

# Indice delle Figure

Figura 1.1: Struttura di un carro pianale a 4 assi (vista laterale) .....	13
Figura 1. 2: Struttura di un carro pianale a 4 assi (vista dall'alto).....	14
Figura 1.3: Struttura di un carro a tasca .....	14
Figura 1.4: Struttura di un carro cisterna.....	15
Figura 1.5: Struttura dell'impianto frenante ferroviario.....	16
Figura 2.1: Diagramma dei tempi di manutenzione: sono rappresentati i tempi relativi alle varie operazioni per riportare al 100% il livello produttivo di una macchina che subisce un guasto.....	15
Figura 2.2: Schema delle diverse politiche e filosofie di manutenzione .....	18
Figura 2.3: Schema di attuazione della manutenzione preventiva a intervalli costanti: si nota che, nonostante la presenza di interventi correttivi, l'intervallo tra due successivi interventi preventivi non viene modificato.....	21
Figura 2.4: Schema di attuazione della manutenzione preventiva a età costante: nel caso si verifichi un intervento correttivo, il successivo intervento preventivo viene riprogrammato.....	22
Figura 2.5: Andamento del segnale di monitoraggio del degrado di una macchina.....	27
Figura 2.6: Rappresentazione grafica delle diverse politiche manutentive: a diversi valori di frequenza ed impatto del guasto, corrispondono strategie diverse.....	31
Figura 3.1: Tipologie di avaria riscontrate sul parco carri analizzato; si nota che la maggior parte dei guasti è legata all'impianto frenante e alle sue componenti.....	40
Figura 3.2: Tipologie di avaria relative al freno. Si nota che la maggior parte di esse è dovuta a problemi delle suole.....	41
Figura 3.3: Suola del freno .....	43
Figura 3.4: Suole montate su un carro: ogni porta suole ne contiene una coppia. Quando il ceppo viene azionato, le suole entrano in contatto con la superficie della ruota.....	43
Figure 3.5 (sinistra) e 3.6 (destra): Esempi di suole usurate. A sinistra, si nota la superficie rovinata; a destra, lo spessore ridotto.....	43
Figura 3.7: Indicazione della zona della suola di cui va misurato lo spessore, per valutare se sia da sostituire o meno.....	44
Figura 3.8: Schema del programma manutentivo utilizzato da uno dei clienti di VTG. Sono previsti interventi preventivi ogni 120'000 km, a cui si inframmezzano interventi di manutenzione più veloci e controlli visivi.....	45
Figura 3.9.: Media di etichette per suole riportate dai diversi tipi di carri componenti il campione selezionato, nel periodo da Gennaio 2015 a Luglio 2018.....	48
Figura 3.10: Modello termico per definire lo scambio di calore ruota-suola. L'interfaccia tra i due elementi è rappresentata come un sistema di resistenze in serie.....	53
Figura 3.11: Modello agli elementi finiti del sistema ruota/suola freno. E' evidenziato il dettaglio della mesh vicino alla zona di contatto. Il modello include 8900 elementi parabolici. Il diametro della ruota è di 780 mm, mentre la larghezza della suola è di 80 mm.....	54

<i>Figura 3.12: Legame tra tasso di usura e temperatura per 5 diversi tipi di materiali, misurati con prova perno su disco.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.13: Andamento della temperatura e consumo (in grammi di materiale usurato) per ogni tipo di suola, in funzione del tempo, nel caso T1.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.14: Andamento della temperatura e consumo (in <math>\mu\text{m}</math>) per ogni tipo di suola, in funzione del tempo, nel caso T1.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.15: Consumo delle suole in termini di diminuzione di spessore (mm) in funzione dei chilometri percorsi, rilevato sulla base di monitoraggi .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.16: Tratte percorse dal treno dimostrativo nel corso di un anno. I percorsi sono stati individuati in modo che si differenziassero per clima e conformazione del territorio .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.1: Andamento delle funzioni di costo al variare del tempo.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.2: Andamento del tasso di guasto per ogni diversa famiglia di macchine.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.3: Tasso di guasto in funzione del tempo. La curva, detta "a vasca da bagno", presenta 3 zone con andamento differente, riferibili alle diverse fasi della vita utile di una macchina.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.4: Andamento di <math>f(t)</math> in funzione del tempo. L'area sottesa dalla funzione tra l'istante iniziale <math>t=0</math> e l'istante <math>t= t_0</math> corrisponde a <math>F(T)</math>; l'area rimanente, invece, corrisponde a <math>R(T)</math>.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.5: Andamenti delle funzioni <math>R(T)</math> e <math>F(T)</math>. Si nota che le due curve sono simmetriche: quando <math>F(T)</math> è nulla, <math>R(T)</math> è pari a 1, e viceversa.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.1: Andamento di <math>f(t)</math>, calcolata utilizzando i valori di <math>\mu</math> e <math>\sigma</math> relativi al cliente sul quale si sta tarando il modello.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.2: Andamenti di <math>R(tp)</math> e <math>F(tp)</math>, calcolate integrando <math>f(t)</math>.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.3: Andamento del tasso di guasto <math>\lambda</math> nel caso in esame, calcolato a partire da <math>f(t)</math> e <math>R(tp)</math>.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.4: Andamento delle funzioni di costo calcolate per il cliente in esame. Si evidenzia il minimo della curva CUA, cui corrisponde il valore di <math>t_p</math> ottimale.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5.5: Andamento delle funzioni di costo valutate considerando la manutenzione applicata a treno completo; si nota uno spostamento verso sinistra del <math>t_p</math> ottimo.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 6.1: Andamento di <math>f(t)</math>, calcolata con i valori di <math>\mu</math> e <math>\sigma</math> relativi al cliente cui si sta applicando il modello.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 6.2: Andamento di <math>F(tp)</math> e <math>R(tp)</math>, calcolate integrando <math>f(t)</math>.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 6.3: Andamento del tasso di guasto <math>\lambda(t)</math>; si nota che la funzione cresce in modo più rapido rispetto al caso precedente.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 6.4: Andamento delle curve di costo calcolate per il cliente su cui si sta applicando il modello. Si nota che <math>C_c</math> cresce molto più velocemente rispetto al caso precedente: ciò è dovuto alla più elevata probabilità di guasto associata al cliente.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 6.5: Schema del programma manutentivo definito per il cliente in questione, sulla base dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello.....</i>	<i>112</i>

# Indice delle Tabelle

<i>Tabella 2.1: Schema per la scelta della politica manutentiva, sulla base di impatto, frequenza e prevedibilità del guasto. (MC/P= man. su condizione/predittiva; MPC= man. preventiva ciclica; MP=man. preventiva; MC=man. correttiva) .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabella 3.1: Media delle percorrenze chilometriche mensili di ogni tipo di carro, per ogni diverso tipo di soole, e stima chilometrica della durata di queste ultime.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabella 3.2: Media della durata chilometrica di ogni tipologia di suola, valutata sul campione di carri selezionato.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 3.3: Durata media per tipo di suola valutata estraendo i dati direttamente dal sistema GPS.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 3.4: Valori dei vari parametri utilizzati per ogni scenario di simulazione.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabella 3.5: Consumo delle soole per ogni scenario di simulazione, in termini di massa di materiale perso.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabella 3.6: Tassi di usura per ciascun materiale costituente le soole, stimati sulla base dei monitoraggi compiuti sul treno.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabella 4.1: Descrizione dei diversi andamenti assumibili dal tasso di guasto e delle caratteristiche del gruppo di macchinari cui sono relativi .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabella 5.1: Costi specifici relativi al cliente di riferimento per la taratura del modello .....</i>	<i>90</i>
<i>Tabella 5.2: Costi totali, individuati moltiplicando i costi specifici per i relativi tempi o numeri di elementi .....</i>	<i>91</i>
<i>Tabella 5.3: Costi fissi relativi al cliente di riferimento per la taratura del modello .....</i>	<i>91</i>
<i>Tabella 5.4: Costi relativi alle lavorazioni effettuate in sede di manutenzione preventiva .....</i>	<i>92</i>
<i>Tabella 5.5: Valori dei parametri utilizzati e risultati ottenuti dalla taratura del modello .....</i>	<i>95</i>
<i>Tabella 5.6: Valori dei parametri definiti per la taratura del modello nel caso di manutenzione effettuata su treno completo.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabella 5.7: Risultati ottenuti dalla taratura del modello nel caso di manutenzione effettuata su treno completo .....</i>	<i>100</i>
<i>Tabella 6.1: Costi specifici e totali relativi al cliente di riferimento per l'applicazione del modello.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabella 6.2: Parametri e costi relativi ai diversi scenari di manutenzione ipotizzati. Al variare del numero di carri che si vuole lavorare, sono riportati il numero di operatori e il tempo necessari allo scopo. A ciascuno scenario è inoltre abbinato il costo relativo all'intervento di manutenzione preventiva, secondo le condizioni previste.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabella 6.3: Parametri in ingresso definiti per il cliente di riferimento per l'applicazione del modello .....</i>	<i>106</i>
<i>Tabella 6.4: Costi totali relativi alla manutenzione preventiva da effettuarsi sul cliente in esame .....</i>	<i>107</i>
<i>Tabella 6.5: Risultati ottenuti dall'applicazione del modello al cliente in esame.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabella 6.6: Valori delle grandezze affidabilistiche calcolate in corrispondenza del tp ottimo.....</i>	<i>110</i>

# Sommario

La manutenzione dei carri ferroviari è un elemento molto importante ai fini dell'efficienza del trasporto merci su rotaia. In particolare, la manutenzione preventiva, se effettuata correttamente, consente di aumentare di molto il tasso di utilizzo dei carri, e quindi il rendimento del servizio di trasporto.

Il presente lavoro si propone di individuare un metodo che permetta di identificare l'intervallo ottimale con cui effettuare gli interventi di manutenzione, cioè l'intervallo che permette di rendere la manutenzione il più efficiente possibile.

Per fare questo, è stata svolta anzitutto un'analisi sulle tipologie di guasto più frequenti, con lo scopo di individuare gli elementi maggiormente coinvolti nei fenomeni di avaria dei carri. Ci si è quindi concentrati sulle caratteristiche dell'elemento individuato, per capire se fosse possibile pianificare la manutenzione sulla base della durata della vita utile dello stesso.

Poiché, dalle analisi svolte, è emerso che questo tipo di approccio non è in grado di garantire un intervallo di manutenzione ottimale, si è valutato il problema dal punto di vista economico.

Nello specifico, si è sviluppato un modello che, valutando la variazione dei costi relativi alla manutenzione in funzione del tempo, permette di individuare il valore da attribuire all'intervallo affinché i costi siano minimi.

# Abstract

The maintenance of rail wagons is a very important element for the efficiency of rail freight transport. In particular, if correctly carried out, preventive maintenance allows to greatly increase the using rate of the wagons, and therefore the efficiency of the transport service itself.

The present work aims at finding a method that allows to identify the optimal interval that should be considered when carrying out maintenance interventions, i.e. the interval that makes maintenance as efficient as possible.

To do this, an analysis was carried out on the most frequent types of fault, with the aim of identifying the most involved elements in the phenomena of wagon failure. Consequently, we focused on the characteristics of the identified element, to understand if it was possible to plan maintenance basing on the useful life of the element.

Since it has emerged from the analyzes carried out that this type of approach is not able to guarantee an optimal maintenance interval, the problem has been evaluated from the economic point of view.

Specifically, we have developed a model that makes it possible to identify the value to be attributed to the interval by evaluating the variation in costs related to maintenance as a function of time, in order to obtain the minimal costs as possible.

# Capitolo 1

## Trasporto merci in ambito ferroviario

Negli ultimi anni, il trasporto merci in ambito ferroviario ha subito diversi cambiamenti, a causa di eventi che hanno interessato tutto il settore.

Tra i più significativi, si è registrata un'ampia crescita del traffico intermodale, che ha preso il sopravvento sui trasporti "tradizionali" di merci varie su carri singoli (traffico diffuso) o su treni completi.

Il trasporto intermodale consiste nel carico di merce diversa in contenitori unitizzati (container e casse mobili), che possono essere trasportati con diverse modalità, senza dover effettuare rotture del carico. I container, infatti, possono venire spostati direttamente da navi a carri ferroviari, o da carri a camion, utilizzando sempre lo stesso tipo di attrezzature: non è necessario spostare la merce da un contenitore all'altro, poiché viene movimentato tutto il contenitore. Questo permette di velocizzare di molto i tempi di carico e scarico, rendendo il trasporto su rotaia più competitivo.

Il traffico diffuso, o a carro singolo, offre la possibilità di caricare la merce su uno o più carri, messi a disposizione da Imprese Ferroviarie o da detentori di carri privati, in scali merci vicino al luogo di origine. Tali carri vengono poi composti in treni misti, in base alla destinazione di ciascuno, e portati allo scalo successivo, che sarà vicino al luogo di arrivo. Può anche accadere che i treni si fermino in scali intermedi, e quindi vengano scomposti e ricomposti più volte, per mezzo dello smistamento dei carri negli scali. Tale tipo di trasporto, sempre meno utilizzato, in Italia è stato soppresso, in quanto ritenuto non economicamente sostenibile.

Per quanto riguarda il trasporto effettuato a treno completo, esso si differenzia dal precedente in quanto i treni vengono composti al momento della partenza, in base alla destinazione dei carri, e non vengono più modificati fino all'arrivo. Per poter inviare una certa merce verso una determinata destinazione, quindi, è necessario attendere che il numero di carri componenti il treno raggiunga un certo numero. Tale metodo di trasporto è tendenzialmente più veloce rispetto a quello a carro singolo, non essendo necessarie soste intermedie per effettuare lo smistamento dei carri, ma risulta meno agevole per chi ha necessità di inviare poca merce per volta.

Le differenze nel metodo di effettuazione del trasporto comportano differenze anche dal punto di vista manutentivo.

In particolare, nel caso del trasporto a treno completo, i carri che necessitano riparazioni non vengono trasportati singolarmente in officina, ma si attende che questi siano abbastanza numerosi da comporre un treno economicamente sostenibile. Questo può causare la sottrazione al servizio dei carri per tempi molto superiori a quelli che sarebbero necessari per la riparazione. Il che, come verrà approfondito nel seguito, è dannoso per il servizio intermodale. Al contrario, utilizzando questo metodo si hanno dei vantaggi per quanto riguarda i controlli periodici sui carri: poiché questi rimangono in composizioni più o meno fisse (lungo una stessa tratta sono sempre gli stessi carri a circolare), diventa più semplice effettuare manutenzioni a treno completo, controllando tutti i vagoni in una volta sola.

Per quanto riguarda invece il sistema diffuso, le problematiche sono inverse: si hanno vantaggi dal punto di vista delle riparazioni sui carri singoli, in quanto è più semplice disporre il loro trasporto in officina. D'altro canto, non è possibile effettuare controlli periodici su treni completi, poiché le composizioni variano continuamente.

## *1.1 VTG Rail Europe*

VTG Rail Europe è una società di noleggio e logistica ferroviaria internazionale, con sede ad Amburgo.

La società è proprietaria di circa 90'000 carri ferroviari, che costituiscono la più grande flotta di proprietà privata in Europa.

Fondata nel 1951, l'azienda si è inizialmente specializzata nel settore dei carri cisterna, per il trasporto di liquidi e gas, anche nel campo delle merci classificate come pericolose.

La flotta di carri, in continua crescita nel corso degli anni, ha subito un importante ampliamento in seguito all'annessione, da parte di VTG, del gruppo AAE, società svizzera detentrici di carri ferroviari intermodali. L'acquisizione, avvenuta nel 2014, ha permesso all'azienda di estendere i propri traffici anche nel settore intermodale, ampliando quindi il proprio raggio d'influenza.

Con l'acquisizione di AAE, e quindi con l'ingresso nel traffico intermodale, VTG si è trovata ad operare in un contesto molto diverso rispetto a quello delle cisterne. Sia per i tipi di carro, sia per le caratteristiche del traffico, sia per tipo di merce trasportata, infatti, le due realtà sono molto diverse.

### *1.1.1 Differenze tra i tipi di traffico*

Per traffico intermodale si intende, come già accennato, il trasporto di UTI (Unità di Trasporto Intermodale) con l'utilizzo di carri pianale, che possono avere caratteristiche diverse in base al tipo di carico che sono abilitati a trasportare (casce mobili, container, semirimorchi intermodali).

Questo tipo di traffico è molto frenetico: non appena un treno raggiunge la destinazione, infatti, questo viene scaricato e, a breve distanza di tempo, ricaricato e preparato per un nuovo trasporto. Effettuare le operazioni di carico e scarico il più velocemente possibile è necessario per rendere il trasporto su rotaia competitivo nei confronti di quello su strada.

Al contrario, i carri cisterna hanno traffici meno intensi e percorrono un minor numero di chilometri al mese. Questo perché è molto diverso il tipo di trasporto: se infatti un intermodale percorre continuamente la stessa tratta, effettuando una sorta di spola, un carro cisterna affronta viaggi solitamente più lunghi, spesso internazionali, ma una volta giunto a destinazione rimane fermo anche per lunghi periodi.

I tempi di scarico e ricarica, infatti, sono molto più dilatati, soprattutto nel caso di merci pericolose, per cui è necessaria una pulitura accurata del contenitore prima di poterlo riempire nuovamente con una sostanza diversa. Essendo inoltre le operazioni svolte in impianti, il caricamento del treno avviene un carro alla volta, mentre, per i treni intermodali, è possibile caricare più carri contemporaneamente.

Dal fatto che ci siano tutte queste differenze tra le due tipologie di traffico, consegue che anche la manutenzione sarà svolta in maniera diversa.

Come avviene per le tempistiche di carico/scarico, infatti, anche i tempi di manutenzione sono molto diversi in un caso e nell'altro.

Per quanto riguarda i carri intermodali, gli interventi correttivi, cioè le riparazioni in seguito a guasto, devono essere tempestivi, in modo da permetterne la ripartenza in tempi brevi.

Pertanto, se l'avaria rilevata sul carro è tale da poter essere riparata in situ, viene inviata una squadra mobile, che effettua le riparazioni senza necessità di portare il veicolo in officina.

Se, viceversa, i danni sono di una certa entità, si deve disporre il trasporto del carro in officina, dove verrà riparato. Quest'operazione è complicata dal fatto che il carro, per essere trasportato, deve prima venire staccato dalla composizione, ovvero rimosso dal treno di cui fa parte. Per fare questo, sono necessarie diverse manovre: occorre separare il veicolo riparando dagli altri componenti del treno, quindi effettuare le manovre necessarie ad estrarlo dalla composizione e spostarlo su un binario libero, dove possa venire lasciato in attesa che venga organizzato il trasporto.

Inoltre, se il carro su cui si individua l'avaria è carico, a queste operazioni si aggiungono quelle di scarico.

La rimozione di un carro dalla composizione di cui era parte viene definita *scarto*.

Per i carri cisterna, le problematiche sono invece di altro tipo.

Nel caso vengano riscontrate delle avarie, infatti, non si ha urgenza di ripararle come avviene per i carri pianale; essendo i tempi di sosta più lunghi, solitamente si ha il tempo di intervenire “con calma”, prima che il treno riparta.

I maggiori problemi si verificano quando le anomalie vengono riscontrate prima che i carri abbiano raggiunto la destinazione, e quindi quando sono ancora carichi.

Tale situazione è problematica perché le operazioni di scarto di una cisterna sono più complesse rispetto a quelle relative ad un carro intermodale, soprattutto per quanto riguarda lo scarico. Lo svuotamento delle cisterne, infatti, richiede più tempo e attenzione rispetto allo scarico dei container dai carri pianale, in particolare se si ha a che fare con sostanze pericolose, e quindi esistono problemi di sicurezza per gli operatori.

Anche per quanto riguarda i controlli periodici si agisce in maniera diversa.

I carri intermodali vengono controllati con una certa cadenza (manutenzione preventiva), in modo da sostituire eventuali elementi usurati rimettendo a nuovo il carro, con lo scopo di ridurre la probabilità di guasto in esercizio, e quindi la possibilità di dover scartare i carri.

Interventi di questo tipo sono difficili da realizzare nel caso delle cisterne, a causa della natura del traffico sopra descritta. Se gli intermodali viaggiano sempre sulle stesse tratte, infatti, i carri serbatoio hanno percorsi molto più estesi. Non si programmano quindi interventi periodici, ma si effettuano controlli approfonditi prima di caricare le cisterne in ripartenza.

### *1.1.2 Gestione della manutenzione*

Per quanto riguarda la gestione pratica delle manutenzioni, in base a quale ente ne è responsabile, si agisce in maniera diversa.

Nel caso di VTG, l’ente cui vengono noleggiati i carri può decidere se occuparsi personalmente della manutenzione, o se affidarne la gestione a VTG stessa. Nel secondo caso, sarà l’azienda a disporre le riparazioni dei carri e il loro eventuale trasporto in officina, nonché la rimessa in esercizio degli stessi.



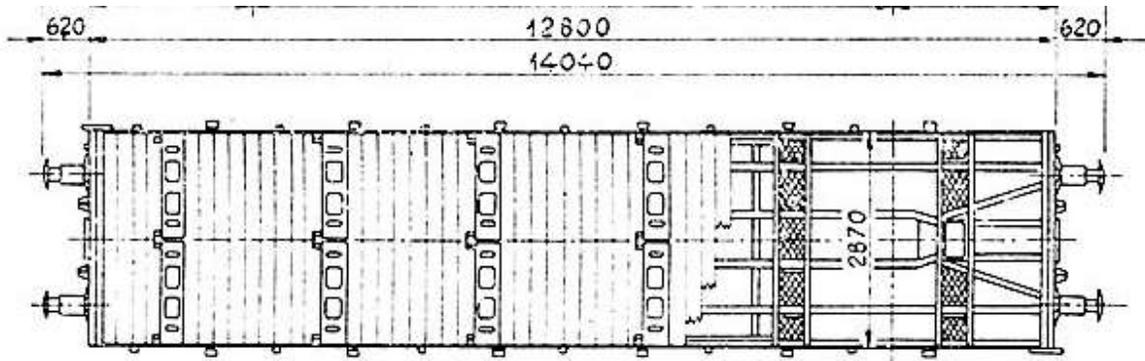


Figura 1. 2. Struttura di un carro pianale a 4 assi (vista dall'alto)

Altra tipologia sono i carri a tasca (Figura 1.3), equipaggiati di una “conca” (la tasca, appunto), all’interno della quale trovano posto gli assi di un semirimorchio, e di una sella di appoggio mobile, cui viene agganciato il perno.

I carri a tasca possono essere utilizzati anche per il trasporto di container o casse mobili.

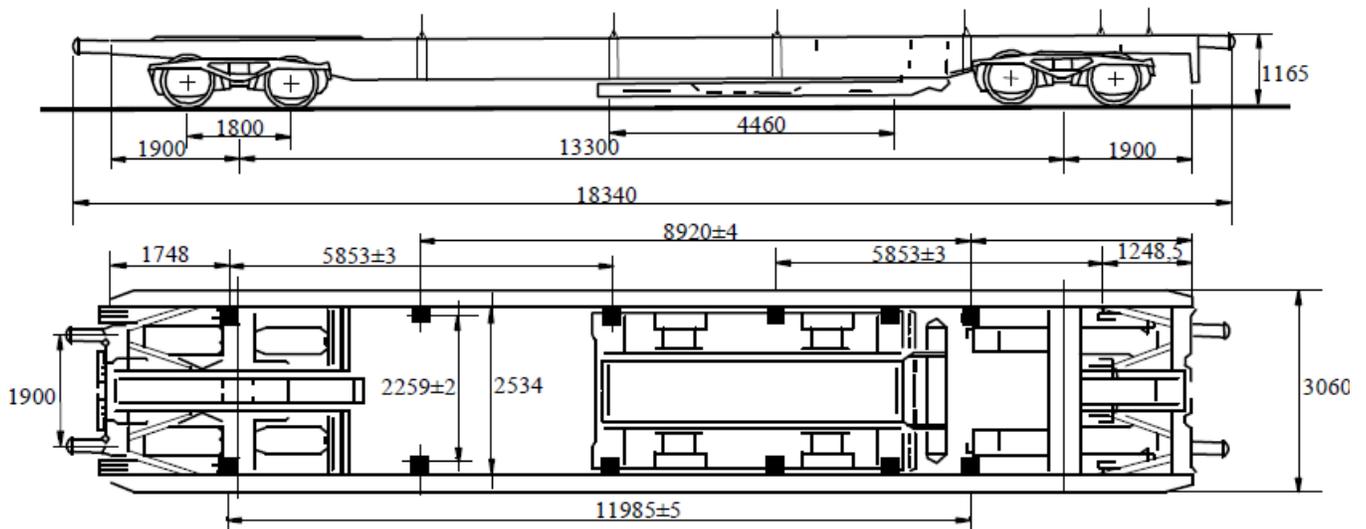


Figura 1.3: Struttura di un carro a tasca

### 1.2.2 Carri cisterna

I carri cisterna (Figura 1.4) sono utilizzati per il trasporto di sostanze liquide e gassose. Si differenziano in base al tipo di sostanza che trasportano, essendo ciascuna tipologia progettata per il trasporto di uno specifico tipo di materiale, difficilmente compatibile con altri.

Le cisterne sono fornite di appositi bocchettoni per il carico nella parte superiore, e, in alcuni casi, di uno o più scomparti divisori interni.

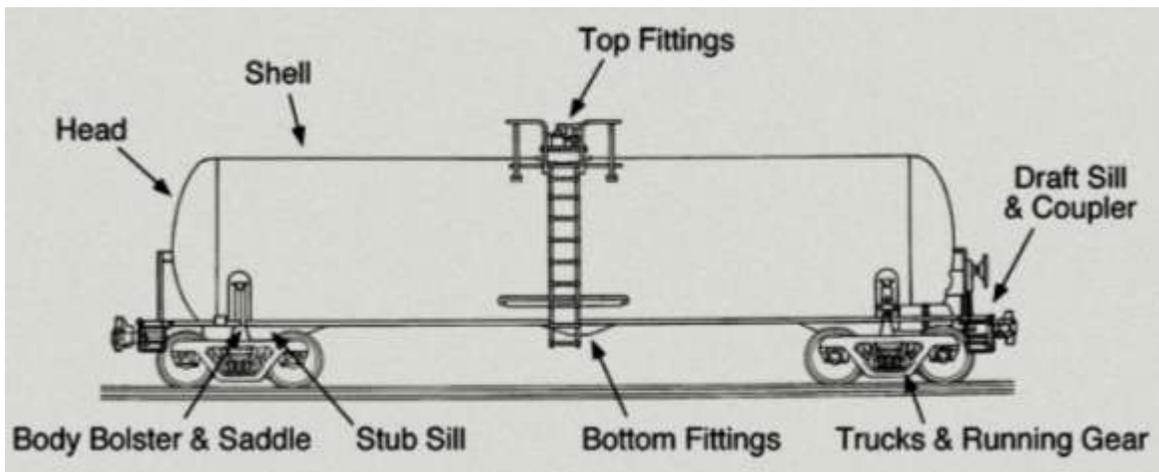


Figura 1.4: Struttura di un carro cisterna

### 1.2.3 Componenti fondamentali

Come si nota dalle immagini, gli elementi fondamentali dei carri, ovvero quelli componenti la sottostruttura, sono i medesimi per tutti i tipi di carro.

Nello specifico, questi elementi sono i carrelli, le sale montate, l'impianto frenante, i respingenti, i tenditori e gli organi di aggancio.

L'impianto frenante dei treni è di tipo pneumatico, strutturato in modo da essere continuo: l'ordine di frenatura, impartito dalla locomotiva, deve essere recepito da tutti i carri. La continuità del sistema è realizzata per mezzo di un sistema ad aria compressa.

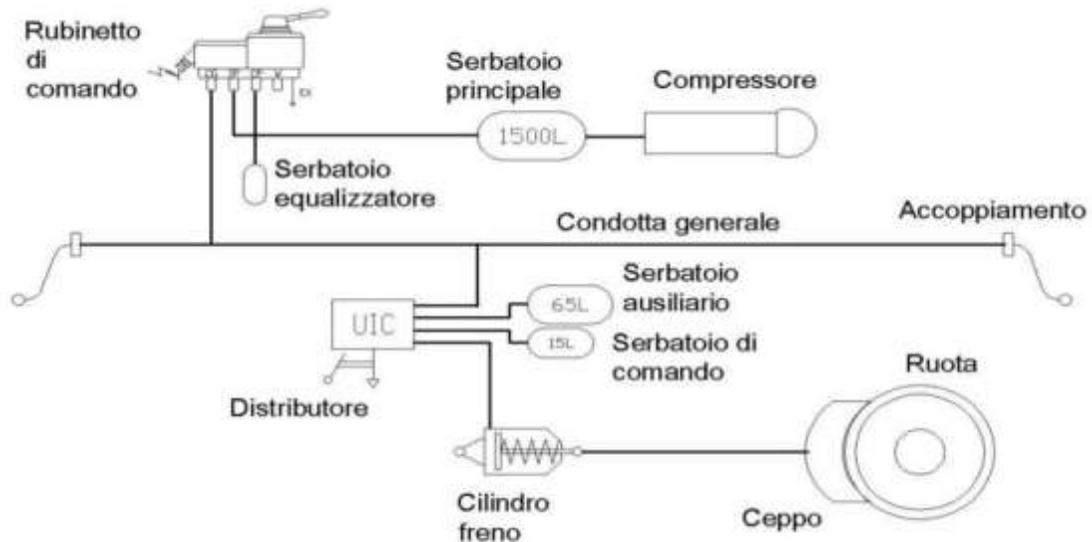


Figura 1.5: Struttura dell'impianto frenante ferroviario

In particolare, l'impianto frenante è composto dai seguenti elementi, mostrati in Figura 1.5 :

- compressore, che mantiene l'aria nella condotta alla pressione voluta (solitamente 5 bar);
- uno o più serbatoi di accumulo dell'aria in pressione prodotta dal compressore;
- rubinetto di comando, attraverso cui viene avviata la frenatura;
- dispositivi per l'attuazione del comando di frenatura (serbatoio ausiliario, di comando, cilindri del freno, leveraggi, pinze o ceppi frenanti);
- condotta dell'aria in pressione (detta *condotta principale* o *generale*) per l'accoppiamento di altri veicoli, cioè per fare in modo che il comando di frenatura venga trasmesso a tutti i carri che compongono il treno.

Nel momento in cui, agendo sul rubinetto, viene variata la pressione dell'aria nella condotta, per mezzo del distributore viene azionato il sistema di leve che porta al serraggio dei ceppi sulla ruota, rallentando il treno fino all'arresto.

E' fondamentale garantire il perfetto funzionamento degli elementi citati, per motivi di efficienza ma soprattutto per la sicurezza dell'esercizio.

Per questo motivo, la manutenzione, soprattutto quella di tipo preventivo, assume grande rilevanza nell'ambito dei trasporti su rotaia.

Nel capitolo seguente si andrà quindi ad approfondire il concetto di manutenzione, soprattutto in ambito ferroviario.

## Capitolo 2

### Manutenzione in generale

La norma UNI 10147 definisce, con il termine *guasto*, un fenomeno che consiste nella “cessazione dell’attitudine di una certa “entità” ad eseguire la funzione ad essa richiesta.”

Per far fronte all’accadimento di tali fenomeni, che sono dannosi per la produzione e in alcuni casi anche per la sicurezza, si ricorre a processi di manutenzione.

La manutenzione delle macchine in generale ha due scopi principali [1][4]:

- **Riparare i guasti**
- **Impedire la loro insorgenza**

In base all’aspetto privilegiato, si distinguono due tipologie manutentive, definite rispettivamente *manutenzione correttiva* (riparazione di guasti già in atto) e *manutenzione preventiva* (effettuazione di interventi prima che il guasto si verifichi).

In entrambi i casi, l’obiettivo da perseguire è la riduzione dell’indisponibilità accidentale o sistematica della macchina, che si manifesta quando gli apparati sono soggetti, durante la produzione, a usura, fatica e corrosione e, in generale, quando i meccanismi invecchiano e si degradano.

La comparsa di un guasto causa generalmente un decadimento delle prestazioni, che può essere tanto istantaneo e totale, quanto parziale e dilazionato nel tempo. Tra il manifestarsi dell’anomalia e l’intervento della manutenzione per la riparazione, dunque, può trascorrere diverso tempo, in base a quanto l’avaria è debilitante per la macchina. Inoltre, il momento in cui si decide di effettuare una riparazione può non coincidere con l’inizio effettivo delle

operazioni, per motivi di mancata disponibilità di tecnici o di pezzi di ricambio. Di conseguenza, la durata di un intervento di manutenzione non dipende solo dal tempo necessario alla lavorazione vera e propria, ma anche da altri fattori.

Nella norma UNI 9910 sono riportati i diagrammi relativi ai tempi della manutenzione, dei quali la Figura 2.1 fornisce un esempio. Tali diagrammi evidenziano i diversi intervalli di tempo di cui si compone il periodo di manutenzione.

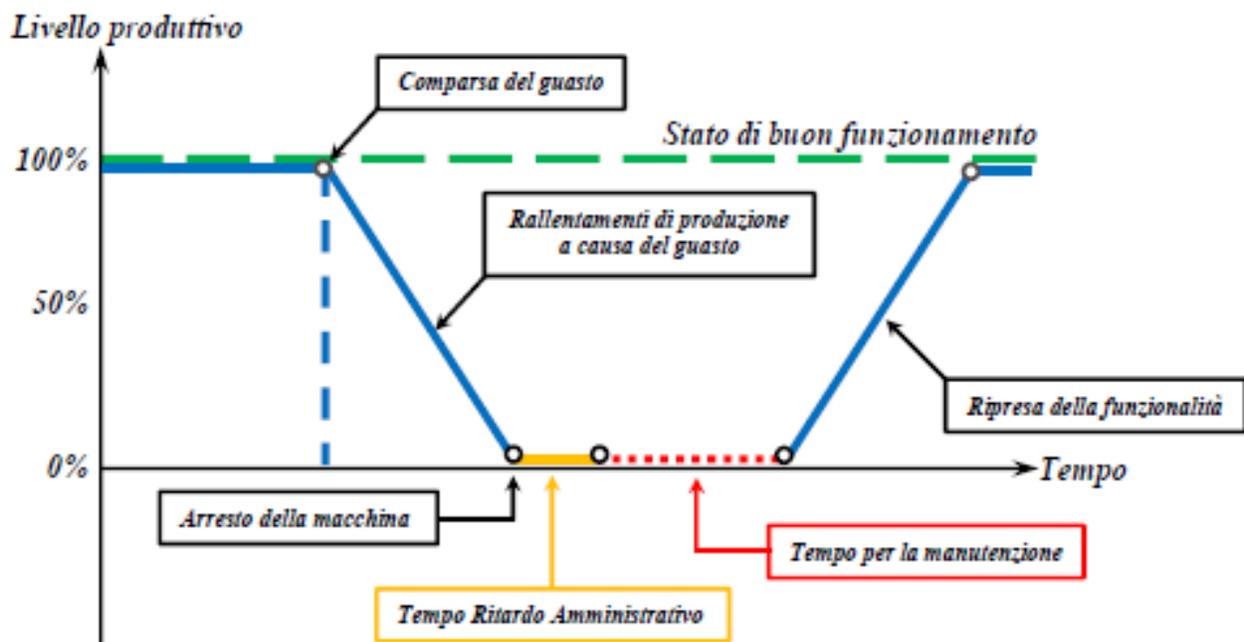


Figura 2.1: Diagramma dei tempi di manutenzione: sono rappresentati i tempi relativi alle varie operazioni per riportare al 100% il livello produttivo di una macchina che subisce un guasto

Osservando la figura, si nota che, dal momento della comparsa del guasto fino al momento in cui viene nuovamente raggiunto lo stato di buon funzionamento, è possibile individuare una serie di intervalli, legati a fattori diversi [2]:

- **Rallentamento:** è l'intervallo di tempo durante il quale il sistema continua ad operare, ma i processi ed il funzionamento risultano via via rallentati o errati (i primi rallentamenti molto spesso non vengono associati ad un malfunzionamento o alla comparsa di un guasto). In questo intervallo di tempo, l'operatore ha modo di constatare che la macchina presenta un guasto che sta portando all'arresto del sistema, quindi di segnalarlo agli addetti alla manutenzione.
  
- **Ritardo Amministrativo:** è il tempo necessario affinché la manutenzione si attivi, a causa di fenomeni di tipo amministrativo e all'effettiva disponibilità e preparazione dei manutentori alla specifica tipologia di guasto. Non è infatti da escludere la possibilità che, al momento del guasto, non vi sia alcun manutentore libero per effettuare l'intervento. Lo stesso vale per i ricambi e le attrezzature necessarie alle operazioni di manutenzione.
  
- **Tempo di riparazione:** è il tempo necessario a completare il processo di riparazione, composto a sua volta da 4 sotto-intervalli:
  - o **Tempo di ricerca e rilevazione dell'anomalia segnalata** → tempo durante il quale il tecnico incaricato effettua un controllo tramite diagnostica (direttamente sulla macchina) e/o telediagnostica (a distanza, tramite comandi remoti).
  
  - o **Tempo di approvvigionamento ricambi** → tempo necessario per reperire i pezzi di ricambio necessari, a magazzino o da fornitori.
  
  - o **Tempo di effettiva riparazione** → è il tempo necessario alla sostituzione dei componenti guasti.

- o **Tempo di controllo** → prima di liberare la macchina dalla manutenzione, occorre effettuare alcuni controlli e test, per verificare che tutto sia funzionante. Questo intervallo tiene conto del tempo necessario per tali operazioni.

Sommando tutti gli intervalli di tempo elencati, si ottiene il tempo di *indisponibilità della macchina*, cioè l'intervallo di tempo complessivo durante il quale la macchina non può essere utilizzata.

Alcune quantità dipendono dalla capacità del servizio manutentivo, altre da fattori esterni, quali i turni lavorativi, i rallentamenti burocratici o la mancanza di ricambi in magazzino.

Il controllo di questi tempi può permettere al gestore del servizio di intervenire in modo mirato su quegli aspetti che maggiormente possono contribuire ad aumentare l'efficacia degli interventi, e quindi minimizzare l'indisponibilità della macchina.

## 2.1 Politiche manutentive

La manutenzione nasce inizialmente dall'esigenza di riparare le macchine guaste per allungare la loro vita utile produttiva; allo stesso modo, la necessità di una macchina di essere mantenuta nel tempo comporta di fissarne e limitarne a priori l'effettivo "sfruttamento" in azienda.

La prima politica sviluppatasi, dunque, è una politica manutentiva di tipo semplice (correttiva), la quale si basa sull'attesa che compaia un guasto, quindi sul successivo intervento dei tecnici per la riparazione e il ripristino delle funzionalità originali.

Altre filosofie, più recenti, hanno favorito il nascere di diverse politiche di manutenzione, volte a ridurre i costi e i tempi di fermo macchina. La necessità di integrare più profondamente la manutenzione nella realtà aziendale, ha portato allo sviluppo di una politica di prevenzione del guasto [4].

In Figura 2.2 sono rappresentate, in modo schematico, le diverse politiche manutentive, associate alle “filosofie” da cui nascono.

Ciascuna delle politiche citate verrà approfondita nei paragrafi seguenti.



Figura 2.2: Schema delle diverse politiche e filosofie di manutenzione

### 2.1.1 Manutenzione correttiva

La manutenzione correttiva è definita come *“manutenzione eseguita a seguito di un’ avaria e volta a riportare un’entità nello stato in cui essa possa eseguire la funzione richiesta”* [5].

Questo tipo di manutenzione, quindi, prevede di lasciare la macchina in esercizio fintantoché il manifestarsi o il progredire di un’ anomalia non costringa il gestore a fermarla.

Tale strategia presenta vantaggi e svantaggi: il fattore positivo è un costo di manutenzione e di fermo macchina pressoché nullo durante il tempo di funzionamento.

I fattori negativi sono invece i seguenti:

- elevata perdita di ricavi, dovuti al fermo della macchina per guasto;
- imprevedibilità dell’intervento, quindi delle eventuali operazioni di deviazione del flusso produttivo in corso (in ambito ferroviario occorre la sostituzione dei veicoli guasti);
- costi di riparazione generalmente elevati, poiché il guasto di un solo componente che si protrae per molto tempo può portare al danneggiamento di altri componenti della macchina.

La strategia correttiva, che rappresenta l’approccio più tradizionale alla manutenzione, conserva quindi una sua validità qualora le tipologie di guasto siano facilmente riparabili, in un contesto produttivo in cui il fermo macchina non comporti gravi danni al ciclo produttivo generale. È il caso, ad esempio, di avarie a macchine in parallelo, il cui ruolo nel ciclo produttivo può facilmente essere ricoperto da un’altra unità.

Un altro caso in cui la manutenzione correttiva è vantaggiosa, si verifica qualora la comparsa della tipologia di guasto a cui è applicata sia scarsamente prevedibile. Se si applicasse una strategia preventiva, infatti, si rischierebbe di sostituire elementi ancora in buono stato, con conseguenti perdite di denaro [4].

### 2.1.2 *Manutenzione preventiva*

#### Manutenzione preventiva ciclica

La manutenzione preventiva si definisce come *“manutenzione eseguita a intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti, volta a ridurre le probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di un’entità”* [5].

La politica preventiva si basa quindi sulla sostituzione programmata di un determinato componente della macchina, ancora perfettamente funzionante, con uno nuovo, in modo da prevenirne il cedimento incontrollato. La programmabilità dell’intervento consente una maggiore organizzazione del lavoro di manutenzione e garantisce la possibilità di gestire la fermata della macchina nella maniera più conveniente.

Nell’ambito della manutenzione preventiva, in base alle modalità di determinazione degli intervalli di tempo predeterminati e alla definizione dei criteri prescritti, si possono distinguere diverse tecniche manutentive [2]:

- **Manutenzione programmata statica:**  
gli intervalli e i criteri prescritti di intervento sono generalmente fissati, a intervalli regolari o a specifici limiti di usura, per tutta la vita utile del componente o della macchina. Esempio pratico può essere la sostituzione delle candele di un’automobile, la cui cadenza chilometrica è specificata dal costruttore ed è da ritenersi valida per tutta la vita del veicolo.
- **Manutenzione programmata dinamica:**  
nella manutenzione programmata dinamica, gli intervalli sostitutivi sono determinati in genere in base alla storia della macchina stessa. La rilevazione del tempo medio tra due guasti (Mean Time Between Failure = *MTBF*), che spesso è funzione delle modalità con cui la macchina viene utilizzata, consente di redigere dei calendari di intervento preventivo, basati su una determinata probabilità che il guasto non si manifesti nell’arco di tempo che intercorre tra due sostituzioni successive.

La manutenzione di tipo dinamico, a sua volta, può essere attuata secondo due strategie differenti, denominate “manutenzione ad intervalli costanti” e “manutenzione a età costante” [1][2].

Nel caso di manutenzione a intervalli costanti, si adotta un intervallo di tempo fisso (per esempio un trimestre) tra un intervento di sostituzione preventiva ed il seguente, indipendentemente da quello che succede durante questo intervallo di tempo. La modalità d'intervento non cambia, quindi, anche se, tra due interventi preventivi programmati, si sono effettuati interventi correttivi, come mostra lo schema in Figura 2.3.

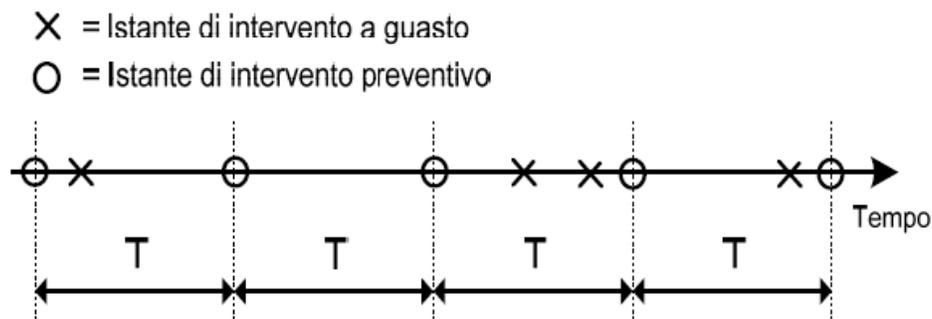


Figura 2.3: Schema di attuazione della manutenzione preventiva a intervalli costanti: si nota che, nonostante la presenza di interventi correttivi, l'intervallo tra due successivi interventi preventivi non viene modificato

Nel caso di manutenzione a età costante, invece, si sostituisce un componente quando lo stesso raggiunge una certa età di funzionamento costante rispetto all'ultimo intervento cui è stata sottoposta la macchina, che si tratti di un intervento correttivo o preventivo. L'età di funzionamento viene misurata in termini di ore di funzionamento, chilometri percorsi, ecc. Ne consegue che, se all'interno del suddetto intervallo accade un guasto, il successivo istante d'intervento preventivo viene ricalcolato (come mostrato in Figura 2.4), in modo tale che, tra il guasto e il nuovo intervento preventivo, trascorra un intervallo di tempo pari all'età costante.

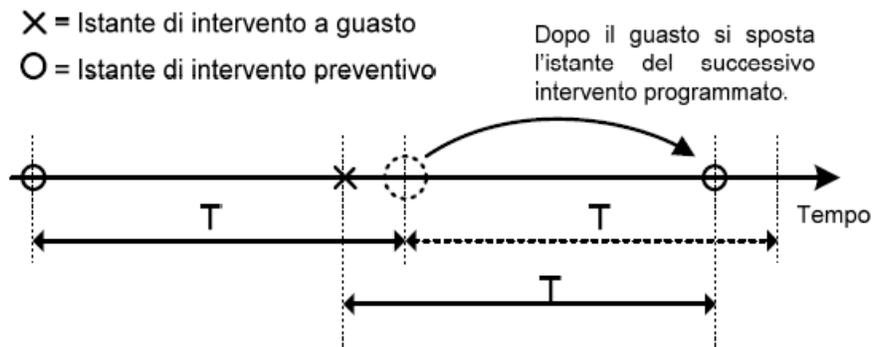


Figura 2.4: Schema di attuazione della manutenzione preventiva a età costante: nel caso si verifichi un intervento correttivo, il successivo intervento preventivo viene riprogrammato

Sia che si tratti di manutenzione a intervalli costanti, che di manutenzione basata sull'età, le attività che vengono svolte durante gli interventi manutentivi sono le seguenti:

- Attività di mantenimento di primo livello (di base): pulizia, cambio dell'olio lubrificante, regolazione, lubrificazione delle parti in moto relativo, ecc.
- Attività di mantenimento a fronte di usura: sostituzione di uno o più componenti della macchina, che si sono usurati al raggiungimento dell'età per cui è stata prevista la sostituzione ciclica anticipata.

A differenza della correttiva, la manutenzione preventiva ciclica risulta conveniente per le macchine per le quali la natura aleatoria del guasto determina una criticità per la sicurezza delle persone e dell'ambiente, e/o l'impatto dovuto all'interruzione dell'attività produttiva causato dal guasto è significativo (elevata perdita di produzione, di qualità, ecc.).

Per quanto riguarda i costi associati, quelli dovuti alle perdite per mancanza di sicurezza e/o servizio sono quelli più rilevanti.

Ne consegue che l'obiettivo della politica di manutenzione preventiva ciclica è quello di ridurre il più possibile il numero dei guasti, in modo tale da contenere le voci di costo indotte da questi ultimi.

È bene tener presente, però, che aumentare in modo indiscriminato la frequenza degli interventi preventivi, al fine di abbassare la probabilità di guasto, porta ad avere un eccessivo costo proprio degli interventi preventivi, che vanifica l'abbassamento di costo legato alla diminuzione dei guasti. La frequenza degli interventi preventivi deve pertanto essere adeguata al carico di lavoro della macchina.

#### Manutenzione su condizione

Un altro tipo di manutenzione preventiva è quella che viene definita *manutenzione su condizione*.

Può succedere, infatti, che adottare una politica di sostituzione programmata non sia conveniente, e che non lo sia nemmeno, dal punto di vista della sicurezza, una politica di tipo correttivo. In questi casi, la soluzione generalmente adottata è quella di constatare le condizioni di usura del componente in questione, e solo allora decidere se sostituirlo o meno [4].

Revisioni non necessarie delle macchine, intese a prevenire guasti futuri, possono talvolta provocare guasti indotti e un danno economico maggiore, rispetto al permettere che la macchina funzioni fino a rottura.

La strategia di monitoraggio della condizione, effettuata mediante verifiche ispettive periodiche, tende quindi ad individuare lo stato di un componente che potenzialmente potrebbe provocare un guasto.

I vantaggi di una manutenzione basata sul monitoraggio sono riassumibili nei seguenti punti:

- Riduzione dei costi di manutenzione
- Aumento della disponibilità operativa delle macchine
- Miglioramento della sicurezza
- Riduzione della quantità e della gravità dei guasti in esercizio

Il monitoraggio delle condizioni può essere definito come un metodo che indica lo stato di “salute” della macchina, utilizzando parametri che evidenziano i cambiamenti avvenuti nel tempo nella macchina stessa. In base al tipo di parametri considerati, si individuano diversi tipi di analisi:

- **Analisi acustica:** l’insorgere di rumori nuovi o variazioni di suono durante il funzionamento di alcuni componenti può essere sintomo di un degrado, che in breve tempo potrebbe portare ad un cedimento.
- **Analisi termica:** la generazione di calore o l’aumento della temperatura di funzionamento a regime oltre un determinato valore limite, spesso indica un degrado del componente.
- **Analisi dei meati dei fluidi interni:** consiste nel controllo dei livelli dei fluidi, che può essere eseguito manualmente o mediante sensori. L’associazione ad un guasto o ad un futuro guasto non è da riferirsi al livello rilevato, ma alla periodicità con cui tale livello viene ripristinato.

Altri indici di possibili anomalie sono l’analisi del lubrificante o del refrigerante rimosso per la sostituzione periodica, dove colore, odore o la presenza di altri liquidi potrebbero indicare particolari usure o cedimenti.

- **Analisi dei parametri di processo:** vengono pesate le prestazioni della macchina e, nel caso in cui differiscano oltre una definita tolleranza da quelli che sono i valori standard, possono essere indice della necessità di un intervento manutentivo.

- Analisi di corrosione: permette di evidenziare particolari fenomeni di usura dovuti a un non corretto funzionamento o utilizzo della macchina, nonché a particolari condizioni di lavoro della macchina stessa (ad esempio, ambienti aggressivi possono accentuare la normale usura di componenti specifici).
- Analisi di vibrazione dinamica: legata a organi rotanti quali ingranaggi, cuscinetti, boccole ecc.

Per quanto riguarda invece i metodi adottabili per effettuare il monitoraggio, si possono distinguere quattro categorie:

- Sistemi continui: i dati relativi a più parametri di funzionamento della macchina vengono acquisiti a intervalli regolari e piuttosto brevi (diagnostica in tempo reale). Questi sistemi sono costosi, ma offrono il più alto grado di copertura nei confronti del guasto.
- Sistemi di sorveglianza: i dati sono rilevati con intervalli di tempo più lunghi (ad esempio nelle fasi di avvio-spegnimento).
- Sistemi di acquisizione distributivi: i dati vengono inviati da strumenti e apparecchiature portatili, posizionati in punti di misura definiti a priori.
- Sistemi di acquisizione manuali: i dati vengono raccolti manualmente dagli operatori durante percorsi pianificati attraverso il parco macchine, senza coinvolgere strumenti posizionati in modo stabile.

## Manutenzione predittiva

La manutenzione predittiva ha un'impostazione simile a quella su condizione. Essa, infatti, si basa sulla possibilità di riconoscere la presenza di un'anomalia in stato di avanzamento, attraverso l'identificazione e l'interpretazione di segnali premonitori del guasto finale.

Il segnale, quando riconosciuto, entra poi a far parte di quei fattori che possono essere monitorati attraverso ispezioni continue o periodiche, come descritto in precedenza.

Un esempio di metodo predittivo è l'identificazione di una legge che correli la variazione di un certo parametro con la vita utile residua del componente analizzato [2][4].

Contrariamente a quanto avviene per la manutenzione preventiva (in particolare per la manutenzione su condizione), l'idea di base si fonda su un controllo dello stato delle apparecchiature eseguito in modo da non interrompere il loro normale funzionamento, ma da segnalarne anticipatamente ed in modo continuo il progressivo degrado.

Lo scopo della manutenzione predittiva è quindi quello di minimizzare, attraverso lo sviluppo di metodologie flessibili e affidabili di rilevamento della condizione, il numero di ispezioni o di revisioni, che potrebbero a loro volta dare luogo a guasti o deterioramenti.

Una volta che si è in grado di monitorare un determinato segnale premonitore, la politica in questione prevede che non si esegua nessun intervento di manutenzione fintantoché il valore di tale segnale non abbia superato un certo livello, definito livello di allerta (fase di rilevamento dell'anomalia).

A partire dal momento in cui si rileva una qualche anomalia, è invece necessario compiere un controllo più frequente e preciso del parametro (fase di diagnosi precisa e diagnosi di conferma), al fine di evitare che l'eventuale accelerazione della fase di degrado della macchina colga il personale di manutenzione impreparato, causando il guasto della macchina.

Nel caso di manutenzione su condizione, una volta che il segnale raggiunge il livello di allarme, ovvero il massimo valore tollerabile prima che la macchina si rompa, si interviene in modo preventivo, riparando o sostituendo il componente responsabile dell'avaria.

Nel caso di manutenzione predittiva, invece, si effettua una stima della tendenza al deterioramento del segnale nel tempo (Figura 2.5) e, sfruttando quest'ultima, si prevede

quando la macchina supererà il livello di allerta, quindi quando sarà necessario intervenire preventivamente.

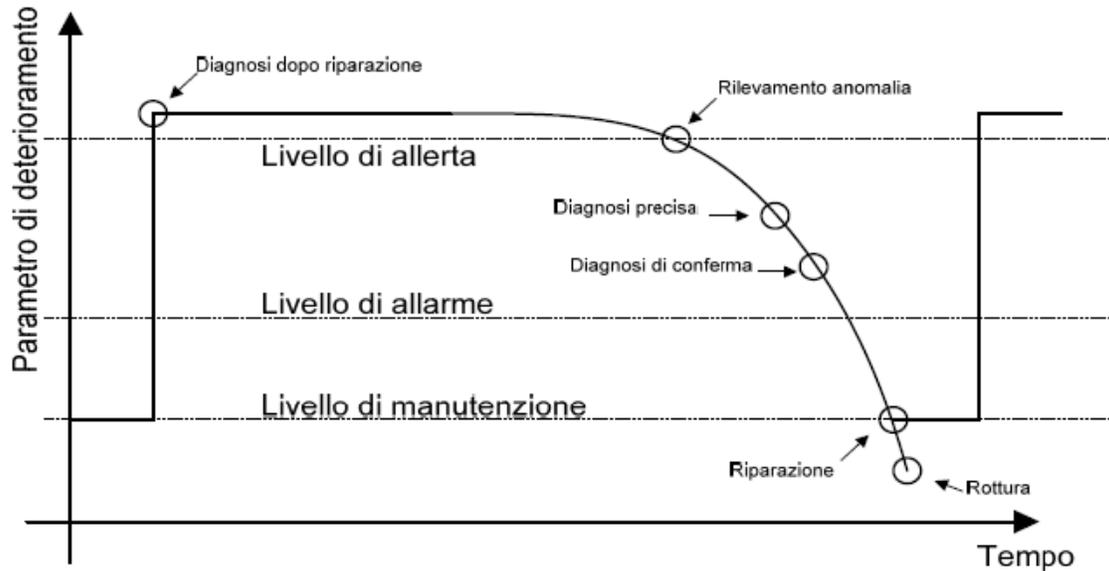


Figura 2.5: : Andamento del segnale di monitoraggio del degrado di una macchina

La politica di manutenzione su condizione/predittiva risulta vantaggiosa per le macchine che presentano elevati costi di utilizzo ed elevati costi dovuti alle eventuali perdite di disponibilità e sicurezza che si verificano in caso di fermo impianto, in quanto garantisce, a livello ideale, alti livelli di disponibilità dell'impianto e bassi costi totali.

Rispetto alla manutenzione preventiva ciclica, questa strategia manutentiva presenta due importanti vantaggi [1][4]:

1. Grazie alla possibilità di monitorare l'effettivo stato di degrado della macchina, permette di programmare solo gli interventi realmente necessari, mentre gli interventi di manutenzione preventiva ciclica sono programmati in anticipo, senza tener conto della condizione di funzionamento della macchina; questo porta ad un risparmio per quanto riguarda i costi propri di manutenzione.

2. Permette di accumulare esperienza sull'affidabilità reale di una macchina, attraverso misure di ispezione, test non distruttivi e monitoraggio continuo; ciò garantisce la possibilità di "costruire" previsioni più accurate del comportamento della macchina, requisito fondamentale per contenere al meglio i costi indotti dall'accadimento di eventi non desiderati, come i guasti.

Di contro, la manutenzione su condizione/predittiva presenta un elevato costo d'investimento (acquisto di macchinari d'ispezione, formazione del personale di manutenzione). Inoltre, in generale, è una politica che ha bisogno di tempo per poter essere implementata in un determinato contesto impiantistico, giacché le attività che la contraddistinguono – individuazione di segnali premonitori del degrado, identificazione dei livelli di allerta e allarme, analisi della tendenza dei segnali monitorati – sono attività che risultano efficaci ed efficienti solo passato un certo periodo di assestamento.

In questo periodo transitorio di avvio, non si riescono a cogliere appieno i benefici della manutenzione su condizione/predittiva, il che può impattare sulla convenienza "percepita" della scelta di questa politica.

## 2.2 Scelta della politica manutentiva

Definire la strategia manutentiva da adottare significa, sostanzialmente, scegliere la combinazione delle politiche di manutenzione da applicare. Si parla di combinazione in quanto la scelta di una determinata politica non preclude la possibilità di applicarne anche un'altra; qualunque sia la politica scelta, infatti, vi è sempre la possibilità che la macchina si guasti, dunque si ricorrerà ad interventi correttivi. Inoltre, è possibile utilizzare strategie diverse per diversi elementi della stessa macchina.

È importante tener presente che, in base alla tipologia di macchina, una certa politica può risultare più efficace di altre, e che non tutti i componenti di una macchina necessitano di un'accurata pianificazione della manutenzione, in quanto non critici dal punto di vista del guasto (cioè hanno una bassa probabilità di guasto, provocano una perdita di produzione/servizio contenuta, hanno un basso impatto sulla sicurezza dell'uomo/ambiente, ecc.).

I fattori strategici da considerare per selezionare la migliore politica per ogni tipologia di macchina sono pertanto i seguenti [1][2][4]:

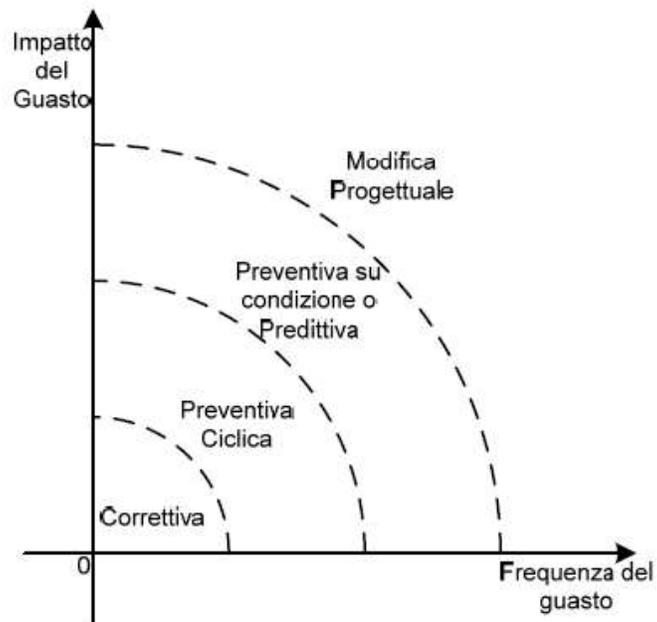
- 1) **Impatto del guasto:** è una misura delle conseguenze generate dal guasto o degrado. In genere si valuta in termini di costo indotto dal guasto. Le conseguenze negative provocate da un guasto possono essere svariate: bassa qualità del prodotto realizzato, degrado ambientale, rischio d'infortuni del personale, diminuzione della produzione giornaliera, fermo impianto, costo della sostituzione della macchina, ecc ....
- 2) **Intervallo di guasto:** rappresenta il tempo medio che trascorre tra due guasti consecutivi. Si misura attraverso uno degli indicatori tipici dell'analisi di affidabilità; il più utilizzato in genere è il *MTBF*.

3) Prevedibilità del guasto: rappresenta la possibilità di prevedere il momento in cui si produrrà un guasto. Tale previsione viene effettuata per via statistica a partire dalla probabilità di accadimento di un guasto (da cui dipende la legge di affidabilità della macchina) o, nel caso di manutenzione predittiva, attraverso modelli previsionali che si basano sul monitoraggio del funzionamento della macchina.

Un criterio di prima approssimazione per la scelta della politica di manutenzione più adatta, in relazione ai primi due fattori citati (impatto e frequenza del guasto), è rappresentato graficamente in Figura 2.6.

Dallo schema si può dedurre che [1][4]:

- in caso di guasti caratterizzati da bassa frequenza e basso impatto, è sufficiente una politica di manutenzione correttiva;
- all'aumentare della frequenza e dell'impatto del guasto, diventa man mano più conveniente implementare una politica di manutenzione preventiva ciclica;
- in caso di guasti caratterizzati da alta frequenza e alto impatto, è bene ricorrere alla manutenzione preventiva su condizione/predittiva;
- per valori d'impatto e frequenza ancora più alti è necessario, laddove possibile, effettuare delle modifiche di progetto che migliorino le caratteristiche di affidabilità (a favore di una minore frequenza di guasto) e manutenibilità della macchina (per diminuire l'impatto del guasto).



*Figura 2.6: Rappresentazione grafica delle diverse politiche manutentive: a diversi valori di frequenza ed impatto del guasto, corrispondono strategie diverse*

Un altro metodo per la scelta della politica di manutenzione è riassunto in Tabella 2.1. In questo caso, oltre ai due fattori già citati in precedenza, si considera anche la prevedibilità del guasto [1].

	<b>PREVEDIBILE</b>	<b>NON PREVEDIBILE</b>	<b>PREVEDIBILE</b>	<b>NON PREVEDIBILE</b>
<b>ALTO IMPATTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MC/P, con taratura della frequenza di monitoraggio dopo il livello di allerta</li> <li>- MPC, con ottimizzazione della frequenza di sostituzione programmata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introduzione e uso di entità in ridondanza e/o ausiliarie, in modo da aumentare l'affidabilità complessiva del sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MC/P con attività di monitoraggio continuo (se possibile)</li> <li>- MPC, con l'ottimizzazione della frequenza di sostituzione programmata</li> <li>- Monitoraggio continuo della frequenza di guasto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introduzione e uso di entità in ridondanza e/o ausiliarie, in modo da aumentare l'affidabilità complessiva del sistema</li> <li>- Programmazione di standard di riparazione</li> </ul>
<b>BASSO IMPATTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MP o MC, in funzione di un'analisi comparativa tra costi e benefici</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Continuare a operare fino al guasto (MC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MP o MC, in funzione di un'analisi comparativa tra costi e benefici</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Continuare a operare fino al guasto (MC)</li> </ul>
	<b>BASSA FREQUENZA</b>		<b>ALTA FREQUENZA</b>	

Tabella 2.1: Schema per la scelta della politica manutentiva, sulla base di impatto, frequenza e prevedibilità del guasto. (MC/P= man. su condizione/predittiva; MPC= man. preventiva ciclica; MP=man. preventiva; MC=man. correttiva)

Programmando la manutenzione secondo una determinata strategia, si auspica che, nel lungo periodo, si vada verso una riduzione dell'impatto e della frequenza dei guasti, e verso un aumento della loro prevedibilità (ad esempio, qualora non fosse presente lo storico di un dato tipo di guasto, la sua progressiva creazione permetterebbe di effettuare una previsione sull'istante di guasto).

Riassumendo, per determinare quale sia la miglior politica di manutenzione possibile, occorre anzitutto analizzare la modalità di guasto della macchina; quindi, nel caso di guasti frequenti, si valuta se esistano dei segnali sintomatici di un degrado nel funzionamento e, in caso affermativo, se sia possibile monitorare tali segnali, o comunque fare una previsione sulla vita utile dei componenti.

Sulla base delle risposte date a queste domande, si imposta un tipo di manutenzione piuttosto che un altro, tenendo sempre da conto anche il rapporto costi/benefici relativo all'attuazione di ciascuna politica.

### *2.3 Manutenzione dei carri ferroviari*

I carri ferroviari, come si è accennato nel Cap. 1, hanno bisogno di essere mantenuti efficienti, onde prevenire il verificarsi di guasti o deperimenti, e garantire quindi sia la regolarità e la sicurezza dell'esercizio, sia l'integrità delle merci trasportate. Non devono trascurarsi inoltre tutti quei fattori che ne influenzano l'aspetto esteriore, quali la pulizia e il decoro.

Per soddisfare queste necessità, è indispensabile prevedere e organizzare un programma di manutenzione del materiale rotabile.

Anche in ambito ferroviario esistono diverse strategie manutentive. In particolare, ciascuna azienda potrebbe decidere di intervenire solo a posteriori, dopo che l'avaria si sia verificata, oppure adottare un sistema di manutenzione preventiva, basata su visite e revisioni periodiche, allo scopo di prevenire il manifestarsi di avarie ed eliminare le anomalie prima che esse diano luogo ad inconvenienti, che potrebbero pregiudicare la regolarità e la sicurezza dell'esercizio e risultare economicamente onerosi.

La scelta fra queste due possibilità estreme o il ricorso ad una soluzione intermedia dipende dalla natura dell'azienda, dal tipo di attività svolto e da considerazioni di carattere economico. Tenuto conto dell'alto grado di sicurezza e regolarità preteso nell'esercizio ferroviario, la seconda alternativa è quella che viene normalmente adottata, pur non trascurando la

possibilità che si verifichino avarie accidentali, che necessitano sempre di interventi a posteriori per la riparazione dei guasti [2].

### *2.3.1 Manutenzione preventiva in ambito ferroviario*

La necessità di offrire un servizio di trasporto sempre più intenso ed efficiente, ha indotto la necessità di fissare, in campo manutentivo, visite e interventi ai mezzi ben definiti e opportunamente intervallati, al fine di massimizzare la sicurezza di esercizio e ridurre al minimo i tempi di fermo dei carri.

Effettuando interventi ciclici e programmati, infatti, ci si propone di garantire che, nell'intervallo che intercorre tra un intervento ed il successivo, non siano necessari altri lavori sui carri. In particolare, si vuole fare in modo che non si verifichino guasti conseguenti all'usura dei componenti, andando a sostituire quei componenti prima che raggiungano il limite di consumo prescritto.

Dal punto di vista dell'efficienza del trasporto, quello che nello specifico si vuole evitare è che un carro venga scartato dalla composizione.

Come si è detto in precedenza, lo scarto del carro è un'operazione complessa; è quindi preferibile aumentare gli interventi preventivi, al fine di ridurre la probabilità di guasto dei treni, quindi le situazioni in cui sia necessario lo scarto di singoli carri.

Per quanto riguarda l'organizzazione delle riparazioni, si prevedono interventi di tipo diverso, cui corrisponde un livello più o meno approfondito di controllo ed eventuale riparazione dei veicoli.

Le tipologie di intervento principali sono le seguenti [2]:

- Visite ai rotabili:

la visita al materiale rotabile viene affidata ad agenti specializzati, detti verificatori, che prestano servizio in specifici posti di verifica, dislocati in determinate stazioni (o impianti), scelte in relazione all'importanza del movimento veicolare. Compito dei verificatori è accertare che i veicoli non presentino avarie o anomalie tali da pregiudicare la loro regolare circolazione ed utilizzazione e di eliminare, compatibilmente con i mezzi di cui dispongono ed il tempo di sosta del materiale, le anomalie di più modesta entità riscontrate.

I verificatori devono anche controllare che i veicoli non siano scaduti di revisione, cioè che non sia trascorso un tempo maggiore di quello previsto dall'ultima revisione subita dal carro, e controllare la regolarità del carico.

In caso di anomalie, il verificatore è tenuto ad applicare al veicolo una specifica etichetta, per segnalare al personale interessato all'utilizzazione e alla circolazione del materiale l'esistenza dell'anomalia e le limitazioni che ne derivano.

Le etichette si differenziano in base all'entità dell'avaria: in base all'elemento oggetto del guasto, infatti, le limitazioni imposte sono più o meno stringenti.

Ad ogni "livello" di limitazione, corrisponde un diverso modello di etichetta:

- Modello K: segnala che il carro o l'unità di carico sono avariati; il carro può proseguire il viaggio, ma necessita di riparazione una volta scaricato, prima del successivo ricarico.
- modello M: segnala la presenza di un'avaria, per cui è necessario un esame mirato del carro, che può comunque proseguire il viaggio
- modello R1: segnala che il carro ha un difetto al sistema frenante o che comunque, per motivi particolari, il freno non può essere utilizzato.

- **Manutenzione corrente:**

le piccole riparazioni di manutenzione corrente vengono effettuate sui piazzali, dallo stesso personale di verifica, eventualmente coadiuvato da tecnici specializzati, distaccati presso i posti di verifica, oppure organizzati in vere e proprie postazioni di manutenzione corrente.

Per avarie di maggiore entità, non eliminabili con i mezzi a disposizione, le riparazioni di manutenzione corrente vengono eseguite in officina.

- **Revisioni e riparazioni periodiche:**

per far fronte alle usure ed al consumo di alcune parti del materiale rotabile, vengono programmati lavori di revisione e riparazione di tipo periodico, sulla base dei chilometri percorsi e del tempo trascorso tra una revisione e la successiva. In sostanza, si tratta dell'esecuzione di un insieme di operazioni di manutenzione, specificate in dettaglio in appositi ordinativi permanenti, che vengono eseguite nelle officine di deposito, togliendo il rotabile dal servizio secondo turni di revisione prestabiliti.

### *2.3.2 Entità del distanziamento tra riparazioni cicliche*

Visto che la manutenzione in ambito ferroviario è per gran parte di tipo preventivo, uno degli elementi fondamentali per la programmazione degli interventi è il distanziamento tra le riparazioni.

L'intervallo di tempo che intercorre tra un intervento ed il successivo, infatti, non deve essere troppo breve, perché si rischierebbe di intervenire "in anticipo", ovvero quando gli elementi sono ancora in buono stato, né troppo lungo, perché a quel punto si rischia di intervenire quando ormai il guasto è avvenuto, rendendo inutile un intervento di tipo preventivo.

E' quindi di primaria importanza definire la durata del ciclo manutentivo in modo efficiente; per fare questo, si deve tener conto, in particolare, dei seguenti elementi [2]:

- durata tecnica di ciascun organo di servizio, cioè durata media della vita utile dei componenti del carro, specialmente quelli più sensibili all'usura;
- tendenza alla progressiva esaltazione di usure, consumi e deperimenti; indipendentemente dai guasti tecnici veri e propri, infatti, superati certi limiti di usura i vari organi decadono rapidamente, deteriorandosi al punto da non essere più riparabili o riutilizzabili. Come conseguenza, si ha un rapido accrescimento del deterioramento di altri organi ad essi collegati, il che rende più onerose le riparazioni;
- accrescimento progressivo degli oneri di manutenzione al crescere dell'usura: più un componente è rovinato, maggiore sarà il costo della riparazione.

In particolare, per quanto riguarda la durata tecnica degli organi di servizio, si basa la programmazione sull'elemento più critico, ovvero sull'elemento che si guasta più di frequente, o che ha maggiore impatto sul carro.

Dal punto di vista della frequenza di guasto, gli elementi più incidenti sono di solito quelli soggetti ad usura: questo tipo di elementi, infatti, rovinandosi con il progressivo utilizzo, è caratterizzato da una vita utile più o meno limitata, in base a quanto è elevato il relativo tasso di usura.

Valutando, ove possibile, la durata di tale vita utile, si può definire la cadenza con cui attuare la manutenzione sulla base della stessa. In questo modo, l'intervento di manutenzione preventiva dovrebbe coincidere approssimativamente con la soglia di usura limite del componente considerato, evitando una sostituzione/riparazione precoce o, di contro, tardiva.

Per quanto riguarda i costi, invece, si deve tenere conto del fatto che, più l'intervallo tra gli interventi è breve, maggiore è l'incidenza degli oneri relativi alla manutenzione preventiva sui costi totali. Se gli intervalli sono lunghi, infatti, i costi legati al singolo intervento vengono diluiti nel tempo, generando un impatto minore.

Si è parlato di distanziamento associandovi una connotazione temporale; nella pratica, però, per quanto riguarda l'ambito ferroviario, si utilizza di solito un intervallo di tipo chilometrico: viene effettuato un intervento manutentivo quando il carro ha percorso una certa quantità di chilometri dall'ultima riparazione.

### *2.3.3 Altri elementi da cui dipende la buona riuscita della manutenzione*

L'efficienza della manutenzione non è legata solo alla precisione con cui viene stimato l'intervallo tra un intervento e il successivo, ma dipende anche da tutta una serie di condizioni al contorno molto più "pratiche", come la disponibilità delle officine ad accogliere e lavorare i carri, sia a livello di spazio che di tempo.

Come già accennato, inoltre, si deve tener conto dei vari costi: le manovre, le soste, le operazioni necessarie allo scarto, tutte queste attività hanno un proprio costo, che si cerca di minimizzare.

Per questi motivi, oltre a definire con attenzione l'entità del distanziamento, occorre prevedere, quando si pianificano gli interventi, la manodopera e i tempi necessari al completamento delle operazioni, e richiedere la disponibilità dei luoghi con un buon anticipo. Se, infatti, al momento stabilito non è possibile lavorare i carri, è inutile aver definito un distanziamento ottimale.

In particolare, se si pianifica la manutenzione su mute di carri, se non si è programmato correttamente il tempo di lavorazione, può accadere che ne vengano mantenuti solo alcuni.

Di conseguenza, il treno ripartirebbe con alcuni vagoni messi a nuovo e altri invece in stato di usura avanzato: per evitare di perdere omogeneità, quindi, la muta dovrebbe venire fermata nuovamente dopo breve tempo, causando sia costi che tempi di fermo aggiuntivi e non previsti.

Un'altra dinamica importante di cui tenere conto è l'interazione tra i diversi soggetti coinvolti nelle operazioni di manutenzione, ovvero il detentore dei carri, che solitamente è anche E.C.M. (ente responsabile della manutenzione); l'impresa ferroviaria, cioè l'ente che utilizza i carri; le officine, che si occupano delle riparazioni.

Ciascuno di questi enti ha degli interessi e degli obiettivi che non sempre si accordano con quelli degli altri, anzi, spesso sono in conflitto.

Se infatti l'E.C.M. punta a diminuire gli interventi, pianificandoli in modo da fermare i carri al momento più opportuno e fare una manutenzione completa, per ottimizzare i costi ed essere sicuro che i veicoli siano in buono stato, per i clienti (le imprese ferroviarie) è fondamentale che i vagoni siano disponibili il più a lungo possibile. Piuttosto che interventi lunghi e completi, quindi, prediligono dei controlli veloci e diluiti nel tempo, sfruttando i momenti in cui i carri sono in sosta per attuarli.

Le officine, d'altro canto, hanno interesse ad effettuare il più alto numero di interventi possibile: anche per esse, quindi, sono più convenienti tanti controlli veloci; in questo caso, però, si presentano anche problemi di spazio e di tempo. In base a quanto l'officina è estesa, infatti, sarà in grado di accogliere quantità più o meno importanti di carri, e di lavorarli più o meno velocemente.

Esiste dunque un conflitto di interessi tra i soggetti coinvolti, il che causa diversi punti di vista anche sulla manutenzione preventiva.

Se all'E.C.M., infatti, interessa avere una pianificazione precisa degli interventi da eseguire, basata sui consumi dei componenti, per l'IF non è sempre conveniente, o meglio non sempre sembra conveniente, soprattutto se i costi della manutenzione sono a carico della stessa. Se la strategia manutentiva non è condivisa, risulta più difficile applicarla nel pratico.

Tenendo conto di tutti questi aspetti, si vuole pianificare un programma di manutenzione preventiva per uno dei clienti di VTG, il quale attualmente non la prevede, per diminuire il tasso di guasto e i conseguenti costi di manutenzione.

## Capitolo 3

# Analisi dell'aspetto tecnico: individuazione degli elementi più critici dal punto di vista dei guasti

### 3.1 Analisi dei guasti

Poiché lo scopo della trattazione è stabilire un programma manutentivo, anzitutto si sono analizzati i guasti che si verificano sui carri, osservando quali siano le tipologie più ricorrenti.

L'analisi è stata effettuata estrapolando dal database aziendale i dati di guasto relativi al parco carri del cliente per il quale si vuole programmare la manutenzione, e valutando l'incidenza di ciascun tipo di guasto sul totale delle avarie.

La rilevazione effettuata è basata sulle etichettature subite dai carri: nello storico dei guasti, infatti, sono riportate le segnalazioni ricevute da ciascun carro, con relativa problematica riscontrata.

I risultati delle analisi svolte sono riportati nel grafico in Figura 3.1.

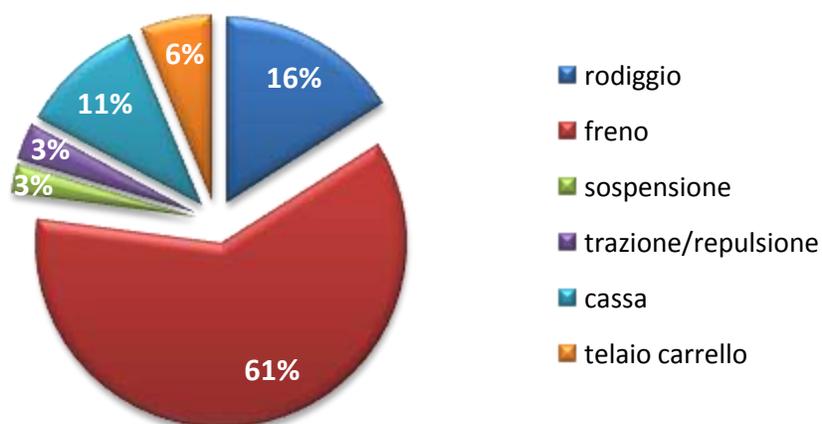
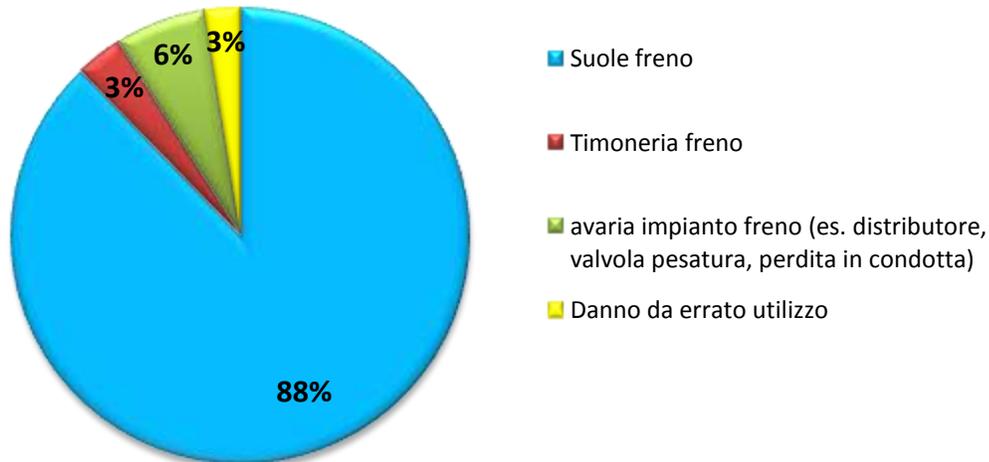


Figura 3.1: Tipologie di avaria riscontrate sul parco carri analizzato; si nota che la maggior parte dei guasti è legata all'impianto frenante e alle sue componenti

Si nota che la maggior parte dei guasti riscontrati sono relativi all'impianto frenante e agli elementi ad esso correlati: si è dunque approfondita l'indagine, valutando, nell'ambito di questa tipologia di guasto, quali siano gli elementi più critici.

Dai dati raccolti, riportati nel grafico in Figura 3.2, emerge che la quasi totalità delle avarie ha come soggetto le suole del freno.



*Figura 3.2: Tipologie di avaria relative al freno. Si nota che la maggior parte di esse è dovuta a problemi delle suole*

La suola (Figura 3.3 ) è l'elemento che rende fisicamente possibile la frenata del carro: quando il ceppo serra la sala, la suola entra in contatto con la superficie della ruota (Figura 3.4), riducendone la velocità per effetto dell'attrito. La suola può essere costituita di diversi materiali: il più utilizzato è la ghisa, ma negli ultimi anni sono state sviluppate anche suole in materiale organico e sintetico.

Il ripetuto sfregamento della suola con la sala causa perdita di materiale da parte della prima, che quindi si assottiglia (Figure 3.5 e 3.6): una volta raggiunto il valore di spessore minimo, la suola va sostituita.



*Figura 3.3: Suola in ghisa*

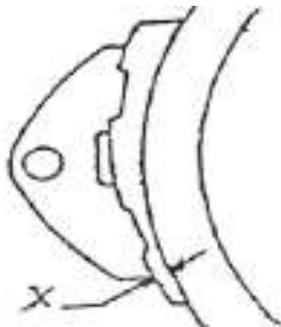


*Figura 3.4: Suole montate su un carro: ogni porta suole ne contiene una coppia. Quando il ceppo viene azionato, le suole entrano in contatto con la superficie della ruota*



*Figure 3.5 (sinistra) e 3.6 (destra): Esempi di suole usurate. A sinistra, si nota la superficie rovinata; a destra, lo spessore ridotto*

La normativa che regola l'utilizzo dei carri ferroviari, il Contratto Uniforme di Utilizzo (CUU), e, nello specifico, l'allegato 9 di questo documento, definisce le varie tipologie di avaria e i provvedimenti da adottare al loro insorgere. Nel caso delle soole, esso stabilisce che debbano essere sostituite quando il loro spessore raggiunge i 10 mm in corrispondenza del porta soole (la parte indicata con una X nell'immagine in Figura 3.7).



*Figura 3.7: Indicazione della zona della soola di cui va misurato lo spessore, per valutare se sia da sostituire o meno*

Si deduce, quindi, che le soole sono un elemento soggetto ad usura e, visto quanto emerso dall'analisi dei guasti effettuata, sono l'elemento più critico dal punto di vista della manutenzione, cioè quello che, usurandosi con frequenza maggiore rispetto agli altri componenti, risulta più determinante per la scelta della durata del ciclo manutentivo.

Questo non significa che, in sede di manutenzione preventiva, le lavorazioni si limitino alle soole: vengono effettuati tutti i trattamenti normalmente previsti ma, per quanto riguarda la scelta della cadenza, ci si riferisce principalmente a tali elementi. Questo per fare in modo che, nel tempo che intercorre tra due interventi successivi, il carro non debba subire ulteriori sostituzioni delle soole, che ne causerebbero comunque il fermo, anche se breve.

Sostituendo le soole prima che raggiungano il valore minimo di spessore, inoltre, se ne evita la rottura e si prevencono anche danni alle sale montate.

### 3.2 *Analisi della durata della vita utile delle soole freno*

Individuato l'elemento più critico dal punto di vista manutentivo, la prima valutazione che si può fare per definire l'entità dell'intervallo tra due interventi preventivi è la stima della vita utile di tale elemento.

A tal proposito, si sono analizzati sia degli studi teorici presenti in letteratura, sia valutazioni sperimentali e pratiche.

#### 3.2.1 *Valutazione della vita utile sulla base del monitoraggio di alcuni treni*

Si è analizzato anzitutto il programma manutentivo utilizzato da una delle aziende clienti di VTG, che effettua manutenzione preventiva con buoni risultati. Tale programma è basato proprio sulla durata delle soole del freno, definita a partire dal monitoraggio di queste ultime durante l'esercizio.

Nello specifico, l'analisi della velocità di usura delle soole è stata svolta mediante il monitoraggio di due delle tratte percorse con maggior frequenza dai treni del cliente; mettendo in relazione i chilometri percorsi con la frequenza delle riparazioni, si è determinato un legame tra i primi e la durata delle soole stesse.

Sulla base di quanto osservato, è stato stilato il programma delle manutenzioni.

Nello specifico, dai monitoraggi è risultato che le soole in ghisa si usurino dopo percorrenze di circa 120'000 km.

Sulla base di questo dato, è stato stabilito il programma di manutenzione rappresentato graficamente in Figura 3.8.

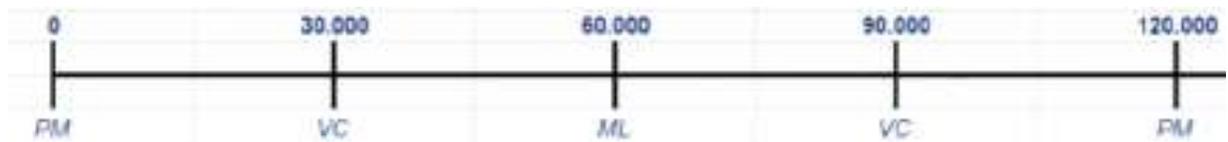


Figura 3.8: Schema del programma manutentivo utilizzato da uno dei clienti di VTG. Sono previsti interventi preventivi ogni 120'000 km, a cui si inframmezzano interventi di manutenzione più veloci e controlli visivi.

Come si può osservare nell'immagine, vengono identificati 3 tipi di intervento, diversificati per l'intervallo chilometrico che intercorre tra l'uno e l'altro e per il tipo di lavorazione prevista da ciascuno.

Nello specifico, la dicitura PM (preventive maintenance = manutenzione preventiva) identifica il tipo di intervento più approfondito, durante il quale vengono sostituite le soole, misurato il profilo delle sale montate (che, nel caso sia necessario, vengono sostituite), effettuate la pulizia e la lubrificazione del carro. Si tratta quindi di una manutenzione preventiva vera e propria, completa di tutte le lavorazioni richieste; tale intervento viene effettuato ogni 120'000 km, in coerenza con quanto emerso dai monitoraggi.

Tra una PM e la successiva, quindi ogni 60'000 km circa, viene effettuato un intervento di manutenzione "leggera" (ML = maintenance light), durante il quale si effettuano solo pulizia e lubrificazione.

Infine, vengono effettuati controlli visivi (VC = visual check) ogni circa 30'000 km, percorrenza corrispondente alla metà di quella che intercorre tra una PM e una ML.

Il programma descritto, applicato al cliente su cui è stato effettuato il monitoraggio, porta effettivamente dei buoni risultati, nel senso che la manutenzione risulta efficiente, riducendo gli interventi correttivi sui carri.

Se però si estende la programmazione di cui sopra ad altri clienti, o anche solo a treni del medesimo cliente che però percorrono tratte diverse, emergono diversi problemi.

Nonostante la manutenzione, infatti, si rilevano problemi alle soole nel tempo che intercorre tra un intervento e il successivo, il che rende necessaria la fermata del carro per la sostituzione.

Ci si chiede quindi se il problema sia legato ad un'errata stima della durata delle soole, o al fatto che quanto valutato per uno specifico treno non possa venire esteso ad altri, a causa delle diverse condizioni di esercizio.

Si approfondisce dunque l'analisi, da un lato ricercando in letteratura studi ed eventuali altri metodi per la determinazione della durata delle soole del freno; dall'altro, effettuando un'indagine sullo storico dei guasti di un cliente differente da quello per cui è stata sviluppata la

programmazione sopra descritta, in modo da valutare l'intervallo che intercorre tra un'etichetta per soles e la seguente. Così facendo si può dedurre, anche se non in modo preciso, dopo quanti chilometri la suola raggiunge lo spessore limite. Confrontando il valore dedotto in questo modo con quello risultante dai monitoraggi descritti anteriormente, si può avere un primo riscontro sul fatto che la durata vari o meno in base al contesto.

### *3.2.2 Analisi di un campione di carri*

Dal monitoraggio su cui è basato il programma di manutenzione precedentemente descritto, risulta un valore di durata della vita delle soles pari a circa 120'000 km.

Per capire se tale valutazione possa essere estesa in un ambito più generale, si valuta la durata delle soles equipaggiate ai carri di un cliente diverso. Per effettuare tale valutazione, si analizzano i dati relativi alle avarie riscontrate negli ultimi 3 anni sui carri di tale cliente.

Definito un campione di 100 carri, composto da tipologie di mezzi diversi, equipaggiati con soles di tipo diverso, e viaggianti su tratte diverse, si è analizzato, per ciascun carro, lo storico delle etichette e delle riparazioni subite da Gennaio 2015 a Luglio 2018.

Così facendo, è stato possibile ricostruire il numero effettivo di volte in cui ogni vagone è stato fermato per problemi alle soles, e quindi quante volte esse sono state sostituite.

Nello specifico, il campione analizzato è composto dai seguenti tipi di carri:

- 23 del tipo Sdggmrs e 17 del tipo Sdggmrss (carri a doppia tasca)
- 10 del tipo Sggmrs (carri portacontainer)
- 29 del tipo Sgns e 22 del tipo Sgnss (carri portacontainer)

Il numero di carri per ogni tipologia è stato scelto in modo da mantenere le stesse proporzioni esistenti sul totale dei carri noleggiati allo stesso cliente.

Per quanto riguarda invece il tipo di soles, si ha la seguente composizione:

- 78 carri con soles di tipo GG (in ghisa)
- 10 carri con soles di tipo LL (sintetiche)
- 15 carri con soles di tipo K (sintetiche)

Una volta selezionato il campione, si sono ricercati nel sistema aziendale, per ogni carro, i dati utili allo scopo prefissato.

E' stato valutato anzitutto il numero di etichette per consumo delle soles riportate da ciascun carro nel periodo considerato, in modo da avere un' idea generale della frequenza con cui si riscontra tale anomalia.

A partire da questa informazione, poi, è stato fatto un confronto tra le diverse serie di carri e tra carri equipaggiati con differenti tipi di soles, per valutare se il numero di etichette fosse dipendente dalle caratteristiche del mezzo.

Per realizzare tale confronto, è stata calcolata la media del numero di etichette per tipologia di carro, differenziando anche per tipo di suola.

Gli esiti di questa prima indagine sono riportati nel grafico in Figura 3.9.

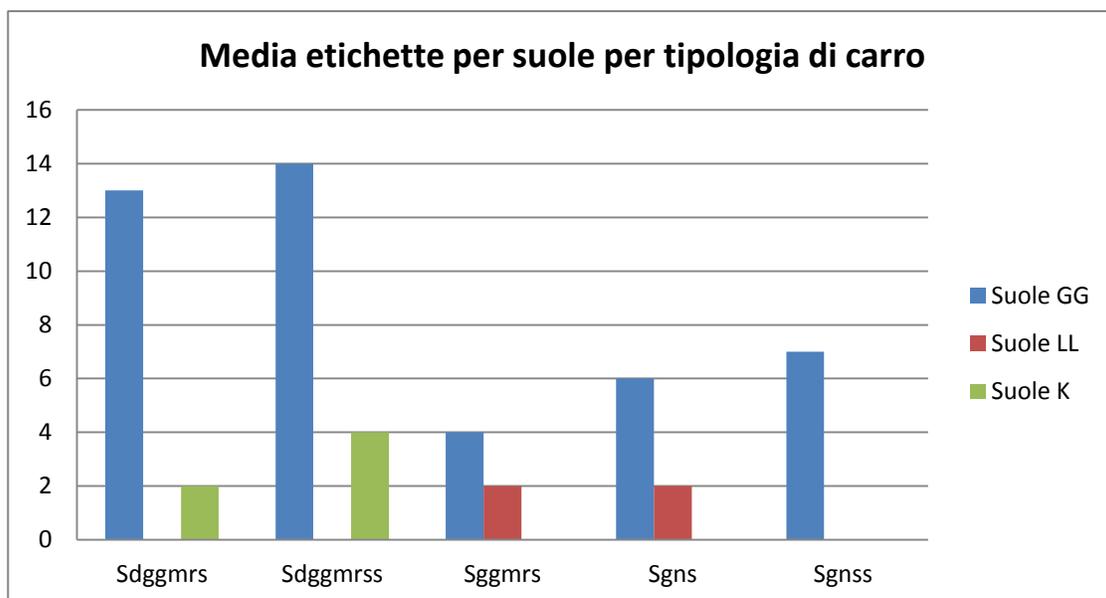


Figura 3.9.: Media di etichette per soles riportate dai diversi tipi di carri componenti il campione selezionato, nel periodo da Gennaio 2015 a Luglio 2018.

Dal grafico, si evince che i carri del tipo Sdggmrs(s) vengono etichettati più spesso rispetto alle altre tipologie; da questo, si può concludere che in effetti le caratteristiche del carro influenzano la velocità di usura della suola.

In seguito si è valutata, sempre nello stesso periodo di tempo, la quantità di chilometri percorsi da ciascun carro.

Per fare questo, è stato sfruttato il sistema GPS presente sui vagoni, che ha permesso di ricostruirne gli spostamenti e dunque l'entità delle percorrenze.

Poiché valutare tutti gli spostamenti compiuti nel periodo in esame per ciascun carro sarebbe stato un lavoro estremamente lungo, la percorrenza è stata valutata facendo un'approssimazione: sono stati rilevati dal sistema i chilometri percorsi ogni mese per 5 mesi da ciascuna vettura, quindi si è calcolata una media di percorrenza mensile.

E' stato poi valutato il tempo medio intercorso tra una sostituzione delle suole e la successiva etichettatura: moltiplicando tale tempo per la percorrenza rilevata, si è ottenuta una stima della durata chilometrica delle suole.

La valutazione è stata fatta sia per tipo di carro che per tipo di suola; i risultati sono riportati in Tabella 3.1. E' stata poi fatta una media delle durate solo per tipo di suola, riportata in Tabella 3.2.

tipo carro	tipo suole	media km/mese	durata media suole (km)
Sdggmrs	GG	9839	29377
	K	7933	42515
Sdggmrss	GG	10202	33636
	K	10308	49883
Sggmrs	GG	8897	32504
	LL	7627	42903
Sgns	GG	7485	47522
	LL	4718	27230
Sgnss	GG	7503	37370

*Tabella 3.1: Media delle percorrenze chilometriche mensili di ogni tipo di carro, per ogni diverso tipo di suole, e stima chilometrica della durata di queste ultime*

<b>Medie per tipo di suola</b>	
GG	36082
LL	35067
K	46199

*Tabella 3.2: Media della durata chilometrica di ogni tipologia di suola, valutata sul campione di carri selezionato*

Si nota che le durate così calcolate si discostano molto da quella risultante dai monitoraggi di cui al par. 3.2.1. Inoltre, i diversi tipi di suola sono caratterizzati da durate della vita utile diverse. In particolare, le soles di tipo K hanno una durata maggiore rispetto alle altre due tipologie.

Dall'analisi condotta, emerge che la durata media della vita utile delle soles freno dipende sia dal tipo di materiale di cui sono costituite, sia dal tipo di carro cui sono equipaggiate.

In particolare, tale durata varia tra i 30 e i 45 mila chilometri, che sono valori molto diversi da quelli citati nel par. 3.2.1.

Si deduce quindi che la vita utile delle soles non è fissa, ma varia con le condizioni di esercizio e le caratteristiche dei carri.

A questo punto, ci si chiede se sia possibile individuare un modello di comportamento delle soles, cioè se sia possibile definire, parametrizzando i diversi elementi che ne influenzano il consumo, l'entità dell'usura al variare di tali parametri.

### 3.2.3 Studi teorici

Per approfondire il comportamento delle suole, si sono ricercati in letteratura studi relativi alla stima della durata di queste ultime.

E' stato possibile reperire molto materiale riguardo questo problema: essendo un argomento molto complesso e rilevante, sono stati fatti svariati tentativi, da parte di autori diversi, di approfondirlo e comprenderlo meglio.

In particolare, sono stati sviluppati studi riguardo il legame esistente tra il consumo delle suole e le sollecitazioni termiche a cui queste ultime sono sottoposte.

A questo proposito, risulta di grande interesse il lavoro svolto da T. Vernersson e R. Lundén [8][10], i quali valutano l'usura delle suole conseguente alla percorrenza di una breve tratta.

Tale valutazione viene effettuata implementando un modello termico che, nota l'entità del calore generato durante la frenata, permette di conoscere la temperatura all'interno del sistema ruota/suola. Note le temperature, utilizzando i tassi di usura determinati in seguito a prove sperimentali, viene calcolato, in termini di massa e spessore persi, il consumo totale delle suole dei freni.

#### Descrizione del modello termico

Il modello termico sviluppato da Vernersson descrive come si ripartisce il calore, generato durante la frenata, tra la ruota e la suola.

Viene anzitutto definito, utilizzando l'Equazione 3.1, il calore generato dal contatto tra ruota e suola [6][7][8][10]:

$$q^{brake} = \mu p v \quad [3.1]$$

$\mu$  è il coefficiente d'attrito,  $p$  è la pressione di contatto (ipotizzata costante) e  $v$  è la velocità di rotolamento locale all'interfaccia ruota/suola.

Per definire la ripartizione di calore, tale interfaccia è immaginata come un sistema di resistenze termiche in serie, una legata alle caratteristiche della ruota, l'altra a quelle della suola, come mostra la Figura 3.10 [6][8][10][13].

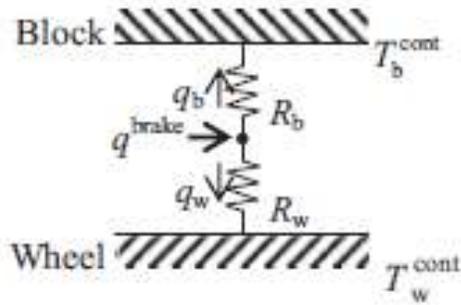


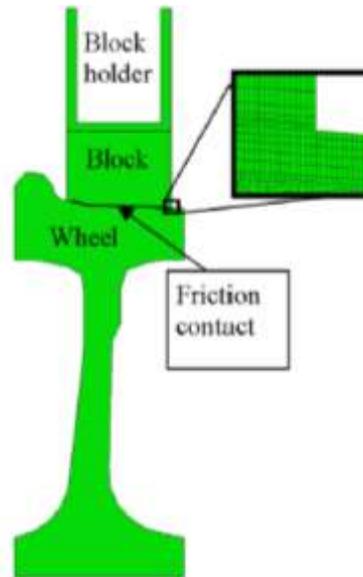
Figura 3.10: Modello termico per definire lo scambio di calore ruota-suola. L'interfaccia tra i due elementi è rappresentata come un sistema di resistenze in serie

Sulla base di questa schematizzazione, è possibile definire il calore ricevuto dalla suola e quello ricevuto dalla ruota con le Equazioni 3.2 e 3.3 [8][13]:

$$q_w = \frac{T_b^{cont} - T_w^{cont}}{R_w + R_b} + \frac{R_b}{R_w + R_b} q^{brake} \quad [3.2]$$

$$q_b = \frac{T_w^{cont} - T_b^{cont}}{R_w + R_b} + \frac{R_w}{R_w + R_b} q^{brake} \quad [3.3]$$

Per il calcolo della temperatura, viene implementato un modello agli elementi finiti del sistema ruota/suola, che, sottoposto a sollecitazione termica, restituisce i valori di temperatura di ogni parte del sistema. Il modello è rappresentato in Figura 3.11 [8][10].



*Figura 3.11: Modello agli elementi finiti del sistema ruota/suola freno. E' evidenziato il dettaglio della mesh vicino alla zona di contatto. Il modello include 8900 elementi parabolici. Il diametro della ruota è di 780 mm, mentre la larghezza della suola è di 80 mm*

### Correlazione tra usura della suola e temperatura

Il passo successivo è la determinazione del livello di usura del materiale in base alla temperatura raggiunta.

Sono stati condotti diversi studi per valutare il legame tra tasso di usura e temperatura; Vernersson, Lundén et al. hanno svolto delle prove con un tribometro del tipo “perno su disco”, per individuare la variazione del tasso di usura al crescere della temperatura [12] .

Il tribometro è una macchina utilizzata per valutare il coefficiente d'attrito, il volume di usura e altre proprietà tribologiche dei materiali. Nella configurazione perno su disco, viene simulata

l'interazione tra la ruota (disco) e la suola (perno): il perno poggia sul disco, che gira a velocità controllata [11][12].

Nello studio in questione, vengono usate velocità tra i 4 e i 7 m/s e pressioni di contatto tra 0,5 e 1 MPa, con tempi di prova di 20 minuti. Per controllare la temperatura del disco, viene utilizzato un dispositivo a induzione di calore.

Sono stati testati 5 diversi materiali (ghisa, sintetico e 3 tipi di materiale organico composito), ottenendo per ciascuno l'andamento del tasso di consumo al variare della temperatura.

I risultati ottenuti sono riportati nel grafico in Figura 3.12.

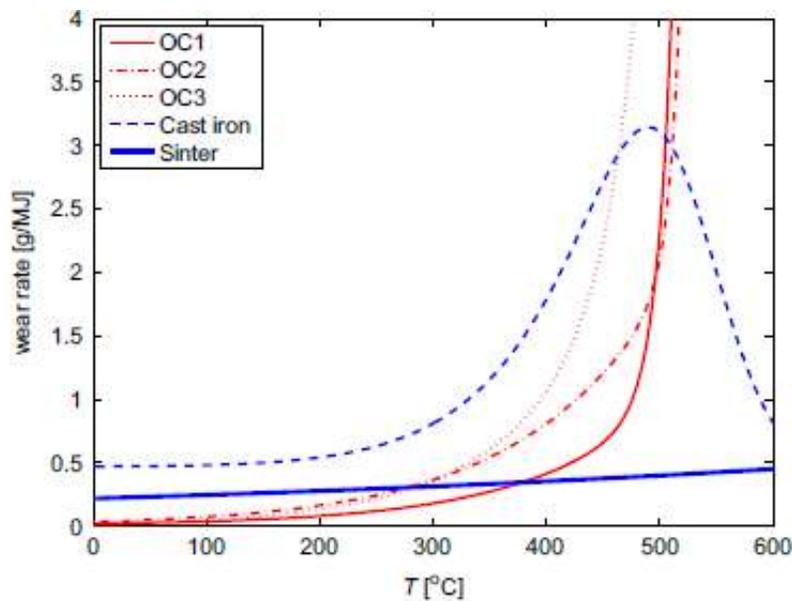


Figura 3.12: Legame tra tasso di usura e temperatura per 5 diversi tipi di materiali, misurati con prova perno su disco

Osservando il grafico, si può notare il diverso comportamento dei materiali: il tasso di usura delle soles in ghisa aumenta fino ad una temperatura di circa 500°, dopodiché diminuisce; per le soles in materiale organico, il tasso aumenta sempre e, sopra i 400°, cresce in modo esponenziale; le soles in materiale sintetico hanno un tasso di usura che resta pressoché costante al variare della temperatura.

La differenza riscontrata tra i tassi di usura è coerente con quanto emerso dall'analisi dei dati condotta nel paragrafo 3.2.2, anzi fornisce una spiegazione dal punto di vista teorico al fatto che soles di tipo diverso si consumino in modo diverso.

Grazie alla correlazione così stabilita tra temperatura e usura, diventa possibile, ricostruito l'andamento delle temperature utilizzando il modello, associarvi l'andamento del tasso di consumo.

A questo punto, si può calcolare l'usura totale del componente (in termini di massa o spessore) avendo nota la sollecitazione.

Viene quindi simulata la percorrenza di una tratta con 30 fermate, poste tutte alla stessa distanza  $d$ , con tempo di fermata pari a 30 s in ogni stazione. Si definiscono 8 diversi scenari, in cui vengono variate la distanza tra le stazioni, la forza frenante, il carico per asse, la decelerazione in frenata: tutti fattori che causano variazioni di temperatura nel sistema suola/ruota.

Per ogni scenario, viene effettuata una simulazione di percorrenza: si avranno 30 cicli di frenata per ogni scenario, essendo 30 le fermate ipotizzate.

Come per lo studio sul tasso di usura, vengono utilizzati 5 diversi tipi di soles per ciascuna simulazione.

In Tabella 3.1 si riportano le condizioni imposte in ciascuno scenario [8].

Case	$d_{station}$ [km]	$M$ [tonnes]	$a_{brake}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$Q_0$ [kW]	$t_{brake}$ [s]
T1	3.0	14.5	1.0	161	22.2
T2	3.0	14.5	1.4	225	15.9
T3	2.4	14.5	1.0	161	22.2
T4	3.0	16.0	1.0	177	22.2
T5	2.0	14.5	1.0	161	22.2
T6	1.5	14.5	1.0	161	22.2
T7	1.0	14.5	1.0	161	22.2
T8	0.75	14.5	1.0	161	22.2

Tabella 3.4: Valori dei vari parametri utilizzati per ogni scenario di simulazione

Per ciascun ciclo di frenata di ogni scenario, viene calcolato il consumo della suola, in massa, secondo l'Equazione 3.4:

$$w = \dot{w} \cdot Q_0 \cdot t_b \quad [3.4]$$

dove  $\dot{w}$  è il tasso di usura, ricavato dal grafico in Figura 3.12 .

Sommando i consumi associati ad ogni ciclo, al termine della tratta si hanno i consumi totali per ogni tipo di suola, riportati in Tabella 3.5 [8].

	OC1	OC2	OC3	Cast	Sinter	$T_{end}$
T1	3.54	7.13	4.14	27.8	14.5	72.3
T2	4.41	8.93	5.18	29.4	15.0	76.0
T3	3.94	7.96	4.62	28.5	14.7	88.3
T4	4.50	9.10	5.28	31.8	16.3	79.6
T5	4.35	8.82	5.12	29.3	14.9	103
T6	5.23	10.6	6.15	31.3	15.3	131
T7	7.08	14.3	8.30	36.4	15.9	178
T8	8.90	17.9	10.4	42.5	16.4	216

*Tabella 3.5: Consumo delle suole per ogni scenario di simulazione, in termini di massa di materiale perso*

Si nota che i casi in cui si hanno i consumi maggiori sono T2, T4, T7 e T8: in T2 si ha maggiore forza frenante; in T4 aumenta il carico per asse, e quindi anche la forza frenante; in T7 e in T8 diminuisce la distanza tra le stazioni.

Si capisce quindi come l'usura delle suole sia fortemente dipendente dal tipo di tratta che viene percorsa, e da come viene percorsa: basti osservare come nelle simulazioni, modificando anche solo un parametro, cambi (anche di molto) la quantità di materiale usurato.

Si può pertanto dedurre l'esistenza di un legame tra forza frenante e massa consumata, e tra massa consumata e temperatura raggiunta dalla suola.

In Figura 3.13 si riporta il dettaglio dei consumi per quanto riguarda lo scenario T1: per ogni tipo di materiale, il grafico mostra la quantità di massa persa in funzione del tempo (in blu), e l'andamento della temperatura (in rosso).

Per avere un'idea più chiara dell'entità dell'usura, partendo dalla massa di materiale consumato si calcola la diminuzione di spessore della suola, in seguito ai vari cicli di frenata.

Per fare ciò, la massa viene divisa per la densità del materiale, quindi per l'area di contatto della suola.

Nel caso della ghisa, essendo la densità pari a  $7,2 \text{ g/cm}^3$  e l'area di contatto  $320 \text{ mm}^2$  (80 mm per 320 mm), si ottiene una differenza di spessore pari a 0,15 mm.

Il consumo, in termini di spessore, per tutti i tipi di materiale, è raffigurato nel grafico di Figura 3.14.

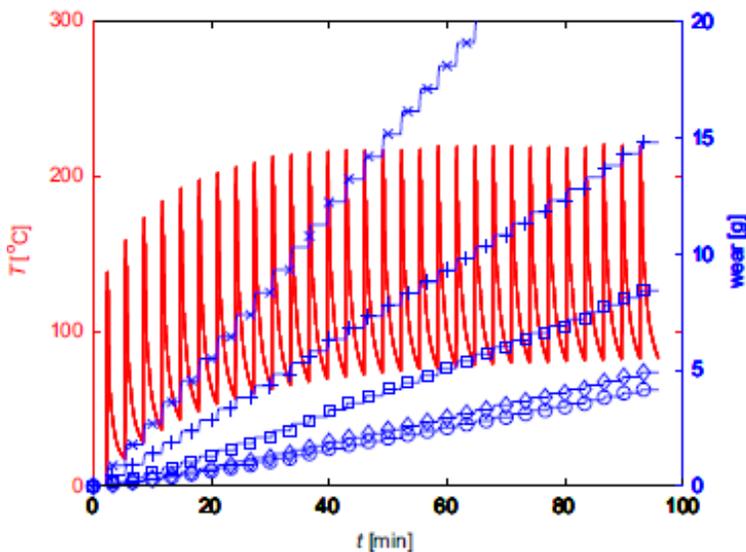


Figura 3.13: Andamento della temperatura e consumo (in grammi di materiale usurato) per ogni tipo di suola, in funzione del tempo, nel caso T1

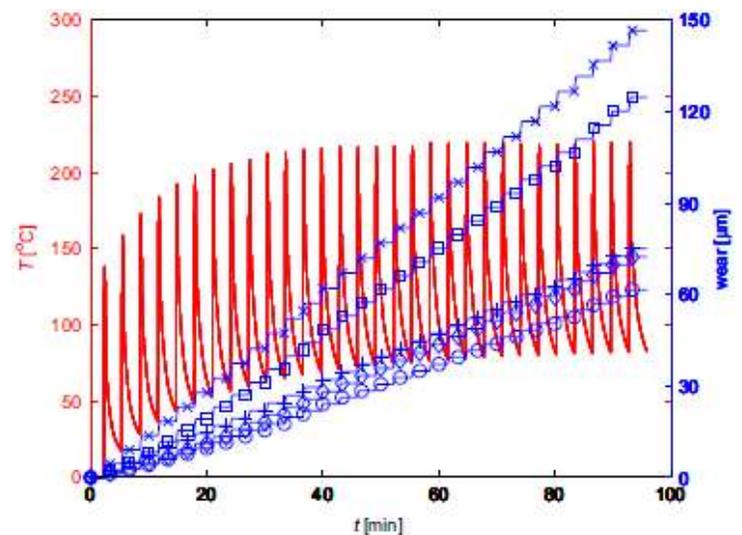


Figura 3.14: Andamento della temperatura e consumo (in  $\mu\text{m}$ ) per ogni tipo di suola, in funzione del tempo, nel caso T1

Per la pianificazione degli interventi di manutenzione, sarebbe utile stabilire una relazione tra l'usura delle soles e i chilometri percorsi dal carro; fare questo in modo analitico risulta però molto complicato, poiché l'usura delle soles, più che dalla lunghezza del percorso, dipende dai parametri sopra elencati e quindi, in sostanza, da quante volte vengono utilizzati i freni.

Sfruttando i risultati ottenuti dalle simulazioni, si può però fare un'approssimazione: le tratte di cui si è simulata la percorrenza con il modello sono lunghe all'incirca 90 km, essendo suddivise in 30 fermate poste a 3 km di distanza una dall'altra. Poiché si è calcolato che il consumo totale, in termini di spessore, è pari a 0,15 mm, si può assumere che il consumo specifico sia di circa 0,0016 mm/km.

Quindi, posto che una suola nuova abbia spessore di 60 mm e che lo spessore utile minimo sia di 10-15 mm, si arriverà ad un consumo pari a 45 mm dopo una percorrenza di circa 28'000 km. Tale stima, pur non essendo molto rigorosa, è coerente con quanto riportato in uno studio di Miyauchi, Nakaiama et al., nel quale, in seguito a monitoraggi effettuati su alcuni treni viaggianti su tratte diverse, si deduce che le suole in ghisa raggiungono lo spessore limite di utilizzo dopo circa 30'000 km [9].

In Figura 3.15 sono riportati gli esiti di tali monitoraggi.

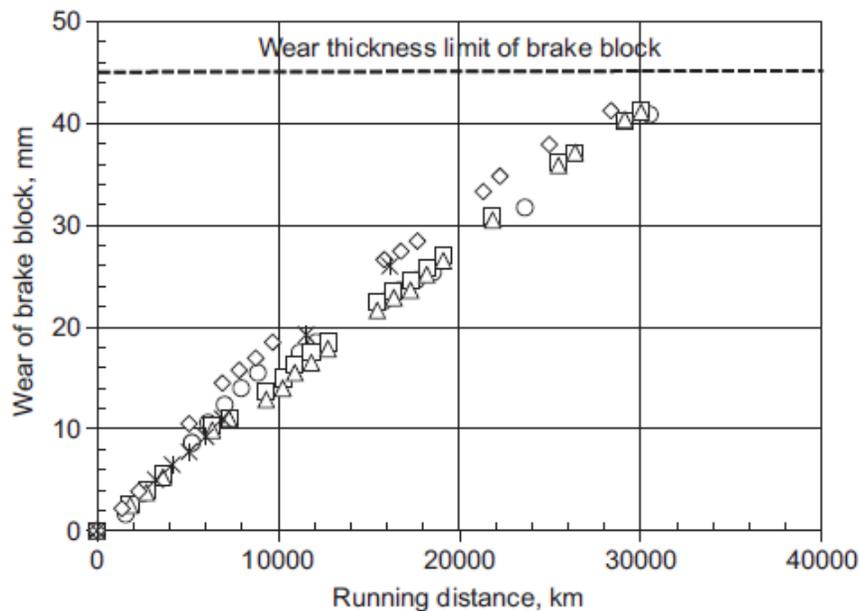


Figura 3.15: Consumo delle suole in termini di diminuzione di spessore (mm) in funzione dei chilometri percorsi, rilevato sulla base di monitoraggi

Utilizzando lo stesso procedimento, si può fare una stima della durata chilometrica della vita utile delle soles in altro materiale.

Per il materiale sintetico, il consumo rilevato è di circa 75  $\mu\text{m}$  in 90 km, quindi il tasso di consumo è  $\dot{w} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ mm/km}$ . L'intervallo necessario a raggiungere i 45 mm di spessore consumato sarà quindi pari a circa 48'000 km.

Per soles composite, viene fatta una media tra i tre diversi tipi di materiale osservati.

Le soles con tasso di usura più alto sono quelle in materiale OC2 (0,0013mm/km), per cui la durata chilometrica risulta di circa 30'800 km; il materiale OC1 è quello con tasso di usura minore di tutti, quindi con durata più elevata (60'000 km); il materiale OC3 ha un tasso molto simile a quello delle soles sintetiche, dunque anche la durata risulta simile (circa 50'000 km).

In media, quindi, soles in materiale organico hanno una durata di circa 45'000 km.

Dallo studio considerato emergono alcuni elementi fondamentali per la trattazione.

Anzitutto, si evince che materiali di tipo diverso sono caratterizzati da velocità di usura diverse.

In secondo luogo, si pone l'attenzione sul legame tra temperatura e tasso di usura. Il fatto che il tasso di usura non sia costante, introduce un'ampia variabilità al comportamento delle soles. In particolare, essendo l'aumento di temperatura delle soles legato alla frenata, si deduce che sia il tipo di tracciato, che l'andamento altimetrico, che lo stile di guida del macchinista, influenzino, e non poco, la durata della suola.

Si deve poi tenere conto del fatto che le valutazioni sulla durata delle soles sono valide per le condizioni di carico relative. Osservando quanto riportato in Tabella 3.5, infatti, si nota che il consumo di massa subisce variazioni molto grandi tra il caso T1 e il caso T8, almeno per quanto riguarda le soles in ghisa e quelle in materiali organici.

Si intuisce quindi la complessità del comportamento delle soles e, di conseguenza, la difficoltà nell'eventuale modellizzazione di quest'ultimo.

### *3.2.4 Progetto Europe Train*

Dopo aver analizzato sia studi teorici che dati pratici, per completare l'analisi del comportamento delle soole sono stati presi in considerazione i risultati ottenuti da un progetto finanziato dall'Unione Europea, con lo scopo di valutare il comportamento delle soole del freno, nello specifico di quelle in materiale sintetico (LL).

Questo tipo di soole è stato introdotto al fine di ridurre le emissioni sonore dovute alla frenatura dei treni, secondo quanto prescritto dalla politica europea per incentivare il trasporto su rotaia.

La commissione UE, infatti, in allarme per quanto riguarda l'inquinamento acustico causato dai treni, ha avviato una politica di riduzione del rumore ferroviario, attraverso una serie di direttive volte ad attenuare il rumore alla sua fonte.

Il contatto ruota/rotaia è la fonte principale del rumore, causato dal fatto che i due elementi non sono perfettamente lisci, per cui si genera una vibrazione reciproca tra le due superfici. Più le superfici sono rugose, più elevato è il rumore (a parità di velocità), e la rugosità delle sale è strettamente collegata al tipo di soole montate dal carro: è stato infatti dimostrato che i ceppi in ghisa inducono livelli di rugosità maggiore rispetto ai ceppi in altro materiale.

Uno degli interventi prescritti dalle direttive UE, dunque, è la sostituzione delle soole in ghisa con soole in materiale composito, in modo da ridurre la rugosità indotta e quindi il rumore [14].

Vista l'introduzione di questo nuovo materiale, è stato avviato un progetto sperimentale per valutarne le caratteristiche e il comportamento in esercizio, con particolare riferimento all'usura.

Il progetto consiste in un treno dimostrativo, composto da 30 vagoni di serie diversa, equipaggiati sia con soole in ghisa che con soole sintetiche. Il treno ha viaggiato per un anno, a partire da dicembre 2010, percorrendo all'incirca 200'000 km, lungo sei diverse tratte in più paesi europei [15].

I percorsi sono stati definiti in modo da comprendere diverse aree climatiche e tipi di territorio, per far sì che le condizioni di carico sul treno fossero il più possibile ad ampio raggio.

Sono state definite cinque tratte ad anello più una lineare, mostrate in Figura 3.16, durante le quali è stato attuato un monitoraggio costante delle condizioni delle suole e delle altre componenti usurabili del treno, tra cui le sale montate.

In questo modo, è stato possibile definire i tassi di usura di tali componenti, e quindi la durata della loro vita utile, in termini di chilometri.



*Figura 3.16: Tratte percorse dal treno dimostrativo nel corso di un anno. I percorsi sono stati individuati in modo che si differenziassero per clima e conformazione del territorio*

I materiali delle soles analizzate sono ghisa e materiale sintetico di due tipi diversi (C952-1 e IB116\*); in Tabella 3.6 si riportano i tassi di usura stimati durante il monitoraggio, con relativa percentuale rispetto all'usura della ghisa [15].

<b>Block wear rate [mm/10,000 km] and in % to CI</b>							
<b>CI empty</b>	<b>CI loaded</b>	<b>C952-1 empty</b>	<b>C952-1 loaded</b>	<b>IB116* empty</b>	<b>IB116* loaded</b>	<b>IB116* Combi empty</b>	<b>IB116* Combi loaded</b>
2.14	8.00	0.82	1.70	1.31	4.11	0.86	4.92
100 %	100 %	38 %	21 %	61 %	51 %	40 %	62 %

*Tabella 3.6: Tassi di usura per ciascun materiale costituente le soles, stimati sulla base dei monitoraggi compiuti sul treno.*

Il tasso di usura rilevato per le soles in ghisa è pari a 8 mm/10'000 km, cioè 0,0008mm/km; confrontandolo con quello emerso dagli studi di Vernersson et al., di cui si è parlato nel paragrafo precedente, si nota che il primo è pari a metà del secondo: 0,0008mm/km contro 0,0017mm/km.

Calcolando la durata chilometrica relativa, quindi, si otterrà un valore doppio rispetto a quello valutato col tasso di Vernersson: risultano 60'000 km anziché 30'000.

Osservando invece i tassi di usura delle soles LL (C952-1 e IB116), si nota che sono molto inferiori rispetto a quello delle soles GG. Facendo una media tra i diversi valori, si ottiene un'usura di 2,28 mm ogni 10 000 km (ovvero 0,000228 mm/km), pari circa al 36% del tasso rilevato per la ghisa.

Valutando la durata chilometrica con riferimento ai limiti di usura, si ricava che lo spessore minimo utile, pari a 15 mm, viene raggiunto dopo circa 175'000 km.

Rispetto alle valutazioni considerate nei paragrafi precedenti, esistono degli elementi comuni, come il fatto che le soles in materiale sintetico raggiungano più lentamente la soglia limite di usura.

Quello che però si evidenzia maggiormente, è la discrepanza tra i valori dei tassi di consumo e della durata chilometrica corrispondente.

Ciascuna delle metodologie di valutazione della durata delle soles considerata, infatti, ha portato a risultati diversi. Non solo: anche quando la valutazione avviene con metodi simili (monitoraggi su treni viaggianti), i valori risultanti sono comunque differenti.

Si deduce quindi che la valutazione fatta monitorando i carri di un determinato cliente non possa venire estesa ai carri di un altro: se si imposta il programma di manutenzione generalizzando quanto osservato per un certo caso specifico, si incontreranno inevitabilmente dei problemi.

### *3.3 Elementi da cui dipende l'usura delle soole*

Analizzando i modi in cui la durata delle soole è stata valutata, si possono approfondire i motivi per cui non sia possibile l'estensione al generale di quanto valutato nel particolare.

Il fatto che i diversi metodi di valutazione portino a diversi risultati, infatti, è imputabile più alle diverse condizioni di esercizio (reali o simulate) del treno, che non alla differenza di metodo stessa.

Come già emergeva dallo studio di Vernersson [8][10], infatti, il tasso di consumo ha una forte dipendenza da quelle che sono le condizioni di esercizio. In particolare, con riferimento a quanto descritto finora, gli elementi principali che incidono sull'usura sono i seguenti:

- Materiale costitutivo della suola
- Tipo di carro
- Tipo di impianto frenante e sua efficienza
- Pressione applicata sulle soole durante la frenata
- Quantità di frenate effettuate
- Diminuzione della pressione nella condotta generale
- Tipo di locomotiva
- Stile di guida del macchinista
- Condizioni meteorologiche (pioggia, umidità...)
- Condizioni della rotaia
- Condizioni delle sale montate
- Tipologia del tracciato (andamento plano-altimetrico, entità dei dislivelli...)

Vista la quantità di fattori individuata, si può capire come mai i risultati ottenuti siano così diversi e, di conseguenza, come mai non si possano generalizzare analisi svolte su casi singoli.

La maggior parte dei parametri citati, inoltre, varia di giorno in giorno e di frenata in frenata.

Di conseguenza, anche quando vengono effettuati monitoraggi e misure per determinare l'entità di un parametro, tali misure sono valide solo per il carro monitorato, in quel momento e in quel luogo. La stessa misura, ripetuta nello stesso modo ma su un carro diverso, o anche sullo stesso carro ma in un altro momento, potrebbe dare un risultato completamente differente.

Per fare una stima veramente precisa, quindi, sarebbe necessario misurare il consumo delle soole su ogni vagone in modo costante, tenendo traccia del percorso, sia a livello chilometrico che plano-altimetrico, e della quantità delle frenate, oltre che della loro intensità.

Anche così, però, la stima sarebbe valida per il treno specifico monitorato; per conoscere la durata delle soole di un treno diverso, andrebbe ripetuto il monitoraggio su quel treno, e così via.

Diventa quindi estremamente complesso definire una correlazione analitica tra le condizioni al contorno e l'evolversi dello stato di usura delle soole.

Di conseguenza, per definire la durata della suola in modo preciso, occorrerebbe effettuare dei monitoraggi sui carri per i quali si vuole programmare la manutenzione preventiva, quindi, in base a quanto riscontrato, stabilire il programma di interventi.

Un approccio del genere, però, non è certamente ottimale: il monitoraggio andrebbe effettuato su ogni tratta, e sarebbe necessario molto tempo per definire i tempi di manutenzione.

Inoltre, come accennato per il problema del rumore, si stanno sviluppando tipologie di soole diverse, con caratteristiche di usura diverse. Più aumentano i tipi di soole, più è probabile che i carri di uno stesso treno siano differenti tra loro: diventa quindi ancora più complicato definire un programma di manutenzione sulla base della durata tecnica, in quanto ogni tipo di carro ne avrebbe una diversa.

Per tutti questi motivi, per programmare la manutenzione si passa a considerare l'aspetto economico del problema, lasciando in secondo piano l'aspetto più tecnico.

## Capitolo 4

### **Sviluppo di un modello economico per la valutazione del distanziamento ottimo**

Vista la complessità del processo di valutazione della vita utile delle suole del freno, si valuta la possibilità di utilizzare un approccio diverso per determinare il distanziamento ottimo tra gli interventi previsti nel ciclo manutentivo.

In mancanza di riferimenti chiari e univoci riguardo la vita utile dell'elemento maggiormente critico, e quindi venuta meno la possibilità di analizzare il problema dal punto di vista del componente, lo si analizza dal punto di vista economico.

L'attività manutentiva implica dei costi che variano in base a come essa viene effettuata: il problema della definizione del tempo di ciclo può quindi venire visto come un problema di ottimizzazione dei costi. Si ricerca dunque il tempo di ciclo in corrispondenza del quale i costi di manutenzione sono minimi: per fare questo, si definisce una funzione di costo che sia dipendente dal tempo, in modo che, una volta minimizzata, fornisca il valore di tempo di cui sopra.

Tale valore verrà poi convertito in chilometri percorsi, in coerenza con quanto detto in precedenza riguardo la manutenzione in ambito ferroviario.

## 4.1 Struttura del modello

Per effettuare un'analisi dei costi relativi alla manutenzione, si devono considerare sia gli oneri legati agli interventi di manutenzione preventiva, sia quelli legati alla manutenzione di tipo correttivo, che viene attuata all'insorgere di un guasto.

Entrambe le tipologie di costo, valutate in funzione del tempo, possono essere rappresentate con delle curve aventi andamenti opposti. La curva  $C_p$ , rappresentante i costi legati a manutenzione preventiva, ha andamento decrescente, mentre la curva  $C_c$  dei costi relativi a manutenzione correttiva, ha andamento crescente.

$C_p$  decresce perché, all'aumentare del tempo di intervallo con cui la preventiva viene svolta, il costo unitario per intervento viene suddiviso su tempi più lunghi, dunque il costo per unità di tempo diminuisce.

Al contrario, essendo  $C_c$  legata al numero di guasti che si verificano sui carri, aumenta con l'aumentare del tempo: più tempo passa, maggiore sarà il numero di guasti atteso [1][2].

Sommando le due funzioni di costo descritte, si ottiene la curva dei costi totali  $CUA$  (Costo Unitario Atteso), che, come mostrato in Figura 4.1, ha andamento parabolico. Tale curva rappresenta il valore dei costi totali di manutenzione per unità di tempo, al variare dell'intervallo definito per l'applicazione della manutenzione preventiva.

Il valore di tempo da utilizzare come intervallo tra due interventi preventivi, ovvero la soluzione ottima al problema, si individua quindi minimizzando  $CUA$ .

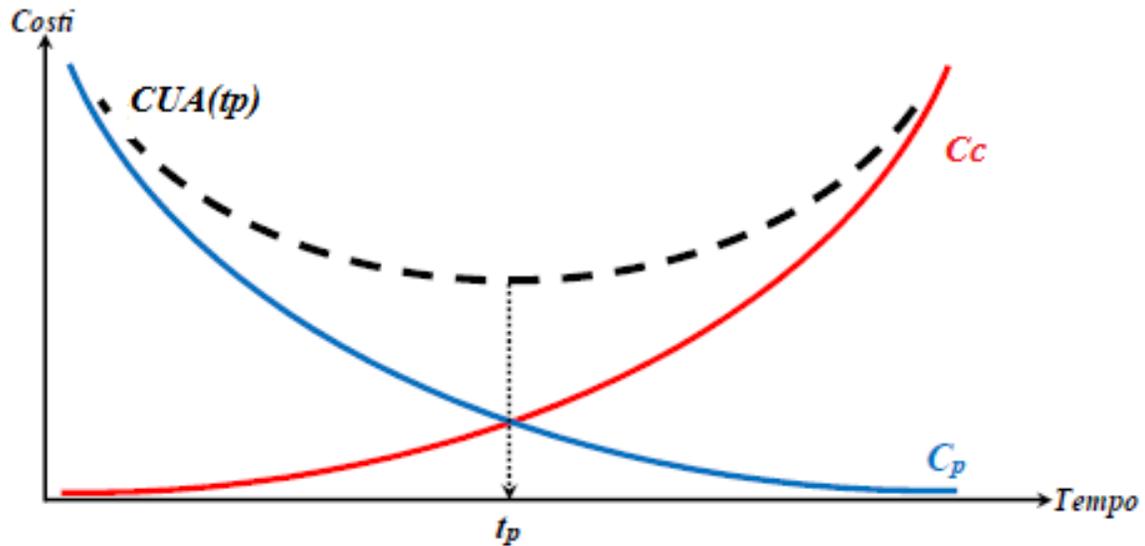


Figura 4.1: Andamento delle funzioni di costo al variare del tempo

Dal punto di vista analitico,  $CUA$  è definito dalle equazioni 4.1 e 4.2 [1][3]:

$$CUA = \frac{\text{costo totale atteso}}{\text{lunghezza del ciclo di manutenzione}} \quad [4.1]$$

$$CUA = \frac{C_p + C_c \cdot N_c}{t_p} \quad [4.2]$$

dove  $N_c$  è il numero di guasti atteso nel periodo  $t_p$ , stimato in funzione della probabilità di avaria dei componenti presi in esame.

Come si può notare dalla formula, l'incidenza dei costi relativi a guasto sul totale dei costi attesi è fortemente dipendente dal numero di guasti: si intuisce che, se il numero di guasti è poco elevato, l'andamento di  $CUA$  sarà maggiormente condizionato dai costi di preventiva. Lo scopo di tale manutenzione, infatti, è abbassare la frequenza degli interventi correttivi, quindi dei guasti, in modo da ridurre i costi ad essi relativi: poiché i costi di manutenzione preventiva

hanno in generale un andamento decrescente con il tempo, è preferibile che  $CUA$  sia influenzato maggiormente da  $C_p$  che da  $C_c$ .

Nel caso in cui il numero di guasti sia basso, non conviene applicare manutenzione preventiva, in quanto l'abbassamento del tasso di guasto non sarebbe tale da equilibrare l'aumento del  $CUA$  dovuto all'introduzione dei costi di preventiva.

## 4.2 Valutazione dei costi

La valutazione dei costi  $C_p$  e  $C_c$  viene fatta individuando le singole voci di costo da cui essi dipendono.

Per quanto riguarda gli interventi di manutenzione preventiva, si possono individuare i seguenti costi specifici:

- costi di manodopera: costo orario di ogni operatore  $\rightarrow C_{op}$  [€/h]
- costi di ricambio: costo dei pezzi che vengono sostituiti  $\rightarrow C_{ric}$  [€/pz]
- costi di sosta: costi per l'utilizzo dei binari su cui vengono posizionati i carri da riparare, in attesa dell'intervento degli addetti alla manutenzione  $\rightarrow C_{sosta}$  [€/h]
- costi di manovra: costo delle manovre necessarie a spostare i carri sul binario di destinazione  $\rightarrow C_{manovra}$  [€/manovra]
- costi di trasferta: costi legati all'uscita degli operatori, quando la manutenzione non avviene all'interno dell'officina, ma ad opera di una squadra mobile  $\rightarrow C_{trasf}$  [€]
- costi extramanutentivi: costi legati alla messa in sicurezza, la preparazione del cantiere e la seguente pulizia dell'area dove avviene la riparazione  $\rightarrow C_{extra}$  [€]
- costi relativi alle altre lavorazioni effettuate (lubrificazione, misura del profilo delle sale..)  $\rightarrow C_{lubrifica}, C_{misura\ sale}$  [€]
- costo della prova freno, da effettuarsi prima della rimessa in esercizio dei carri  $\rightarrow C_{prova\ freno}$  [€/carro]

Nel caso di intervento correttivo, si ipotizza che l'unica lavorazione effettuata sia la sostituzione delle soles, essendo queste ultime l'elemento individuato come più critico e la loro sostituzione il tipo di intervento che si vuole ridurre. Di conseguenza, i costi da valutare sono i medesimi riportati sopra, tolti i costi di lubrificazione e misura del profilo delle sale, e con l'aggiunta di due voci:

- costi di scarico: costi legati alle operazioni di scarico della merce dal carro, quando viene rilevato un guasto durante un trasporto  $\rightarrow C_{scarico}$  [€]
- costo di fermo produttivo: rappresenta la produttività persa nel tempo in cui il carro è fermo per le riparazioni (poiché l'intervento non è programmato, l'utile che si sarebbe ricavato dall'utilizzo del carro viene perso)  $\rightarrow C_{fermo}$  [€/h]

Occorre poi definire i tempi impiegati per le riparazioni e le altre attività correlate, il numero di operatori coinvolti, il numero di pezzi di ricambio utilizzati, ecc..., che, moltiplicati per i relativi costi specifici, permettono di definire il valore complessivo di ogni voce di costo, come riportato nel seguito (Equazioni dalla 4.3 alla 4.8):

$$C_{ric} [\text{€}] = c_{pezzo} [\text{€/pz}] \cdot n_{pezzi} \quad [4.3]$$

$$C_{op} [\text{€}] = c_{op} [\text{€/h}] \cdot n_{op} \cdot t_{lavoraz} [\text{€}] \quad [4.4]$$

$$C_{sosta(p)} [\text{€}] = c_{sosta} [\text{€/h}] \cdot t_{sosta(p)} [h] \quad [4.5]$$

$$C_{manovra} [\text{€}] = c_{man} [\text{€/man}] \cdot n_{man} \quad [4.6]$$

$$C_{fermo} [\text{€}] = c_{fermo} [\text{€/h}] \cdot t_{sosta(c)} [h] \quad [4.7]$$

$$C_{sosta(c)} [\text{€}] = c_{sosta} [\text{€/h}] \cdot t_{sosta(c)} [h] \quad [4.8]$$

$C_{trasf}$ ,  $C_{extra}$ , e  $C_{scarico}$ , invece, sono costi fissi, dipendenti dall'officina che effettua le riparazioni. I tempi di sosta nel caso di manutenzione preventiva possono essere diversi da quelli relativi ad interventi correttivi: questo perché la manutenzione correttiva, non essendo programmata, può richiedere tempi maggiori per l'approntamento delle attrezzature o per la mancanza di pezzi di ricambio immediatamente disponibili.

Sommando tra loro tutte le voci di costo, si ottiene il valore di  $C_p$  e  $C_c$  (Equazioni 4.9 e 4.10), cioè il costo totale di ogni singolo intervento di manutenzione.

$$C_p = C_{ric} + C_{op} + C_{sosta} + C_{manovra} + C_{trasf} + C_{extra} \quad [4.9]$$

$$C_c = C_{ric} + C_{op} + C_{sosta} + C_{manovra} + C_{trasf} + C_{extra} + C_{scarico} + C_{fermo} \quad [4.10]$$

### 4.3 Valutazione del numero di guasti atteso

Per valutare il numero di guasti atteso, è fondamentale conoscere la probabilità di guasto degli elementi in esame.

Il calcolo di  $N_c$  viene effettuato secondo l'Equazione 4.11:

$$N_c = \lambda(t_p) \cdot t_p \cdot F(t_p) \quad [4.11]$$

dove:

$\lambda$  = tasso di guasto relativo al componente in esame, cioè numero di guasti nell'unità di tempo

[1/t]

$t_p$  = durata dell'intervallo tra una manutenzione preventiva e la seguente [t]

$F(t_p)$  = funzione di probabilità di guasto cumulata in un periodo di tempo di lunghezza  $t_p$ , ovvero probabilità che effettivamente si verifichino dei guasti in quel periodo di tempo [-]

Sia il tasso di guasto che la probabilità cumulata di guasto sono grandezze affidabilistiche, per la cui valutazione sono necessarie alcune nozioni di base di teoria dell'affidabilità, riportate nel seguito.

#### 4.4 Nozioni di affidabilità

La norma UNI EN 13306 definisce l'affidabilità come “l'attitudine di un'entità a svolgere la funzione richiesta in date condizioni, durante un intervallo di tempo stabilito”. In altre parole, è la probabilità che suddetta entità funzioni correttamente (senza guasti e/o perdite di efficacia) durante un determinato periodo di tempo e a partire da condizioni di funzionamento date.

Per poter determinare l'affidabilità di un'entità, dunque, è necessario [1]:

- fissare un criterio per determinare se un elemento funziona o meno, in modo inequivocabile;
- stabilire con precisione le condizioni ambientali e di utilizzo;
- definire l'intervallo di tempo durante il quale si vuole che l'entità si trovi in stato operativo.

L'affidabilità può essere misurata sfruttando degli indici. In particolare, tali indici misurano la cosiddetta “affidabilità effettiva”, cioè la propensione al buon funzionamento di una macchina durante un certo periodo di tempo.

Esistono molti indici che permettono di misurare l'affidabilità di una macchina, tuttavia quello maggiormente utilizzato è il già citato *MTBF*, ossia il tempo medio intercorso tra due guasti successivi. Tale indice fa riferimento a entità che, una volta guastatesi, possano essere riparate; nel caso di entità che non possono essere riparate, e quindi una volta guastatesi necessitano una sostituzione, si parla di “Mean Time To Failure” (*MTTF*).

Il valore di *MTBF* può essere valutato come media dei valori di *TBF* (Time Between Failure) registrati, cioè come media dei tempi intercorsi tra la fine di uno stato di avaria e il guasto successivo.

Per poter calcolare *MTBF* in questo modo, è necessario avere a disposizione lo storico dei guasti della macchina oggetto dell'analisi [1][4].

La misura dell'affidabilità, e quindi la ricostruzione della legge di affidabilità di una macchina, è fondamentale per poter prendere decisioni sulle politiche che devono essere adottate per la sua manutenzione.

Per realizzare qualsiasi studio di affidabilità, è necessario conoscere la definizione di ciascuna delle 4 seguenti funzioni affidabilistiche, relazionate con il guasto delle macchine [1][16]:

- probabilità di guasto;
- probabilità cumulata di guasto;
- affidabilità;
- tasso di guasto.

Si tratta di grandezze che, in genere, dipendono dal tempo; possono essere definite sia per un dominio discreto che per un dominio continuo.

#### 4.4.1 Elementi di affidabilità nel discreto

Per la definizione di tali grandezze nel discreto, il periodo temporale di riferimento viene suddiviso in sotto-intervalli di ampiezza  $\Delta t$ .

Prendendo come riferimento una popolazione di  $n$  elementi, la probabilità di guasto per tale popolazione in ogni intervallo di tempo è definita come il rapporto tra il numero di elementi guastatisi nell'intervallo  $(t_i; t_i + \Delta t]$  e il numero totale di elementi della popolazione (Equazione 4.12) [1][4]:

$$P(t_i; t_i + \Delta t) = \frac{\text{elementi guastatisi in } (t_i; t_i + \Delta t]}{\text{elementi totali della popolazione}} \quad [4.12]$$

La probabilità cumulata di guasto  $F(T)$  definisce la probabilità che il guasto si produca prima di un dato tempo  $T$ , scelto per la valutazione. La si può calcolare secondo l'Equazione 4.13 [1][4]:

$$F(T) = \frac{\text{numero di elementi guastatisi prima del tempo } T}{\text{numero di elementi della popolazione}} \quad [4.13]$$

In sostanza, quindi, la probabilità cumulata di guasto è la somma delle probabilità di guasto di ciascun intervallo  $(t_i; t_i + \Delta t ]$  dall'istante 0 sino al tempo  $T$  scelto. Se il tempo  $T$  è composto da  $N$  intervalli, la 4.13 si può riscrivere nella forma dell'Equazione 4.14:

$$F(T) = \sum_{i=1}^N P(t_i; t_i + \Delta t) \quad [4.14]$$

La funzione  $F(T)$  è anche chiamata legge d'inaffidabilità, o più semplicemente inaffidabilità, dell'elemento in questione tra il tempo 0 e  $T$ .

Per definire la legge di affidabilità  $R(T)$ , si assume che un elemento possa trovarsi solo in due stati all'interno di un certo tempo  $T$ : guastarsi all'interno di  $T$  oppure sopravvivere oltre il tempo  $T$ .

Si definisce quindi legge di affidabilità, o più semplicemente affidabilità, di ciascun intervallo  $\Delta t$ , la relazione tra il numero di elementi che sopravvivono aldilà del tempo  $T$  e il numero totale di elementi della popolazione di partenza. Inoltre, se l'inaffidabilità  $F(T)$  identifica la probabilità che il guasto si verifichi entro il tempo  $T$ , allora l'affidabilità  $R(T)$ , ossia la probabilità di sopravvivenza dell'elemento aldilà di  $T$ , si definisce come complemento a uno dell'affidabilità (Equazione 4.15) [1]:

$$R(T) = \frac{\text{numero di elementi che sopravvivono oltre il tempo } T}{\text{numero di elementi della popolazione}} = 1 - F(T) \quad [4.15]$$

L'ultima grandezza da definire è il tasso di guasto. L'importanza di questo parametro si deve al fatto che esso permette di valutare, per un certo campione di elementi, come cambia la probabilità che essi si guastino all'aumentare del tempo di utilizzo.

Il tasso di guasto  $\lambda$  consente, infatti, di caratterizzare la propensione al guasto all'interno dell'intervallo  $(t_i; t_i + \Delta t]$  di un elemento sopravvissuto fino a un dato istante di tempo  $t_i$  [1].

Esso si definisce secondo l'Equazione 4.16:

$$\lambda(t_i; t_i + \Delta t) \cdot \Delta t = \frac{\text{numero di guasti avvenuti nell'intervallo}(t_i; t_i + \Delta t]}{\text{numero di elementi della popolazione}} \quad [4.16]$$

Si noti che la probabilità che definisce il tasso di guasto si calcola sulla popolazione residua, cioè sui soli elementi sopravvissuti fino al tempo  $T$ .

Il tasso di guasto in genere tende a cambiare con il tempo: il suo andamento è una caratteristica peculiare di ogni famiglia di macchinari, come mostrato nella Figura 4.2 [16].

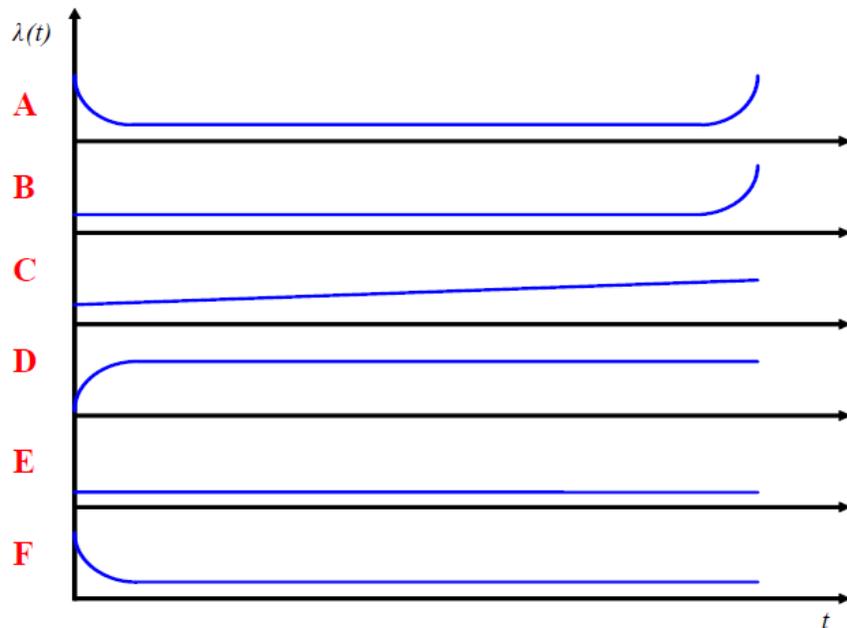


Figura 4.2: Andamento del tasso di guasto per ogni diversa famiglia di macchine

In base alle caratteristiche della macchina e al comportamento dei suoi componenti, il tasso di guasto assume forme diverse. Si riporta in Tabella 4.1 la descrizione del comportamento che  $\lambda$  assume nei diversi casi, e il tipo di macchinario cui ciascun andamento può venire abbinato.

<b>Modello</b>	<b>Descrizione del comportamento</b>	<b>Tipi di macchine</b>
A	A partire da un'alta incidenza del guasto, il tasso di guasto presenta una fase con andamento decrescente (rodaggio), seguita da una fase con tasso di guasto costante, e infine una fase di crescita rapida.	Macchinari meccanici complessi (per esempio stazioni elettro-meccaniche).
B	Tasso di guasto costante fino un certo istante a partire dal quale inizia ad aumentare rapidamente.	Componenti meccanici soggetti a usura (per esempio cuscinetti).
C	Lento aumento del tasso di guasto (dovuto all'usura progressiva con l'utilizzo).	Consumo/usura lenta delle protezioni/isolamenti di apparati elettrici.
D	Rapido incremento del tasso di guasto quando il componente è nuovo e successivo adattamento a un livello costante.	Componenti elettrici specifici (ad esempio, resistenze per il riscaldamento di liquidi).
E	Tasso di guasto costante durante tutta la vita utile (guasti aleatori).	Componenti elettronici.
F	Alta mortalità infantile all'inizio e successiva stabilizzazione del tasso di guasto a un livello costante.	Componenti elettronici con difettosità dei materiali, sistemi complessi (con errori di progetto, difettosità dei materiali, ecc.).

*Tabella 4.1: Descrizione dei diversi andamenti assumibili dal tasso di guasto e delle caratteristiche del gruppo di macchinari cui sono relativi*

La prima famiglia (Modello A, macchinari meccanici complessi) presenta un comportamento di carattere generale che è conosciuto anche come "curva a vasca da bagno" (Figura 4.3), ed è il modello che più spesso si utilizza nei trattati teorici come esempio guida per rappresentare l'andamento del tasso di guasto nelle differenti tappe della vita operativa di una macchina. In particolare, con riferimento alla curva, si possono distinguere tre fasi di vita utile, cui corrispondono tre diversi andamenti [16]:

**1. Fase di mortalità infantile (rodaggio):** è la fase in cui il tasso di guasto, da un alto valore iniziale (elevata propensione al guasto), diminuisce fino a stabilizzarsi intorno ad un valore quasi costante (cioè diminuisce con l'aumentare dell'età di funzionamento della macchina). In questa fase, gli elementi più deboli, soggetti appunto a mortalità infantile, vengono rimpiazzati o riparati. La mortalità infantile è un fenomeno che si manifesta nella prima fase del funzionamento di una macchina, successivamente alla sua installazione o a interventi di manutenzione che ne hanno richiesto lo smontaggio. È dovuta a difetti di vario tipo: di progetto, del processo di fabbricazione/montaggio, d'installazione, di difettosità dei materiali....

La tendenza del tasso di guasto a diminuire fino a stabilizzarsi è dovuta al fatto che gli elementi più propensi al guasto, dopo un certo tempo, sono ormai stati sostituiti o riparati, quindi non fanno più parte della popolazione dei sopravvissuti. Inoltre, gli elementi sopravvissuti hanno caratteristiche di propensione al guasto simili e costanti.

**2. Fase di vita utile:** dopo il rodaggio, il tasso di guasto della macchina raggiunge il suo valore più basso e si mantiene approssimativamente costante nel tempo (cioè la propensione al guasto non cambia con l'aumento della vita operativa della macchina). Nel corso di questo periodo, si producono solo guasti di natura aleatoria, del tutto fisiologici durante il funzionamento della macchina stessa (ad esempio, carichi di punta accidentali diversi dai valori nominali del progetto).

**3. Fase d'usura (o degrado) con l'età:** è la fase in cui il tasso di guasto diventa crescente nel tempo (cioè cresce con l'aumentare della vita operativa della macchina). Quando una macchina giunge alla fine della sua vita utile, infatti, iniziano a manifestarsi malfunzionamenti, dovuti al fenomeno dell'invecchiamento, che ne aumentano la propensione al guasto. Questa fase equivale pertanto a un degrado irreversibile delle caratteristiche della macchina, tanto più rapido quanto più la macchina è sensibile al fenomeno dell'usura.

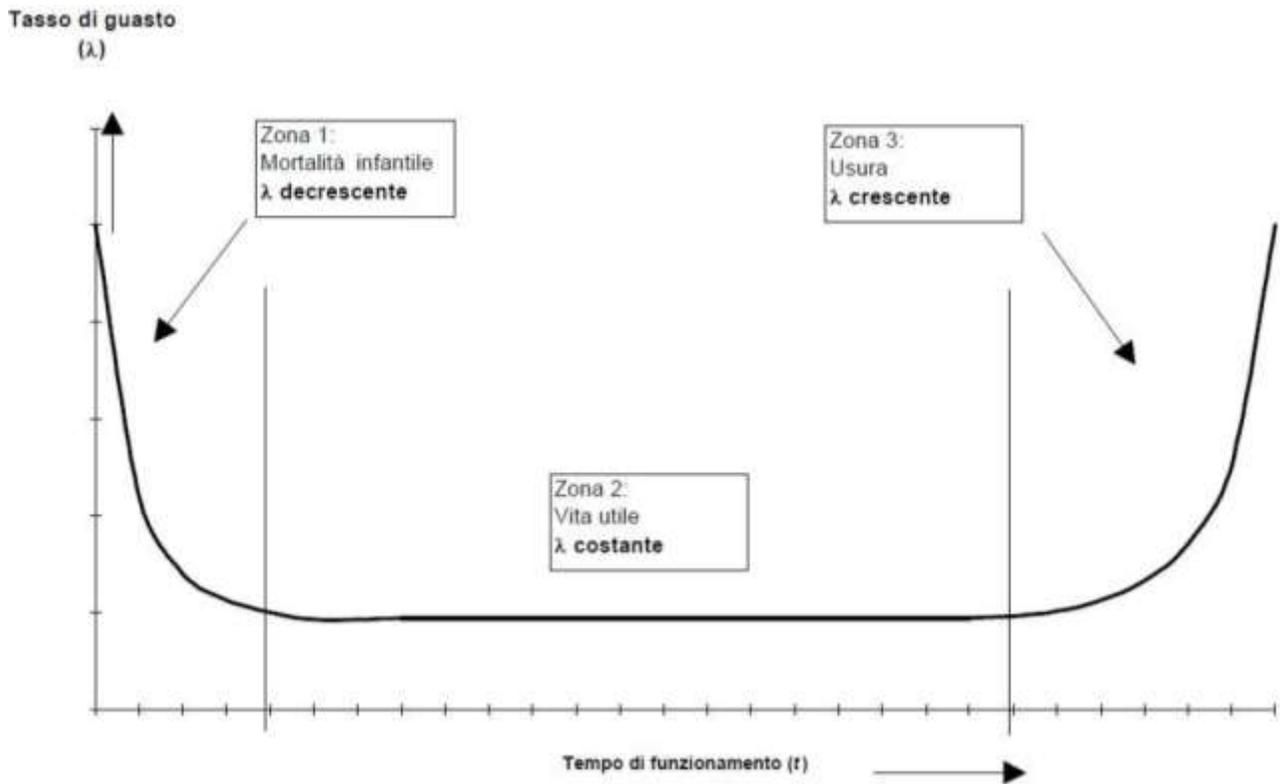


Figura 4.3: Tasso di guasto in funzione del tempo. La curva, detta “a vasca da bagno”, presenta 3 zone con andamento differente, riferibili alle diverse fasi della vita utile di una macchina

#### 4.4.2 Elementi di affidabilità nel continuo

La trattazione fatta anteriormente per le variabili affidabilistiche con riferimento a intervalli di tempo  $\Delta t$  discreti e finiti, può essere estesa al caso continuo, considerando intervalli di tempo infinitesimi  $dt$ .

Si definisce quindi la variabile aleatoria  $t$  (tempo fino al guasto di una macchina) come il tempo intercorso tra l'istante iniziale, in cui si mette in marcia la macchina, e l'istante in cui la macchina smette di funzionare. A partire da  $t$ , si può definire la probabilità di guasto  $P(t; t + dt)$  come la probabilità che la macchina si guasti nell'intervallo  $(t; t + dt)$ .

Nel continuo si è soliti esprimere la probabilità di guasto utilizzando l'Equazione 4.17, cioè come il prodotto di una funzione  $f(t)$ , detta densità di probabilità (o frequenza) di guasto, per un intervallo di tempo infinitesimo  $dt$  [16]:

$$P(t; t + dt] = f(t)dt \quad [4.17]$$

Introducendo la variabile fittizia  $x$  per esprimere lo scorrere del tempo  $t$  all'interno dell'intervallo  $(t; t + dt]$ , è possibile identificare  $f(t)$  come la funzione che permette di calcolare la probabilità infinitesima  $f(t)dt$  che la macchina si guasti nel periodo di tempo infinitesimo  $(t; t + dt]$ .

Traducendo in linguaggio matematico quanto esposto, si ha l'Equazione 4.18:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{probabilità di guasto per } t < x \leq t + \Delta t}{\Delta t} \quad [4.18]$$

Una volta che si conosce la funzione di densità di probabilità di guasto  $f(t)$ , si può calcolare, attraverso la sua integrazione nel tempo (Equazione 4.19), la funzione di distribuzione cumulata della probabilità di guasto  $F(T)$ , cioè la probabilità che il guasto accada all'interno di un dato valore di intervallo  $T$  della variabile temporale  $t$  [16]:

$$F(t) = \int_0^T f(t)dt \quad [4.19]$$

A livello grafico, la probabilità cumulata di guasto al tempo  $T$  è l'area sottesa dalla funzione  $f(t)$  tra l'istante iniziale ( $t = 0$ ) e l'istante finale  $T$  nel quale si desidera calcolare  $F(T)$  (Figura 4.4).

Per quanto riguarda la definizione dell'affidabilità  $R(T)$ , cioè la probabilità di sopravvivenza della macchina aldilà di  $T$ , si ottiene come complemento a 1 di  $F(T)$  (Equazione 4.20):

$$R(T) = 1 - F(T) = 1 - \int_0^T f(t)dt \quad [4.20]$$

Gli andamenti delle funzioni  $f(t)$ ,  $F(T)$  e  $R(T)$  sono illustrati, a livello indicativo, in Figura 4.4 e 4.5 [16].

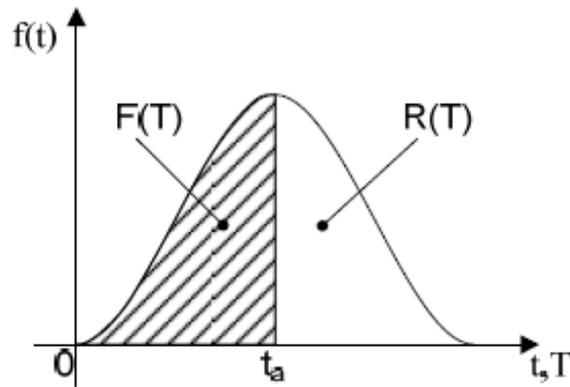


Figura 4.4: Andamento di  $f(t)$  in funzione del tempo. L'area sottesa dalla funzione tra l'istante iniziale  $t=0$  e l'istante  $t= t_a$  corrisponde a  $F(T)$ ; l'area rimanente, invece, corrisponde a  $R(T)$ .

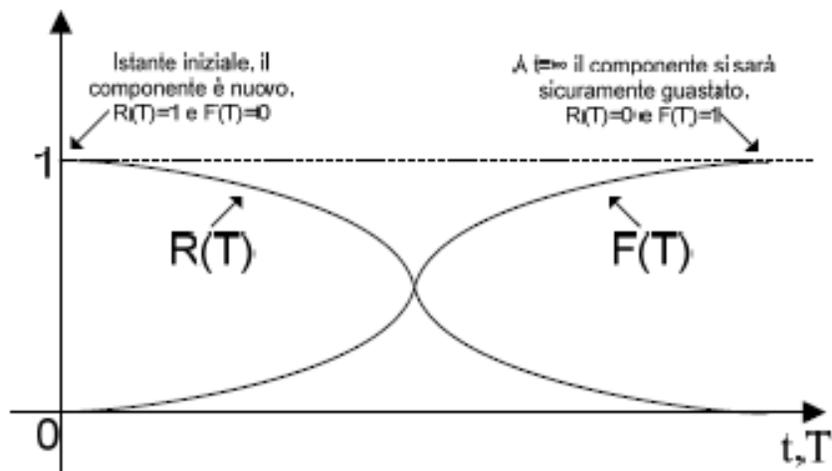


Figura 4.5: Andamenti delle funzioni  $R(T)$  e  $F(T)$ . Si nota che le due curve sono simmetriche: quando  $F(T)$  è nulla,  $R(T)$  è pari a 1, e viceversa.

Anche per il tasso di guasto  $\lambda(t)$  esiste una definizione nel continuo. In particolare, si definisce come la funzione a partire dalla quale si può calcolare la probabilità infinitesima  $\lambda(t) dt$  che la macchina, funzionante fino al tempo  $t$ , si guasti nel periodo di tempo infinitesimo immediatamente successivo  $(t; t + dt)$  [1][16].

Analiticamente, a tale definizione corrisponde l'Equazione 4.21:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{probabilità di guasto per } (t < x \leq t + \Delta t | x > t)}{\Delta t} \quad [4.21]$$

A partire da queste definizioni, si può scrivere la relazione che vincola  $\lambda$ ,  $R$  e  $F$ , data dall'Equazione 4.22 [1][3][16].

$$\lambda(t)dt = \frac{f(t)dt}{R(T)} \quad [4.22]$$

Va segnalato che, mentre  $f(t)$ ,  $R(T)$  e  $F(T)$  sono delle probabilità (e pertanto dei valori numerici compresi tra zero e uno), il tasso di guasto è piuttosto una velocità o frequenza di guasto, e può quindi essere interpretato come il numero di guasti nell'unità di tempo (e ha come dimensione il reciproco del tempo).

#### 4.4.3 Espressione analitica della legge di affidabilità

Per ottenere l'espressione analitica della legge di affidabilità e di tutti gli altri indicatori che a essa fanno riferimento, per prima cosa è necessario calcolare la funzione matematica che esprime la densità di probabilità di guasto  $f(t)$ . La funzione  $f(t)$  di un elemento può essere approssimata, in dipendenza dalla fase di vita operativa in cui si trova, attraverso una delle funzioni analitiche di 'fitting' presentate nel seguito [1][16].

a) Funzione esponenziale negativa (Equazione 4.23):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad [4.23]$$

La funzione esponenziale negativa è valida durante la fase di vita utile della macchina, dove il tasso di guasto può essere considerato costante. Tale distribuzione, infatti, riassume il comportamento tipico dell'accadimento di fenomeni le cui cause sono totalmente accidentali.

b) Funzione di Weibull (Equazione 4.24):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad [4.24]$$

La funzione di Weibull possiede un'alta flessibilità applicativa (dovuta alla sua grande capacità di adattamento) e può essere utilizzata per modellare tutte le fasi del ciclo di vita di una macchina, variando i valori dei parametri caratteristici della curva (costituiti dalla vita caratteristica  $\eta$  [unità di misura temporale] e il fattore di forma  $\beta$  [numero puro]).

In particolare:

1. Nella fase di mortalità infantile, il fattore di forma  $\beta$  è inferiore a uno e il tasso di guasto corrispondente risulta decrescente.
2. Nella fase di vita utile, il fattore di forma  $\beta$  è pari a uno. Ne consegue che il tasso di guasto  $\lambda(t)$  è corrispondentemente costante e uguale a  $1/\eta$ . Dato che  $\lambda$  è costante, la funzione di Weibull coincide con la funzione esponenziale negativa, con  $\lambda$  pari a *MTBF*.
3. Nella fase di usura, il fattore di forma  $\beta$  è maggiore di uno: il tasso di guasto risulta corrispondentemente crescente.

c) Funzione normale (Equazione 4.25):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad [4.25]$$

La funzione normale si può utilizzare per descrivere la fase finale della vita di una macchina. I valori di  $\mu$  e  $\sigma$  sono rispettivamente la media e la varianza di *TBF*.

Una volta determinata la forma della funzione di densità di probabilità, è possibile ricavare le altre grandezze affidabilistiche, sulla base delle relazioni esposte in precedenza.

#### 4.5 Determinazione delle grandezze affidabilistiche nel caso in esame

Per definire la forma della funzione  $f(t)$  nel caso in esame, si è considerato che il tasso di guasto abbia andamento crescente, ovvero ci si è posti nella condizione corrispondente alla fase 3 della curva a vasca da bagno. Questo perché il tipo di intervento correttivo considerato è la sostituzione delle suole del freno, che sono un componente soggetto ad usura, dunque più esposto a rischi di avaria con l'aumentare del tempo. Una volta che raggiungono lo spessore limite, inoltre, esse vengono comunque sostituite: più tempo trascorre, quindi, più è probabile che sia necessario un intervento.

La funzione di densità di probabilità assume dunque la forma della funzione normale, descritta dall'Equazione 4.25. Come si è detto,  $\mu$  e  $\sigma$  corrispondono rispettivamente a media e varianza di  $TBF$ , ovvero del tempo trascorso tra la riparazione di un'avaria ed il guasto successivo. In sostanza, quindi,  $\mu$  non è altro che  $MTBF$  (o, più precisamente,  $MTTF$ , in quanto si tratta di elementi che vengono sostituiti, non riparati).

Nel caso in esame, questi due parametri verranno stimati sfruttando i dati disponibili riguardo le avarie riscontrate sui carri.

Nota  $f(t)$ , è possibile valutare la funzione di probabilità cumulata  $F(t_p)$ , che rappresenta la probabilità di guasto nel periodo  $t_p$ , sfruttando l'Equazione 4.26:

$$F(t_p) = \int_0^{t_p} f(t)dt = \frac{1}{2} \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{t_p - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right) \quad [4.26]$$

e, di conseguenza, la funzione di affidabilità  $R(t_p)$ , dall'Equazione 4.27:

$$R(t_p) = 1 - F(t_p) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{t_p - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \quad [4.27]$$

dove  $\operatorname{erf}\left(\frac{t_p - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)$  e  $\operatorname{erfc}\left(\frac{t_p - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)$  sono rispettivamente la funzione degli errori e la funzione degli errori complementare, definite secondo le Equazioni 4.28 e 4.29.

$$\operatorname{erf}\left(\frac{t_p - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\left(\frac{t_p - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)} e^{-t^2} dt \quad [4.28]$$

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{t_p - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\left(\frac{t_p - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)}^{\infty} e^{-t^2} dt \quad [4.29]$$

Una volta definite queste grandezze, è possibile calcolare il tasso di guasto  $\lambda$  al variare del tempo, sfruttando l'Equazione 4.22.

A questo punto, è possibile stimare il numero di guasti attesi nel periodo  $t_p$ , utilizzando l'equazione 4.11.

Riassumendo, per stabilire l'intervallo ottimo con cui effettuare la manutenzione preventiva, è necessario conoscere i costi relativi ai diversi interventi, lo storico dei guasti del componente in esame e la probabilità di guasto relativa. Partendo da queste informazioni, il modello definito restituisce il tempo ottimo di intervallo e il relativo costo totale.

## Capitolo 5

### Taratura del modello

Definita la struttura del modello, occorre verificarne la funzionalità e l'aderenza alla realtà. Per fare questo, si applica il modello ad una situazione "nota", cioè di cui si conoscono sia i dati di partenza che i risultati ad essi conseguenti, e si verifica che i risultati forniti dal modello siano coerenti con quello che avviene nella realtà.

Si ricerca quindi un cliente dell'azienda che svolga manutenzione preventiva in modo efficiente, per poter assumere che il tempo di ciclo da esso utilizzato sia ottimo, e di cui siano disponibili tutte le informazioni richieste dal modello.

#### *5.1 Scelta del soggetto per la taratura*

Tra i clienti che effettuano manutenzione preventiva, si è individuato quello che ne usufruisce da più tempo, e si è valutata l'efficienza della strategia di manutenzione da esso seguita.

Non è sufficiente infatti che il cliente scelto esegua manutenzione: essa deve anche fornire dei buoni risultati, cioè si deve poter assumere che l'intervallo utilizzato sia ottimo (in caso contrario, non si potrebbe avere un confronto con i risultati ottenuti utilizzando il modello).

L'intervallo definito dal cliente è di tipo chilometrico, stimato sulla base della durata del componente più critico che, come visto in precedenza, sono le soles del freno.

In particolare, i carri vengono lavorati dopo che hanno percorso circa 30-35 mila chilometri dalla precedente sostituzione delle soles: tale intervallo è stato scelto perché il cliente ha

stimato che le soles dei propri carri raggiungono il limite di usura consentito in corrispondenza di questa distanza.

Per verificare che la stima effettuata sia realistica, e quindi il tempo di ciclo si possa considerare ottimo, si sono analizzati i dati di guasto relativi alle soles per il cliente in questione.

Per un campione di 100 carri, si è individuato il tempo medio trascorso tra una sostituzione (conseguenza di un guasto o di una manutenzione) e la successiva etichettatura per soles ricevuta dal carro. Si è poi valutata la media dei chilometri percorsi in un mese da ciascun carro, per poter trasformare l'intervallo temporale individuato in un intervallo chilometrico, da poter confrontare con quello utilizzato per la manutenzione.

Dalle analisi svolte, si deduce una percorrenza mensile di circa 8'800 km, mentre il tempo medio che intercorre tra due riparazioni consecutive è risultato essere di circa 4 mesi e mezzo; si deduce quindi che si verificano dei guasti in media ogni 38'000 km. Dovendo la manutenzione prevenire il guasto, la cadenza individuata dal cliente può essere considerata efficiente, quindi il cliente analizzato risulta idoneo per la taratura.

## 5.2 Definizione dei dati in ingresso

Appurato che la taratura può essere effettuata sul cliente identificato, si definiscono i vari parametri, costi e grandezze necessari per applicare il modello.

Per semplificare la trattazione, si considerano solo i guasti relativi alle soles, in particolare soles in ghisa. Nello specifico, la probabilità di guasto e i costi relativi agli interventi di manutenzione correttiva vengono calcolati ipotizzando che l'unica lavorazione effettuata sia la sostituzione di questi componenti, come accennato nel par. 4.2.

### 5.2.1 Valutazione dei costi

Vengono valutati, anzitutto, i costi di intervento, sia in caso di guasto che in caso di manutenzione preventiva.

I costi considerati sono quelli già presentati nel capitolo precedente, ovvero quelli relativi ai pezzi di ricambio, agli operatori, alla sosta, la trasferta, ecc... .

Per valutare tali costi, si è fatto riferimento alle fatture emesse dalle diverse officine; poiché alcuni costi, specialmente quelli logistici, variano da un'officina all'altra, si è calcolato un valore medio per ogni voce di costo.

I valori dei costi specifici così ottenuti sono riportati in Tabella 5.1:

c operatore	35 €/ora
c soles GG	30 €/pezzo
c manovra	240 €/manovra
c sosta	8 €/ora

Tabella 5.1: Costi specifici relativi al cliente di riferimento per la taratura del modello

Per calcolare i costi totali, è necessario conoscere i tempi di sosta e lavorazione del carro, e il numero di pezzi sostituiti.

Si ipotizza di sostituire tutte le suole del carro, sia in caso di preventiva che in caso di correttiva (nel primo caso è verosimile perché in sede di preventiva si rinnova completamente il carro, nel secondo caso ci si pone nella condizione più sfavorevole). Per quanto riguarda il tempo di lavorazione, sono necessarie circa 2 ore per completare la sostituzione delle suole di un carro, ipotizzando la presenza di due lavoratori.

Per la valutazione del tempo di sosta, si è riscontrato, dallo storico dei guasti, che il tempo medio che trascorre tra lo scarto del carro e la sua rimessa in esercizio, in caso di avaria, è di circa 3 giorni; in caso di manutenzione preventiva, invece, il carro resta fermo in media un giorno.

I costi totali risultanti sono riportati in Tabella 5.2:

C ric GG	960 €
C op	280 €
Csosta prev	200 €
Csosta corr	600 €

*Tabella 5.2: Costi totali, individuati moltiplicando i costi specifici per i relativi tempi o numeri di elementi*

A questi si aggiungono i costi fissi, presenti sia in caso di preventiva che di correttiva, valutati sempre sulla base delle fatture esaminate (Tabella 5.3):

Cmanovra	240 €
Ctrasferta	200 €
Cextra	150 €

*Tabella 5.3: Costi fissi relativi al cliente di riferimento per la taratura del modello*

e, per quanto riguarda la manutenzione preventiva, i costi delle altre lavorazioni che si effettuano (Tabella 5.4):

C misura sale	20 €
C lubrifica	30 €
C prova freno	50 €

Tabella 5.4: Costi relativi alle lavorazioni effettuate in sede di manutenzione preventiva

Nel caso di intervento correttivo, inoltre, si deve tenere conto anche dei costi dovuti all'eventuale scarico della merce dal carro e al fermo produttivo. Per determinare quest'ultimo, si è fatto riferimento alle tariffe applicate dal cliente per effettuare il trasporto.

Si è stimato un costo specifico di 33 €/ora, che moltiplicato per le ore di sosta si traduce in un costo totale di 2'376 €. Quest'ultimo è il costo che incide maggiormente sul totale dei costi di intervento correttivo.

Il costo dello scarico, anch'esso variabile in base al soggetto che se ne occupa, è stato invece stimato pari a 30 €/intervento, sempre sulla base delle tariffe applicate dalle officine.

Sommando le varie voci di costo, si ottengono i costi totali per intervento, per entrambi i casi:

$$C_p = 2'730 \text{ €/intervento}$$

$$C_c = 4'286 \text{ €/intervento}$$

Il fatto che i costi legati a correttiva siano molto superiori a quelli legati a preventiva, deriva dal fatto che, nel caso di intervento programmato, non si hanno costi legati al fermo produttivo, che, come si è visto, è il valore che incide maggiormente sul totale.

### 5.2.2 Valutazione del numero di guasti atteso

Come illustrato in precedenza, per stimare il numero di guasti atteso è necessario conoscere la probabilità di guasto. Per calcolare tale grandezza, anzitutto, si definisce la funzione di densità di probabilità che, come detto, assume la forma della funzione normale.

Per definire il valore di tale funzione al variare del tempo, vanno definiti i parametri  $\mu$  e  $\sigma$ .

Il valore di  $\mu$ , che coincide con  $MTTF$ , è già stato identificato anteriormente (par. 5.1 ), ed è pari a 4,37.

Per valutare  $\sigma$ , invece, si ricorre alla definizione di varianza (Equazione 5.1), per cui:

$$\sigma = \frac{\sum_1^N (x_i - \mu)^2}{N} \quad [5.1]$$

dove  $x_i$  è il valore di  $TBF$  di ciascun carro analizzato ed  $N$  il numero di carri del campione.

Inserendo i dati ottenuti dal campione nell'equazione, si ottiene un valore di  $\sigma$  pari a 3,40.

Noti i due parametri, è possibile calcolare il valore di  $f(t)$  al variare del tempo.

Integrando  $f(t)$  nell'intervallo  $(0; t_p)$ , come descritto nel par. 4.5, si ottiene il valore della funzione di probabilità cumulata  $F(t_p)$ , ovvero la probabilità che si verifichi un guasto in un periodo di tempo di durata  $t_p$ .

Dal valore di  $F(t_p)$ , si deduce  $R(t_p)$  come suo complemento a 1 e, infine, si calcola il valore del tasso di guasto  $\lambda(t_p)$  come rapporto tra la funzione di densità di probabilità e la funzione di affidabilità.

In Figura 5.1; 5.2 e 5.3 sono riportati gli andamenti delle funzioni definite.

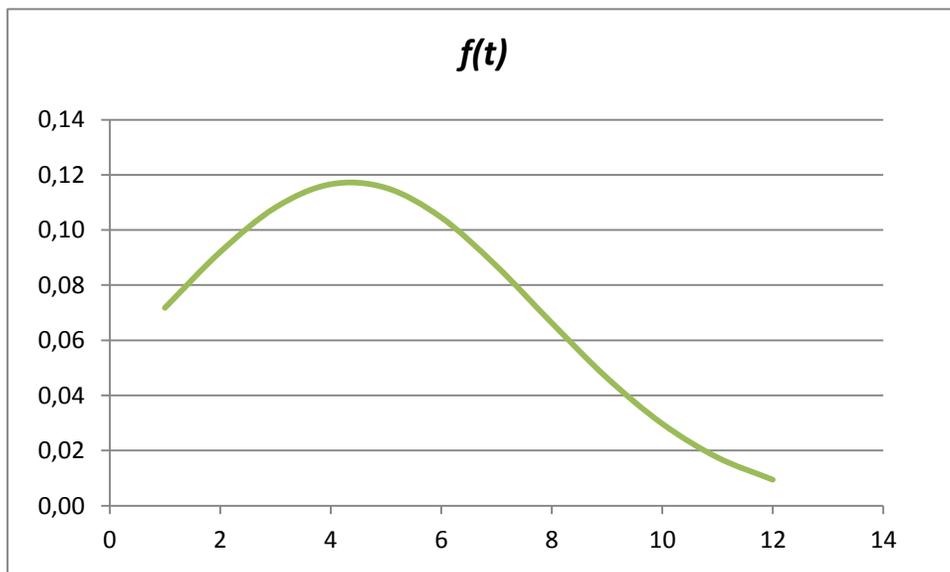


Figura 5.1: Andamento di  $f(t)$ , calcolata utilizzando i valori di  $\mu$  e  $\sigma$  relativi al cliente sul quale si sta tarando il modello

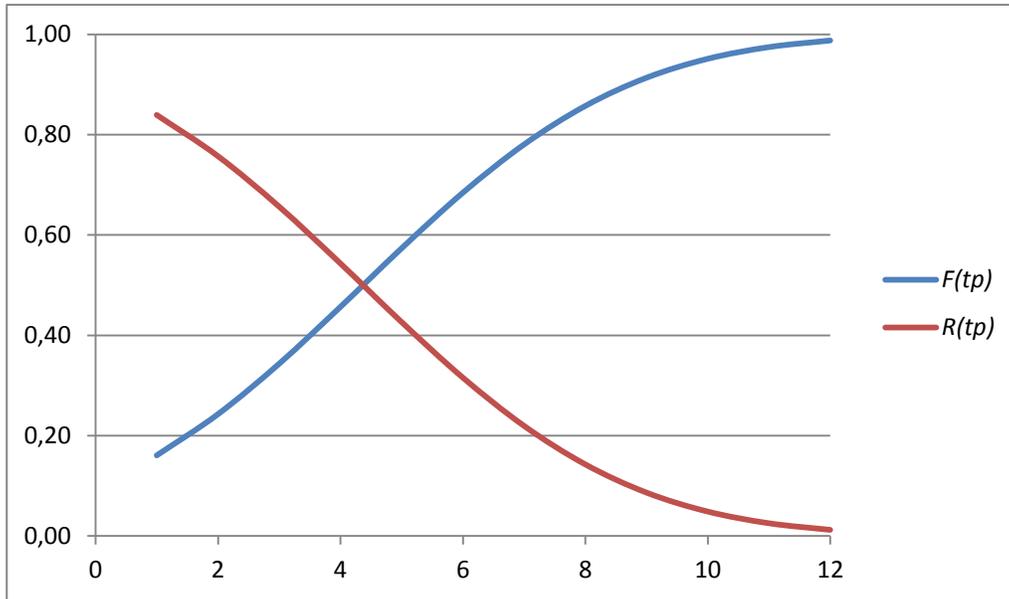


Figura 5.2: Andamenti di  $R(t_p)$  e  $F(t_p)$ , calcolate integrando  $f(t)$

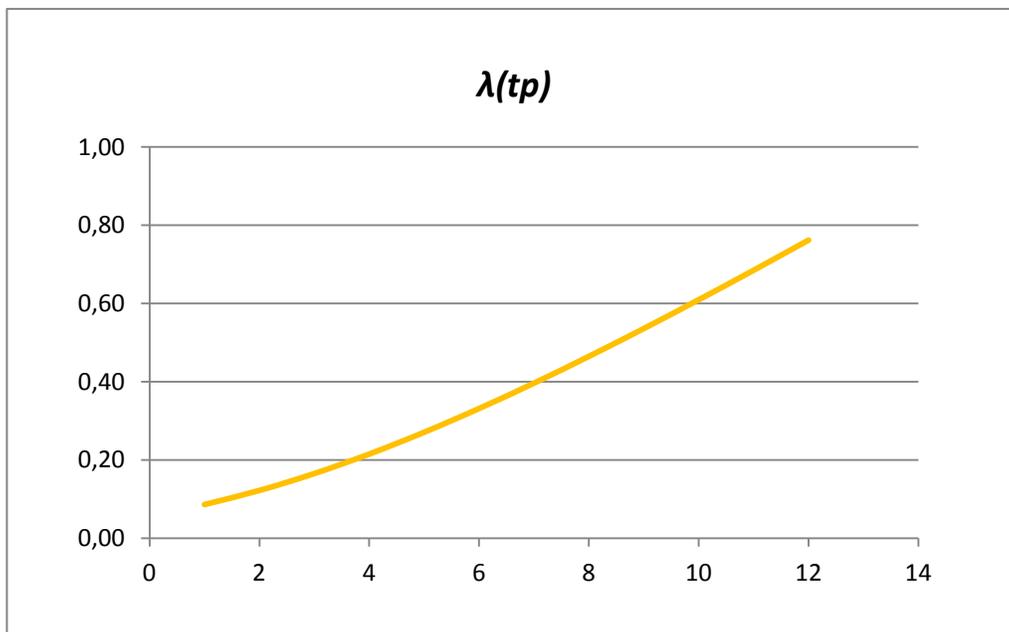


Figura 5.3: Andamento del tasso di guasto  $\lambda$  nel caso in esame, calcolato a partire da  $f(t)$  e  $R(t_p)$

Una volta definite tutte le grandezze affidabilistiche, è possibile calcolare il numero di guasti atteso nel periodo in esame, e quindi definire la funzione di costo  $C_c$  che, sommata a  $C_p$ , fornisce il valore di  $CUA$ , costo totale atteso.

A questo punto, minimizzando  $CUA$ , si ottiene il valore del tempo di intervallo ottimo.

Perché il modello si possa ritenere affidabile, il valore di  $t_p$  ottenuto dovrebbe corrispondere ad una percorrenza chilometrica di circa 35 mila chilometri.

Si riportano in Tabella 5.5 i valori dei parametri utilizzati e i risultati ottenuti, mentre il grafico in Figura 5.4 mostra gli andamenti delle funzioni di costo.

$\mu$	4.37	
$\sigma$	3.40	
$f(t)$	0.115	
$R(t_p)$	0.57	
$\lambda(t_p)$	0.202	1/mese
$F(t_p)$	0.43	
$CUA(t_p)$	1098	€/mese
$t_p$	3.8	mesi
km/mese	8785	
km corrispondenti	32947	

Tabella 5.5: Valori dei parametri utilizzati e risultati ottenuti dalla taratura del modello

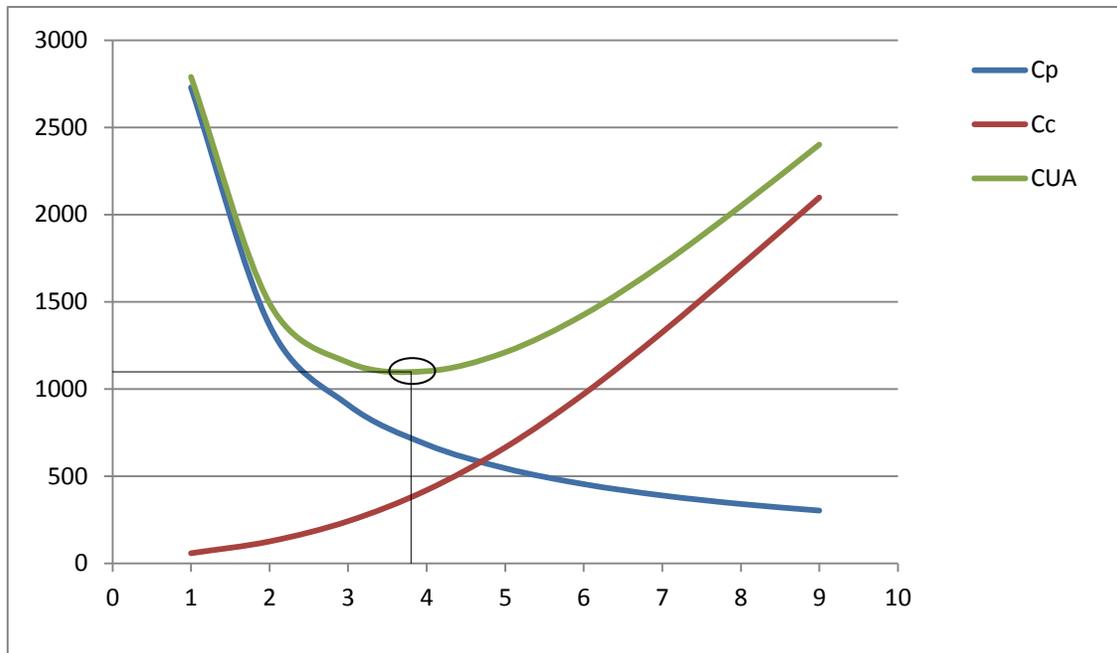


Figura 5.4: Andamento delle funzioni di costo calcolate per il cliente in esame. Si evidenzia il minimo della curva CUA, cui corrisponde il valore di  $t_p$  ottimale

Come riportato in Tabella 5.5 e come si nota dal grafico in Figura 5.4, il tempo ottimo, pari approssimativamente a 3 mesi e mezzo, corrisponde ad una percorrenza chilometrica di circa 33'000 km: il risultato ottenuto è quindi coerente con quanto previsto dal cliente e accertato come ottimo.

Si può dunque concludere che il modello implementato fornisce risultati affidabili per quanto concerne un unico carro.

Tutte le considerazioni fatte finora, infatti, sono relative a carri singoli, non a treni interi.

Nella pratica, tuttavia, il cliente considerato effettua la manutenzione su navette complete, che vengono fermate e lavorate tutte in una volta (quando possibile). Occorre dunque aggiungere alcuni parametri al modello, per poter definire con maggior precisione il contesto in cui avviene la manutenzione.

Andranno poi modificati i costi, in modo da tenere conto di tutti i carri che vengono lavorati.

### 5.3 *Modello per treno completo: struttura*

Per far sì che il modello sia il più possibile aderente alla realtà, si deve tenere conto anche del fatto che, per poter effettuare un intervento, è necessario che ci siano spazio e tempo disponibili, ovvero che ci siano dei binari dove i carri possano essere ricoverati e che sia possibile fermare un treno per il tempo necessario alla manutenzione.

Si deve inoltre considerare, come accennato, che la manutenzione viene effettuata su treno completo e non su singolo carro, fatto che porta diverse conseguenze: in base a quanto i carri sono tra loro omogenei, infatti, l'usura dei loro componenti sarà più o meno simile, dunque potrebbe accadere che non tutti i carri del treno abbiano effettivamente necessità di essere mantenuti.

Inoltre, non sempre il tempo disponibile è tale da permettere la lavorazione di tutti i carri che la necessiterebbero.

Per tenere conto di tutte queste cose, i diversi costi vengono resi dipendenti dal numero di carri effettivamente lavorati durante un singolo intervento di manutenzione: in base al tempo disponibile, al numero di operatori, al numero di carri componenti il treno e alla percentuale di omogeneità, infatti, tale numero varia.

Instaurando una relazione tra tutti questi fattori, è possibile adattare il modello alla situazione specifica che si vuole indagare, semplicemente variando i parametri in ingresso.

Poiché l'obiettivo di questa prima applicazione è la taratura del modello, i parametri sopra descritti vengono definiti in base a quanto effettivamente avviene per il cliente che si sta considerando, individuando dei valori numerici che rappresentino ciascuno dei seguenti elementi:

- tempo disponibile;
- numero di carri componenti i treni;
- percentuale di omogeneità, ovvero quanti dei carri componenti il treno si trovano effettivamente in condizioni di usura tali da necessitare manutenzione;
- numero di operatori disponibili.

Per definire il valore da attribuire a ciascun parametro, è stato osservato un campione di navette su cui è stata effettuata manutenzione preventiva.

Per ogni treno, si è preso in considerazione il tempo medio impiegato per gli interventi, il numero di carri di cui è composto, il numero di carri effettivamente lavorati, il tipo di soles montato da ciascun carro.

Quindi, si sono fatte delle considerazioni che hanno portato alla definizione dei parametri secondo quanto segue:

- il tempo disponibile per la lavorazione è stato valutato come media della durata degli interventi: se è stato impiegato un certo tempo, significa che c'era la possibilità concreta di impiegarlo;
- il numero di carri componenti il treno è stato valutato come media dei carri inseriti nelle varie navette;
- la percentuale di omogeneità è stata valutata sia in base al numero di carri con stesso tipo di soles presenti, sia in base al numero di carri lavorati per ogni treno: si è infatti assunto che i carri lavorati siano tra loro simili dal punto di vista dell'usura, se vengono mantenuti nello stesso momento;
- il numero di operatori viene desunto dal numero di carri lavorati di volta in volta: in base al numero di carri effettivamente lavorati e al tempo che è stato impiegato, si valuta il numero di operatori necessario.

Infine, assumendo che, se i carri non vengono lavorati, è o perché non serve che lo siano, o perché non si ha il tempo necessario, si è definita una sorta di "intersezione" tra il tempo disponibile e la percentuale di omogeneità: il numero di carri lavorati dipende sia da quanti effettivamente necessitano lavorazione (funzione della percentuale di omogeneità), sia da quanto tempo e operatori sono disponibili. Se il tempo a disposizione è tale da permettere la lavorazione di più carri rispetto a quelli omogenei, cioè quelli che devono essere mantenuti, comunque verranno lavorati solo questi ultimi, per evitare sprechi di materiale (se si

sostituiscono le soles quando sono ancora lontane dal limite di usura, di fatto si sostituisce un pezzo ancora funzionante, sprecando del materiale).

Al contrario, se i carri che necessitano lavorazione sono più di quelli che il tempo a disposizione consente di lavorare, sarà proprio il tempo disponibile il parametro limitante, e si considererà lavorato solo il numero di carri concorde con quest'ultimo.

In base al numero di carri lavorati, come detto, varieranno i costi legati a preventiva, più specificamente quelli legati al numero di pezzi sostituiti, alle lavorazioni svolte e ai lavoratori coinvolti. I costi logistici, invece, restano invariati, perché non dipendono dal numero di carri. Si capisce il motivo pensando ad esempio ai costi di manovra: manovrare un carro solo o più carri contemporaneamente, richiede sempre lo stesso carico di lavoro, perché i carri vengono spostati insieme. Il fatto che questo tipo di costi rimanga fisso, determina una riduzione del costo a carro, se si effettua manutenzione su treni completi. Prendendo sempre ad esempio la manovra, lavorando i carri singolarmente si dovrebbe pagare il prezzo corrispondente per ogni carro, mentre, lavorando il treno, si paga una sola manovra per più vagoni.

Si potrebbe quindi ipotizzare che programmare la manutenzione su navette sia più conveniente che farlo su carri singoli; tale ipotesi verrà verificata in base ai risultati forniti dal modello.

Per quanto riguarda i costi legati agli eventuali interventi correttivi, si prevede un aumento anche in questo caso. Essendo maggiore il numero di carri considerato, infatti, sarà maggiore anche il numero di guasti atteso nel periodo di osservazione. Per tenere conto di questa variazione, il numero di guasti  $N_c$  viene moltiplicato per il numero di carri componenti il treno.

#### 5.4 Taratura su treno completo

Fatte tutte queste precisazioni, si può procedere con la taratura del modello modificato. Come già accennato, i parametri per la definizione del numero di carri lavorati sono stati definiti sulla base dell'osservazione di quanto avviene nella pratica. Si è riscontrato che, in media, vengono lavorati circa due terzi dei carri totali, e che il treno non viene fermato per più di un giorno. Si riportano in Tabella 5.6 i valori dei vari parametri, definiti nel caso del cliente considerato.

n carri treno	15	
% omogeneità	0.7	
n carri da lavorare	11	
t di sosta	24	h
t a disposizione	8	h
h di lavoro/giorno	8	
t lavoraz	2	h/carro
n carri con op singolo	4	
n op disponibili	6	
n carri lavorabili	12	
n carri lavorati	11	

Tabella 5.6: Valori dei parametri definiti per la taratura del modello nel caso di manutenzione effettuata su treno completo

Adattando i costi nel modo descritto e ripetendo il processo seguito per la taratura su carro singolo, si ottengono i risultati riportati in Tabella 5.7 e in Figura 5.5.

totali a intervento		
Cp	14130 €	
	1285 €/carro	
Cc	4746 €	
tp	3.40	mesi
CUA	7108 €/mese	
km/mese	8785	
km corrispondenti	29842	

Tabella 5.7: Risultati ottenuti dalla taratura del modello nel caso di manutenzione effettuata su treno completo

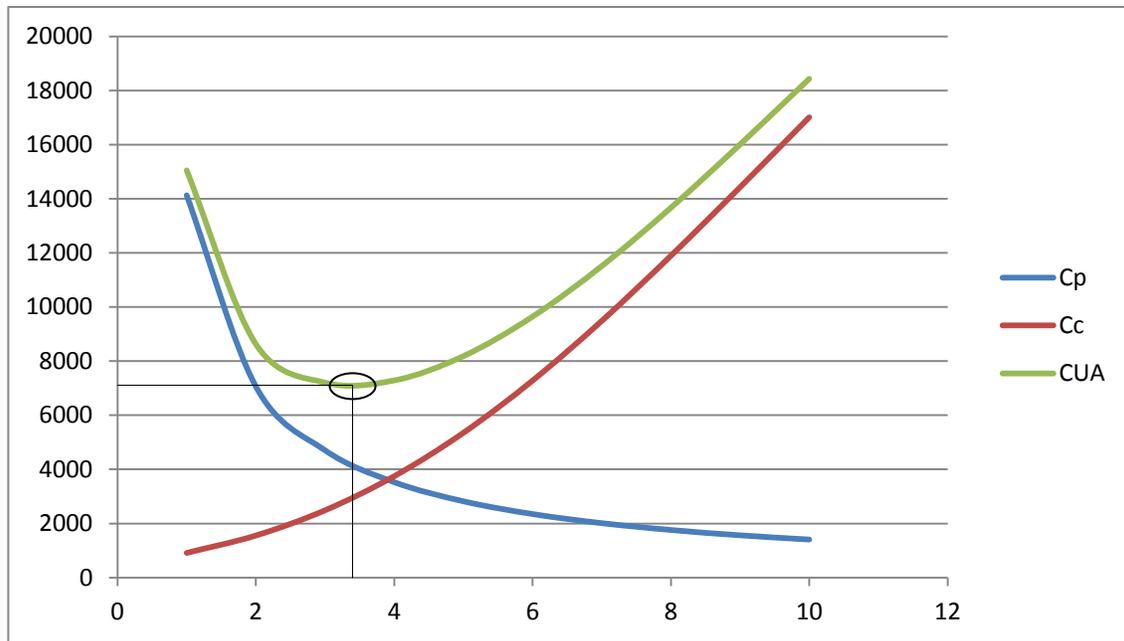


Figura 5.5: Andamento delle funzioni di costo valutate considerando la manutenzione applicata a treno completo; si nota uno spostamento verso sinistra del  $t_p$  ottimo

Dividendo il costo totale relativo ad un intervento di preventiva per il numero di carri lavorati, si ottiene il costo medio per carro (1'285 €). Confrontando tale valore con il costo della manutenzione effettuata su carro singolo (2'630 €), individuato nel paragrafo precedente, si ha la conferma del fatto che è più conveniente attuare la manutenzione su navette. Una differenza di costo così ampia è dovuta al fatto che i costi maggiori sono quelli fissi: mantenendo più carri insieme, questi ultimi vengono suddivisi tra tutti i carri, quindi in qualche modo "assorbiti".

Si nota inoltre che i costi relativi a correttiva aumentano maggiormente rispetto a quelli di preventiva: di conseguenza, il tempo di intervallo ottimo diminuisce rispetto a quello rilevato nel caso di carro singolo.

Il valore di percorrenza da interporre tra gli interventi, tuttavia, rimane coerente con quello utilizzato dal cliente: si può affermare che il processo di taratura fornisce un esito positivo.

E' dunque possibile procedere con l'applicazione del modello per la programmazione della manutenzione preventiva, ove non ancora avviata.

## Capitolo 6

### Applicazione del modello

Poiché la taratura ha fornito buoni risultati, si procede con l'applicazione del modello ad un cliente che non effettua manutenzione preventiva, per definire un possibile programma di interventi.

Il cliente su cui si vuole applicare il modello ha traffici molto intensi: i treni che ha a disposizione percorrono molti chilometri al mese, più di quelli percorsi dal cliente cui ci si è riferiti per la taratura.

Si è scelto questo soggetto in quanto i carri ad esso in dotazione sono soggetti ad etichettature per suole freno con frequenza maggiore rispetto ad altri tipi di guasto: con l'introduzione di un programma di manutenzione preventiva, dunque, si potrebbero ridurre gli interventi correttivi relativi a questo tipo di avaria.

#### *6.1 Valutazione dei costi*

Per quanto riguarda la valutazione dei costi di manutenzione correttiva, si procede come si è fatto per la taratura: i valori delle varie voci di costo vengono attribuiti sulla base delle tariffe applicate dalle officine. In particolare, essendo alcuni prezzi variabili da un ente con l'altro, ci si è riferiti a quelli applicati dall'officina cui il cliente in questione ricorre più spesso.

Dall'analisi svolta, si sono ricavati i costi specifici e i conseguenti costi totali, riportati in Tabella 6.1. Per il calcolo, si sono mantenute le ipotesi che vengano sostituite tutte le suole del carro, che siano necessari almeno due operatori per effettuare la lavorazione e che il tempo

necessario alla rimessa in esercizio del carro sia pari a 3 giorni (quest'ultimo valore è stato stabilito sulla base dello storico dei guasti).

c op	32 €/h
c suole	30 €/pezzo
c manovra	130 €/manovra
c sosta	8 €/ora
c fermo	33 €/h

C ric	960 €
C op	512 €
C sosta	600 €
C manovra	130 €
C trasferta	120 €
C extra	124 €
C scarico	30 €
C fermo	2376 €
C prova freno	50 €

*Tabella 6.1: Costi specifici e totali relativi al cliente di riferimento per l'applicazione del modello*

Sommando le diverse voci di costo, si ottiene il totale per intervento correttivo ( $C_c$ ), pari a 4902 €.

Il discorso risulta più complesso per quanto riguarda i costi legati alla manutenzione preventiva. Non essendo infatti la manutenzione già in atto, non è possibile riferirsi a dei dati esistenti ma, essendo lo scopo dell'applicazione proprio la definizione di un programma di manutenzione, tali dati devono essere ipotizzati.

Vengono quindi definiti diversi scenari, per ciascuno dei quali si ipotizzano diverse condizioni di intervento, relative alle possibili strategie adottabili. Per ciascuno scenario, quindi, si valutano i costi associati: le condizioni che forniscono il costo minore, saranno quelle cui si farà riferimento per la definizione del programma manutentivo.

## **6.2 Definizione delle condizioni di manutenzione**

Come descritto in precedenza, il modello tiene conto del contesto in cui la manutenzione si realizza. Occorre quindi anzitutto definire tale contesto: è meglio applicare la manutenzione a carro singolo o a treno completo? Nel secondo caso, conviene lavorare tutti i carri del treno in un'unica volta, o spezzare la lavorazione, fermando il treno più volte di seguito ma per minor tempo o utilizzando meno lavoratori?

Per rispondere a queste domande, si effettua una valutazione dei costi associati ad ogni scenario.

Nello specifico, si ipotizza il numero di carri da lavorare ad ogni intervento, quindi si deducono il tempo e la manodopera necessari, e si valutano i costi conseguenti. Si confrontano poi i costi ottenuti in corrispondenza di ogni caso, e si valuta quale sia la situazione per la quale il costo associato è minore.

Per la definizione del numero di carri manutenendi, anzitutto si sceglie il numero di carri di cui deve comporsi ogni treno; viene poi definita la percentuale di omogeneità, sulla base delle caratteristiche dei carri in dotazione al cliente.

Si pone il numero di carri per treno pari a 15, quindi si ipotizzano diverse soluzioni di lavorazione: per ogni quantità di carri lavorati alla volta, si definiscono tempi e manodopera necessari, quindi i relativi costi.

Il confronto viene poi eseguito calcolando il costo totale per mantenere il treno. Se cioè vengono lavorati 3 carri alla volta, sarà necessario fermare il treno 5 volte per controllare tutti i carri. Di conseguenza, il costo di ogni intervento sarà relativamente basso, ma il costo totale deriverà dalla somma dei costi di ogni singolo intervento.

Si riportano in Tabella 6.2 gli scenari di intervento ipotizzati; in particolare, per ogni diversa quantità di carri lavorata, si riportano il tempo necessario alla lavorazione di quei carri, il costo

a intervento, il numero di interventi totale e il costo totale della manutenzione preventiva (prodotto tra il numero di interventi e il costo a intervento).

Nel caso in cui i carri lavorati in una volta siano più della metà di 15, il costo totale è calcolato sommando al costo a intervento il costo a carro singolo, moltiplicato per il numero di carri che manca per raggiungere la quota di 15.

	da lavorare	lavorati	n op	t necessario (giorni)	Cp (€/int)	n interventi	Cp tot (€)
<b>variando giorni</b>	15	4	2	1	4926	4	19704
		6	2	1.5	7202	3	21606
		8	2	2	9478	2	18956
		10	2	2.5	11754	2	23508
		12	2	3	14030	2	19700
		14	2	3.5	16306	2	18196
		15	2	4	17622	1	17622
<b>variando n op</b>	15	8	4	1	9278	2	18556
		12	6	1	13630	2	19300
		15	8	1	17022	1	17022
<b>entrambi</b>	15	12	4	1.5	13730	2	19400
		15	6	1.5	17378	1	17378

Tabella 6.2: Parametri e costi relativi ai diversi scenari di manutenzione ipotizzati. Al variare del numero di carri che si vuole lavorare, sono riportati il numero di operatori e il tempo necessari allo scopo. A ciascuno scenario è inoltre abbinato il costo relativo all'intervento di manutenzione preventiva, secondo le condizioni previste

Si sono distinti tre gruppi di scenari : nel primo varia solo il numero di giorni, nel secondo solo il numero di operatori, nel terzo vengono variati entrambi.

Si nota che i costi aumentano maggiormente incrementando il numero di giorni di sosta che non il numero di operatori al lavoro sui carri. E' dunque preferibile, ove possibile, adottare questa soluzione.

Si nota inoltre che, in tutti e tre i gruppi, il costo minore si ha lavorando tutti i carri in una volta sola.

Il costo minore in assoluto, invece, si ottiene lavorando tutti i carri in una volta, con 8 operatori in contemporanea.

Il tempo di ottimo per la manutenzione preventiva verrà quindi ricercato utilizzando come parametri in ingresso al modello le condizioni così stabilite.

E' da notare che il calcolo è stato fatto considerando di lavorare tutti i carri componenti il treno; può essere però che non tutti i carri necessitino di essere mantenuti, in quanto non è detto che tutti i carri si usurino nello stesso modo (dipende molto dalle caratteristiche proprie di ciascuno, soprattutto dal tipo di soles montato). Valutando il costo totale, in ogni caso, ci si pone nella situazione più sfavorevole, dunque si tiene conto del massimo costo riscontrabile.

Ripetendo il ragionamento sull'omogeneità già applicato nel caso della taratura, si può introdurre il parametro % *omg* (percentuale di omogeneità), sulla base del numero di carri con le stesse caratteristiche presenti nella flotta. Nel caso in esame, si può porre la percentuale pari a 0.8, in quanto circa l'80% dei carri noleggiati all'azienda considerata sono equipaggiati con soles in ghisa. Si ipotizza quindi che la maggior parte dei carri arrivi al momento della manutenzione in condizioni di usura simili.

Riassumendo, le condizioni di manutenzione definite sono riportate in Tabella 6.3:

n carri treno	15	
% omogeneità	0.8	
n carri da lavorare	12	
t sosta	24	h
t a disposizione	8	h
t lavoraz	2	h/carro
n carri con op singolo	4	
n op disponibili	6	
n carri lavorabili	12	
n carri lavorati	12	

*Tabella 6.3: Parametri in ingresso definiti per il cliente di riferimento per l'applicazione del modello*

Il tempo a disposizione è posto pari a 8 ore, in quanto tale è la durata di una giornata lavorativa. Anche se al termine delle 8 ore i carri sono pronti per la rimessa in esercizio, quindi, non potranno essere spostati fino al giorno successivo. Per questo motivo, il tempo a disposizione differisce dal tempo di sosta.

I costi totali relativi alla manutenzione preventiva, calcolati utilizzando i parametri sopra definiti, sono invece visibili in Tabella 6.4.

C ric	11520 €
C misura sale	240 €
C lubrifica	360 €
C op	1536 €
C prova freno	600 €
Csosta	200 €
Cmanovra	130 €
Ctrasferta	120 €
Cextra	124 €
Cprova freno	50 €

*Tabella 6.4: Costi totali relativi alla manutenzione preventiva da effettuarsi sul cliente in esame*

Il costo totale a intervento ( $C_p$ ) risultante dalla somma dei costi di cui sopra è pari a 14'880 €, che corrispondono a 1'240 € a carro.

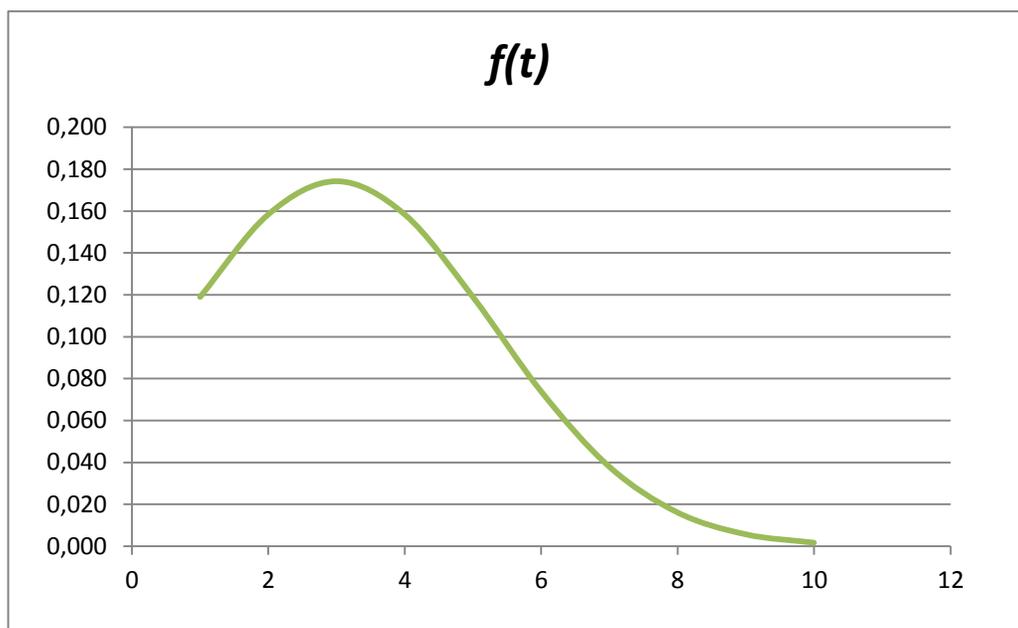
### **6.3 Calcolo del tempo ottimo di intervallo manutentivo**

Definite le condizioni di attuazione della manutenzione, si passa alla valutazione della parte probabilistica del problema, ovvero il numero di guasti atteso.

Si calcola anzitutto la funzione di densità di probabilità  $f(t)$ : come visto in precedenza, si ricavano media e varianza di tale funzione, che assume sempre la forma di funzione normale, con riferimento allo storico dei guasti, ottenendo in questo caso  $\mu = 3$  e  $\sigma = 2,29$ .

Si nota che  $MTTF$  è minore rispetto al caso precedente: ci si attende un tasso di guasto maggiore, quindi anche una maggiore probabilità di guasto.

Calcolando le grandezze affidabilistiche secondo quanto detto al par 4.5 e confrontando gli andamenti delle curve relative (Figure 6.1, 6.2 e 6.3) con quelli individuati nel caso utilizzato per la taratura, si nota che  $\lambda(t)$  ha effettivamente una crescita più rapida e raggiunge valori maggiori.



*Figura 6.1: Andamento di  $f(t)$ , calcolata con i valori di  $\mu$  e  $\sigma$  relativi al cliente cui si sta applicando il modello*

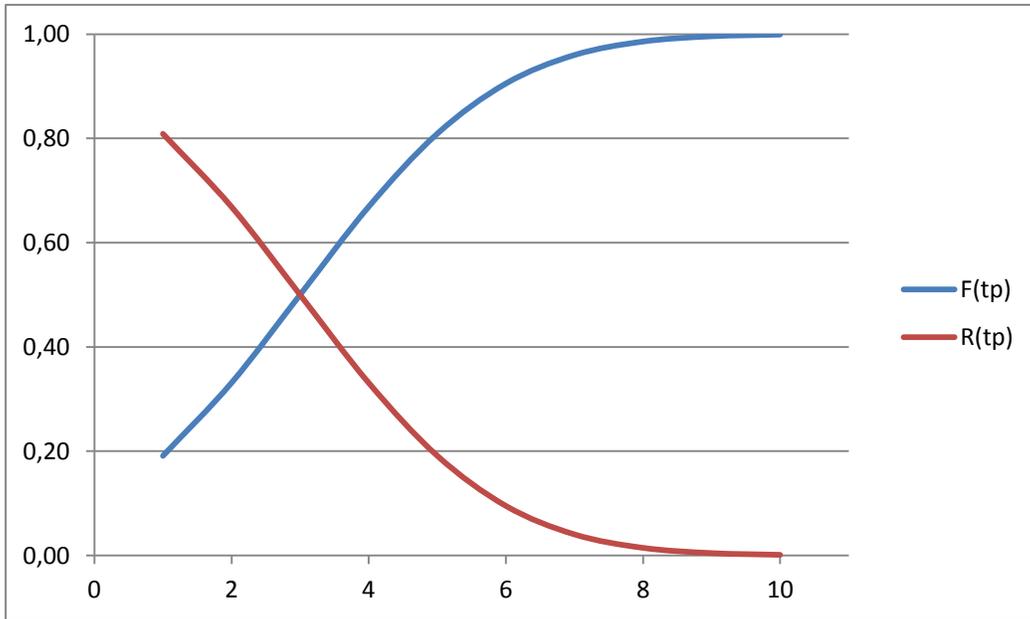


Figura 6.2: Andamento di  $F(tp)$  e  $R(tp)$ , calcolate integrando  $f(t)$

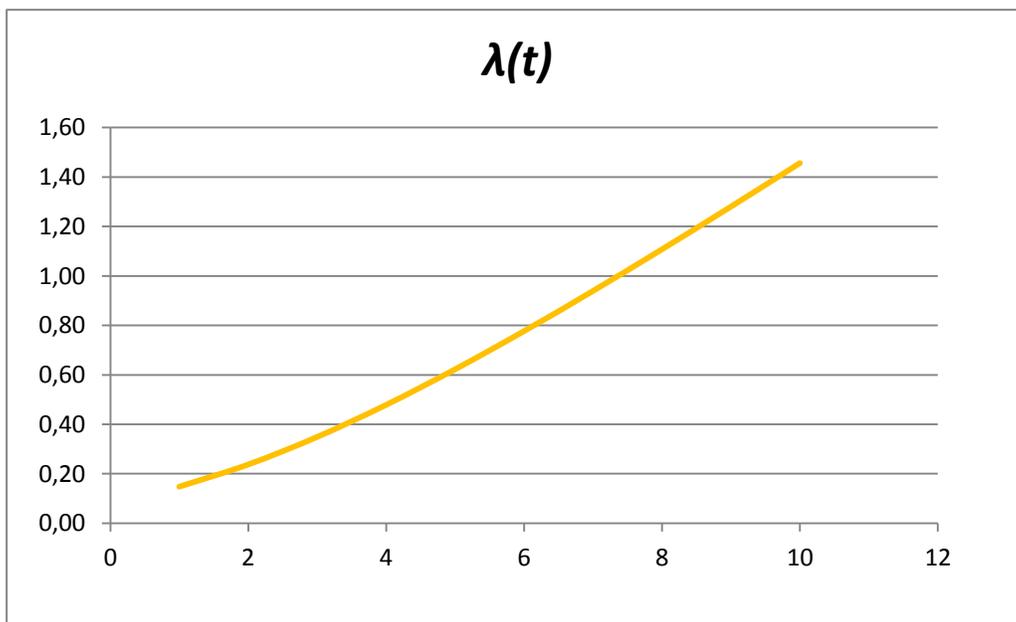


Figura 6.3: Andamento del tasso di guasto  $\lambda(t)$ ; si nota che la funzione cresce in modo più rapido rispetto al caso precedente

Definite anche le curve affidabilistiche, si procede con il calcolo del tempo di intervallo ottimo, seguendo lo stesso procedimento utilizzato per tarare il modello.

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 6.4 e in Figura 6.4.

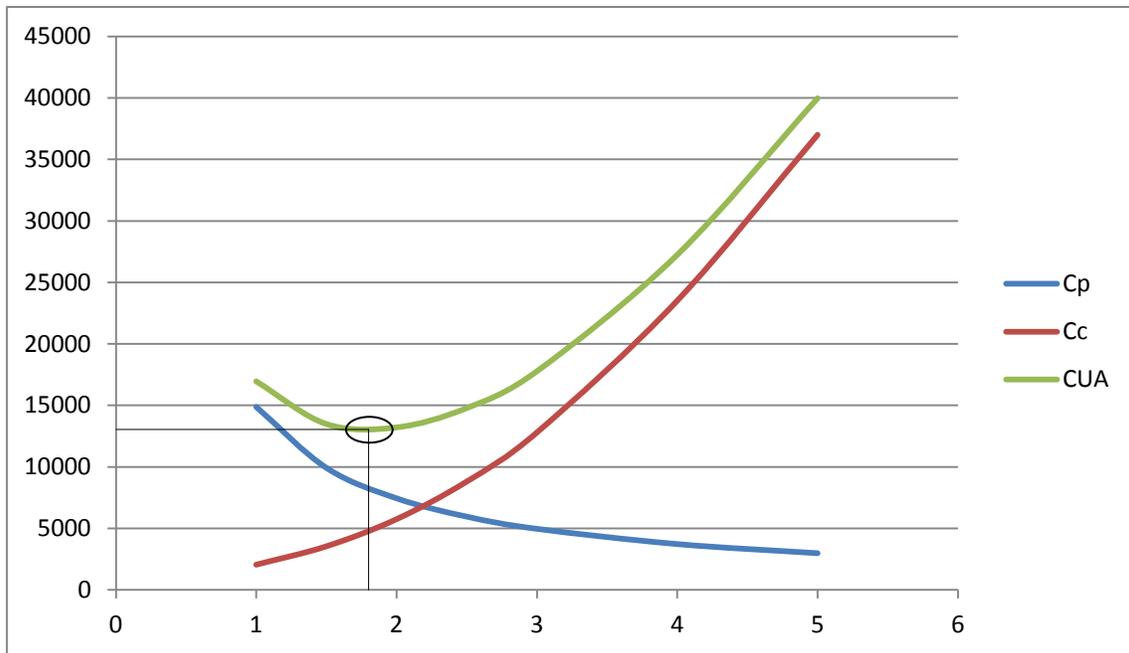
tp	1.80	mesi
CUA	13055	€/mese
km/mese	11433	
km corrispondenti	20627	

*Tabella 6.5: Risultati ottenuti dall'applicazione del modello al cliente in esame*

In Tabella 6.5, invece, si riportano i valori assunti dalle varie grandezze affidabilistiche, in corrispondenza del tp individuato.

$f(tp)$	0.152	
$F(tp)$	0.30	
$R(tp)$	0.70	
$\lambda(tp)$	0.22	1/mesi

*Tabella 6.6: Valori delle grandezze affidabilistiche calcolate in corrispondenza del tp ottimo*



*Figura 6.4: Andamento delle curve di costo calcolate per il cliente su cui si sta applicando il modello. Si nota che  $C_c$  cresce molto più velocemente rispetto al caso precedente: ciò è dovuto alla più elevata probabilità di guasto associata al cliente*

Si nota che, rispetto a quanto accadeva per il cliente sul quale è stato tarato il modello, il tempo di intervallo ottimo è minore e il costo totale molto maggiore.

Questo dipende dal fatto che la probabilità di guasto, in questo caso, è maggiore, dunque si prevede di avere un maggior numero di avarie; di conseguenza, il tempo di intervallo che minimizza i costi sarà minore.

In conclusione, il programma manutentivo ottimale per il cliente considerato si può riassumere nei seguenti punti:

- manutenzione effettuata su treni da 15 carri, con l'obiettivo di lavorarne almeno l'80% ogni volta;
- intervallo tra due interventi successivi pari a 20'000 km circa;
- costo atteso pari a circa 13'000 €/mese.



*Figura 6.5: schema del programma manutentivo definito per il cliente in questione, sulla base dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello*

Applicando la manutenzione secondo questo piano, si auspica di ridurre il numero di guasti, e quindi il numero di interventi correttivi. Di conseguenza, si avrà anche una riduzione dei costi associati alla manutenzione.

Se, una volta in opera, il programma di manutenzione si rivelasse non applicabile nel modo desiderato, per motivi legati a tempo, spazi o personale disponibile, sarebbe opportuno modificare le condizioni di intervento ipotizzate, quindi riapplicare il modello. Sulla base dei risultati che si otterrebbero in questo modo, quindi, valutare se e quali modifiche siano da apportare alla pianificazione sopra descritta.

## Conclusioni e possibili ulteriori sviluppi

Nella presente trattazione si è cercato, partendo da un problema molto pratico, di trovare una soluzione ottimale, analizzandolo dal punto di vista analitico. Si è dunque modellizzato, in maniera semplice, il contesto di studio, con l'attenzione a non renderlo avulso da quella che è la realtà dei fatti, ma mantenendolo il più possibile aderente a quello che avviene nel pratico.

La questione della manutenzione è un problema attuale, rilevante sia dal punto di vista della sicurezza che da quello economico.

Si è visto come un elemento che sembrerebbe banale, come la durata del ciclo manutentivo, richieda invece delle riflessioni e degli studi di una certa entità per essere stabilito in modo ottimale.

Il modello implementato offre la possibilità di stimare tale intervallo in un modo relativamente semplice: sono richieste analisi di dati e di costo, ma una volta noti i parametri richiesti, il calcolo di  $t_p$  viene svolto in maniera rapida.

Per accertare la validità del modello, occorrerebbe monitorare i treni cui è applicato il programma manutentivo che ne consegue per almeno un anno. Quindi, analizzando l'andamento dei guasti, l'effettivo metodo di realizzazione della manutenzione e i costi associati, valutare se il piano manutentivo identificato abbia effettivamente portato dei giovamenti, sia dal punto di vista della riduzione dei guasti, sia dal punto di vista economico.

Va inoltre sottolineato che il modello tiene conto solo dell'elemento suola, nello specifico suola in ghisa.

Si potrebbe quindi ampliare il discorso, eseguendo una valutazione che riguardi anche le altre tipologie di suole, o addirittura gli altri elementi usurabili, come le sale montate, e l'interazione tra di essi, permettendo di analizzare il problema in modo ancora più preciso.

Sarebbe interessante, inoltre, approfondire il discorso sulla percentuale di omogeneità: se infatti non tutti i carri vengono lavorati, quelli che non sono stati messi a nuovo avranno tempi di usura diversi rispetto agli altri. Questo potrebbe portare alla necessità di scartare quei carri nel tempo che intercorre tra gli interventi preventivi.

Tale aspetto non è stato indagato, però è un elemento che potrebbe disturbare il buon svolgimento del programma manutentivo, quindi da tenere in conto in possibili ulteriori sviluppi.

E' da notare, inoltre, la rilevanza assunta da un altro elemento, all'apparenza banale, come il numero di carri lavorati per intervento. Si è visto infatti che il costo manutentivo varia di molto al variare di questo fattore.

Di conseguenza, emerge l'importanza del contesto in cui si realizza la manutenzione, contesto che, negli studi cui si è fatto riferimento durante lo svolgimento della tesi, non è stato preso in considerazione.

Gli autori di tali studi, infatti, si sono concentrati esclusivamente su elementi tecnici, sviluppando modelli che ne descrivessero l'usura. Tali modelli, però, rimasti privi di un'applicazione pratica, risultano non sufficienti a garantire la buona riuscita di un programma manutentivo.

Da questo, si deduce l'importanza di calare nel reale quanto teorizzato dal punto di vista analitico, per evitare di realizzare modelli che risultino inapplicabili, e quindi, inutili.

# Bibliografia

- [1] F. Garetti, M. Macchi, A. C. Marquez: *Modelli di ottimizzazione dei costi di manutenzione*, Politecnico di Milano, 2012
- [2] V. Tertan, F. Sgarbossa: *Manutenzione preventiva ferroviaria in assenza di dati a rottura: applicazione al caso Sistemi Territoriali S.p.A.*, Università degli studi di Padova, 2016
- [3] E.H. Aghezzaf, M.A. Jamali, D. Ait-Kadi: *An integrated production and preventive maintenance planning model*, European Journal of Operational Research 181 (2007) 679–685, ELSEVIER, 2007
- [4] L. Furlanetto, M. Garetti, M. Macchi: *Principi generali di gestione della manutenzione*, FrancoAngeli, Milano, 2006
- [5] UNI 10147: 2013: *Termini aggiuntivi alla UNI EN 13306 e definizioni*
- [6] M. Aimar, A. Somà: *Study of an onboard wired-wireless health monitoring system equipped with power save algorithm for freight railway wagons*, Politecnico di Torino, 2018
- [7] M. Aimar, A. Somà, A. Zanardelli, *Dati sperimentali misurati con On-Board Unit per il monitoraggio delle condizioni dei carri merci*, Ingegneria Ferroviaria n.7-8, CIFI, 2017
- [8] T. Vernersson, R. Lundén, *Wear of brake blocks for in-service conditions - Influence of the level of modelling*, Wear314(2014)125–131, ELSEVIER, 2013
- [9] T. Miyauchi, J. Nakayama, N. Fujiwara, K. Shimoda, S. Nakazawa, S. Fukagai: *Friction and wear performance of nickel and molybdenum-reduction cast iron composite brake blocks including ceramic foams*, Wear 302 (2013) 1436–1443, ELSEVIER, 2012
- [10] T. Vernersson: *Temperatures at railway tread braking. Part 2: calibration and numerical examples*, Proc. IMechE Vol. 221, IMechE, 2007

- [11] C. Ferrer, M. Pascual, D. Busquets, E. Rayón: *Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique*, *Wear* 268 (2010) 784–789, ELSEVIER, 2009
- [12] S. Abbasi, S. Teimourimanesh, T. Vernersson, U. Sellgren, U. Olofsson, R. Lundén: *Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material*, *Wear* 314(2014)171–180, ELSEVIER, 2013
- [13] S. Teimourimanesh, R. Lundén, T. Vernersson: *Braking Capacity of Railway Wheels – State-of-the-art Survey*, 16th International Wheelset Congress (IWC16), Cape Town (RSA) conference paper, ResearchGate, 2010
- [14] J. Oertli, P. Hübner: *Risanamento acustico del trasporto merci su ferrovia – Stato dell’arte*, CER - UIC, 2006
- [15] *Europe Train: project presentation*, UIC, 2009
- [16] S. Ierace, *Affidabilità, manutenibilità e disponibilità*, slides del corso

# Ringraziamenti

Con questo lavoro di tesi si conclude la mia carriera universitaria, e con essa un'ampia fase della mia vita. Il ciclo di studi è concluso, mi preparo all'ingresso nel mondo del lavoro, nella vita adulta.

Guardare indietro mi fa sembrare incredibile aver fatto davvero tutte le cose che ho fatto! E mi fa ricordare una volta di più che il merito dei miei successi non è solo mio.

Per questo motivo, non posso tagliare il traguardo senza ringraziare chi mi ci ha accompagnato, passo dopo passo.

Il primo grazie va alla mia famiglia, mamma, papà, Andrea e Marco, che ci sono da sempre e che per primi hanno contribuito alla mia crescita, costruendo le basi che mi hanno reso chi sono oggi, e che mi hanno sempre sostenuto nei momenti difficili.

Insieme a loro, non posso non citare gli zii, le zie, le nonne Carla e Paola, i cugini Martina, Davide, Anna, Luca e Alessandro, che sono stati i miei primi amici e compagni di giochi, e che sono tuttora importanti compagni di viaggio.

Un grande grazie va poi ai miei amici, in particolare Chiara, Luca, Rebecca, Valerio, Denny, Simone, Stefano e Beatrice, ai frequentatori dell'Oratorio di San Giorgio, alle compagne di squadra delle varie epoche e a tutti coloro che nel mio cammino sono stati educatori, insegnanti e punti di riferimento: la stima, la fiducia e l'affetto che hanno riposto e che ripongono in me sono stati indispensabili per arrivare fino a qui.

Giungendo ai tempi più recenti, ringrazio tantissimo i miei compagni del Poli: Matteo, Eleonora, Valentina e Matteo, con cui ho condiviso le fatiche dello studio e che mi hanno sempre spronato e dato la spinta quando rallentavo o proprio non ingranavo.

Un grazie anche ai compagni della triennale, anche se ultimamente ci siamo un po' persi di vista, in particolare Stefano e Chiara.

Infine, "last but not least", ringrazio il Professor Maja e tutti i membri dell'ufficio VTG Saronno, che mi hanno accolto e accompagnato durante gli 8 mesi di tirocinio .

In particolare ringrazio Jacopo, che mi ha seguito nello svolgimento della tesi, rispondendo con pazienza alle mie domande e aiutandomi a "sbloccare" la situazione quando si presentava qualche problema; Lorenzo, che pur non seguendomi direttamente è sempre intervenuto al momento giusto, dispensando consigli e dandomi fiducia quando ero in crisi; gli altri membri del CS: Andrea, Alessandro (e il suo amico Shimmns), Vania e Anna, che con la loro simpatia e disponibilità hanno reso piacevole e proficua la mia permanenza tra loro.