

PROPOSTA DI REVISIONE TARIFFARIA SULLA BASE DI UN MODELLO ECONOMETRICO E INGEGNERISTICO PER IL CALCOLO DEI COSTI DIRETTAMENTE LEGATI ALLA PRESTAZIONE DEL SERVIZIO FERROVIARIO

Questo documento, fornito ad ART nell'ambito dell'interlocuzione sull'aggiornamento del modello costi diretti, viene pubblicato sul sito di RFI in versione ostensibile.

Le tariffe riportate sono differenti da quelle inserite nella Proposta Tariffaria per il Periodo 2020-28 in quanto determinate precedentemente alla fissazione del quadro regolatorio di riferimento (Delibera ART 95/2023). Per tale motivo il documento rappresenta uno strumento di supporto alla comprensione delle logiche di modulazione della componente A. Per la definizione dell'ammontare della componente A si faccia invece riferimento alla Misura 7 della Delibera ART 95/2023.

INDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. GLOSSARIO | 4 |
| 2. INTRODUZIONE | 5 |
| 3. IL CONTESTO REGOLATORIO | 6 |
| 4. IL MODELLO ECONOMETRICO | 8 |
| 4.1 APPROCCIO METODOLOGICO | 9 |
| 4.2 COSTRUZIONE DEL DATASET | 11 |
| 4.2.1 Unità di rilevazione | 12 |
| 4.2.2 Costi di manutenzione input del modello | 14 |
| 4.2.3 Dati di traffico | 17 |
| 4.2.4 Caratteristiche infrastruttura | 18 |
| 4.3 DEFINIZIONE DEL MODELLO ECONOMETRICO | 25 |
| 4.3.1 Elasticità dei costi | 26 |
| 4.3.2 Costo marginale | 27 |
| 4.4 RISULTATI | 28 |
| 4.4.1 Manutenzione ordinaria | 31 |
| 4.4.2 Manutenzione straordinaria | 32 |
| 5. IL MODELLO INGEGNERISTICO | 36 |
| 5.1 APPROCCIO METODOLOGICO | 36 |
| 5.2 ANALISI PRELIMINARE DEI PARAMETRI DI MODULAZIONE | 37 |
| 5.3 ANALISI DEL TRAFFICO PER CARATTERISTICHE | 39 |
| 5.3.1 Velocità di marcia | 40 |
| 5.3.2 Massa totale | 40 |
| 5.3.3 Numero veicoli e assi | 41 |
| 5.3.4 Raggi di curvatura percorsi | 43 |
| 5.3.5 Pendenze affrontate | 44 |
| 5.3.6 Tipo di trazione | 45 |
| 5.3.7 Materiali rotabili | 47 |
| 5.4 ANALISI DEI MODELLI | 51 |
| 5.4.1 Il modello Svizzero | 52 |
| 5.4.2 Il modello Britannico | 56 |
| 5.4.3 Confronto tra modello Britannico e Svizzero | 56 |
| 5.4.4 Il modello di usura della linea di contatto | 61 |
| 5.4.5 Scelta dei modelli | 65 |
| 5.5 SCELTA DEI PARAMETRI DA UTILIZZARE | 66 |
| 5.5.1 Parametri di infrastruttura | 67 |
| 5.5.2 Parametri della traccia | 68 |
| 5.5.3 Parametri del materiale rotabile | 70 |
| 5.5.4 Riepilogo dei parametri di modulazione | 72 |
| 5.5.5 Rotabili innovativi a ridotta aggressività verso l'infrastruttura | 72 |
| 6. APPLICAZIONE DEL MODELLO E CALCOLO DELLE TARIFFE | 73 |
| 6.1 INTRODUZIONE AL MODELLO TARIFFARIO | 73 |
| 6.2 BASE COSTO: INPUT DA MODELLO ECONOMETRICO E ALLOCAZIONE | 74 |
| 6.3 MODELLO ARMAMENTO SEGNALAMENTO | 74 |
| 6.4 MODELLO FLAT SEGNALAMENTO | 80 |
| 6.5 MODELLO TRAZIONE ELETTRICA | 80 |
| 6.6 PROPOSTA TARIFFARIA | 81 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6.7 | DINAMICHE TEMPORALI DELLE TARIFFE | 82 |
| 7. | RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | 84 |
| 8. | APPENDICI | 85 |
| 8.1 | IL SISTEMA AZIENDALE IN.RETE | 85 |
| 8.2 | REVIEW MODELLI ECONOMETRICI | 87 |
| 8.3 | STIMA DEI COEFFICIENTI DEL MODELLO ECONOMETRICO | 91 |
| 8.4 | BENCHMARK RISULTATI MODELLO ECONOMETRICO | 92 |
| 8.5 | VELOCITÀ DI RIFERIMENTO DEL MODELLO | 93 |
| 8.6 | MODELLO DI POTENZA | 95 |
| 8.7 | MODELLO DI CURVATURA | 96 |
| 8.8 | INDICE DELLE FIGURE | 97 |
| 8.9 | INDICE DELLE TABELLE | 99 |

1. Glossario

| | |
|----------|--|
| ART | Autorità di Regolazione dei Trasporti |
| CATRIN | Cost Allocation of Transport Infrastructure Cost |
| ERTMS | European Rail Traffic Management System |
| FCL | Fascicolo Circolazione Linea |
| GI | Gestore dell'Infrastruttura |
| IRG–Rail | Independent Regulators' Group – Rail |
| MBS | Multibody Simulation (Simulazione multicorpo) |
| NWR | Normal Wear Rate (Tasso di consumo unitario della linea di contatto) |
| PIR | Prospetto Informativo di Rete |
| PMdA | Pacchetto Minimo di Accesso |
| RFI | Rete Ferroviaria Italiana S.p.A. |
| SCMT | Sistema Controllo Marcia Treno |
| SSC | Sistema Supporto alla Condotta |

2. Introduzione

La proposta di revisione tariffaria per il pedaggio di accesso all'Infrastruttura Ferroviaria Nazionale presentata nel presente documento è elaborata in coerenza con quanto previsto dal Regolamento europeo n. 909/2015 ed è sviluppata sulla base di un modello econometrico e di un modello ingegneristico.

L'obiettivo del modello econometrico è quello di stimare i costi direttamente legati alla prestazione del servizio ferroviario, individuando i corrispondenti costi marginali, che rappresentano la base per la determinazione della tariffa regolatoria. L'approccio seguito è del tipo c.d. top-down, a partire dalle caratteristiche (quantitative/qualitative) dei servizi di trasporto che circolano sull'IFN che contribuiscono in maniera più importante a spiegare la variabilità del costo economico connesso alla circolazione dei servizi stessi.

Il modello ingegneristico ha come obiettivo quello di disaggregare il danno relativo causato da diversi tipi di veicoli sull'infrastruttura della Rete Ferroviaria Italiana, nelle caratteristiche di traccia e percorso nelle quali sono effettivamente impiegati. La stima, che costituisce fattore di "attribuzione" del costo alle singole circolazioni, è quindi usata per modulare, sulla base delle caratteristiche specifiche di ciascun singolo treno, il costo marginale stimato dal Modello Econometrico (Wheat and Smith 2006).

Il presente Documento è organizzato nel seguente modo. Dopo una breve descrizione del contesto regolatorio, si fornisce una descrizione del modello econometrico e del modello ingegneristico implementati e dei risultati ottenuti.

3. Il contesto regolatorio

Il Modello Econometrico elaborato è funzionale alla determinazione dell'ammontare dei costi diretti, come definiti dalla Misura 59 della Delibera ART n. 96/2015, tenendo conto di quanto previsto a riguardo dall'art. 31 della Direttiva europea n. 34/2012, dall'art. 17 del d.lgs. n. 112/2015, che l'ha recepita, e dal Regolamento europeo n. 909/2015.

Il Modello Econometrico mira a stimare i costi direttamente legati alla prestazione del servizio ferroviario (c.d. "Costi Diretti") a partire dalle caratteristiche (quantitative/qualitative) dei servizi di trasporto che circolano sull'IFN che contribuiscono in maniera più efficace a spiegare la variabilità del costo economico connesso alla circolazione dei servizi stessi.

Con riferimento al PMdA, la Direttiva UE n. 34/2012, la legislazione nazionale di recepimento (in particolare, l'art. 17 d.lgs. n. 112/2015) e la Delibera ART n. 96/2015 hanno stabilito un principio di proporzionalità del canone da correlare al "costo direttamente legato alla prestazione del servizio ferroviario", nonché la possibilità di ricorrere, in aggiunta ai Costi Diretti, all'applicazione di coefficienti di maggiorazione, onde potervi includere anche tipologie di costo non direttamente legate alla prestazione.

Ai fini della definizione del canone del Pacchetto Minimo di Accesso, le due richiamate categorie di costi vengono rispettivamente schematizzate dalla suddetta Delibera in:

- Componente A, correlata al recupero dei Costi Diretti e modulata come tariffa in funzione di tre parametri di usura dell'infrastruttura individuati come significativi dall'ART (Misura 28 della Delibera);
- Componente B, orientata al recupero dei Costi totali pertinenti ed efficienti e differenziata in funzione dei "segmenti di mercato" con il metodo dei binomi, avendo riguardo alla sostenibilità per il mercato" (Misura 29 della Delibera).

In sede di costruzione dei Modelli, la componente oggetto di interesse è la Componente A, che ricomprende, come anticipato, i "costi direttamente legati alla prestazione del servizio ferroviario" attraverso l'applicazione delle norme dettate dal Regolamento UE 909/2015.

Tale Regolamento stabilisce che il GI dovrebbe essere autorizzato a "includere nel calcolo dei costi diretti soltanto i costi che, in base a prove obiettive e sostanziali, derivano direttamente dalla prestazione del servizio ferroviario".

Il Regolamento attribuisce altresì al GI il diritto di calcolare i costi diretti sulla base dei modelli econometrici o di ingegneria oppure di una combinazione di entrambi, in base alle migliori pratiche internazionali relative ai metodi e ai modelli di calcolo dei costi marginali dell'infrastruttura.

Gli articoli 3 e 4 del Regolamento distinguono dettagliatamente le componenti di costo che devono essere incluse tra i costi diretti e quelle che, invece, non sono ammissibili.

In particolare, a norma dell'art. 3, "i costi diretti relativi all'intera rete sono calcolati come la differenza tra, da un lato, i costi della prestazione dei servizi del pacchetto minimo di accesso e dell'accesso all'infrastruttura di collegamento agli impianti di servizio e, dall'altro, i costi non ammissibili di cui all'articolo 4".

I costi non ammissibili elencati dall'art. 4 vengono di seguito riportati:

- a) costi fissi relativi alla messa a disposizione di un tratto di linea che rimangono a carico del gestore dell'infrastruttura anche in assenza di movimenti di treni;

- b) costi che non si riferiscono a pagamenti effettuati dal gestore dell'infrastruttura. I costi o i centri di costo che non sono direttamente connessi alla prestazione del pacchetto minimo di accesso o all'accesso all'infrastruttura di collegamento agli impianti di servizio;
- c) costi di acquisto, vendita, smantellamento, decontaminazione, ricoltivazione o locazione di terreni o altre immobilizzazioni;
- d) costi generali per tutta la rete, compresi stipendi e pensioni;
- e) costi di finanziamento;
- f) costi relativi al progresso tecnologico o all'obsolescenza;
- g) costi delle immobilizzazioni immateriali;
- h) costi di sensori di terra, apparecchiature di comunicazione di terra e sistemi di segnalamento se non direttamente sostenuti in ragione della prestazione del servizio ferroviario;
- i) costi relativi all'informazione, alle apparecchiature di comunicazione non di terra o alle apparecchiature per le telecomunicazioni;
- j) costi relativi a singoli eventi di forza maggiore, incidenti o perturbazioni del servizio, fatto salvo quanto previsto dall'articolo 35 della direttiva 2012/34/UE;
- k) costi dei sistemi di alimentazione elettrica per la corrente di trazione se non direttamente sostenuti per la prestazione del servizio ferroviario. I costi diretti di prestazione di servizi ferroviari che non fanno uso di sistemi di alimentazione elettrica non includono i costi di utilizzo dei sistemi di alimentazione elettrica;
- l) costi relativi alla messa a disposizione delle informazioni di cui all'allegato II, punto 1, lettera f), della direttiva 2012/34/UE, purché non siano sostenuti per la prestazione del servizio ferroviario;
- m) costi amministrativi sostenuti per regimi di canoni differenziati di cui all'articolo 31, paragrafo 5, e all'articolo 32, paragrafo 4, della direttiva 2012/34/UE;
- n) gli ammortamenti che non sono determinati in base all'usura reale dell'infrastruttura imputabile alla prestazione del servizio ferroviario;
- o) la parte dei costi di manutenzione e di rinnovo delle infrastrutture civili che non è direttamente imputabile alla prestazione del servizio ferroviario.

4. Il Modello Econometrico

L'obiettivo del modello econometrico è quello di stimare i **costi direttamente legati alla prestazione del servizio ferroviario** seguendo un approccio c.d. top-down. L'approccio econometrico, che ha il vantaggio di basarsi su dati storici effettivi, si basa sul concetto di **costo marginale**.

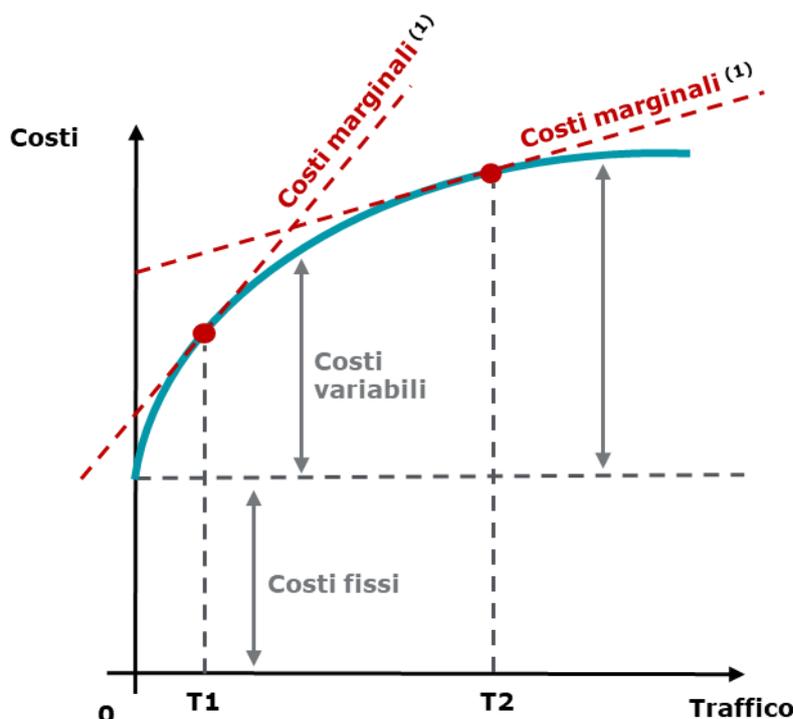


Figura 1 - I costi marginali

Il costo marginale può essere definito come il **costo** sostenuto dal GI **relativo ad una unità aggiuntiva di traffico**. L'approccio econometrico proposto per la stima dei costi marginali direttamente legati al traffico si basa sulla **modellizzazione della funzione di costo** coerente con la **teoria economica** della massimizzazione del profitto, secondo cui per un determinato livello di produzione e dei prezzi dei fattori produttivi l'impresa minimizza i costi. In sintesi, la **funzione di costo** può essere rappresentata con la seguente funzione generica:

$$C = f(q, x, z)$$

Dove:

- ✓ q è un vettore di variabili relative alle caratteristiche di traffico;
- ✓ x è un vettore di caratteristiche quantitative dell'infrastruttura;
- ✓ z è un vettore di indicatori, o variabili dummy, relativo a caratteristiche qualitative dell'infrastruttura.

La funzione di costo dipende quindi non solo dalle **variabili relative alle caratteristiche di traffico**, ma anche dalle variabili relative alle **caratteristiche dell'infrastruttura**, delle quali è necessario tenere debitamente in considerazione al fine di ottenere una stima corretta dei costi marginali.

Nella fase preliminare del lavoro, è stata effettuata una *literature review* per analizzare i possibili diversi modelli applicabili per la stima dei costi. Alla luce dell'analisi effettuata, ci si è principalmente focalizzati sui modelli

adottati nell'ambito del progetto CATRIN (Cost Allocation of TRansport INfrastructure cost). In Appendice B si riporta una breve review dei modelli adottati in differenti Paesi nell'ambito del progetto CATRIN e un'analisi di benchmark del caso italiano rispetto a tali Paesi.

4.1 Approccio metodologico

Il nostro approccio si è basato sulle seguenti fasi:



Nella fase di costruzione del dataset, è stato costruito il dataset integrato contenente la rilevazione dei costi, dei volumi di traffico, e di tecnologia e infrastruttura per ogni unità di rilevazione identificata nella tratta (o "sezione di linea omogenea") per il periodo temporale 2014-2018.

Nella fase di costruzione del modello econometrico, sono stati analizzati diversi modelli sulla base della prassi economica. Successivamente è stato evidenziato il razionale per la scelta del modello econometrico che si intende adottare.

Nella fase di analisi e discussione dei risultati, vengono discussi i risultati ottenuti e un'analisi di benchmark con i principali Paesi europei.

L'approccio metodologico seguito nel presente lavoro è perfettamente in linea con le indicazioni del "Charges Working Group" dell'Independent **Regulators' Group** – Rail (IRG–Rail), che definisce le seguenti linee guida nell'implementazione della metodologia econometrica per la determinazione dei costi diretti nel rispetto del Regolamento europeo n. 909/2015.

| Step | Aim | Description |
|------|--------------------------|---|
| 1 a | Collect data on costs | <ul style="list-style-type: none"> - Cost data on operation, maintenance and renewal costs - A preferred approach is to disaggregate these costs by type - Should be collected at the network section level, for at least one year - Identifiable fixed and non-eligible costs may be excluded from the cost base |
| 1 b | Collect data on traffic | <ul style="list-style-type: none"> - Should be collected at the same observation unit as costs, for the same period - Usually expressed in tonne-km or train-km and a preferred approach is to collect data on each traffic type |
| 1 c | Collect other data | <ul style="list-style-type: none"> - Collect data on infrastructure characteristics (e.g. number of tracks, type of rail, age of different components) at the same level as cost and traffic data - Additional data such as the different climates or regions can also be collected |
| 2 | Assemble datasets | <ul style="list-style-type: none"> - Data on costs, traffic and infrastructure characteristics should be merged into a single dataset to enable econometric estimations |
| 3 | Econometric estimation | <ul style="list-style-type: none"> - Estimate econometric models where the dependent variables are the types of costs, the variables of interest are the traffic types and control variables include for instance infrastructure characteristics, climate and region variables |
| 4a | Derive elasticity | <ul style="list-style-type: none"> - From the results of the econometric model, it is possible to estimate the elasticity of costs to traffic - The elasticity represents the percentage of costs that vary with the level of traffic. |
| 4b | Calculate marginal costs | <ul style="list-style-type: none"> - Marginal costs should then be calculated. They represent the costs per unit of traffic considered (e.g., per train-km or (gross)tonne-km) - If an elasticity has already been derived then the marginal costs may be calculated as elasticities times average costs |

Fonte: IRG-Rail. Guidelines to the calculation of direct costs in respect of implementing Regulation 2015-909. 2016.

Figura 2 - Linee guida nell'implementazione della metodologia econometrica per la determinazione dei costi diretti.

4.2 Costruzione del dataset

L'utilizzo del Modello Econometrico per la stima dei costi direttamente legati alla prestazione del servizio ferroviario ha richiesto la predisposizione di un database costruito ad-hoc. Nello specifico, tale dataset contiene la rilevazione **dei costi, dei volumi di traffico, e delle caratteristiche di tecnologia e infrastruttura** per ogni **unità di rilevazione** impiegata nell'implementazione del modello, e per ogni periodo temporale oggetto di analisi.

L'infrastruttura è caratterizzata in riferimento a dati sulle tratte, sulle sottostazioni, sulle località, sulle opere d'arte (ponti, gallerie). Nello specifico, si è proceduto nel seguente modo:

1. Raccolta dei dati sui costi.
2. Raccolta dei dati sul traffico.
3. Raccolta di altri dati utili (tecnologia, infrastruttura, etc).
4. Integrazione dei dati sui costi, sul traffico, sulle caratteristiche di tecnologia e infrastruttura, per ogni unità di rilevazione impiegata nell'implementazione del modello, cioè per ogni tratta.

Di seguito si riporta una sintesi dei dati utilizzati, distinti per tipologia e fonti:

| | TIPOLOGIA | FONTE | DETTAGLI | OSSERVAZIONI |
|---|---|---|--|--------------|
| 1 | Dati di COSTO | Sistema IN.RETE | Contengono i costi relativi alla manutenzione correttiva e alla manutenzione ciclica, rilevati per tratte, località e sottostazioni, e in particolare relative a: <ul style="list-style-type: none"> • Armamento binari • Armamento deviatori • Segnalamento • Energia sottostazioni • Energia linee di contatto | 65.865 |
| 2 | Dati di INFRASTRUTTURA | Sistema IN.RETE | Dati di infrastruttura <ul style="list-style-type: none"> • Gallerie • Ponti • Intersezioni • Deviatori | 45.844 |
| 3 | Dati Fascicoli Circolazione Linee (FCL) | Sistema PIC (Piattaforma Integrata di Circolazione) | <ul style="list-style-type: none"> • Regime di esercizio • Tecnologia • Sagoma • Modulo • ... | 22.422 |
| 4 | Dati di TRAFFICO | Sistema PIC (Piattaforma Integrata di Circolazione) | <ul style="list-style-type: none"> • Data circolazione treno • Numero trasporto • Codice località origine/destinazione • Codice segmento di mercato • Codice tratta • Peso • Velocità commerciale/di marcia • Trazione/codice tipo trazione • Lunghezza composizione/numero carri | 347 Mln |

A seguito dell'integrazione dei dati sui costi, sul traffico, sulle caratteristiche di tecnologia e infrastruttura per ogni unità di rilevazione impiegata nell'implementazione del modello, il dataset consiste di circa **3000 tratte**, che rappresentano l'intera rete ferroviaria italiana. Tali tratte sono osservate nei **5 anni** dal 2014 al 2018 per un totale di circa 15000 **osservazioni** utilizzate per la stima. Le **variabili utilizzate** nella stima sono le seguenti: la variabile risposta è data dal **costo di manutenzione correttiva e preventiva (ciclica)** espresso in euro al livello dei prezzi 2019. Due specificazioni diverse del modello sono state implementate: nella prima la variabile di traffico è misurata in termini di **peso dei treni circolati (Ton)**, nella seconda è misurata in termini di **numero dei treni circolati**. In aggiunta alla variabile di traffico, il modello include come controllo le seguenti **variabili di infrastruttura e tecnologia** relative alla tratta: lunghezza della tratta; velocità massima della tratta; rapporto tra lunghezza e distanza della tratta; altitudine; dislivello tra inizio e fine tratta; percentuale di gallerie; percentuale di ponti; numero di deviatori; numero di intersezioni; dummies per tipo di linea (fondamentale, AV, complementare, nodi); dummy per presenza stazione; dummy per banalizzazione; dummies per tipologia di servizio (DC/DCO, DL, etc.); dummy per binario unico; dummies per tipo di blocco (BA/CC, BRA, etc.); dummy per tratta non elettrificata; dummy per tratta con elettrificazione con sistema 25 kV; dummies per

sistema di protezione marcia (ERTMS, SSC, etc); dummy per tipologia di sagoma (PC25, PC 80, etc). Sono infine incluse **dummies regionali** e **dummies annuali**, al fine di cogliere eventuali effetti territoriali a livello regionale e eventuali variazioni temporali.

Si forniscono di seguito alcuni esempi di attività svolta nella costruzione del dataset:

- Il numero di **tratte**, **località** e **sottostazioni** può variare nel corso degli anni. Inoltre, dato il parziale disallineamento su località e tratte tra i diversi sistemi utilizzati (IN.RETE, PIC) si è reso necessario un lavoro di **integrazione** al fine di risolvere tale disallineamento.
- Il dataset relativo ai **dati di traffico giornaliero** circolato su ogni tratta della rete (tipicamente in entrambi i sensi di marcia) ha richiesto l'elaborazione di circa **347 Mln di osservazioni**.
- Relativamente ai dati sulle **gallerie**, è stato definito e implementato un **algoritmo** per la gestione della presenza, in ogni singola tratta, di eventuali gallerie parallele nei due sensi di marcia. Senza questo algoritmo, avremmo avuto una sovrastima della percentuale di lunghezza tratta occupata da gallerie, e, nei casi limite, addirittura una percentuale maggiore del 100%.
- Ogni sottostazione elettrica alimenta in media 5,5 tratte. Per correlare il costo delle sottostazioni ai volumi di traffico è stato quindi necessario creare un'associazione tra le sottostazioni e le tratte. I dati grezzi disponibili prevedono infatti l'associazione di ogni sottostazione a una sola località o tratta «primaria».
- Al fine di associare ad ogni sottostazione tutte le località e le tratte è stato quindi definito e implementato un **complesso algoritmo** di associazione basato sul **principio c.d. «nearest neighbour»**, che associa ogni località e tratta ad un'unica sottostazione sulla base della **distanza geografica** (latitudine e longitudine). Il risultato dell'associazione ottenuta con l'applicazione di tale algoritmo ha portato all'associazione in media di circa 5,8 tratte per ogni sottostazione (media osservata pari a 6).

4.2.1 Unità di rilevazione

Per la stima del modello econometrico, l'**unità di analisi** della rete è stata identificata nella **tratta o «sezione di linea omogenea»**. Le tratte o «sezioni di linea omogenee» sono parti della rete ferroviaria, eventualmente di lunghezza diversa, solitamente di collegamento tra due località.

La figura sotto mostra, a titolo esemplificativo, le località, le tratte e le sottostazioni della **linea ferroviaria Ancona – Pescara**.

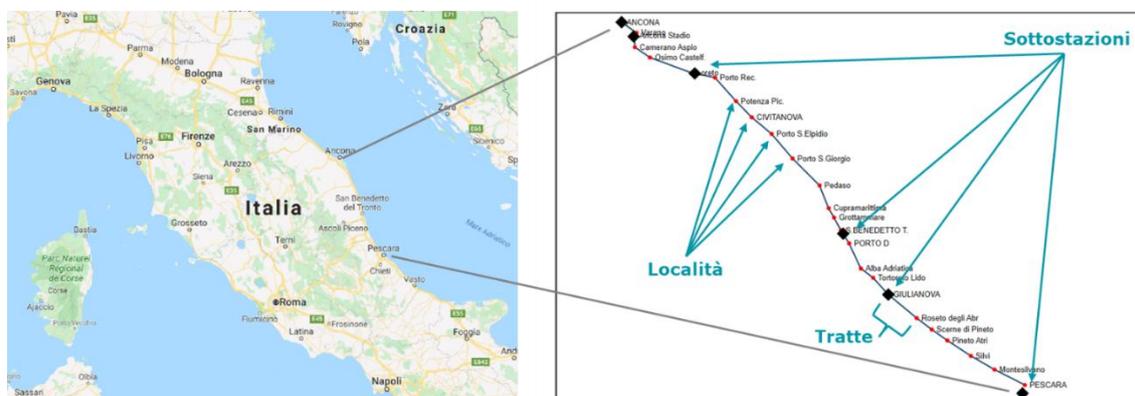


Figura 3 - Le località, le tratte e le sottostazioni della linea ferroviaria Ancona – Pescara

Si specifica che la tratta In.Rete può essere comprensiva di più tratte PIC, in quanto in genere esiste una maggiore disaggregazione per il modello rete PIC. Il modello rete PIC tiene infatti conto anche del senso di marcia (pari/dispari) e di ulteriori località non considerate nel modello InRete, che vengono utilizzate per tracciare in maniera più dettagliata l'orario e avere più punti di rilevazione per la circolazione. Nel modello In.Rete, che è organizzato al fine di gestire le attività manutentive, le località del modello contengono sempre dei deviatori, mentre invece quelle del modello PIC possono comprendere qualsiasi punto orario; questo tipo di topologia consente al modello In.Rete di avere i deviatori quasi completamente localizzati nelle località. Per maggiore chiarezza si veda ad esempio nelle figure successive la schematizzazione della tratta Firenze Santa Maria Novella – Dev. Estremo Firenze Statuto, in cui il modello PIC oltre a considerare tratte diverse i due sensi di marcia, contiene anche un punto orario intermedio (Firenze Statuto Int.).

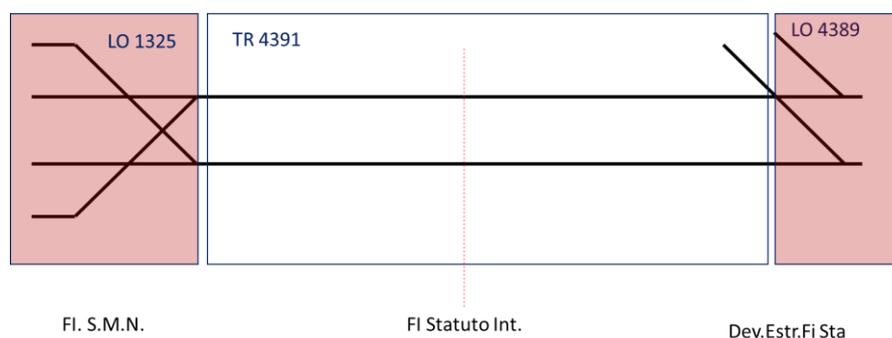


Figura 4 - Topologia modello in.Rete 2000 – Es. tratta Firenze Santa Maria Novella – Dev. Estremo Firenze Statuto

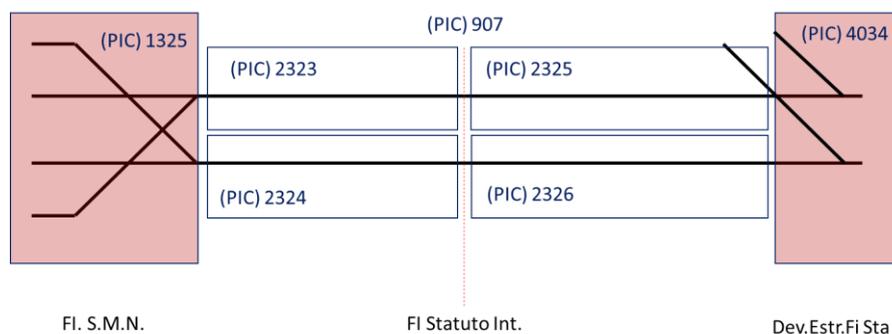


Figura 5 - Topologia modello PIC – Es. tratta Firenze Santa Maria Novella – Dev. Estremo Firenze Statuto

La sezione di linea omogenea, che costituisce l'unità di rilevazione, ha sempre traffico omogeneo, non essendovi punti intermedi in cui un treno possa entrare o uscire, operazione che nel modello In.Rete avviene sempre nelle località.

Per ciascuno dei cinque anni inclusi nel modello, il giorno di riferimento è il 31 dicembre. Nel caso in cui ci siano state delle modifiche al modello rete (es. aggiunta di tratte, inserimento o soppressione di località intermedie) all'interno dell'anno queste sono state ricondotte puntualmente al modello rete di fine anno.

Per la manutenzione straordinaria l'unità di rilevazione è più ampia rispetto alla manutenzione ordinaria, per cui non potendosi associare questo tipo di costo alla specifica tratta In.Rete, si è proceduto ad associare le rilevazioni di costo alle tratte commerciali.

4.2.2 Costi di manutenzione input del modello

Per definire il perimetro dei costi da utilizzare in input per il modello ci si è riferiti a quelli enunciati all'art.4 del regolamento: quelli dalla lettera a) alla lettera n) non sono stati posti come input del modello, come previsto dal regolamento stesso.

Per quanto riguarda la lettera o), che riferisce alla “*parte dei costi di manutenzione e di rinnovo delle infrastrutture civili che non è direttamente imputabile alla prestazione del servizio ferroviario*”, sono stati considerati imputabili i costi di tutta la manutenzione ordinaria, riferendosi alle seguenti tipologie di Ordini di Lavoro, riconducibili allo schema di politiche manutentive rappresentato in fig. 2:

- 100 Correttiva
- 211 Preventiva Ciclica Visite e ispezioni
- 212 Preventiva Ciclica Manutenzione
- 240 Preventiva Ciclica – Obblighi di legge
- 221 Preventiva On Condition Ispezioni
- 222 Preventiva On Condition Diagnostica
- 231 Preventiva-Predittiva da Ispezioni
- 232 Preventiva-Predittiva da Diagnostica
- 300 Migliorativa
- 400 Attività di produzione

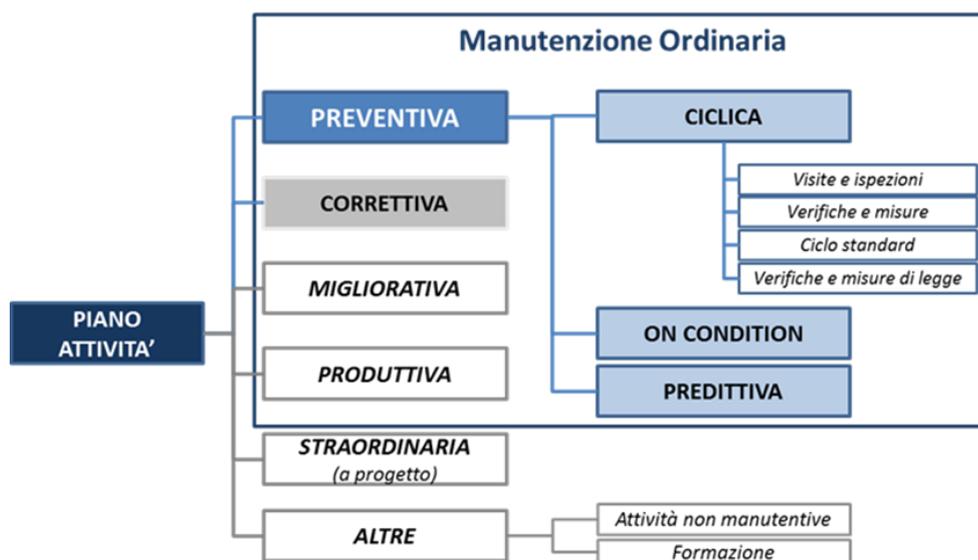


Figura 6 - Politiche manutentive di Rete Ferroviaria Italiana. Nel modello sono stati considerati come dati di input tutti gli ordini di lavoro della Manutenzione Ordinaria

Per meglio discriminare quali siano i costi connessi al passaggio del treno è stato introdotto, a seguito di valutazione di esperti del processo manutentivo, il concetto di “settori di specializzazione” degli asset, riconducibili alle 5 categorie di oggetti di cui alla precedente comunicazione (armamento, deviatoi, segnalamento, sottostazioni elettriche e linea di contatto). Nello specifico, tra i 5 settori principali di cui si compone l’infrastruttura, i dati di costo di 3 sono stati considerati oggetto di analisi, poiché posti in contatto più o meno diretto al passaggio del treno, e quindi inseriti come input del modello:

- **Armamento o sovrastruttura ferroviaria:** complesso di apparecchiature costituenti il binario (rotaie, traverse, organi di attacco, etc.), gli apparecchi del binario (scambi, intersezioni, dispositivi di dilatazione,

giunti, paraurti, etc.), la massicciata e tutto quanto occorra per l'assemblaggio, l'ancoraggio e la regolazione dei componenti dell'infrastruttura ferroviaria;

I dati relativi alla manutenzione per questo settore di specializzazione sono stati suddivisi in “**binario**” e “**deviatoi**” come già illustrato nella precedente comunicazione.

- **Apparati di segnalamento:** insieme degli impianti per il comando ed il controllo di sicurezza degli enti, utilizzati in linea e nelle località di servizio per la gestione della circolazione dei treni in sicurezza;
- **Trazione elettrica:** complesso di apparecchiature ed impianti destinato alla conversione, distribuzione e trasporto dell'energia elettrica per l'alimentazione dei mezzi di trazione (energia, alimentazione e linee di contatto);

I dati relativi alla manutenzione per questo settore di specializzazione sono stati suddivisi in “**Sottostazioni elettriche**” e “**linea di contatto**” come già illustrato nella precedente comunicazione.

I rimanenti due settori principali non sono stati considerati:

- **Opere civili:** complesso di opere costituenti il nastro stradale a sostegno e/o a protezione della sovrastruttura ferroviaria (rilevati/trincee, ponti/viadotti, gallerie, muri di sostegno, tombini, sottopassi, etc.);
- **Impianti di telecomunicazione:** insieme di apparecchiature destinate a supportare e trasmettere a distanza le varie tipologie di comunicazioni (telefoniche e dati).

Per quanto riguarda i *rinnovi* di cui al punto o), pur essendo esclusi dal perimetro dei costi alla base della Delibera ART n. 96/15, oltre che finanziati con strumenti diversi dal pedaggio (apposito Contratto di Programma – Parte Investimenti), è stato prodotto un modello econometrico parallelo per valutare la marginalità rispetto al traffico.

L'unità di rilevamento utilizzata per i costi nel “sistema InRete” è la così detta sede tecnica di primo livello del sistema InRete, ovvero località, tratte e sottostazioni.

Il livello di aggregazione dei costi utilizzato per le stime si riferisce alle tratte, che rappresentano l'unità di analisi della rete utilizzata per le stime del modello Econometrico.

Quindi, si riportano di seguito i criteri di allocazione utilizzati:

- per i costi relativi alle tratte non è stato necessario definire alcun criterio di allocazione, in quanto già rilevati per il medesimo livello di aggregazione nel “sistema InRete”;
- per i costi relativi alle località si è proceduto all'allocazione di questi ultimi alla tratta collegata alla località considerata. Qualora due o più tratte siano collegate ad una stessa località, i costi di quest'ultima sono stati ripartiti tra le diverse tratte a questa collegate.
- per i costi relativi alle sottostazioni si è proceduto a creare un'associazione tra le sottostazioni e le tratte. Nel sistema In.Rete i dati prevedono l'associazione di ogni sottostazione a una sola località o tratta «primaria». Al fine di associare ad ogni sottostazione le tratte alimentate è stato quindi definito e implementato un algoritmo di associazione basato sul principio c.d. «nearest neighbour», che associa ogni tratta ad un'unica sottostazione sulla base della distanza geografica (latitudine e longitudine). Ogni sottostazione elettrica alimenta in media 5,5 tratte. Il risultato dell'associazione ottenuta con l'applicazione di tale algoritmo ha portato all'associazione in media di circa 5,8 tratte per ogni sottostazione.

La seguente figura mostra la distribuzione dei costi relativi al 2018 per categoria di costo e sedi tecniche, cioè per località (LO), sottostazioni (SS) e tratte (TR).

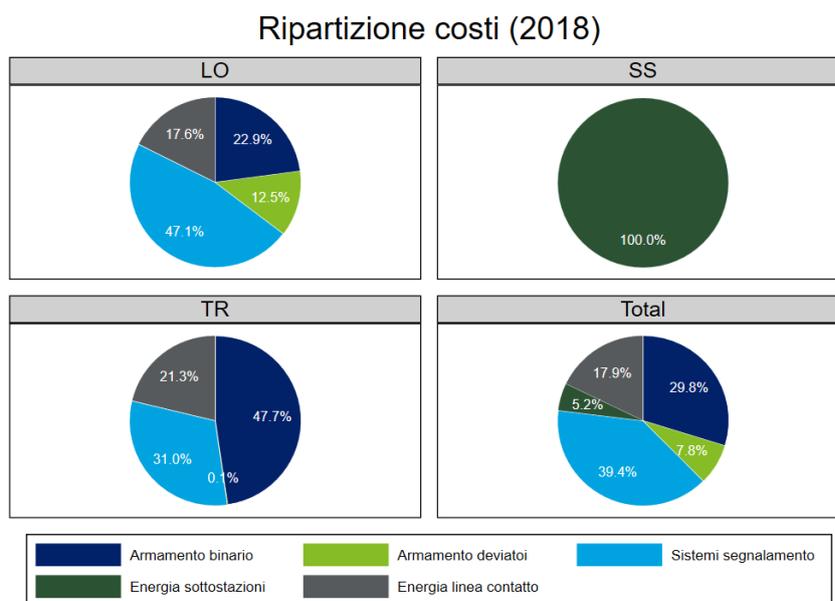


Figura 7. Distribuzione dei costi di manutenzione ordinaria relativi al 2018 per categoria di costo e sedi tecniche, cioè per località (LO), sottostazioni (SS) e tratte (TR)

Tabella 1 - Distribuzione dei costi di manutenzione ordinaria relativi al 2018 per categoria di costo e sedi tecniche, cioè per località (LO), sottostazioni (SS) e tratte (TR)

| Se.Te. | Categoria oggetti | Settore di specializzazione | | | | Totale 2018 (mln Euro) | |
|------------|-------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| | | Armamento | | Segnalamento | Trazione elettrica | | |
| | | Armamento - Binario | Armamento - Deviatoi | Sistemi di Segnalamento | Energia - Sottostazioni | | Energia - Linea di Contatto |
| LO | | 71,3 | 38,8 | 146,6 | - | 54,8 | 311,4 |
| TR | | 77,4 | 0,1 | 50,3 | - | 34,5 | 162,3 |
| SSE | | - | - | - | 25,9 | - | 25,9 |
| TOT | | 148,7 | 38,9 | 196,9 | 25,9 | 89,3 | 499,6 |

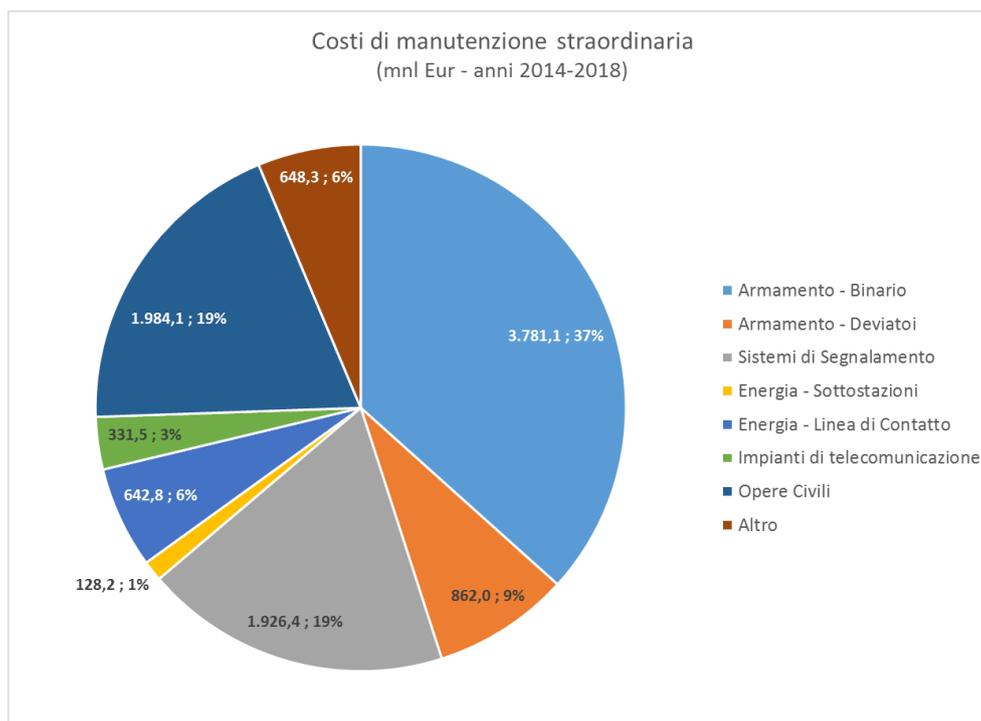


Figura 8. Distribuzione dei costi di manutenzione straordinaria relativi al periodo 2014-2018 per categoria di costo

Tabella 2 - Distribuzione dei costi di manutenzione straordinaria relativi al periodo 2014-2018 per categoria di costo

| | Armamento | | Segnalamento | Trazione elettrica | | Telecomunicazioni | OC | | Totale 2018 (mln Euro) |
|-------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------|--------------|------------------------|
| | Armamento - Binario | Armamento - Deviatoli | Sistemi di Segnalamento | Energia - Sottostazioni | Energia - Linea di Contatto | Impianti di telecomunicazione | Opere Civili | Altro | |
| 2014 | 437,1 | 153,8 | 208,7 | 19,0 | 69,7 | 40,3 | 198,9 | 73,0 | 1.200,6 |
| 2015 | 720,2 | 134,8 | 300,8 | 22,7 | 93,0 | 55,2 | 279,0 | 87,0 | 1.692,6 |
| 2016 | 835,5 | 159,2 | 391,0 | 23,1 | 130,8 | 68,0 | 389,0 | 127,9 | 2.124,4 |
| 2017 | 890,9 | 196,3 | 456,6 | 29,1 | 169,1 | 75,1 | 570,4 | 147,5 | 2.535,0 |
| 2018 | 897,5 | 218,0 | 569,3 | 34,3 | 180,2 | 92,9 | 546,7 | 212,9 | 2.751,8 |
| TOT. | 3.781,1 | 862,0 | 1.926,4 | 128,2 | 642,8 | 331,5 | 1.984,1 | 648,3 | 10.304,4 |

4.2.3 Dati di traffico

Il traffico è stato esaminato per ogni tratta, considerando ogni treno circolato per ciascun giorno dell'anno. Il singolo record comprende le seguenti caratteristiche:

- **Data_Treno** (Data di circolazione del treno)
- **Num_Trasporto** (è un codice di 6 cifre con cui viene identificata la traccia e comprende nelle ultime cifre il numero del treno, la prima cifra è sempre 1, le restanti 0)
- **Cod_Localita_Orig** (località Origine del treno – codice PIC)
- **Cod_Localita_Dest** (località Destino del treno – codice PIC)
- **Prg_Marcia** (Ordina le tratte PIC percorse dal treno)
- **Cod_Segmento_Mercato_Livello_1** (Segmento di mercato di 1° livello - come da Del. 96/15 – codice numerico, dato associato al solo 2018)

- **Cod_Segmento_Mercato_Livello_2** (Segmento di mercato di 2° livello come da Del. 96/15 – codice numerico, dato associato al solo 2018)
- **Cod_Tratta** (codice PIC della tratta percorsa)
- **Peso_Treno** (Massa totale del treno in t)
- **Velocita_Commerciale** (Velocità commerciale da Origine a Destinazione del treno)
- **Velocita_Marcia** (Velocità di marcia sulla singola tratta PIC, ricavata considerando la distanza tra le località estreme di tratta e il tempo in cui il treno è in moto)
- **Trazione** (Indica se la trazione è elettrica o no)
- **Cod_Tipo_Mezzo_Trazione** (è il codice del mezzo di trazione)
- **Lun_Composizione** (è la lunghezza del convoglio in metri)
- **Num_Veicoli_O_Carri** (è il numero di veicoli del treno)

4.2.4 Caratteristiche infrastruttura

Le caratteristiche dell'infrastruttura considerate nell'analisi sono desunte dai Fascicoli di Circolazione Linee; in particolare sono le seguenti:

- **blocco**: sistema di distanziamento presente sulla linea (tecnologia)
- **banalizzazione**: indica, per le linee a doppio binario, se la tecnologia consente di inoltrare i treni in ciascun senso di marcia su entrambi i binari
- **ripetizione segnale**: tipo di tecnologia per la ripetizione dei segnali in macchina
- **SCMT**: protezione della marcia del treno conseguita con sistema SCMT (Sistema Controllo Marcia Treno)
- **SSC**: protezione della marcia del treno conseguita con sistema SSC (Sistema Supporto alla condotta)
- **Velocità massima**: è quella consentita sulla tratta per i treni autorizzati per ciascuno dei ranghi (A,B,C, P)
- **Sistema di esercizio della linea**: tipo di organizzazione per la regolazione della circolazione (DC Dirigente Centrale, DCO Dirigente Centrale Operativo, DL Dirigenza Locale, DU Dirigente Unico)
- **Elettificazione tratta**: tratta elettrificata (E) o a trazione termica (D) in cui è assente la catenaria
- **Lunghezza tratta** in Km
- **rom bin**: Indica se la tratta PIC (cod pic) è un binario PARI (orientamento convenzionale Sud-Nord o Est-Ovest), DISPARI (orientamento convenzionale Nord-Sud od Ovest-Est) o unico (linee a semplice binario)
- **rom coer**: giurisdizione di Direzione Circolazione di competenza
- **rom dtp**: giurisdizione di Direzione Produzione di competenza
- **rom reg**: regione
- **rom tco**: indica la tratta Commerciale
- **rom reg**: concatena il tipo di blocco con la presenza di banalizzazione e la tipologia di tecnologia adottata (correnti fisse CF o correnti codificate CC)
- **rom ese**: concatena il tipo di esercizio con specifica sul tipo di telecomando in caso di DCO (CTC o SCC)
- **rom el**: tipo di elettificazione (tratte non elettrificate D, elettrificate a 3kV corrente continua T-E, o elettrificate a 25kV corrente alternata T-K25 tipica delle tratte AV)

- **rom sc**: sistema di controllo (ERTMS tipico delle tratte AV, SCMT sistema controllo marcia treno, SSC Sistema Supporto alla condotta)
- **rom tc**: tipo di codifica sagoma limite
- **rom pa**: categoria di peso assiale

Si riportano di seguito alcuni dati relativi alla variazione di alcune caratteristiche laddove sia ritenuta significativa:

Relativamente alla distribuzione di **elettificazione** e **numero binari** si osserva che mentre l'estensione delle linee elettrificate è cresciuta circa di 80 km (+0,6%), quella delle linee a doppio binario di circa 170 km (+1%).

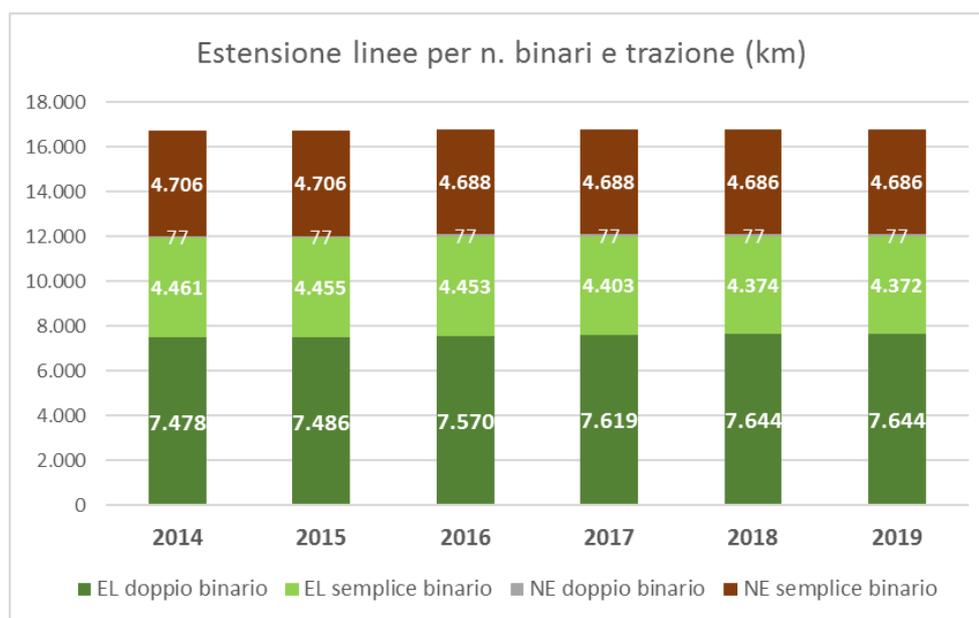


Figura 9. Estensione delle linee per elettrificazione e numero binari

Relativamente alla distribuzione del **sistema di esercizio** impiegato si osserva un progressivo e importante incremento delle linee esercite con telecomando (+11%) a scapito degli altri sistemi, in particolare della dirigenza centrale (-31%) e della dirigenza locale (-18%).

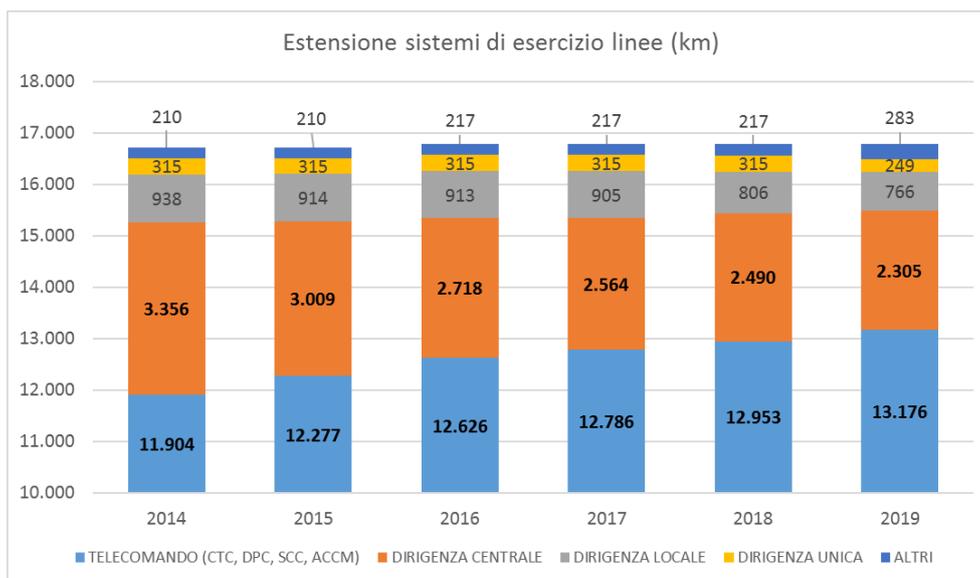


Figura 10. Estensione delle linee per sistema di esercizio

Relativamente alla distribuzione del **regime di circolazione** impiegato si osserva un incremento dell'ERTMS di 55 km (+8%), del blocco automatico di 110 km (+2%) e del blocco conta-assi di 180 km (+2%) a discapito dei regimi più obsoleti. All'interno del regime di blocco automatico si segnala un adeguamento delle linee alla banalizzazione.

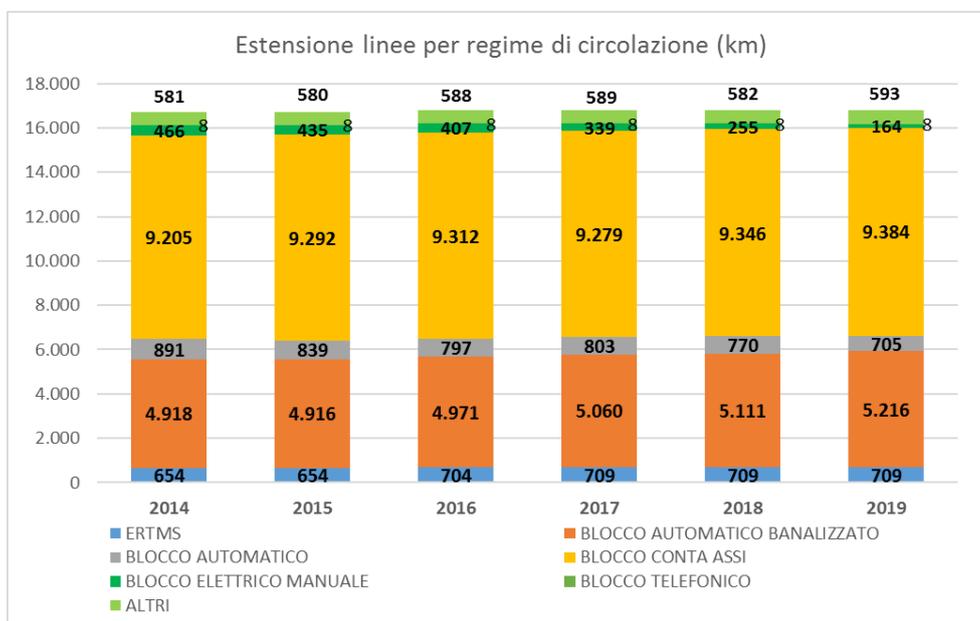


Figura 11. Estensione delle linee per regime di circolazione

Relativamente alla distribuzione del **sistema di controllo marcia** impiegato si osserva un incremento del SCMT di 755 km (+6%) a fronte del decremento del Sistema di Supporto alla Condotta (SSC) di 570 km (-14%); anche le linee con doppio attrezzaggio (SCMT-SSC) sono state progressivamente sostituite (-115 km) con SCMT (-60%).

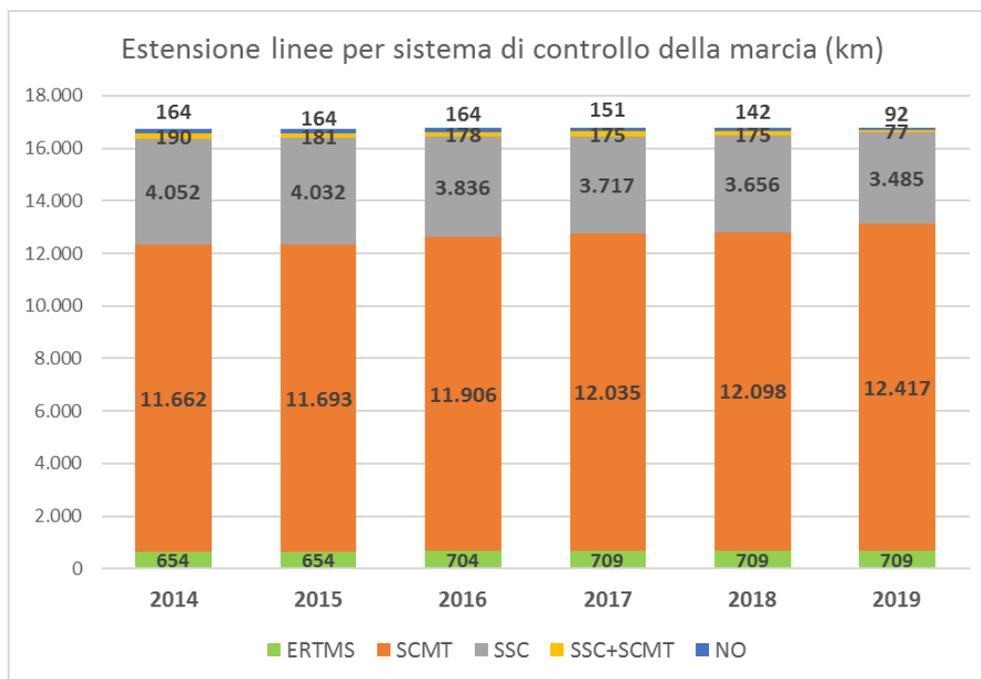


Figura 12. Estensione delle linee per sistema di controllo della marcia

Per quanto concerne la distribuzione degli **intervalli di velocità massima**, desunti dalla velocità massima relativa al rango più prestante presente sulla tratta, si osserva un decremento delle classi inferiori (<80 km/h - 3%, 80-120 0%, e 120-160 -1%) e un conseguente incremento delle classi con velocità superiori ai 160 km/h.

Complessivamente si registra un incremento della velocità media (pesata sulle estensioni di rete) pari a circa l'1%.

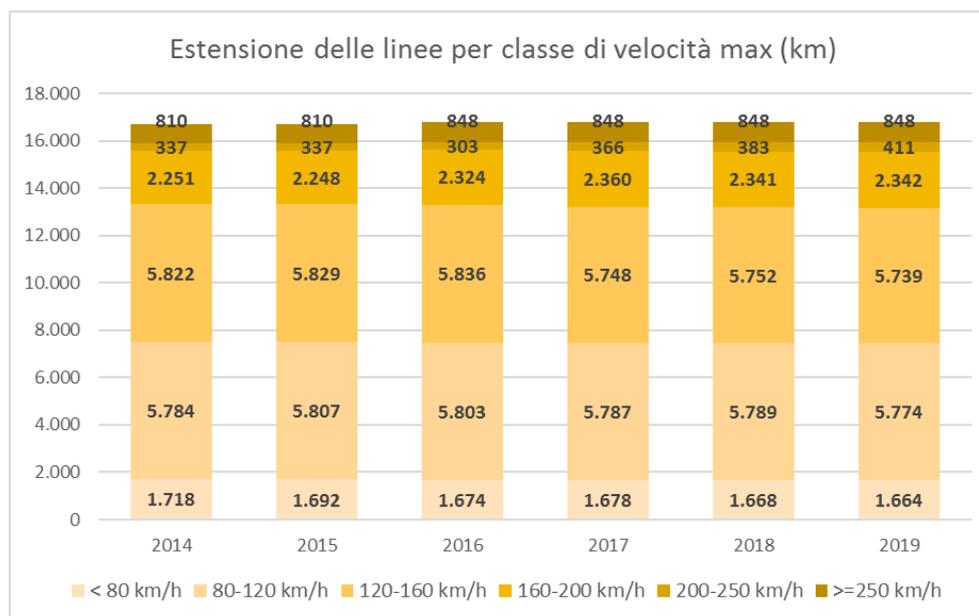


Figura 13. Estensione delle linee per sistema di controllo della marcia

Per quanto concerne l'estensione dei **carichi assiali ammessi**, si nota come siano ampiamente presenti solo due tipi di categorie (D4 e C3), comprese le relative limitazioni (D4L e C3L). Negli anni riportati si registra una sostanziale stabilità di tali classi, tuttavia è presente un miglioramento dovuto alla eliminazione di alcune limitazioni nella classe D4, per la quale si registra una diminuzione del 3% delle linee con limitazione in favore di un aumento (+5%) delle linee senza limitazioni.

Le linee con prestazioni inadatte al segmento merci (ovvero inferiori a C3) sono diminuite di circa 100 km (-9%).



Figura 14. Estensione delle linee per sistema di controllo della marcia

Per quanto concerne la distribuzione delle **sagome limite ammesse**, si apprezza un poderoso incremento della sagoma più prestante (PC 80) pari a circa 1.350 km (+63%), a discapito di tutte le altre sagome, a conferma dell'impegno del Gestore in favore del traffico combinato.

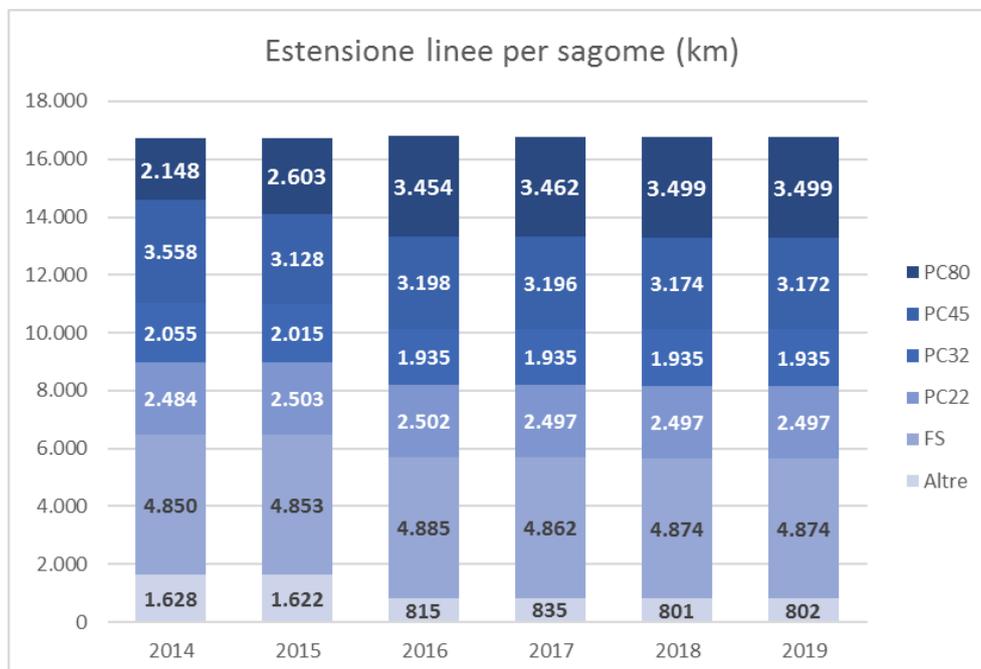


Figura 15. Estensione delle linee per sagome limite

Il modello comprende anche dati relativi alle caratteristiche della rete che non cambiano nel tempo, e che quindi vengono assunte come costanti all'interno del periodo.

Si riportano nella tabella di seguito i principali dati relativi a opere civili, segnalamento, dispositivi di armamento e sottostazioni.

Tabella 3 - Caratteristiche invarianti infrastruttura

| | Oggetto | Tipo | Bin. | Numero | Numero/km | Numero/km | Estensione vista linea (km) | Percentuale | Percentuale |
|-----|---------------|---------------------|-------|--------|-----------|-----------|-----------------------------|-------------|-------------|
| OC | Ponti | VIADOTTO | | 1.449 | 0,09 | 1,37 | 373 | 2,2% | 5% |
| | | PONTE | | 7.839 | 0,47 | | 192 | 1,1% | |
| | | CAVALCAVIA | | 4.586 | 0,27 | | 127 | 0,8% | |
| | | SOTTOVIA | | 7.288 | 0,43 | | 76 | 0,5% | |
| | | SOTTOPASSO | | 1.564 | 0,09 | | 12 | 0,1% | |
| | | ALTRI | | 195 | 0,01 | | 7 | 0,0% | |
| | Gallerie | Doppia canna | | 132 | 0,01 | 0,11 | 98 | 0,6% | 9% |
| | | Singola canna | s.b. | 1.122 | 0,07 | | 520 | 3,1% | |
| | | | d.b. | 616 | 0,04 | | 799 | 4,8% | |
| | | | + b. | 13 | 0,00 | | 21 | 0,1% | |
| IS | Segnali | Segnale ferroviario | | 29.513 | 1,76 | 2,46 | | | |
| | | segnali di manovra | | 9.587 | 0,57 | | | | |
| | | Segnali per PL | | 2.141 | 0,13 | | | | |
| | PL | | 4.238 | 0,25 | | | | | |
| ARM | Intersezioni | | | 416 | 0,02 | 1,24 | | | |
| | Deviatoi | | | 20.467 | 1,22 | | | | |
| TE | Sottostazioni | | | 625 | 0,04 | | | | |

4.3 Definizione del modello econometrico

L'obiettivo del modello econometrico è quello di stimare i **costi direttamente legati alla prestazione del servizio ferroviario** seguendo un approccio c.d. top-down. L'approccio metodologico seguito nel presente documento è in linea con le indicazioni fornite nelle linee guida nell'implementazione della metodologia econometrica per la determinazione dei costi diretti nel rispetto del Regolamento europeo n. 909/2015, definite dal "Charges Working Group" dell'**Independent Regulators' Group – Rail (IRG–Rail)**. L'approccio econometrico, che ha il vantaggio di basarsi su dati storici effettivi, si basa sul concetto di **costo marginale**. Il costo marginale può essere definito come il **costo sostenuto dal GI relativo ad una unità addizionale di traffico**.

Si ritiene necessario sottolineare che, riguardo l'interpretazione del concetto di costi direttamente imputabili al traffico oggetto del presente lavoro, il "Position Paper" rilasciato dall'IRG-Rail nell'Ottobre 2012 afferma che: "L'IRG-Rail charging working group sostiene l'opinione che il "costo direttamente sostenuto" dovrebbe essere interpretato come "costo marginale di breve periodo" (IRG-Rail Position Paper on the concept of "Cost that is directly incurred", October 2012). Si rende infine necessario sottolineare che i risultati della presente analisi non trovano applicazione in caso di cambiamenti inattesi di natura strutturale o congiunturale che possano incidere significativamente sulla relazione tra i costi di manutenzione e i volumi di traffico, così come stimata sulla base dell'osservazione storica relativa al periodo temporale oggetto dell'analisi stessa.

L'approccio econometrico proposto per la stima dei costi marginali direttamente legati al traffico si basa sulla **modellizzazione della funzione di costo** in coerenza con la **teoria economica** della massimizzazione del profitto, secondo cui per un determinato livello di produzione e dei prezzi dei fattori produttivi l'impresa minimizza i costi. In sintesi, la **funzione di costo** può essere rappresentata con la seguente funzione generica:

$$C = f(q, x, z)$$

dove

- q è un vettore di variabili relative alle caratteristiche di traffico;
- x è un vettore di caratteristiche quantitative dell'infrastruttura;
- z è un vettore di indicatori, o variabili dummy, relativo a caratteristiche qualitative dell'infrastruttura.

La funzione di costo dipende quindi non solo da **variabili relative alle caratteristiche di traffico**, ma anche da variabili relative alle **caratteristiche dell'infrastruttura**, delle quali è necessario tenere debitamente in considerazione al fine di ottenere una stima corretta dei costi marginali. Il modello econometrico consente di stimare la relazione tra i costi e i volumi di traffico, al netto degli effetti prodotti sui costi dalle variabili legate all'infrastruttura e alla tecnologia incluse nel modello. Si forniscono di seguito i dettagli sulle forme funzionali analizzate e la corrispondente metodologia di stima utilizzata in relazione alle diverse forme funzionali.

Le forme funzionali prese in considerazione nel presente lavoro sono le principali forme funzionali utilizzate in letteratura e suggerite dalla *best practice* europea (CATRIN, 2009) e, più in generale, nella letteratura economica ed econometrica, per modellizzare la funzione dei costi:

- **Modello Log-log:** Il modello log-log assume che la trasformazione più efficiente dei dati sia quella logaritmica. Quindi, i costi (C), le variabili di traffico (q) e le caratteristiche quantitative dell'infrastruttura (x) entrano nella relazione in termini logaritmici, mentre le variabili dummy (z) non vengono trasformate. **La forma funzionale del modello log-log per ogni tratta i al tempo t è la seguente:**

$$\ln(C_{it}) = \alpha + \beta \ln(q_{it}) + \gamma \ln(x_{it}) + \delta z_{it} + \varepsilon_{it}$$

- **Modello Box-Cox:** è un modello più generale e più flessibile rispetto al modello log-log, in cui la trasformazione logaritmica viene rimpiazzata dalla più generale trasformazione c.d. di Box-Cox. **La forma funzionale del modello Box-Cox per ogni tratta i al tempo t è la seguente:**

$$C_{it}^{(\lambda)} = \alpha + \beta q_{it}^{(\lambda)} + \gamma x_{it}^{(\lambda)} + \delta z_{it} + \varepsilon_{it}$$

La trasformazione di Box-Cox (Greene 2003), che consente una maggiore flessibilità è la seguente:

$$w^{(\lambda)} = \frac{w^{\lambda}-1}{\lambda}$$

dove w è la variabile trasformata e λ è un parametro da stimare. Il vantaggio di utilizzare questo modello è dato dal fatto che la trasformazione di Box-Cox include la trasformazione logaritmica come caso speciale. Quindi, l'applicazione del modello fornisce indicazioni sulla trasformazione che meglio si adatta ai dati osservati, verificabile attraverso un test statistico della seguente ipotesi: se i dati sono log-normali, il parametro λ non è significativamente diverso da zero. Altrimenti, la trasformazione logaritmica non è il modo più efficiente di trattare i dati e la più generale trasformazione di Box-Cox è statisticamente preferibile.

L'approccio utilizzato è stato quello di partire dal modello log-log, per passare poi all'applicazione del modello Box-Cox più generale e complesso, **dimostrando statisticamente quale tra i due modelli sia superiore** in termini di bontà di adattamento ai dati osservati, e quindi preferibile. I parametri del modello log-log sono stimati con il metodo dei **Minimi Quadrati Ordinari**, mentre i parametri del modello Box-Cox sono stimati con il metodo della **Massima Verosimiglianza** (Greene 2003). Tutte le stime sono ottenute utilizzando il software statistico-econometrico **Stata 16** (StataCorp). Per la stima di entrambi i modelli log-log e Box-Cox, l'unità di analisi della rete è identificata nella tratta o «sezione di linea omogenea», mentre il periodo temporale oggetto di analisi si riferisce agli anni 2014 – 2018.

Per cogliere eventuali variazioni temporali, sono stati inclusi degli **effetti fissi annuali**, tramite l'inclusione tra i regressori di 4 **variabili dummy per gli anni** 2014, 2015, 2016, e 2017. Il coefficiente di ognuna di tali variabili dummy quantifica, per ogni anno, la differenza in media rispetto al costo stimato per l'anno scelto come riferimento e cioè il 2018. Questo consente una rappresentazione molto flessibile di eventuali variazioni temporali.

4.3.1 Elasticità dei costi

Indipendentemente dalla forma di funzione prescelta, la prima misura necessaria alla stima dei costi marginali è l'**elasticità** dei costi rispetto ai volumi di traffico (o elasticità di utilizzo), che misura la **reattività del costo alle variazioni del traffico**. L'elasticità dei costi è calcolata come rapporto tra la variazione percentuale del costo rispetto alla variazione percentuale nel volume di traffico.

Per il modello **log-log** con termini logaritmici di primo ordine l'elasticità del costo alla variabile di traffico è **costante** e pari al coefficiente del logaritmo della variabile di traffico:

$$\beta$$

Per il modello **Box-Cox** l'elasticità del costo alla variabile di traffico include il coefficiente di trasformazione λ e per ogni tratta i al tempo t **varia sia al variare del traffico che del costo**, ed è calcolata come (Andersson 2009; Greene 2003):

$$\beta \left(\frac{q_{it}}{C_{it}} \right)^{\lambda},$$

dove β è il coefficiente della variabile di traffico, C_{it} è la variabile di costo della tratta i al tempo t , q_{it} è la variabile di traffico della tratta i al tempo t , e λ è il coefficiente di trasformazione di Box-Cox. Il fattore di **elasticità dei**

costi al variare dei volumi di traffico è stato quindi **determinato fornendone una stima econometrica utilizzando le formule sopra indicate**, che differiscono a seconda del modello (log-log oppure Box-Cox) stimato.

4.3.2 Costo marginale

Il **costo marginale** è la misura del costo sostenuto per ogni unità di traffico aggiuntiva che circola sulla rete ed è espresso in termini di EUR/ton-km, oppure in termini di EUR/tr-km. Nello specifico, nel modello econometrico i costi marginali vengono implementati nel seguente modo:

1. viene dapprima stimato il costo marginale specifico per ogni tratta (**costo marginale locale**). I costi marginali (CM_{it}) sono **stimati per ogni tratta i al tempo t** come il prodotto tra il costo medio e l'elasticità di utilizzo:

$$CM_{it} = \text{Costo medio}_{it} * \text{Elasticità di utilizzo}_{it},$$

dove:

- L'**elasticità di utilizzo della tratta i al tempo t** misura la reattività del costo alle variazioni del traffico per la tratta i al tempo t, ed è data dal rapporto tra la variazione percentuale del costo rispetto alla variazione percentuale nel volume di traffico. Come descritto al punto 2 della presente nota, l'elasticità dei costi al traffico è costante e stimata come β nel modello log-log e stimata come $\beta(q_{it}/C_{it})^\lambda$ nel modello Box-Cox.
- Il **costo medio della tratta i al tempo t** è dato dal costo unitario medio sostenuto per unità di traffico al km. Il costo medio è stimato per ogni tratta come il costo C_{it} predetto dal modello (log-log o Box-Cox) diviso per la variabile di traffico al km (peso treno*km ovvero numero treni*km):

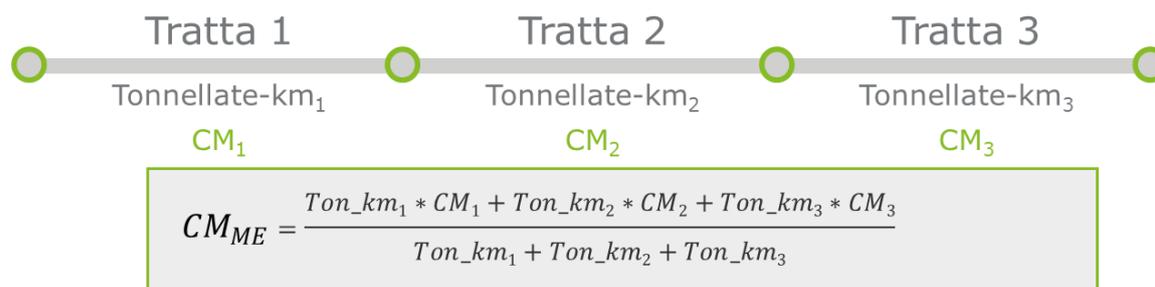
$$\frac{C_{it}}{q_{it}^{km}}$$

Si noti, che misurare il costo marginale in termini di traffico per distanza percorsa (km) risulta utile nell'ambito di una prospettiva di pricing.

2. Una volta stimato il costo marginale specifico per ogni tratta (**costo marginale locale**) come appena descritto, è possibile calcolare il costo marginale per l'intera rete (**costo marginale medio della rete**). Tale costo marginale medio (CM_{ME}) è ottenuto come **media ponderata dei costi marginali locali stimati per ogni tratta della rete**, utilizzando il traffico al km della tratta come peso specifico della tratta in relazione al traffico totale della rete:

$$CM_{ME} = \sum_{it} \left[CM_{it} \frac{q_{it}^{km}}{\sum_{it} q_{it}^{km}} \right]$$

Si noti che questa **misura (media ponderata per l'intera rete)** ha l'utile proprietà di rappresentare la **tariffa uniforme** che potrebbe essere applicata a tutte le tratte della rete recuperando esattamente le stesse entrate che si avrebbero applicando a ciascuna tratta la specifica tariffa locale stimata dal modello (Andersson, 2006; Johansson and Nilsson, 2004). Si riporta di seguito, a titolo esemplificativo, il calcolo dei costi marginali medi (CM_{ME}) per peso treno-km in relazione a 3 tratte:



4.4 Risultati

Si riporta di seguito la stima dei coefficienti di principale interesse sia del modello log-log che Box-Cox. Il modello log-log prevede la trasformazione logaritmica della variabile dipendente e di tutte le variabili indipendenti quantitative che non presentano zeri «naturali». Analogamente, il modello di Box-Cox prevede la trasformazione c.d. di Box-Cox della variabile dipendente e di tutte le variabili indipendenti quantitative che non presentano zeri «naturali».

La tabella seguente mostra la stima dei coefficienti di principale interesse sia del modello log-log che Box-Cox dove la variabile dipendente è data dai **costi totali di manutenzione** e la **variabile di traffico** è misurata in termini di **peso dei treni circolati**:

Tabella 4 - Stima dei coefficienti di principale interesse del modello log-log e Box-Cox (variabile la variabile di traffico è misurata in termini di peso dei treni circolati).

| Peso treno | | |
|-------------------------------------|-----------|-------------|
| Costi totali di manutenzione | | |
| | Log-log | Box-Cox |
| Peso treno (Ton) | 0,300 *** | 0,144 *** |
| Lunghezza tratta (km) | 0,537 *** | 3,682 *** |
| Variabili infrastruttura | ✓ | ✓ |
| Variabili tecnologia | ✓ | ✓ |
| Dummies regioni | ✓ | ✓ |
| Dummies anni | ✓ | ✓ |
| Osservazioni | 14.412 | 14.412 |
| λ | | 0,199 *** |
| Test λ=0 | | 2.606,6 *** |

*Note: * significativo al 10%; ** significativo al 5%; *** significativo al 1%*

La tabella seguente mostra la stima dei coefficienti di principale interesse sia del modello log-log che Box-Cox dove la variabile dipendente è data dai **costi totali di manutenzione** e la **variabile di traffico** è misurata in termini di **numero dei treni circolati**:

Tabella 5 - Stima dei coefficienti di principale interesse del modello log-log e Box-Cox (variabile la variabile di traffico è misurata in termini di numero di treni circolati).

| Numero treni | | |
|-------------------------------------|-----------|-------------|
| Costi totali di manutenzione | | |
| | Log-log | Box-Cox |
| Numero treni | 0,311 *** | 0,497 *** |
| Lunghezza tratta (km) | 0,552 *** | 3,769 *** |
| Variabili infrastruttura | ✓ | ✓ |
| Variabili tecnologia | ✓ | ✓ |
| Dummies regioni | ✓ | ✓ |
| Dummies anni | ✓ | ✓ |
| Osservazioni | 14.412 | 14.412 |
| λ | | 0,197 *** |
| Test $\lambda=0$ | | 2.524,0 *** |

*Note: * significativo al 10%; ** significativo al 5%; *** significativo al 1%*

La stima dei coefficienti di tutte le variabili incluse nei modelli è riportata in Appendice C. Si noti che i coefficienti del modello log-log e Box-Cox non sono direttamente confrontabili a causa della diversa trasformazione delle variabili d'interesse. Dopo aver tenuto conto dell'effetto significativo delle caratteristiche di tecnologia e infrastruttura, nonché di fattori regionali e temporali, i costi di manutenzione risultano **correlati positivamente e significativamente alla variabile di traffico**, misurata sia come peso dei treni che come numero dei treni circolati, nonché alla lunghezza della tratta. Si evidenzia che i coefficienti della variabile di traffico (misurata sia in termini di **peso dei treni circolati** che in termini di **numero dei treni circolati**) e della variabile lunghezza della tratta sono **altamente significative** (sono infatti significative all'1%).

Come descritto in precedenza, per il modello log-log l'elasticità del costo alla variabile di traffico è costante e pari al coefficiente stimato. Per il modello Box-Cox l'elasticità del costo alla variabile di traffico varia sia al variare del traffico che del costo. La figura sotto riporta la **stima della funzione di elasticità del modello Box-Cox** al variare del traffico, misurato in termini di **peso dei treni circolati**, in corrispondenza del costo medio per tratta.

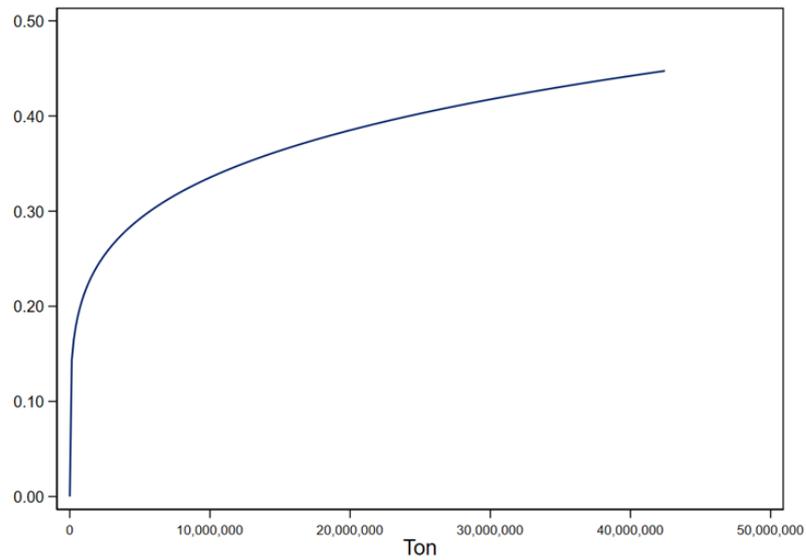


Figura 16 - Stima della funzione di elasticità del modello Box-Cox al variare del traffico, misurato in termini di peso dei treni circolati, in corrispondenza del costo medio per tratta.

La figura sotto riporta la **stima della funzione di elasticità del modello Box-Cox** al variare del traffico, misurato in termini di **numero dei treni circolati**, in corrispondenza del costo medio per tratta.

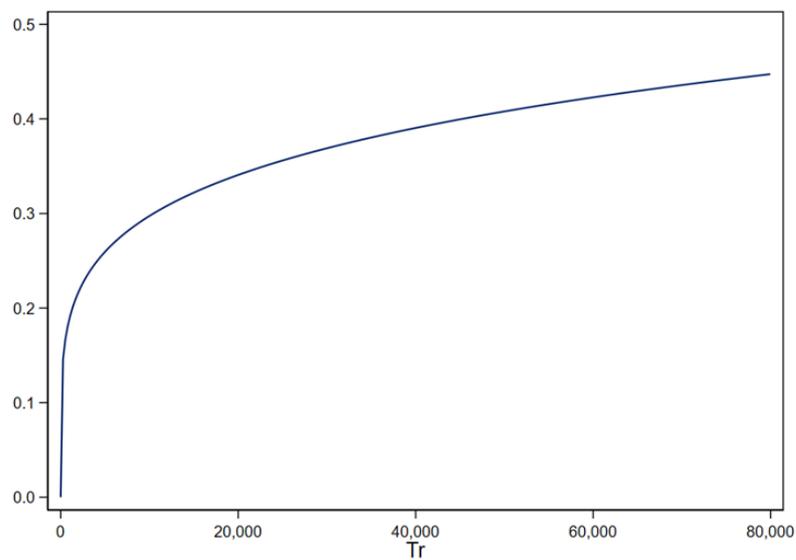


Figura 17 - Stima della funzione di elasticità del modello Box-Cox al variare del traffico, misurato in termini di numero di treni circolati, in corrispondenza del costo medio per tratta.

4.4.1 Manutenzione ordinaria

La Tabella seguente riporta i risultati della stima dell'elasticità, del costo medio e del costo marginale relativi ai **costi totali di manutenzione** rispetto alla variabile di traffico data dal **peso dei treni**.

Tabella 6 - Stima dell'elasticità, del costo medio e del costo marginale relativi ai costi totali di manutenzione rispetto alla variabile di traffico data dal peso dei treni.

| EUR/k ton-km | | | | | | |
|--------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------|----------------------------|
| Modello | Costo marginale (A) | Costo medio stimato (B) | Costo medio osservato | Delta costo medio stimato-osservato | Elasticità | Recupero del costo (% A/B) |
| Log-log | 0,903 | 3,011 | 2,683 | 0,328 | 0,300 | 30,0 |
| Box-Cox | 0,832 | 2,698 | | 0,015 | 0,349 | 30,8 |

La Tabella seguente riporta i risultati della stima dell'elasticità, del costo medio e del costo marginale relativi ai **costi totali di manutenzione** rispetto alla variabile di traffico data dal **numero dei treni**.

Tabella 7 - Stima dell'elasticità, del costo medio e del costo marginale relativi ai costi totali di manutenzione rispetto alla variabile di traffico data dal numero di treni.

| EUR/treni-km | | | | | | |
|--------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------|----------------------------|
| Modello | Costo marginale (A) | Costo medio stimato (B) | Costo medio osservato | Delta costo medio stimato-osservato | Elasticità | Recupero del costo (% A/B) |
| Log-log | 0,435 | 1,398 | 1,242 | 0,156 | 0,311 | 31,1 |
| Box-Cox | 0,404 | 1,249 | | 0,007 | 0,349 | 32,4 |

Si noti che, oltre a risultare **statisticamente preferibile** rispetto al modello log-log, il modello **Box-Cox** risulta fornire una **stima più accurata del costo medio** ponderato osservato, ottenuto cioè utilizzando il valore dei costi osservato anziché quello predetto dal modello.

I costi marginali per treno-km superano i costi marginali per ton-km per un fattore di circa 500 ton. Questo significa che **un treno che pesa circa 500 ton dovrebbe pagare approssimativamente la stessa tariffa** in un sistema tariffario basato su ton-km e in un sistema basato su treno-km.

La Tabella seguente mostra i risultati della stima dell'elasticità, del costo medio e del costo marginale relativi ai **costi totali di manutenzione**, distinti per **tipologia di servizio**.

Tabella 8 - Stima dell'elasticità, del costo medio e del costo marginale relativi ai costi totali di manutenzione, distinti per tipologia di servizio.

| EUR/treni-km | | | | | | | |
|--------------|------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------|----------------------------|
| Modello | Servizio | Costo marginale (A) | Costo medio stimato (B) | Costo medio osservato | Delta costo medio stimato-osservato | Elasticità | Recupero del costo (% A/B) |
| Log-log | Passeggeri | 0,300 | 1,614 | 1,435 | 0,179 | 0,186 | 18,6 |
| | Merci | 0,575 | 10,439 | 9,280 | 1,159 | 0,055 | 5,5 |
| Box-Cox | Passeggeri | 0,321 | 1,440 | 1,435 | 0,005 | 0,247 | 22,3 |
| | Merci | 0,563 | 9,310 | 9,280 | 0,030 | 0,096 | 6,0 |

I risultati indicano un maggior costo marginale al treno-km stimato per i treni merci rispetto ai treni passeggeri. Infine, si riportano nelle Tabelle di seguito i risultati della stima del modello Box-Cox del costo medio e del costo marginale relativi ai **costi di manutenzione distinti per tipologia di costo**. Per i costi di armamento binario e deviatoi sono stati stimati i costi marginali sia rispetto al peso dei treni che rispetto al numero di treni, mentre per i costi dei sistemi di segnalamento, e della linea di contatto e sottostazioni sono stati stimati soltanto i costi marginali rispetto al numero di treni. Per quanto riguarda i costi relativi a linea di contatto e sottostazioni la variabile di traffico include soltanto i treni elettrici.

Tabella 9 - Stima del modello Box-Cox del costo medio e del costo marginale per numero di treni relativi ai costi di armamento binario e deviatoi

| EUR/k ton-km | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Modello | Tipologia di costo | Costo marginale (A) | Costo medio stimato (B) | Costo medio osservato | Delta costo medio stimato-osservato |
| Box-Cox | Costo armamento binari e deviatoi | 0,268 | 0,956 | 0,934 | 0,022 |

Tabella 10 - Stima del modello Box-Cox del costo medio e del costo marginale per numero di treni relativi ai costi di manutenzione distinti per tipologia di costo.

| EUR/treni-km | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Modello | Tipologia di costo | Costo marginale (A) | Costo medio stimato (B) | Costo medio osservato | Delta costo medio stimato-osservato |
| Box-Cox | Costo armamento binari e deviatoi | 0,122 | 0,443 | 0,432 | 0,010 |
| | Costo sistemi segnalamento | 0,165 | 0,519 | 0,517 | 0,002 |
| | Costo elettr. (LC + SS)* | 0,108 | 0,331 | 0,332 | -0,001 |

Si noti che la somma dei costi marginali al treno-km delle diverse tipologie di costo riconduce al costo marginale stimato per i costi totali di manutenzione.

A fini di benchmark, in Appendice D si riporta un confronto tra l'elasticità e i costi marginali di manutenzione stimati per l'Italia nel presente lavoro e le stime ottenute per diversi Paesi Europei negli studi realizzati nell'ambito del progetto *Cost Allocation of Transport Infrastructure Cost* ("CATRIN").

4.4.2 Manutenzione straordinaria

In aggiunta ai costi marginali della manutenzione correttiva e manutenzione ciclica sono stati inoltre stimati i **costi marginali di rinnovo (manutenzione «straordinaria»)**. Le categorie di costo incluse nei costi di rinnovo sono le seguenti: armamento binari e deviatoi, sistema di segnalamento, linea di contatto e sottostazioni, opere civili. L'**approccio metodologico** alla stima dei costi marginali di rinnovo è lo stesso seguito per la stima dei costi di manutenzione correttiva e ciclica descritto in precedenza. Anche in questo caso, il periodo temporale oggetto di analisi si riferisce agli anni **2014 – 2018**.

Alcune varianti rispetto alla stima del modello per i costi di manutenzione correttiva e ciclica, dovute alla **specificità dei costi di rinnovo**, si sono rese necessarie. Si riportano di seguito tali varianti:

- A differenza dei costi di manutenzione correttiva e ciclica, i costi di rinnovo (manutenzione «straordinaria») non sono disponibili a livello di tratta o «sezione di linea omogenea», ma sono disponibili a livello aggregato per linea ferroviaria (e associabili quindi alle tratte commerciali). L'**unità di analisi della rete** è quindi in questo caso identificata nella **tratta commerciale**.
- Data la natura straordinaria dei costi di rinnovo, coerentemente con quanto osservato anche in analisi simili (ad es. Andersson 2006) si osserva una significativa variabilità temporale nei costi di rinnovo delle singole linee ferroviarie. Per questa ragione, a differenza della stima del modello per i costi di manutenzione correttiva e ciclica non si è considerato nell'analisi il costo sostenuto nei singoli anni, ma si è altresì considerata **la media dei costi di rinnovo sostenuti per ogni linea nei 5 anni dal 2014-2018**.

Si rende altresì necessario sottolineare che, a differenza dell'analisi relativa ai costi di manutenzione ordinaria, l'associazione tra i centri di costo e le linee per cui è stato possibile effettuare un'**associazione tra i costi di rinnovo e i volumi di traffico circolato risulta solo parziale**. Di conseguenza, il totale dei costi di rinnovo inclusi nella stima del modello non riflette il totale dei costi di rinnovo sostenuti per l'intera rete ferroviaria.

Si riporta di seguito la stima dei coefficienti di principale interesse del modello log-log e Box-Cox, dove la variabile dipendente è data dai **costi di rinnovo** e la **variabile di traffico** è misurata in termini di **peso dei treni circolati**:

Tabella 11 - Stima dei coefficienti di principale interesse del modello log-log e Box-Cox per i costi di rinnovo (variabile la variabile di traffico è misurata in termini di peso dei treni circolati)

| Peso treno | | |
|--------------------------|-----------|------------|
| Costi di rinnovo | | |
| | Log-log | Box-Cox |
| Peso treno (Ton) | 0,245 * | 0,272 ** |
| Lunghezza tratta (km) | 0,721 *** | 16,753 *** |
| Variabili infrastruttura | ✓ | ✓ |
| Variabili tecnologia | ✓ | ✓ |
| Osservazioni | 234 | 234 |
| λ | | 0,265 *** |
| Test $\lambda=0$ | | 62,6 *** |

*Note: * significativo al 10%; ** significativo al 5%; *** significativo al 1%*

La tabella seguente mostra la stima dei coefficienti di principale interesse sia del modello log-log che Box-Cox dove la variabile dipendente è data dai **costi di rinnovo** e la **variabile di traffico** è misurata in termini di **numero dei treni circolati**:

Tabella 12 - Stima dei coefficienti di principale interesse del modello log-log e Box-Cox per i costi di rinnovo (variabile la variabile di traffico è misurata in termini di numero di treni circolati)

| Numero treni | | |
|--------------------------|-----------|------------|
| Costi di rinnovo | | |
| | Log-log | Box-Cox |
| Numero treni | 0,243 * | 1,532 ** |
| Lunghezza tratta (km) | 0,694 *** | 16,666 *** |
| Variabili infrastruttura | ✓ | ✓ |
| Variabili tecnologia | ✓ | ✓ |
| Osservazioni | 234 | 234 |
| λ | | 0,266 *** |
| Test $\lambda=0$ | | 63,0 *** |

Note: * significativo al 10%; ** significativo al 5%; *** significativo al 1%

Pur tenendo conto dell'effetto significativo delle caratteristiche di tecnologia e infrastruttura, i costi di rinnovo risultano **correlati positivamente e significativamente alla variabile di traffico**, misurata sia come peso dei treni che come numero dei treni circolati, nonché alla lunghezza della tratta. Soprattutto a causa della ridotta numerosità del campione utilizzato nelle stime rispetto al modello per i costi di manutenzione, per quanto riguarda il coefficiente della variabile di traffico per il modello log-log, questo risulta comunque significativo, seppure al 10%.

Anche per i costi di rinnovo, la stima del coefficiente λ è significativamente diversa da zero. Quindi **la trasformazione logaritmica è fortemente rifiutata** per ogni livello di significatività in favore della trasformazione di Box-Cox. **Il modello Box-Cox risulta quindi statisticamente preferibile rispetto al modello log-log**. Si noti che i coefficienti del modello log-log e Box-Cox non sono direttamente confrontabili a causa della diversa trasformazione delle variabili d'interesse.

La Tabella seguente mostra i risultati della stima dell'elasticità, del costo medio¹ e del costo marginale² relativi ai **costi di rinnovo** rispetto alla variabile di traffico data dal **peso dei treni circolati**.

Tabella 13 - Stima dell'elasticità, del costo medio e del costo marginale relativi ai costi di rinnovo rispetto alla variabile di traffico data dal peso dei treni

| EUR/k ton-km | | | | | | |
|--------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------|----------------------------|
| Modello | Costo marginale (A) | Costo medio stimato (B) | Costo medio osservato | Delta costo medio stimato-osservato | Elasticità | Recupero del costo (% A/B) |
| Log-log | 1,130 | 4,617 | 4,110 | 0,507 | 0,245 | 24,5 |
| Box-Cox | 1,216 | 4,014 | | -0,096 | 0,379 | 30,3 |

La Tabella seguente riporta i risultati della stima dell'elasticità, del costo medio e del costo marginale relativi ai **costi di rinnovo** rispetto alla variabile di traffico data dal **numero dei treni**.

¹ I costi medi e i costi marginali sono tutti espressi in prezzi al 2019.

² Si noti, che nell'ambito di variazioni di volumi poco significative, il nuovo costo marginale relativo a un futuro anno di riferimento potrà essere stimato moltiplicando il valore dell'elasticità di utilizzo stimata nel presente lavoro per la nuova stima dei costi medi ottenuta dai dati osservati nell'anno di riferimento.

Tabella 14 - Stima dell'elasticità, del costo medio e del costo marginale relativi ai costi di rinnovo rispetto alla variabile di traffico data dal numero dei treni circolati

| EUR/treni-km | | | | | | |
|--------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------|----------------------------|
| Modello | Costo marginale (A) | Costo medio stimato (B) | Costo medio osservato | Delta costo medio stimato-osservato | Elasticità | Recupero del costo (% A/B) |
| Log-log | 0,499 | 2,057 | 1,842 | 0,216 | 0,243 | 24,3 |
| Box-Cox | 0,609 | 1,797 | | -0,045 | 0,424 | 33,9 |

Si noti che, anche in questo caso, oltre a risultare statisticamente preferibile rispetto al modello log-log, il modello Box-Cox risulta fornire una stima più accurata del costo medio ponderato osservato, ottenuto cioè utilizzando il valore dei costi osservato anziché quello predetto dal modello.

L'analisi è stata condotta per verificare la sussistenza e l'entità della dipendenza dal traffico di una quota di usura, rispetto alla quale la manutenzione straordinaria ha un impegno economico complessivamente importante.

Tuttavia **tale quota non può essere collegata alla marginalità del transito di singoli treni**, per il motivo nel seguito esposto.

Le lavorazioni raccolte nella categoria manutenzione straordinaria hanno la funzione di mantenere la linea idonea al passaggio di treni, **indipendentemente se il traffico atteso si realizzi o meno**: sono correlate al ripristino delle caratteristiche necessarie dell'infrastruttura a fronte del degrado dovuto all'interazione con l'ambiente ed al decadimento intrinseco dei componenti. Ad esempio, talune lavorazioni si effettuano su linee sulle quali si intenda riprendere a circolare dopo un periodo prolungato di chiusura, anche nei casi in cui la quantità di traffico tra la precedente operazione di manutenzione straordinaria e la sospensione del traffico sia stata minimale.

I parametri e la natura di una quota importante di lavorazioni di manutenzione straordinaria sono dipendenti dalle caratteristiche di offerta che la linea deve garantire. Quindi linee preparate per essere in grado di sostenere un traffico frequente, pesante e veloce richiedono manutenzione straordinaria più impegnativa di una linea non destinata a tale traffico in condizioni ambientali comparabili.

Per cui **la correlazione tra caratteristiche del traffico e impegno della manutenzione straordinaria esiste non nel senso che una marginalità di circolazione comporta una quota di usura addizionale, ma nel senso che la scelta strategica di predisposizione di una linea a certe prestazioni comporta l'impostazione di caratteristiche specifiche di manutenzione straordinaria, indipendentemente dal fatto che il traffico atteso si realizzi o meno.**

5. Il Modello Ingegneristico

Il modello ingegneristico ha come obiettivo la stima del danno relativo causato da diversi tipi di veicoli all'infrastruttura della Rete Ferroviaria Italiana, da impiegare successivamente come fattore di "attribuzione" ai singoli veicoli per modulare, sulla base delle caratteristiche specifiche di ciascun singolo veicolo, il costo marginale stimato dal Modello Econometrico (Wheat and Smith 2006).

Il metodo ingegneristico viene usato prevalentemente per modulare il valore del costo diretto sui parametri previsti nel Reg 909/2015.

L'obiettivo finale è quello di pervenire a una formulazione delle tariffe del PMdA parte A, per il periodo regolatorio 2022-2026 che, con riferimento alla Misura 23 della Del. 96/15 «Principi fondamentali per la modulazione del pedaggio», sia caratterizzata da:

- Semplicità: caratterizzata da una tariffa base fissa, unica, corrispondente al costo medio ad essa pertinente. Partendo da tale tariffa media, con l'applicazione di pochi coefficienti correttivi, ricavati dal GI in base a classi di variabili legate alla tipologia di costi da coprire, sarà determinata la tariffa effettiva;
- Predeterminazione: per ciascuna impresa ferroviaria dovrà essere possibile predeterminare la tariffa relativa alla traccia di ciascun proprio treno;
- Correlazione ai costi: la metodologia per addivenire alle tariffe dovrà essere basata su criteri cost-based.

5.1 Approccio metodologico

Il modello ingegneristico è il risultato di un processo articolato in molteplici fasi, volto a modulare il costo unitario dedotto dal modello econometrico al traffico presente sulla rete nazionale, sulla base di parametri opportunamente scelti.

Può essere sintetizzato nelle seguenti fasi:

1. Vengono determinati, attraverso il metodo econometrico, il costo diretto unitario [€/km] (cfr. Misura 28 Del.96/15 « $T_{base,A}$ ») e i costi diretti unitari [€/km] per i tre settori di specializzazione alla base del modello (armamento, segnalamento e trazione elettrica);
2. Vengono analizzati i parametri di modulazione a partire da quelli del Reg UE 909/2015;
3. Viene analizzata la distribuzione del traffico in termini di parametri, concentrando prioritariamente l'attenzione su quelli già utilizzati nel precedente periodo regolatorio 2016-21 (massa totale, velocità di marcia e tipo di trazione);
4. Vengono analizzati e scelti i modelli da applicare a ciascun settore di specializzazione, ripartendo percentualmente i costi su ciascun modello. La scelta del modello è basata anche sull'eshaustività dei parametri trattati;
5. Vengono ipotizzati i parametri da utilizzare per la modulazione del costo unitario diretto; in prima istanza si utilizzano gli stessi parametri e limiti di classe già in vigore;
6. Per ciascun parametro e classe viene applicato il modello scelto al punto 4, anche attraverso l'utilizzo di opportune simulazioni, che ne determina un «indice di danno» adimensionale;
7. L'indice di danno viene normalizzato rispetto alle percorrenze annue complessive di ciascuna classe affinché la media pesata tra questi indici normalizzati e le percorrenze sia uguale a 1;
8. Si calcolano le tariffe moltiplicando gli indici di danno normalizzati per la tariffa unitaria;

9. Si calcolano gli impatti sul mercato e sul gestore dell'infrastruttura;
10. Nel caso di risultati insoddisfacenti, si procede all'adozione di un diverso modello reiterando dal punto 4 oppure si variano i parametri da utilizzare o i relativi limiti di classi reiterando dal punto 5.

5.2 Analisi preliminare dei parametri di modulazione

Per quanto riguarda i parametri di modulazione utilizzati nel modello, si è resa necessaria un'approfondita analisi di tutti i principali parametri del Regolamento, volta a comprenderne il livello di significatività ai fini della modulazione del costo unitario diretto.

Una prima selezione dei parametri ha in seguito tenuto conto sia di quanto previsto dalla Delibera 96/15 sia dell'effettiva disponibilità o affidabilità dei dati coinvolti.

Tabella 15 - Parametri di modulazione: analisi preliminare

| Parametro Regolamento 909/15 | Contenuto in Delibera 96/15 | Disponibilità o affidabilità dato | Prima selezione |
|--|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Lunghezza del treno e/o numero dei veicoli nel treno | - | ✓ | ✓ |
| Massa del treno | ✓ | ✓ | ✓ |
| Tipo di veicolo, in particolare la massa non sospesa | - | NO | - |
| Velocità del treno | ✓ | ✓ | ✓ |
| Potenza di trazione dell'unità a motore | - | ✓ | ✓ |
| Peso per asse e/o numero degli assi | - | indiretta | ✓ |
| Numero di sfaccettature registrato o l'uso effettivo delle attrezzature di protezione contro lo slittamento delle ruote | - | NO | - |
| Rigidità longitudinale dei veicoli e forze orizzontali che incidono sul binario | - | NO | - |
| Energia elettrica consumata e misurata o le dinamiche di pantografi o pattini di contatto come parametro per imporre diritti per l'usura della linea aerea di contatto o del binario elettrificato | - | NO | ✓ |
| Parametri dei binari, in particolare, i raggi | - | ✓ | ✓ |
| Eventuali altri parametri relativi ai costi | - | - | - |
| (Linea di contatto senza modulazione) | ✓ | | - |

Si ritiene quindi opportuno esplicitare i motivi che hanno condotto alla scelta di includere o meno fin dalla prima selezione alcuni parametri.

Per quanto riguarda il tipo di veicolo, in particolare la massa non sospesa (esclusi dalla selezione) i dati in possesso del gestore risultano limitati e scarsamente affidabili. Le imprese infatti non forniscono treno per treno dati identificativi relativamente ai carri/carrozze utilizzati, ma solamente all'unità di trazione. Per quanto

riguarda le composizioni, viene inserito il numero dei veicoli in composizione e la lunghezza totale del treno. Occorrerebbe pertanto che l'impresa, deducendo le informazioni rilevanti dai dati tecnici forniti dal costruttore dei veicoli, le associ alla matricola del carro. All'atto della partenza del treno dovrebbe associarsi la matricola di ogni carro ad ogni treno; in più occorrerebbe un sistema di verifica per accertare quanto dichiarato/richiesto dall'impresa.

Relativamente al peso per asse e/o numero degli assi (inclusi nella selezione), il numero degli assi per le composizioni ordinarie non è nella disponibilità immediata del gestore, che conosce solamente il numero dei veicoli in composizione. Tale grandezza si può stimare in maniera indiretta, e con un certo margine di precisione, moltiplicando il numero dei veicoli per un valore medio opportunamente ricavato. Il peso per asse, a sua volta non nella disponibilità del gestore in quanto l'impresa inserisce solamente il numero dei veicoli in composizione e il peso totale; può essere facilmente dedotto dividendo il peso totale per il numero assi stimato.

Per quanto riguarda il numero di sfaccettature registrato o l'uso efficace delle attrezzature di protezione contro lo slittamento delle ruote (esclusi dalla selezione), va tenuto presente che tale misura non è nella disponibilità del gestore ed è pressoché impossibile da stimare, soprattutto a priori. L'unico modo per ottenere questa informazione sarebbe effettuare periodicamente delle letture del profilo ruota e associarle alla matricola del carro. All'atto della partenza del treno dovrebbe associarsi la matricola del carro ad ogni treno; in più occorrerebbe un sistema di verifica per accertare quanto dichiarato/richiesto dall'impresa. A tal proposito è tuttavia bene ricordare come l'evoluzione della tecnologia dei sistemi frenanti per i carri merci sia attesa generare una riduzione dell'usura e conseguentemente delle irregolarità dei profili dei cerchioni dei veicoli merci, a beneficio dell'usura della rotaia. Tale evoluzione è stata incoraggiata dal DL 24 aprile 2017, n.50, recante «Disposizioni urgenti in materia finanziaria, iniziative a favore degli enti territoriali, interventi per le zone colpite da eventi sismici e misure per lo sviluppo», il quale all'articolo 47 «Interventi per il trasporto ferroviario» ha disposto l'assegnazione di 20 M€ per il 2018 a sostegno del rinnovo del sistema frenante dei carri merci (cd «retrofit»). Con il successivo DPCM 28.11.2018 è stato disposto un ulteriore finanziamento di 15 M€. L'attuazione di tale misura è in fase avanzata, infatti il MIT ha pubblicato sulla GU del 14 maggio 2019 il Decreto Direttoriale del 7 gennaio 2019-aggiornato a maggio 2020. RFI sta rendicontando le percorrenze dei carri «retrofitati» a beneficio del MIT che eroga i finanziamenti ai proprietari dei carri tramite RFI.

Per la rigidità longitudinale dei veicoli e forze orizzontali che incidono sul binario (esclusi dalla selezione) valgono le considerazioni fatte per la massa non sospesa. Occorrerebbe infatti che l'impresa, deducendole dai dati tecnici forniti dal costruttore, la associ alla matricola del carro. All'atto della partenza del treno dovrebbe associarsi la matricola del carro ad ogni treno; in più occorrerebbe un sistema di verifica per accertare quanto dichiarato/richiesto dall'impresa. In alternativa, le forze orizzontali possono essere stimate dalla modellazione del contatto ruota-rotaia.

Infine, in relazione all'energia elettrica consumata, tale parametro non viene al momento consuntivato attraverso l'uso di contatori. Il gestore dell'infrastruttura può tuttavia stimare l'energia assorbita da un treno attraverso l'algoritmo noto come «misuratore virtuale».

Al contrario, nonostante le dinamiche dei pantografi (escluse dal modello) possano essere studiate attraverso appositi modelli, il gestore non ha disponibilità dei parametri che possono variare durante la marcia del treno (ad es. la forza di contatto tra linea e pantografo viene modulata dal macchinista) così come del materiale di contatto dello strisciante sulla linea (dato invariante nella marcia). Occorrerebbe per quest'ultimo che l'impresa lo associ alla matricola del locomotore. All'atto della partenza del treno dovrebbe associarsi la matricola del locomotore ad ogni treno; in più occorrerebbe un sistema di verifica per accertare quanto dichiarato/richiesto dall'impresa.

Si riporta infine un confronto tra i diversi gestori europei in relazione ai parametri impiegati nei rispettivi modelli di calcolo.

Tabella 16 - Parametri utilizzati per la modulazione dai gestori europei

| Parametro Regolamento 909/15 | AT | CH | DE | ES | FR | UK |
|---|----|----|----|----|----|----|
| lunghezza del treno e/o numero dei veicoli nel treno | | X | | | | |
| massa del treno | X | | | X | X | |
| tipo di veicolo, in particolare massa non sospesa | | X | | | | X |
| velocità del treno | | | | | | |
| potenza di trazione dell'unità a motore | | | | | | |
| peso per asse e/o numero degli assi | | X | | | | X |
| numero di sfaccettature ruota [...] | | | | | | |
| rigidità longitudinale dei veicoli e forze orizzontali che incidono sul binario | | X | | | | X |
| energia elettrica [...] e dinamiche di pantografi | | | | | | |
| parametri dei binari, in particolare, i raggi | | X | | X | X | |
| eventuali altri parametri relativi ai costi | | | | | | |
| Segmenti di mercato | X | | X | | | |

5.3 Analisi del traffico per caratteristiche

Nel presente capitolo sono riportate le caratteristiche del traffico impiegate per l'elaborazione del modello ingegneristico. Tali grandezze, analizzate rispetto al traffico circolato 2018 con riferimento ai segmenti di mercato di 1° livello di cui alla misura 24 della Del. 96/15, sono:

- Velocità di marcia
- Massa totale
- Massa assiale (solo 2018)
- Numero veicoli e assi
- Raggi di curvatura percorsi
- Pendenze affrontate
- Tipo di trazione
- Materiali rotabili

5.3.1 Velocità di marcia

La velocità di marcia considerata è ottenuta dividendo il tempo per cui il treno è programmato in moto per la distanza percorsa.

Al fine di comprendere la distribuzione delle velocità di marcia sulla rete, sono state aggregate le percorrenze effettuate da ciascun segmento di mercato in un intervallo di 5 km/h (limite superiore non compreso).

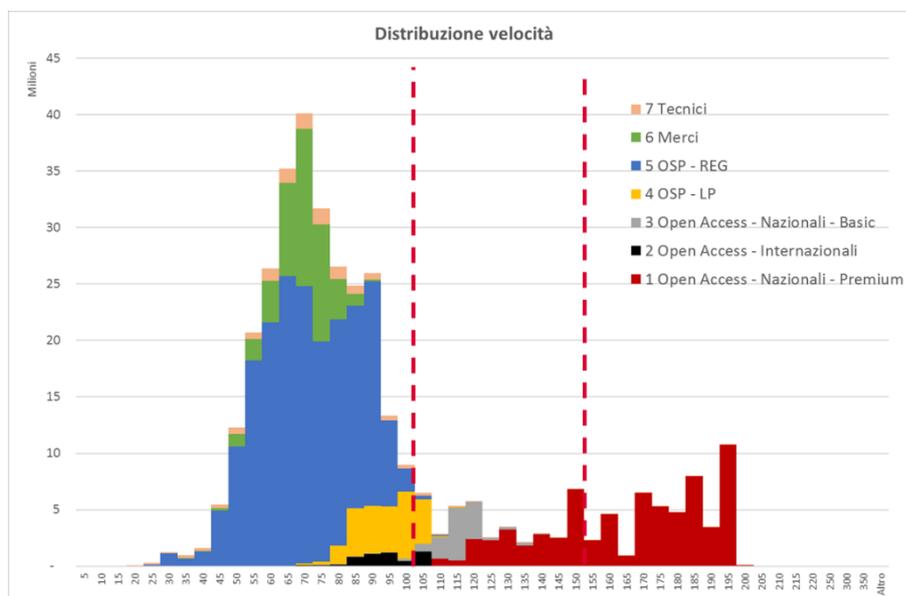


Figura 18 - Distribuzione delle velocità di marcia (2018)

Si apprezza una netta separazione tra i vari segmenti di mercato: se i segmenti Regionali e Mercati ricadono esclusivamente nell'intervallo [0-100), l'intervallo [100-150) è caratterizzato dalla presenza prevalente di Basic e Premium mentre l'intervallo [150 -300) è invece caratterizzato esclusivamente dai Premium.

Tabella 17 - Traffico per classe di velocità di marcia (2018)

| 2018 | [0 - 99 KM/H] | [100 - 149 KM/H] | [150 - 999 KM/H] |
|---------|---------------|------------------|------------------|
| Mln tkm | 274,55 | 41,70 | 47,30 |
| % | 76% | 11% | 13% |

5.3.2 Massa totale

Al fine di comprendere la distribuzione delle masse totali, sono state aggregate le percorrenze effettuate da ciascun segmento di mercato in un intervallo di 100 t (limite superiore non compreso).

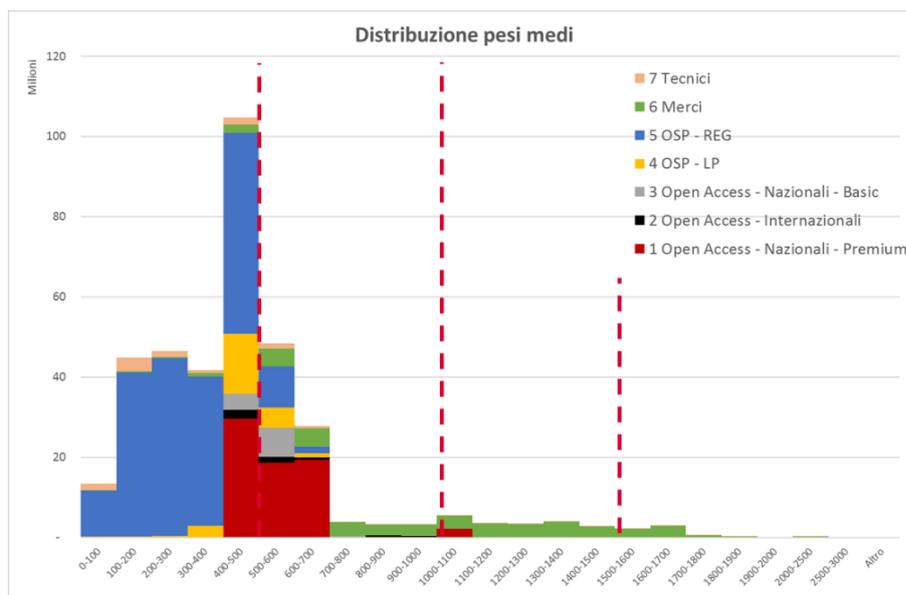


Figura 19 - Distribuzione delle masse totali (2018)

Al pari di quanto riscontrato per le velocità di marcia, si assiste ad una marcata differenziazione tra i vari segmenti di mercato per quanto riguarda le classi estreme: se i segmenti Regionali ricadono quasi esclusivamente nell'intervallo [0-500), gli intervalli [1000-1500) e [1500-3000) sono invece caratterizzati quasi unicamente da merci. Al contrario l'intervallo [500-1000) risulta piuttosto eterogeneo, caratterizzato dalla presenza sia di treni lunga percorrenza (sia OA che OSP), sia di regionali che di merci.

Tabella 18 - Traffico per classe di peso (2018)

| | Mln tkm | % |
|-------------------|---------|-----|
| 1 [0 - 499 t] | 251,19 | 69% |
| 2 [500 - 999 t] | 86,92 | 24% |
| 3 [1000 - 1499 t] | 19,20 | 5% |
| 4 >= 1500 t | 6,25 | 2% |

5.3.3 Numero veicoli e assi

Per quanto concerne l'analisi delle masse assiali insistenti sulla rete nazionale si è resa necessaria l'estrazione dei dati relativi a massa totale (vedi paragrafo precedente) e numero di assi dei treni circolanti. Se per le composizioni bloccate tale operazione è risultata poco onerosa, per i treni merci e le composizioni variabili si è dovuto ricorrere innanzitutto a una stima della media del numero di veicoli per treno (non sempre indicati dalle imprese) a partire dalla lunghezza media dei treni, e quindi al calcolo del numero di assi totale. Quest'ultimo è stato ottenuto moltiplicando il numero medio dei veicoli per 3,9 per i treni passeggeri lunga percorrenza (VL), per 3,6 per i treni regionali (considerando che il 25% usufruisce di carrelli intercalati tra 2 casse di tipo Jacobs – in media un carro ha 2,33 assi) e per 3,6 per i treni merci (considerando che circa il 20% del parco dei carri merci presentano 2 assi anziché 4 cioè 2 carrelli).

I risultati di tale elaborazione sono riportati nella tabella che segue contenente le informazioni sul numero veicoli medio, numero assi-veicolo medio e numero assi totali medio, per le tre classi di business.

Tabella 19 - Numero veicoli, assi-veicolo e assi totali medi (2018)

| | N. Veicoli medi | N. Assi veicolo | N. Assi medi |
|------------|-----------------|-----------------|--------------|
| VL | 9,4 | 3,9 | 37 |
| VB | 6,1 | 3,6 | 22 |
| M | 17,4 | 3,6 | 63 |
| TOT | 8,6 | 3,7 | 32 |

Alla luce dei risultati ottenuti è stato possibile individuare il campo di esistenza delle masse assiali, compreso tra le 5 t/asse (carro pianale merci a vuoto) e le 22,5 t/asse (limite massimo di carico su linee di cat. D4). Generalmente i locomotori hanno carichi maggiori (17-22,5 t/asse) delle carrozze (11-17). I carri merci sono estremamente variabili. Gli elettrotreni hanno carichi assiali minori di 16, a meno che non montino carrelli Jacobs.

-OMISSIS-

Figura 20 - Campo di esistenza delle masse assiali medie ed esempi

Infine sono stati calcolati i volumi di traffico per ogni classe di massa assiale, sintetizzati nella tabella che segue.

Tabella 20 - Traffico per classe di massa assiale e business (2018)

VOLUMI

| T/asse | (5-14] | (14-16] | (16-18] | (18-20] | (20-22,5] | |
|------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| VL | 43,06 | 52,97 | 2,37 | 15,10 | 0,04 | 113,53 |
| VB | 91,73 | 72,66 | 37,87 | - | - | 202,26 |
| M | 21,45 | 4,30 | 5,92 | 7,69 | 8,41 | 47,76 |
| TOT | 156,23 | 129,93 | 46,16 | 22,79 | 8,44 | 363,55 |
| % | 43% | 36% | 13% | 6% | 2% | |
| Medie | 12,4 | 14,8 | 16,9 | 19,2 | 21,7 | 14,5 |

Sono state considerate le percorrenze dei materiali appartenenti ai 3 business (VL, VB, M). La massa assiale media è stata stimata dividendo la massa totale per il numero degli assi. Si tratta quindi di un carico statico.

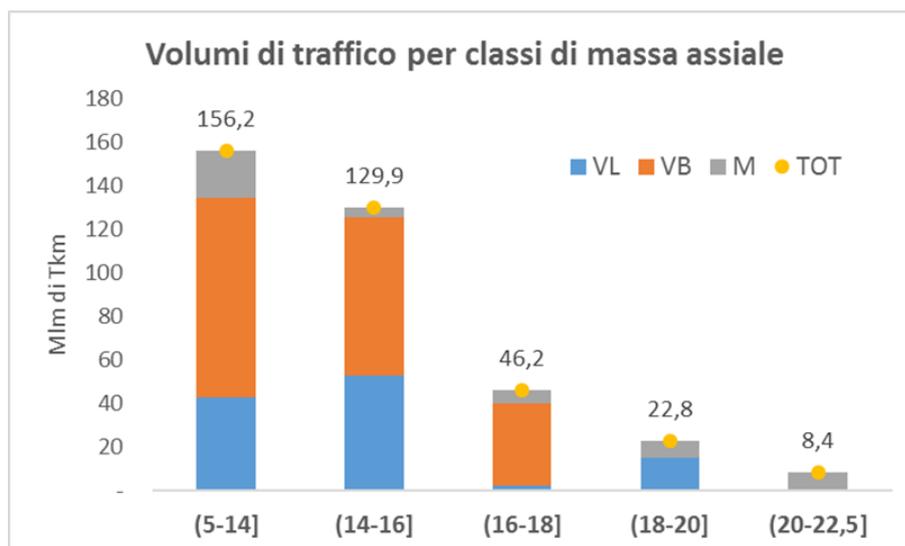


Figura 21 - Traffico per classe di massa assiale (2018)

Può risultare interessante infine confrontare i dati di traffico appena mostrati con le caratteristiche dell'infrastruttura, in particolare l'estensione della rete per classe di carico limite ammesso.

Tabella 21 - Estensione della rete per limiti di carico (2018)

| Limiti carico | T/asse | Lrete | % |
|---------------|---------|--------|------|
| A | 16 | 638 | 4% |
| B2 | 16-18 | 415 | 2% |
| C3 | 18-20 | 6.898 | 41% |
| D4 | 20-22,5 | 8.885 | 53% |
| Totale | | 16.835 | 100% |

5.3.4 Raggi di curvatura percorsi

Per quanto riguarda l'analisi dei raggi di curvatura, sono state analizzate le percorrenze su ciascuna tratta commerciale. Ogni tratta commerciale è stata suddivisa in curve e rettilinei attingendo al database RoMan, nel quale è contenuta una rappresentazione semplificata dell'infrastruttura. Gli intervalli scelti per rappresentare le curve sono desunti dal modello ingegneristico svizzero (che verrà illustrato successivamente), così come pure i coefficienti di lunghezza virtuale (CVL).

Tabella 22 - Traffico, estensione della rete e CVL per classi di curvatura

| Raggi (m) | Mln tkm | Lrete (km binario) | CVL |
|---------------|---------------|--------------------|-------------|
| R < 300 | 1,93 | 247 | 12,21 |
| R [300-400) | 5,42 | 663 | 3,02 |
| R [400-600) | 19,81 | 1.772 | 1,76 |
| R [600-1200) | 32,04 | 2.285 | 1,07 |
| R > 1200 | 42,23 | 2.248 | 1,00 |
| Lrett | 262,18 | 17.285 | 1,00 |
| Totale | 363,61 | 24.500 | 1,14 |

Tale rappresentazione consente di confrontare due linee di lunghezza e caratteristiche planimetriche differenti assegnando un peso per ciascun intervallo di curva.

Il coefficiente di lunghezza virtuale per l'intera rete è risultato pari a 1,14. Ciò corrisponde a dire che i volumi percorsi sulla rete RFI danno luogo al 114% dell'usura che gli stessi volumi creerebbero su una infrastruttura completamente rettilinea.

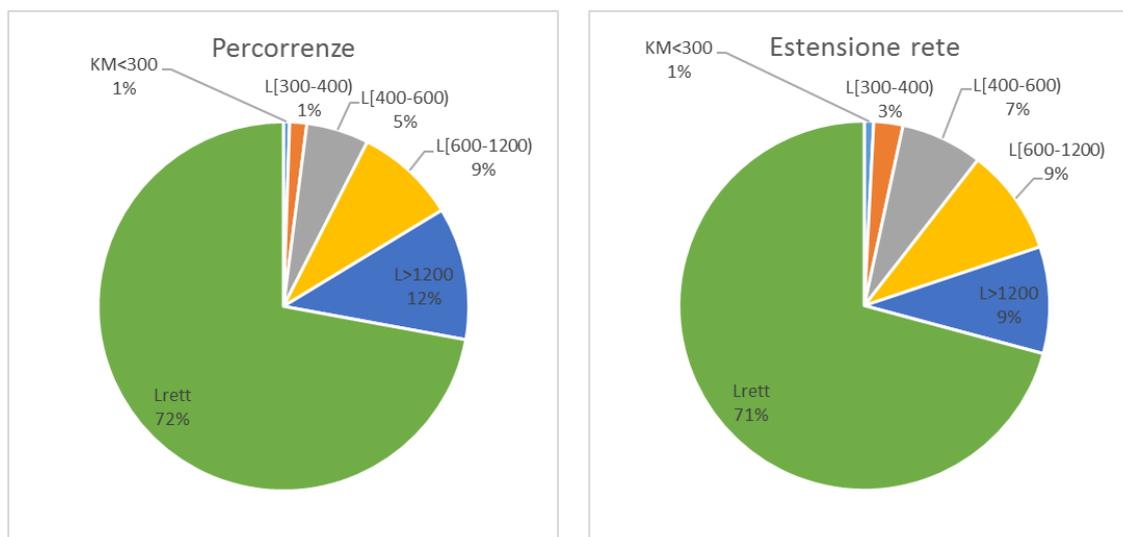


Figura 22 - Ripartizione del traffico e dell'estensione della rete per classi di curvatura

5.3.5 Pendenze affrontate

Al pari dell'analisi sui raggi di curvatura sono state analizzate le percorrenze su ciascuna tratta commerciale. Ogni tratta commerciale è stata suddivisa in livellette attingendo al database RoMan, nel quale è contenuta una rappresentazione semplificata dell'infrastruttura. Le livellette si intendono indipendenti dal verso di percorrenza (salita o discesa). Gli intervalli scelti per rappresentare le pendenze sono 5.

Tabella 23 - Traffico, estensione della rete e CVL per classi di pendenza

| P ‰ | Mln tkm | Lrete (km binario) | P _{MEDIA} ‰ |
|---------------|---------------|--------------------|----------------------|
| [2 – 3,5] | 8,11 | 1.081 | 2,5 |
| [1 – 2) | 35,19 | 3.030 | 1,5 |
| [0,5 – 1) | 74,14 | 4.941 | 0,75 |
| (0 – 5) | 152,81 | 9.502 | 0,25 |
| 0 (piano) | 93,31 | 5.946 | 0 |
| Totale | 363,61 | 24.500 | |

La pendenza media per l'intera rete è risultata pari a 5,4‰. La pendenza ponderata sui volumi, quindi quella che affronta in media un treno, è pari a 4,5‰.

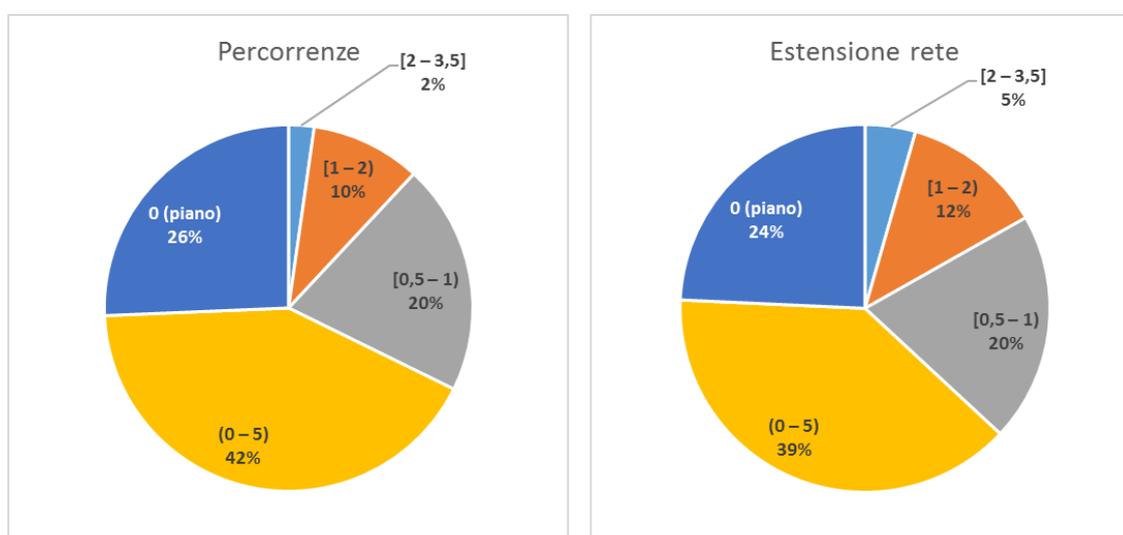


Figura 23 - Ripartizione del traffico e dell'estensione della rete per classi di pendenza

5.3.6 Tipo di trazione

Relativamente al tipo di trazione sono stati calcolati i volumi rendicontati relativi al traffico a trazione elettrica (TE) e diesel (TD) per ciascun anno dal 2014 al 2019, riassunti nella tabella di seguito.

Tabella 24 - Volumi di traffico per tipo di trazione dal 2014 al 2019

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TE | 293,3 | 303,1 | 312,6 | 318,5 | 327,2 | 335,9 |
| TD | 36,8 | 37,0 | 36,6 | 35,2 | 35,9 | 34,9 |
| TOT | 330,1 | 340,1 | 349,2 | 353,7 | 363,1 | 370,8 |
| % TE | 88,8% | 89,1% | 89,5% | 90,1% | 90,1% | 90,6% |

Si registra una crescita del traffico complessivo con un CAGR del 2,5% circa. Nel dettaglio, i volumi TE crescono con un CAGR del 2,9 % mentre i volumi TD diminuiscono con CAGR del 1,1%.

Alla luce di questi andamenti, determinati da un progressivo livello di elettrificazione delle linee secondarie e dei mezzi perlopiù del trasporto regionale, si può constatare quindi che la percentuale del traffico TE cresce in maniera lenta ma costante.

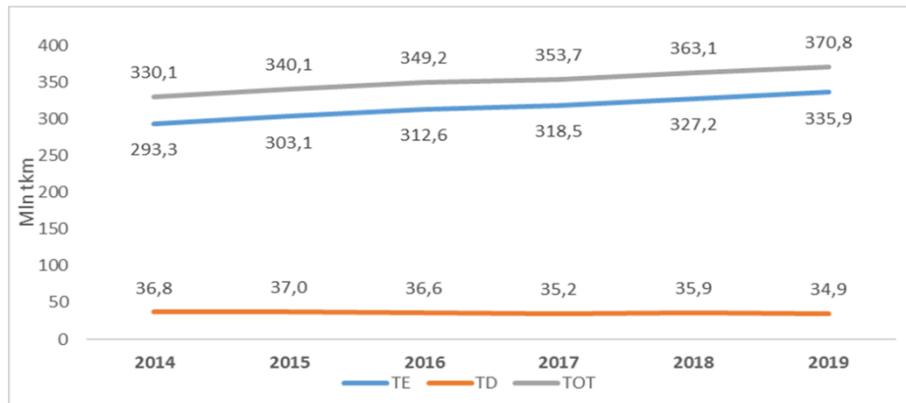


Figura 24 - Andamento dei volumi di traffico per tipo di trazione dal 2014 al 2019

5.3.7 Materiali rotabili

In conclusione della presentazione delle caratteristiche del traffico si ritiene opportuno fornire un quadro dei materiali rotabili che percorrono la rete. A tal fine si riportano di seguito i dati a disposizione relativi al 2018 suddivisi per business.

Lunga Percorrenza

Per quanto riguarda la lunga percorrenza le composizioni bloccate costituiscono la maggioranza dei materiali impiegati (circa 65%), con una netta prevalenza degli ETR 1000, ETR 500 e ETR AGV575 (che da soli coprono il 48% del totale).

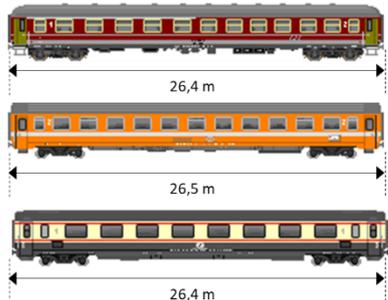
Tabella 25 - Materiali rotabili lunga percorrenza

| Composizione | Descrizione | Peso tot. (t) | Loco | Unità rimorchiate | N. Assi (di cui motori) | Mln Tkm | % |
|------------------------|-----------------|---------------|-------|-------------------|-------------------------|---------|-------|
| Composizioni Ordinarie | IC - FB | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 1000 AV | Frecciarossa | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 500 AV | Frecciarossa | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR AGV575 AV | Italo AGV | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 600 | Frecciargento | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 675 | Italo Evo | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 485 | Frecciargento | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 1000 + ETR 1000 AV | Frecciarossa | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 460 P | Frecciargento | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 610 | Int.li Svizzera | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 470 | Frecciargento | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| TGV-R SNCF | TGV | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 700 AV | Frecciargento | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| Altre | | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| Totale | | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |

-OMISSIS-

Figura 25 - Ripartizione materiali rotabili lunga percorrenza per volumi di traffico

I dati relativi alle composizioni ordinarie sono evidentemente variabili. Si riportano tuttavia le caratteristiche di carrozze tipo, impiegate per questo tipo di composizioni.



| | Peso a vuoto (t) | Interperno (m) | Passo carrelli (m) | Carico assiale a vuoto (t) | Vmax (km/h) |
|--------------|------------------|----------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| UIC X | 40-48 | 19 | 2,5 | 10-12 | 160-180-200 |
| UIC Z1 | 36-42,6 | 19 | 2,6 | 9-10,65 | 200 |
| Gran confort | 52 | 19 | 2,5 | 13 | 200 |

Figura 26 - Caratteristiche carrozze tipo lunga percorrenza

Breve Percorrenza

La breve percorrenza è prevalentemente operata con materiali a composizione ordinaria. Oltre la metà dei volumi (51,4%) registrati nel 2018 è difatti stata operata in composizione ordinaria, con mezzo di trazione E464. La rimanente parte è invece piuttosto eterogenea, con più di 10 materiali diversi impiegati tra l'1 e il 5% dei volumi totali.

Tabella 26 - Materiali rotabili breve percorrenza

| Composizione | Descrizione | Peso tot. (t) | Loco | Unità rimorchiate | Numero Assi (di cui motori) | Mln Km NPA | % |
|--------------|--------------------|---------------|-------|-------------------|-----------------------------|------------|-------|
| E464 | Comp. Ordinaria TE | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALe 501/502 | Minuetto elettrico | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALn 501/502 | Minuetto diesel | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 425 | Jazz | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALe 506/426 | TAF | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALn 663 | Automot. diesel | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALe 711/710 | TSR | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALn 668 | Automot. diesel | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALe 582 | Automot. elettrica | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ATR 220 | Swing | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 170 | Flirt | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALe 642 | Automot. elettrica | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 350 | Flirt | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| D445 | Comp. Ordinaria TD | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 343 | Flirt | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ATR 365 | Pendolino Sardegna | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 563 | Civity Friuli | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALe 724 | Automot. elettrica | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |

| | | | | | | | |
|---------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|---------------|-------------|
| ETR 524 | Flirt | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ALn 776 | Automotrice FCU | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 324 | Jazz | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ETR 526 | Jazz | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| ATR 125 | GTW | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| Altre | | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. | omis. |
| TOTALE | | | | | | 197,10 | 100% |

-OMISSIS-

Figura 27 - Ripartizione materiali rotabili breve percorrenza per volumi di traffico

Anche per la breve percorrenza, che come visto è fortemente caratterizzata dalle composizioni ordinarie, sono di seguito riportate le caratteristiche delle carrozze tipo impiegate.

| | Peso a vuoto (t) | Interperno (m) | Passo carrelli (m) | Carico assiale a vuoto (t) | Vmax (km/h) | Posti 2° cl (di cui sedute) |
|---|------------------|----------------|--------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------------|
|  26,4 m | 42 | 19 | 2,4 | 10,5 | 140 | 170 (100) |
|  26 m | 50 | 20 | 2,5 | 12,5 | 160 | (126) |
|  24,3 m | 42 | 17,8 | 2,4 | 10,5 | 140 | (161) |
|  26,4 m | 39 | 19 | 2,4 | 9,8 | 160 (TE) 130 (TD) | (60) |
|  | 38 | 19 | 2,4 | 9,5 | 160 | (84) |

Figura 28 - Caratteristiche carrozze tipo breve percorrenza

Merci

Per quanto riguarda il trasporto merci, i mezzi E652 e E483 coprono una parte importante dei volumi totali (rispettivamente 29% e 16%). La parte rimanente è tuttavia quasi equamente distribuita tra oltre 15 materiali diversi. Nella tabella successiva vengono riportati i dati relativi esclusivamente al mezzo di trazione, non avendo a disposizione a sistema dati relativi a ciascun carro in composizione.

Tabella 27 - Mezzi di trazione merci

| Tipo Mezzo Trazione | Peso tot. (t) | Numero Assi | MIn Km NPA | % |
|---------------------|---------------|-------------|------------|-------|
| E652 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E483 | omis. | omis. | omis. | omis. |

| | | | | |
|------------------------|-------|-------|--------------|-------------|
| E189 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E405 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E193 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E190 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E191 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E484 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E412 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E633 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E655 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E186 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E474 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E436 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| E656 | omis. | omis. | omis. | omis. |
| Vari in traz. multipla | omis. | omis. | omis. | omis. |
| Altri mezzi | omis. | omis. | omis. | omis. |
| TOTALE | | | 47,76 | 100% |

-OMISSIS-

Figura 29 - Ripartizione mezzi di trazione merci per volumi di traffico

5.4 Analisi dei modelli

Nel presente paragrafo vengono presentati ed analizzati i modelli presenti in letteratura tecnica per la quantificazione del danno dovuto al passaggio del treno, considerati ai fini del modello ingegneristico in oggetto.

Per il danno alla sovrastruttura ferroviaria:

- Metodo Svizzero
- Aggiornamento del Metodo Britannico

Per il danno al sistema di trazione elettrica:

- Modello di usura LdC Politecnico Milano

In relazione al modello ingegneristico oggetto del presente documento, è importante evidenziare quali siano i settori di specializzazione i cui costi sono stati considerati, perché direttamente dipendenti dal passaggio dei treni, e quali invece siano stati esclusi, anche nell'ottica di sottolineare eventuali affinità tra il modello stesso e quelli disponibili in letteratura.

Tra i primi rientrano:

1. Armamento o sovrastruttura ferroviaria (costi inclusi sia nel modello Svizzero che quello Britannico)
2. Apparatì di segnalamento (costi non esplicitamente inclusi nel modello Svizzero, ma le cui considerazioni discendono dal modello Britannico)
3. Trazione elettrica (costi inclusi nel modello del Politecnico di Milano)

Tra i settori non considerati nel modello:

4. Opere civili
5. Impianti di comunicazione

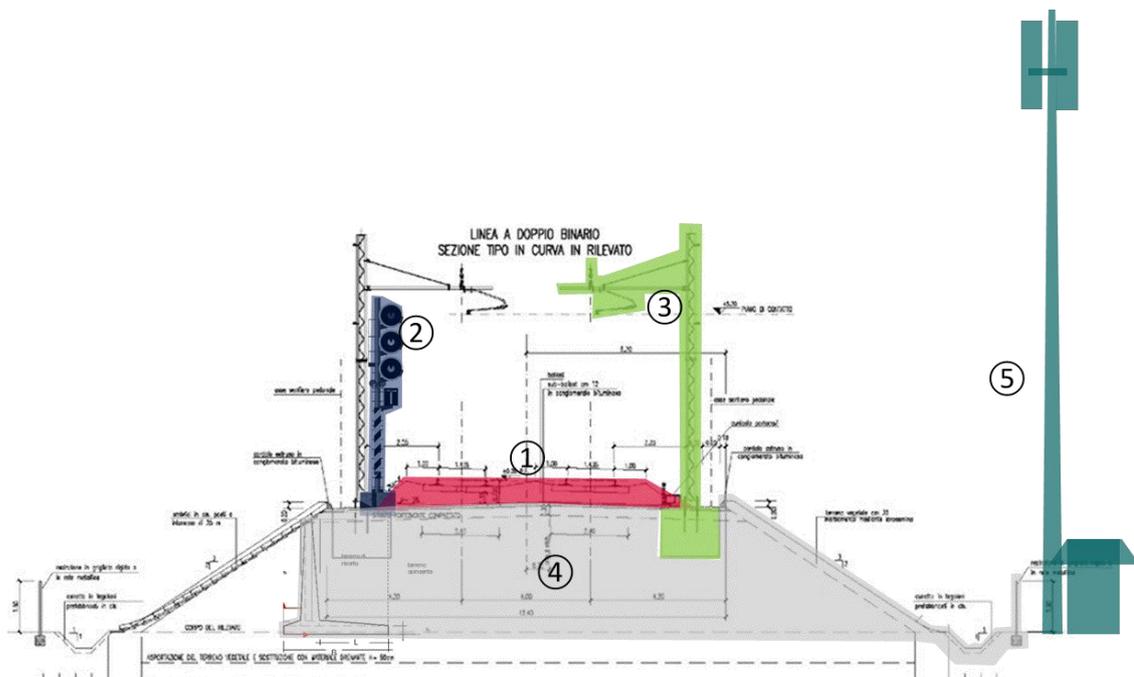


Figura 30 – Schematizzazione degli elementi ricadenti in ciascun settore di specializzazione in una generica sezione di linea (rif. elenco numerato paragrafo precedente)

5.4.1 Il modello Svizzero

Il modello svizzero è il metodo usato dai gestori dell'infrastruttura svizzera per determinare il costo diretto dei singoli veicoli (Rif. UFT Confederazione Svizzera «Prezzo di base in funzione dell'usura nel sistema dei prezzi delle tracce 2017 - Istruzioni per la determinazione dei prezzi dei veicoli») che compongono il «Prezzo Base di Usura» indicato nei Prospetti Informativi Rete dei gestori svizzeri.

Il Metodo Svizzero calcola il costo associato all'usura dei binari sulla base di cinque diversi tipi di danneggiamento. A ciascun tipo di danneggiamento è associato un fattore che trasforma il danno in costi di ripristino. Gli effetti di danneggiamento sono riportati nella seguente figura e sono:

- **D1** Danneggiamento massiciata / spostamento rotaie;
- **D2**: Difetto di rotaia del binario diritto (es: ondulazione, fatica da contatto per rotolamento in rettilineo);
- **D3**: Difetto di rotaia del binario diritto dovuto a trazione;
- **D4**: Difetto di rotaia e usura della rotaia in curva (es: fatica da contatto per rotolamento in curva);
- **D5**: Degrado dello scambio dovuto a forze verticali e orizzontali.

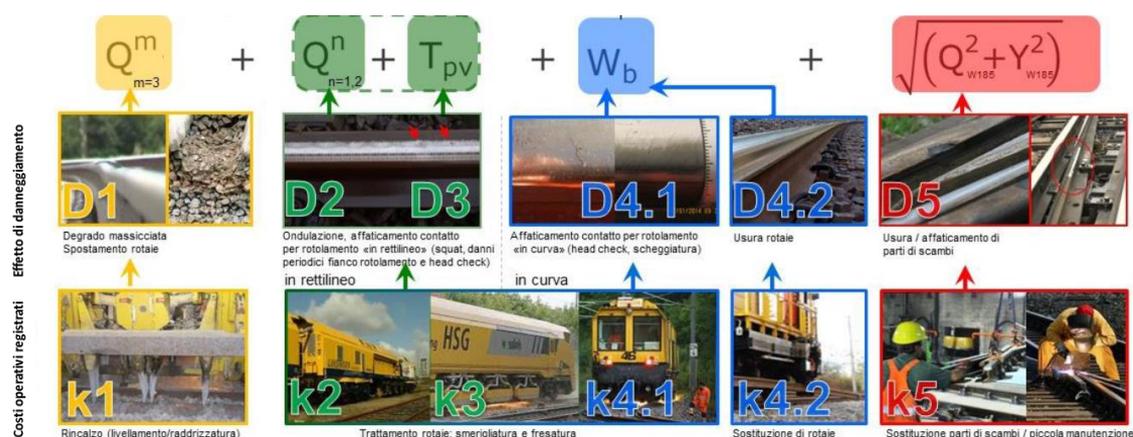


Figura 31 - Modello svizzero di danneggiamento: effetti di danneggiamento sulle diverse parti di infrastruttura e azioni manutentive correlate

I danni al binario considerati dal metodo svizzero sono associati ai veicoli transitanti sulla rete in base alle caratteristiche proprie del veicolo. Le caratteristiche dei veicoli considerate dal modello svizzero ai fini dell'usura sono:

- $Q(V)$: forza dinamica di contatto della ruota
- T_{pv} : indice della forza di trazione («Traction power value»)
- W_b : energia specifica di attrito nel contatto ruota-rotaia (Calcolata tramite simulazioni MBS)
- Q_{W185} : forza verticale della ruota sulla rotaia durante il transito sugli scambi
- Y_{W185} : forza orizzontale della ruota sulla rotaia durante il transito sugli scambi (Calcolata tramite simulazioni MBS)

La forza dinamica alla ruota $Q(V)$ dipende dalla velocità V . Si applica la seguente relazione:

$$Q(V) = a_Q \cdot V + b_Q, \text{ con } V [\text{kmh}^{-1}]$$

Come punto di partenza per la determinazione dei coefficienti a_Q e b_Q si considerano:

$$a_Q = 0,0437445 m_R \frac{\sqrt{m_R+245} - 5,525910}{m_R+245},$$

con m_R [kg] pari alla massa non sospesa per ruota

$$b_Q = Q_0$$

con Q_0 [kN] pari al carico statico sulla ruota ovvero il rapporto tra la massa del treno ed il numero delle ruote.

L'influenza delle grandezze descritte in termini di danneggiamento D_j è definita dalle rispettive leggi, illustrate più in dettaglio nei seguenti paragrafi. Per mettere in relazione i danneggiamenti D_j con i costi si applicano i cosiddetti fattori di calibratura dei costi k_j .

Nella fase successiva si applicano alle grandezze di interazione le diverse leggi di danneggiamento per calcolare i coefficienti di danneggiamento da D1 a D5.

Danneggiamento massicciata / spostamento rotaie D1

La relazione tra la forza dinamica di contatto della ruota $Q(V)$ e il danneggiamento massicciata / spostamento rotaie è espressa secondo la relazione empirica $D1 \sim Q^3$.

Il danno D1 è quindi espresso secondo la seguente relazione per ogni sala montata n_{RS} :

$$D1 = n_{RS} \cdot Q(V)^3$$

Per D1 ogni sala montata è considerata rilevante per il danneggiamento.

Difetto di rotaia del binario diritto D2

La relazione tra la forza dinamica di contatto della ruota $Q(V)$ e il danno di fatica da contatto per rotolamento è espressa secondo la relazione empirica $D1 \sim Q^{1,2}$. Il danno D1 è quindi espresso secondo la seguente relazione per ogni sala montata n_{RS} :

$$D2 = n_{RS} \cdot Q(V)^{1,2}$$

Per D2 ogni sala montata è considerata rilevante per il danneggiamento.

Difetto di rotaia del binario diritto dovuto a trazione D3

Empiricamente l'indice della forza di trazione o Traction power value (Γ_{pv}) è considerato un indicatore del danno di fatica da contatto per rotolamento indotto dalla trazione sotto la ruota motrice.

$$D3 = T_{pv} = \frac{P_{ruota}}{A_{ruota,eff}} [KW/mm^2]$$

Con P_{ruota} , Potenza sulla ruota [kW], pari al rapporto tra potenza di trazione ed il numero di ruote motrici e $A_{ruota,eff}$ [mm²] calcolata come segue

$$A_{ruota,eff} = \frac{8,3593707 \cdot \vartheta + 4,1874191}{\vartheta^{0,8571601}} \cdot \left(\frac{Q_0}{0,3 + \frac{1}{R_{ruota}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\vartheta = \arccos \left(\frac{R_{ruota} - 0,3}{R_{ruota} + 0,3} \right)$$

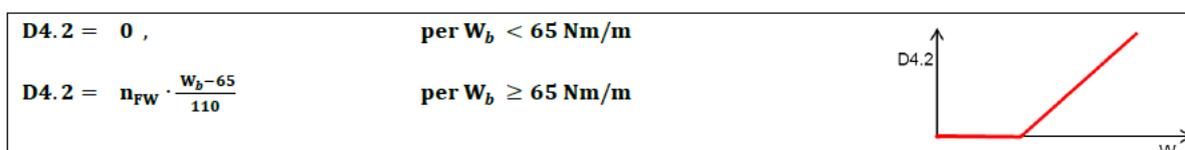
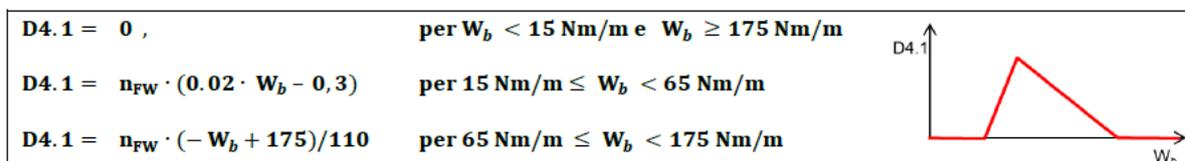
Difetto di rotaia e usura della rotaia in curva D4.1, D4.2

L'energia di attrito applicata nel contatto ruota/rotaia è considerata un meccanismo comprovato che provoca danno di fatica da contatto per rotolamento D4.1 o l'usura D4.2 in curva.

L'energia specifica di attrito W_b , necessaria al calcolo di D4.1 e D4.2, è determinata mediante simulazioni MBS, in funzione della tipologia di carrello, di ruota e di rotaia.

Il potenziale di danneggiamento complessivo si ottiene dalla moltiplicazione per il numero di sale montate di guida (n_{FW}) di uno stesso telaio degli organi di rotolamento, poiché solo queste sono considerate rilevanti per il danneggiamento.

Le formule di D4.1 e D4.2 sono riassunte nelle figure seguenti:



Degrado dello scambio dovuto a forze verticali e orizzontali D5

Le azioni sugli scambi sono composte da forze orizzontali (Y) e verticali (Q). La forza orizzontale Y_{w185} indotta dalla ruota principale esterna è ottenuta da simulazioni MBS per una corsa lungo una curva a S di 185 m. La forza verticale Q_{w185} è definita per la massima velocità ammissibile V_{Wamm} (es. 30, 60 o 100 km/h) per il transito sugli scambi in posizione deviata.

$$D5 = n_{FW} \cdot \sqrt{0,5 \cdot Q(V_{Wamm})^2 + 0,5 \cdot Y_{w185}^2}$$

Fattori di calibratura dei costi

A ogni tipo di danneggiamento (da D1 a D5) è associato un intervento di manutenzione e dei costi relativi per l'eliminazione dei danni o la prevenzione degli stessi. Tramite dei fattori di calibratura (da k1 a k5) differenziati per raggio di curvatura/rettilineo (raggio >12.000 m) del tratto di binario considerato si ottengono i costi associati a ciascun tipo di danno. Il prezzo di base in funzione dell'usura che un veicolo è tenuto a pagare al chilometro su una di queste sezioni si calcola come la somma dei danneggiamenti moltiplicati per i fattori di calibratura dei costi.

$$\text{Costo di Usura} = \sum_j k_j \cdot D_j \text{ con } j = 1, 2, 3, 4.1, 4.2, 5$$

Il costo di usura al chilometro è calcolato per ciascun tratto identificato da un intervallo di raggio di curvatura R ($R < 300$; $300 < R < 400$; $400 < R < 600$; $600 < R < 1200$, rettilineo). Il costo totale è dato dalla somma dei costi associati a ciascun tratto identificato da una coppia di intervalli Raggio-Velocità.

| Inter- vallo | Fattori di calibratura dei costi | | | | | |
|-----------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | k1 | k2 | k3 | k4.1 | k4.2 | k5 |
| Rettilineo | 0,00000000883 | 0,000002818560 | 0,003379926726 | 0 | 0 | 0,000234518869 |
| R<300 | 0,000000010785 | 0 | 0 | 0,081359599719 | 0,058656594313 | 0,000234518869 |
| R300-400 | 0,000000002667 | 0 | 0 | 0,010953481857 | 0,023825333808 | 0,000234518869 |
| R400-600 | 0,000000001556 | 0 | 0 | 0,010953481857 | 0,023825333808 | 0,000234518869 |
| R600-1200 | 0,000000000949 | 0 | 0 | 0,010953481857 | 0 | 0,000234518869 |

Figura 32: Panoramica dei fattori di calibratura dei costi

5.4.2 Il modello Britannico

Sviluppato nel 2013 da SERCO per l'ORR e basato sul VTISM, il modello Britannico è stato giudicato valido dall'ORR, tuttavia non è stato adottato nel CP5 (periodo di controllo 2013-2018). Il modello prevede una formula ibrida dalla quale è possibile intuire immediatamente la sua principale peculiarità, ovvero un peso maggiore del carico assiale rispetto alla velocità.

$$\text{Danno specifico} = D_{\text{asse-miglia}} = 0,473 \cdot e^{0,133 \cdot A} + 0,015 \cdot V \cdot U - 0,009 \cdot V - 0,284 \cdot U - 0,442 \left[\frac{\text{Danno}}{\text{Asse} \cdot \text{miglio}} \right]$$

A = massa assiale [t], con range 5 ÷ 25 t

V = velocità operativa [mph], con range 25 ÷ 100 mph (40 ÷ 160 km/h)

U = massa non sospesa [t/asse], con range 1 ÷ 3 t

5.4.3 Confronto tra modello Britannico e Svizzero

Si riporta nelle tabelle di seguito un confronto tra gli abachi di danneggiamento derivanti dai due modelli presentati a conferma della loro affinità a livello di risultati. Si noti che in entrambi i metodi il danno è espresso in scala adimensionale, sebbene in scale diverse.

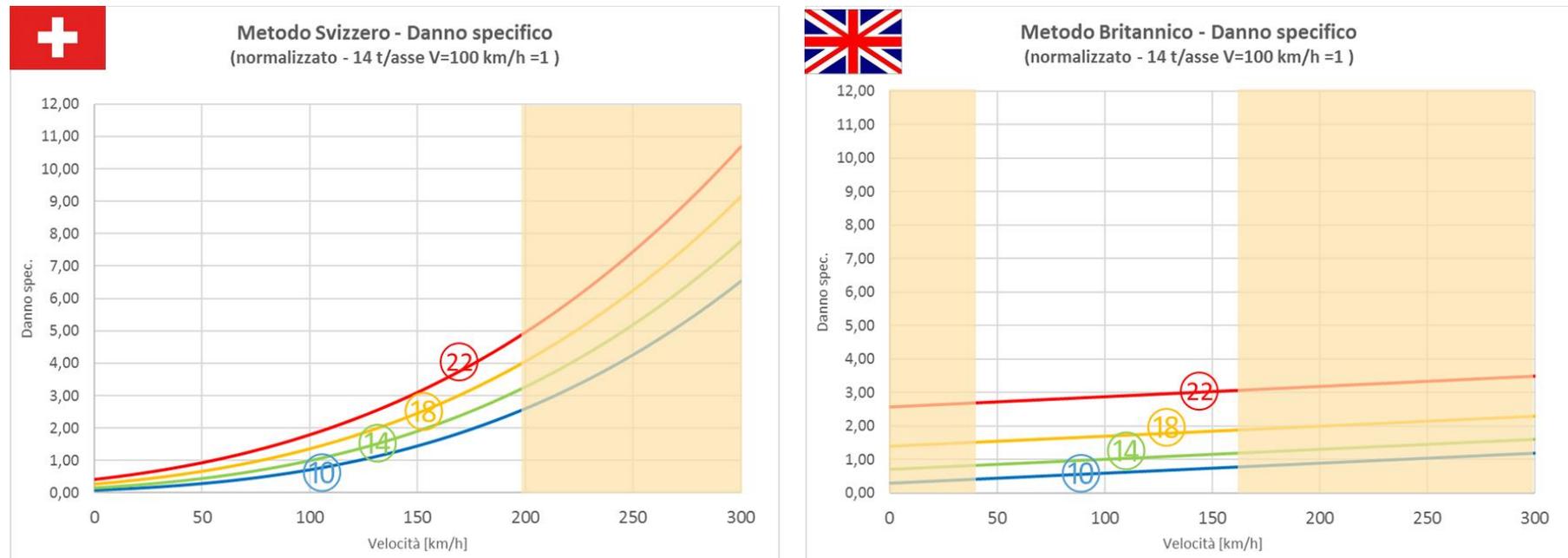


Figura 33 – Indice di Danno specifico (singolo asse) normalizzato per ciascuna massa assiale (10-14-18-22 t/a)

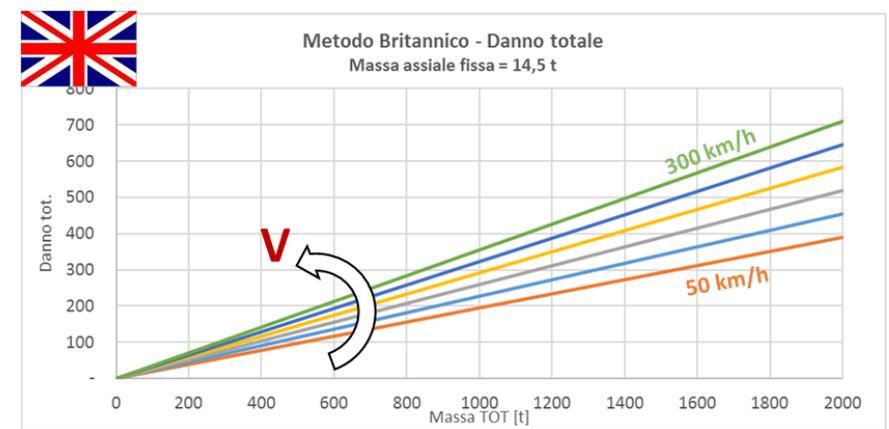
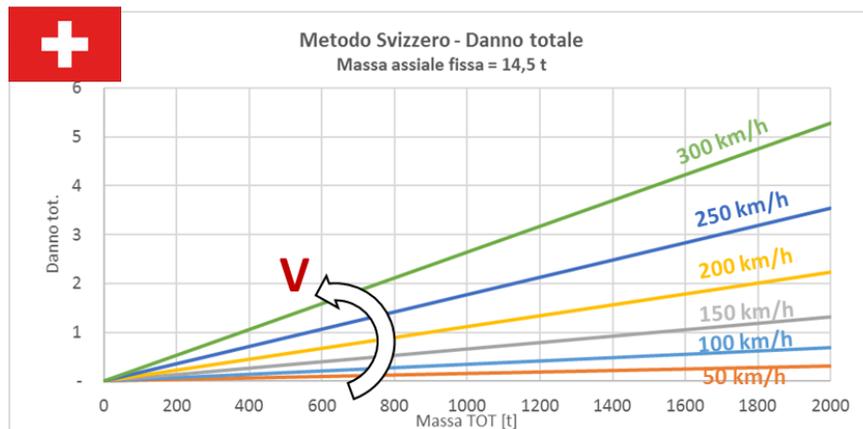
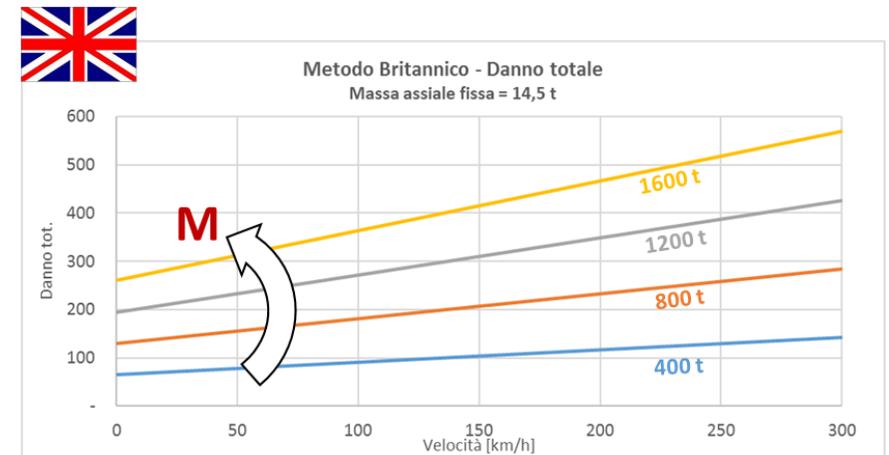
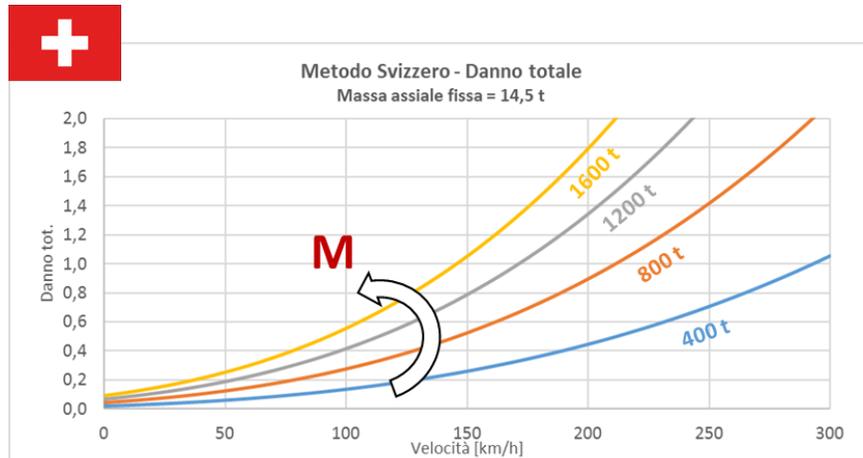


Figura 34 - Danno totale (tutti gli assi) – parametro fisso massa assiale (14,5 t)

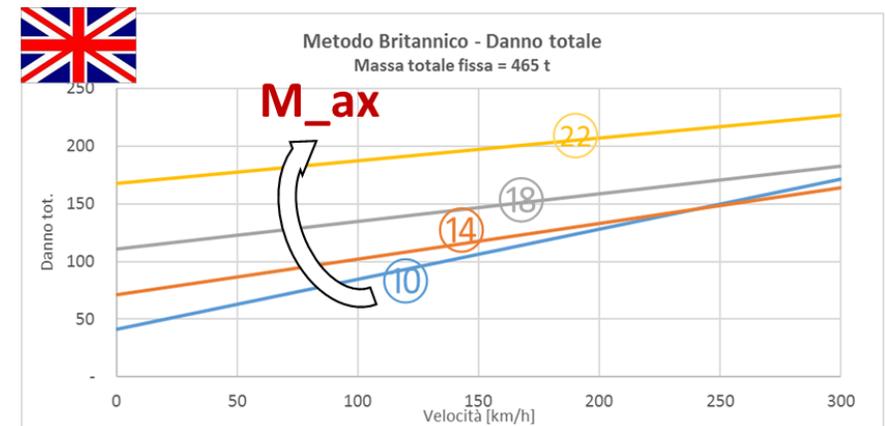
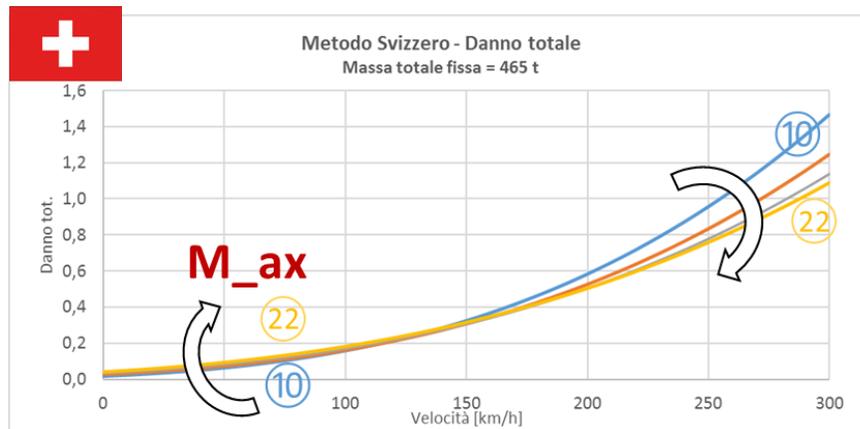
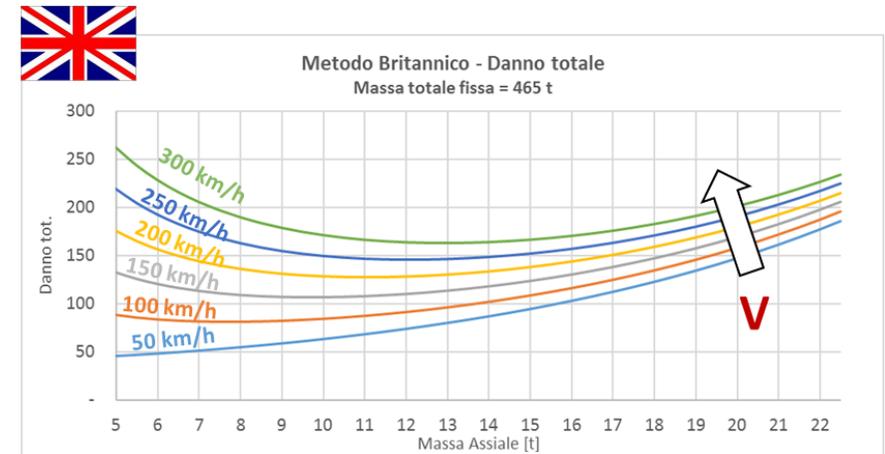
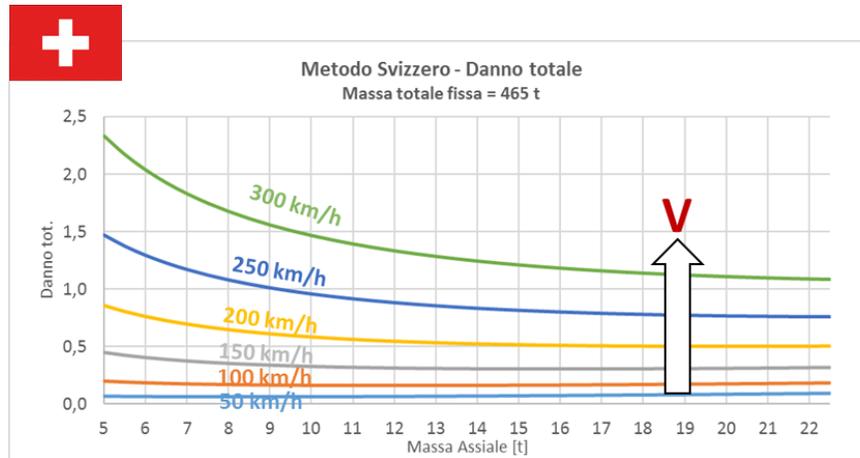


Figura 35 - Danno totale (tutti gli assi) – parametro fisso massa totale (465 t)

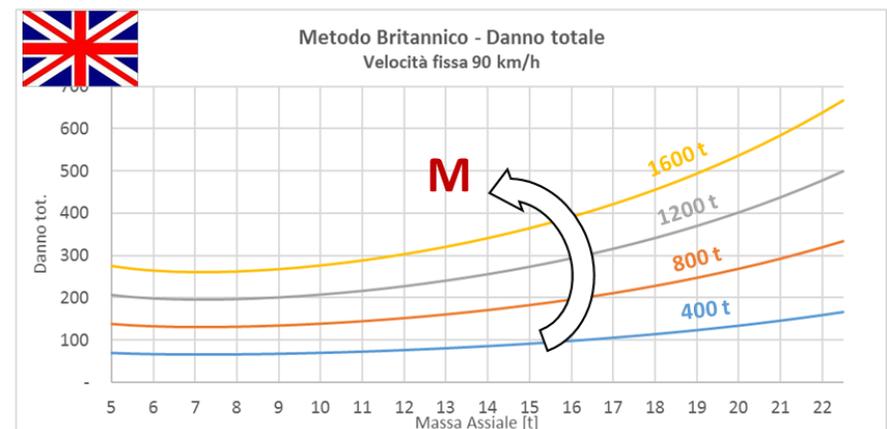
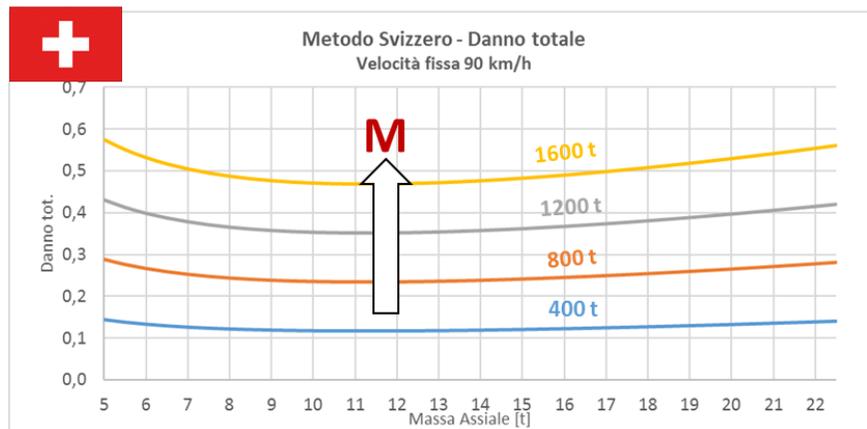
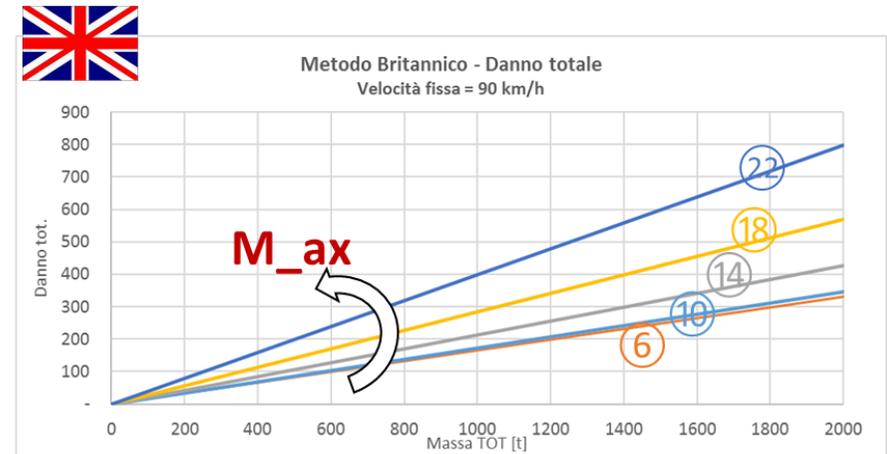
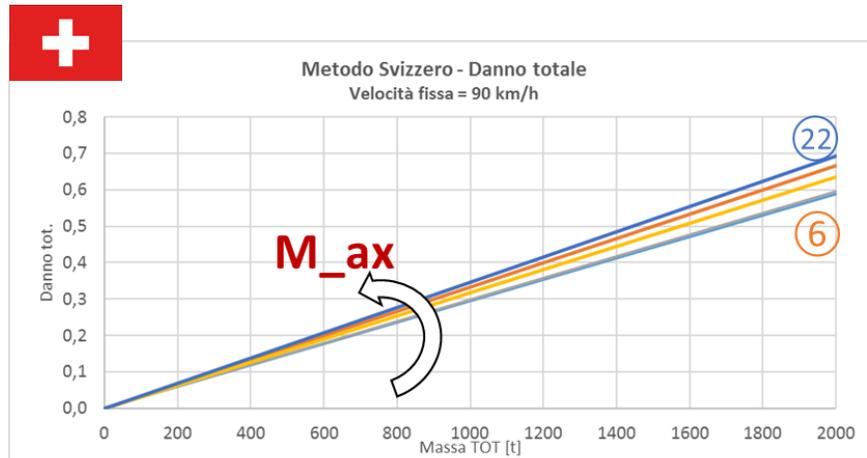


Figura 36 - Danno totale (tutti gli assi) – parametro fisso velocità di marcia (90 km/h)

5.4.4 Il modello di usura della linea di contatto

Il modello di usura della linea di contatto rinvenuto in letteratura (Rif. G. Bucca, A. Collina, «*Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model*» 2015) modella i meccanismi di usura della linea di contatto e fornisce la formula per il calcolo del tasso unitario di consumo *Normal Wear Rate* (NWR), definito come rapporto tra il volume di filo usurato (mm^3) e la distanza di scorrimento (km).

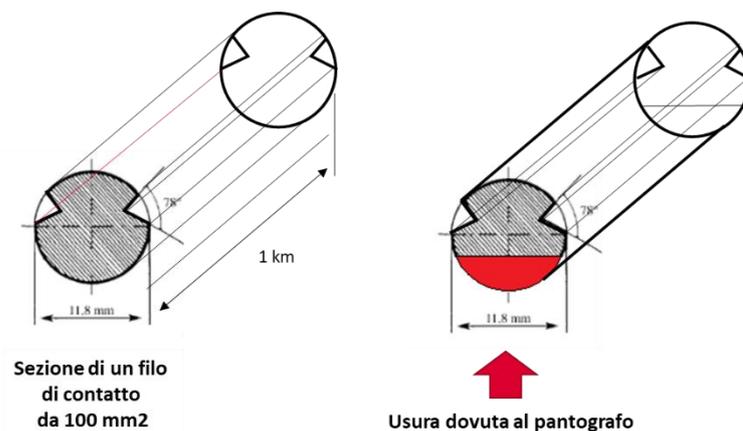


Figura 37 - Usura del filo di contatto

Si riporta di seguito, per pronta consultazione, un quadro delle tipologie di sistemi di alimentazione elettrica in uso sulla rete gestita da RFI (funi portante e linea di contatto)

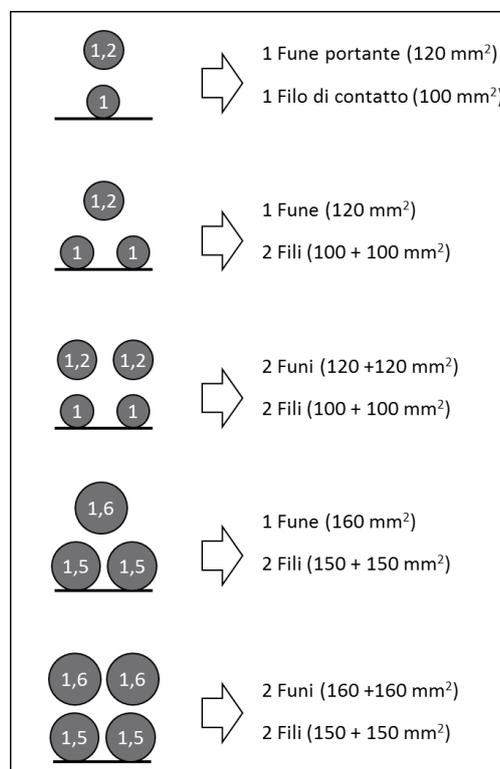


Figura 38: tipologie di sistemi di alimentazione elettrica in uso sulla rete gestita da RFI

Il modello messo a punto individua tre contributi all'usura del filo di contatto: uno meccanico, uno elettrico ed uno relativo all'arco elettrico.

$$NWR = \underbrace{k_1 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{I_C}{I_0} \right) \right)^{-\alpha} \cdot \left(\frac{F_m}{F_0} \right)^\beta \cdot \frac{F_m}{H}}_{\text{Contributo meccanico}} + \underbrace{k_2 \cdot \frac{R_C (F_m) \cdot I_C^2}{H \cdot V} \cdot (1 - u)}_{\text{Contributo elettrico}} + \underbrace{k_3 \cdot u \cdot \frac{V_a \cdot I_C}{V \cdot H_m \cdot \rho}}_{\text{Contributo arco elettrico}}$$

| Symbol | Meaning | Cu-ETP |
|----------|--|--------|
| F_m | Mean value of contact force [N] | - |
| k_1 | Weight of mechanical contribution to the whole wear | 22.4 |
| k_2 | Weight of electrical contribution to the whole wear | 10.3 |
| k_3 | Weight of contribution due to electrical arcs to the whole wear | 0.4 |
| α | Coefficient of dependence for the mechanical contribution on the electrical current | 4.5 |
| β | Coefficient of non-linear dependence of mechanical contribution on the mean value of contact force | 1.8 |
| I_0 | Reference value of electrical current [A] | 500 |
| I_C | Nominal electrical current during tests [A] | - |
| F_0 | Reference value of contact force [N] | 90 |
| H | Hardness of material [N/mm ²] | 700 |
| R_C | Electrical contact resistance between strip and wire (Eq. 3) [Ω] | - |
| V | Sliding speed in the tests [m/s] | - |
| V_0 | Reference value of sliding speed [m/s] | 44.4 |
| u | Decimal fraction value of percentage of contact loss | - |
| V_a | Electrical arc voltage [V] | 50 |
| H_m | Latent heat of fusion for copper [kJ/kg] | 205 |
| ρ | Density of copper [kg/m ³] | 8940 |

Figura 39 - Modello di usura del filo di contatto

Si riporta un grafico relativo all'andamento del NWR in funzione dell'intensità di corrente, fissate la velocità di strisciamento del pantografo (nel grafico 160 km/h) e la forza di contatto pantografo/filo (90 N).

Viene escluso dalla trattazione il contributo dell'arco elettrico perché connesso a una situazione di anomalia della captazione dell'energia.

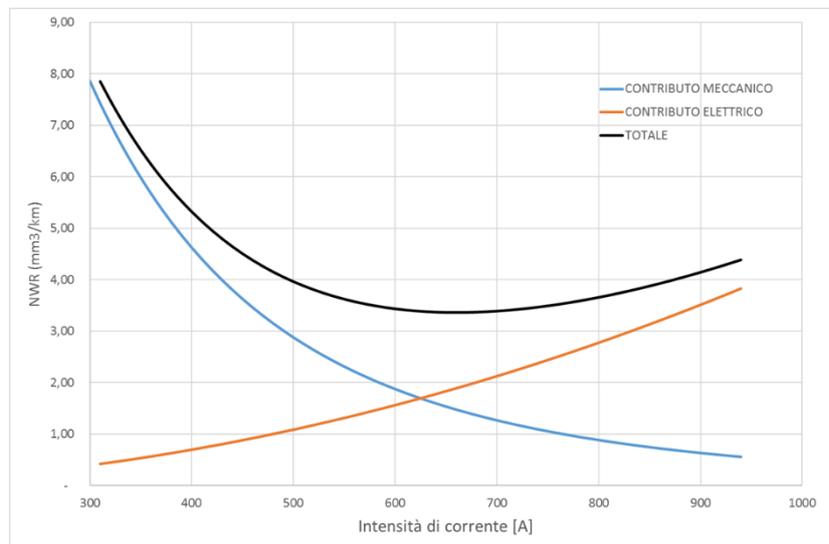


Figura 40 - Andamento del NWR in funzione del contributo meccanico ed elettrico

Con l'obiettivo di simulare l'andamento del NWR in funzione della velocità di strisciamento del pantografo (e quindi la velocità di marcia del convoglio) si ipotizzano le funzioni di forza di contatto pantografo-linea di

contatto in funzione della velocità di strisciamento, in riferimento al limite massimo della forza di contatto previsto da apposita Specifica Tecnica di Interoperabilità, mostrata in figura 41.

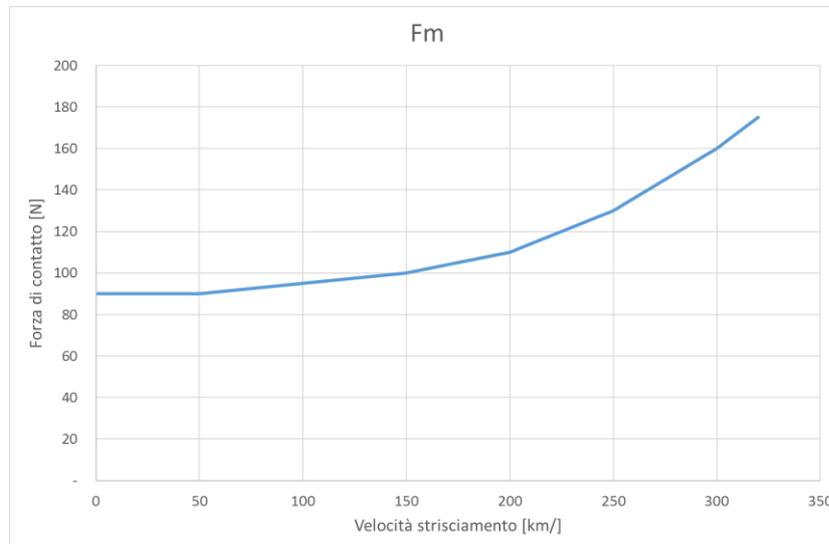


Figura 41 - Forza di contatto pantografo-linea di contatto

Si assume inoltre l'andamento dell'intensità di corrente in funzione della velocità di strisciamento come lineare e compreso tra 300 e 900 A.

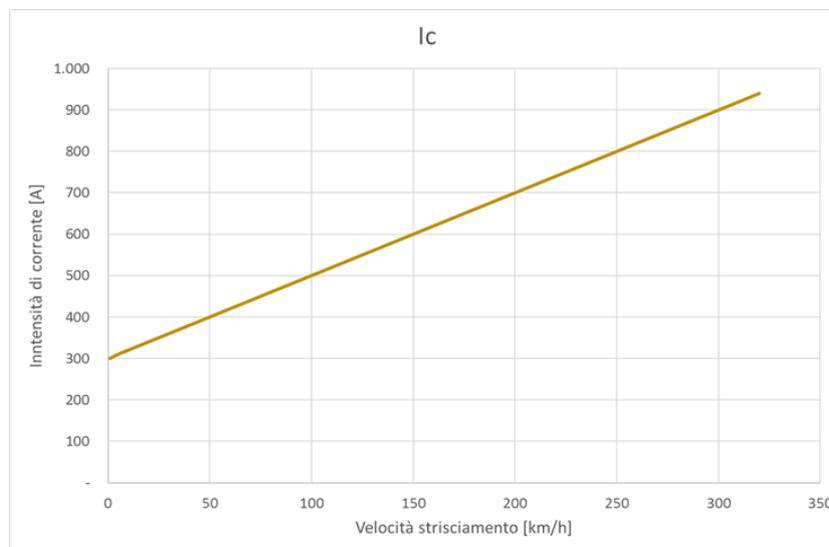


Figura 42 - Ipotesi di assorbimento di corrente in funzione della velocità

A questo punto, riportando in un grafico l'andamento del NWR, si può osservare come questo decresca rispetto alla velocità, almeno fin quando le forze di contatto tra pantografo e linea di contatto non iniziano ad aumentare significativamente.

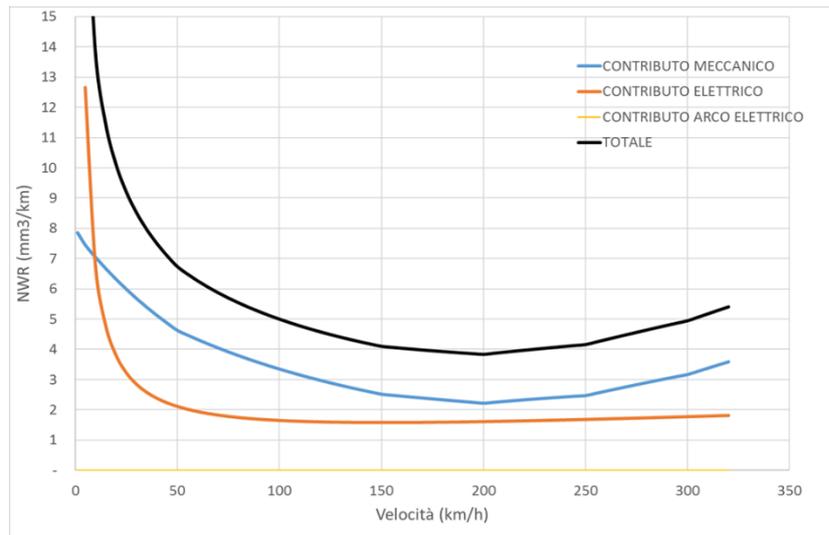


Figura 43 - Andamento del NWR in funzione della velocità di strisciamento del pantografo

Il modello presentato sembra fornire risultati in linea con quanto evidenziato dalle osservazioni empiriche. Si riporta in tal senso un prospetto sulla frequenza di sostituzione del filo di contatto su alcune linee in funzione dello spessore residuo e del numero di treni che ha richiesto un intervento di sostituzione.

Tabella 28 - Consumo della linea di contatto

| Tratta | Tipologia | Velocità media [km/h] | Treni [numero/(giorno*binario)] | Sezione LdC [mm²] | Tipo di filo sagomato [mm²] | Diametro [mm] | Intervento [mm] | Sostituzione | | Consumo [mm/treno] |
|-----------------------|-----------|-----------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------|-----------------|--------------|---------|--------------------|
| | | | | | | | | [anni] | [treni] | |
| Orte Nord-Rovezzano | A | 250 | 90 | 540 | 150 | 14,42 | 9,2 | 10 | 328.500 | 0,000016 |
| Casilina-Formia | A | 153 | 60 | 440 | 100 | 11,96 | 7,9 | 7 | 153.300 | 0,000026 |
| Rimini-Porto d'Ascoli | B | 153 | 86 | 440 | 100 | 11,96 | 7,9 | 7 | 219.730 | 0,000018 |
| Fortezza-Brennero | Valico | 96 | 78 | 610 | 150 | 14,42 | 9,2 | 5 | 142.350 | 0,000037 |
| Peri-Fortezza | Valico | 138 | 97 | 440 | 100 | 11,96 | 7,9 | 7 | 247.835 | 0,000016 |
| Arona-Domodossola | Valico | 118 | 45 | 610 | 150 | 14,42 | 9,2 | 10 | 164.250 | 0,000032 |
| Rho-Arona | B | 141 | 103 | 440 | 100 | 11,96 | 7,9 | 7 | 263.165 | 0,000015 |
| Foligno-Terontola | C | 114 | 36 | 320 | 100 | 11,96 | 7,9 | 10 | 131.400 | 0,000031 |
| Torino-Alessandria | C | 154 | 80 | 440 | 100 | 11,96 | 7,9 | 10 | 292.000 | 0,000014 |

Dall'analisi dei dati in tabella 28 non scaturisce una correlazione netta tra il consumo della linea di contatto e la velocità della linea, tuttavia sembrerebbe che il consumo diminuisca all'aumentare delle velocità, come previsto dal modello del Politecnico di Milano.

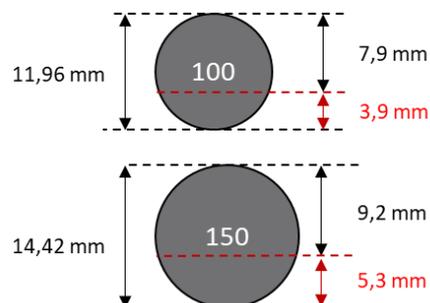


Figura 44 - Soglie di intervento per i fili di contatto usati su rete RFI

5.4.5 Scelta dei modelli

Per quanto riguarda la modulazione del costo unitario diretto esistono in letteratura solidi modelli che analizzano il danneggiamento dell'infrastruttura al variare dei parametri del materiale rotabile, dell'infrastruttura e dalle caratteristiche della traccia. Tali modelli nascono prevalentemente per pianificare in maniera efficace ed efficiente la manutenzione (cd «predittiva»); se tali modelli vengono trasposti nella regolazione economica hanno la finalità, oltre che di associare a ogni circolazione un costo diretto quanto più possibile aderente alla realtà, di stimolare i produttori – nel lungo periodo – alla progettazione e realizzazione di rotabili meno aggressivi per l'infrastruttura.

In relazione all'armamento, il modello di danneggiamento svizzero è quello che considera il maggior numero di parametri sia del materiale rotabile sia dell'infrastruttura, sia della marcia del treno. Tale modello rende possibile inoltre una modellazione dell'azione della marcia del treno sull'infrastruttura, consentendo di osservare la variazione dei parametri di uscita (spostamento della rotaia, difetti, danni da fatica e usura in curva) al variare dei parametri in ingresso (velocità, potenza, geometria del tracciato). Il modello inglese, meno customizzabile, tiene invece conto dei soli parametri massa assiale, massa non sospesa e velocità di marcia. Appare quindi preferibile utilizzare il modello svizzero per la modulazione.

Per quanto riguarda gli apparati di segnalamento, non si hanno a disposizione modelli che descrivano in maniera esaustiva il comportamento in termini di usura degli impianti al passaggio dei treni. La modellazione risulta inoltre estremamente complessa, sia per la eterogeneità degli impianti, sia per la varietà di fenomeni che contribuiscono all'usura di detti sistemi, alcuni dei quali non legati al passaggio del singolo treno (es. tempi di utilizzo, fenomeni atmosferici, attacco di roditori, furti/manomissioni). È opportuno peraltro considerare una significativa ripartizione degli asset che concorrono al costo di questo settore di specializzazione:

- a) Oggetti di campo (le apparecchiature elettromeccaniche poste nelle immediate vicinanze del binario, ivi comprese garitte e canalette);
- b) Oggetti di posto centrale (gli hardware informatici, nonché tutti gli oggetti che si trovano negli edifici).

Stante la bontà del modello econometrico, i costi marginali ottenuti con questo sono allocabili esclusivamente sugli asset compresi in categoria a).

Inoltre, come si evince dal documento del SERCO «*VTISM Analysis to Inform the Allocation of Variable Usage Costs to Individual Vehicles*», è stato stimato che il 50% del costo variabile degli apparati di segnalamento, dovuto prevalentemente alle vibrazioni, sia riconducibile alla formula di deterioramento della massiciata (massa assiale, numero assi e velocità) e il 50% sia correlato esclusivamente alle percorrenze.

Per quanto riguarda il sistema di trazione elettrica, nonostante si sia rinvenuto in letteratura uno studio con il quale modellare i meccanismi di usura del pantografo, realizzato, peraltro con la collaborazione di RFI, dal Politecnico di Milano, la trasposizione del modello nella regolazione economica appare complessa. Tale complessità deriva dal fatto che la funzione di danno non è monotona (crescente/decrescente) né rispetto alla velocità né rispetto alla corrente. Bisognerebbe quindi suddividere il campo di esistenza della funzione in almeno 3 intervalli complicando notevolmente la formulazione; inoltre i parametri stessi risultano poco controllabili (ad esempio la forza di contatto tra pantografo e linea di contatto è regolata dal macchinista, come pure l'assorbimento dipende dalla curva caratteristica di trazione del mezzo). Per quanto esposto non si ritiene di modulare il costo diretto relativo all'usura della linea di contatto, se non rispetto al numero di pantografi in presa, in continuità con la formulazione utilizzata nell'attuale sistema.

5.5 Scelta dei parametri da utilizzare

Analizzati i modelli di danneggiamento ed osservati i dati disponibili si è proceduto alla scelta dei parametri da utilizzare per la modulazione. Tale scelta deriva dalla capacità dei parametri coinvolti di rispondere positivamente a tre caratteristiche fondamentali: significatività, variabilità e misurabilità/semplificata.

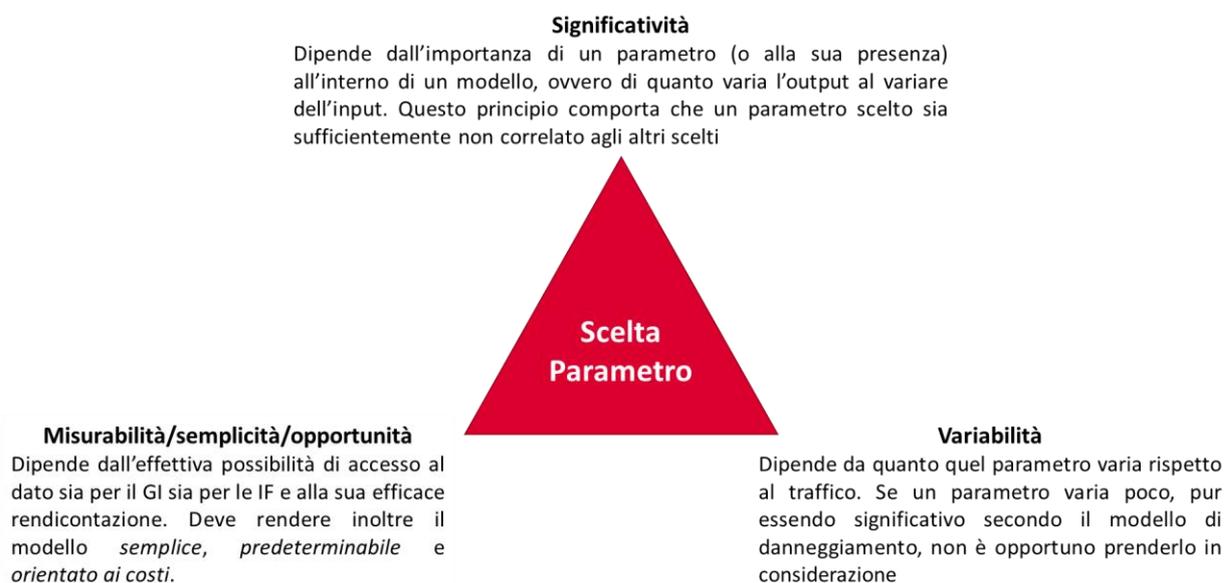


Figura 45 - Criteri per la scelta dei parametri di modulazione del costo diretto unitario

Appare fondamentale partire dalla selezione preliminare, illustrata in precedenza, e dai parametri usati dai principali gestori di infrastrutture europee. Un'ulteriore considerazione si può fare suddividendo i parametri in tre categorie:

- Parametri di infrastruttura
- Parametri di materiale rotabile
- Parametri della traccia

Va considerato inoltre che i parametri possono avere delle influenze reciproche (ad esempio i parametri della traccia sono influenzati oltre che dalle esigenze commerciali del trasporto, ovviamente anche dalle caratteristiche del materiale rotabile e dell'infrastruttura), così come può esistere una correlazione più o meno significativa tra diversi parametri (es. massa totale e numero di assi) che fa propendere per la scelta di un parametro piuttosto che di un altro.

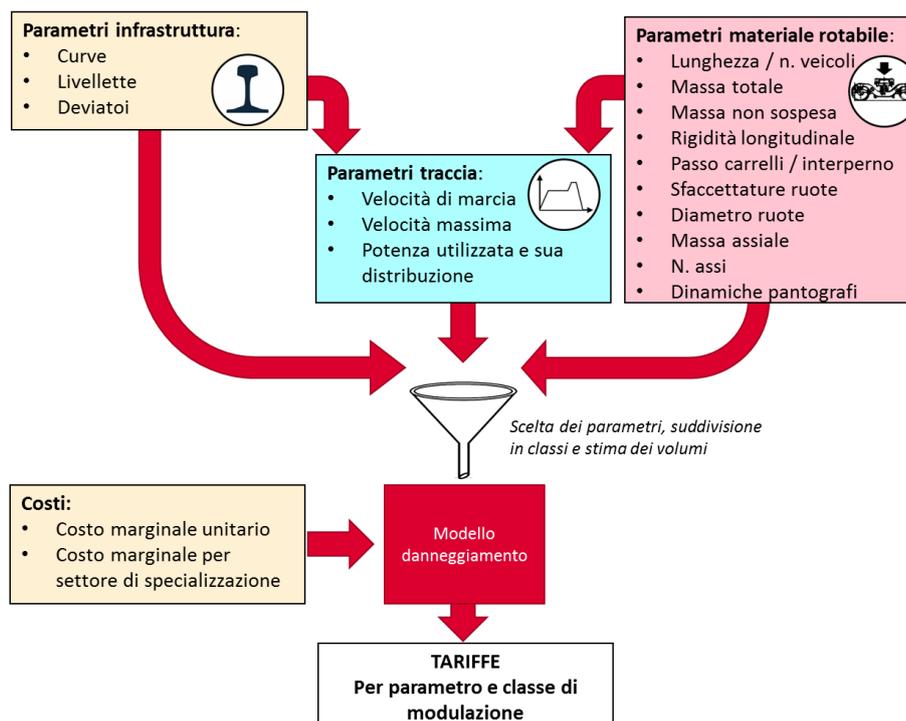


Figura 46 - Schematizzazione dei parametri di modolazione del costo diretto unitario e come influiscono nel modello ingegneristico al fine di determinare le tariffe

Si ritiene quindi opportuno chiarire le ragioni che hanno condotto alla scelta finale di utilizzare o meno alcuni parametri.

5.5.1 Parametri di infrastruttura

Il regolamento cita, tra i parametri del binario, il raggio di curvatura. Si rileva che tale parametro viene utilizzato per la modulazione in soli due paesi tra quelli esaminati (Svizzera e Portogallo). Tuttavia, nel presente modello, non è stato incluso per ragioni connesse alle seguenti possibili modalità di utilizzo del parametro:

- La descrizione del percorso di ciascun treno associando gli sviluppi della percorrenza ai rettilinei e alle curve (caratterizzate da un raggio di curvatura o classi di raggi) e l'associazione a ciascuna sezione di linea percorsa di una tariffa. Tale metodo, sebbene rappresenti l'allocazione più accurata possibile del costo diretto, risulta essere scarsamente *semplice* (sia da un punto di vista commerciale sia computazionale) sia difficilmente *predicibile* (cfr. Mis. 23 Del. 96/15)
- La suddivisione della rete nazionale in classi di linee con livelli di curvatura omogenei e l'associazione di una tariffa a ciascuna linea in funzione delle classi a curvatura omogenee scelte. Questo metodo risulta essere eccessivamente penalizzante per le linee montane, in cui si scaricherebbe il costo di un'usura maggiore a fronte di prestazioni di esercizio generalmente inferiori rispetto a una linea tendenzialmente rettilinea. Inoltre tale suddivisione sarebbe possibile solo se i costi associati a tale suddivisione fossero significativamente diversi per diverse parti di rete (cfr. Art. 5.1 Reg.)

Il parametro curvatura è stato però incluso (in termini di media di rete) nella costruzione degli abachi di danneggiamento (si veda il modello di curvatura)

Un ulteriore parametro escluso dal modello è la pendenza. Le livellette, sebbene non siano contemplate espressamente dai modelli studiati, sono variabili strettamente correlate (come del resto anche i raggi di

curvatura) alla marcia del treno. Determinando delle resistenze al moto possono significativamente influenzare altre variabili che invece producono direttamente un effetto sull'infrastruttura (es. la velocità di marcia o la potenza utilizzata). Appare quindi scontato aspettarsi una correlazione tra l'usura del binario e la presenza di livellette, stando ai modelli analizzati. Oltre a questa considerazione vale inoltre quanto osservato ai punti a) e b) per i raggi di curvatura.

Per questi motivi non si considera la pendenza come parametro di modulazione del modello in oggetto, tuttavia se ne terrà conto nelle simulazioni mostrate al capitolo successivo.

Per quanto attiene alla presenza di deviatori vale la considerazione fatta al punto b) per i raggi ovvero quello di suddivisione della rete; in questa circostanza infatti le classi dovrebbero essere definite dalla «densità di deviatoi» (es. numero medio di deviatori per unità di lunghezza). Una ulteriore differenziazione potrebbe essere fatta sulla velocità massima di percorrenza di un deviatoio in posizione deviata (30 – 60 – 100 km/h) che ne determina le caratteristiche geometriche. Pertanto si è scelto di non considerare la densità di deviatori come parametro di modulazione.

Alla luce di ciò, per tutti i parametri di infrastruttura sarebbe quindi necessaria una suddivisione per parti di rete, che risulterebbe incoerente con le prescrizioni della Del. 96/15 in quanto creerebbe effetti distorsivi sul mercato e introdurrebbe elementi di complicatezza e scarsa predicibilità dei corrispettivi nei confronti del mercato.

5.5.2 Parametri della traccia

Anche i parametri della traccia, al pari di quella dell'infrastruttura, sono soggetti a variazioni lungo il percorso in funzione dei parametri dell'infrastruttura e del rotabile. Infatti, se l'infrastruttura e il materiale rotabile possono individuare dei range di esistenza dei parametri di marcia (ad esempio la velocità massima di un convoglio è determinata dalle caratteristiche più restrittive di ciascun rotabile in composizione, e dalla velocità della linea in funzione del rango), non ne individuano univocamente il valore.

La velocità è un parametro presente esplicitamente in alcuni sistemi tariffari. Tale parametro riveste inoltre particolare significatività per l'ampia differenziazione nella rete italiana in termini di velocità massime. In continuità con il precedente periodo regolatorio e con le prescrizioni ART, che lo individua tra i parametri di cui tener conto *obbligatoriamente* (cfr. Mis. 23 Del. 96/15), si riconferma tale parametro tra quelli che saranno utilizzati per la modulazione.

Vista la variabilità degli output in termini di usura in funzione della velocità input per entrambi i modelli di usura si ridefiniscono tuttavia i limiti di classe, come indicato nella tabella seguente. Tale ridefinizione mira a rendere gli intervalli più equilibrati in termini di volumi e a modellare in maniera più precisa il parametro.

| OLD | [0 – 100] KM/H | [100 – 150] KM/H | [150 – 300] KM/H | | NEW | Volumi (tkm) | % |
|-----------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------|---------------|-----------------|------|
| Volumi [Mlnkm] | 274,55 | 41,70 | 47,30 | 363,55 | [0 – 75] KM/H | 176,00 | 48% |
| % | 76% | 11% | 13% | 100% | [75 – 100] | 99,68 | 27% |
| V_{MEDIA} [km/h] | 70 | 123 | 177 | 90 | 100-125 | 23,06 | 6% |
| | | | | | 125-150 | 17,85 | 5% |
| | | | | | 150-175 | 19,79 | 5% |
| | | | | | 175-200 | 27,16 | 7% |
| | | | | | 200-225 | 0,01 | 0% |
| | | | | | 225-250 | 0,00 | 0% |
| | | | | | TOT. | 363,55 | 100% |

Figura 47 - Ridefinizione dei limiti di classe di velocità (dati 2018)

Un ulteriore parametro di modulazione variabile rispetto alla marcia del treno, come si evidenzia dall'analisi del modello di danneggiamento svizzero, è la potenza trasmessa al cerchione. Tale grandezza deriva dalla potenza massima continuativa del mezzo di trazione (o elettrotreno), rispetto alla quale si calcolano i tempi di percorrenza pura, e su quanti assi viene trasferita.

Come accade per la velocità, anche questo parametro varia con le fasi del moto (accelerazione, coasting, frenatura) e con le resistenze al moto (variabili in funzione della velocità). In linea di massima per ottenere velocità maggiori con grandi resistenze al moto e accelerazioni occorrono potenze maggiori. Per tali motivi quest'ultima questa variabile è stata considerata nella costruzione degli abachi, ma non come parametro di modulazione.

5.5.3 Parametri del materiale rotabile

La massa totale è il più comune parametro utilizzato per la modulazione del costo diretto. In continuità con il precedente periodo regolatorio e con le prescrizioni ART, che lo individua tra i parametri di cui tener conto *obbligatoriamente* (cfr. Mis. 23 Del. 96/15), si riconferma tale parametro tra quelli che saranno utilizzati per la modulazione.

Al pari di quanto considerato per le velocità anche per le masse si ridefiniscono i limiti delle classi già previsti nell'attuale sistema di pedaggio come mostrato nella figura successiva

| | Mln tkm | % |
|-------------------|---------|-----|
| 1 [0 - 499 t] | 251,19 | 69% |
| 2 [500 - 999 t] | 86,92 | 24% |
| 3 [1000 - 1499 t] | 19,20 | 5% |
| 4 >= 1500 t | 6,25 | 2% |



| Classe di massa (t) | 0-300 | 300-600 | 600-900 | 900-1200 | 1200-1500 | 1500-2000 | TOT. |
|---------------------|--------|---------|---------|----------|-----------|-----------|---------------|
| Volumi (tkm) | 104,72 | 194,92 | 35,17 | 12,35 | 10,15 | 6,25 | 363,55 |
| % | 28,8% | 53,6% | 9,7% | 3,4% | 2,8% | 1,7% | 100% |

Figura 48 - Ridefinizione dei limiti di classe di massa (dati 2018)

Un secondo parametro del materiale rotabile che riveste un ruolo rilevante ai fini del modello è la massa assiale. Tale parametro è la base di calcolo per il danno causato dal singolo asse sia nel metodo svizzero sia nel metodo britannico. In entrambi i metodi tale valore viene esteso all'intero veicolo/convoglio moltiplicandolo semplicemente per il numero di assi che hanno le stesse caratteristiche. Tale parametro può quindi essere utilizzato per costruire un catalogo di carri cui viene associato un costo diretto (Svizzera e Gran Bretagna); in ogni caso per addivenire a una misura globale del danno tale parametro non è sufficiente, poiché sarebbe necessario associarlo ad un altro (numero di assi, numero di veicoli, lunghezza o massa totale).

La complessità del parametro massa assiale può essere quindi gestita **limitando al minimo il numero di classi di modulazione**. Si propone di procedere attraverso la definizione di solo due classi di massa assiale (leggeri/pesanti), come sarà mostrato nel seguito.

Tabella 29 – Classi di masse assiali (stima dati 2018)

| | Volumi | Media | % |
|-------------|---------------|-------------|-------------|
| ≤ 18 t/asse | 332,35 | 14,2 | 91,4% |
| >18 t/asse | 31,20 | 19,9 | 8,6% |
| TOT. | 363,55 | 14,5 | 100% |

Altri parametri del materiale rotabile, come la lunghezza dell'interperno o il passo dei carrelli e la rigidità longitudinale sono importanti per valutare l'energia specifica di attrito, grandezza necessaria per la stima del

danno da fatica per contatto da rotolamento in curva (cfr. componente D4.1 modello svizzero) e dell'usura della rotaia in curva (cfr. componente D4.2).

L'energia specifica di attrito può essere calcolata in funzione dei raggi con simulatori della marcia MBS (multi-corpo) tipo *Simpack* o *Vampire*. I valori presi a riferimento per la costruzione degli abachi di danneggiamento sono quelli mostrati in figura 49 e in tabella 30 i quali risultano piuttosto significativi per le carrozze viaggiatori, mentre risultano in genere sovrastimati per i carri merci.

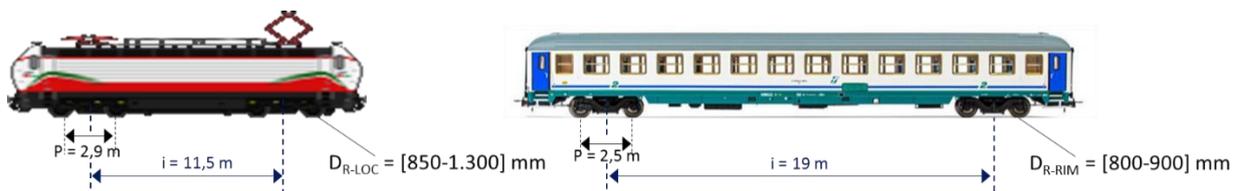


Figura 49 – Valori di riferimento per la costruzione degli abachi di danneggiamento per locomotore e veicolo rimorchiato relativamente a diametro ruota, interperno e passo dei carrelli

Tabella 30 – Valori di riferimento per il lavoro di attrito per intervalli di raggio di curvatura per locomotore e veicolo rimorchiato con riferimento alle dimensioni mostrate in figura precedente

| Lavoro di attrito per un raggio (da simulazione MBS) | | | | |
|--|--|------------|--------|-------------|
| Lavoro di attrito per un raggio | | Raggio [m] | Loco | Rimorchiata |
| $W_{b,R < 300}$ | | 270 [Nm/m] | 230,00 | 150,00 |
| $W_{b,R 300-400}$ | | 343 [Nm/m] | 170,00 | 100,00 |
| $W_{b,R 400-600}$ | | 480 [Nm/m] | 100,00 | 60,00 |
| $W_{b,R 600-1200}$ | | 800 [Nm/m] | 50,00 | 25,00 |

Vista la minore importanza relativa delle componenti di usura in curva (componenti D4.1 e D4.2 del modello svizzero) tali parametri non vengono considerati nei parametri di modulazione.

Per quanto riguarda la massa non sospesa si rimanda alle analisi preliminari; nelle simulazioni si considera standard e pari a 1,6 t/asse. Il diametro della ruota parimenti non viene considerato come parametro particolarmente influente vista la sua scarsa variabilità. Nella costruzione degli abachi di danneggiamento viene adottato un valore standard pari a 900 mm ($r = 450$ mm), mentre viene escluso dai parametri di modulazione.

5.5.4 Riepilogo dei parametri di modulazione

Si riepilogano dunque i parametri di modulazione con i quali verranno calcolate le tariffe.

- Parametri di infrastruttura: **nessuno**
- Parametri del materiale rotabile: Massa totale; massa assiale; presenza di pantografi
- Parametri della traccia: **Velocità di marcia**

5.5.5 Rotabili innovativi a ridotta aggressività verso l'infrastruttura

Il modello di determinazione dei costi diretti a base della presente proposta di schema tariffario modula il corrispettivo richiesto in relazione a una serie di parametri dei treni secondo i quali sono significative sia la differenza di usura causata all'infrastruttura, sia la variabilità all'interno dell'insieme dei rotabili attualmente circolanti. In riferimento all'usura connessa al transito dei veicoli, esistono altri parametri determinanti, in parte individuati dal Regolamento europeo n. 909/2015, rispetto ai quali si è ritenuto di non effettuare modulazione in quanto non ne è stata ritenuta sostanziale la variabilità nell'ambito del parco dei materiali circolanti (vedi par. 5.5.3).

L'efficientamento del costo di manutenzione dell'infrastruttura, prescritto al Gestore, può peraltro anche avvalersi, in analogia a quanto previsto da Gestori d'Infrastruttura esteri, dell'evoluzione tecnologica in corso nella progettazione e costruzione dei veicoli, premiando la transizione del parco circolante verso tipologie di rotabili meno aggressive. Fermo restando che tale evoluzione dovrà strutturarsi all'interno di uno specifico settore di ricerca, per favorire tale transizione, il Gestore dell'Infrastruttura è disponibile all'applicazione di schemi di incentivazione che valorizzino per le Imprese Ferroviarie, nell'ambito dei canoni del PMdA, il minore costo di manutenzione dell'infrastruttura connesso all'adozione di nuove tipologie di rotabili progettati in riferimento a tale esigenza.

Tale incentivazione potrà essere riconosciuta a tipologie di rotabili non ancora in servizio sulla IFN alla data di pubblicazione del presente schema tariffario.

La dimostrazione della riduzione di usura potrebbe essere posta in capo ai richiedenti, siano essi Imprese Ferroviarie o costruttori di rotabili, che forniranno gli elaborati tecnici necessari e la risultanza di eventuali campagne di prove al banco e in campo.

La quantificazione della riduzione di usura, che si traspone in un beneficio economico per l'impresa ferroviaria che esercisce predette tipologie di rotabili, sarà riscontrata dal Gestore secondo principi di trasparenza e non discriminazione sulla base di specifiche tecniche da pubblicarsi per tipologia di materiali e comunque congruenti al modello oggetto della presente relazione, e dovrà comunque essere soggetta a benestare dell'Autorità di Regolazione dei Trasporti.

Il Gestore dell'IFN si riserva di subordinare l'accoglimento delle richieste a campagne di misure supplementari, in condizioni concordate, a carico dei proponenti. Si riserva inoltre di effettuare misure sull'evoluzione dello stato manutentivo delle infrastrutture, nel caso in cui il contributo di usura dovuto ai rotabili per la cui circolazione è richiesta incentivazione sia chiaramente individuabile.

6. Applicazione del modello e calcolo delle tariffe

6.1 Introduzione al modello tariffario

La formula della tariffa componente A del pedaggio, come disposto dalla Misura 28 Del. 96/15, è ripartita in tre sub-componenti additive fra loro:

$$T_{A,treno} = (T_{base,A1} \cdot W_{A1} + T_{base,A2} \cdot W_{A2} + T_{base,A3} \cdot W_{A3}) \cdot P_{treno}$$

Dove:

- $T_{A,treno}$ è il corrispettivo finale della traccia, espresso in euro
- $T_{base,A1}$, $T_{base,A2}$ e $T_{base,A3}$ sono le tariffe base, relative alle sub componenti massa, velocità e linea di contatto. RFI deve assegnare una percentuale (γ , δ e il loro complemento a 100) a ciascuna componente per suddividere la $T_{base,A}$
- W_{A1} , W_{A2} e W_{A3} sono tre set di coefficienti (relativi rispettivamente alla sub componente massa, velocità e linea di contatto) sulla base delle quali ciascuna tariffa viene modulata
- P_{treno} è lunghezza della traccia oraria del singolo treno, espressa in km

Si propone di superare tale formulazione, con apposito atto da parte di Codesta Autorità, per come enunciato di seguito.

La formulazione proposta è tale che le prime due componenti siano accorpate in un'unica componente A_{1-2} , sia perché è comune e non segregabile la base di costo, sia perché la modulazione non è distinguibile, come si è mostrato nei capitoli precedenti. Viene inoltre introdotta una nuova sub componente *flat* per ciascuna classe di modulazione (a tale tariffa non è quindi associabile un coefficiente di modulazione W_A).

La nuova formula per la proposta tariffaria è quindi la seguente:

$$T_{A,treno} = (T_{base,A1-2} \cdot W_{A1-2}) \cdot PM_{treno} + (T_{base,flat} + T_{base,A3} \cdot W_{A3}) \cdot P_{treno}$$

Dove:

- $T_{base,A1-2}$ è la tariffa base per le sub componenti massa (A1) e velocità (A2) ed è costituita dal costo marginale unitario del settore armamento e dal 50% del costo marginale del settore segnalamento, ottenuti dal modello econometrico;
- $T_{base,flat}$ è la tariffa base flat (non distinta per classi di modulazione) ed è legata a quei costi marginali che non sono modulabili, individuati nel 50% dei costi marginali di segnalamento ricavati dal modello econometrico;
- $T_{base,A3}$ è la tariffa base per le sub componenti linea di contatto elettrica (A3) ed è costituita dal costo marginale unitario del settore trazione elettrica ottenuto dal modello econometrico;
- W_{A1-2} è una matrice di coefficienti dipendente dalla classe di massa e dalla classe di velocità, utilizzata per modulare la $T_{base,A1-2}$. Si ottiene dal modello ingegneristico per il settore armamento/segnalamento;
- W_{A3} è un set di coefficienti per modulare la $T_{base,A3}$;

- PM_{treno} è lunghezza della traccia moltiplicata per la massa del convoglio, espressa in ton-km;
- P_{treno} è lunghezza della traccia oraria del singolo treno, espressa in km.

6.2 Base costo: input da modello econometrico e allocazione

La base costo si compone di due blocchi:

- **Modello Armamento e Segnalamento:** ha come dati di input i costi marginali associati ai settori di specializzazione omonimi. I costi marginali del settore **armamento** sono completamente modulati con il modello ingegneristico discendente dal metodo svizzero (quota modello ingegneristico 100%), i costi marginali del settore **segnalamento** sono invece modulati in parte con il medesimo modello ingegneristico (quota modello ingegneristico 50%) in parte in maniera omogenea (quota modello flat 50%). Da tale modello discendono la tariffa $T_{\text{base, A1-2}}$ e la tariffa $T_{\text{base, flat}}$
- **Modello Trazione Elettrica:** ha come dati di input i costi marginali associati al settore di specializzazione omonimo. Tale modello comprende solamente ma completamente i costi del settore, la modulazione avviene in base all'unico parametro (n. di pantografi). Da tale modello discende la tariffa $T_{\text{base, A3}}$.

A questi due blocchi vengono allocati i costi marginali ottenuti dal modello econometrico come mostrato nello schema in basso:

Tabella 31 - Allocazione dei costi marginali ottenuti dal modello econometrico sui due blocchi (Modello Armamento e segnalamento e Modello Trazione Elettrica). Da questa allocazione si ottengono le tariffe basi

| Settore specializzazione | INPUT MODELLO ECONOM. EUR/Km | A1-2 (ARM+SEGN) | | | | A3 (TE) | |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------|------------|----------------------|------------|--------------------|
| | | Quota MOD. ING. | Valore unitario MOD. ING. | Quota FLAT | Valore unitario FLAT | Quota TE | Valore unitario TE |
| | | % | EUR/Km | % | EUR/Km | % | EUR/Km |
| Armamento | 0,122 | 100% | 0,122 | 0% | - | 0% | - |
| Segnalamento | 0,165 | 50% | 0,083 | 50% | 0,083 | 0% | - |
| Trazione elett. | 0,117 | 0% | - | 0% | - | 100% | 0,117 |
| TOT. | 0,404 | 51% | 0,205 | 20% | 0,083 | 29% | 0,117 |

| | | |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| $T_{\text{base, A1-2}}$ | $T_{\text{base, flat}}$ | $T_{\text{base, A3}}$ |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|

Dovendo utilizzare per la $T_{\text{base, A1-2}}$ la tonnellata-km come unità di misura, si ottiene – per un peso ponderato medio per l'anno 2018 pari a 464,6 tonnellate – un valore di **0,00044 EUR/tonkm**.

6.3 Modello armamento segnalamento

Il “Modello armamento e segnalamento” è basato sull'assunzione che la quota integrale (100%) di costo marginale dell'armamento più il 50% della quota del costo marginale del modello segnalamento siano modulate a partire dalla tariffa base $T_{\text{base, A1-2}}$ con un modello ingegneristico, mostrato di seguito.

Il restante 50% del costo marginale del segnalamento rimane non modulato (ovvero “flat”) per ciascuna unità di traffico $T_{\text{base, flat}}$.

Tale allocazione del costo di segnalamento è infatti desunta dalla formulazione adottata da altri gestori (Networkrail cfr. Serco «*VTISM Analysis to Inform the Allocation of Variable Usage Costs to Individual Vehicles*»).

Il modello ingegneristico utilizzato per modulare la $T_{\text{base, A1-2}}$ è basato sull'utilizzo del metodo svizzero per l'individuazione dell'**indice di danno** per ciascuna classe di modulazione, necessario a sua volta per costruire la matrice dei coefficienti di modulazione W_{A1-2} .

Per costruire tale indice si è proceduto come segue:

- Si sono stabilite le grandezze input ovvero
 - **Velocità di marcia medie** per ciascuna classe di velocità
 - **Massa media** per ciascuna classe di massa
 - **Massa assiale media** (14,5 t/asse) valida per tutte le classi oppure due masse assiali (14,2 e 19,9 t/asse. La disaggregazione avviene in corrispondenza delle classi di velocità per le quali la variazione dell'usura indotta è significativa).
 - **Massa non sospesa di riferimento** (1,6 t/asse) valida per tutte le classi
 - **Raggio ruota di riferimento** (0,45 m) valido per tutte le classi
 - **Lunghezza interperni** (19 m) e **passo dei carelli** (2,5 m) **di riferimento** validi per tutte le classi
 - **Curvatura media della linea** ($1/R = 0,0033 \text{ m}^{-1}$) (vedi appendice “*Modello curvatura*”)
 - **Potenze al cerchione** variabili per classe di velocità/massa (vedi appendice “*Modello di potenza*”)

Tabella 32 - Velocità medie (km/h) per classe di velocità

| km/h | V_{REF} [km/h] |
|-----------|-------------------------|
| 0 - 75 | 69 |
| 75 - 100 | 96 |
| 100 - 125 | 126 |
| 125 - 150 | 158 |
| 150 - 175 | 186 |
| 175 - 200 | 211 |
| 200 - 225 | 235 |
| 225 - 250 | 277 |

Tabella 33 - Masse medie (t) per classe di massa

| Classe di massa (t) | 0-300 | 300-600 | 600-900 | 900-1200 | 1200-1500 | 1500-2000 |
|---------------------|-------|---------|---------|----------|-----------|-----------|
| Massa media (t) | 182 | 453 | 680 | 1.097 | 1.344 | 1.665 |

Si sono costruiti degli **abachi di danneggiamento** con l'utilizzo delle **formule del modello svizzero**, anche con la finalità di osservare la variabilità del danno rispetto al variare dei parametri di input; nel grafico mostrato viene visualizzata la velocità di marcia in ascissa e l'indice di danno (adimensionale in ordinata).

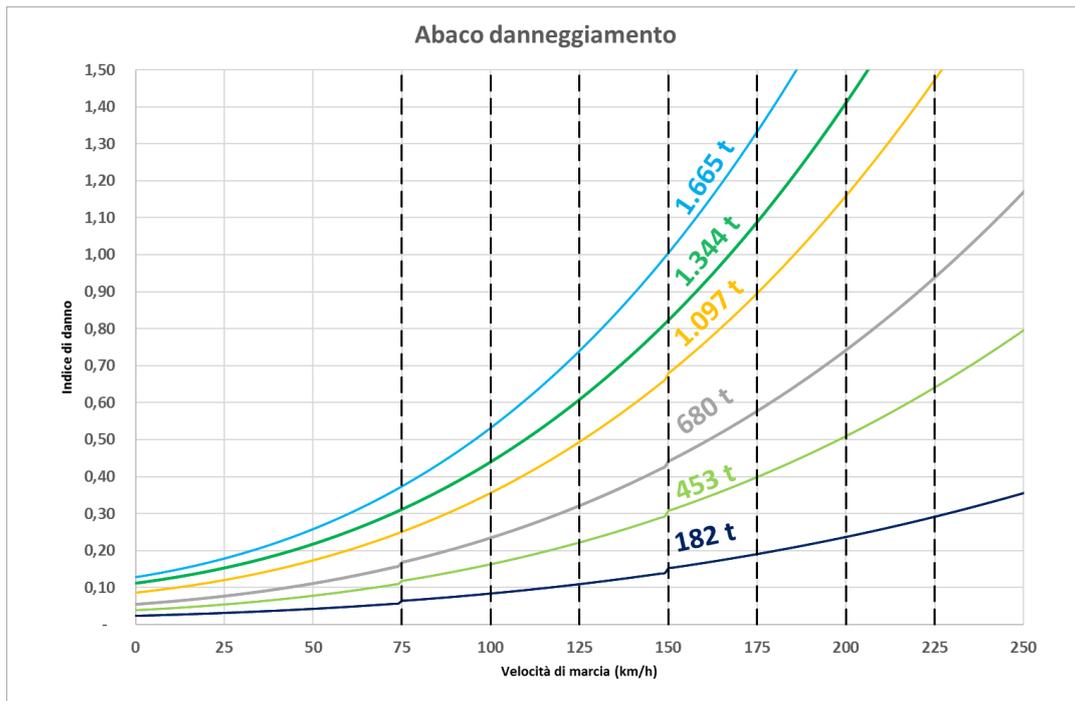


Figura 50 - Abaco di danneggiamento costruito con il modello ingegneristico svizzero relativo a sei curve iso-massa

Per ciascun cluster velocità/massa si sono registrati i valori in una matrice di coefficienti C_{A1-2} che successivamente verranno normalizzati rispetto alle percorrenze per definire la matrice W_{A1-2} .

Tabella 34 - Indici di danno per intervalli di massa/velocità (matrice di coefficienti C_{A1-2}) ottenuti con il modello ingegneristico svizzero

| | t km/h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|-----------|-------|---------|---------|----------|-----------|-----------|
| | | 0-300 | 300-600 | 600-900 | 900-1200 | 1200-1500 | 1500-2000 |
| A | 0 - 75 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,23 | 0,29 | 0,34 |
| B | 75 - 100 | 0,08 | 0,15 | 0,22 | 0,34 | 0,42 | 0,50 |
| C | 100 - 125 | 0,11 | 0,22 | 0,33 | 0,50 | 0,62 | 0,75 |
| D | 125 - 150 | 0,16 | 0,33 | 0,48 | 0,74 | 0,90 | 1,10 |
| E | 150 - 175 | 0,21 | 0,45 | 0,65 | 1,01 | 1,22 | 1,50 |
| F | 175 - 200 | 0,26 | 0,57 | 0,82 | 1,29 | 1,57 | 1,93 |
| G | 200 - 225 | 0,32 | 0,70 | 1,03 | 1,61 | 1,97 | 2,42 |
| H | 225 - 250 | 0,44 | 0,99 | 1,46 | 2,31 | 2,82 | 3,48 |

Tabella 35 – Matrice degli indici di danno *normalizzati* per intervalli di massa/velocità (matrice di coefficienti W_{A1-2})

| | t km/h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|-----------|-------|---------|---------|----------|-----------|-----------|
| | | 0-300 | 300-600 | 600-900 | 900-1200 | 1200-1500 | 1500-2000 |
| A | 0 - 75 | 0,26 | 0,50 | 0,72 | 1,12 | 1,40 | 1,68 |
| B | 75 - 100 | 0,39 | 0,76 | 1,09 | 1,65 | 2,05 | 2,48 |
| C | 100 - 125 | 0,54 | 1,10 | 1,60 | 2,45 | 3,02 | 3,68 |
| D | 125 - 150 | 0,80 | 1,64 | 2,36 | 3,65 | 4,43 | 5,42 |
| E | 150 - 175 | 1,03 | 2,18 | 3,17 | 4,93 | 6,00 | 7,36 |
| F | 175 - 200 | 1,28 | 2,77 | 4,04 | 6,33 | 7,71 | 9,48 |
| G | 200 - 225 | 1,55 | 3,44 | 5,04 | 7,92 | 9,65 | 11,88 |
| H | 225 - 250 | 2,14 | 4,87 | 7,16 | 11,33 | 13,83 | 17,05 |

Volendo passare invece da un modello a classi ad **un modello continuo**, almeno **per il parametro massa**, (ovvero basato sulla tonnellata-km) così come avviene in altri Paesi (es. Austria, Svezia) occorre stimare i coefficienti di regressione lineare per ciascuna classe di velocità.

Tabella 36 - Coefficienti di regressione lineare

| | km/h | Coeff. Regr. Lin | R ² |
|---|-----------|---------------------|----------------|
| A | 0 - 75 | 0,0002103 | 0,9987864 |
| B | 75 - 100 | 0,0003094 | 0,9983084 |
| C | 100 - 125 | 0,0004581 | 0,9990052 |
| D | 125 - 150 | 0,0006748 | 0,9988324 |
| E | 150 - 175 | 0,0009139 | 0,9992639 |
| F | 175 - 200 | 0,0011739 | 0,9994952 |
| G | 200 - 225 | 0,0014688 | 0,9996387 |
| H | 225 - 250 | 0,0021027 | 0,9997872 |

A questo punto l'abaco di danneggiamento si presenta come mostrato in figura, ovvero con la massa totale in ascisse e delle curve iso-velocità:

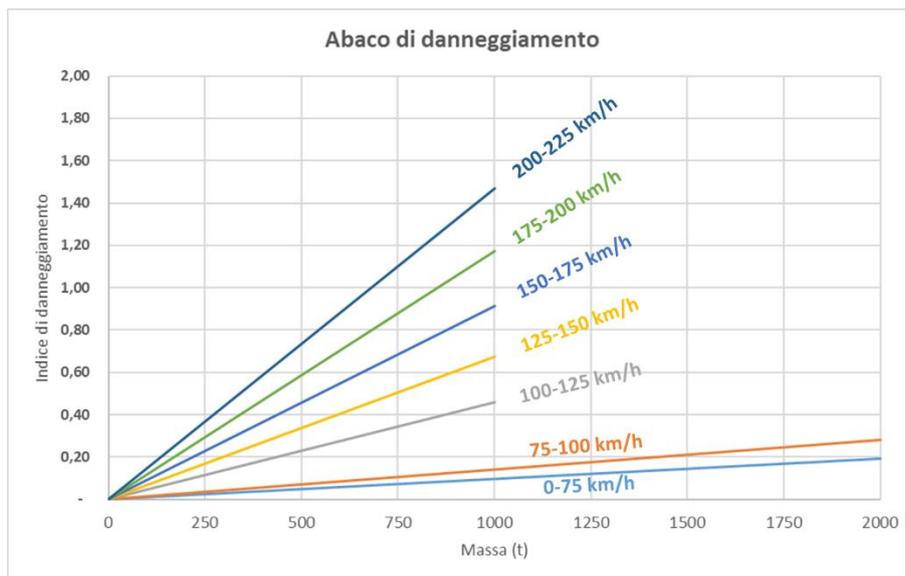


Figura 51 – Abaco di danneggiamento costruito con il modello ingegneristico svizzero relativo a sei curve iso-velocità, in cui la massa è una funzione continua

Il vettore dei coefficienti di regressione lineare rappresenta la pendenza delle rette mostrato nell'abaco ed ha funzione analoga a quella della matrice C_{A1-2} mostrata in precedenza. Per passare dall'abaco di danneggiamento alle tariffe bisogna considerare le percorrenze per ciascuna classe di velocità e quindi “normalizzare” il vettore dei coefficienti di regressione lineare, ottenendo quindi il nuovo vettore W_{A1-2} .

Ottenuto il vettore dei coefficienti W_{A1-2} si può semplicemente ottenere la tariffa unitaria moltiplicando questi coefficienti per il $T_{base, A1-2}$ espresso in [EUR/tonkm].

Tabella 37 – Coefficienti di regressione lineare funzione di danno (massa) per classi di velocità, distribuzione delle percorrenze di massa (tonkm) per classi di velocità e relativi coefficienti “normalizzati” W_{A1-2} e tariffe T_{A1-2}

| | km/h | Coeff. Regr. Lin | PM % | W_{A1-2} | T_{A1-2} [EUR/tonkm] |
|---|-----------|------------------|--------|------------|------------------------|
| A | 0 - 75 | 0,0002103 | 46,6% | 0,509 | 0,00022 |
| B | 75 - 100 | 0,0003094 | 25,1% | 0,748 | 0,00033 |
| C | 100 - 125 | 0,0004581 | 7,2% | 1,108 | 0,00049 |
| D | 125 - 150 | 0,0006748 | 5,5% | 1,632 | 0,00072 |
| E | 150 - 175 | 0,0009139 | 6,1% | 2,211 | 0,00097 |
| F | 175 - 200 | 0,0011739 | 9,6% | 2,840 | 0,00125 |
| G | 200 - 225 | 0,0014688 | 0,003% | 3,553 | 0,00156 |
| H | 225 - 250 | 0,0021027 | 0,001% | 5,086 | 0,00224 |

Si vuole a questo punto differenziare le classi di velocità maggiori di 150 km/h (indicate con le lettere E, F, G) rispetto alle due classi di massa assiale media ($M_{ASS_M} \leq 18$ t/asse e $M_{ASS_M} > 18$ t/asse).

Tabella 38 - Coefficienti di regressione lineare funzione di danno (massa) per classi di velocità e massa assiale, distribuzione delle percorrenze di massa (tonkm) per classi di velocità e relativi coefficienti "normalizzati" W_{A1-2} e tariffe T_{A1-2}

| | km/h | M_{ASS_M} | Coeff. Regr. Lin | PM | W_{A1-2} | T_{A1-2} |
|----------|-----------|-----------------------|------------------|-----|------------|------------|
| | | | | % | | [EUR/km] |
| A | 0 - 75 | | 0,00021 | 47% | 0,509428 | 0,0002242 |
| B | 75 - 100 | | 0,00031 | 25% | 0,74953 | 0,0003299 |
| C | 100 - 125 | | 0,00046 | 7% | 1,109724 | 0,0004884 |
| D | 125 - 150 | | 0,00067 | 6% | 1,63475 | 0,0007195 |
| E | 150 - 175 | $\leq 18 \text{ t/a}$ | 0,00092 | 4% | 2,218980 | 0,0009767 |
| | | $> 18 \text{ t/a}$ | 0,00092 | 2% | 2,22134 | 0,0009777 |
| F | 175 - 200 | $\leq 18 \text{ t/a}$ | 0,00118 | 7% | 2,854284 | 0,0012563 |
| | | $> 18 \text{ t/a}$ | 0,00115 | 3% | 2,78751 | 0,0012269 |
| G | 200 - 225 | $\leq 18 \text{ t/a}$ | 0,00148 | 0% | 3,575546 | 0,0015738 |
| | | $> 18 \text{ t/a}$ | 0,00141 | 0% | 3,41923 | 0,0015050 |

Si è considerato il 32% dei materiali con $M_{ASS_M} > 18 \text{ t/asse}$ per ciascuna delle classi E, F, G.

Si noti come il valore del coefficiente di regressione per i treni con massa assiale più alto sia inferiore.

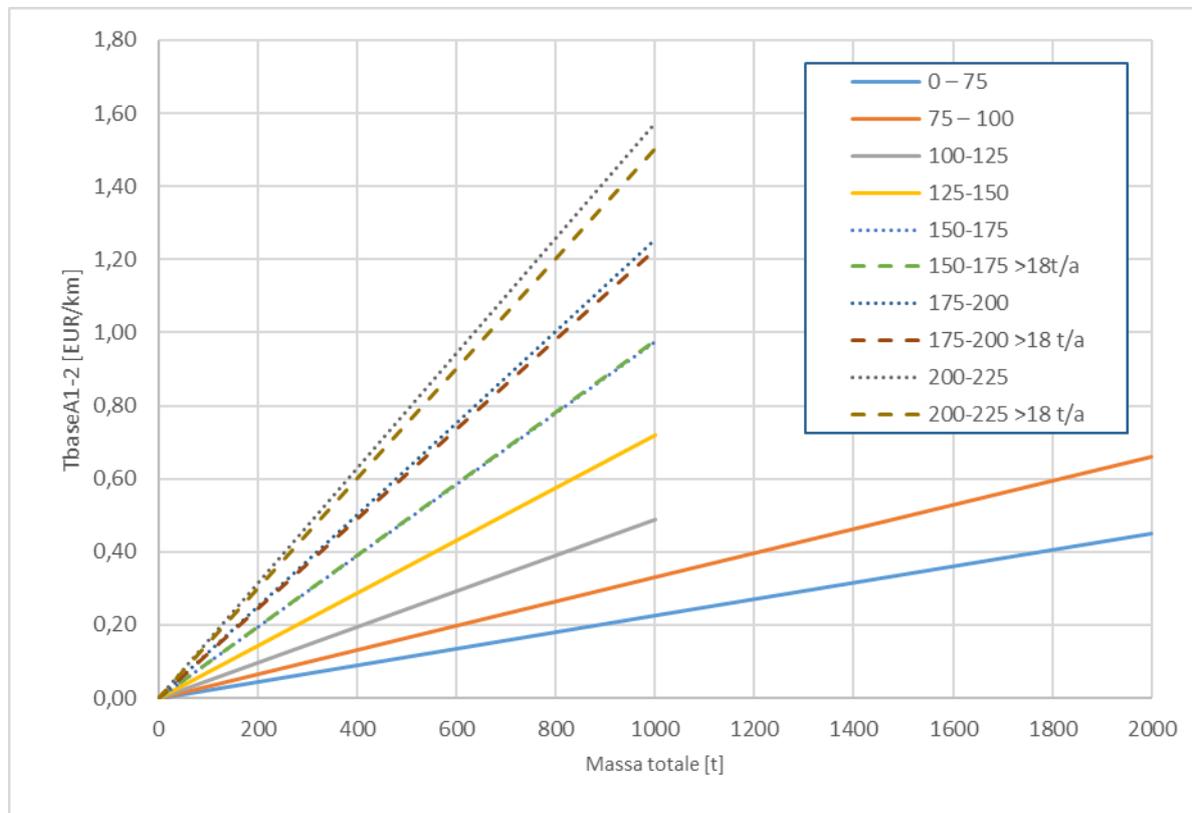


Figura 52 – Grafico delle tariffe $T_{base,A1-2}$

6.4 Modello flat segnalamento

Come illustrato nel paragrafo precedente, il 50% del costo di segnalamento non è correlabile a grandezze fisiche del treno, ma solo al passaggio di una unità di traffico.

6.5 Modello trazione elettrica

L'unica modulazione prevista per la trazione elettrica deriva dalla **presenza o meno di pantografi** e, in continuità con il passato modello tariffario, eventualmente **del doppio pantografo**, solo nella fattispecie di materiali con $V_{max} \geq 250\text{km/h}$.

La rendicontazione delle percorrenze di treni con tale caratteristica avviene a seguito di comunicazione da parte delle IF, circa l'utilizzazione del doppio pantografo nelle tratte in cui detta utilizzazione è prevista e opportune verifiche da parte del GI durante la circolazione dei treni.

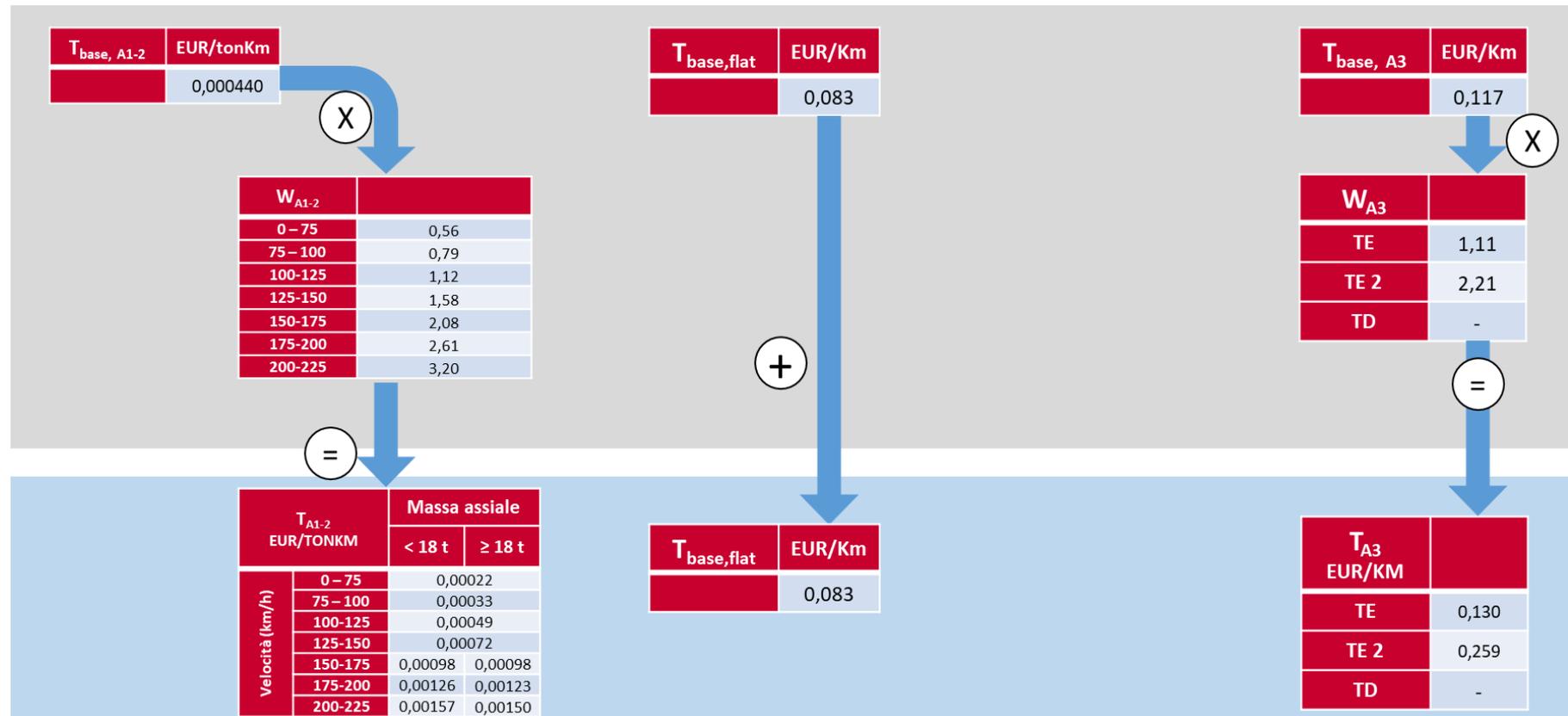
Nella tabella successiva vengono riportate la **suddivisione del traffico**, gli **indici di danno** per le 3 configurazioni e gli **indici di danno normalizzati** rispetto alle percorrenze (W_{A3}).

Tabella 39: Modello trazione elettrica: percorrenze, indici di danno e normalizzazione degli indici di danno relativi alle percorrenze

| | Percorrenze (%) | Indice di danno | Indice di danno norm. (W_{A3}) | T_{A3} [EUR/km] |
|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|-------------------|
| Elettrico 1 pantografo | 89,9% | 1 | 1,11 | 0,130 |
| Elettrico 2 pantografi | 0,2% | 2 | 2,21 | 0,259 |
| Diesel | 9,9% | 0 | 0 | 0 |

6.6 Proposta tariffaria

La proposta tariffaria conclusiva si compone quindi della somma delle 3 componenti, costruite come mostrato nella figura:



In sintesi la proposta tariffaria si può esprimere come segue:

$$P = P_{U_{tonkm}} * tonkm + P_{U_{km}} * km + P_{U_{kmEL}} * km_{EL}$$

Con:

$P_{U_{tonkm}}$ ricavabile dalla tabella 40.

$P_{U_{km}} = 0,083$ EUR/km

$P_{U_{kmEL}} = 0,13$ EUR/km elettrico

Tabella 40 – Tariffe unitarie a tonnellatakm (EUR/tonkm)

| Classe di velocità di marcia (km/h) | Massa assiale < 18 t | Massa assiale ≥ 18 t |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 0 - 75 | | 0,00022 |
| 75 - 100 | | 0,00033 |
| 100 - 125 | | 0,00049 |
| 125 - 150 | | 0,00072 |
| 150 - 175 | 0,00098 | 0,00098 |
| 175 - 200 | 0,00126 | 0,00123 |
| 200 - 225 | 0,00157 | 0,00150 |

6.7 Dinamiche temporali delle tariffe

Il costo diretto unitario considerato per la formulazione delle tariffe illustrate in questo capitolo deriva dal modello econometrico il quale ha preso in considerazione gli anni 2014-2018 come anni di analisi. Il costo diretto unitario da modello econometrico, il cui valore è risultato 0,404 EUR/km, è valido per ciascuno degli anni di analisi. Si riporta nella tabella di seguito il valore del costo diretto totale calcolato a ritroso su ciascuno degli anni 2014-2018, considerando i volumi circolati, e lo si confronta con i valori previsti nel p.r 2016-2021, e quelli effettivamente registrati nelle rispettive Co.Reg.

Tabella 41 – Costi diretti unitari e totali secondo il modello Del. 75/2016 (1), registrati Co.Reg. (2) e da modello econometrico (3) per gli anni 2014-2019

| | | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|-----|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| (1) | Costi diretti previsti (Del. ART n. 75/2016) [Mln EUR] | 178,50 | 180,51 | 181,09 | 181,93 | 192,52 | 194,87 |
| | Trenikm previsti [Mln Tkm] | 330,12 | 340,10 | 344,80 | 348,36 | 357,27 | 362,77 |
| | Costo diretto unitario = IMU diretto previsto [EUR/km] | 0,54 | 0,53 | 0,53 | 0,52 | 0,54 | 0,54 |
| (2) | Costi diretti registrati (Co. Reg.) [Mln EUR] | 178,50 | 170,40 | 166,20 | 246,70 | 310,10 | 305,10 |
| | Trenikm registrati [Mln Tkm] | 330,12 | 340,10 | 349,23 | 353,69 | 363,12 | 371,71 |
| | Costo diretto unitario registrato [EUR/km] | 0,54 | 0,50 | 0,48 | 0,70 | 0,85 | 0,82 |
| | Ricavi Pedaggio parte A registrati [Mln EUR] | - | - | - | - | 182,11 | 184,09 |
| | IMU diretto ricavo parte A [EUR/km] | - | - | - | - | 0,51 | 0,51 |
| (3) | Costo diretto totale modello [EUR/km] | 133,37 | 137,40 | 141,09 | 142,89 | 146,70 | 150,17 |
| | Costo diretto unitario modello econom. [EUR/km] | 0,404 | 0,404 | 0,404 | 0,404 | 0,404 | 0,404 |

La modulazione tariffaria proposta in questo capitolo ha preso a riferimento la distribuzione dei volumi nelle diverse classi di modulazione del 2018 per il calcolo dei coefficienti WA e quindi per la prospettazione finale delle tariffe; pertanto l'annualità rispetto alla quale la modulazione sarebbe corretta è il 2018.

Ai fini del calcolo della tariffa globale per il periodo regolatorio 2022-2026 è necessario ricavare il costo diretto totale. Si propone quindi di estendere i risultati ricavati in riferimento all'annualità 2018 procedendo nella maniera seguente:

- Stimare i volumi di traffico, con le procedure già previste dalla Del. 96/15 o comunque già adottate da questo Gestore, con la disaggregazione prevista da ciascuna classe di modulazione;
- Applicare le tariffe prospettate in questo capitolo (calcolate sull'annualità 2018) ai volumi del periodo regolatorio 2022-26;
- Calcolare, a partire esclusivamente dai volumi e dalle tariffe il costo diretto totale.

In tale maniera le tariffe componente A rimangono stabili per l'intero periodo 2022-26.

7. Riferimenti bibliografici

- Andersson, M. (2006), *Marginal Cost Pricing of Railway Infrastructure Operation, Maintenance and Renewal in Sweden: From Policy to Practice Through Existing Data*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1943, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1-11.
- Andersson, M. (2009), *D8 – Rail Cost Allocation for Europe, Annex 1A – Marginal Cost of Railway Infrastructure Wear and Tear for Freight and Passenger Trains in Sweden*.
- Bucca G., Collina A., (2015) «*Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model*»
- CATRIN (2009). *D8, Rail Cost Allocation for Europe*.
- Confederazione Svizzera, *Prezzo di base in funzione dell'usura nel sistema dei prezzi delle tracce 2017, Istruzioni per la determinazione dei prezzi dei veicoli*, 2016, Ufficio federale dei trasporti, 3003 Berna, Divisione Finanziamento.
- Greene, W.H. (2003) *Econometric Analysis*. 5th ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- IRG-Rail (2016). *Guidelines to the calculation of direct costs in respect of implementing Regulation 2015-909*.
- Johansson, P. and Nilsson, J. (2004). “*An economic analysis of track maintenance costs*”. *Transport Policy* 11(3), pp. 277-286.
- Johansson, P. and Nilsson, J. E. (2002), *An Economic Analysis of Track Maintenance Costs*, Deliverable 10 Annex A3 of UNITE (UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency), Funded by EU 5th Framework RTD Programme. ITS, University of Leeds, Leeds.
- SERCO (2012) «*VTISM Analysis to Inform the Allocation of Variable Usage Costs to Individual Vehicles*»
- Smith, A.S.J., S. Iwnicki, A. Kaushal, K. Odolinski, and P. Wheat (2014). ‘*Estimating the damage and marginal cost of different vehicle types on rail infrastructure: combining economic and engineering approaches*’, In: The Stephenson Conference: Research for Railways, 21-23 April 2015, London.
- Smith, A.S.J., Wheat, P. and Nixon, H. (ITS/ORR) (2008), *International Benchmarking of Network Rail's Maintenance and Renewal Costs*, joint report written by Andrew Smith and Phill Wheat (ITS) and Hannah Nixon (ORR) as part of PR2008, June 2008.
- StataCorp, LP. (2020) *Stata Statistical Software: Release 16*. College Station, Tx.
- Wheat, P., & Smith, A. (2006). *Assessing the marginal infrastructure wear and tear costs for Britain's railway network*. In European Transport Conference (ETC) Association for European Transport (AET).
- Wheat, P. and Smith, A. (2008), *Assessing the Marginal Infrastructure Maintenance Wear and Tear Costs for Britain's Railway Network*, *Journal of Transport Economics and Policy*, 42(2), 189-224.

8. Appendici

8.1 Il sistema aziendale In.Rete

Il sistema In.Rete, attraverso il quale RFI tiene traccia delle voci di costo, è strutturato per moduli integrati secondo le logiche ERP (*enterprise resources planning*):

- PM: ordini di manutenzione, oggetti tecnici, guasti;
- HR: anagrafica personale, time sheet;
- DMS: gestione documenti;
- IM: fonti di finanziamento, budget;
- FI: fatture attive e fatture passive;
- CO: controlling centri di costo e controlling ordini;
- MM: richieste di acquisto, ordini di acquisto, gestione delle scorte, movimentazione del magazzino e ricezione delle fatture;
- AM: cespiti in costruzione, scarico dei costi.

La struttura organizzativa di RFI viene rappresentata a sistema (modulo HR) tramite Unità Organizzative (UO), che contengono n persone: una UO corrisponde ad un Centro di Lavoro (CdL) nel modulo PM. Il CdL è una unità organizzativa della manutenzione che raccoglie risorse, da pianificare, programmare e consuntivare temporalmente, necessarie per gli interventi manutentivi sugli oggetti. I CdL possono essere di diverse tipologie: si ricordano, in particolare:

- Centri di Lavoro Persone (insieme di manutentori la cui attività è misurata in ore di manodopera);
- Centri di Lavoro Mezzi (gruppo di attrezzature speciali condivise tra più CdL la cui attività è misurata in ore di attrezzatura).

Il sistema In.Rete, dunque, censisce tutto l'asset ferroviario oggetto di manutenzione e, con il suo modulo dedicato alla manutenzione, consente la verifica dei prerequisiti di tutte le risorse interne ed esterne coinvolte nel processo manutentivo (personale, automezzi, materiali, servizi, ditte appaltatrici), la gestione degli avvisi provenienti dai sistemi di diagnostica sullo stato delle linee, il supporto alla pianificazione, esecuzione e rendicontazione dei diversi tipi di attività (manutenzione ciclica, *on condition*, preventiva).

Il sistema In.Rete consente di schematizzare gli oggetti di manutenzione tramite il concetto di **Sede Tecnica ("SeTe")**: si tratta di un'entità tecnica, collegata ad un concetto di posizione, funzione o processo, che viene utilizzata per rappresentare, tramite un codice univoco, un impianto, una parte di esso oppure delle apparecchiature logicamente raggruppabili. I livelli di cui si compongono i codici identificativi delle SeTe consentono di individuare la composizione e la strutturazione delle singole apparecchiature soggette ai processi di RFI.

Sedi Tecniche simili appartengono alla stessa Classe: ciascuna Classe è articolata per Caratteristiche che possono assumere Valori diversi e ciascuna Classe viene identificata tramite un codice.

Di seguito si riportano alcuni attributi delle Sedi Tecniche.

- Proprietà: sono previste diverse categorie di proprietà, che possono essere così schematizzate

| Categoria | Descrizione |
|----------------------------------|--|
| C=Enti Terzi | SeTe che non sono di proprietà di RFI, presenti a sistema per completare il modello di rete, e che non sono gestite da RFI |
| E=Enti Terzi e gestione RFI | SeTe che non sono di proprietà di RFI, presenti a sistema, e che sono gestite da RFI |
| I=Infrastruttura FS | SeTe di proprietà di RFI |
| M=Struttura Mezzi e Attrezzature | Mezzi e Attrezzature di proprietà di RFI |
| R=Modello Infrastruttura | SeTe della Struttura di Riferimento |

- Stato Sistema: indica in quale fase si trova a sistema il **codice** della SeTe

| Stato Sistema | Significato |
|---------------|---------------------------------------|
| CREA | Creazione di una SeTe nel sistema |
| CREA FCAN | Cancellazione di una SeTe dal sistema |
| INAT | Codice della SeTe inattivo |

- Stato Utente: indica in quale fase di vita si trova una SeTe intesa come **Oggetto Reale** sul campo

| Codice | Significato |
|--------|---------------------------------------|
| FATT | Futura attivazione |
| ESER | In esercizio |
| FUES | Fuori esercizio |
| SOPP | Soppressa |
| CONC | Concessa in gestione ad altre Società |
| Modi | Modificato |

Secondo il Nuovo Modello di Controllo, la targatura delle SeTe Infrastrutturali a Servizio avviene a sistema mediante l'alimentazione della nuova Classe Recast 2.0, articolata in termini di Pillars e di servizi. Si riportano di seguito i **servizi ricompresi in ciascun Pillar**:

| Perimetro Asset | Servizi |
|---|--|
| PILLAR I - Infrastruttura ferroviaria nazionale | Traccia oraria |
| | Navigazione IF |
| | Assistenza PRM |
| | A.U. platee di lavaggio |
| PILLAR II - Servizi alle imprese ferroviarie | A.U. stazione passeggeri |
| | A.U. impianti di approvvigionamento combustibili |
| | A.U. terminali merci |
| | A.U. aree composizione treni |
| | A.U. aree sosta |
| | A.U. centri manutenzione |
| PILLAR III - Non strumentali | Servizi safety mercato |
| | Prestazioni sanitarie |
| | Gestione patrimonio |

Ai fini dell'attribuzione a servizio, si ricorda il principio generale secondo il quale, a prescindere dal fatto che RFI gestisca le attività manutentive su un determinato asset, qualora lo stesso sia stato dato in gestione a soggetti terzi, operanti in qualità di operatori di impianto, l'asset dovrà essere targato a Pillar III, servizio "gestione patrimonio".

Con moduli dedicati, IN.Rete supporta, oltre agli interventi di manutenzione, la gestione informatizzata di processi aziendali tra cui quelli amministrativo-contabili e di controllo di gestione, acquisti e vendite, tesoreria, gestione patrimoniale dell'asset ferroviario, sicurezza sul lavoro, gestione tecnico-economica e finanziaria degli investimenti infrastrutturali.

8.2 Review modelli econometrici

Le best practices esistenti a livello europeo in materia di misurazione dei costi marginali diretti di breve periodo legati all'usura sono state raccolte nelle pubblicazioni del gruppo di studio CATRIN (*Cost Allocation of Transport INfrastructure cost*), finanziato dalla Commissione europea. Il progetto CATRIN è nato per assistere le politiche europee dei trasporti e, in particolare, per lo studio delle tariffe. Il *Deliverable 8* del 2009 riporta una serie di casi studio relativi all'applicazione di modelli econometrici per Regno Unito, Austria, Svezia, Svizzera e Francia, nonché un caso studio con un modello econometrico pooled che prende in considerazione due soltanto dei Paesi oggetto dei casi studio specifici, ovvero Regno Unito e Austria, ai quali vengono aggiunti gli Stati Uniti, il Belgio, l'Irlanda, e l'Olanda. Si riporta di seguito una sintesi degli studi appena menzionati.

Svezia

Gli Autori prendono in esame la relazione che intercorre tra i dati sui costi di manutenzione sostenuti dal gestore dell'infrastruttura ferroviaria (Banverket), i volumi di traffico ed altre caratteristiche, distinguendo l'impatto prodotto sui costi dai treni passeggeri e quello prodotto dai treni merci. L'ipotesi di partenza è, infatti, quella secondo la quale i treni passeggeri e i treni merci deteriorano l'infrastruttura in misura diversa, in ragione del fatto che tali tipologie di treni si differenziano in termini di velocità, peso assiale, sospensioni etc., generando, dunque, forze diverse sui binari.

Gli Autori hanno basato il lavoro su un dataset costituito dalle osservazioni relative ai costi di manutenzione sull'infrastruttura ferroviaria svedese. Il dataset di partenza è stato suddiviso in due parti: una con le osservazioni relative al traffico dei soli treni merci e un'altra con le osservazioni relative al traffico misto. La prima parte del dataset contiene 101 osservazioni riconducibili a circa 25 tratte, mentre la seconda ne contiene 648 riconducibili a circa 160 tratte (la tratta è un segmento della rete, di lunghezza variabile, che normalmente congiunge due nodi o due stazioni). I costi di manutenzione esaminati comprendono sia la manutenzione correttiva che quella preventiva, rimangono esclusi gli specifici interventi di manutenzione invernale, come la pulizia della neve e lo sghiacciamento.

Per le tratte a traffico misto è stato costruito un modello di regressione basato sull'utilizzo delle trasformazioni Box-Cox.

I coefficienti risultanti sono tutti significativi e i segni sono conformi alle aspettative: i costi di manutenzione sono positivamente correlati alla lunghezza della tratta, alla lunghezza degli scambi, all'età dei binari e degli scambi, al numero dei giunti e ai dati di output (volumi del traffico merci e del traffico passeggeri). Altro risultato degno di nota è che l'elasticità dei costi rispetto ai volumi di traffico passeggeri è più di tre volte maggiore dell'elasticità dei costi rispetto ai volumi di traffico merci.

Per le tratte riservate al traffico merci, è stato inizialmente costruito un modello basato su trasformazioni Box-Cox, ma, dato il risultato del test del rapporto di verosimiglianza, che non ha rigettato l'ipotesi di base (parametro di trasformazione λ uguale a zero), è stato costruito un modello log-lineare, includendo anche una variabile di output quadratica per riflettere la non linearità della relazione: le variabili di output sono entrambe significative, con quella quadratica che ha coefficiente negativo; la lunghezza della tratta, anch'essa significativa, è positiva; la lunghezza degli scambi, le variabili legate all'età e il numero di giunti presentano coefficienti non significativi. L'elasticità stimata è molto più alta di quella risultante dal modello Box-Cox.

Svizzera

Anche il gestore svizzero (*SBB - Schweizerische Bundesbahnen*) ha il diritto/dovere di far pagare l'accesso all'infrastruttura agli operatori del settore e la tariffa applicata, oltre ad essere non discriminatoria, deve essere modulata sulla base dei differenti costi legati all'utilizzo dell'infrastruttura, all'impatto ambientale dei veicoli ed alle caratteristiche della domanda. L'obiettivo dello studio sulla Svizzera consiste nella stima dei costi marginali legati alla manutenzione e al rinnovamento dell'infrastruttura ferroviaria, ipotizzando che tali costi marginali siano funzione di una serie di variabili esplicative, come le tonnellate-km, il numero di treni e caratteristiche tecniche e spaziali dell'infrastruttura stessa.

Il lavoro si è basato sulla costruzione di un unico dataset al fine di integrare tre differenti dataset di partenza: posto che le ferrovie svizzere possono essere suddivise in circa 500 sezioni di binario, per ciascuna di esse sono stati forniti i dati relativi agli anni dal 2003 al 2007 per infrastruttura, trasporto e costi.

Vengono riportate di seguito le **variabili infrastrutturali**, fermo restando che vi sono dati completi per gli anni presi in considerazione solo per 366 sezioni:

- lunghezza della sezione (km);
- lunghezza degli scambi sul totale della sezione (%);
- lunghezza dei ponti sul totale della sezione (%);
- frazione di raggio < 500m (%);
- frazione con pendenza > 2% (%);
- frazione della sezione con protezione da fuoco e rumori (%);
- frazione delle piattaforme sulla lunghezza totale della sezione (%);
- frazione delle traverse con età > 25 anni (%);
- dummy per stazioni passeggeri;
- dummy per gli scali di smistamento;
- dummy per le sezioni a binario unico;
- dummy per le regioni (23).

I **dati di trasporto** si riferiscono alle seguenti variabili:

- peso totale per sezione;
- peso per sezione dei treni passeggeri;
- peso per sezione dei treni merci;
- totale tonnellate-km;
- tonnellate-km treni passeggeri;
- tonnellate-km treni merci;
- numero totale dei treni;

- numero dei treni passeggeri;
- numero dei treni merci.

I **dati di costo** riguardano, in particolare, i costi per manutenzione operativa (e.g. pulizia, sghiacciamento, etc.), manutenzione dei binari, manutenzione dei sistemi di segnalamento e manutenzione dei cavi. Gli elementi di costo sono stati raggruppati in quattro categorie:

- costi di manutenzione annuali;
- parte dei costi annuali relativi esclusivamente a manutenzione operativa e dei binari;
- costi di manutenzione di lungo periodo che risultano riconducibili ai costi di rinnovamento;
- costi di manutenzione e rinnovamento (i costi di manutenzione annuali sono stati combinati con i costi di rinnovamento aventi cadenza quinquennale per ciascuna sezione).

Lo studio è stato eseguito applicando sia un modello log-lineare, sia le trasformazioni Box-Cox: dal momento che il parametro di trasformazione è statisticamente diverso da zero, la seconda metodologia è preferibile alla prima. Nel secondo modello (quello più rilevante), la maggior parte dei coefficienti sono significativi: sono positivi la lunghezza della sezione, degli scambi, dei ponti e delle piattaforme, la curvatura, le forti pendenze e le sezioni a binario unico; la lunghezza delle gallerie ha coefficiente negativo. I costi di rinnovamento risentono meno dell'influenza di variabili come la pendenza e, a differenza dei costi di manutenzione, la lunghezza delle gallerie non ha coefficiente negativo. Le elasticità così stimate sono state utilizzate per calcolare i costi marginali, dal momento che la grandezza di interesse è data dall'effetto prodotto da una tonnellata-km addizionale sui costi di una sezione.

Al fine di incrementare la flessibilità del modello, viene considerata anche l'ipotesi in cui la relazione tra costi e traffico non sia lineare, attraverso l'aggiunta di termini quadratici. Rimane tuttavia preferibile il modello lineare, poiché sia per i costi di manutenzione (secondo modello) sia per i costi di rinnovamento (terzo modello) o non vi sono differenze oppure queste non sono significative.

Sono state proposte anche varianti del modello includendo prima tipologie addizionali di treni e in seguito differenze in termini territoriali.

Austria

Gli Autori analizzano i costi di manutenzione sostenuti dal gestore dell'infrastruttura ferroviaria austriaca, sulla base di dati cross-section per gli anni 1998-2000. Sono stati stimati tre diversi modelli: log-lineare, translogaritmico e Box-Cox. Ciascun modello è stato stimato utilizzando le seguenti categorie di variabili:

1. tre tipi di variabili di traffico
 - numero di treni
 - tonnellate-km
 - wagon axles

Eccezion fatta per il modello translogaritmico che può essere stimato solo per le tonnellate lorde.

2. variabili relative alle caratteristiche dell'infrastruttura
 - raggio di curvatura
 - età del binario
 - lunghezza degli scambi
3. variabili dummy per gli anni di osservazione.

Tutti i modelli hanno restituito dei coefficienti significativi e il modello Box-Cox è risultato essere quello con la maggiore capacità predittiva. Da tutti i modelli è emersa una relazione positiva tra traffico e costi di manutenzione, nonché tra questi ultimi e le caratteristiche dell'infrastruttura. Rispetto, invece, alla quota di gallerie e stazioni sulla lunghezza totale della sezione, la relazione con i costi di manutenzione è negativa.

Francia

Ai fini dello studio dei costi di manutenzione sostenuti dal gestore francese dell'infrastruttura ferroviaria, la stessa è stata suddivisa in circa 1000 tratte.

Più nello specifico, la variabile dipendente è data dai costi di manutenzione riconducibili a tali tratte, che rappresentano circa l'81% del totale dei costi di manutenzione; sono compresi anche i costi legati alle catenarie, ai sistemi di segnalamento e alle opere d'arte. La restante parte si riferisce ai sistemi di smistamento, alle piattaforme intermodali per il trasporto delle merci e a tutti quei servizi residuali il cui costo non può essere assegnato ad una specifica tratta. Rimangono esclusi anche i costi di rinnovamento, eccezion fatta per alcuni interventi di manutenzione straordinaria rientranti nella categoria c.d. *Opérations de Grand Entretien* (OGE, si tratta di interventi che si collocano a metà strada tra quelli di manutenzione e quelli di rinnovamento).

Le variabili esplicative possono essere suddivise come segue:

1. variabili tecniche, a loro volta suddivise in:
 - infrastrutturali: numero di scambi per tratta, lunghezza della tratta (in metri), tipo di energia (elettrica o non elettrica), tipo di sistema di controllo del traffico (automatico o non automatico);
 - qualitative: età dei binari, età delle traverse, quota di traverse in calcestruzzo (sul totale), velocità massima consentita.
2. Variabili di traffico: peso medio (in tonnellate) di 5 tipi di treni (passeggeri lunga distanza, passeggeri Ile-de-France - IdF, regionali passeggeri, merci, altri).

Tre sono i modelli implementati: Box-Cox, translogaritmico e log-log. Il primo risulta essere preferibile rispetto agli altri due.

Le variabili tecniche sono statisticamente significative, dunque il loro utilizzo è essenziale ai fini della stima della funzione di costo di breve periodo.

Regno Unito

Lo studio prende in considerazione i dati relativi ai costi di manutenzione e rinnovamento dell'infrastruttura ferroviaria, ferme restando le limitazioni di seguito descritte.

I costi di manutenzione sono quelli riconducibili alla manutenzione generale, pari circa al 45% del totale dei costi di manutenzione sostenuti annualmente, dal momento che, oltre ai costi di manutenzione generale, soltanto i costi dei sistemi di segnalamento e delle telecomunicazioni sono disponibili a livello di *Maintenance Delivery Unit* (MDU). I costi di rinnovamento presi in considerazione sono parimenti i soli disponibili a livello di MDU, vale a dire i costi per il rinnovamento dei binari, delle traverse e della massicciata, che rilevano per circa il 30% dei costi di rinnovamento totali.

Le variabili esplicative utilizzate, invece, sono:

- densità totale del traffico (in tonnellate, tonnellate-km per km di tratta, disponibili per treni passeggeri intercity, passeggeri regionali e per treni merci);
- lunghezza della tratta (in km);
- percentuale della lunghezza della tratta con carico assiale massimo superiore a 25 tonnellate;
- percentuale della lunghezza della tratta con velocità massima della linea superiore a 100 mph (miglia orarie);
- percentuale della lunghezza della tratta con rotaie a saldatura continua;
- indice di costo orario del lavoro (in £).

Il modello econometrico è finalizzato a costruire una funzione di costo, che metta in relazione il totale dei costi presi in considerazione con le variabili di output (traffico), prezzi delle variabili di input (lavoro, energia, etc.) e input che nel breve periodo rimangono fissi (componenti infrastrutturali come numero dei deviatori, lunghezza, capacità e età della tratta, etc.).

Tale funzione di costo è stata utilizzata per determinare il costo marginale di breve periodo del traffico aggiuntivo, in quanto la formulazione consente di stimarne l'impatto marginale sul costo variabile a parità di caratteristiche della rete e lunghezza del binario. La funzione ha la forma di una log-log.

I coefficienti delle variabili relative alla qualità dell'infrastruttura non sono significative. Il coefficiente della variabile densità di traffico (logaritmica), che esprime l'elasticità dei costi rispetto al traffico, è significativo ed ha un valore più alto rispetto ad altri studi; la spiegazione potrebbe essere rinvenuta proprio nell'aver utilizzato dati che coprono soltanto una parte dei costi totali (45% dei costi di manutenzione e 30% dei costi di rinnovamento). Anche il coefficiente della lunghezza della tratta (logaritmica) è significativo e indica l'esistenza di economie di scala negli interventi di manutenzione e rinnovamento.

8.3 Stima dei coefficienti del modello econometrico

Si riporta di seguito la **stima dei coefficienti del modello Box-Cox**, dove la variabile dipendente è data dai **costi totali di manutenzione** e la variabile di traffico è data dal **peso dei treni circolati**. Il modello di Box-Cox prevede la trasformazione della variabile dipendente e delle variabili indipendenti quantitative che non presentano zeri «naturali».

| Variabili trasformate | | Dummy binario unico | | | |
|--------------------------------|------------|--|------------|---------------------|--------------|
| Peso treno | 0,144 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BA/CC | -2,016 *** | Liguria | 2,263 *** |
| Lunghezza tratta | 3,682 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BA/CF | -0,519 | Marche | 0,343 |
| Velocità max | -0,121 ** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BBAN/CF | 1,176 *** | Molise | 1,616 *** |
| Rapporto lunghezza/distanza | -1,416 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BBAN/CF-CE | -0,539 ** | Piemonte | 3,284 *** |
| Variabili non trasformate | | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BRA | -3,028 *** | Puglia | 1,300 *** |
| Altitudine | 0,002 *** | Dummy tratta non elettr. | -1,038 *** | Sardegna | 2,359 *** |
| Dislivello | 0,005 *** | Dummy tratta elettr. K25 | 1,350 *** | Sicilia | 3,263 *** |
| Percentuale gallerie (%) | -0,015 *** | Dummy sist. protez. marcia ERTMS | 4,534 *** | Trentino-Alto Adige | -1,048 *** |
| Percentuale ponti (%) | 0,030 *** | Dummy sist. protez. marcia SSC | 0,297 | Toscana | 2,743 *** |
| Numero deviatoi | 0,128 *** | Dummy sagoma PC25/PC30/PC32 | 0,622 *** | Umbria | 2,701 *** |
| Numero intersezioni | -0,335 *** | Dummy sagoma PC45/PC50 | -0,759 *** | Veneto | 1,506 *** |
| Dummy linea AV | 0,484 | Dummy sagoma PC60/PC80 | -1,488 *** | Anno 2014 | -0,723 ** |
| Dummy nodi | -1,339 *** | Abruzzo | 0,156 | Anno 2015 | -2,207 *** |
| Dummy linea complem. | -1,530 *** | Valle d'Aosta | 2,817 *** | Anno 2016 | -3,373 *** |
| Dummy presenza stazione | 8,060 *** | Basilicata | 3,509 *** | Anno 2017 | -1,566 *** |
| Dummy banalizz. | 0,439 * | Calabria | 1,927 *** | Costante | 17,514 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DC/DCO | -0,986 *** | Campania | 6,262 *** | Osservazioni | 14,412 |
| Dummy tipo eser./telec. DCO/DL | 0,776 *** | Emilia-Romagna | 2,253 *** | λ | 0,199 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DL | -0,050 | Friuli | 3,120 *** | Test $\lambda=0$ | 2.606,60 *** |

Note: * significativo al 10%; ** significativo al 5%; *** significativo al 1%

Si riporta di seguito la **stima dei coefficienti del modello log-log**, dove la variabile dipendente è data dai **costi totali di manutenzione** e la variabile di traffico è data dal **peso dei treni circolati**. Il modello log-log prevede la trasformazione logaritmica della variabile dipendente e delle variabili indipendenti quantitative che non presentano zeri «naturali».

| | | | | | |
|---------------------------------|------------|--|------------|---------------------|------------|
| Log peso treno | 0,300 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BA/CC | -0,181 *** | Lazio | 0,219 *** |
| Log lunghezza tratta | 0,537 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BA/CF | -0,118 *** | Liguria | 0,245 *** |
| Log velocità max | -0,066 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BBAN/CF | 0,187 *** | Marche | 0,004 |
| Log rapporto lunghezza/distanza | -0,161 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BBAN/CF-CE | -0,024 | Molise | 0,201 *** |
| Altitudine | 0,000 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BRA | -0,384 *** | Piemonte | 0,324 *** |
| Dislivello | 0,001 *** | Dummy tratta non elettr. | -0,088 *** | Puglia | 0,147 *** |
| Percentuale gallerie (%) | -0,002 *** | Dummy tratta elettr. K25 | 0,120 *** | Sardegna | 0,280 *** |
| Percentuale ponti (%) | 0,004 *** | Dummy sist. protez. marcia ERTMS | 0,263 ** | Sicilia | 0,393 *** |
| Numero deviatoi | 0,010 *** | Dummy sist. protez. marcia SSC | 0,060 ** | Trentino-Alto Adige | -0,162 *** |
| Numero intersezioni | -0,024 *** | Dummy sagoma PC25/PC30/PC32 | 0,042 ** | Toscana | 0,262 *** |
| Dummy linea AV | 0,351 *** | Dummy sagoma PC45/PC50 | -0,070 *** | Umbria | 0,248 *** |
| Dummy nodi | -0,100 *** | Dummy sagoma PC60/PC80 | -0,092 *** | Veneto | 0,147 *** |
| Dummy linea complem. | -0,191 *** | Abruzzo | -0,020 | Anno 2014 | -0,042 |
| Dummy presenza stazione | 0,913 *** | Valle d'Aosta | 0,231 *** | Anno 2015 | -0,193 *** |
| Dummy banalizz. | 0,053 * | Basilicata | 0,324 *** | Anno 2016 | -0,309 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DC/DCO | -0,152 *** | Calabria | 0,225 *** | Anno 2017 | -0,146 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DCO/DL | 0,113 *** | Campania | 0,618 *** | Costante | 5,618 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DL | 0,132 *** | Emilia-Romagna | 0,255 *** | Osservazioni | 14,412 |
| Dummy binario unico | -0,132 *** | Friuli | 0,203 *** | R ² | 0,676 |

Note: * significativo al 10%; ** significativo al 5%; *** significativo al 1%

Si riporta di seguito la **stima dei coefficienti del modello Box-Cox**, dove la variabile dipendente è data dai **costi totali di manutenzione** e la variabile di traffico è data dal **numero dei treni circolati**. Il modello di Box-Cox prevede la trasformazione della variabile dipendente e delle variabili indipendenti quantitative che non presentano zeri «naturali».

| | | | | | |
|--------------------------------|------------|--|------------|---------------------|--------------|
| Variabili trasformate | | Dummy binario unico | -0.877 *** | Lazio | 2.525 *** |
| Numero treni | 0.497 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BA/CC | -1.566 *** | Liguria | 2.923 *** |
| Lunghezza tratta | 3.769 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BA/CF | -0.242 | Marche | -0.100 |
| Velocità max | -0.180 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BBAN/CF | 1.075 *** | Molise | 1.410 *** |
| Rapporto lunghezza/distanza | -1.591 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BBAN/CF-CE | -0.685 *** | Piemonte | 3.490 *** |
| Variabili non trasformate | | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BRA | -3.464 *** | Puglia | 1.374 *** |
| Altitudine | 0.003 *** | Dummy tratta non elettr. | -1.862 *** | Sardegna | 1.701 *** |
| Dislivello | 0.005 *** | Dummy tratta elettr. K25 | 2.204 *** | Sicilia | 2.324 *** |
| Percentuale gallerie (%) | -0.014 *** | Dummy sist. protez. marcia ERTMS | 5.126 *** | Trentino-Alto Adige | -1.118 *** |
| Percentuale ponti (%) | 0.032 *** | Dummy sist. protez. marcia SSC | -0.514 ** | Toscana | 2.872 *** |
| Numero deviatoti | 0.125 *** | Dummy sagoma PC25/PC30/PC32 | 0.660 *** | Umbria | 2.841 *** |
| Numero intersezioni | -0.280 *** | Dummy sagoma PC45/PC50 | -0.172 | Veneto | 1.297 *** |
| Dummy linea AV | 0.843 | Dummy sagoma PC60/PC80 | -0.567 *** | Anno 2014 | -1.381 *** |
| Dummy nodi | -1.986 *** | Abruzzo | -0.113 | Anno 2015 | -2.941 *** |
| Dummy linea complem. | -2.445 *** | Valle d'Aosta | 2.253 *** | Anno 2016 | -4.095 *** |
| Dummy presenza stazione | 7.807 *** | Basilicata | 3.212 *** | Anno 2017 | -1.447 *** |
| Dummy banalizz. | 0.783 *** | Calabria | 0.928 *** | Costante | 18.227 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DC/DCO | -0.834 ** | Campania | 5.584 *** | Osservazioni | 14.412 |
| Dummy tipo eser./telec. DCO/DL | 0.827 *** | Emilia-Romagna | 2.606 *** | λ | 0.197 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DL | 0.532 | Friuli | 3.519 *** | Test $\lambda=0$ | 2,523.95 *** |

Note: * significativo al 10%; ** significativo al 5%; *** significativo al 1%

Si riporta di seguito la **stima dei coefficienti del modello log-log**, dove la variabile dipendente è data dai **costi totali di manutenzione** e la variabile di traffico è data dal **numero dei treni circolati**. Il modello log-log prevede la trasformazione logaritmica della variabile dipendente e delle variabili indipendenti quantitative che non presentano zeri «naturali».

| | | | | | |
|---------------------------------|------------|--|------------|---------------------|------------|
| Log numero treni | 0,311 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BA/CC | -0,137 *** | Lazio | 0,231 *** |
| Log lunghezza tratta | 0,552 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BA/CF | -0,080 ** | Liguria | 0,308 *** |
| Log velocità max | -0,083 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BBAN/CF | 0,180 *** | Marche | -0,034 |
| Log rapporto lunghezza/distanza | -0,189 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BBAN/CF-CE | -0,046 * | Molise | 0,169 *** |
| Altitudine | 0,000 *** | Dummy tipo di blocco/corr. bin. BRA | -0,460 *** | Piemonte | 0,364 *** |
| Dislivello | 0,001 *** | Dummy tratta non elettr. | -0,213 *** | Puglia | 0,155 *** |
| Percentuale gallerie (%) | -0,002 *** | Dummy tratta elettr. K25 | 0,252 *** | Sardegna | 0,234 *** |
| Percentuale ponti (%) | 0,004 *** | Dummy sist. protez. marcia ERTMS | 0,316 ** | Sicilia | 0,262 *** |
| Numero deviatoti | 0,011 *** | Dummy sist. protez. marcia SSC | -0,057 ** | Trentino-Alto Adige | -0,157 *** |
| Numero intersezioni | -0,021 *** | Dummy sagoma PC25/PC30/PC32 | 0,047 ** | Toscana | 0,289 *** |
| Dummy linea AV | 0,434 *** | Dummy sagoma PC45/PC50 | -0,015 | Umbria | 0,276 *** |
| Dummy nodi | -0,160 *** | Dummy sagoma PC60/PC80 | -0,024 | Veneto | 0,143 *** |
| Dummy linea complem. | -0,275 *** | Abruzzo | -0,044 | Anno 2014 | -0,156 *** |
| Dummy presenza stazione | 0,911 *** | Valle d'Aosta | 0,243 *** | Anno 2015 | -0,318 *** |
| Dummy banalizz. | 0,092 *** | Basilicata | 0,316 *** | Anno 2016 | -0,435 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DC/DCO | -0,122 *** | Calabria | 0,109 *** | Anno 2017 | -0,141 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DCO/DL | 0,113 *** | Campania | 0,562 *** | Costante | 7,344 *** |
| Dummy tipo eser./telec. DL | 0,181 *** | Emilia-Romagna | 0,294 *** | Osservazioni | 14,412 |
| Dummy binario unico | -0,140 *** | Friuli | 0,269 *** | R ² | 0,680 |

Note: * significativo al 10%; ** significativo al 5%; *** significativo al 1%

8.4 Benchmark risultati modello econometrico

Si riporta di seguito la tabella che riassume i valori relativi all'**elasticità** e ai **costi marginali di manutenzione** stimati per diversi Paesi Europei negli studi realizzati nell'ambito del progetto *Cost Allocation of Transport Infrastructure Cost ("CATRIN")*, fornendo un confronto rispetto all'elasticità e ai costi marginali di manutenzione stimati per l'Italia nel presente lavoro.

EUR/k ton-km

| Paese | Modello | Costo marginale |
|-------------|---------|-----------------|
| Italia | Log-log | 0,903 |
| Italia | Box-Cox | 0,832 |
| Francia | Box-Cox | 1,390 |
| Svezia | Box-Cox | 0,460 |
| Svizzera | Box-Cox | 0,320 |
| Austria | Box-Cox | 1,200 |
| Regno Unito | Log-Log | 1,730 |

Fonte: CATRIN. D8, Rail Cost Allocation for Europe (2009).

| Paese | Modello | Elasticità | Recupero del costo (%)* |
|-------------|---------|------------|-------------------------|
| Italia | Log-log | 0,300 | 30 |
| Italia | Box-Cox | 0,349 | 31 |
| Francia | Box-Cox | 0,390 | 34-39 |
| Svezia | Box-Cox | 0,250 | 20 |
| Svizzera | Box-Cox | 0,220 | 21 |
| Austria | Box-Cox | 0,550 | 48 |
| Regno Unito | Log-Log | 0,250 | |

Fonte: CATRIN. D8, Rail Cost Allocation for Europe (2009).

(*) Costo marginale / costo medio

EUR/treni-km

| Paese | Modello | Costo marginale |
|--------------|---------|-----------------|
| Italia | Log-log | 0,435 |
| Italia | Box-Cox | 0,404 |
| Francia* | Box-Cox | 0,695 |
| Svezia* | Box-Cox | 0,230 |
| Svizzera | Box-Cox | 0,180 |
| Austria | Box-Cox | 0,635 |
| Regno Unito* | Log-Log | 0,865 |

(*) Costo marginale stimato sulla base di un fattore di conversione pari a 0,5 rispetto al costo per K Ton-km.

8.5 Velocità di riferimento del modello

Occorre distinguere a quale tipo di velocità ci si riferisce nella scelta del parametro da modulare, per cui si riportano di seguito delle definizioni:

- **Velocità commerciale (V_{COMM}):** è un parametro sensibile per il cliente finale per cui ha senso calcolarlo su un itinerario O-D e non su singole tratte; non si utilizza per caratterizzare l'usura. È ottenuta come **distanza O-D** diviso **tempo di viaggio totale** (inclusivo dei tempi di servizio viaggiatori, soste tecniche e allungamenti) sulla relazione O-D.
- **Velocità di marcia (V_{MARCIA}):** è il parametro utilizzato per calcolare l'usura e può essere calcolato per intero itinerario (come avviene nel tariffario di RFI), ma anche per singola tratta. È ottenuta come **lunghezza di una tratta** diviso

tempo di viaggio al netto del servizio viaggiatori e delle soste tecniche (inclusivo dei soli allungamenti) sulla stessa tratta.

- **Velocità operativa (V_O):** è un parametro *utilizzabile* per calcolare l'usura, considerando che la condotta di un convoglio avviene impostando la velocità in funzione dei segnali e non dei tempi di arrivo a destinazione. Può essere calcolata per intero itinerario o per singola tratta. È ottenuta come **lunghezza di una tratta** diviso la **percorrenza pura** (tempo di viaggio al netto del servizio viaggiatori, delle soste tecniche e degli allungamenti) sulla stessa tratta.
- **Velocità massima (V_{MAX}):** è la minima velocità individuata dalla massima velocità dei rotabili in composizione e dalla velocità delle linee in funzione del rango in una determinata sezione.

In genere vale:

$$0 < V_{COMM} \leq V_{MARCIA} \leq V_O \leq V_{MAX}$$

Nel costruire gli abachi di danneggiamento si è suddiviso il campo delle velocità di marcia in classi fissando per ciascuna un limite minimo e un limite massimo. Per ciascuna classe si è calcolata la velocità media come media ponderata rispetto alle percorrenze. Successivamente per addivenire alla **velocità di riferimento** tale media è stata incrementata del 13% per tener conto che, sebbene il treno venga necessariamente rendicontato con la velocità di marcia viaggia nella realtà ad una velocità superiore, che è ottenuta sfruttando le caratteristiche del mezzo e della linea. Questo avviene perché la velocità rendicontata contiene, come già illustrato, degli allungamenti per garantire la regolarità del servizio o l'uso efficiente della capacità dell'infrastruttura.

Nel grafico a lato viene illustrata la relazione tra **velocità di marcia rendicontata** (che contiene gli allungamenti) e la **velocità operativa** (che è stata assunta come velocità di riferimento per costruire gli abachi). La velocità operativa è in genere il 26% maggiore della velocità di marcia. Per il calcolo del danno la velocità a cui si fa riferimento è la velocità di marcia incrementata del 13%, ipotizzato che la metà del tempo per gli allungamenti venga utilizzata dal treno in stazione (arrivo anticipo o partenza in ritardo) e l'altra metà come incremento delle velocità assegnate in orario.

Tabella 42 – Velocità di riferimento: confronto tra velocità di marcia calcolate relative alla percorrenza pura e le velocità rendicontate per alcuni treni

| Materiale | BU | N. treno | Imp. | Mot. | Rim. | Peso | N. assi | Peso/ass | Vm | Vrend | Linea | l/a linea |
|--------------|----|----------|------|------|------|------|---------|----------|-----|-------|---------------------------|-----------|
| TAF | VB | 21747 | 48 | 2 | 2 | 273 | 16 | 17,06 | 70 | 57 | Orte - Fiumicino Aer. | 1,23 |
| TAF | VB | 7403 | 48 | 2 | 2 | 273 | 16 | 17,06 | 47 | 45 | La Storta - Valle Aurelia | 3,73 |
| E 464 np | VB | 12042 | 559 | 1 | 3 | 285 | 16 | 17,81 | 98 | 80 | Pescara - Ancona | 1,02 |
| E 444 | VL | 1546 | 641 | 1 | 6 | 470 | 28 | 16,79 | 129 | 98 | Pescara - Ancona | 1,02 |
| E 464 np | VB | 2481 | 597 | 1 | 5 | 422 | 24 | 17,58 | 102 | 79 | Perugia - Roma | 1,12 |
| AGV575 | VL | 9912 | 964 | 6 | 5 | 423 | 24 | 17,63 | 243 | 184 | Bologna - Milano (AV) | 1,00 |
| ETR 500 | VL | (teor) | 1 | 2 | 11 | 652 | 52 | 12,54 | 99 | 79 | Verona - Brennero | 1,27 |
| E 414 | VL | 8811 | 1500 | 2 | 9 | 732 | 44 | 16,64 | 147 | 109 | Milano - Lecce | 1,02 |
| E 402 (IC) | VL | 608 | 253 | 1 | 8 | 600 | 36 | 16,67 | 134 | 104 | Bologna - Bari | 1,03 |
| ETR 1000 | VL | 9309 | 901 | 4 | 4 | 501 | 32 | 15,66 | 219 | 137 | Bologna - Firenze (AV) | 1,01 |
| ETR 1000 | VL | 9617 | 901 | 4 | 4 | 501 | 32 | 15,66 | 248 | 207 | Milano - Bologna (AV) | 1,00 |
| ETR 500 | VL | 9502 | 951 | 2 | 11 | 652 | 52 | 12,54 | 246 | 206 | Bologna - Milano (AV) | 1,00 |
| E 189 | M | (teor) | 3197 | 1 | 16 | 1200 | 68 | 17,65 | 94 | 75 | Pescara - Ancona | 1,02 |
| ETR 1000 dup | VL | 9528 | 903 | 8 | 8 | 1002 | 64 | 15,66 | 248 | 207 | Bologna - Milano (AV) | 1,00 |
| E 189 + E189 | M | 43148 | 3640 | 2 | 17 | 1600 | 76 | 21,05 | 92 | 69 | Verona QE - Brennero | 1,27 |

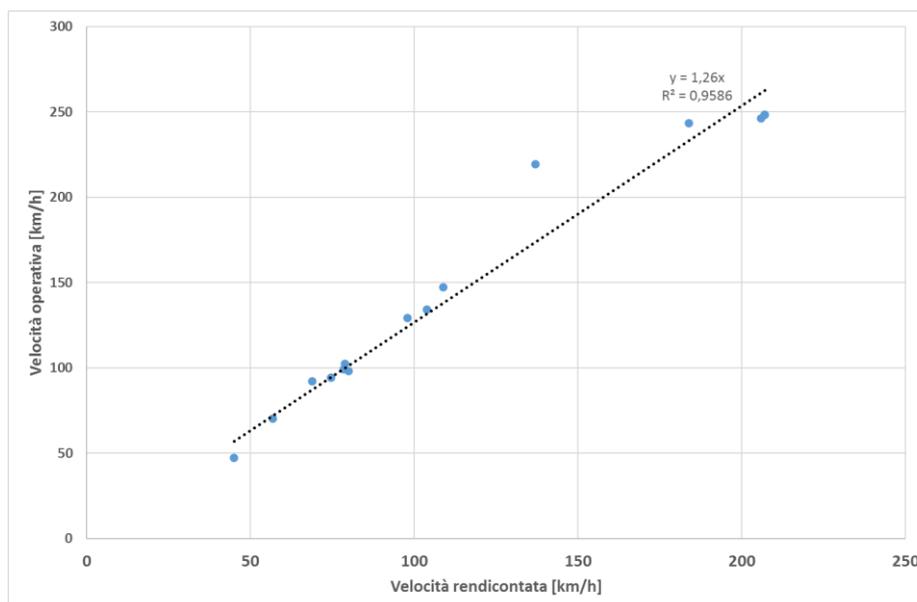


Figura 53 – Relazione tra velocità rendicontata e velocità operativa

8.6 Modello di potenza

Per calcolare la componente D3 del modello svizzero occorre fare riferimento alla potenza alla ruota, che è una grandezza variabile durante la marcia del treno sia in funzione del tracciato sia in funzione della curva caratteristica di trazione del mezzo. Nella costruzione degli abachi si è considerata una potenza di trazione dipendente dai cluster di velocità/massa in funzione delle potenze continue dei mezzi di trazione ricorrenti in ciascun cluster. Per trasformarle in potenze alla ruota medie vengono rapportate a 8 ruote e a un'utilizzazione media della potenza sul tracciato del 50%.

Tabella 43 – Potenze dei treni per ciascun cluster massa/velocità di marcia (MW)

| Potenza (MW) | | Intervalli di peso (t) | | | | | |
|-------------------------------|-----------|------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|
| | | 0 - 300 | 300 - 600 | 600 - 900 | 900 - 1200 | 1200 - 1500 | 1500 - 2000 |
| Intervalli di velocità (km/h) | 0 - 75 | 2,0 | 2,0 | 3,5 | 6,0 | 10,0 | 10,0 |
| | 75 - 100 | 4,0 | 4,0 | 6,0 | 6,0 | 10,0 | 10,0 |
| | 100 - 125 | 4,0 | 4,0 | 6,0 | 6,0 | 10,0 | 10,0 |
| | 125 - 150 | 4,0 | 4,0 | 6,0 | 6,0 | 10,0 | 10,0 |
| | 150 - 175 | 7,5 | 7,5 | 9,0 | 9,0 | 10,0 | 10,0 |
| | 175 - 200 | 7,5 | 7,5 | 9,0 | 9,0 | 10,0 | 10,0 |
| | 200 - 225 | 7,5 | 7,5 | 9,0 | 9,0 | 10,0 | 10,0 |
| | 225 - 250 | 7,5 | 7,5 | 9,0 | 9,0 | 10,0 | 10,0 |

La potenza alla ruota utilizzata per ciascuna classe è espressa nella tabella successiva

Tabella 44 – Potenze dei treni per ciascun cluster massa/velocità di marcia (kW/ruota) utilizzate nel calcolo della componente D3 per la costruzione degli abachi di danneggiamento

| Potenza (kW/ruota) | | Intervalli di peso (t) | | | | | |
|-------------------------------|-----------|------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|
| | | 0 - 300 | 300 - 600 | 600 - 900 | 900 - 1200 | 1200 - 1500 | 1500 - 2000 |
| Intervalli di velocità (km/h) | 0 - 75 | 125 | 125 | 219 | 375 | 625 | 625 |
| | 75 - 100 | 250 | 250 | 375 | 375 | 625 | 625 |
| | 100 - 125 | 250 | 250 | 375 | 375 | 625 | 625 |
| | 125 - 150 | 250 | 250 | 375 | 375 | 625 | 625 |
| | 150 - 175 | 469 | 469 | 563 | 563 | 625 | 625 |
| | 175 - 200 | 469 | 469 | 563 | 563 | 625 | 625 |
| | 200 - 225 | 469 | 469 | 563 | 563 | 625 | 625 |
| | 225 - 250 | 469 | 469 | 563 | 563 | 625 | 625 |

8.7 Modello di curvatura

Nella tabella successiva vengono riportati gli sviluppi del traffico su ogni classe di raggi di curvatura. Sono state quindi calcolate le componenti D4.1 e D4.2 per ciascuna classe di curvatura, ma nella costruzione degli abachi sono stati utilizzati i valori indistinti per ciascuna classe di velocità e di massa.

Tabella 45 – Valori di lavoro di attrito in curva per ciascuna classe di raggio di curvatura e calcolo dei valori D4.1 e D4.2 da applicare all'intera rete

| Raggi | Volumi | Raggio medio | Curvatura media (1/R) | % di incidenza | Wb | D4.1 | D4.2 |
|----------------|---------------|--------------|-----------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| [m] | [Mtr*km] | [m] | [m ⁻¹] | | [Nm/m] | | |
| R < 300 | 1,93 | 270 | 0,00370 | 0,5% | 150 | 0,23 | 0,77 |
| 300 ≤ R < 400 | 5,42 | 343 | 0,00292 | 1,5% | 100 | 0,68 | 0,32 |
| 400 ≤ R < 600 | 19,81 | 480 | 0,00208 | 5,4% | 60 | 0,90 | - |
| 600 ≤ R < 1200 | 32,04 | 800 | 0,00125 | 8,8% | 25 | 0,20 | - |
| R ≥ 1200 | 42,23 | 3.000 | 0,00033 | 11,6% | 0 | - | - |
| Lrett | 262,18 | | - | 72,1% | 0 | - | - |
| TOT | 363,61 | 3.072 | 0,00033 | 100,0% | 7,76 | 0,08 | 0,01 |

8.8 Indice delle figure

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - I COSTI MARGINALI | 8 |
| FIGURA 2 - LINEE GUIDA NELL'IMPLEMENTAZIONE DELLA METODOLOGIA ECONOMETRICA PER LA DETERMINAZIONE DEI COSTI DIRETTI. | 10 |
| FIGURA 3 - LE LOCALITÀ, LE TRATTE E LE SOTTOSTAZIONI DELLA LINEA FERROVIARIA ANCONA – PESCARA | 12 |
| FIGURA 4 - TOPOLOGIA MODELLO IN.RETE 2000 – ES. TRATTA FIRENZE SANTA MARIA NOVELLA – DEV. ESTREMO FIRENZE STATUTO | 13 |
| FIGURA 5 - TOPOLOGIA MODELLO PIC – ES. TRATTA FIRENZE SANTA MARIA NOVELLA – DEV. ESTREMO FIRENZE STATUTO..... | 13 |
| FIGURA 6 - POLITICHE MANUTENTIVE DI RETE FERROVIARIA ITALIANA. NEL MODELLO SONO STATI CONSIDERATI COME DATI DI INPUT TUTTI GLI ORDINI DI LAVORO DELLA MANUTENZIONE ORDINARIA..... | 14 |
| FIGURA 7. DISTRIBUZIONE DEI COSTI DI MANUTENZIONE ORDINARIA RELATIVI AL 2018 PER CATEGORIA DI COSTO E SEDI TECNICHE, CIOÈ PER LOCALITÀ (LO), SOTTOSTAZIONI (SS) E TRATTE (TR) | 16 |
| FIGURA 8. DISTRIBUZIONE DEI COSTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA RELATIVI AL PERIODO 2014-2018 PER CATEGORIA DI COSTO | 17 |
| FIGURA 9. ESTENSIONE DELLE LINEE PER ELETTRIFICAZIONE E NUMERO BINARI..... | 19 |
| FIGURA 10. ESTENSIONE DELLE LINEE PER SISTEMA DI ESERCIZIO | 20 |
| FIGURA 11. ESTENSIONE DELLE LINEE PER REGIME DI CIRCOLAZIONE | 20 |
| FIGURA 12. ESTENSIONE DELLE LINEE PER SISTEMA DI CONTROLLO DELLA MARCIA..... | 21 |
| FIGURA 13. ESTENSIONE DELLE LINEE PER SISTEMA DI CONTROLLO DELLA MARCIA..... | 22 |
| FIGURA 14. ESTENSIONE DELLE LINEE PER SISTEMA DI CONTROLLO DELLA MARCIA..... | 22 |
| FIGURA 15. ESTENSIONE DELLE LINEE PER SAGOME LIMITE | 23 |
| FIGURA 16 - STIMA DELLA FUNZIONE DI ELASTICITÀ DEL MODELLO BOX-COX AL VARIARE DEL TRAFFICO, MISURATO IN TERMINI DI PESO DEI TRENI CIRCOLATI, IN CORRISPONDENZA DEL COSTO MEDIO PER TRATTA. | 30 |
| FIGURA 17 - STIMA DELLA FUNZIONE DI ELASTICITÀ DEL MODELLO BOX-COX AL VARIARE DEL TRAFFICO, MISURATO IN TERMINI DI NUMERO DI TRENI CIRCOLATI, IN CORRISPONDENZA DEL COSTO MEDIO PER TRATTA. | 30 |
| FIGURA 18 - DISTRIBUZIONE DELLE VELOCITÀ DI MARCIA (2018) | 40 |
| FIGURA 19 - DISTRIBUZIONE DELLE MASSE TOTALI (2018)..... | 41 |
| FIGURA 20 - CAMPO DI ESISTENZA DELLE MASSE ASSIALI MEDIE ED ESEMPI..... | 42 |
| FIGURA 21 - TRAFFICO PER CLASSE DI MASSA ASSIALE (2018) | 43 |
| FIGURA 22 - RIPARTIZIONE DEL TRAFFICO E DELL'ESTENSIONE DELLA RETE PER CLASSI DI CURVATURA..... | 44 |
| FIGURA 23 - RIPARTIZIONE DEL TRAFFICO E DELL'ESTENSIONE DELLA RETE PER CLASSI DI PENDENZA..... | 45 |
| FIGURA 24 - ANDAMENTO DEI VOLUMI DI TRAFFICO PER TIPO DI TRAZIONE DAL 2014 AL 2019 | 46 |
| FIGURA 25 - RIPARTIZIONE MATERIALI ROTABILI LUNGA PERCORRENZA PER VOLUMI DI TRAFFICO..... | 47 |
| FIGURA 26 - CARATTERISTICHE CARROZZE TIPO LUNGA PERCORRENZA | 48 |
| FIGURA 27 - RIPARTIZIONE MATERIALI ROTABILI BREVE PERCORRENZA PER VOLUMI DI TRAFFICO..... | 49 |
| FIGURA 28 - CARATTERISTICHE CARROZZE TIPO BREVE PERCORRENZA..... | 49 |
| FIGURA 29 - RIPARTIZIONE MEZZI DI TRAZIONE MERCI PER VOLUMI DI TRAFFICO..... | 50 |
| FIGURA 30 – SCHEMATIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI RICADENTI IN CIASCUN SETTORE DI SPECIALIZZAZIONE IN UNA GENERICA SEZIONE DI LINEA (RIF. ELENCO NUMERATO PARAGRAFO PRECEDENTE) | 51 |
| FIGURA 31 - MODELLO SVIZZERO DI DANNEGGIAMENTO: EFFETTI DI DANNEGGIAMENTO SULLE DIVERSE PARTI DI INFRASTRUTTURA E AZIONI MANUTENTIVE CORRELATE | 52 |
| FIGURA 32: PANORAMICA DEI FATTORI DI CALIBRATURA DEI COSTI | 55 |
| FIGURA 33 – INDICE DI DANNO SPECIFICO (SINGOLO ASSE) NORMALIZZATO PER CIASCUNA MASSA ASSIALE (10-14-18-22 T/A) | 57 |
| FIGURA 34 - DANNO TOTALE (TUTTI GLI ASSI) – PARAMETRO FISSO MASSA ASSIALE (14,5 T) | 58 |
| FIGURA 35 - DANNO TOTALE (TUTTI GLI ASSI) – PARAMETRO FISSO MASSA TOTALE (465 T) | 59 |
| FIGURA 36 - DANNO TOTALE (TUTTI GLI ASSI) – PARAMETRO FISSO VELOCITÀ DI MARCIA (90 KM/H)..... | 60 |
| FIGURA 37 - USURA DEL FILO DI CONTATTO | 61 |
| FIGURA 38: TIPOLOGIE DI SISTEMI DI ALIMENTAZIONE ELETTRICA IN USO SULLA RETE GESTITA DA RFI..... | 61 |
| FIGURA 39 - MODELLO DI USURA DEL FILO DI CONTATTO | 62 |
| FIGURA 40 - ANDAMENTO DEL NWR IN FUNZIONE DEL CONTRIBUTO MECCANICO ED ELETTRICO..... | 62 |
| FIGURA 41 - FORZA DI CONTATTO PANTOGRAFO-LINEA DI CONTATTO..... | 63 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 42 - IPOTESI DI ASSORBIMENTO DI CORRENTE IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ | 63 |
| FIGURA 43 - ANDAMENTO DEL NWR IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ DI STRISCIAMENTO DEL PANTOGRAFO | 64 |
| FIGURA 44 - SOGLIE DI INTERVENTO PER I FILI DI CONTATTO USATI SU RETE RFI | 64 |
| FIGURA 45 - CRITERI PER LA SCELTA DEI PARAMETRI DI MODULAZIONE DEL COSTO DIRETTO UNITARIO | 66 |
| FIGURA 46 - SCHEMATIZZAZIONE DEI PARAMETRI DI MODULAZIONE DEL COSTO DIRETTO UNITARIO E COME INFLUISCONO NEL MODELLO INGEGNERISTICO AL FINE DI DETERMINARE LE TARIFFE | 67 |
| FIGURA 47 - RIDEFINIZIONE DEI LIMITI DI CLASSE DI VELOCITÀ (DATI 2018) | 68 |
| FIGURA 48 - RIDEFINIZIONE DEI LIMITI DI CLASSE DI MASSA (DATI 2018) | 70 |
| FIGURA 49 – VALORI DI RIFERIMENTO PER LA COSTRUZIONE DEGLI ABACHI DI DANNEGGIAMENTO PER LOCOMOTORE E VEICOLO RIMORCHIATO RELATIVAMENTE A DIAMETRO RUOTA, INTERPERNO E PASSO DEI CARRELLI | 71 |
| FIGURA 50 - ABACO DI DANNEGGIAMENTO COSTRUITO CON IL MODELLO INGEGNERISTICO SVIZZERO RELATIVO A SEI CURVE ISO-MASSA | 76 |
| FIGURA 51 – ABACO DI DANNEGGIAMENTO COSTRUITO CON IL MODELLO INGEGNERISTICO SVIZZERO RELATIVO A SEI CURVE ISO-VELOCITÀ, IN CUI LA MASSA È UNA FUNZIONE CONTINUA | 78 |
| FIGURA 52 – GRAFICO DELLE TARIFFE T _{BASE} ,A1-2 | 79 |
| FIGURA 53 – RELAZIONE TRA VELOCITÀ RENDICONTATA E VELOCITÀ OPERATIVA | 95 |

8.9 Indice delle tabelle

| | |
|--|----|
| TABELLA 1 - DISTRIBUZIONE DEI COSTI DI MANUTENZIONE ORDINARIA RELATIVI AL 2018 PER CATEGORIA DI COSTO E SEDI TECNICHE, CIOÈ PER LOCALITÀ (LO), SOTTOSTAZIONI (SS) E TRATTE (TR) | 16 |
| TABELLA 2 - DISTRIBUZIONE DEI COSTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA RELATIVI AL PERIODO 2014-2018 PER CATEGORIA DI COSTO | 17 |
| TABELLA 3 - CARATTERISTICHE INVARIANTI INFRASTRUTTURA | 24 |
| TABELLA 4 - STIMA DEI COEFFICIENTI DI PRINCIPALE INTERESSE DEL MODELLO LOG-LOG E BOX-COX (VARIABILE LA VARIABILE DI TRAFFICO È MISURATA IN TERMINI DI PESO DEI TRENI CIRCOLATI) | 28 |
| TABELLA 5 - STIMA DEI COEFFICIENTI DI PRINCIPALE INTERESSE DEL MODELLO LOG-LOG E BOX-COX (VARIABILE LA VARIABILE DI TRAFFICO È MISURATA IN TERMINI DI NUMERO DI TRENI CIRCOLATI) | 29 |
| TABELLA 6 - STIMA DELL'ELASTICITÀ, DEL COSTO MEDIO E DEL COSTO MARGINALE RELATIVI AI COSTI TOTALI DI MANUTENZIONE RISPETTO ALLA VARIABILE DI TRAFFICO DATA DAL PESO DEI TRENI. | 31 |
| TABELLA 7 - STIMA DELL'ELASTICITÀ, DEL COSTO MEDIO E DEL COSTO MARGINALE RELATIVI AI COSTI TOTALI DI MANUTENZIONE RISPETTO ALLA VARIABILE DI TRAFFICO DATA DAL NUMERO DI TRENI. | 31 |
| TABELLA 8 - STIMA DELL'ELASTICITÀ, DEL COSTO MEDIO E DEL COSTO MARGINALE RELATIVI AI COSTI TOTALI DI MANUTENZIONE, DISTINTI PER TIPOLOGIA DI SERVIZIO. | 31 |
| TABELLA 9 - STIMA DEL MODELLO BOX-COX DEL COSTO MEDIO E DEL COSTO MARGINALE PER NUMERO DI TRENI RELATIVI AI COSTI DI ARMAMENTO BINARIO E DEVIATOI | 32 |
| TABELLA 10 - STIMA DEL MODELLO BOX-COX DEL COSTO MEDIO E DEL COSTO MARGINALE PER NUMERO DI TRENI RELATIVI AI COSTI DI MANUTENZIONE DISTINTI PER TIPOLOGIA DI COSTO. | 32 |
| TABELLA 11 - STIMA DEI COEFFICIENTI DI PRINCIPALE INTERESSE DEL MODELLO LOG-LOG E BOX-COX PER I COSTI DI RINNOVO (VARIABILE LA VARIABILE DI TRAFFICO È MISURATA IN TERMINI DI PESO DEI TRENI CIRCOLATI) | 33 |
| TABELLA 12 - STIMA DEI COEFFICIENTI DI PRINCIPALE INTERESSE DEL MODELLO LOG-LOG E BOX-COX PER I COSTI DI RINNOVO (VARIABILE LA VARIABILE DI TRAFFICO È MISURATA IN TERMINI DI NUMERO DI TRENI CIRCOLATI) | 34 |
| TABELLA 13 - STIMA DELL'ELASTICITÀ, DEL COSTO MEDIO E DEL COSTO MARGINALE RELATIVI AI COSTI DI RINNOVO RISPETTO ALLA VARIABILE DI TRAFFICO DATA DAL PESO DEI TRENI | 34 |
| TABELLA 14 - STIMA DELL'ELASTICITÀ, DEL COSTO MEDIO E DEL COSTO MARGINALE RELATIVI AI COSTI DI RINNOVO RISPETTO ALLA VARIABILE DI TRAFFICO DATA DAL NUMERO DEI TRENI CIRCOLATI | 35 |
| TABELLA 15 - PARAMETRI DI MODULAZIONE: ANALISI PRELIMINARE | 37 |
| TABELLA 16 - PARAMETRI UTILIZZATI PER LA MODULAZIONE DAI GESTORI EUROPEI | 39 |
| TABELLA 17 - TRAFFICO PER CLASSE DI VELOCITÀ DI MARCIA (2018) | 40 |
| TABELLA 18 - TRAFFICO PER CLASSE DI PESO (2018) | 41 |
| TABELLA 19 - NUMERO VEICOLI, ASSI-VEICOLO E ASSI TOTALI MEDI (2018) | 42 |
| TABELLA 20 - TRAFFICO PER CLASSE DI MASSA ASSIALE E BUSINESS (2018) | 42 |
| TABELLA 21 - ESTENSIONE DELLA RETE PER LIMITI DI CARICO (2018) | 43 |
| TABELLA 22 - TRAFFICO, ESTENSIONE DELLA RETE E CVL PER CLASSI DI CURVATURA | 44 |
| TABELLA 23 - TRAFFICO, ESTENSIONE DELLA RETE E CVL PER CLASSI DI PENDENZA | 45 |
| TABELLA 24 - VOLUMI DI TRAFFICO PER TIPO DI TRAZIONE DAL 2014 AL 2019 | 45 |
| TABELLA 25 - MATERIALI ROTABILI LUNGA PERCORRENZA | 47 |
| TABELLA 26 - MATERIALI ROTABILI BREVE PERCORRENZA | 48 |
| TABELLA 27 - MEZZI DI TRAZIONE MERCI | 49 |
| TABELLA 28 - CONSUMO DELLA LINEA DI CONTATTO | 64 |
| TABELLA 29 – CLASSI DI MASSE ASSIALI (STIMA DATI 2018) | 70 |
| TABELLA 30 – VALORI DI RIFERIMENTO PER IL LAVORO DI ATTRITO PER INTERVALLI DI RAGGIO DI CURVATURA PER LOCOMOTORE E VEICOLO RIMORCHIATO CON RIFERIMENTO ALLA DIMENSIONI MOSTRATE IN FIGURA PRECEDENTE | 71 |
| TABELLA 31 - ALLOCAZIONE DEI COSTI MARGINALI OTTENUTI DAL MODELLO ECONOMETRICO SUI DUE BLOCCHI (MODELLO ARMAMENTO E SEGNALAMENTO E MODELLO TRAZIONE ELETTRICA). DA QUESTA ALLOCAZIONE SI OTTENGONO LE TARIFFE BASI | 74 |
| TABELLA 32 - VELOCITÀ MEDIE (KM/H) PER CLASSE DI VELOCITÀ | 75 |
| TABELLA 33 - MASSE MEDIE (T) PER CLASSE DI MASSA | 75 |

| | |
|---|----|
| TABELLA 34 - INDICI DI DANNO PER INTERVALLI DI MASSA/VELOCITÀ (MATRICE DI COEFFICIENTI C_{A1-2}) OTTENUTI CON IL MODELLO INGEGNERISTICO SVIZZERO | 76 |
| TABELLA 35 – MATRICE DEGLI INDICI DI DANNO <i>NORMALIZZATI</i> PER INTERVALLI DI MASSA/VELOCITÀ (MATRICE DI COEFFICIENTI W_{A1-2})..... | 77 |
| TABELLA 36 - COEFFICIENTI DI REGRESSIONE LINEARE..... | 77 |
| TABELLA 37 – COEFFICIENTI DI REGRESSIONE LINEARE FUNZIONE DI DANNO (MASSA) PER CLASSI DI VELOCITÀ, DISTRIBUZIONE DELLE PERCORRENZE DI MASSA (TONKM) PER CLASSI DI VELOCITÀ E RELATIVI COEFFICIENTI “NORMALIZZATI” W_{A1-2} E TARIFFE T_{A1-2} | 78 |
| TABELLA 38 - COEFFICIENTI DI REGRESSIONE LINEARE FUNZIONE DI DANNO (MASSA) PER CLASSI DI VELOCITÀ E MASSA ASSIALE, DISTRIBUZIONE DELLE PERCORRENZE DI MASSA (TONKM) PER CLASSI DI VELOCITÀ E RELATIVI COEFFICIENTI “NORMALIZZATI” W_{A1-2} E TARIFFE T_{A1-2} | 79 |
| TABELLA 39: MODELLO TRAZIONE ELETTRICA: PERCORRENZE, INDICI DI DANNO E NORMALIZZAZIONE DEGLI INDICI DI DANNO RELATIVI ALLE PERCORRENZE | 80 |
| TABELLA 40 –TARIFFE UNITARIE A TONNELLATAKM (EUR/TONKM) | 82 |
| TABELLA 41 – COSTI DIRETTI UNITARI E TOTALI SECONDO IL MODELLO DEL. 75/2016 (1), REGISTRATI CO.REG. (2) E DA MODELLO ECONOMETRICO (3) PER GLI ANNI 2014-2019 | 82 |
| TABELLA 42 – VELOCITÀ DI RIFERIMENTO: CONFRONTO TRA VELOCITÀ DI MARCIA CALCOLATE RELATIVE ALLA PERCORRENZA PURA E LE VELOCITÀ RENDICONTATE PER ALCUNI TRENI | 94 |
| TABELLA 43 – POTENZE DEI TRENI PER CIASCUN CLUSTER MASSA/VELOCITÀ DI MARCIA (MW)..... | 95 |
| TABELLA 44 – POTENZE DEI TRENI PER CIASCUN CLUSTER MASSA/VELOCITÀ DI MARCIA (kW/RUOTA) UTILIZZATE NEL CALCOLO DELLA COMPONENTE D3 PER LA COSTRUZIONE DEGLI ABACHI DI DANNEGGIAMENTO | 96 |
| TABELLA 45 – VALORI DI LAVORO DI ATTRITO IN CURVA PER CIASCUNA CLASSE DI RAGGIO DI CURVATURA E CALCOLO DEI VALORI D4.1 E D4.2 DA APPLICARE ALL’INTERA RETE | 96 |