

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile in Infrastrutture e Sistemi di trasporto**

Tesi di Laurea Magistrale

SICUREZZA NEL TRASPORTO FERROVIARIO: EFFETTI DI DISPOSITIVI DI PROTEZIONE AUTOMATICA INTEGRATIVA AI PASSAGGI A LIVELLO SUL RISCHIO D'ESERCIZIO



Relatori

Prof. Ing. Bruno DALLA CHIARA

Ing. Nicola COVIELLO

Candidata

Benedetta DE CRESCENZO

26 Ottobre 2018

INTRODUZIONE

Il sistema di trasporto ferroviario italiano risulta essere tra i più sicuri in Europa, ma se il confronto avviene con gli Stati dell'estremo oriente come il Giappone, si nota che è possibile incrementare ulteriormente la sicurezza. La domanda che sorge spontanea è "come?". Si parla, soprattutto in ambito di ricerca di automazione integrale in ambito ferroviario, ma la sua realizzazione oggi presuppone una serie di requisiti tra cui avere una linea interamente protetta, inaccessibile dall'esterno, modificare le banchine ed i treni. In parte ciò è stato attuato con le linee AV.

Nell'approccio iniziale di questa tesi, svolta presso la TU Darmstadt, si è indagata la possibilità concreta di attuare l'automazione integrale sulle linee ordinarie. Dal percorso precedente è emerso che la risposta in termini tecnologici per attuare l'automazione integrale non è semplice ed immediata.

Preso coscienza dei limiti odierni legati all'automazione integrale, si è valutata un'alternativa valida ed è quella di perseguire la sicurezza in ambito ferroviario introducendo l'automazione parziale, quest'ultima consta di tecnologie a supporto della sicurezza, introducendo un livello di automazione intermedio.

È interessante prendere atto del fatto che il gestore della rete ferroviaria italiana ha di recente attuato un progetto che mira alla sostituzione dei passaggi a livello con opere alternative quali cavalcavia o sottovia, dove possibile. In tutti i restanti passaggi a livello nazionali, che per ragioni urbanistiche, storiche e culturali, non possono essere smantellati e sostituiti da opere d'arte sostitutive, deve essere valutata un'alternativa.

L'alternativa proposta è quella di installare, su ogni passaggio a livello non sopprimibile, un sistema di monitoraggio che lavora in tempo reale, dando vita al processo denominato automazione parziale. I sistemi permettono di pre-identificare, nel caso studio di questa tesi, la presenza di un generico ostacolo sul sedime ferroviario tra i passaggi a livello.

La tecnologia usata agisce come supporto per il macchinista, il quale può essere preavvisato della presenza di un ostacolo entro l'area monitorata al passaggio a livello. Il preavviso agisce su due aspetti importanti: il tempo di azione e reazione del macchinista, che si riduce grazie

all'occhio remoto del sistema tecnologico e la velocità di condotta che può essere ridotta e con essa lo spazio di arresto necessario al convoglio.

L'obiettivo di questa tesi di laurea è di fornire un'analisi sia di tipo statistica, ma anche cinematica, del rischio che si corre al passaggio a livello sia nelle attuali condizioni, che in futuro, proponendo l'introduzione del sistema di protezione automatica integrativa con monitoraggio in tempo reale in tutti i passaggi a livello nazionali.

L'analisi viene condotta utilizzando il sistema proposto da RFI per instaurare l'automazione parziale ai passaggi a livello. Nel lavoro di tesi si ipotizza che tutti i passaggi a livello oggi presenti sulla rete ferroviaria, non privati e custoditi, siano dotati di protezione automatica integrativa con monitoraggio in tempo reale del tipo SIRIO-LX.

L'analisi è condotta con due diverse metodologie. La prima metodologia è quella che usa la Fault Tree Analysis (FTA) con l'obiettivo di costruire l'albero dei guasti relativo al Top Event denominato "Ostacolo al PL", successivamente si procede con la Event Tree Analysis (ETA) che permette di quantificare gli itinerari di rischio che realizzano l'albero di tipo logico. L'analisi si concluderà utilizzando i risultati ottenuti dalla ETA e classificando il rischio per mezzo della matrice di rischio di RFI.

L'analisi di rischio così condotta verrà confrontata con i risultati di una seconda tipologia di analisi. La seconda analisi ha un approccio cinematico con risoluzione del tipo tabellare e grafica. La soluzione grafica permette di identificare nel piano cartesiano velocità-spazio il luogo dei punti in cui l'incidente avviene (color rosso), non avviene (color verde) ed una zona transitoria di color giallo dove è possibile spostarsi nella zona verde o rossa a seconda che il preavviso sia tempestivo.

Entrambi i risultati servono a rafforzare la validità dell'uno e dell'altro metodo e permettono di apprezzare sia qualitativamente che quantitativamente il miglioramento, in termini di riduzione del rischio, apportato ai passaggi a livello, quando è presente il sistema di monitoraggio.

RINGRAZIAMENTI

In questa sezione vorrei spendere poche ma sincere parole per tutti coloro che durante il mio percorso di formazione sono stati presenti fisicamente e mentalmente.

Ringrazio il Prof. Bruno Dalla Chiara e l'Ing. Nicola Coviello per il sostegno durante la realizzazione di questo progetto nato in Germania e concluso in Italia. Ringrazio l'università partner la TU Darmstadt per aver dedicato tempo ed attenzioni al progetto intrapreso con grande entusiasmo.

Voglio ringraziare una persona speciale, Davide, per avermi sempre sostenuta in questi anni, per aver creduto in me più di qualsiasi altra persona al mondo, lo ringrazio per la pazienza, per il supporto e l'affetto ricevuto in questo percorso di crescita personale e professionale.

Ringrazio tutta la mia famiglia, non farò i nomi perché sono troppi, ma ringrazio in particolar modo la mia nipotina Elettra per aver rallegrato le mie giornate e per essere il mio angioletto porta fortuna.

Ringrazio i miei amici di sempre, quelli conosciuti in questi anni di studio, i ragazzi dell'Erasmus e i/le miei/mie coinquilini/ne per avermi sopportata durante le sessioni d'esame e non solo.

Infine, ma non per importanza, ringrazio i miei nonni, perché sono stati sin da piccola i miei più grandi sostenitori e mi hanno sempre motivata nello studio.

In questi ringraziamenti lascio spazio a quella che è stata da sempre la citazione che più mi rappresentata:

“C'è una forza motrice più forte del vapore, dell'elettricità e dell'energia atomica: la volontà”

Albert Einstein

INDICE

1	INTRODUZIONE	10
1.1	SVILUPPO FERROVIARIO NEL TEMPO.....	10
1.2	MOTIVAZIONI A SUPPORTO DELLA SCELTA DELLA MOBILITÀ FERROVIARIA.....	12
1.3	LA MARCIA DEI TRENI IN SICUREZZA	15
1.3.1	<i>Il principio base della sicurezza.....</i>	<i>15</i>
1.4	SISTEMI DI CIRCOLAZIONE FERROVIARIA	16
1.4.1	<i>Blocco telefonico e blocco elettrico manuale.....</i>	<i>17</i>
1.4.2	<i>Blocco elettrico automatico</i>	<i>18</i>
1.4.3	<i>Blocco radio (BRA).....</i>	<i>23</i>
2	SICUREZZA IN AMBITO FERROVIARIO.....	27
2.1	QUADRO NORMATIVO FERROVIARIO IN MATERIA DI SICUREZZA.....	27
2.2	GESTIONE DEI RISCHI FERROVIARI E LORO ANALISI	30
2.3	IL SISTEMA DI GESTIONE DELLA SICUREZZA (SGS)	34
2.4	SICUREZZA IN FERROVIA.....	36
2.4.1	<i>Fattore umano e metodo HEART.....</i>	<i>36</i>
2.5	LE CAUSE DI INCIDENTALITÀ FERROVIARIA.....	39
2.5.1	<i>Definizione di incidente significativo e serio</i>	<i>39</i>
2.5.2	<i>Incidenti di esercizio</i>	<i>39</i>
2.5.3	<i>Cause degli incidenti.....</i>	<i>42</i>
2.6	FATTORI CHE CONCORRONO ALLA SICUREZZA FERROVIARIA	48
2.7	STATO DELL'ARTE.....	50
3	AUTOMAZIONE.....	51
3.1	DEFINIZIONE E TIPOLOGIE DI AUTOMAZIONE	51
3.1.1	<i>Automazione integrale.....</i>	<i>51</i>
3.2	SAFETY INTEGRITY LEVEL	54
3.2.1	<i>La sicurezza funzionale nel ferroviario.....</i>	<i>54</i>
3.3	L'ESPERIENZA IN GERMANIA	55
4	LA SICUREZZA AI PASSAGGI A LIVELLO NAZIONALI.....	57
4.1	IL PASSAGGIO A LIVELLO	57
4.2	LE TIPOLOGIE DI PASSAGGI A LIVELLO	57
4.3	STATISTICHE DI INCIDENTALITÀ AI PL	61
4.3.1	<i>Incidentalità ai PL a livello europeo.....</i>	<i>61</i>
4.3.2	<i>Incidentalità ai PL a livello nazionale</i>	<i>62</i>

4.3.3	<i>Le principali cause dell'incidentalità ferroviaria ai PL italiani</i>	64
4.4	AUTOMAZIONE PARZIALE	67
4.4.1	<i>Programma di potenziamento tecnologico</i>	67
4.4.2	<i>Caratteristiche del sistema PAI PL</i>	70
4.4.3	<i>Il sistema di monitoraggio SIRIO LX</i>	71
5	ANALISI DEL RISCHIO FERROVIARIO AI PASSAGGI A LIVELLO	74
5.1	IL CONCETTO DI RISCHIO.....	74
5.1.1	<i>Analisi di rischio scelta</i>	75
5.2	ANALISI CON ALBERO DEI GUASTI (FAULT TREE ANALYSIS-FTA)	78
5.3	ANALISI CON ALBERO DEGLI EVENTI (EVENT TREE ANALYSIS- ETA).....	80
5.4	RISULTATI ATTESI	81
5.5	CASO STUDIO APPLICATIVO	82
5.5.1	<i>Costruzione dell'albero dei guasti</i>	82
5.5.2	<i>Costruzione albero degli eventi</i>	83
5.5.3	<i>Analisi con matrice di rischio e confronto</i>	90
5.6	ANALISI DI RISCHIO CON INTEGRAZIONE TABELLARE	98
5.6.1	<i>Risultati dell'analisi in assenza di monitoraggio</i>	103
5.6.2	<i>Risultati dell'analisi con sistema di monitoraggio</i>	109
5.7	INDICATORE DI RISCHIO	112
6	CONCLUSIONI	115
7	BIBLIOGRAFIA	118
8	SITOGRAFIA	120
9	APPENDICE	122
9.1	APPENDICE SEZIONE A: FREQUENZE DI ACCADIMENTO PER FTA.....	122
9.2	APPENDICE SEZIONE B: PROBABILITÀ RAMI DELL'ALBERO DEGLI EVENTI.....	130
9.3	APPENDICE SEZIONE C: RISOLUZIONE ALBERO DEI GUASTI E DEGLI EVENTI.....	148
9.3.1	<i>Risoluzione albero dei guasti</i>	148
9.3.2	<i>Risoluzione albero degli eventi</i>	149
9.4	APPENDICE SEZIONE D: ANALISI DI RISCHIO CON INTEGRAZIONE TABELLARE	154
9.4.1	<i>Le resistenze al moto: formulazioni analitiche</i>	154
9.4.2	<i>Integrazione tabellare: valutazione dello spazio di arresto in emergenza</i>	155
9.4.3	<i>Formula UIC: valutazione dello spazio di arresto in esercizio</i>	158
9.4.4	<i>Risultati dell'analisi in assenza di sistema di monitoraggio SIRIO-LX</i>	159
9.4.5	<i>Risultati dell'analisi con sistema di monitoraggio SIRIO-LX</i>	160
10	ALLEGATI	163

10.1	ALLEGATO 1.....	163
10.2	ALLEGATO 2.....	163
10.3	ALLEGATO 3.....	164
10.4	ALLEGATO 4.....	165
10.4.1	<i>Citroën C3 caratteristiche dimensionali [mm] (da automobiledimension.com)</i>	<i>165</i>
10.4.2	<i>Dimensioni camion di tipo motrice e bilico in metri [o]</i>	<i>165</i>
10.4.3	<i>Autobus Setra di tipo extraurbano [mm] (da scheda tecnica compagnia Setra).....</i>	<i>165</i>
10.4.4	<i>Dimensioni di un parcheggio per biciclette (da scheda tecnica Intelligent Energy Europe) [p]</i>	<i>166</i>

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Rete ferroviaria italiana anni 1860, 1906 ed oggi (da sx a dx) [a]	11
Figura 1.2 Emissioni di CO ₂ per mezzi di trasporto differenti.....	13
Figura 1.3 Mortalità nei diversi sistemi di trasporto negli anni dal 2010 al 2015 [1].....	14
Figura 1.4 Tasso di mortalità italiana comparato con l'EU ed estero [1].	14
Figura 1.5 Incidente sulla linea Bari-Nord del 12 luglio 2016 [c].	17
Figura 1.6 Blocco automatico a tre aspetti [d].	18
Figura 1.7 Blocco automatico a quattro aspetti [9].	19
Figura 1.8 Circuito di binario, libero in alto, occupato in basso [e].....	20
Figura 1.9 Schema funzionale di un BAcc [9].	21
Figura 1.10 I quattro codici e loro significati nel RSC [9].....	22
Figura 1.11 BAcc a nove codici: codici e loro spiegazione [9].	23
Figura 2.1 Processo operativo RFI nella gestione del rischio [8].	31
Figura 2.2 Schema del CSM RA.	32
Figura 2.3 Esempio di scheda di valutazione del rischio [25].	33
Figura 2.4 Livelli di responsabilità del SGS in Trenitalia [22].....	34
Figura 2.5 Analisi quali-quantitativa di RFI relativa al fattore umano [17].	37
Figura 2.6 Codici alfanumerici di identificazione della modalità di errore [17].....	37
Figura 2.7 Percentuale di incidenti significativi (2012-2014). [12].....	40
Figura 2.8 Andamento degli incidenti tipici e atipici rispetto al totale dal 1992 al 2010. [3]..	41
Figura 2.9 Incidenza delle principali cause accidentali. [19].....	42
Figura 2.10 Conseguenze del rischio idrogeologico sul tracciato ferroviario. [2].....	43
Figura 2.11 Incidenti dovuti a cause umane. [31]	44
Figura 3.1 Gradi di automazione.....	53
Figura 3.2 Classificazione del livello SIL. [7]	55
Figura 4.1 Passaggio a livello custodito con barriere. [t].....	57
Figura 4.2 Tipologie di PL custoditi.	58
Figura 4.3 Andamento nazionale degli incidenti significativi ai PL. [4]	63
Figura 4.4 SIRIO LX in presenza di a) Auto b) Pedone c) Oggetto generico. [s]	71
Figura 4.5 Sistema di monitoraggio SIRIO LX. [30].....	72
Figura 5.1 Scala di frequenza di accadimento/probabilità di un evento. [2].....	76
Figura 5.2 Scala di classificazione di danno. [2].....	76
Figura 5.3 Matrice di rischio usata nella risk analysis.	77
Figura 5.4 Classificazione del livello di rischio in RFI.....	77

Figura 5.5 Treno ETR 460. [u].....	98
Figura 9.1 Caratteristiche CENELEC SIL.	123
Figura 9.2 PL con barriera TD 96/2 e avvisatore luminoso.	124
Figura 9.3 Classificazione dei PL per range di velocità massima della linea.	137
Figura 9.4 Classificazione dei PL per tempo di chiusura in minuti.	160

1 INTRODUZIONE

1.1 Sviluppo ferroviario nel tempo

La ferrovia nasce in Inghilterra, dove il convoglio ferroviario inizialmente era caratterizzato dalla trazione esercitata per mezzo di animali, nello specifico i cavalli. La linea ferroviaria era presente non solo nelle zone minerarie per il trasporto del materiale estratto, ma aveva anche la funzione di trasporto pubblico nelle grandi città.

La prima inaugurazione ferroviaria avvenne nel 1825 in Inghilterra, anno in cui iniziarono a prendere piede la costruzione di brevi tratti di linea ferroviaria allora denominati “strade ferrate”.

In Italia durante il processo risorgimentale la “strada ferrata” rappresentava un forte simbolo per completare la tanto bramata unità nazionale. La prima linea italiana fu la Napoli-Portici nel Regno delle Due Sicilie con sette chilometri di estensione. La linea ferroviaria non si poneva solo l'obiettivo di connettere territori appartenenti allo stesso stato, ma soprattutto era una possibilità per estendere la comunicazione o meglio lo scambio di merci con gli stati confinanti. La prima apertura dell'Italia nei confronti dell'Estero venne resa possibile grazie al primo grande traforo alpino nel 1871, il Fréjus, importante collegamento che connetteva la penisola italiana con la vicina Francia.

Nel 1890 si introdusse una importantissima innovazione nel campo ferroviario che fu l'introduzione dell'energia elettrica come forza motrice. L'Italia sposò l'arrivo di questa innovazione a partire dai primi anni del Novecento, sostituendo la trazione a vapore con quella elettrica trifase. Il cambiamento ebbe di base la necessità di usare energie alternative per ovviare alla carenza di carbon fossile. La vera svolta per il sistema ferroviario italiano avvenne quando si adottò la trazione a corrente continua a 3000 Volt, sostituendo quella trifase. Ne seguì un aumento della velocità dei convogli ferroviari.

Con il passare degli anni, oltre allo sviluppo ferroviario, particolarmente prepotente fu quello legato allo sviluppo del veicolo privato. Negli anni ottanta del 1900, circa l'85% degli utenti (venti milioni) preferiva il trasporto su gomma. Nacque così la necessità di rinnovare e rivoluzionare il sistema ferroviario, e si pensò al potenziamento della rete ferroviaria. Il potenziamento venne realizzato dall'Ente Ferrovie dello Stato, che nel 1985 decise di realizzare nuovi binari che fossero più veloci e competitivi rispetto alle autostrade.

Il treno inizia così a diventare competitivo anche su lunghe distanze grazie all'alta velocità, che permette oggi di raggiungere i 300 km/h, abbattendo così i tempi di percorrenza e proponendosi energicamente come soluzione alternativa alla mobilità su gomma e aerea. [11]



Figura 1.1 Rete ferroviaria italiana anni 1860, 1906 ed oggi (da sx a dx) [a]

1.2 Motivazioni a supporto della scelta della mobilità ferroviaria

Lo sviluppo ferroviario che si è avuto a partire dalle sue origini ad oggi è stato possibile grazie e soprattutto al fatto che il sistema ferroviario ha introdotto dei vantaggi e benefici nella società, aiutando l'utente non solo a potersi muovere tramite una mobilità altamente sostenibile, ma soprattutto si garantisce un servizio costante, confortevole, alla portata di tutti, spesso senza barriere, dunque dotato di forte accessibilità, economico e anche competitivo nelle tempistiche di trasferimento a lunghe distanze. Oltre a questi fattori importanti ve ne sono altri che possono essere definiti come fondamentali, non solo per il singolo utente ma soprattutto per la società che eroga il servizio di trasporto.

Il trasporto ferroviario risulta indubbiamente essere il sistema di terra più efficiente in assoluto. Il suo più grande punto di forza è l'efficienza energetica, fortemente legata al contatto ruota-rotaia, il quale realizza un supporto piano che permette il rotolamento della ruota metallica, permettendo un movimento caratterizzato da un attrito molto contenuto. In questo modo le perdite energetiche per attrito vengono abbattute, ed è dunque necessaria una potenza minore rispetto agli equivalenti sistemi su gomma. La richiesta energetica di un treno a parità di tonnellate risulta essere inferiore dal 50% al 70% in meno rispetto al trasporto su strada. Oggi ci troviamo di fronte ad una limitatezza delle risorse energetiche, combustibili fossili, raramente si trovano nuovi giacimenti, ma questo non ferma l'aumento di consumi relativo ai trasporti soprattutto nei paesi in via di sviluppo.

Il secondo requisito, legato alla scelta del modo di trasporto, associato al sistema ferroviario è la sua forte competitività in termini di sostenibilità e di rispetto dell'ambiente. Oggigiorno non si può prescindere dal progettare un servizio di trasporto senza considerare questo importante fattore, non solo per una questione di comfort dell'utente, ma anche e soprattutto per chi vive nelle prossimità di una linea ferroviaria. Il rispetto ambientale può essere perseguito tenendo conto di alcuni fattori:

- Rumorosità interna ed esterna al veicolo secondo la Direttiva 2006/66/CE;
- L'inquinamento legato ai gas di scarico per i veicoli termici e l'inquinamento elettromagnetico per veicoli elettrici secondo la Norma CEI EN 50121;
- I fluidi utilizzati nei diversi impianti installati a bordo veicolo come impianti di climatizzazione, raffreddamento e similari;
- Il tipo di servizio igienico a bordo e la modalità di espulsione di sostanze di scarico;

- La riciclabilità dei materiali impiegati nella costruzione dell'infrastruttura e del veicolo.

In termini di sostenibilità ambientali le emissioni di gas serra (CO₂), di ossidi derivanti dal traffico (NO_x, CO, SO_x, ...) e polveri sottili sono molto contenute nei treni rispetto a tutti gli altri sistemi di trasporto. Si riporta nella tabella che segue quelle che sono le emissioni di CO₂ per i diversi sistemi di trasporto maggiormente utilizzati dagli utenti, considerando tutti i processi, dalla produzione di carburante e/o energia elettrica fino al moto del veicolo (Well to Wheel).

Mezzo di trasporto	Numero medio di passeggeri	Emissioni CO ₂ [g _{CO2} /km*passeggero]
Treno	156	14
Autobus	12.7	68
Motoveicoli	1.2	72
Autoveicoli	1.5	104-158

Figura 1.2 Emissioni di CO₂ per mezzi di trasporto differenti.

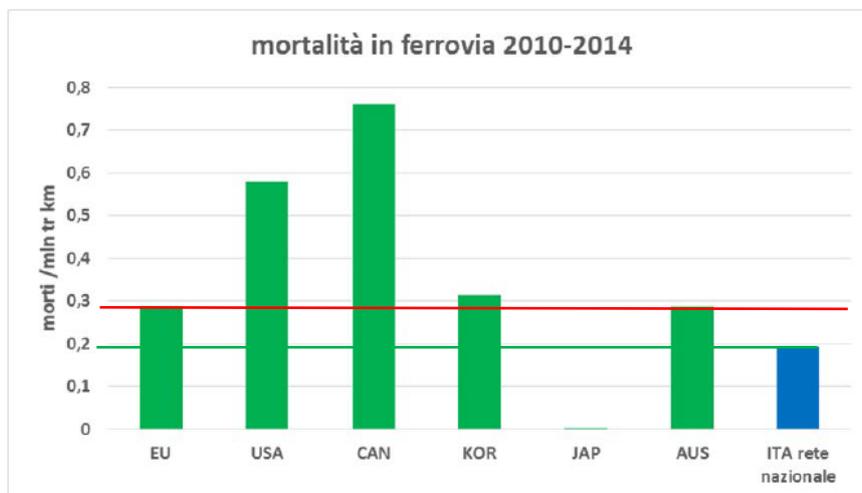
La sicurezza che il sistema ferroviario offre grazie al suo continuo aggiornamento normativo e tecnologico permette di individuare la sicurezza stessa come una delle principali motivazioni per cui un utente è spinto a scegliere il trasporto ferroviario come alternativa a quello stradale. Dal 2001 l'UIC (Union internationale des chemins de fer), attraverso l'Unità per la Sicurezza, sta raccogliendo dati sul 89% della rete ferroviaria appartenente allo Spazio economico europeo (EU e EFTA). Grazie a questi dati si è notato come gli incidenti ed il numero di vittime legate al trasporto ferroviario si sia ridotto di un terzo nei dieci anni tra il 2007 e il 2016. L'UIC ha istituito l'Indice di Sicurezza Globale (GSI), indice che fornisce non solo statistiche relative al numero di incidenti, ma ogni incidente viene ponderato in base alla sua classificazione e/o tipo, frequenza e vittime. Si può dunque, grazie a questi dati, comprendere meglio i livelli di sicurezza, distinguendo gli eventi rari da quelli gravi, che potrebbero compromettere i risultati delle statistiche [b].

MORTI NEL PERIODO 2010-2015 PER MODALITA' DI TRASPORTO *					
ANNO	STRADALE	MARITTIMO	AEREO	FERROVIARIO	TOTALE
2010	4114	12	13	84	4223
2011	3860	227	21	69	4177
2012	3753	39	7	79	3878
2013	3385	359	8	73	3825
2014	3381	38	20	56	3495
2015	3419	9	13	60	3501
totale	21912	684	82	421	23099

* Fonte: Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti anni 2014 e 2015, integrati con quanto riportato nella banca dati ISTAT.

Figura 1.3 Mortalità nei diversi sistemi di trasporto negli anni dal 2010 al 2015 [1].

Inoltre, risulta essere interessante comprendere la posizione dell'Italia nel bilancio della sicurezza ferroviaria in termini di mortalità non solo a livello europeo ma mondiale.



Fonte dati: Dati europei e mondiali estratti dall'ERA 2016 SPR report

Figura 1.4 Tasso di mortalità italiana comparato con l'EU ed estero [1].

Il numero di morti in ambito ferroviario in Italia risulta essere positivamente sotto la media europea, ma è interessante sottolineare energicamente come nonostante l'ottima posizione tra i primati europei in termini di sicurezza, l'Italia può ancora notevolmente fare passi avanti nella sicurezza ferroviaria. L'esempio lampante in termini di efficienza nella sicurezza ferroviaria è il Giappone. Il grafico mostra palesemente come il tasso di mortalità del Giappone sia prossimo allo zero, dunque questo significa che ci sono ancora molti margini di miglioramento a cui l'Italia deve aspirare e pian piano avvicinarsi nei prossimi anni.

1.3 La marcia dei treni in sicurezza

L'ottimo risultato che l'Italia detiene in termini di sicurezza ferroviaria in Europa è stato frutto di un sentito sviluppo ed investimento economico in termini di sistemi altamente tecnologici atti alla sorveglianza e alla "gestione" della marcia del treno. Questi sistemi dotati di tecnologia innovativa portano ad un notevole incremento del livello di automazione, che integra la normale gestione della marcia del treno effettuata dal macchinista. Questi sistemi inviano le informazioni necessarie al macchinista in modo che quest'ultimo possa migliorare la propria condotta durante la marcia del treno e condurre la guida in maggiore sicurezza [23].

1.3.1 Il principio base della sicurezza

In ambito ferroviario il principio base da seguire per garantire sempre la sicurezza ferroviaria è il rispetto del distanziamento minimo tra i treni. Il distanziamento a vista, al contrario dei veicoli stradali, non è perseguibile in ambito ferroviario, dove la circolazione del convoglio ferroviario è garantita da un distanziamento a spazio.

$$\text{Distanza di frenatura (arresto)} > \text{Spazio di visibilità}$$

La distanza di frenatura (B_d) viene ricavata a partire dall'uguaglianza tra l'energia cinetica immagazzinata e il lavoro speso per effettuare la frenatura del veicolo ferroviario:

$$B_d = \left\{ \frac{0.5 \cdot (1000 \cdot P \cdot k_a \cdot \left(\frac{V}{3.6}\right)^2 / g)}{R + F} \right\}$$

- $R = R_{ord} = r_{ord} \cdot P$
- $F = T_{max} = 1000 \cdot f_{ad} \cdot P_{locomotive}$
- k_a è il coefficiente di aderenza
- V è la velocità del convoglio [km/h]
- P è il peso totale del veicolo ferroviario, considerando il peso del locomotore (o più locomotori se presenti) e delle carrozze trainate [tonn].

Il parametro r_{ord} rappresenta la resistenza ordinaria specifica [kg/tonn] ed è funzione della tipologia di veicolo ferroviario in esame. Si riporta nella sezione “Allegati” una tabella riassuntiva dei principali casi ferroviari e relativi valori dei parametri utili alla valutazione di r_{ord} .

La distanza di arresto si valuta a partire da quella di frenatura aggiungendo a quest’ultima i parametri relativi allo spazio percorso a velocità costante (di inizio frenatura), una quantità che tiene conto dei tempi di percezione, reazione, manovra e massima efficienza in termini di potenza del freno.

1.4 Sistemi di circolazione ferroviaria

Con la terminologia “sistemi di circolazione” si definisce l’insieme dei provvedimenti tecnici ed organizzativi necessari per garantire il corretto distanziamento tra i treni. Il principio base è quello di garantire sempre la distanza minima di sicurezza tra due treni successivi, per treni sullo stesso senso di marcia, mentre in caso di singolo binario, si deve impedire che due treni viaggianti in senso opposto non possano essere inoltrati.

Oggi i sistemi di circolazione si basano sul “distanziamento a spazio”, modalità che vede la linea ferroviaria suddivisa in sottosezioni denominate sezioni di blocco o di distanziamento, protette da segnali fissi. La regola da seguire per garantire la sicurezza della circolazione è che può esserci uno ed un solo treno contemporaneamente in ogni sezione di blocco. Inizialmente le sezioni di blocco avevano la dimensione del tratto di linea compresa tra due stazioni, successivamente, grazie alle tecnologie introdotte, è stato possibile ridurre lo spazio costituente la sezione di blocco fino al limite della distanza di frenatura. La nuova dimensione del blocco di distanziamento ha permesso di avere più posti di blocco tra le stazioni, aumentando così la potenzialità della linea ferroviaria. La dimensione della sezione di blocco per linee con velocità maggiori di 120 km/h è di 1350 m [29].

Sulle linee della Rete Ferroviaria Italiana (RFI), gruppo Ferrovie dello Stato (FS), i sistemi di circolazione attualmente in uso sono i seguenti:

- Blocco telefonico;
- Blocco elettrico manuale;
- Blocco elettrico automatico a circuito di binario;
- Blocco elettrico automatico conta assi;

- Blocco radio per linee AV/AC.

1.4.1 Blocco telefonico e blocco elettrico manuale

Il blocco telefonico e il blocco elettrico manuale sono oggi tecnologie in disuso, sono presenti rispettivamente per l'1% e il 7% sulla rete RFI.

Il blocco telefonico nonostante sia presente sul territorio solo in minima parte, ha mostrato in un evento di cronaca recente la necessità di sostituirlo con le più moderne tecnologie di sistemi automatici atti alla supervisione della linea ferroviaria. Sulla linea Bari-Nord, il 12 luglio 2016, si è verificato lo scontro frontale tra due treni pendolari viaggianti sulla tratta ad unico binario tra la città di Ruvo e Corato. Secondo attente indagini la causa è stata individuata proprio nell'uso del blocco telefonico.



Figura 1.5 Incidente sulla linea Bari-Nord del 12 luglio 2016 [c].

1.4.2 Blocco elettrico automatico

Il blocco elettrico automatico (BA) venne usato in Italia per la prima volta intorno al 1950. Il distanziamento tra i treni tra due sezioni di blocco viene garantito da segnali di blocco intermessi con funzionamento automatico. La linea è divisa in sezioni di blocco che risultano essere protette da segnali ferroviari di solito disposti sul via libera (color verde). Lungo la linea i segnali diventano a via impedita (color rosso) quando si registra il passaggio del treno, in modo da impedire il passaggio del treno che segue, proteggendo così la marcia lungo la linea ferroviaria. Il segnale da via impedita si predisporrà sul via libera solo dopo che la sezione sarà stata liberata completamente dal treno in transito. Il blocco elettrico risulta dunque un sistema di distanziamento “aperto” quando la linea è sbloccata.

Il blocco elettrico automatico ha il grande vantaggio di svincolare le operazioni di sicurezza dall'intervento del macchinista.

Il blocco automatico può essere classificato in tre sottocategorie in base al tipo di segnalamento che lo caratterizza [9]:

- BA a due aspetti: ogni segnale è costituito da un segnale di prima categoria, configurazioni di verde e rosso, preceduto da un segnale di avviso, con possibile configurazione giallo o verde, il segnale in questione annuncia al macchinista lo stato di occupazione della sezione che segue;
- BA a sezioni concatenate o a tre aspetti: i segnali di avviso sono accoppiati a quelli di prima categoria a formare un unico segnale, compreso il segnale di protezione delle stazioni. Ne risulta che ogni singolo segnale può assumere tre configurazioni, rosso, giallo e verde. Con questa modalità è possibile aumentare il numero delle sezioni di blocco tra stazioni consecutive poiché con l'accoppiamento dei segnali, ogni segnale di blocco occuperà la posizione che dovrebbe occupare il segnale di avviso della sezione che segue [d].

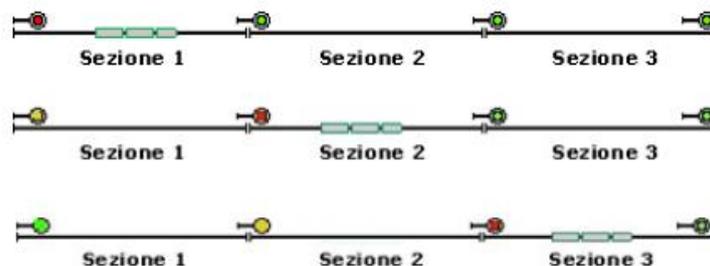


Figura 1.6 Blocco automatico a tre aspetti [d].

Il colore su cui si predispose il segnale comunica al macchinista le informazioni che si riportano di seguito:

- a) Segnale predisposto sul rosso: via impedita, la sezione immediatamente a valle del segnale è occupata da un treno;
 - b) Segnale predisposto sul giallo: preavviso di via impedita, una sola sezione di blocco è libera;
 - c) Segnale predisposto sul verde: via libera, almeno due sezioni di blocco successive sono libere.
- BA a quattro aspetti: questa tipologia di blocco automatico si trova sia su linee alta velocità che su linee tradizionali. In questo ultimo caso si introduce il concetto di ultimo verde, ovvero un segnale verde lampeggiante. Il segnale in questione può significare:
 - a) Via libera;
 - b) Preavviso di via impedita per treni con velocità elevate che necessitano di maggiori spazi di frenatura.

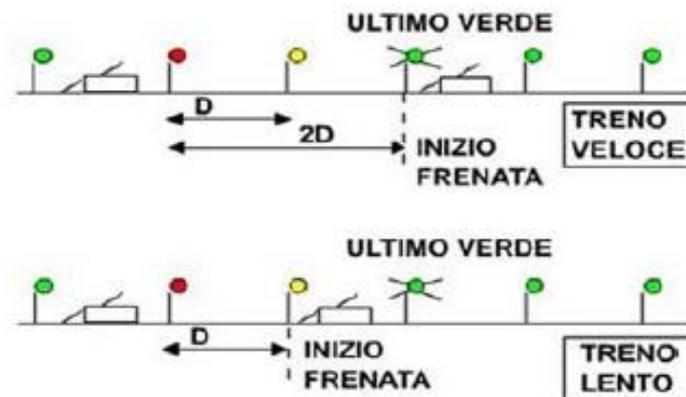


Figura 1.7 Blocco automatico a quattro aspetti [9].

1.4.2.1 Blocco elettrico automatico a circuito di binario

Il blocco elettrico automatico a circuito di binario viene anche denominato blocco elettrico automatico a correnti fisse (BAcf). Il distanziamento tra i treni viene realizzato per mezzo di circuiti elettrici di binario (cdb), di cui ogni linea ferroviaria è dotata. Grazie al cdb è possibile individuare in modo automatico la posizione di un treno in una sezione di blocco. Il suo funzionamento consiste in un generatore di corrente e in un relè che rileva la corrente. Se sulla sezione è presente almeno un asse del treno, la corrente viene cortocircuitata ed il relè è diseccitato, dunque la sezione risulta occupata e il segnale di prima categoria si predispone sul rosso. Questo segnale viene preceduto da un segnale di avviso che ha la funzione di avvisare il macchinista che la sezione che segue è occupata. Si ricorda che il segnale di prima categoria può predisporre sul verde o rosso secondo le regole definite in precedenza. Il segnale di avviso può assumere anche la configurazione rossa, quando avvisa che la sezione che segue è occupata, oppure verde quando avvisa che nessun treno sta occupando la sezione.

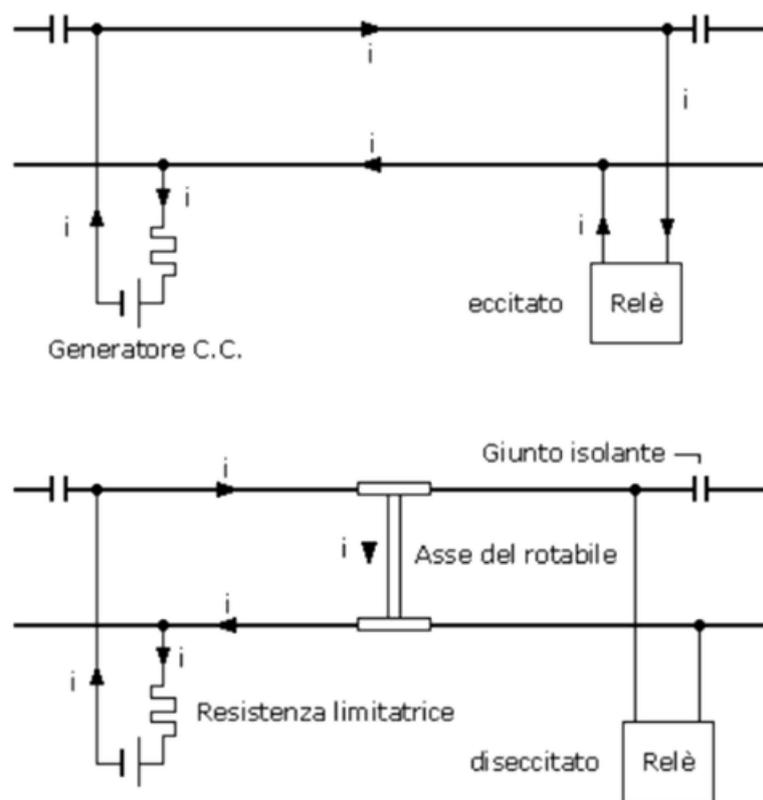


Figura 1.8 Circuito di binario, libero in alto, occupato in basso [e].

1.4.2.2 Blocco elettrico automatico a correnti codificate

Il blocco elettrico automatico a circuito di binario a correnti codificate (BACC), va ad alimentare i cdb con correnti codificate e in aggiunta controlla anche che i relè si muovano secondo il codice. Si effettua questo controllo per aumentare il livello di informazione.

Il circuito di binario lavora con corrente alternata da 50 Hz, quest'ultima viene interrotta ciclicamente grazie a dei codificatori elettronici in modo da creare una corrente non fissa. I codificatori svolgono la mansione di far seguire ad ogni intervallo di alimentazione un intervallo di pari durata ma di "non-alimentazione". Sommando i due intervalli si ha il periodo di codificazione, il valore inverso è la frequenza del codice, misurata in periodi al minuto. Sull'estremo opposto del cdb si localizza un seguitore di codice (relè), il quale nel caso di binario libero batte con la stessa sequenza del codice di alimentazione. Grazie a questo relè è possibile inviare una corrente di tipo continua al primario di un trasformatore decodificatore, l'invio viene effettuato alternativamente in un senso e nell'altro. A questo punto comparirà nel secondario del trasformatore una tensione alternata, che dimostra che il seguitore non è indebitamente eccitato o diseccitato. La tensione in questione viene usata per alimentare un relè principale, denominato HR.

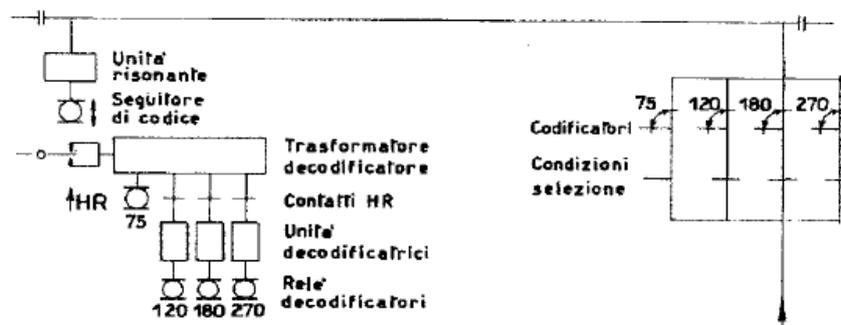


Figura 1.9 Schema funzionale di un BACC [9].

Particolarmente interessante risulta la possibilità di ottenere in locomotiva tramite un processo induttivo dei codici. I codici sono associati a delle indicazioni, si realizza con questa modalità un segnalamento in cabina. Il sistema permette dunque di avere un migliore utilizzo delle velocità ammesse dalla linea ed un controllo automatico di frenatura. Questa novità permette di limitare le situazioni pericolose che potevano nascere da un momento di distrazione del macchinista o semplicemente dalla mancata visibilità di un segnale. Il macchinista grazie a

questo sistema è in grado di conoscere l'aspetto del segnale che segue ancor prima di riuscirlo a vedere fisicamente lungo il tracciato ferroviario.

I tipi di ripetizione di segnale a bordo treno esistenti sono di due tipologie:

- Sistemi puntiformi o discontinui: Ripetizione Segnali Digitale Discontinua- RSDD. Questi sistemi grazie ad una boa trasmettono informazioni a bordo riguardo l'aspetto dei segnali, ma solo al passaggio dei segnali.
- Sistemi continui: Ripetizione Segnali continua-RSC. Questi sistemi comunicano con il macchinista con continuità durante la marcia del veicolo, sono in grado di comunicare in aggiunta ai primi anche le modifiche all'aspetto dei segnali di suo interesse.

I codici utilizzati, ad eccezione della Direttissima Roma-Firenze dove i codici sono nove, sono quattro, per essere fiscali cinque se si include l'assenza di codice Si può dunque operare con un sistema RSC a quattro codici o a più di quattro codici.

Codice	Pulsante	Significato
270		Via libera senza particolari limitazioni: il treno può viaggiare alla v max.
180		Via libera con preavviso di segnale disposto a via impedita o a via libera con riduzione di velocità; è un codice di prudenza, usato anche per segnalare i rallentamenti.
120		Riduzione di velocità: il prossimo segnale di 1° ctg è a via libera ma la velocità da tenere è 30, 60 o 100 km/h a seconda del precedente avviso
75	 (lampeggia)	Avviso: il prossimo segnale di 1° ctg è a via impedita o giallo/giallo
AC		Via impedita; negli arrivi in deviata su binari di stazione non codificati, via libera con conferma di riduzione di velocità (nessuna indicazione sul segnale successivo)

Figura 1.10 I quattro codici e loro significati nel RSC [9].

Se non viene pervenuta alcuna informazione a bordo (AC) il sistema recepisce che il binario è occupato o che possa essere eventualmente danneggiato, motivo per cui si attiva in automatico la frenatura di emergenza. Questo sistema però ha il limite di non essere un sistema train-stop, poiché vi è la possibilità di superare un segnale a via impedita con la velocità massima del convoglio ferroviario, processo che attiva la frenatura solo dopo il superamento del segnale in questione.

Si riportano di seguito i nove codici del sistema RSC:

Codice	Aspetto cruscotto	Frequenza		Significato del successivo segnale di 1° categoria
		50 Hz	178 Hz	
AC		-	-	Via impedita; negli arrivi in deviate su binari di stazione non codificati, via libera con conferma di riduzione di velocità
75	 (lampeggia)	75	-	Via impedita.
120		120	-	Via libera, da percorrersi con riduzione di velocità a 30, 60 o 100 km/h a seconda dell'indicazione del segnale di avviso appena superato.
120*		120	75	Via libera, da percorrersi con riduzione di velocità a 100 km/h.
120**		120	120	Via libera, da percorrersi con riduzione di velocità a 130 Km/h. Non ancora utilizzato.
180		180	-	Via libera, ma preavvisa un segnale disposto a via impedita o a via libera con riduzione di velocità. È un codice di prudenza, utilizzato anche in precedenza a segnali di rallentamento o di termine zona codificata.
180*		180	75	Via libera, ma con avviso anticipato di riduzione di velocità a 100 km/h (o 130 km/h - non ancora utilizzato) o velocità massima della linea ridotta a 150 km/h per lavori.
270		270	-	Via libera senza particolari limitazioni. Velocità massima: 180 km/h.
270*		270	75	Via libera senza particolari limitazioni. Velocità massima: 220 km/h.
270**		270	120	Via libera senza particolari limitazioni. Velocità massima: 250 km/h.

Figura 1.11 BAcc a nove codici: codici e loro spiegazione [9].

1.4.3 Blocco radio (BRA)

Il blocco radio è tra i più recenti sistemi di distanziamento, ed introduce la novità di poter essere definito “dinamico”. Il sistema blocco radio viene impiegato principalmente su linee ad Alta Velocità/ Alta Capacità (AV/AC), linee gestite tramite il sistema ERTMS/ETCS di livello 2, con assenza di segnali convenzionali. Il suo impiego prende vita a partire dal 2005 grazie alle norme che lo disciplinano. L’accezione “dinamico” è legata al fatto che il sistema assicura il distanziamento tra i treni per mezzo di Autorizzazioni al Movimento (MA), trasmesse via radio a bordo treno a partire da un Radio Block Center (RBC). Il RBC si trova al posto centrale per il comando e controllo della linea. Il sistema sfrutta la rete GSM-R, creata appositamente per l’ambito ferroviario.

Questa tecnologia grazie al continuo scambio di informazioni linea-bordo treno permette di avere informazioni continue in ogni veicolo ferroviario sia nel tempo che nello spazio,

caratteristica che permette di adattare il posizionamento e la lunghezza delle sezioni di blocco in funzione di [32]:

- Posizione;
- Velocità;
- Prestazioni frenanti del veicolo in relazione alle prestazioni peggiori presenti lungo la linea.

Sul terreno si individuano delle sezioni delimitate da Segnali Imperativi, costituiti da elementi ad alta rifrangenza posizionate su propri pali o sui pali della linea elettrica (TE). Le sezioni di cui si parla sono costituite da circuiti di binario. Il movimento del convoglio è permesso tra una o più sezioni limitrofe. Si sottolinea che il segnale di termine della sezione diventa il punto di arresto imperativo per il treno.

Il sistema GSM-R, a partire dal RBC, trasmette a bordo treno tramite radio le informazioni riguardo:

- Libertà della sezione;
- Spazio disponibile;
- Velocità da mantenere.

Il treno potrà dunque marciare solo sotto autorizzazione ricevuta tramite messaggi elettronici, denominati Autorizzazione al Movimento (MA). Queste autorizzazioni possono essere di tre tipi [h]:

Tipo di autorizzazione	Simbolo MA	Spiegazione del MA
MA in Supervisione Completa		Concessa sotto supervisione del BRA e le indicazioni di marcia sono riportate nel cruscotto della cabina di guida.
MA in marcia vista		Concessa dal sistema quando una o più sezioni risultano occupate. La marcia può avvenire a vista con velocità sotto i 30km/h, fino al successivo segnale imperativo.
MA con apposita prescrizione		<p>Il movimento è concesso a seconda delle situazioni e prescrizioni ricevute:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. con marcia vista con velocità inferiore ai 30km/h fino al successivo segnale imperativo; 2. V_{max} di 60 km/h fino al successivo segnale imperativo di protezione o al successivo segnale di confine, non considerando i segnali imperativi di fine sezioni incontrati.

In assenza di segnale radio, durante la marcia del treno, con una delle modalità “Supervisione Completa” o “Marcia a Vista” il treno viene immediatamente arrestato con urgenza, salvo il tempestivo ripristino del segnale. In questa situazione il Dirigente Centrale Operativo (DCO) ordinerà al treno di proseguire con marcia a vista e con velocità inferiore ai 30 km/h fino al

successivo segnale imperativo di fine sezione o di protezione di Pds dove l'arresto deve essere effettuata a priori.

La suddivisione della linea avviene attraverso lunghezze diverse e quest'ultime sono delimitate da segnali imperativi. Le sezioni sono denominate "sezioni di blocco radio", queste sono costituite da circuiti di binario che rilevano lo stato del via libera. Le linee con sistema BRA sono banalizzate ed è ammessa la marcia parallela [20].

In modo sintetico si riportano i principali costituenti del blocco radio:

- posto Centrale del Blocco Radio: costituito dai RBC, ognuno è relativo ad una delle tratte di cui si compone la linea, e in aggiunta di un'interfaccia operatore;
- sezioni di Blocco Radio;
- punti Informativi: sono riferimenti discontinui, denominati boe, del sistema a terra. La loro funzione principale è di localizzare il treno;
- sottosistema di trasmissione, consente di creare un collegamento bidirezionale tra il RBC ed il treno per mezzo di antenne.

2 SICUREZZA IN AMBITO FERROVIARIO

2.1 Quadro normativo ferroviario in materia di sicurezza

L'evoluzione normativa in campo ferroviario ha portato a variazioni nella valutazione del rischio e della sicurezza in ambito ferroviario nel corso degli anni. La sicurezza è un requisito fondamentale da perseguire in tutte le fasi di progettazione, manutenzione e organizzazione delle infrastrutture, dei veicoli e dei servizi ferroviari.

In Italia la gestione della sicurezza ferroviaria nazionale è gestita dall' Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (ANFS). La ANFS controlla in parte anche delle linee regionali, ma solamente quelle riportate nell'allegato A del Decreto del 5 agosto 2016. Le mansioni che svolge sono quelle riportate nel Decreto Legislativo N. 162/2007 e sono le seguenti:

<p>Compiti normativi</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Attività internazionale: Sviluppo di obiettivi, metodologie di sicurezza con IERA e armonizzazione delle norme nazionali • Attività di regolamentazione: Suddivisione di responsabilità e ruoli degli operatori ferroviari
<p>Compiti autorizzativi</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rilascio di titoli abilitativi agli operatori ferroviari per l'esercizio dell'attività
<p>Compiti di controllo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Controllo continuo del lavoro svolto dagli operatori ferroviari, con l'obiettivo di individuare eventuali criticità interne • Risoluzione delle eventuali criticità rilevate

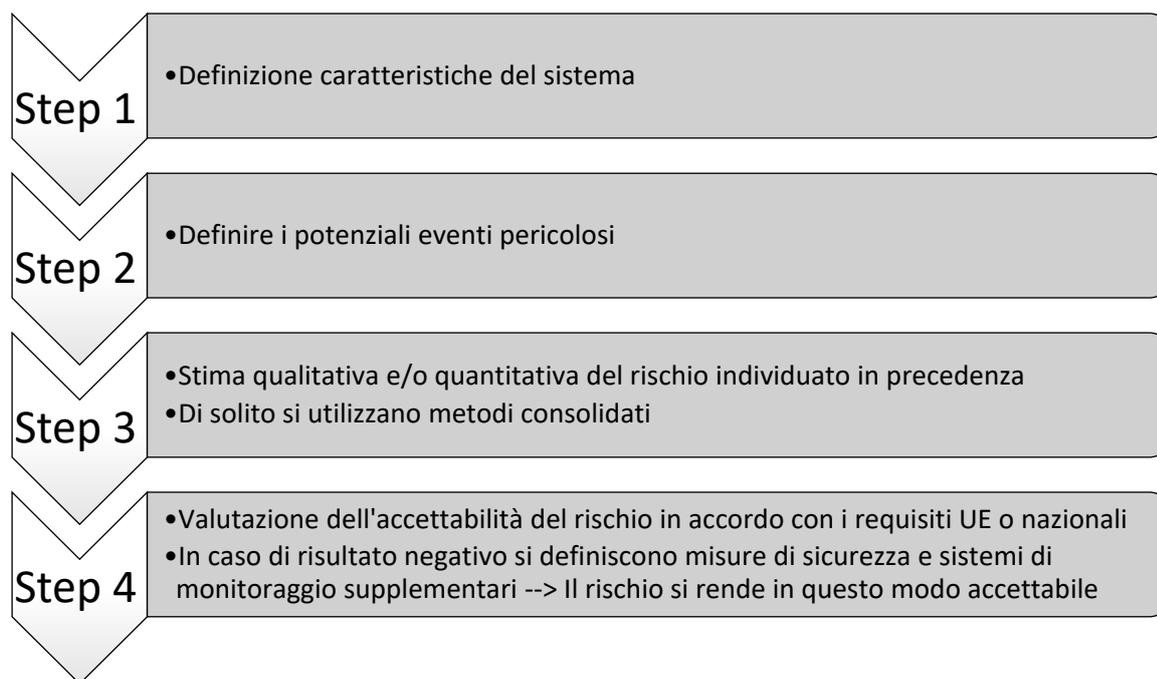
Si sottolinea che la ANFS non ha competenza in ambito del trasporto metropolitano, tram, trasporto leggero su rotaia e infrastrutture private. [f]

La ANFS non ha alcun obbligo di legge nel condurre indagini su incidenti ferroviari, ma può effettuare approfondimenti su eventi significativi in ambito ferroviario.

L'ente che si occupa di svolgere indagini sugli incidenti ed inconvenienti ferroviari è L'Organismo investigativo, che è formato dalla Direzione Generale per le Investigazioni Ferroviarie, direzione interna al Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti.

Le indagini svolte sono realizzate solo a seguito di incidenti molto gravi, altri incidenti possono essere oggetto di interesse solo se lo ritiene la Direzione. Le informazioni relative all'incidente vengono riportate all'interno di una relazione tecnica denominata DIGIFEMA.

Quando si parla di rischio, l'obiettivo è quello di implementare una modalità di valutazione del rischio stesso, considerando tutti i processi svolti e l'individuazione di misure che permettano di mitigare, ma soprattutto prevenire il rischio, o meglio di rendere il rischio accettabile. Il Regolamento Europeo n. 402/2013 fa riferimento a metodologie di analisi del rischio condiviso, e allo stesso tempo fa riferimento a tecniche e metodologie in termini di analisi consolidate in ambiti diversi da quello ferroviario. Il Regolamento in questione riporta un "Metodo comune di sicurezza" che si basa sul gestire i rischi in modo iterativo, e sulla ripetizione di attività con l'obiettivo finale di dimostrare che l'oggetto/situazione in analisi è conforme ai requisiti minimi di sicurezza definiti. Il soddisfare i requisiti minimi comporta rendere accettabile il rischio, nel caso in cui il rischio sia l'oggetto di studio.



La ex direttiva ANFS del 2012 può considerarsi come un documento attendibile per definire la condizione di rischio accettabile. Oltre a quest'ultima si è soliti utilizzare delle tabelle di raffronto, dove per ogni provvedimento normativo in vigore si indica da una parte la coerenza o meno che ha il provvedimento stesso con i principi e criteri presenti nel decreto 4/2012, dall'altro il gestore dell'infrastruttura o impresa ferroviaria tra le cui attribuzioni ricade il provvedimento in questione.

Se si dovessero presentare delle variazioni di qualsiasi natura rispetto alla condizione iniziale bisogna effettuare una specifica valutazione della modifica in atto, confrontando il sistema attuale (modificato) e quello iniziale (privo di modifiche), con l'obiettivo di vedere se il sistema è ancora accettabile o meno. Nello specifico la società RFI utilizza un Organismo Tecnico (OT), con l'obiettivo di valutare l'importanza della modifica effettuata e in aggiunta realizza un'analisi riguardo il livello di sicurezza del sistema ferroviario prima e dopo la modifica, accertando che si garantisca almeno lo stesso livello tra prima e dopo l'intervento. I profili professionali che costituiscono il OT sono guidati da un responsabile Tecnico, che ha come subordinati tecnici specializzati in diversi settori tecnici.

2.2 Gestione dei rischi ferroviari e loro analisi

La gestione del rischio deve essere la priorità di ogni singola impresa o gestore ferroviario.

L'analisi del rischio nel recente passato poteva definirsi "statico" a causa del fatto che esisteva una figura professionale esterna che forniva la documentazione che solo pochi esperti potevano utilizzare, ma il suo contributo non aveva continuità nel tempo. Oggi invece esiste un insieme di esperti, guidati da chi svolge funzioni di "risk manager", che sono coinvolti con continuità nel processo di gestione e miglioramento della sicurezza, coerentemente con le procedure previste dai Sistemi di Gestione della Sicurezza (SGS), di cui si parlerà in seguito. Ovviamente la presenza di questo team non esclude la collaborazione con terze parti come studiosi, consulenti specialistici, Organismi ed altri, che entrano in gioco soprattutto per la valutazione e validazione dei processi e modelli adottati [21].

La società RFI adotta una procedura in termini di gestione del rischio che è in regola con quanto riportato nel Regolamento (CE) 352/2009, dove si richiede almeno la redazione di un rapporto preliminare relativo alla gestione del rischio relativo ad una possibile modifica proposta da una azienda "X". L' Organismo Tecnico (OT) valuta il documento in questione ed eventualmente può chiedere la sua integrazione con un documento denominato Rapporto di risk assessment o risk management, dove si conferma la tipologia di modifica da apportare. La modifica può essere classificata come:

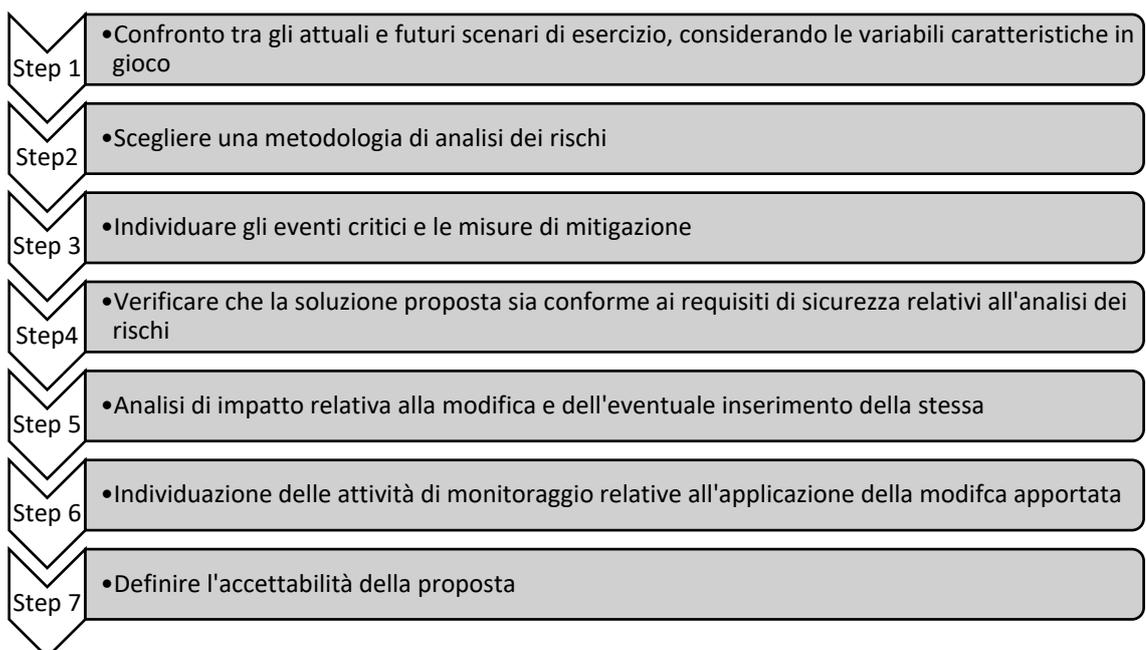
- modifica rilevante;
- modifica non rilevante.

Il processo operativo che si deve seguire viene riportato nello schema che segue:



Figura 2.1 Processo operativo RFI nella gestione del rischio [8].

Il processo logico che si segue nel valutare l'accettabilità della soluzione proposta, si articola secondo i punti riportati nel diagramma che segue:



Quanto riportato nello schema precedente è sintetizzato in un diagramma a flusso di proprietà RFI:

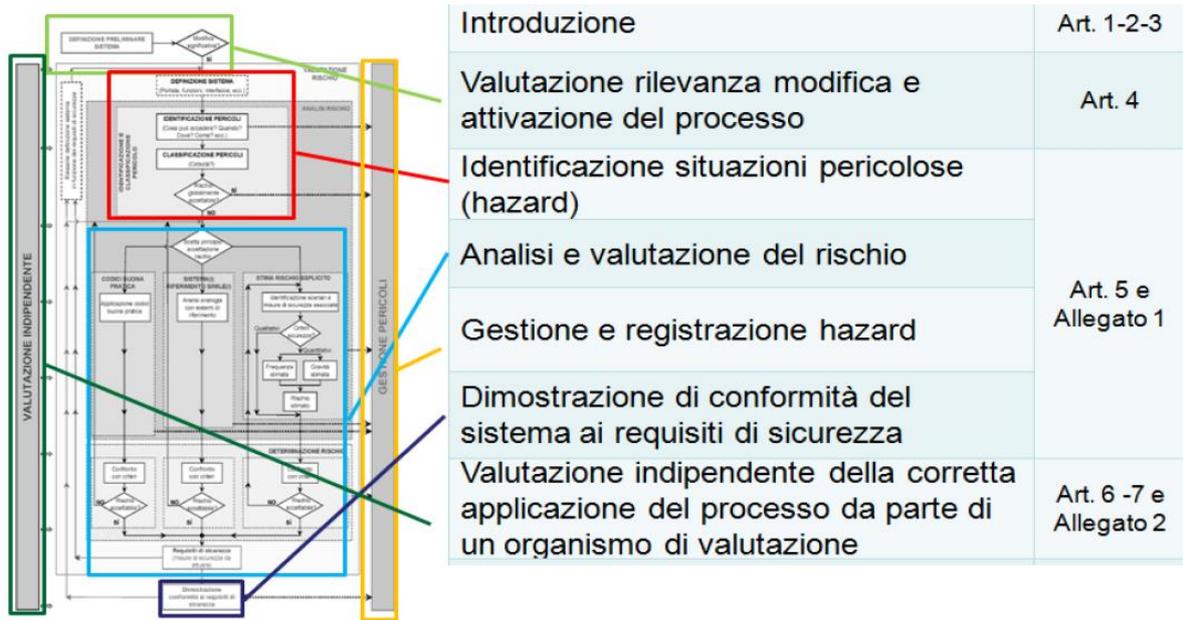


Figura 2.2 Schema del CSM RA.

Si definiscono a questo punto i criteri di accettabilità del rischio secondo tre livelli, come definito nel Regolamento 402/2013:

Principio di accettazione del rischio	Descrizione
Codici di buona pratica	Sono norme e standard tecnici, che se correttamente applicate possono aiutare nel gestire situazioni pericolose in ambito ferroviario.
Sistemi di riferimento simili	Si utilizzano con finalità di comparare sistemi di riferimento il cui livello di sicurezza è definito accettabile. Il sistema da confrontare con lo standard deve essere impiegato in condizioni funzionali, operativi ed ambientali simili al sistema di riferimento standard. Si eseguono analisi delle similitudini con sistemi in esercizio.
<u>Stima accurata dei rischi</u>	I primi due criteri non sono validi, dunque si procede con un approccio statistico. Si valuta in primis la probabilità di accadimento dell'evento critico da analizzare e si analizzano le conseguenze associate all'evento in analisi.

L'accettabilità dei rischi stimati sfrutta la relazione che si crea tra la probabilità di accadimento di un evento critico e la gravità dello stesso. Il secondo elemento da considerare viene sviluppato in quattro sottoclassi, che definiscono precisamente il livello di gravità associato ad un evento critico:

Livelli di gravità	
Insignificante	Danni del sistema poco rilevanti.
Marginale	Presenza di individui feriti a causa dell'evento critico, minacce per l'ambiente e/o grave danno ai sistemi.
Critico	Presenza di persone gravemente ferite, perdita di un sistema principale e/o danni ingenti all'ambiente.
Catastrofico	Presenza di decessi e importanti ferite fisiche e/o importanti danni ambientali.

Si comprende dunque che il livello di sicurezza che si ritiene accettabile si esprime in termini probabilistici. La modalità con cui si fa riferimento alla probabilità è usare il concetto di rischio residuo ammissibile per un sistema di trasporto.

Si definisce di seguito il livello di rischio residuo indicato con:

- X: Condizione non ammissibile;
- Tollerabile: Definisce il rischio residuo ammissibile;
- Trascurabile: Definisce un rischio residuo irrilevante.

Scenario di incidente	URTO FRA TRENI		
Evento pericoloso	EP030 - Avaria al sistema di frenatura del treno		
Stima del rischio	Gravità	Probabilità	Rischio
	6	1	Tollerabile
Cause primarie	CP010 - Condizioni psicofisiche del personale che svolge attività di sicurezza non adeguate CP020 - Mancanza dei requisiti di competenza del personale CP030 - Mancata formulazione o errata comunicazione delle disposizioni interne CP060 - Errata pianificazione delle attività operative CP080 - Mancata o errata gestione delle registrazioni CP090 - Mancato rilievo o mancata gestione delle anomalie rilevate CP110 - Mancato rispetto dei requisiti tecnici dei veicoli CP120 - Mancato rispetto delle scadenze e degli standard di manutenzione dei veicoli CP130 - Utilizzo di materiali non conformi per la manutenzione dei veicoli CP140 - Utilizzo di apparecchiature e strumenti non conformi per la manutenzione dei veicoli CP150 - Mancato rispetto degli standard di manutenzione dell'infrastruttura CP160 - Atti di vandalismo		
Misure di mitigazione	RS-CP:010-020-030-060-080-090-110-120-130-140-150-160 RS-EP030		

Figura 2.3 Esempio di scheda di valutazione del rischio [25].

2.3 Il sistema di gestione della sicurezza (SGS)

Il sistema di gestione della sicurezza (SGS) in linea con lo sviluppo normativo degli ultimi anni sia nazionale che comunitario, è un sistema dedicato alla sicurezza della circolazione dei treni e dell'esercizio ferroviario. È stato accettato dalla ANSF e nel 2014 è stata rilasciata a RFI l'Autorizzazione di Sicurezza. È un sistema che ha lo scopo di condurre una organizzazione a stabilire politiche ed obiettivi e al col tempo di conseguire tali obiettivi [g]. Gli obiettivi che si devono raggiungere sono appartenenti ad aspetti legati a:

- Sicurezza;
- Tutela dell'ambiente;
- Qualità dei prodotti.

Il SGS in ambito ferroviario viene regolamentato dai seguenti standard internazionali e di settore:

- ISO 14001 relativo alla gestione ambientale;
- ISO9001:2000 relativo ai sistemi di qualità;
- OHSAS 18001 relativo alla gestione della sicurezza e salute nei luoghi di lavoro;
- Standard specifico per il sistema di gestione della sicurezza in ambito ferroviario;
- Disposizione 13/2001 del gestore dell'infrastruttura.

Nella società Trenitalia la struttura del SGS si basa sul principio *“La gestione della sicurezza si realizza insieme alla gestione operativa”* e si articola nei livelli di responsabilità riportati nello schema che segue:

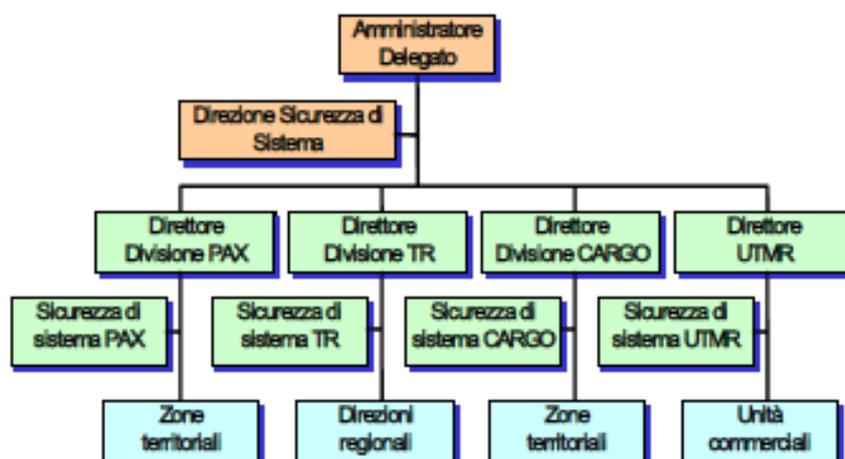


Figura 2.4 Livelli di responsabilità del SGS in Trenitalia [22].

Alla base di un sistema di gestione si ha a che fare con un processo logico, che nel caso specifico è denominato ciclo PDCA:

- PLAN: Pianificazione;
- DO: Attuazione;
- CHECK: Verifica;
- ACT: Correzione.

Ognuno di questi step consta in:



L'obiettivo che si propone il SGS è quello di coinvolgere tutte le entità interessate nelle parti di cui si compone, con lo scopo di migliorare con continuità le forme di controllo e gestione della sicurezza in ambito ferroviario, fino al raggiungimento dell'assenza di incidentalità. Questo obiettivo si propone come raggiungibile con l'impiego di nuove norme, ma soprattutto strumenti tecnologici.

2.4 Sicurezza in ferrovia

“La scienza della sicurezza è la disciplina che studia il rischio nelle sue varie forme, dirette e indirette, e ne valuta la possibilità di riduzione al di sotto di soglie accettabili per l'uomo e per le attività produttive di suo interesse”. (Fedele 2008)

La sicurezza di un sistema di trasporto consiste nel poter viaggiare o poter permettere lo spostamento di più veicoli in condizioni sicure, dunque in condizioni di pericolo nulle o trascurabili. L'obiettivo che la sicurezza si pone è quello di valutare i rischi e assicurare che quest'ultimi rientrino nei limiti di accettabilità prestabiliti.

In Italia il concetto di sicurezza non si scinde in due come nel mondo anglosassone, dove si parla di *Safety* e *Security*. La prima definizione di sicurezza, *Safety*, riguarda la sicurezza della guida ed incolumità delle persone rispetto ad eventi accidentali, malfunzionamenti o errori umani, mentre la *Security* riguarda la protezione dei veicoli e della merce, includendo anche riferimenti ad incidenti di natura dolosa.

2.4.1 Fattore umano e metodo HEART

La fonte del pericolo può avere tre principali tipologie di natura durante la fase del moto:

- natura umana, se è prevista la figura del macchinista a bordo;
- il mezzo di trasporto, includendo anche ciò che trasporta (merce);
- l'infrastruttura su cui si esercita il moto del veicolo.

In questa tesi si pone particolare attenzione al fattore umano, sottolineando come la carenza di sicurezza legata a questo fattore sia derivante tipicamente da una variazione di un generico fattore (f), esogeno al sistema, che è caratterizzato da una grande repentinità ($\Delta f / \Delta t$), rispetto alle capacità di reazione e percezione del conducente. Il fattore in questione ha di solito una natura spaziale, si pensi ad esempio alla presenza di una persona o di un generico ostacolo lungo la linea ferroviaria nell'area che costituisce il passaggio a livello [8].

Ogni individuo è caratterizzato da una personale cultura, competenza, esperienza, capacità pratiche e psicologiche differenti. Tutti questi fattori influenzano enormemente l'operatività del macchinista. Si sottolinea che la componente umana risulta la principale fonte di rischio in ambito ferroviario e quantificare l'errore umano è un processo molto articolato.

La procedura seguita da RFI nell'analisi quali-quantitativa del fattore umano è sintetizzata nello schema che segue:

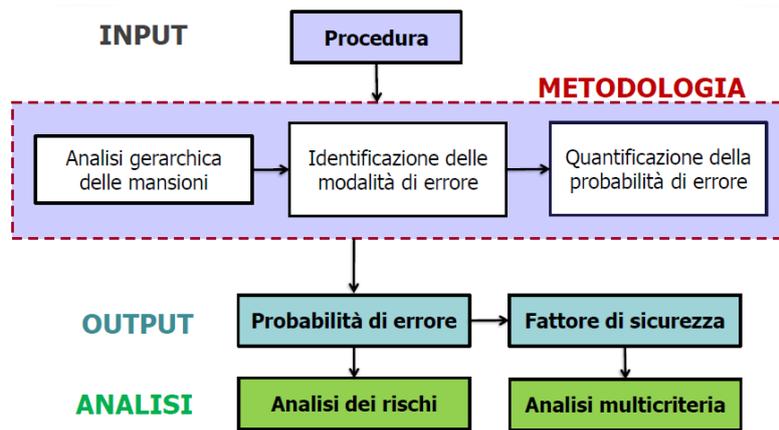


Figura 2.5 Analisi quali-quantitativa di RFI relativa al fattore umano [17].

La metodologia consta di tre livelli:

- analisi gerarchica delle mansioni, va a scindere i compiti in modo gerarchico, focalizzandosi sui seguenti obiettivi:
 1. definizione degli obiettivi;
 2. identificazione del piano di lavoro per raggiungere gli obiettivi;
 3. individuazione della gerarchia dei compiti da eseguire, includendo gli obiettivi secondari. Si realizza una piramide costituita dai sotto compiti per realizzare l'obiettivo desiderato.
- identificazione delle modalità di errore: sono tipicamente classificati in base al tipo di errore, modalità di errore e sono identificati da un codice alfanumerico:

Tipo di errore	Codice	Modalità di errore
Errori di azione	A1	Operazione troppo lunga/corta
	A2	Operazione eseguita nel momento sbagliato
	A3	Operazione in direzione errata
	A4	Operazione in meno/di troppo
	A5	Disallineare
	A6	Operazione giusta con l'oggetto sbagliato
	A7	Operazione errata con l'oggetto giusto
	A8	Operazione omessa
	A9	Operazione incompleta
	A10	Operazione errata con l'oggetto errato
Errori di controllo	C1	Controllo omesso
	C2	Controllo incompleto
	C3	Controllo giusto con l'oggetto sbagliato
	C4	Controllo errato con l'oggetto giusto
	C5	Controllo eseguito nel momento errato
	C6	Controllo errato con l'oggetto errato
Errori di recupero	R1	Informazione non ottenuta
	R2	Ottenuta informazione errata
	R3	Recupero dell'informazione incompleto
Errori di comunicazione	I1	Informazione non comunicata
	I2	Comunicata informazione errata
	I3	Comunicazione incompleta dell'informazione
Errori di scelta	S1	Scelta omessa
	S2	Scelta errata

Figura 2.6 Codici alfanumerici di identificazione della modalità di errore [17].

- le tecniche relative alla quantificazione dell'errore hanno una natura probabilistica. Esistono varie metodologie adottate nel campo ferroviario tra cui:

HEART (Human error assessment and reduction technique)	L'errore umano viene quantificato tenendo conto delle azioni di un operatore, considerandone la tipologia di mansione, l'ergonomia ed eventuali fattori ambientali che possono incidere sulla prestazione. La probabilità di errore umano si calcola come funzione del prodotto dei singoli fattori che caratterizzano una mansione.
THERP (Technique for human error rate prediction)	Processo usato in ambito industriale, predice la probabilità di errore umano e valuta il degrado di un sistema uomo-macchina.
SLIM (Success likelihood index methodology)	Processo scisso in due: 1. analisi delle mansioni in cui esiste probabilità di errore umano; 2. trasformare la probabilità di successo in probabilità di errore umano.
APJ (Absolute probability judgement)	Fondato sul giudizio di esperti in fattori umani. Esistono varie metodologie per l'analisi.
PC (Paired comparisons)	Si stima la probabilità di errore umano, tramite un confronto a coppie. Si costruisce una matrice di comparazione per comprendere quale elemento deve essere migliorato. Il risultato è una classifica di errori umani e associate probabilità.

Tra le diverse metodologie quella usata in RFI è la HEART. In questa metodologia la probabilità di errore umano P si esprime come il prodotto tra la probabilità nominale di errore P_0 e tutti i valori relativi al fattore di performance PF_i , che è funzione delle condizioni favorevoli dell'errore CFE_i (valori tabellati in Allegato 2) e dell'errore di peso Ap_i .

$$P = P_0 \cdot \prod_i PF_i$$

$$PF_i = \{(CFE_i - 1) \cdot Ap_i + 1\}$$

2.5 Le cause di incidentalità ferroviaria

2.5.1 Definizione di incidente significativo e serio

Secondo la Direttiva 2016/798/EC del UE si definisce un “*“incidente significativo” qualsiasi incidente che coinvolga almeno un veicolo ferroviario in moto, in cui vi siano almeno un morto o una persona seriamente ferita, o significativi danneggiamenti al tracciato ferroviario, altre installazioni o all’ambiente, o forte interruzione del traffico, escludendo gli incidenti in officina, casa e deposito.*”

Si specifica che significativi danneggiamenti al tracciato, installazioni o ambiente si riferiscono a costi maggiori o uguali a 150.000 euro, mentre l’interruzione del traffico ha forte incidenza solo se il sistema ferroviario sulla linea è sospesa per più di sei ore.

Un “incidente serio”, secondo la Direttiva 2004/49/EC, si definisce come “*qualsiasi collisione tra treni, deragliamenti, in cui risulti essere presente almeno un morto o feriti gravi per un quantitativo di cinque/sei persone o deterioramento del materiale rotabile, dell’infrastruttura o dell’ambiente. Si includono tutti i possibili incidenti che abbiano un ovvio impatto sulla sicurezza ferroviaria, sulla regolarità del servizio o nella gestione della sicurezza. Con il termine “extensive damage” si intende quel danno che può immediatamente essere valutato tramite investigazione con un costo di almeno due milioni in totale*”. [12]

2.5.2 Incidenti di esercizio

Gli incidenti di esercizio sono definiti come tutti quegli eventi che connessi all’esercizio ferroviario, durante lo svolgimento dell’attività hanno causato danni a persone e/o cose o gravi perturbazioni alla circolazione.

Si definisce come incidentalità reale l’insieme di tutti gli incidenti di esercizio che si sono effettivamente realizzati nel tempo. Quest’ultima può essere suddivisa in due categorie di incidenti:

- **incidenti tipici:** incidenti ai treni, incidenti in manovra ed incidenti ai passaggi a livello (PL);

Incidenti tipici	
AI TRENI	<ul style="list-style-type: none"> • Scontro tra treni; • Investimento di treni; • Urto di treni contro ostacoli; • Urti di treni fuori sagoma; • Spezzamento del treno; • Svio del treno; • Incendio di rotabili in composizione treno.
IN MANOVRA	<ul style="list-style-type: none"> • Urto di rotabili in manovra; • Incendio di rotabili; • Svio di rotabili in manovra; • Fuga di rotabili; • Incidente ai carrelli.
AI P.L.	<ul style="list-style-type: none"> • Urto di un rotabile contro un veicolo fermo al PL aperto; • Urto di rotabile contro altro ostacolo; • Investimento di persone; • Investimento animali.

- **incidenti atipici:** investimenti di persone, caduta di persone da rotabili in movimento, danni alle persone durante la salita/discesa dalle carrozze, danni alle persone per manovra di sportelli o finestrini, danni alle persone per bruschi avvii o frenate, danni alle persone per la caduta di oggetti all'interno delle vetture, danni alle persone per oggetti lanciati dal treno, danni alle persone sportesi dal finestrino, danni alle persone per contatto con le attrezzature elettriche, altro.

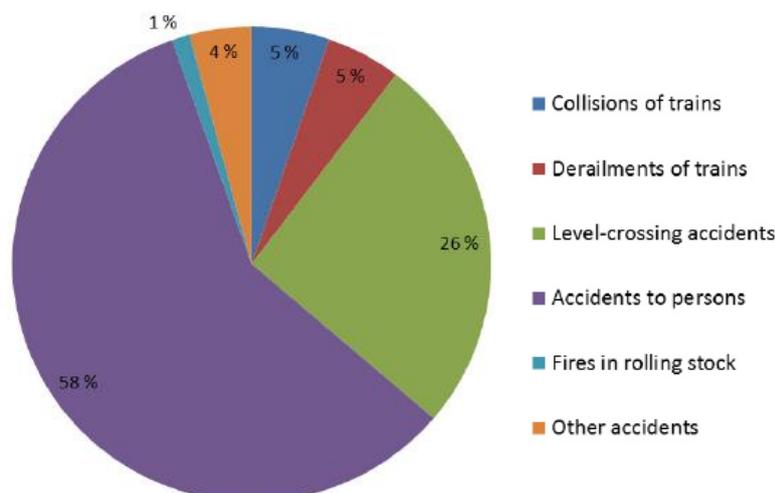


Figura 2.7 Percentuale di incidenti significativi (2012-2014). [12]

In esercizio è possibile avere anche quella che viene definita “incidentalità potenziale”, ovvero l’insieme di tutte quelle situazioni di esercizio, che pur non causando incidenti, sono potenzialmente una fonte di rischio per la sicurezza ferroviaria. Quest’ultima si costituisce di:

- pericolati incidenti: sono incidenti che si sarebbero potuti verificare, ma non sono accaduti per interventi di emergenza o per caso.
- irregolarità procedurali: non determinano l’accadimento di un incidente ma assumono principalmente un carattere di sistematicità.
- anomalità tecniche: sono anomalità tecniche che non hanno portato ad eventi incidentali, ma che avrebbero potuto, tra questi le anomalità della sede ferroviaria e del materiale rotabile tra i principali.
- guasti agli impianti di sicurezza: la circolazione continua anche in presenza di questa tipologia di guasto, dunque si ha un degrado del livello di sicurezza che si dovrebbe garantire per il servizio in opera. In queste situazioni è il macchinista l’unica vera fonte di sicurezza per il veicolo ferroviario, che agisce basandosi sulla sua personale esperienza, cultura e preparazione.

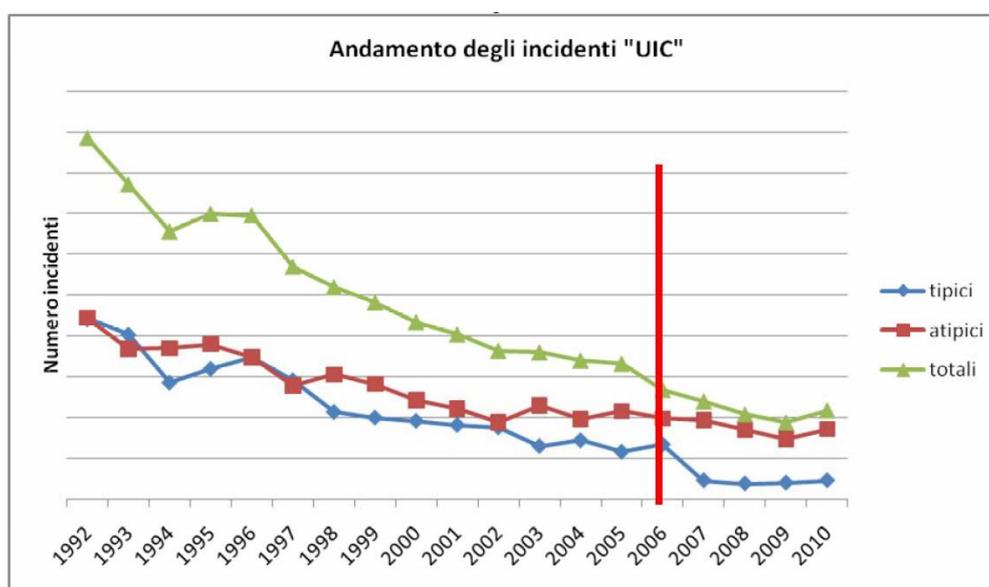


Figura 2.8 Andamento degli incidenti tipici e atipici rispetto al totale dal 1992 al 2010. [3]

2.5.3 Cause degli incidenti

Gli eventi che possono causare situazioni di rischio potenziale o incidenti di servizio si possono sintetizzare in tre grandi famiglie:

- cause tecniche;
- cause di natura accidentale;
- **cause umane.**

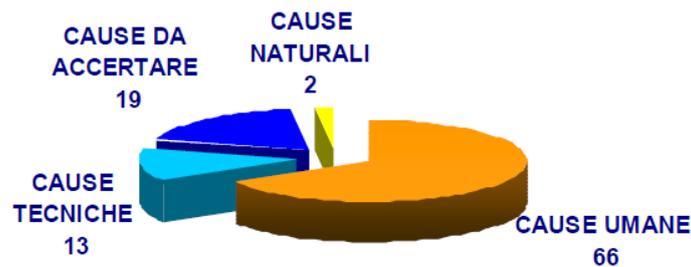


Figura 2.9 Incidenza delle principali cause accidentali. [19]

2.5.3.1 Cause tecniche

Le cause tecniche, come suggerisce la denominazione stessa, sono associabili a guasti o anomalie di natura tecnica, e sono relativi al materiale rotabile, la sede ferroviaria, l'armamento, gli impianti di sicurezza e di segnalamento. La frequenza di accadimento di questi eventi è contenuta, se paragonata alle cause umane, su cui ci si focalizzerà maggiormente. Queste cause hanno la particolarità, che quando si manifestano, i sistemi intaccati sono progettati con l'obiettivo di preservare la sicurezza, anche se a volte è la regolarità del servizio a risentirne. Per citare un esempio pratico, quando si ha un'interruzione dell'erogazione di elettricità, il circuito di binario si predispose sulla via impedita dei segnali, relativi alla linea che ha subito il guasto elettrico e ne consegue l'immediato arresto del veicolo ferroviario che si interfaccia con il segnale di via impedita, bloccando l'erogazione del servizio ferroviario lungo la linea.

2.5.3.2 Cause di natura accidentale

Le cause di natura accidentale sono di tipo esterno alla ferrovia, ovvero fuori dall'ambito infrastrutture e personale. Le principali cause esterne sono terremoti, frane, smottamenti, allagamenti, inondazioni, valanghe e alluvioni, che possono sintetizzarsi in rischi di tipo:

- idrogeologico: in questa categoria di dissesto esistono due sottocategorie:
 1. rischio geologico: ci si riferisce prevalentemente ai dissesti;

2. rischio idrologico: tutti quei eventi che si hanno superando il livello critico idrometrico in corrispondenza di corsi d'acqua, ad esempio nel caso di esondazioni e alluvioni.
- Rischio sismico: oltre agli eventi sismici racchiude in sé tutti i possibili eventi che hanno come causa il sisma, si pensi ad esempio agli tsunami.

Rischi idrogeologici	Conseguenze per linea ferroviaria
Frane/smottamenti	Presenza di ostacoli come massi rocciosi sull'armamento ferroviario con possibili distorsioni e spostamenti delle rotaie, possibile rottura cavi della corrente elettrica (qualora presente), possibili cedimenti della massicciata rispetto al livello originario.
Allagamenti/inondazioni	Allagamento della sede ferroviaria con possibile trasporto e accumulo di detriti sui binari da parte dell'acqua.
Valanghe	Caduta neve e pezzi di ghiaccio sulla sede ferroviaria (ostacoli per il passaggio dei treni), eventuali distorsioni e spostamenti degli apparati elettrici o dell'infrastruttura.
Erosione	Disgregazione ed asportazione di parti del suolo o del supporto su cui sono collocati i binari con possibili cedimenti e fenomeni di instabilità ad opera di agenti naturali come vento, acqua e ghiaccio.

Figura 2.10 Conseguenze del rischio idrogeologico sul tracciato ferroviario. [2]

Nonostante queste cause siano non prevedibili, durante la fase di progettazione si dovrebbe tenerne conto, in modo da minimizzare o in via alternativa rendere ammissibile la situazione che segue il manifestarsi dell'evento naturale in questione. Esistono norme che danno indicazioni specifiche sul monitoraggio in tempi discreti per controllare lo stato di salute del sistema ferroviario prima e dopo gli eventi naturali. In Allegato 3 si riporta una tabella dove secondo la classificazione dell'evento naturale si propone una idonea modalità di monitoraggio, con l'obiettivo di contenere le conseguenze dell'evento naturale.

2.5.3.3 Cause umane

Le cause umane, come mostrato dalla figura 2.9, hanno un'incidenza preponderante tra le cause principali di incidentalità ferroviaria. Una percentuale importante è quella che caratterizza questa tipologia di causa, ben il 66% tra tutti gli errori hanno natura umana. La domanda che sorge spontanea è il perché questa percentuale sia così elevata, la risposta per quanto semplice è che il personale spesso non rispetta le norme, esistono equivoci, imperizia e anche la dimenticanza, senza sottovalutare i fattori strettamente personali connessi al singolo individuo, quali la cultura personale e lo stato psicologico. Si sottolinea però che oltre al singolo individuo l'analisi deve espandersi cercando di comprendere le condizioni al contorno che hanno potuto portare ad un errato comportamento dell'uomo. Si sottolinea dunque l'importanza della valutazione del contesto entro cui si manifesta l'errore, focalizzandosi principalmente sullo stato di salute degli equipaggiamenti tecnologici in uso sulla linea, sugli aspetti tecnici ed organizzativi, le condizioni di esercizio in cui si inserisce il veicolo, possibili condizioni climatiche non favorevoli, come abbondante neve lungo il tracciato ferroviario, presenza di lavori concomitanti lungo la linea, alle volte non ben segnalati, o presenza di traffico perturbato a causa di ritardi o possibili scioperi.

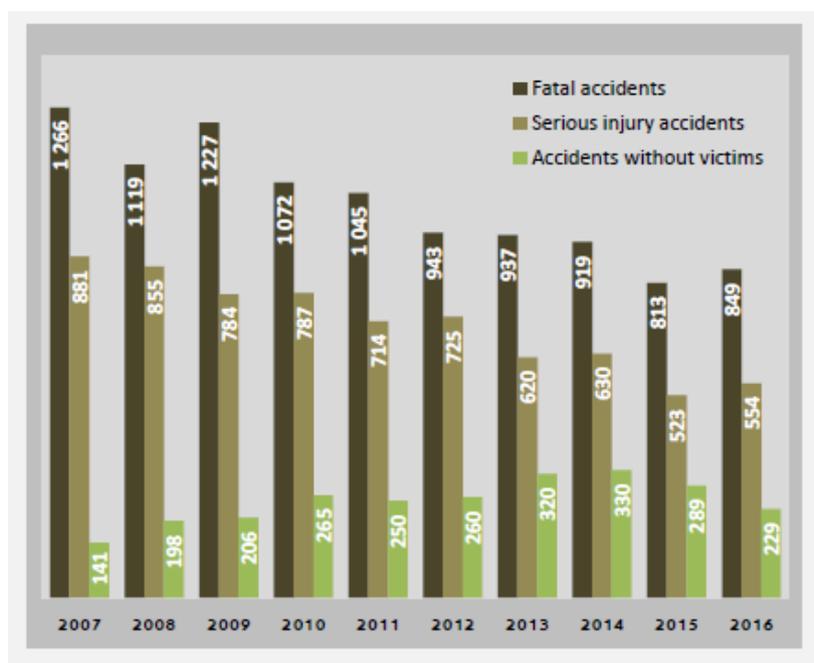


Figura 2.11 Incidenti dovuti a cause umane. [31]

Oggi si ha la necessità di condurre un'analisi del fattore umano, con l'obiettivo di studiare in modo approfondito le informazioni strettamente connesse all'individuo, informazioni strettamente personali come, la preparazione professionale, la consapevolezza del ruolo svolto, aspetti della vita privata che possono incidere sul grado di prestazione del macchinista.

Il campo di analisi umana permette di avere un elevato margine di miglioramento e dunque di abbattimento dell'oggi in calo percentuale di incidentalità per cause di natura umana.

Oggi l'obiettivo che ogni società, non solo ferroviaria, si pone è quello dell'ottimizzazione delle prestazioni dei lavoratori e di migliorare il livello di affidabilità dell'operatore sul luogo di lavoro. Migliorare le prestazioni e l'affidabilità significa indirettamente migliorare la sicurezza, il benessere e l'efficienza della società, perché si tende con questa modalità a limitare la tendenza ad effettuare operazioni non corrette.

Si analizza con un punto di vista antropocentrico l'ambiente di lavoro, focalizzandosi sull'intero sistema nella sua globalità e studiandone l'influenza sul comportamento del singolo individuo.

Il verificarsi dell'incidente, inconveniente o quasi-incidente sarà quindi il risultato della combinazione di più fattori:

- *“comportamenti individuali o decisioni prese dagli operatori che portano ad azioni non sicure;*
- *ambiente di lavoro o attività lavorative non affidabili o sicure dal punto di vista progettuale o procedurale;*
- *fattori organizzativi carenti in materia di valutazione dei rischi, gestione della sicurezza, formazione degli operatori”.* [Decreto n.271/99].

Inoltre, un quarto aspetto da considerare è il fattore *fatica*. La fatica ha come conseguenza diretta l'abbattimento del livello di prestazione del lavoratore, il rallentamento dei riflessi non solo fisici ma anche mentali, la riduzione della capacità di valutare razionalmente una situazione, portando ad un potenziale incremento nell'accadimento di incidenti e dunque una riduzione del livello di sicurezza del sistema di trasporto. Considerando il rapporto RSSB *“Fatigue and its contribution to railway incidents”* del 2015 si può riassumere in una tabella tutti quei fattori che sono connessi alla fatica: [10]

FATTORI DI FATICA	
Fattori legati all'organizzazione dell'azienda (gestione a terra e bordo del mezzo)	<ul style="list-style-type: none"> – Politica di gestione sicurezza – Procedure, istruzioni e manuali di sicurezza – Programmazione del lavoro e dei periodi di riposo del personale – Formazione del personale – Comunicazione terra-bordo – Pianificazione dei viaggi e caratteristiche del carico trasportato (passeggeri, merci) – Operazioni e compiti amministrativi a supporto del servizio di trasporto.
Fattori relativi al mezzo rotabile	<ul style="list-style-type: none"> – Progettare la rete ferroviaria – Grado di automazione degli impianti di bordo e dei sistemi di controllo del traffico – Affidabilità degli impianti di bordo e delle attrezzature – Livelli di rumore, vibrazioni e temperature nei locali del mezzo di trasporto – Qualità dell'ambiente di vita e lavoro – Caratteristiche e requisiti del carico trasportato
Fattori relativi al personale	<ul style="list-style-type: none"> – Completezza delle procedure di formazione ed addestramento – L'idoneità alla mansione (medica) – Carico di lavoro stimato ed effettivo – Possesso di titoli professionali adeguati alla tipologia di esercizio ferroviario – Esperienza professionale maturata e le caratteristiche di competenza e culturali del singolo personale
Fattori ambientali esterni	<ul style="list-style-type: none"> – Condizioni metereologiche – Condizioni e densità del traffico di mezzi rotabili

In aggiunta si sottolinea come nel particolare caso ferroviario è fondamentale comprendere l'integrazione utente-macchina-ambiente. Con il termine *macchina* non ci si riferisce

strettamente al concetto di “veicolo ferroviario”, ma a tutto l’insieme di strumenti tecnologici di cui il sistema ferroviario è composto.

Nonostante oggi si stia sviluppando una naturale propensione verso l’integrazione di nuovi sistemi di controllo, monitoraggio, segnalamento nel sistema ferroviario, la componente umana resta sempre protagonista, nonostante il graduale processo di *parziale automazione* che sta prendendo piede, processo che si sta sviluppando proprio per mitigare e contenere gli effetti che derivano dal comportamento umano errato e dai limiti fisici, soprattutto di tipo visivo se si pensa ai passaggi a livello.

Questo processo di *parziale automazione* richiede dunque una nuova formazione professionale, perché nuove competenze sono richieste dal nuovo sistema in uso, dunque l’obiettivo è di non far scendere il livello di competenza dell’operatore, ma mantenerlo costante e se possibile incrementarlo. [13]

Le soluzioni tecnologiche o procedurali che verranno usate nei prossimi anni per prevenire gli errori umani da soli non sono sufficienti a garantire una sicurezza totale del 100%, motivo per cui Trenitalia ha deciso di agire parallelamente alla *parziale automazione* con quella che viene denominata “technical and non technical skills”, ovvero lavorare su tutte le carenze legate al fattore umano e migliorarle secondo i criteri espressi nelle pagine precedenti.

2.6 Fattori che concorrono alla sicurezza ferroviaria

La sicurezza in ambito ferroviario risulta essere fortemente connessa ad alcuni fattori:

- l'affidabilità;
- i regolamenti di esercizio;
- l'organizzazione;
- la formazione professionale;
- la sorveglianza;
- **la tecnologia.**

L'affidabilità è relativa ai guasti critici per la sicurezza e i guasti in sicurezza. I primi sono guasti potenzialmente molto pericolosi e statisticamente hanno una bassa frequenza di accadimento, sono dovuti principalmente ad errori progettuali, carenze manutentive o omissioni di verifiche e controlli. I secondi sono guasti di tipo frequente e hanno come conseguenza il degrado della circolazione dei treni, sono critici dal punto di vista della sicurezza globale e non intrinseca della tecnologia.

I regolamenti di esercizio si riferiscono ai parametri di snellezza, applicabilità, uniformità, chiarezza delle responsabilità ed ergonomia dei testi. La sicurezza può incrementare anche mediante la regolamentazione d'esercizio, ottimizzandone i parametri.

L'organizzazione consta in:

- struttura organizzativa: è l'insieme degli organismi strutturati ai diversi livelli in cui si concentrano le attività di indirizzo ed operative, relativamente alla sicurezza. È importante avere una struttura a livello dove sia ben chiaro il chi fa cosa;
- selezione degli uomini della sicurezza ai vari livelli di sicurezza: reclutamento del personale ed avanzamento nella carriera professionale.

La formazione professionale ha l'obiettivo di fornire nuove ed aggiuntive competenze al personale sempre più specializzato, fornire gli aspetti tecnico-operativi delle mansioni da svolgere e gli aspetti formativi, relativi al ruolo da svolgere nelle attività in cui si è inseriti.

La sorveglianza consiste nell'insieme delle azioni svolte per verificare se le procedure applicate nell'esercizio ferroviario sono state effettuate correttamente.

In questa tesi si porrà particolare attenzione al fattore *tecnologia*. La tecnologia viene vista come un supporto ed un elemento di integrazione con il personale di linea (macchinisti, regolatore della circolazione e manutentore degli apparati), con l'unico obiettivo di mitigare e prevenire i possibili incidenti, causati dagli errori di queste figure professionali. Le mansioni svolte dal personale di linea hanno un diretto impatto sulla sicurezza dell'esercizio, da qui dunque la necessità di inserire lungo la linea e/o a bordo treno sistemi automatici che siano in grado di lavorare in tempo reale. La tecnologia, sostituendosi in parte all'operato umano evita o riduce le possibilità di errore a questo associato, aumentando gli standard di sicurezza.

La tecnologia deve soddisfare tre requisiti, quello di consistenza, affidabilità e omogeneità.

La consistenza può essere studiata a livello tecnologico sia qualitativamente che quantitativamente. Dal punto di vista quantitativo la diffusione della tecnologia esiste in quei settori in cui l'esercizio è svolto per la totalità o quasi dall'uomo, qualitativamente l'introduzione della tecnologia deve essere finalizzata a quelle condizioni di esercizio in cui la presenza della componente umana è prevalente.

L'affidabilità si lega al problema che alcune situazioni possono non portare a criticità nel sistema ferroviario, ma solo a condizioni di esercizio degradate. Queste situazioni non sono sempre note agli operatori, i quali spesso agiscono secondo esperienza e manualità con l'obiettivo di arginarne l'intensità. Se il sistema non è affidabile ci si imbatte in situazioni di guasto che possono risultare complesse da gestire, si preferisce dunque una elevata affidabilità in modo che si possa snellire la regolamentazione degli interventi in caso di guasto.

L'omogeneità della tecnologia è importante da garantire, perché le diverse attrezzature tecnologiche della rete possono dipendere da normative differenti. L'obiettivo che ci si pone è di raggiungere nel futuro prossimo degli standard normativi in ambito tecnologico che risultino uniformi nello spazio e nel tempo, progettando la nuova e vecchia tecnologia in modo integrato.

2.7 Stato dell'arte

La sicurezza, nel caso specifico di questa tesi, ai passaggi a livello può essere garantita con metodologie differenti. L'approccio usato in questo lavoro di tesi è quello di realizzare la protezione automatica integrativa ai passaggi a livello presidiati, per mezzo di un sistema di monitoraggio in tempo reale. Lo stato dell'arte vede l'applicazione di sistemi tecnologici applicati prevalentemente ai passaggi a livello privi di protezione. La sicurezza ai passaggi a livello nei diversi Stati è stata valutata e studiata proponendo soluzioni tecnologiche, che mitigassero o eliminassero completamente il rischio di incidentalità ai passaggi a livello. In Australia sono stati realizzati passaggi a livello intelligenti (ILXs), dotati di sensori, segnali, dispositivi ad ultrasuoni e/o comunicazioni via radio. La tecnologia utilizzata consta di un sistema di comunicazione tra veicoli differenti, ma solo nei passaggi a livello privi di barriere, che agisce per mezzo di uno scambio di messaggi tra il veicolo stradale, quello ferroviario e l'infrastruttura. La comunicazione si realizza con modalità wireless e sfrutta il posizionamento tramite GPS dei veicoli che si approssimano al passaggio a livello. L'inoltro viene effettuato entro nodi in prossimità dell'intersezione.

Il lavoro proposto si differenzia dall'attuale stato dell'arte perché l'oggetto di studio non sono i passaggi a livello privi di barriere, ma sono esclusivamente della tipologia protetta da barriera o semibarriera. La tecnologia usata non lavora entro un'area gestita da nodi fissi, ma definisce un'area di controllo che coincide con l'area delimitata dalle barriere chiuse o in chiusura. In aggiunta il sistema non lavora determinando per mezzo del GPS la posizione nel tempo del veicolo che si approssima al passaggio a livello, ma localizza l'ostacolo solo se confinato nell'area monitorata in presenza di barriere chiuse o in chiusura. L'interesse è rivolto all'ostacolo che non può uscire dalle barriere e non alla possibilità che il veicolo stradale e ferroviario possano interagire all'intersezione in un generico istante. Il preavviso, effettuato dal sistema serve per dichiarare la presenza di un ostacolo intrappolato e realizzare l'arresto del treno con tempestivo anticipo rispetto alle normali condizioni di esercizio in cui l'ostacolo viene percepito dal macchinista ad una data distanza di visibilità.

3 AUTOMAZIONE

3.1 DEFINIZIONE E TIPOLOGIE DI AUTOMAZIONE

Lo sviluppo tecnologico ed IT degli ultimi anni ha interessato anche il settore dei trasporti, nello specifico il campo metropolitano.

Lo sviluppo tecnologico nell'ambito metropolitano ha già affondato le sue radici e tende ad espandersi velocemente grazie al crescente numero di linee metropolitane automatizzate presenti e in fase di realizzazione. Nel futuro prossimo l'approccio dei progettisti in ambito ferroviario sarà quello di seguire l'onda di automatizzazione intrapresa dal servizio metropolitano, ma non senza difficoltà, motivo per cui l'automazione integrale oggi non si prospetta come una soluzione concreta.

In ambito ferroviario la rivoluzione tecnologica necessita ancora di maggiore tempo, ciò non toglie che la tecnologia stia diventando parte integrante del sistema ferroviario, motivo per cui nel campo ferroviario oggi è possibile parlare di *automazione parziale*.

3.1.1 Automazione integrale

L'automazione integrale, tecnologia presente nelle metropolitane automatiche di Torino (Linea 1, futura linea 2), Hong Kong, Lille, Copenaghen, Roma (linea C) e molte altre, sostituisce la funzione svolta dal macchinista durante la guida. Il veicolo viene reso con l'automazione autonomo nello svolgere un consistente numero di azioni, in primis azionare il veicolo ed instradarlo lungo la linea.

Il principale sottosistema su cui si fonda la tecnologia driveless è l'Automatic Train Control (ATC). Questo sistema è relativo alla sicurezza della circolazione dei treni, è in grado di effettuare operazioni automatiche relativamente alla scelta dell'itinerario e della regolazione dei parametri della marcia del treno, si garantisce con questo sistema che il veicolo rispetti il timetable prefissato.

Un secondo sistema è denominato Automatic Train Protection (ATP), è il sistema che garantisce una idonea e sicura marcia del treno, evitando collisioni, evitando il sorpasso dei segnali predisposti sul rosso e frenando automaticamente i convogli nel caso i limiti di velocità vengano superati.

Il terzo sistema è l'Automatic Train Operation (ATO), sistema che gestisce la guida del veicolo e sostituisce integralmente la funzione del macchinista, fa eccezione l'apertura e chiusura delle porte a bordo del treno.

I tre sistemi sono gestiti da un centro di controllo operativo (OCC-Operation Control Center), che oltre a supervisionare la marcia del treno, svolge la mansione di controllo automatico (ATS-Automatic Train Supervision).

3.1.1.1 Gradi di automazione

Oggi esistono quattro gradi di automazione come definito dall'associazione internazionale dei trasporti pubblici (UITP) nella norma IEC 62290-1. In questa norma si include nella classificazione anche il livello zero di automazione, relativo al trasporto ferroviario tradizionale, si può quindi in sintesi dire che i gradi di automazione sono cinque e non più quattro:

1. GoA 0: il veicolo ferroviario procede con guida a vista effettuata dal macchinista, il quale ha la mansione di arrestare il treno, chiudere le porte, fornire assistenza in caso di guasti, interruzioni o problemi di altra natura durante la marcia e deve seguire le prescrizioni di marcia regolate dai segnali ferroviari.
2. GoA 1: il veicolo ferroviario è integrato con la presenza del sistema ATP e del conducente a bordo. Il macchinista svolgerà mansioni di arresto, frenatura del veicolo, chiusura delle porte del veicolo, assistenza e servizio durante la marcia, mentre la gestione delle norme del viaggio, regolate dai segnali ferroviari, è automatizzata.
3. GoA 2: sul veicolo ferroviario è presente il conducente a bordo, il quale svolge la mansione di chiusura delle porte ed assistenza in caso di imprevisti durante la marcia del treno. Le operazioni quali la fermata del veicolo e le norme di viaggio, regolate dai segnali, sono eseguite in modo automatico. Il sistema prevede la simultanea presenza del sistema ATP, ATO e del macchinista.
4. GoA 3: il servizio viene effettuato in assenza di conducente a bordo, con sistema Driveless train operation (DTO). Le operazioni di chiusura delle porte e di assistenza in caso di problemi durante la marcia del treno vengono effettuate dagli operatori di bordo, mentre vengono automatizzate le operazioni relative all'arresto del treno e della regolazione della marcia del treno.

5. GoA 4: l'esercizio del veicolo ferroviario viene effettuata nella modalità Unattended Train Operation (UTO) senza la presenza di operatori di bordo e del macchinista. Tutte le attività, come la marcia del veicolo, regolata dai segnali, la fermata del treno, l'apertura delle porte e l'assistenza in caso di problematiche sono eseguite in modo automatizzato.

Grade of Automation	Type of train operation	Setting train in motion	Stopping train	Door closure	Operation in event of Disruption
GoA 1 	ATP with driver	Driver	Driver	Driver	Driver
GoA 2 	ATP and ATO with driver	Automatic	Automatic	Driver	Driver
GoA 3 	Driverless	Automatic	Automatic	Train attendant	Train attendant
GoA 4 	UTO	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic

ATP - Automatic Train Protection ATO - Automatic Train Operation

Figura 3.1 Gradi di automazione.

3.2 SAFETY INTEGRITY LEVEL

L'automazione ha permesso di abbattere notevolmente la componente di rischio associata al fattore umano, incrementando di conseguenza la sicurezza delle linee metropolitane.

In ambito ferroviario ci sono molteplici sistemi a cui deve essere associato un livello di sicurezza molto elevato, si pensi ai sistemi di segnalamento o le apparecchiature per la chiusura delle porte in banchina, si parla nel campo dell'automazione della *sicurezza funzionale*.

3.2.1 La sicurezza funzionale nel ferroviario

Nel campo ferroviario, dove l'automazione ha raggiunto livelli molto alti, è necessario che i rischi derivanti da un possibile malfunzionamento del sistema siano ridotti a rischi classificati come accettabili.

In ambito ferroviario la sicurezza funzionale dei sistemi di sicurezza a livello internazionale è governata dalle norme CENELEC EN5012X o IEC del tipo:

1. EN50126 (IEC 62278) -RAMS
2. EN50128 (IEC 622279) -Software
3. EN50129 (IEC 62425) -Sistemi di sicurezza. [6]

L'ingegneria della sicurezza funzionale si occupa di studiare le frequenze di accadimento dei potenziali eventi che possono generare un potenziale guasto/top event. L'obiettivo che ci si pone è quello di fronteggiare la presenza di errori sistematici.

Si introduce il concetto di livello di integrità definito con l'acronimo SIL "Safety Integrity Level", che rappresenta non solo un valore numerico, ma soprattutto esprime il tasso di guasto massimo tollerabile prefissato in fase di progettazione di un sistema tecnologico.

Esistono quattro livelli di SIL, che sono associati ad un valore numerico, che definisce la probabilità che un sistema non sia in grado di garantire la sicurezza per cui è stato progettato (PFD/PFH). A questo range numerico si associa un livello SIL, espresso sotto forma di numero intero che va da un minimo di 1 ad un massimo di 4. I valori del SIL esprimono il livello di integrità del sistema in oggetto. Un sistema che può generare un danno molto alto richiede un elevato valore del SIL, SIL4.

Safety Integrity Level (SIL)	Average Probability of Failure on Demand (PFD _{avg})	Probability of Failure per Hour (PFH)	Risk Reduction Factor (RRF)
SIL 4	$10^{-5} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-4}$	$10^{-9} \leq \text{PFH} < 10^{-8}$	$10000 \leq \text{RRF} \leq 100000$
SIL 3	$10^{-4} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-3}$	$10^{-8} \leq \text{PFH} < 10^{-7}$	$1000 \leq \text{RRF} \leq 10000$
SIL 2	$10^{-3} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-2}$	$10^{-7} \leq \text{PFH} < 10^{-6}$	$100 \leq \text{RRF} \leq 1000$
SIL 1	$10^{-2} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-1}$	$10^{-6} \leq \text{PFH} < 10^{-5}$	$10 \leq \text{RRF} \leq 100$

Figura 3.2 Classificazione del livello SIL. [7]

In sintesi, se si desidera un livello di SIL elevato, la probabilità di avere un guasto del sistema deve essere bassa, se i guasti sono presenti devono essere rilevati e contenuti, a volte per raggiungere il livello di SIL desiderato si può avere ridondanza del sistema.

3.3 L'ESPERIENZA IN GERMANIA

L'automazione integrale nelle ferrovie è oggi oggetto di studio da parte di molte università, che hanno stanziato borse di ricerca e programmi di dottorato con l'obiettivo di studiare la fattibilità dell'automazione integrale in ferroviaria.

Grazie alla borsa di studio Erasmus+, vi è stata la possibilità di collaborare con l'“Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik”, presso il Dipartimento di Ingegneria Civile alla Technischen Universität Darmstadt in Germania.

La collaborazione, principalmente legata ad un percorso di ricerca, quello dei dottorandi Bilal Üyümez e Rene Schönemann, ha coinvolto parte iniziale del lavoro di questa tesi.

L'obiettivo proposto era l'identificazione di situazioni critiche in ambito ferroviario, nello specifico relativo all'esercizio ferroviario, si richiedeva di identificare, a partire da una matrice di rischio, le situazioni critiche e distinguerle da quelle non critiche.

Si richiedeva di modellare un numero limitato di situazioni critiche con un approccio logico, fondato su solide basi matematiche, che fosse di semplice interpretazione per un computer, ma che “traducessero” le azioni umane in regole logiche prive di interpretazione da parte del computer.

Con il linguaggio di programmazione MATLAB[®] sono state modellate tre situazioni critiche estratte dalla matrice di rischio, utilizzando il tool “fuzzyLogicDesigner”.

I risultati ottenuti hanno permesso di evidenziare che ad oggi ci sono ancora molti limiti tecnologici per la realizzazione dell'automazione integrale in ferrovia, ma soprattutto grandi ostacoli si hanno non nel rilevare l'ostacolo lungo il tracciato, ma far comprendere al sistema artificiale la distinzione tra un rischio di natura critica e non critica.

Preso nota dei limiti della ricerca ci si è focalizzati su una particolare situazione critica, la presenza di un ostacolo al passaggio a livello. L'analisi è stata condotta con un approccio simile a quello della prima parte di ricerca, dove si è realizzata la matrice di rischio relativa alla criticità studiata, l'obiettivo non è però stato quello della ricerca di automazione totale al passaggio a livello ma parziale come verrà spiegato in modo dettagliato nei capitoli che seguono di questa tesi.

4 LA SICUREZZA AI PASSAGGI A LIVELLO NAZIONALI

4.1 Il passaggio a livello

Un passaggio a livello, a cui corrisponde l'acronimo PL, è un'intersezione che identifica uno spazio comune tra la sede stradale e quella ferroviaria. Il passaggio a livello permette il passaggio promiscuo tra veicoli ferroviari e stradali, motivo per cui le due sedi devono risultare complanari. Il PL deve essere munito obbligatoriamente di sistemi che inibiscono il transito lato strada quando il veicolo ferroviario è in marcia, questi dispositivi sono preventivamente disposti lato strada per avvisare tempestivamente l'utente stradale.



Figura 4.1 Passaggio a livello custodito con barriere. [t]

4.2 Le tipologie di passaggi a livello

Esistono due principali grandi gruppi per definire le tipologie di passaggio a livello. La prima tipologia è relativa alla presenza o eventuale assenza di protezione della zona di intersezione per mezzo di barriere, semibarriere, cancelli o altre tipologie di chiusure. Le due sottoclassi che costituiscono il primo gruppo tipologico sono:

- PL con barriere, denominati custoditi;
- PL senza barriere, denominati incustoditi.

Si definisce barriera un qualunque tipo di chiusura al PL che inibisca la possibilità di varcare la zona di confine delimitata dalla sede ferroviaria e quella stradale. La barriera può confinare la zona di potenziale rischio solo parzialmente o completamente, a seconda che sia presente una barriera o una semibarriera a protezione del PL.

I PL con barriere sono sistemi che possono essere gestiti da utenti privati o direttamente dal Gestore dell'infrastruttura ferroviaria nazionale (G.I.).

In questa tesi saranno considerati nelle analisi di rischio solo i PL con presenza di barriere lato strada di qualsiasi natura (barriere e/o semibarriere) e gestiti dal gestore dell'infrastruttura italiana ferroviaria RFI.

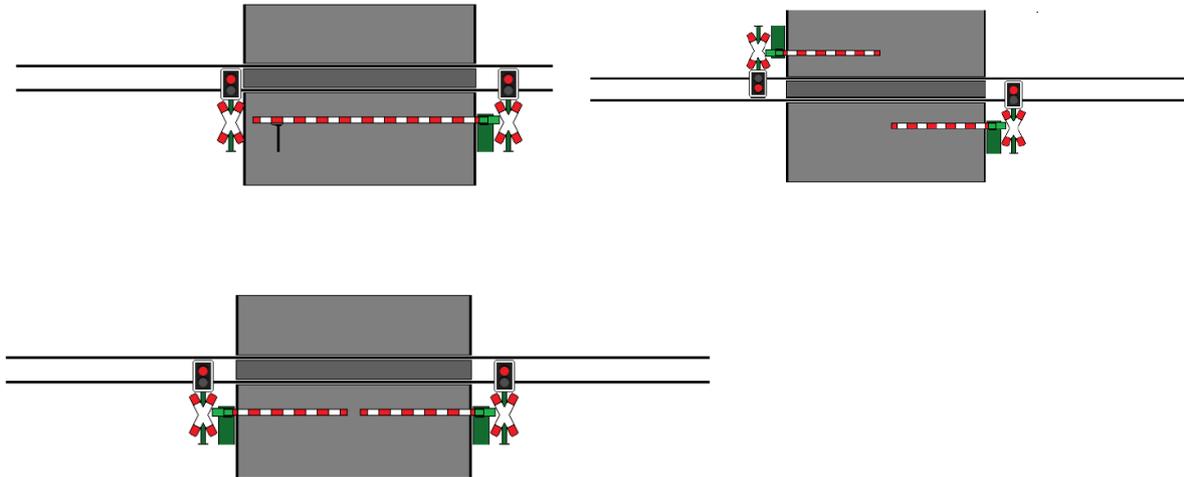


Figura 4.2 Tipologie di PL custoditi.

La seconda classificazione riguarda i PL che possono essere classificati in base alla tipologia di regime di chiusura, che nel caso di PL custoditi sono classificati in due principali gruppi:

- PL ad azionamento manuale: un operatore svolge la mansione di comandare la chiusura della barriera. Oggi la tipologia di azionamento manuale più frequente è quella relativa all'azionamento di un motore elettrico per mezzo di un comando a distanza azionato da un operatore. L'abbassamento viene realizzato qualche istante prima della partenza del veicolo ferroviario dalla stazione più vicina al PL. La chiusura del PL diventa fondamentale per azionare il segnale di via libera. In questa tipologia di regime di chiusura è fondamentale l'intervento dell'uomo.
- PL ad azionamento automatico: il treno stesso aziona l'abbassamento delle barriere poiché quest'ultimo durante il suo transito attiva dei pedali o blocchi conta assi, azionati dallo scorrimento delle ruote, che sono disposti lungo la linea sui "punti di comando" alle "distanze di comando" previste dalle apposite norme.

In presenza di passaggi a livello custoditi per mezzo di barriere complete e manovrate automaticamente che chiudono l'intera carreggiata lato ferrovia si possono trovare le seguenti protezioni:

1. segnali fissi luminosi art.53/1 a) del Regolamento sui segnali;
2. specifici segnali art.53/1 b) del Regolamento sui segnali e relativo alla linea a semplice binario;
3. segnali di partenza delle stazioni vicine;
4. segnali intermedi di BA;
5. segnali di posti di blocco intermedi di B.ca e di blocco elettrico manuale;
6. segnali di 1^a categoria, che svolgono il duplice compito di essere anche segnale di avviso di una stazione.

Per la stessa tipologia di PL le unità periferiche interessate possono essere costituite da segnali e dispositivi che permettono, in base alla reale marcia del treno, di chiudere il PL e di riaprire il PL:

1. avvisatore ottico ed acustico di annuncio del treno, che indica quando chiudere il PL;
2. avvisatore ottico ed acustico di riapertura del PL;
3. tasto e segnalazione ottica di conferma della chiusura del PL avvenuta con successo.

Se invece si è in presenza di passaggi a livello con semibarriere e manovrate automaticamente, il controllo viene effettuato da un posto di controllo. Il posto di controllo consta della presenza di dispositivi di allarme quali:

- allarme per guasto (mancata chiusura del PL, mancato lampeggiamento dell'avvisatore luminoso o acustico, tallonamento delle barriere);
- allarme per assenza di energia elettrica;
- allarme in caso di prolungata chiusura delle barriere (tempo di chiusura superiore a cinque minuti).

In caso di presenza di passaggi a livello con barriere ma non manovrate automaticamente dai treni, si ha che la manovra del via libera avviene solo se le barriere dei PL sono chiuse, notificata la chiusura della barriera, è possibile effettuare la manovra. Si hanno per questa tipologia di PL due possibili situazioni relative alla gestione del sistema:

- nel primo caso si ha che il posto di custodia, che manovra le barriere, è diverso da quello che manovra i segnali. In questo caso l'addetto riceve una comunicazione ogni volta che un treno si approssima sul lato protetto da segnali. Una volta ricevuta la

comunicazione l'addetto provvederà alla chiusura immediata del PL, e comunicherà al posto di manovra tramite segnali il consenso per dare il via libera al treno;

- nel secondo caso la manovra delle barriere viene gestita dal posto che si occupa della manovra delle barriere. L'addetto viene sempre informato dell'arrivo di un treno, per prima cosa chiuderà le barriere e solo dopo averle chiuse, è autorizzato ad aprire il segnale di protezione PL sul lato di provenienza del treno. Una volta passato il treno, il segnale di protezione viene disabilitato e le barriere vengono successivamente riaperte.

4.3 Statistiche di incidentalità ai PL

Il tasso di incidentalità relativo ai passaggi a livello è preoccupante, nonostante essi rappresentino a livello stradale una piccola percentuale, quella del 2% degli incidenti mortali su strada, in ambito ferroviario risultano il 26% degli incidenti mortali totali, dunque è necessario cercare delle misure che possano abbattere significativamente il manifestarsi di situazioni pericolose. Ricerche scientifiche documentano che nell'intersezione strada-ferrovia ci siano mediamente 400 morti ogni anno in Europa, mentre a livello mondiale, si fa l'esempio degli USA, il tasso medio di mortalità annua ai PL è di 300. Questi dati hanno preoccupato molti ricercatori nell'ambito dei sistemi di trasporto, ed è il motivo per cui questa tesi si focalizza nell'analizzare la situazione globale italiana. [27]

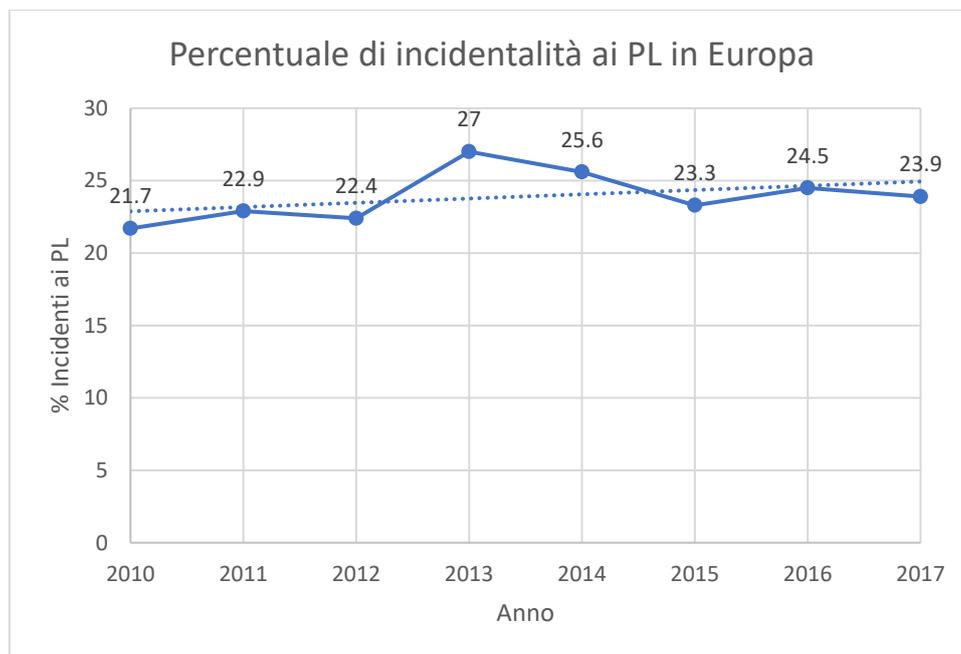
4.3.1 Incidentalità ai PL a livello europeo

Il numero di passaggi a livello nel corso degli anni è diminuito, poiché le politiche aziendali delle società gestori dell'infrastruttura ferroviaria europea hanno deciso di promuovere una campagna di soppressione annuale dei passaggi a livello con un tasso di eliminazione annuale del 4% ca.

La strategia promossa dagli stati europei sembra, considerando le statistiche degli ultimi sette anni di indagine forniti dai report annuali della UIC, non aver apportato consistenti miglioramenti. Il tasso medio annuale di incidentalità sembra essere tendenzialmente stabile, nonostante si siano registrati in alcuni anni dei miglioramenti.

ANNO	% Incidenti al PL	Num. Incidenti	Num. Vittime	Num. Morti	Num. Feriti gravi	Num. Treni passeggeri incidentati
2010	21,7	503	667	381	286	561
2011	22,9	486	618	320	307	503
2012	22,4	412	526	285	232	432
2013	27	509	634	308	294	509
2014	25,6	451	565	262	269	432
2015	23,3	427	510	242	268	413
2016	24,5	398	501	250	247	424
2017	23,9	390	483	221	257	395

La percentuale media di incidenti ai passaggi a livello annuale è circa del 24% in Europa, questo valore rappresenta un quarto di tutte le tipologie di incidenti in ambito ferroviario, motivo per cui desta particolare interesse comprenderne le cause e proporre delle valide soluzioni.



4.3.2 Incidentalità ai PL a livello nazionale

Sulle linee meno recenti del patrimonio ferroviario gestito da RFI ci sono molti punti di intersezione a raso tra la strada e i binari ferroviari, i passaggi a livello. RFI ha sposato l'iniziativa europea di eliminare fisicamente la presenza dei passaggi a livello, sostituendoli, dove possibile, con opere sostitutive quali cavalcavia o sottovia, affiancando interventi di mitigazione tecnologica. Negli ultimi dieci anni circa il 3,5% dei PL è stato soppresso, eliminandone mediamente 200 ogni anno.

La realizzazione di opere sostitutive coinvolge anche gli enti territoriali, come le Amministrazioni comunali e provinciali. Non sempre è però possibile realizzare opere alternative a causa dell'orografia del territorio, condizioni idrogeologiche, condizioni urbanistiche, vincoli di natura archeologica e/o paesaggistica. L'alternativa che si propone è quella di migliorare le condizioni di sicurezza dei passaggi a livello che non possono essere soppressi, per una delle cause precedenti, con un intervento tecnologico mirato.

La soppressione dei passaggi a livello ha impiegato l'azienda in un oneroso investimento, che nel solo 2015, con un numero totale di soppressioni dei PL di 111, ha investito un capitale di circa 60 milioni di euro.

La situazione italiana in termini di incidentalità ferroviaria ai passaggi a livello risulta essere sotto la media europea. Il valore medio di incidentalità in Italia è circa il 15%, rispetto al 24% europeo.

ANNO	Num. incidenti in ferrovia	Num. incidenti ai PL	% Incidenti al PL
2005	134	25	18,66
2006	132	32	24,24
2007	121	19	15,70
2008	103	9	8,74
2009	93	5	5,38
2010	100	15	15,00
2011	106	18	16,98
2012	106	13	12,26
2013	98	14	14,29
2014	109	16	14,68
2015	98	19	19,39
2016	92	11	11,96

I valori riportati nella tabella sono una sintesi dei rapporti annuali ANSF, sintesi che ha permesso di inquadrare il contesto italiano entro il quadro europeo.

Nonostante il tasso di incidentalità italiano risulti inferiore alla media europea, questo non permette al gestore dell'infrastruttura di raggiungere livelli di sicurezza ottimali, poiché nonostante il trend sia dal 2005 al 2016 decrescente, non è ancora sufficiente per abbattere il numero di incidenti significativi ai passaggi a livello:

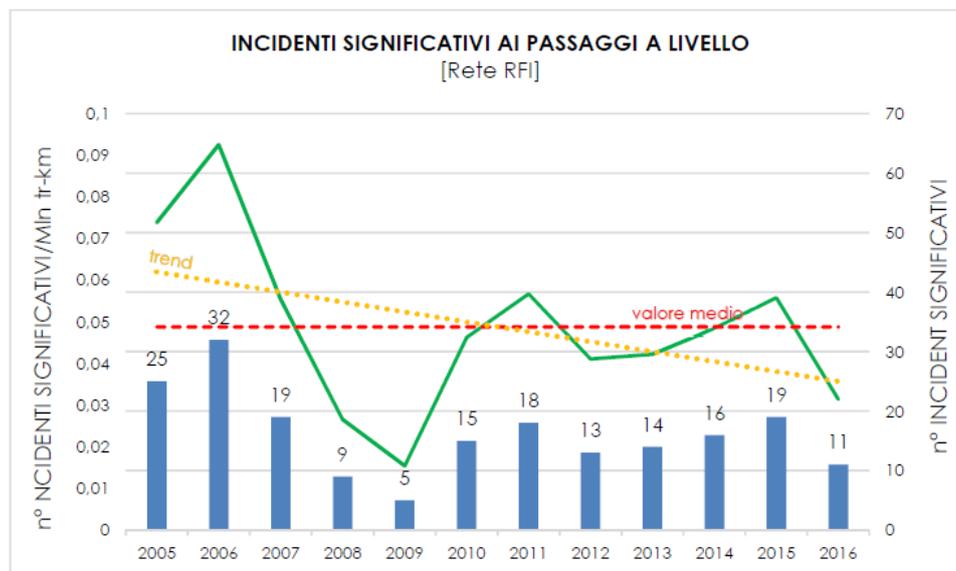


Figura 4.3 Andamento nazionale degli incidenti significativi ai PL. [4]

4.3.3 Le principali cause dell'incidentalità ferroviaria ai PL italiani

Le cause che possono portare al manifestarsi di un evento pericoloso al passaggio a livello non sono uniche e non sono tutte definibili con certezza. Si cerca di riassumere le principali cause, sottolineando che queste sono le più frequenti e non le uniche possibili.

Purtroppo, nonostante le iniziative di RFI, è opportuno sottolineare che la maggior parte degli incidenti ai passaggi a livello sono legati alle infrazioni del Codice della Strada (art. 147), il mancato rispetto delle norme e della segnaletica stradale ed indebiti comportamenti da parte degli utenti. È importante dunque sensibilizzare l'utente tramite campagne di tipo informativo e a carattere educativo.

Alcune ricerche scientifiche, che hanno studiato il comportamento degli utenti ai PL, hanno dimostrato, soprattutto nel caso di pedoni e ciclisti, che l'utente diventa impaziente con molta facilità. L'impazienza rende l'utente predisposto ad un comportamento rischioso con conseguente attraversamento indebito del passaggio a livello in presenza di barriere chiuse o in chiusura. Purtroppo, questo atteggiamento mostra chiaramente l'incapacità del soggetto nello stimare il grado di rischio potenziale legato alla velocità del convoglio ferroviario, spesso ignorata dall'utente, e il tempo di approccio del treno al PL. Da questi studi è emerso che in presenza di utenti giovani, circa il 15% attraversa senza neanche guardare alla propria destra e sinistra e spesso il loro udito è schermato da auricolari che fungono da barriera sonora. [5]

Esiste una campagna di sensibilizzazione promossa dalla UIC che è giunta alla decima edizione, denominata International Level Crossing Awareness Day (ILCAD), che ha promosso la giornata di sensibilizzazione ed informazione dei passaggi a livello, cercando di arrivare soprattutto ai più giovani. Purtroppo, la generazione tra i 15 e 35 anni risulta spesso distratta dall'utilizzo di smartphone o altri dispositivi tecnologici, che spesso catturano la loro attenzione, come fa ben notare l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS).

Purtroppo, oltre alle cause che vedono nell'utente l'origine del manifestarsi di un evento pericoloso al PL, la probabilità che un evento pericoloso si manifesti al passaggio a livello è funzione di altri moltissimi fattori, si riportano di seguito i principali:

1. la densità di traffico ferroviario, misurato in termini di numero massimo di passaggi al PL in un periodo di analisi di ventiquattro ore;

2. la densità di traffico stradale, misurata in termini di numero massimo di veicoli che attraversano il PL in un arco temporale di analisi di ventiquattro ore;
3. l'assenza di sistemi di protezione acustica e luminosa al PL;
4. carenza di sufficiente spazio stradale per il veicolo;
5. carenza di allineamento tra il tracciato ferroviario e stradale, come possibili angoli non retti all'intersezione del PL, o presenza di elevazione non congruente strada-ferrovia.

In sintesi, è possibile tramite campagne di sensibilizzazione inviare messaggi educativi corretti, ma purtroppo la sensibilizzazione prevede tempistiche elevate e non produce effetti nel breve termine. Sicuramente a lungo termine le campagne promosse negli anni daranno i loro frutti, ma oggi bisogna agire in modo più mirato affinché si possa mitigare il problema dell'incidentalità ai passaggi a livello fin da subito.

La necessità di agire nell'immediato è legata principalmente alle conseguenze derivanti da un evento critico al passaggio a livello. Ne ILCAD sono state trattate anche le tematiche relative agli effetti che gli incidenti ai passaggi a livello provocano e sono stati classificati in effetti primari e secondari. Gli eventi primari hanno un impatto di tipo diretto, indiretto ed "astratto", mentre i secondari hanno un impatto sulla supply chain e sull'interruzione del servizio ferroviario. Gli effetti e i relativi impatti possono essere sintetizzati in una tabella, la fonte consultata per la realizzazione tabellare è la Comprehensive Costs of Highway-Rail Grade Crossing Cashes, TRB Report No. 755:

EFFETTO	IMPATTO	CONSEGUENZA
Primario	Diretto	Danni alla proprietà come veicoli stradali, infrastruttura e equipaggiamento ferroviario
		Altri costi diretti come servizio medici d'emergenza e assicurazione
	Indiretto	Perdita di produttività legata al lavoro
		Perdita fiscale
	Astratto	Perdita della qualità della vita
		Dolore e sofferenza
Costi ambientali		
Secondario	Supply chain e interruzione del servizio	Reindirizzare i costi
		Perdita di vendite
		Costi di prevenzione
		Deterioramento dell'inventario
		Ritardo dei passeggeri e delle merci
		Responsabilità legate alle merci ed ai passeggeri
Incremento dell'inventario		

L'ANSF ha richiesto alcune azioni a RFI, sia di natura tecnica, sia di natura tecnologica con l'obiettivo di ridurre da subito il rischio ai passaggi a livello. Le richieste effettuate possono essere sintetizzate nella tabella che segue:

Numero azione	Tipo di azione richiesta
1	Dotare i PL in consegna agli utenti di un sistema tecnologico di apertura su richiesta
2	Verificare la segnaletica stradale
3	Installare bande rumorose o dispositivi rallentatori di velocità o modificare la viabilità locale
4	Garantire l'efficienza dei dispositivi in uso
5	Migliorare gli schemi di principio dei PL
6	Installare barriere non aggirabili dai pedoni
7	Risolve problemi puntuali relative al parallelismo strada-ferrovia
8	Dotare i PL di sistemi di rilevamento degli ostacoli tra le barriere

4.4 Automazione parziale

4.4.1 Programma di potenziamento tecnologico

L'obiettivo a breve termine che RFI si è posto, relativo all'ottimizzazione dei livelli di sicurezza ai passaggi a livello, consta non soltanto del precedente citato intervento di sensibilizzazione, ma soprattutto prevede l'equipaggiamento dei PL non sopprimibili tramite dispositivi tecnologici.

Questa "attività" di potenziamento tecnologico da parte di RFI prende il nome di automazione parziale. Si è parlato in precedenza dell'automazione integrale, ma quest'ultima oggi non è ancora perseguibile in campo ferroviario, nonostante la ricerca stia cercando delle soluzioni valide affinché in futuro anche il servizio ferroviario possa essere ad automazione integrale di categoria GoA 4.

In Austria sono stati condotti degli studi di ricerca dalle università austriache di Salzburg e Wels riguardo la possibilità di automatizzare una linea ferroviaria regionale. I risultati hanno portato ad evidenziare alcuni limiti del progetto.

Il progetto di automazione delle linee ferroviarie ha prima di tutto un forte impatto economico, perché l'odierno sistema infrastrutturale ferroviario dovrebbe cambiare, si pensi alla necessità di isolare la linea con sistemi di protezione che impediscano ad un potenziale ostacolo di entrare lungo la linea stessa, la realizzazione di nuove banchine e nuove tipologie di treni.

Nello studio emerge come l'inserimento di un convoglio ferroviario automatizzato sia un problema in termini di traffico, perché andrebbe ad operare in un sistema a traffico misto, ovvero treni non automatizzati ed automatizzati. La presenza di un eventuale traffico misto è un ostacolo di tipo operativo, tecnico ed economico.

I limiti tecnologici sono ancora molti per realizzare l'automazione integrale in ferrovia, si riportano i risultati evidenziati dallo studio condotto da Oliver Gebauer in Austria relativamente ai limiti degli strumenti oggi noti e potenzialmente utili per realizzare un prototipo di treno ad automazione integrale GoA 4:

1. laser scanner di tipo Lidar: presenta incorrette misurazioni a causa della presenza di echi derivanti dalla precipitazione o dalla caduta di neve;

2. stereo-video: l'utilizzo viene limitato dalla visibilità, il limite di visibilità è prossimo alla distanza di visibilità umana e viene richiesta una continua calibrazione del sistema video nel tempo;
3. sistema radar: assenza di informazione relativa all'oggetto rilevato;
4. ultrasuoni: limitato range di applicazione, utile solamente nel caso di arrivo e partenza del veicolo ferroviario con velocità contenute in prossimità di zone di rischio;
5. camera ad infrarossi (IR): la sincronizzazione oraria delle telecamere è supportata solo da sistemi molto costosi. In condizioni ambientali avverse, come la presenza di nebbia o temperature elevate, le prestazioni di rilevamento scendono in modo esponenziale. Infine, la risoluzione della telecamera è di molto inferiore rispetto alle fotocamere ottiche.

Infine, l'ultima motivazione è di carattere sociale, sarebbe necessaria una modifica delle leggi del traffico, come successo in Nevada per le auto autonome. Il cambiamento legislativo è uno sforzo notevole richiesto ai governanti e non è semplice convincere l'opinione pubblica ed i rappresentanti di stato riguardo la sicurezza del sistema ad automazione integrale sulle linee ferroviarie. [16]

L'alternativa all'automazione integrale, oggi non perseguibile per i motivi citati in precedenza, è quella parziale, ovvero garantire elevati standard di sicurezza grazie alla presenza di sistemi tecnologici che interagiscono con il macchinista in caso di situazioni pericolose. L'introduzione delle tecnologie a supporto della sicurezza, introducono un livello di automazione intermedio, grazie alla presenza di sistemi tecnologici che lavorano in tempo reale e che permettono di rilevare la presenza di eventuali criticità lungo il tracciato ferroviario come la presenza di ostacoli.

Nel caso studio di questa tesi, relativamente al problema dei passaggi a livello, l'automazione parziale viene realizzata tramite uno specifico apparato che verifica la libertà dell'attraversamento. L'automazione parziale ai passaggi a livello viene realizzata tramite un sistema denominato Protezione Automatica Integrativa per i passaggi a livello, il cui acronimo è PAI PL.

Il PAI PL ha carattere sussidiario ed ha l'obiettivo di rilevare la libertà dell'intersezione strada-ferrovia. Il sistema permette di preavvisare il conducente in tempo reale e di agire in questo modo sulla distanza alla quale il macchinista può ancora giovare dell'informazione anticipata.

L'informazione percepita permette di modificare il tempo di azione e reazione del conducente che va a ridursi, ne consegue da subito una riduzione della velocità del convoglio, che coincide con un minor spazio di arresto richiesto. Tutti questi benefici sono riscontrabili se le ipotesi con le quali si lavora sono le migliori condizioni per il moto: tracciato rettilineo, pianeggiante ed assenza di gallerie.

4.4.2 Caratteristiche del sistema PAI PL

Il sistema PAI PL viene usato per rilevare la presenza di ingombri nell'area sottoposta al monitoraggio da parte di sistemi tecnologici. L'ostacolo da rilevare può essere presente nell'area sottoposta al monitoraggio precedentemente alla chiusura della barriera o può manifestarsi contemporaneamente alla chiusura.

Quando si parla di "ingombro" al PL si definisce, a barriere chiuse, la presenza accidentale di veicoli stradali, oggetti di dimensioni consistenti, pedoni e ciclisti.

L'apparato non è progettato per rilevare oggetti o animali di piccola taglia, dimensione inferiore ad una sfera di raggio 60 cm.

Questi sistemi sono introdotti nei casi di passaggi a livello che non possono essere soppressi e sostituiti con la realizzazione di infrastrutture alternative, e devono dunque essere protetti in modo diverso perché presentano evidenti difficoltà di esercizio come:

1. Attraversamenti con barriere distanti tra di loro, caratterizzate da intenso traffico pesante o con tracciato stradale tortuoso;
2. Intralci al normale deflusso stradale.

Una volta che la barriera è chiusa si attiva il sistema di controllo, il quale valuta la libertà dell'attraversamento. Il rilevamento cessa quando l'area monitorata risulta essere libera o dopo un tempo massimo di 10 secondi di rilevamento.

Quando sono previsti più treni in successione nello stesso senso di marcia o in sensi opposti, il controllo relativo alla libertà della zona di intersezione viene effettuata solo per il primo treno.

Nel caso in cui è presente un'anormalità nel sistema PAI PL questa viene indicata per mezzo di una segnalazione luminosa di color rosso ed è cumulata all'allarme relativo alla mancanza di alimentazione per il PL di linea.

In presenza di regolare funzionamento del PAI PL e in assenza di ostacoli rilevati nella zona di ingombro monitorata, si ha la predisposizione al via libera dei segnali di protezione del PL. [28]

4.4.3 Il sistema di monitoraggio SIRIO LX

Il sistema PAI PL introdotto in una decina di passaggi a livello italiani è costituito dal sistema di monitoraggio SIRIO LX, prodotto del Consorzio STARS- Railway Systems.

Il SIRIO LX è un sistema radar di tipo automatico, che è stato progettato con l'obiettivo di rendere nulla la possibilità di avere scontri tra treni ed ostacoli sull'intersezione strada-ferrovia ai passaggi a livello nazionali. Il sistema è stato progettato in modo da risultare conforme ai livelli di sicurezza SIL 4 CENELEC 50129 richiesti dalla normativa vigente ed ha un valore elevato di mean time between failure (MTBF), valore maggiore di dieci anni. Questi due fattori forniscono la sicurezza di avere un prodotto dotato di un elevato livello di sicurezza e di protezione nei confronti degli utenti ai passaggi a livello. La tipologia di ostacolo che è possibile rilevare è vasta, è in grado di localizzare qualsiasi ostacolo, di qualsiasi materiale, purché abbia una dimensione superiore al diametro di una sfera da 60 cm. Il sistema permette di individuare i più comuni ostacoli ai passaggi a livello come macchine, ciclisti, motoveicoli e pedoni. [s]

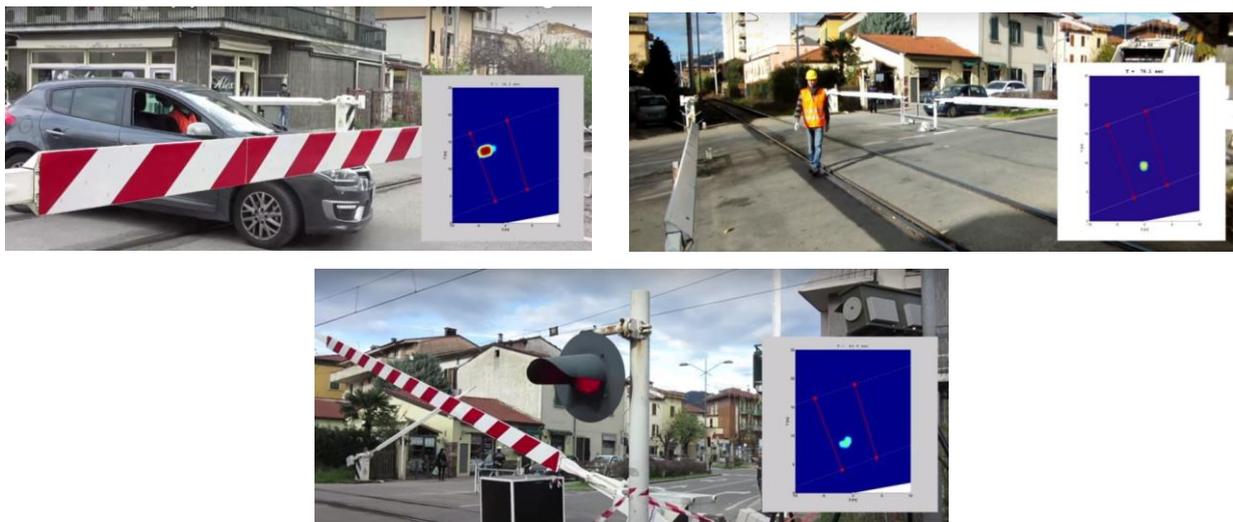


Figura 4.4 SIRIO LX in presenza di a) Auto b) Pedone c) Oggetto generico. [s]

Il tempo di reazione per recepire la presenza di un eventuale ostacolo e visualizzarne la presenza su un apposito monitor controllato da un operatore qualificato in remoto è di 3 secondi. La caratteristica del sistema SIRIO LX è che può essere impiegato in un range di temperature che va dai -40° ai $+70^{\circ}$ ed in ogni condizione atmosferica.

Il sistema di monitoraggio gode di ottime caratteristiche quali:

1. flessibilità: l'area di osservazione è parallelepipeda con angoli e dimensioni configurabili;
2. modularità: si ha la possibilità di utilizzare in contemporanea fino ad un massimo di quattro sensori radar nello stesso sito di analisi su tutta la geometria del passaggio a livello;
3. prestazione: il tempo di reazione del sistema è molto contenuto, soli 3 secondi ed il sistema funziona bene anche in presenza di condizioni atmosferiche avverse come nebbia, pioggia e neve, e in tutte le condizioni di luce;
4. affidabilità: il tempo medio fra i guasti (MTBF) è superiore a 10 anni;
5. video sorveglianza: Presenta un sistema di trasmissione video (TV a circuito chiuso).

L'architettura base di cui si compone il sistema di monitoraggio SIRIO LX consta di un radar e di una cabina esterna. La presenza del sensore radar permette di rilevare la presenza o eventuale assenza di ostacoli entro l'area monitorata, e comunica con la cabina tramite l'interfaccia seriale RS485. Altri componenti del sistema sono un riflettore angolare che permette di svolgere la funzione diagnostica relativamente al corretto funzionamento del sensore, la cabina di monitoraggio che registra i video relativi all'area monitorata e prevede al suo interno la presenza di un operatore addetto al monitoraggio dei dati inviati dal sistema, inoltre funziona da alimentatore del sensore radar, si interfaccia con i sistemi di segnalazione per mezzo di relè e trasmette le informazioni al sistema di controllo remoto. Infine, l'ultimo elemento di cui si compone l'architettura del sistema è un terminal di controllo remoto che riceve tutte le informazioni relative allo stato del passaggio a livello tramite una rete locale LAN o il GSM ferroviario (GSM-R).



Figura 4.5 Sistema di monitoraggio SIRIO LX. [30]

In sintesi, si riassumono i principali vantaggi del sistema:

1. bassi costi di manutenzione;
2. rilevamento ed avviso automatico della presenza di ostacoli al passaggio a livello con barriere chiuse o in chiusura;
3. interfaccia diretta con la segnaletica ferroviaria e comunicazione dei dati monitorati per mezzo di sistemi remoti, consentendo a qualsiasi località di ricevere dati e video in tempo reale, relativamente all'area monitorata;
4. efficienza in qualsiasi condizione atmosferica anche se difficile, sia di giorno che di notte.

In questo lavoro di tesi il sistema SIRIO LX viene considerato applicato a tutti i passaggi a livello presenti oggi in Italia, e non solo ad un numero limitato, come è nella realtà odierna. Si vuole dimostrare che applicando il sistema di monitoraggio SIRIO LX nel PAI PL si ha un'importante riduzione del rischio al passaggio a livello. La riduzione del rischio viene promossa dalla tecnologia di rilevazione in tempo reale dell'ostacolo, grazie al preavviso che il macchinista riceve via LAN o GSM-R. Il preavviso agisce sul tempo di percezione e reazione che si riduce perché ho l'informazione anticipata relativa alla presenza di un ostacolo al PL, prima che possa essere individuato dal macchinista visivamente. L'occhio remoto del sistema di monitoraggio, posizionato al passaggio a livello, rileva prima del macchinista la presenza dell'eventuale ostacolo, instaurando tempestivamente una manovra di frenata anticipata che permette di evitare la collisione con l'ostacolo.

Nel capitolo che segue si mostreranno le due tipologie di analisi utilizzate per avvalorare la tesi che il sistema di monitoraggio del tipo SIRIO LX è fondamentale per ridurre il rischio ai passaggi a livello, scongiurando tutte quelle situazioni di rischio inaccettabile grazie al preavviso tempestivo.

5 ANALISI DEL RISCHIO FERROVIARIO AI PASSAGGI A LIVELLO

5.1 Il concetto di rischio

Spesso nell'ingegneria si sente parlare del concetto di rischio in relazione alla quantificazione della sicurezza di un sistema, di un'installazione industriale, di un'attività umana ed in molteplici altre situazioni.

Secondo una definizione comune il termine rischio individua un danno o un pericolo incerto, ovvero di cui non è nota l'entità ed il tempo di accadimento. Questa definizione popolare nel campo dell'ingegneria perde di valore perché si è soliti lavorare sempre con grandezze fisiche e misurabili.

Usando la definizione economica di rischio, questo è identificabile per mezzo della distribuzione continua della probabilità di verificarsi del generico danno X , si esprime il danno per mezzo dell'integrale che segue:

1. X è la variabile danno;
2. $f(X)$ è la densità di probabilità del danno;
3. A è il valore massimo che il danno può assumere [26]

$$R = \int_0^A X \cdot f(X) \cdot dX$$

Ponendo l'attenzione al campo tecnologico, supposte note le frequenze di accadimento di un evento dannoso X e le sue conseguenze, si definisce rischio il prodotto tra la frequenza (assunta come la probabilità di avere quelle determinate conseguenze) per le stesse conseguenze.

In questa tesi si farà riferimento al rischio di tipo sociale, ovvero quella tipologia di rischio corsa da una comunità o da un gruppo di persone o dal singolo individuo, come l'incidentalità ai passaggi a livello.

In campo tecnologico il rischio può essere di tipo diffuso, legato prevalentemente alle emissioni di inquinanti con modalità e caratteristiche da provocare il nascere di effetti dannosi su una grande parte della popolazione. Il secondo tipo di rischio, quello studiato in questo lavoro di

tesi è denominato “concentrato o catastrofico”, con questa terminologia si fa riferimento ad eventi imprevisi, ma non imprevedibili, che si possono manifestare all’improvviso, avendo effetti su gruppi di individui o sul singolo.

5.1.1 Analisi di rischio scelta

Le tecniche relative all’analisi di rischio sono molteplici ed hanno un ruolo di primaria importanza in ambito progettuale, sia a livello strutturale, impiantistico e relativamente alla sicurezza delle persone.

La risk analysis viene utilizzata come strumento non solo nelle fasi di progettazione ed esercizio di un sistema, ma svolge un ruolo di primaria importanza per il processo decisionale in un progetto.

L’analisi del rischio si articola in cinque principali passi:

1. l’individuazione dei potenziali eventi pericolosi;
2. studio e valutazione delle frequenze di accadimento degli eventi;
3. valutazione delle conseguenze degli eventi accidentali;
4. individuazione dell’entità di rischio associato all’evento;
5. valutazione dell’accettabilità del rischio.

Una volta ottenuti i risultati dell’analisi di rischio, quest’ultimi devono essere studiati in modo da definire, secondo i criteri adottati a livello nazionale, il livello di accettabilità del rischio esaminato. In Italia gli standard di sicurezza sono definiti dall’Azienda autonoma.

L’approccio usato in questo lavoro di tesi per svolgere l’analisi di rischio è quella relativa alla costruzione della matrice di rischio. All’interno di quest’ultima sono posizionati gli eventi, la struttura matriciale permette una rapida visualizzazione dell’intervallo di frequenza di accadimento dell’evento e l’entità del rischio. Le frequenze di accadimento e l’entità del rischio sono suddivise per classi, ad ogni classe è associato un indice numerico, secondo la definizione nazionale riportata nelle tabelle che seguono:

F	Definizione e intervalli di probabilità/frequenza	
1	Inverosimile	Estremamente improbabile che accada. Si può assumere che la situazione pericolosa possa non verificarsi.
2	Improbabile	Improbabile che accada ma possibile. Si può assumere che la situazione pericolosa possa presentarsi eccezionalmente.
3	Remoto	Probabile che accada qualche volta nella vita del sistema. Ci si può ragionevolmente aspettare che la situazione pericolosa si presenti.
4	Occasionale	Probabile che accada parecchie volte. Ci si può aspettare che la situazione pericolosa si presenti parecchie volte.
5	Probabile	Accadrà parecchie volte. Ci si può aspettare che la situazione pericolosa si presenti spesso.
6	Frequente	Probabile che accada frequentemente. La situazione pericolosa si presenterà continuamente.

Figura 5.1 Scala di frequenza di accadimento/probabilità di un evento. [2]

D	Descrizione del danno/conseguenza	
1	Insignificante	Danno leggero al sistema.
2	Marginale	Ferimento leggero di una o più persone e/o un'importante minaccia per l'ambiente e un danno grave a uno o più sistemi.
3	Critico	Lesione grave di una persona e/o importante danno all'ambiente e/o perdita di un sistema principale.
4	Catastrofico	Morte di una o più persone, ferimento grave di più di una persona o danni ingenti all'ambiente.

Figura 5.2 Scala di classificazione di danno. [2]

Una volta definito per ogni evento la classe di frequenza o probabilità F/P e la gravità del potenziale danno D, è possibile definire tramite il prodotto tra queste due quantità l'entità del rischio relativo all'evento in esame:

$$R = P \cdot D$$

La formulazione matematica permette di comprendere come all'aumentare della probabilità di accadimento di un evento e all'aumentare della classe di danno, il rischio aumenti.

Usando la matrice fornita da RFI, dalla combinazione delle classi P e D associate all'evento in analisi, entrando all'interno della matrice è possibile definire l'entità del rischio, che numericamente è dato dall'espressione che precede ed è contenuto in un range numerico che va da 1 a 24.

La matrice oltre a presentare una classificazione numerica relativa all'intensità di rischio, è suddivisa in tre fasce diversamente colorate, relative ad una diversa intensità del rischio.

- la cella di color verde che comprende il range numerico [1-3], corrisponde ad eventi trascurabili, e che non richiedono interventi migliorativi. I sistemi e le modalità di gestione presenti durante l'analisi sono sufficienti a garantire un controllo ottimale dei rischi.
- la cella color gialla corrisponde ad eventi tollerabili, ma sono richiesti interventi migliorativi. Sono necessari in questa situazione controlli adeguati.
- la cella color rosso corrisponde ad un evento non accettabile, è necessario in questo caso attuare delle modifiche del sistema o inserire misure per l'eliminazione dei rischi.

MATRICE DI RISCHIO		Conseguenze			
		Insignificanti (1)	Marginali (2)	Critiche (3)	Catastrofiche (4)
Frequenze	Frequente (6)	6	12	18	24
	Probabile (5)	5	10	15	20
	Occasionale (4)	4	8	12	16
	Remoto (3)	3	6	9	12
	Improbabile (2)	2	4	6	8
	Inverosimile (1)	1	2	3	4

Figura 5.3 Matrice di rischio usata nella risk analysis.

Una volta terminata l'analisi ed individuato il valore numerico nella matrice di rischio, è possibile definire se la condizione di rischio in esame è del tipo trascurabile, accettabile o inaccettabile. I livelli di rischio definiti all'interno della matrice sono interpretabili grazie alla classificazione di RFI riportata nella tabella che segue:

Valore	Rischio	Tipo di intervento	Definizione di intervento
$R > 8$	Inaccettabile	Immediato	Azioni correttive indilazionabili da attuare subito.
$4 \leq R \leq 8$	Alto	Breve termine	Azioni correttive necessarie da programmare e attuare con urgenza.
$2 < R < 4$	Medio	Medio termine	Azioni correttive e/o migliorative da programmare e attuare nel medio termine.
$1 < R \leq 2$	Basso	Lungo termine	Azioni migliorative da valutare in fase di programmazione e da attuare nel lungo termine.
$R \leq 1$	Accettabile	Rischio trascurabile (Non è necessaria la definizione di interventi).	

Figura 5.4 Classificazione del livello di rischio in RFI.

La tabella mostra che avere un valore numerico superiore ad 8 nella classificazione del livello di rischio indica la presenza di una situazione ad elevatissima criticità, dove è necessario subito intervenire. Quando il rischio è inferiore ad 8 si ha la necessità di intervenire a medio o breve termine per ripristinare le condizioni ordinarie di tipo operativo, quando il rischio è inferiore a

3 è trascurabile e non si ha la necessità di procedere con interventi, perché non si hanno rischi imminenti sul sistema in analisi e sugli individui.

5.2 Analisi con albero dei guasti (Fault tree analysis-FTA)

Nello studio dei sistemi si utilizza la metodologia “Fault Tree Analysis” per la valutazione quantitativa del rischio.

L'albero dei guasti, in italiano, è un vero e proprio diagramma logico, che risponde alla semplice domanda: “Che cosa deve succedere perché si abbia un determinato guasto?”.

La tipologia di analisi svolta è quantitativa, ma è possibile anche usare questa tipologia di analisi in modo qualitativo, in questo caso si andrebbero ad evidenziare le principali cause dell'incidente, sia in presenza di errore umano che guasti legati alle apparecchiature, con l'approccio qualitativo ci si focalizza maggiormente sulle misure preventive da usare per ridurre la probabilità che si verifichi l'incidente.

In questo lavoro di tesi l'approccio usato sarà quantitativo e non qualitativo.

Si definisce il “Top Event” o “Evento Iniziatore”, la cui probabilità di accadimento deve essere molto contenuta. Si individuano gli eventi pericolosi e tramite un approccio top-down è possibile procedere all'identificazione degli eventi intermedi e di base.

La soluzione dell'albero dei guasti consiste nel determinare la frequenza di accadimento del Top Event, partendo dai dati disponibili relativi ai singoli eventi che costituiscono l'albero.

Come detto in precedenza, la realizzazione dell'albero, consiste nel costruire uno schema logico, per poterlo realizzare è necessario avere dunque sia delle porte di natura logica e sia gli eventi da rappresentare in base alla loro tipologia. Il prodotto finale degli elementi citati in precedenza realizza la così detta catena degli eventi.

Le porte logiche usate non sono altro che i connettori della logica più comunemente noti come:

1. porta AND: questa porta corrisponde all'operazione della logica di intersezione tra insiemi, significa che l'evento in output si verificherà solo quando si verificheranno tutti gli eventi input che lo riguardano. L'operazione matematica associata è, come per l'intersezione di insiemi, la moltiplicazione dei valori di input. La simbologia grafica convenzionale è: 
2. porta OR: questa porta corrisponde all'operazione logica di unione tra insieme, significa che l'evento in output si verifica al verificarsi di almeno uno degli eventi in input. L'operazione matematica associata, come nel caso di unioni di insiemi nella logica, è di somma tra i valori relativi ai diversi input. La simbologia grafica convenzionale usata è: 

Gli eventi nell'analisi FTA vengono classificati in:

1. evento BASE: è un evento di tipo elementare non scomponibile in sotto eventi;
2. evento INTERMEDIO: è l'evento successivo a quello base, può essere di due tipologie, migliorativo, se determina un miglioramento degli eventi accidentali o propagativo, ovvero determina la nascita di successivi eventi dannosi;
3. TOP EVENT: è l'evento che si vuole analizzare, rappresenta una condizione di anomalità rispetto alle normali condizioni operative e di esercizio previste.

Esiste un'ultima classificazione, quella relativa alla classificazione tecnica della tipologia di guasto:

1. guasto primario: si verificano in contesti operativi di tipo normale e non sono imputabili a cause esterne ad esempio un'auto in transito al PL accidentalmente ha un'avaria e resta nella zona di intersezione ed incastrata entro le barriere;
2. guasto secondario: si verificano in contesti operativi di tipo anomalo e dipendono da particolari condizioni esterne ad esempio il malfunzionamento del passaggio a livello a causa di tallonamento da parte degli utenti;
3. guasto di comando: si verificano quando il sistema opera in modo normale, ma gli spazi e le tempistiche sono errate.

Riassumendo le fasi operative da compiere per realizzare la FTA sono:

1. individuare il Top Event, rispondendo alle domande “che cosa”, “dove” e “quando” si presenta;
2. individuare tutti i possibili eventi e fenomeni intermedi in modo tale da procedere alla costruzione dell’albero dei guasti. Si identificano gli eventi base, ovvero le cause primarie. La costruzione viene realizzata tramite collegamenti di natura logica, utilizzando le porte AND e OR;
3. risoluzione analitica dell’albero dei guasti una volta terminata la sua costruzione. La risoluzione comporta la valutazione della frequenza di accadimento del Top Event grazie ad operazioni di moltiplicazione e somma derivanti dal tipo di connettore logico utilizzato.

I dati utilizzati nell’analisi derivano da banche dati, analisi di tipo storiche e agenzie di statistica ufficiali. La reperibilità del dato è un passo fondamentale e non semplice.

5.3 Analisi con albero degli eventi (Event Tree Analysis- ETA)

L’analisi condotta con l’albero degli eventi è, al contrario del metodo FTA, di tipo induttivo. Il processo logico ha inizio dal così detto evento iniziatore, che deve essersi verificato, a partire da quest’ultimo si studiano tutte le possibili diramazioni, a seconda che i vari sistemi di protezione presenti intervengano o meno. La struttura anche in questo caso è di tipo logico ed è in grado di descrivere, per mezzo di una rappresentazione diagrammatica, tutti i potenziali scenari incidentali in cui l’evento iniziatore può evolvere.

L’albero degli eventi permette di realizzare dei percorsi seguendo le diramazioni di cui consta, i percorsi sono tra di loro mutuamente esclusivi, e sono causati dalla contemporanea manifestazione di eventi che appartengono allo stesso ramo dell’albero. Ogni evento è caratterizzato da una probabilità che si verifichi. Il punto di partenza dell’analisi è il Top Event analizzato con la FTA, successivamente si ricercano tutte le conseguenze in termini di impatto nei confronti del sistema analizzato. Questo strumento fa parte della metodologia nota più comunemente con il nome di analisi cause-conseguenze.

La probabilità che si verifichi un percorso è data dal prodotto delle probabilità dei nodi dell'albero, questo significa che si parla di probabilità condizionata, ovvero i valori diversi di probabilità sono valutati a partire dalle probabilità di ogni nodo dell'albero moltiplicate tra di loro sul ramo in analisi.

L'obiettivo di questa analisi è quella di identificare le possibili sequenze degli eventi conseguenti l'evento iniziatore, che si traducono nel realizzarsi di un incidente.

Esistono due principali campi di applicazione:

1. nel progetto: l'analisi con albero degli eventi viene usata per identificare dei potenziali scenari di natura incidentale, che derivano dagli eventi iniziatori. Si verifica in questo modo l'adeguatezza dei sistemi di sicurezza;
2. nell'esercizio: l'analisi con albero degli eventi viene usata per valutare il rischio che deriva dall'esercizio di un sistema, in questa tesi dell'idoneo funzionamento del passaggio a livello, con il fine di valutare l'adeguatezza dei sistemi di sicurezza, prima dell'introduzione del sistema PAI-PL con monitoraggio del tipo SIRIO LX e dopo l'introduzione del sistema.

Si identificano per ogni albero le sequenze di eventi che potenzialmente sono in grado di generare degli scenari incidentali. La tipologia di risultati attesa non è solo qualitativa, ma soprattutto quantitativa, perché si ha la possibilità di valutare numericamente la probabilità di determinati scenari incidentali. [26]

5.4 Risultati attesi

Grazie all'analisi con albero dei guasti è possibile identificare quanto ciascun fattore influenzi la frequenza di accadimento del Top Event, ed è possibile localizzare la situazione di criticità maggiore.

A partire dall'albero degli eventi invece, è possibile osservare tutte le potenziali situazioni che possono seguire il manifestarsi di un evento iniziatore e la frequenza di accadimento dei potenziali scenari di danno, con il loro grado di rischio, che possono aver luogo percorrendo i diversi rami del diagramma logico degli eventi.

Nel caso studio dei passaggi a livello nazionali, si manifestano, anche in presenza del sistema di monitoraggio SIRIO LX (vedi risultati di analisi nei paragrafi successivi), delle situazioni di rischio classificate come rischio medio-alto. È buon auspicio pensare che questi eventi non si verifichino proprio (bassissime frequenze di accadimento) durante tutta la fase di monitoraggio del passaggio a livello oppure è auspicabile che le conseguenze siano molto contenute. Si sottolinea la necessità di non minimizzare queste situazioni residue di rischio medio-alto, se presenti, perché è sempre necessario evitare problemi di natura tecnica, che possano causare eventi catastrofici da scongiurare.

La tipologia utilizzata in questo lavoro di tesi è denominata “a priori”, ovvero si tratta di una metodologia predittiva che si basa su eventi accaduti in precedenza ed in un dato arco temporale, i dati sono prelevati a partire da banche dati certificati (ANSF Report annuali) o documentazione tecnica dei sistemi impiegati.

Dunque, si ha a che fare con situazioni ipotetiche che si potrebbero manifestare con una certa probabilità e non con certezza assoluta. Gli strumenti utilizzati in questa tesi sono di natura statistica, disciplina i cui fattori sono legati ad aleatorietà ed incertezza.

5.5 Caso studio applicativo

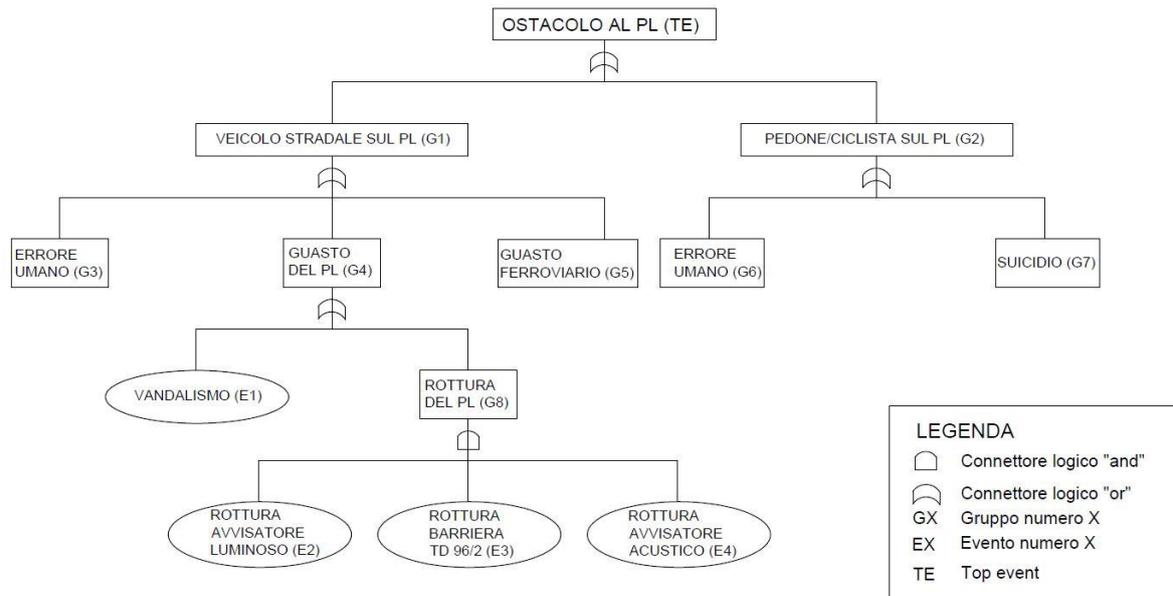
5.5.1 Costruzione dell'albero dei guasti

In questo paragrafo viene inserito l'albero dei guasti utilizzato nell'analisi di incidentalità ai passaggi a livello nazionali.

Con questa tipologia di analisi è possibile indagare le cause che determinano il Top Event, e valutare infine la frequenza di accadimento di quest'ultimo. L'analisi si svolgerà in due fasi principali:

1. costruzione dell'albero dei guasti: si definisce in prima battuta il Top Event, andando alla ricerca delle possibili cause primarie identificate come iniziatori;
2. valutazione probabilistica dell'albero dei guasti: si stima la probabilità di accadimento di un evento critico, associando ad ogni box una probabilità.

L'analisi dettagliata relativa all'indagine dei dati e conseguente valutazione delle probabilità/frequenze di accadimento da associare ai singoli box della struttura ramificata sono riportati in Appendice sezione A.



La criticità principale del caso studio relativo all'incidentalità ai passaggi al livello è data dalla presenza di un generico ostacolo lungo il tracciato ferroviario al passaggio a livello. L'evento iniziatore dell'analisi è dunque quest'ultimo che è il cosiddetto "Top Event".

Nel costruire questo specifico albero dei guasti si è deciso di scindere l'analisi in due principali sezioni: da un lato sono stati considerati gli ostacoli di tipo stradale, tra questi rientrano gli autobus, i camion e gli autoveicoli privati, dall'altro lato sono stati considerati gli ostacoli identificati come pedoni e/o ciclisti. Non è stato possibile studiare separatamente l'ostacolo pedone/ciclista a causa di una forte carenza di dati relativa alla singola tipologia di ostacolo, i dati certificati da banche dati sono forniti sempre aggregati.

Si precisa che per la valutazione delle frequenze o probabilità di accadimento dei diversi box, di cui si compone l'albero logico, sono stati usati i seguenti riferimenti:

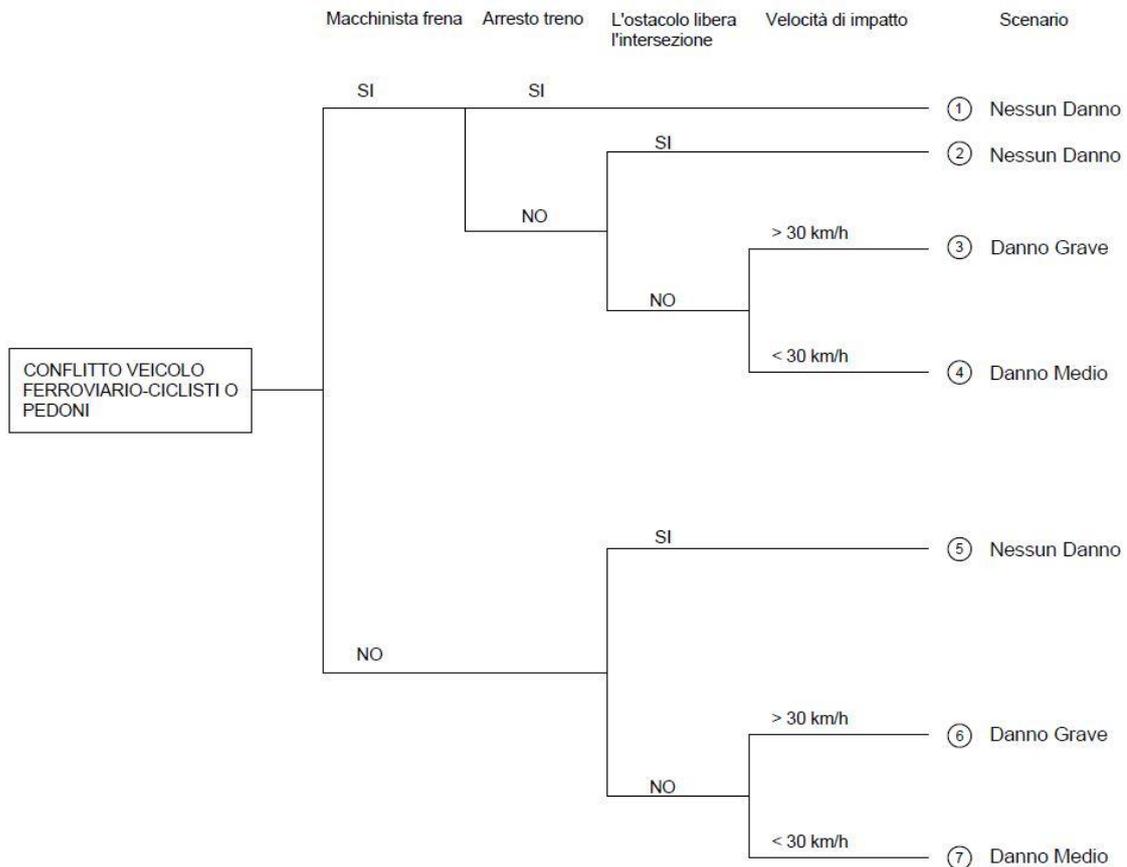
- documentazione RFI, con statistiche di tipo annuali e certificate;
- banche dati certificate come la ERAIL;
- stima dell'errore umano con metodologia HEART;
- schede tecniche dei sistemi.

5.5.2 Costruzione albero degli eventi

In questo paragrafo si riportano gli alberi degli eventi relativi a ciascun tipo di ostacolo, dividendo in due macro classi: veicoli stradali e pedoni/ciclisti. Si esplicheranno le

caratteristiche principali di ciascuna voce contenuta negli strumenti di analisi utilizzati (vedi Appendice sezione B).

• **ALBERO DEGLI EVENTI: CASO PEDONI/CICLISTI SENZA MONITORAGGIO SIRIO LX**



Come mostra l'albero degli eventi il conflitto tra un veicolo ferroviario ed un pedone/ciclista al passaggio a livello può essere dovuto a diversi fenomeni e di diversa natura.

Gli eventi che possono susseguirsi possono essere molto critici soprattutto quando il veicolo ferroviario non riesce ad arrestarsi in tempo al passaggio a livello. In assenza di frenatura è inevitabile lo scontro, ma l'entità della gravità è funzione della velocità del veicolo ferroviario, minore è la sua velocità, minori saranno le conseguenze per la salute del pedone o ciclista.

L'albero degli eventi viene creato a partire dall'albero dei guasti e si articola in diversi rami, identificati da definiti eventi critici che sono denominati "Pivotal Events", che sono posizionati in testa allo schema. Ad ogni Pivotal Event vi è una diramazione, di cui una identifica l'esito positivo dell'evento considerato, l'altro quello negativo. Ad ogni ramo positivo si associa una probabilità P , al ramo negativo si associa il suo complementare $1-P$.

Una volta nota la frequenza di accadimento dell'evento iniziatore, la si moltiplica per le probabilità di accadimento associate al percorso numerato considerato. Ogni percorso segue rami diversi. Il risultato della moltiplicazione porta alla valutazione della frequenza di accadimento dei n-esimi scenari possibili.

La logica associata è quella Booleana, ovvero, quando un ramo viene scelto vi si associa il peso 1, mentre al non scelto un valore nullo che lo esclude dal calcolo matematico. Quando si incontra una biforcazione, la probabilità che il particolare Pivotal Event a cui è associato si verifichi, è dato dalla probabilità condizionata, definito dall'evento iniziatore di tipo critico e dalla sequenza di eventi che porta al Pivotal Event:

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{P(A) + P(B) - P(A \cup B)}{P(B)}$$

Facciamo alcune considerazioni sulla “classificazione” del tipo di danno da associare ai singoli percorsi n-esimi di cui si costituisce l'albero degli eventi.

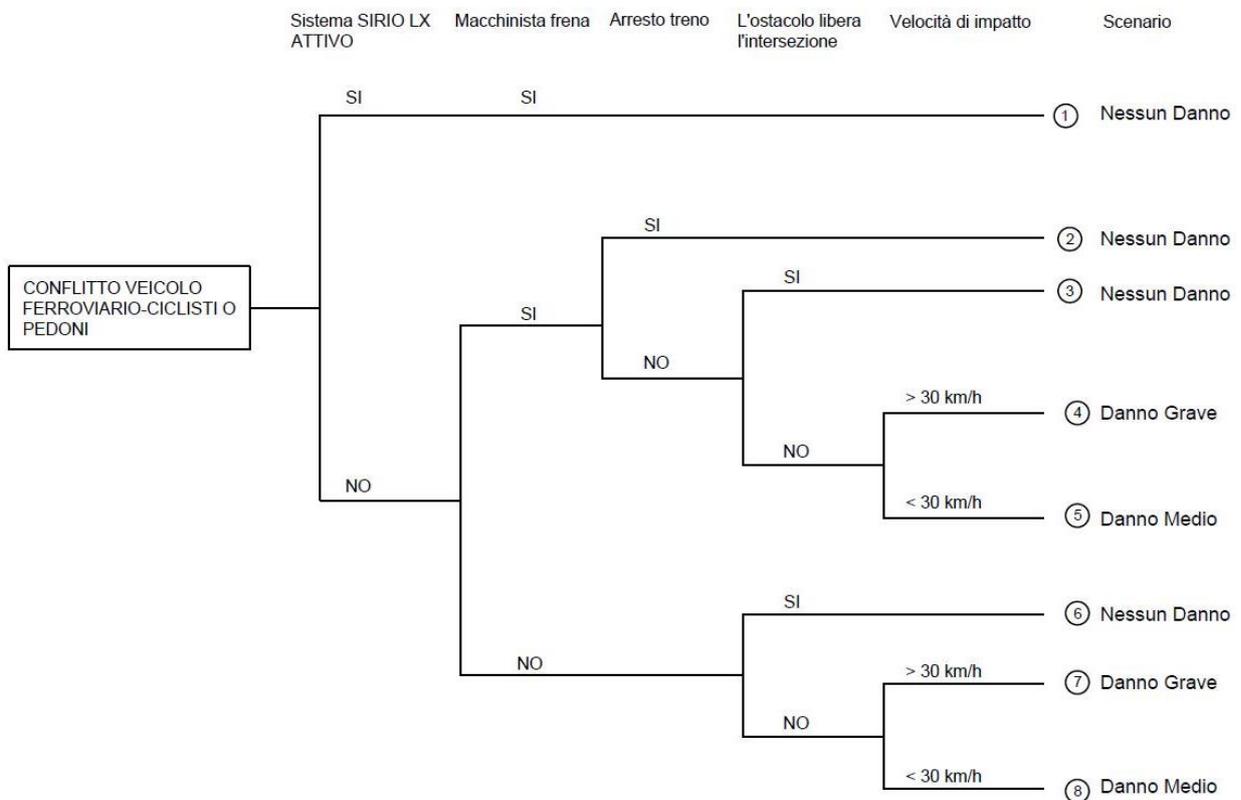
Ogni scenario descritto nella tabella che segue, se considerata insieme alle frequenze di accadimento ottenute dalla risoluzione dell'albero degli eventi, permetterà di svolgere una nuova tipologia di analisi, la quale permetterà di classificare e valutare l'entità del rischio relativo alle potenziali situazioni individuate dai n-esimi percorsi studiati.

Categorie di danno (rif. Albero degli eventi)	Descrizione entità del danno
Nessun danno	Assenza di anomalie rilevate o assenza di problematiche al sistema ferroviario o alle persone. Nessuna conseguenza da segnalare al passaggio a livello.
Danni lieve	Conseguenze quasi nulle per i passeggeri del veicolo ferroviario, possibili lesioni per gli ostacoli al passaggio a livello. (Contusioni, feriti non gravi....).
Danno medio	Conseguenze medio gravi a seconda dell'attore in gioco. I passeggeri possono riportare ferite non gravi, gli ostacoli, soprattutto se pedoni o ciclisti possono riportare ferite medio-gravi.
Danno grave	Possibile incidente al passaggio a livello con potenziale deragliamento del treno, con gravi conseguenze per i passeggeri (morti o feriti gravi), ingenti costi economici per ripristinare il sistema ferroviario, provvisoria interruzione della circolazione ferroviaria e ritardi.

Tabella 5.1 Scenari di danno per i passaggi a livello.

La tabella viene usata come riferimento per definire lo scenario di danno in tutti e quattro gli alberi degli eventi studiati.

• ALBERO DEGLI EVENTI: CASO PEDONI/CICLISTI CON MONITORAGGIO SIRIO LX

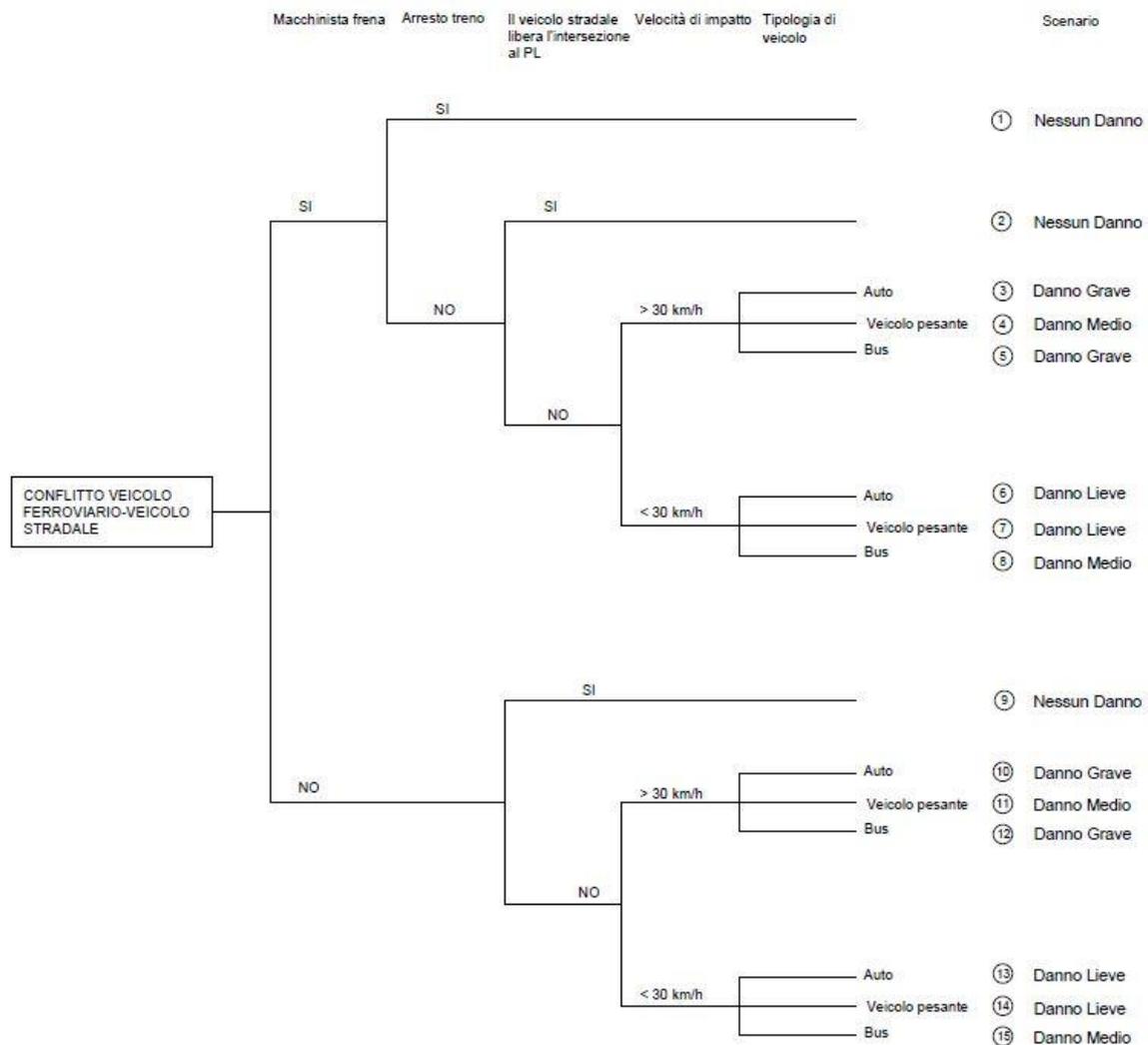


In questo caso studio la differenza principale con il caso che precede è la presenza del sistema di monitoraggio SIRIO LX che può risultare attivo o disattivo. L'attivazione del sistema di monitoraggio garantisce sempre una condizione di preavviso nei confronti del conducente, il quale viene tempestivamente avvisato da una comunicazione tramite LAN o GSM-R, che l'area monitorata a livello del passaggio a livello presenta un ostacolo. Il sistema essendo dotato di radar è in grado di segnalare anche la tipologia di ostacolo. Il macchinista una volta note tutte le informazioni relative all'ostacolo inizia a frenare a distanza maggiore rispetto a quella di visibilità, garantendo l'arresto tempestivo del treno, così da scongiurare collisioni al passaggio a livello. Nei rarissimi casi in cui non è attivo, il sistema risulta non protetto ed il ragionamento segue l'albero degli eventi privo di monitoraggio al passaggio a livello.

La risoluzione dell'albero viene effettuata come nei casi precedenti, con l'applicazione della logica di Boole. La tabella utilizzata per gli scenari di danno è la Tabella 5.1.

Per la risoluzione dell'albero vedere Appendice Sezione B.

• ALBERO DEGLI EVENTI: CASO VEICOLI STRADALI SENZA MONITORAGGIO SIRIO LX



Nel caso in cui l'ostacolo al passaggio a livello è di tipo stradale si considerano il verificarsi di alcuni eventi che incidono in modo diverso sulla gravità degli scenari analizzati:

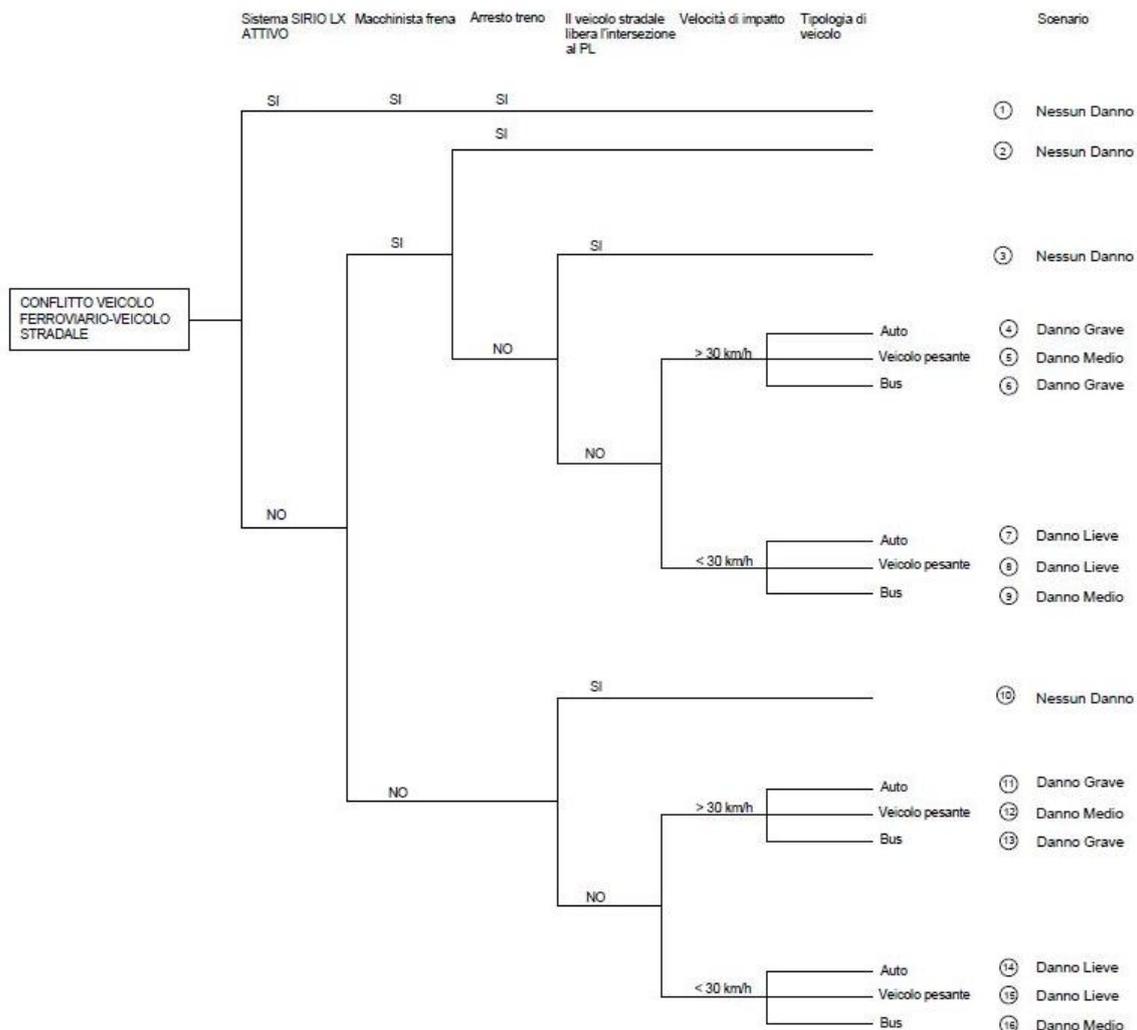
- l'eventuale azione di frenatura che deve essere realizzata dal macchinista del veicolo ferroviario;
- l'eventuale arresto del treno prima o in corrispondenza del passaggio a livello;
- l'eventuale liberazione da parte dell'ostacolo della porzione di passaggio a livello occupata, prima che il treno arrivi al PL;
- la velocità di impatto del treno con l'ostacolo considerato statico lungo il tracciato;
- nel caso stradale, si esegue una distinzione in base alla categoria di veicolo coinvolto nel potenziale scontro. Un veicolo stradale privato ha dimensioni e massa molto

contenute e può portare al massimo cinque individui, diventando così un sistema potenzialmente a rischio. Nel caso di autobus, nonostante le dimensioni importanti e la massa del veicolo, il numero di potenziali vittime o feriti gravi sale da un minimo di 17 ad un massimo di 60 escluso il conducente del veicolo.

La risoluzione dell'albero viene effettuata come nei casi precedenti, con l'applicazione della logica di Boole. La tabella utilizzata per gli scenari di danno è la Tabella 5.1.

Per la risoluzione dell'albero vedere Appendice Sezione B.

• ALBERO DEGLI EVENTI: CASO VEICOLI STRADALI CON MONITORAGGIO SIRIO LX



Come nel caso di analisi relativo all'albero degli eventi con ostacolo del tipo pedone/ciclista, si ha in questo caso la presenza del sistema di monitoraggio SIRIO LX. Valgono le stesse considerazioni fatte nel caso pedone/ciclista.

I ragionamenti in caso di raro malfunzionamento del sistema di monitoraggio seguono la logica spiegata nel caso dell'albero privo di monitoraggio.

La risoluzione dell'albero viene effettuata come nei casi precedenti, con l'applicazione della logica di Boole. La tabella utilizzata per gli scenari di danno è la Tabella 5.1.

Per la risoluzione dell'albero vedere Appendice Sezione B.

5.5.3 Analisi con matrice di rischio e confronto

In questo paragrafo l'analisi prosegue con l'obiettivo di classificare l'entità del rischio per mezzo della matrice di rischio riportata nel paragrafo 5.1.1. La matrice, grazie alle scale di probabilità e di danno, permette di individuare per ogni n-esimo scenario individuato nei diversi alberi degli eventi, l'entità del rischio. L'identificazione dell'entità del rischio permette di comprendere gli scenari più critici, prima dell'introduzione del sistema di monitoraggio e successivamente alla sua introduzione, con l'obiettivo di riscontrare un consistente miglioramento dell'entità del rischio al passaggio a livello.

Risolti i quattro alberi degli eventi (vedi sezione C dell'appendice), si procede alla definizione dell'entità del rischio, mettendo in relazione i valori di frequenza dei singoli n-esimi percorsi di ogni albero degli eventi studiato con la magnitudo del danno, utilizzando la matrice di rischio.

La risoluzione degli alberi degli eventi ha fornito per ogni n-esimo percorso la frequenza di accadimento del percorso scelto in fase di analisi. Si sono considerati gli intervalli riportati nella tabella che segue per definire, secondo gli intervalli considerati nella matrice di rischio, le classi di frequenza.

La tabella 5.2 è stata realizzata considerando il numero totale di passaggi a livello in Italia, 5637 e cinque intervalli temporali, ognuno dei quali definisce una tipologia di frequenza:

Frequenze	Tipologia di frequenza	Tempo di ritorno
$< 10^{-7}$	Inverosimili	200 anni
10^{-7} - 10^{-6}	Improbabile	20 anni
10^{-6} - 10^{-5}	Remoto	2 anni
10^{-5} - 10^{-4}	Occasionale	1 anno
10^{-4} - 10^{-3}	Probabile	1 mese
$> 10^{-3}$	Frequente	< 1 mese

Tabella 5.2 Classificazione delle frequenze.

In contemporanea si associano agli scenari di danno (vedi tabella 5.1) le quattro classi della scala di riferimento riportate in figura 5.2.

Conseguenze RFI	Conseguenze albero degli eventi
Insignificante	Nessun Danno
Marginale	Danno Lieve
Critiche	Danno Medio
Catastrofiche	Danno Grave

Tabella 5.3 Classificazione del danno secondo matrice RFI.

Utilizzando le tabelle 5.2 e 5.3 si ottengono gli indici di frequenza e di danno che permettono di entrare nella matrice di rischio di RFI e sfruttando la definizione di rischio, moltiplicando i valori ottenuti dalla matrice, si individua una cella all'interno della matrice. In base alla posizione della cella si definisce un colore, quest'ultimo come riportato nella figura 5.4 classifica il rischio in trascurabile se di color verde, accettabile se di color giallo e non tollerabile se di color rosso.

L'analisi viene svolta sia per gli alberi degli eventi privi di sistema di monitoraggio, sia con sistema di monitoraggio. L'obiettivo dell'analisi è, oltre a classificare per ogni n-esimo percorso il rischio attribuito, comprendere se con l'introduzione del sistema di monitoraggio SIRIO LX al passaggio a livello si ha un abbassamento del rischio.

5.5.3.1 ANALISI CON MATRICE DI RISCHIO: PEDONI/CICLISTI SENZA MONITORAGGIO

Di seguito si riporta in forma tabellare l'analisi svolta con la matrice di rischio per il primo caso di analisi, quello dell'albero degli eventi con ostacolo del tipo pedone/ciclista e in assenza di sistema di monitoraggio al passaggio a livello SIRIO LX:

Numero Percorso	Frequenza scenario	Tipo di frequenza	Riferimento frequenza matrice	Categoria di danno	Riferimento danno matrice	Valore matrice di rischio	Entità del rischio
1	4,65E-02	Frequente	6	Insignificante	1	6	Medio
2	3,21E-03	Frequente	6	Insignificante	1	6	Medio
3	2,84E-05	Occasionale	4	Catastrofico	4	16	Inaccettabile
4	3,72E-04	Probabile	5	Critico	3	15	Inaccettabile
5	7,98E-04	Probabile	5	Insignificante	1	5	Medio
6	9,93E-05	Occasionale	4	Catastrofico	4	16	Inaccettabile
7	3,29E-07	Improbabile	2	Critico	3	6	Medio

Si riporta di seguito la modalità relativa all'identificazione degli indici. Lo studio verrà proposto solo per la prima riga. La modalità è la stessa per tutte le analisi condotte con matrice di rischio.

MATRICE DI RISCHIO		Conseguenze			
		Insignificanti (1)	Marginali (2)	Critiche (3)	Catastrofiche (4)
Frequenze	Frequente (6)	6	12	18	24
	Probabile (5)	5	10	15	20
	Occasionale (4)	4	8	12	16
	Remoto (3)	3	6	9	12
	Improbabile (2)	2	4	6	8
	Inverosimile (1)	1	2	3	4

5.5.3.2 ANALISI CON MATRICE DI RISCHIO: PEDONI/CICLISTI CON MONITORAGGIO

Numero Percorso	Frequenza scenario	Tipo di frequenza	Riferimento frequenza matrice	Categoria di danno	Riferimento danno matrice	Valore matrice di rischio	Entità del rischio
1	5,10E-02	Frequente	6	Insignificante	1	6	Medio
2	4,15E-06	Remoto	3	Insignificante	1	3	Basso
3	2,86E-07	Improbabile	2	Insignificante	1	2	Basso
4	2,51E-09	Inverosimile	1	Catastrofico	4	4	Medio-Basso
5	3,29E-08	Inverosimile	1	Critico	3	3	Basso
6	3,50E-10	Inverosimile	1	Insignificante	1	1	Inesistente
7	4,35E-11	Inverosimile	1	Catastrofico	4	4	Medio-Basso
8	1,44E-13	Inverosimile	1	Critico	3	3	Basso

L'analisi viene svolta con la stessa modalità del punto 5.5.3.1.

Una volta ottenuti i risultati delle due analisi nel caso di ostacolo del tipo pedone/ciclista, si nota che la presenza del sistema di monitoraggio ha notevolmente migliorato i risultati. Si riporta per semplicità il confronto tra i due risultati, concentrando l'attenzione nel caso studio con presenza di monitoraggio ai percorsi dal n° 2 al n°8, che sono i corrispettivi del caso di analisi in assenza di monitoraggio dal primo al settimo itinerario.

Numero Percorso NO SIRIO LX	Valore matrice di rischio NO SIRIO LX	Entità del rischio NO SIRIO LX	Numero Percorso SIRIO LX	Valore matrice di rischio SIRIO LX	Entità del rischio SIRIO LX
1	6	Medio	2	3	Basso
2	6	Medio	3	2	Basso
3	16	Inaccettabile	4	4	Medio-Basso
4	15	Inaccettabile	5	3	Basso
5	5	Medio	6	1	Inesistente
6	16	Inaccettabile	7	4	Medio-Basso
7	6	Medio	8	3	Basso

Il confronto mostra chiaramente un abbattimento del livello del rischio al passaggio a livello. Il miglioramento è percepibile nel 72% dei casi esaminati, fatta eccezione per una percentuale contenuta di situazioni in cui l'entità del rischio è diminuita, ma non è classificabile come accettabile (color verde).

Le due situazioni che mostrano un miglioramento non sufficiente ad essere classificate come “accettabili”, sono dovute a situazioni in cui il pedone o ciclista volontariamente decide di non liberare l’area che prevede il passaggio del treno. Allo stesso tempo il sistema di monitoraggio ha smesso di funzionare e il macchinista percepisce l’ostacolo solo alla distanza di visibilità, e questo non gli permette di arrestare il veicolo prima che intercetti il passaggio a livello e in aggiunta la velocità di condotta del veicolo è superiore ai 30 km/h.

Purtroppo, quando la volontà dell’utente è quella di occupare il sedime ferroviario al passaggio a livello, solo nel caso in cui il sistema sia sempre attivo e l’utente arrivi con sufficiente anticipo al passaggio a livello è possibile scongiurare la morte del pedone o ciclista. Purtroppo, il limite del sistema di monitoraggio si registra soprattutto in queste circostanze, e il suicidio preventivato non riesce ad essere scongiurato quando l’occupazione dell’area monitorata avviene pochi istanti prima del passaggio del treno.

In tutti gli altri casi di analisi è sempre possibile percepire una riduzione del livello del rischio consistente ed il sistema di monitoraggio permette di avere un rischio molto contenuto (color verde).

5.5.3.3 ANALISI CON MATRICE DI RISCHIO: VEICOLI STRADALI SENZA MONITORAGGIO

L’analisi viene svolta con la stessa modalità del punto 5.5.3.1, ma in questo caso l’ostacolo al passaggio a livello è di tipo stradale. La prima analisi è svolta in assenza di sistema di monitoraggio e mostra che il rischio è elevato, e nel 54% dei casi l’entità del rischio è talmente alta da essere classificata come inaccettabile. La mortalità è molto più alta nel caso di veicoli stradali, poiché spesso il tasso di occupazione di auto e autobus è superiore al singolo individuo al singolo passaggio a livello. Le situazioni che presentano un rischio medio-alto sono il 40% dell’analisi svolta e sono rappresentate per mezzo del colore giallo, che identifica la zona di transizione a seconda che il preavviso del macchinista avvenga o meno tempestivamente. La percentuale, al passaggio a livello, di rischio inaccettabile nel caso pedoni/ciclisti ed in assenza di monitoraggio è del 43%, minore del caso stradale.

Numero Percorso	Frequenza scenario	Tipo di frequenza	Riferimento frequenza matrice	Categoria di danno	Riferimento danno matrice	Valore matrice di rischio	Entità del rischio
1	4,94E-01	Frequente	6	Insignificante	1	6	Medio
2	3,15E-03	Frequente	6	Insignificante	1	6	Medio
3	1,26E-03	Frequente	6	Catastrofico	4	24	Inaccettabile
4	1,34E-04	Probabile	5	Critico	3	15	Inaccettabile
5	3,31E-06	Remoto	3	Catastrofico	4	12	Inaccettabile
6	2,01E-02	Frequente	6	Marginale	2	12	Inaccettabile
7	2,13E-03	Occasionale	4	Marginale	2	8	Medio-Alto
8	5,27E-05	Occasionale	4	Critico	3	12	Inaccettabile
9	9,42E-04	Probabile	5	Insignificante	1	5	Medio
10	6,37E-03	Frequente	6	Catastrofico	4	24	Inaccettabile
11	6,75E-04	Probabile	5	Critico	3	15	Inaccettabile
12	1,67E-05	Occasionale	4	Catastrofico	4	16	Inaccettabile
13	2,11E-05	Occasionale	4	Marginale	2	8	Medio-Alto
14	2,23E-06	Remoto	3	Marginale	2	6	Medio
15	5,52E-08	Inverosimile	1	Critico	3	3	Basso

5.5.3.4 ANALISI CON MATRICE DI RISCHIO: VEICOLI STRADALI CON MONITORAGGIO

Numero Percorso	Frequenza scenario	Tipo di frequenza	Riferimento frequenza matrice	Categoria di danno	Riferimento danno matrice	Valore matrice di rischio	Entità del rischio
1	5,35E-01	Frequente	6	Insignificante	1	6	Medio
2	4,41E-05	Occasionale	4	Insignificante	1	4	Medio-Basso
3	2,81E-07	Improbabile	2	Insignificante	1	2	Basso
4	1,13E-07	Improbabile	2	Catastrofico	4	8	Medio-Alto
5	1,19E-08	Inverosimile	1	Critico	3	3	Basso
6	2,95E-10	Inverosimile	1	Catastrofico	4	4	Medio-Basso
7	1,80E-06	Remoto	3	Marginale	2	6	Medio
8	1,90E-07	Improbabile	2	Marginale	2	4	Medio-Basso
9	4,70E-09	Inverosimile	1	Critico	3	3	Basso
10	4,12E-10	Inverosimile	1	Insignificante	1	1	Inesistente
11	2,79E-09	Inverosimile	1	Catastrofico	4	4	Medio-Basso
12	2,96E-10	Inverosimile	1	Critico	3	3	Basso
13	7,30E-12	Inverosimile	1	Catastrofico	4	4	Medio-Basso
14	9,24E-12	Inverosimile	1	Marginale	2	2	Basso
15	9,79E-13	Inverosimile	1	Marginale	2	2	Basso
16	2,42E-14	Inverosimile	1	Critico	3	3	Basso

Svolte entrambe le analisi per semplicità si riporta il confronto di tipo tabellare tra i due risultati ottenuti. È subito evidente che l'introduzione del sistema di monitoraggio ha notevolmente migliorato la situazione al passaggio a livello quando l'ostacolo è un veicolo di tipo stradale.

Non sono presenti tra i risultati ottenuti situazioni di rischio del tipo "inaccettabile" quando si ha il passaggio a livello monitorato dal sistema SIRIO LX.

Il miglioramento è stato importante perché ora nel 54% dei casi studiati il rischio è molto contenuto, e dunque non si ha presenza di feriti gravi, ma solo di qualche contusione o danni economici di tipo non rilevante.

Il restante 46% è classificato come rischio medio, con presenza di situazioni al limite della soglia di accettabilità per più della metà dei casi di rischio medio. Nelle situazioni di rischio medio si ha la possibilità di rilevare la presenza di feriti, ma gli incidenti non sono mai mortali.

Con le campagne di sensibilizzazione, presenza di semafori al PL ed altre azioni di semplice applicazione è possibile portare questa percentuale nel rischio basso, per un totale del 100% di situazioni di rischio basso e dunque assenza di morti, feriti gravi e danni ingenti all'infrastruttura.

È interessante mostrare il confronto tra le due tabelle, si considerano tutti i casi studio dall'itinerario 1 al n°15 della prima analisi, mentre della seconda si studiano tutti i casi dal n°2 al n°16:

Numero Percorso NO SIRIO LX	Valore matrice di rischio NO SIRIO LX	Entità del rischio NO SIRIO LX	Numero Percorso SIRIO LX	Valore matrice di rischio SIRIO LX	Entità del rischio SIRIO LX
1	6	Medio	2	4	Medio-Basso
2	6	Medio	3	2	Basso
3	24	Inaccettabile	4	8	Medio-Alto
4	15	Inaccettabile	5	3	Basso
5	12	Inaccettabile	6	4	Medio-Basso
6	12	Inaccettabile	7	6	Medio
7	8	Medio-Alto	8	4	Medio-Basso
8	12	Inaccettabile	9	3	Basso
9	5	Medio	10	1	Inesistente
10	24	Inaccettabile	11	4	Medio-Basso
11	15	Inaccettabile	12	3	Basso
12	16	Inaccettabile	13	4	Medio-Basso
13	8	Medio-Alto	14	2	Basso
14	6	Medio	15	2	Basso
15	3	Basso	16	3	Basso

Il rischio continua ad essere alto nella situazione [3-4] in cui il veicolo può restare incastrato nelle barriere e non può più uscirvi perché confinato entro le barriere chiuse o a causa di dissesti della pavimentazione, per il quale non è possibile effettuare manovre che permettano di liberare l'intersezione in tempi brevi. In aggiunta, a causa di problemi legati al non rilevamento dell'ostacolo il veicolo ferroviario non riduce in modo consistente la sua velocità, che risulta essere sempre superiore ai 30 km/h, motivo per cui il veicolo stradale, in questo caso l'automobile incastrata al passaggio a livello, riporta in queste situazioni conseguenze gravi come la presenza di possibili feriti gravi, ma anche da un punto di vista economico e problematiche all'intera rete ferroviaria, soprattutto legate alla circolazione dei treni.

Anche in questo caso studio le situazioni classificate con rischio medio sono molto vicine al confine del rischio classificato basso, come detto in precedenza, agendo tramite campagne di sensibilizzazione, aumentando le sanzioni per chi infrange il Codice della Strada (art.147) e predisponendo sistemi di semaforizzazione al PL, tutte queste situazioni migliorerebbero e il

rischio apparterebbe alla classe bassa (color verde). Queste sono tutte soluzioni che integrano il monitoraggio in tempo reale.

Le classi di rischio medio-alto che permangono non rappresentano motivo di allarme perché sono eventi che hanno una frequenza di accadimento medio dell'ordine di 10^{-7} . Nonostante siano eventi rari la prevenzione con le disposizioni prima suggerite può aiutare a mitigare i danni e a contenerli.

5.6 Analisi di rischio con integrazione tabellare

In questa sezione della tesi viene svolta l'analisi di rischio al passaggio a livello considerando il veicolo ferroviario ETR 460 a cassa pendolante, dotato di nove carrozze. La velocità massima raggiungibile dal veicolo è di 250 km/h ed il treno è dotato della seguente disposizione di ruote 2(1A-A1), 2(4R), 2(1A-A1), 4R, 2(1A-A1), la simbologia A sta per motore e R sta per rimorchiato. La disposizione precedente significa che ci sono 12 ruote motrici e 24 non motrici.



Figura 5.5 Treno ETR 460. [u]

Un veicolo ferroviario in movimento seguirà una serie successiva di stati, i quali sono descritti per mezzo del secondo principio della dinamica. La forza accelerante che governa il moto del veicolo viene espressa dalla formulazione che segue:

$$F_a = F_t - R = m_e \cdot \frac{dv}{dt}$$

- la forza F_a è denominata forza accelerante;
- la forza F_t è la forza di trazione generata dal motore, è fornita dalla caratteristica meccanica del veicolo ferroviario in analisi;
- le resistenze al moto sono sintetizzate con il simbolo R ;
- la massa equivalente m_e , ha in sé l'effetto inerziale delle masse rotanti di cui si compone il veicolo ferroviario. Analiticamente si esprime come il prodotto tra la massa del veicolo ed il fattore di massa equivalente β .

La resistenza totale al moto è data dalla somma di più parametri, quest'ultimi possono essere raggruppati in due principali famiglie:

- resistenze in rettilineo ed in piano (ordinarie);
- resistenze accidentali.

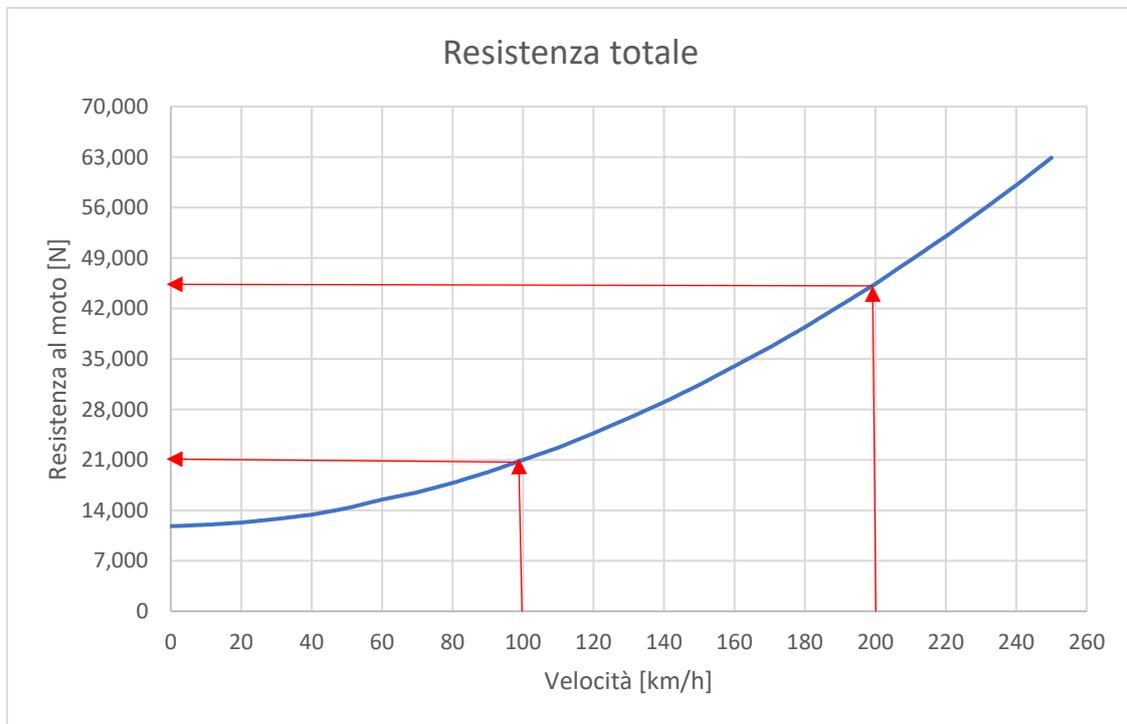
Le resistenze ordinarie sono sempre presenti, al contrario di quelle accidentali che sono funzione delle particolari condizioni di marcia del veicolo ferroviario.

In questa tesi le resistenze accidentali vengono trascurate, le ipotesi utilizzate per il moto sono assenza di livelletta $i = 0\%$ (tracciato pianeggiante), tracciato rettilineo (raggio della curva $R = \infty$) e assenza di gallerie lungo il tracciato, ipotesi che descrivono le migliori condizioni per il moto.

Ai fini dell'analisi si considerano solo le resistenze di tipo ordinario: le resistenze al rotolamento ed aerodinamiche.

Le formulazioni analitiche si riportano in Appendice sezione D.

La resistenza totale, coincidente nel caso in esame con le resistenze ordinarie, viene valutata a partire dal diagramma R-V del treno in esame, relativo al caso di tracciato pianeggiante, se il tracciato non fosse stato pianeggiante la curva non sarebbe stata la stessa, ma sarebbe stata progettata in funzione della livelletta i ‰, traslando a seconda del suo segno.



La valutazione di R_{tot} [N] viene effettuata per ogni velocità V_i [km/h] entrando nel grafico precedente e valutando il corrispondente valore di resistenza associato in [N]. Si consideri ad esempio la velocità V_{100} pari a 100 km/h, il valore di resistenza totale al moto R_{tot} [N] valutato a partire dal grafico “Resistenza totale” è di 21'000 N (21kN).

Il valore della forza F_t generata dal motore viene valutata considerando che agli assi motori è associata una forza frenante F_m di 18 kN per ciascun asse, mentre agli assi non motori è associata una forza F_p di 20,7 kN per ciascun asse.

$$F_t = 12 \cdot F_m \cdot 24 \cdot F_p = 712,8 \text{ kN}$$

I dati utilizzati per realizzare l'integrazione tabellare sono sintetizzati nella tabella che segue:

TRENO ETR 460 PENDOLINO			
DATI	VALORI	UNITÀ DI MISURA	SIMBOLOGIA
Massa del veicolo ferroviario	483600	[kg]	m
Fattore di massa equivalente	1,05	[-]	β
Numero assi motorizzati	12	[-]	-
Numero assi non motorizzati	24	[-]	-
Pendenza longitudinale	0,0	[‰]	i
Forza di frenatura assi motorizzati	18'000	[N]	$F_{F,m}$
Forza di frenatura assi non motorizzati	20'700	[N]	$F_{F,p}$
Resistenza di livelletta	-	[N]	R_{LIV}
Resistenza in curva	-	[N]	R_{curva}
Raggio della curva	∞	[m]	R_c
Massa equivalente	507'780	[kg]	m_E
Tempo di reazione	3,0	[s]	t_m

L'analisi tabellare viene condotta considerando un passo di 1 km/h in termini di velocità, con l'obiettivo di valutare per ogni velocità nel range [0-250] km/h lo spazio di arresto necessario in condizioni di emergenza.

L'analisi tabellare viene riportata dettagliatamente in Appendice sezione D.

La valutazione dello spazio di arresto del convoglio ferroviario quando non lavora in condizioni di emergenza, ma nelle normali condizioni di esercizio è stata effettuata considerando la "Formula UIC":

$$s_{a_{esercizio}} = \frac{v^2}{\frac{1,09375 \cdot \lambda}{\phi(V)} + \frac{0,127}{\phi(V)} \pm 0,253 \cdot i}$$

I parametri dimensionalmente devono essere inseriti come descritto di seguito:

- $S_{a_esercizio}$ in metri;
- la velocità V in km/h (da 250 km/h a 0 km/h);
- il peso frenato λ frazionato (0,90 nel caso studio in esame);
- la livelletta i in ‰ (0‰ nel caso studio in esame).

La valutazione del parametro $\Phi(V)$ è stata realizzata considerando i valori tabellati forniti dalla UIC.

V [km/h]	70	80	90	100	110	120	130	140	160
$\Phi(V)$	0,0611	0,0628	0,0636	0,0648	0,0667	0,0696	0,0721	0,0731	0,0755

I valori tabellati hanno però un range di validità limitato nell'intervallo [70-160] km/h, si è dunque realizzata un'interpolazione lineare con l'obiettivo di valutare per ogni velocità indagata da [0-250] km/h il valore $\Phi(V_i)$ corrispondente.

Anche per questa analisi si rimanda alla sezione D dell'Appendice.

5.6.1 Risultati dell'analisi in assenza di monitoraggio

Grazie alle due tipologie di analisi descritte in precedenza, l'applicazione tabellare e l'applicazione analitica della formula empirica UIC, è stato possibile valutare per ogni velocità iniziale del convoglio ferroviario V_i [km/h] lo spazio d'arresto necessario sia nelle condizioni in cui è necessaria la frenatura di emergenza, sia nei casi di esercizio in condizioni ordinarie.

I valori così ottenuti sono stati utilizzati con lo scopo di costruire due differenti curve, che descrivessero l'andamento dello spazio di arresto del veicolo ferroviario in funzione della velocità dello stesso durante la corsa. Le due curve sono rispettivamente relative all'andamento dello spazio di arresto in condizioni di emergenza e di esercizio.

Oltre alle due curve sono stati inseriti nel grafico delle rette di tipo verticali. Queste rette corrispondono alle distanze di visibilità di cui il macchinista necessita per individuare chiaramente la tipologia di ostacolo lungo il tracciato.

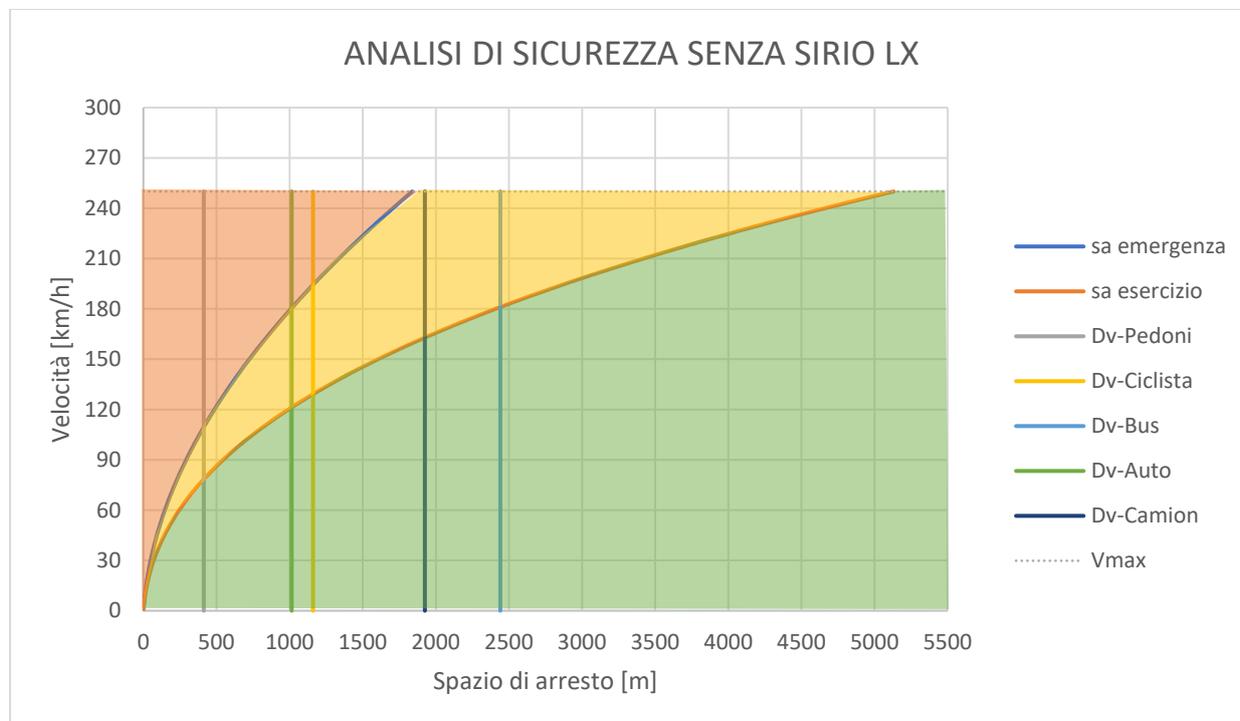
Gli ostacoli, così come definiti nel tipo di analisi precedente, constano di cinque categorie:

1. pedone;
2. ciclista;
3. autobus;
4. autoveicolo privato;
5. camion.

Le distanze di visibilità del macchinista relative al singolo ostacolo sono state svolte come nel caso studio con matrici di rischio, usando la formulazione di Snellen, si riportano in una tabella i risultati ottenuti e relativi alla singola tipologia di ostacolo:

Visibilità singoli ostacoli					
Dati	PEDONE	CICLISTA	BUS	AUTO	CAMION
H [m]	1,687	1,687	3,55	1,475	2,8
L [m]	0,6	2	12,2	4,507	10,8
AV	1	1	1	1	1
D _v [m]	413	1160	2441	1014	1925

L'analisi condotta viene sintetizzata nel grafico che segue, il quale mostra per un generico ostacolo la cui distanza di visibilità D_v è rappresentata da rette verticali, il luogo dei punti in cui il livello del rischio in ambito ferroviario varia a seconda del colore rappresentato, quando il sedime ferroviario al passaggio a livello non è dotata di sistema di monitoraggio:



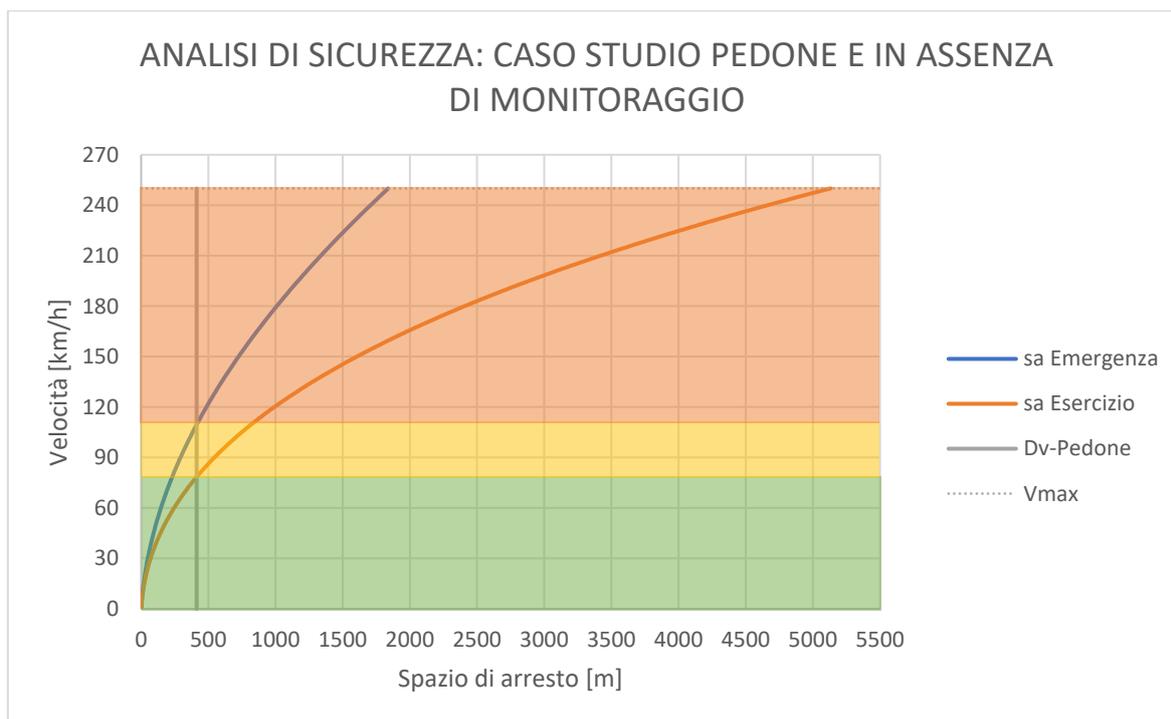
Le tre zone identificate nel grafico rappresentano per mezzo delle tre tipologie di colori ROSSO, GIALLO e VERDE, tre intervalli del livello di sicurezza, la mancanza di visibilità da parte del macchinista è la condizione dominante per definire i tre intervalli di rischio. È intuitivo comprendere che il color rosso individua la porzione di grafico entro cui lo spazio richiesto per effettuare l'arresto in condizioni di emergenza è superiore alla distanza alla quale si percepisce l'ostacolo. Purtroppo, tutte le situazioni che ricadono nella zona rossa sono definibili come rischio inaccettabile e sono caratterizzate dal manifestarsi dell'incidente al passaggio a livello, nello specifico quando l'ostacolo è un pedone, un'auto ed un ciclista.

Gli ostacoli stradali del tipo autobus e camion non appartengono mai alla fascia di color rosso, e non sono mai soggetti a situazioni di rischio inaccettabile. Dall'altra parte, come anche tutte le altre tipologie di ostacoli stradali, ricadono nella fascia gialla, che individua una zona di rischio medio-alto. In questa zona di transizione se la situazione analizzata identifica un punto nel piano in prossimità o nelle vicinanze del confine con il color rosso e in presenza di velocità alte, il rischio è classificato come medio-alto, medio-basso se il punto è vicino al confine con il

color verde e in presenza di velocità basse, e medio altrimenti. Tutte le situazioni appartenenti alla fascia gialla definiscono situazioni in cui lo spazio di arresto necessario al convoglio è compreso nel range dello spazio di arresto di emergenza e di esercizio. L'arresto può avvenire scongiurando l'incidente a seconda dello spazio che intercorre tra l'ostacolo ed il convoglio al momento della localizzazione dell'ostacolo da parte del macchinista.

Infine, l'analisi definisce tutte quelle situazioni appartenenti alla fascia di color verde come situazioni con rischio basso o inesistente, quando il punto identificato nel piano è molto vicino all'asse orizzontale. In tutte queste situazioni il rischio è accettabile e non si avranno presenza di feriti gravi, ingenti danni economici o problemi nella circolazione ferroviaria come ritardi o accodamenti.

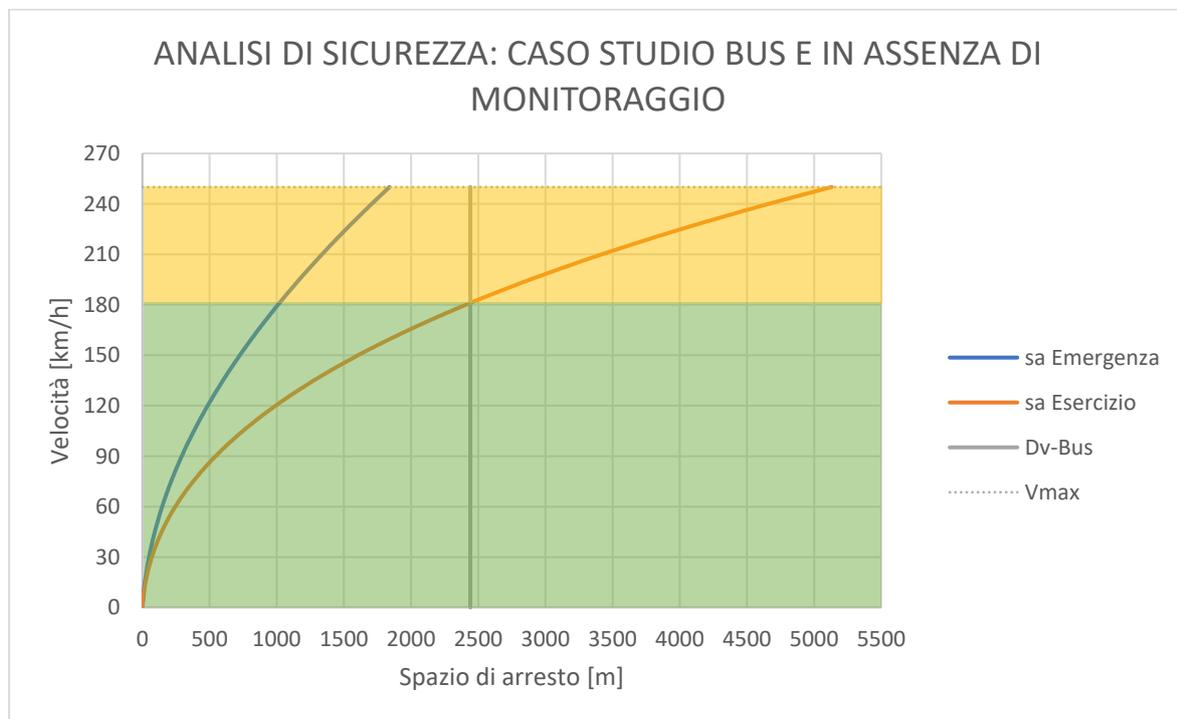
Per completezza si riporta l'analisi dettagliata nella versione grafica relativa ad ogni singolo ostacolo, così da definire in base al singolo ostacolo come variano le fasce di colore:



Le fasce di colore dell'analisi nei casi studio relativi al singolo ostacolo sono identificate in orizzontale. Il criterio utilizzato per la realizzazione delle fasce di color verde, giallo e rosso è lo stesso per tutti gli ostacoli. La definizione delle fasce è stata realizzata secondo la logica che segue:

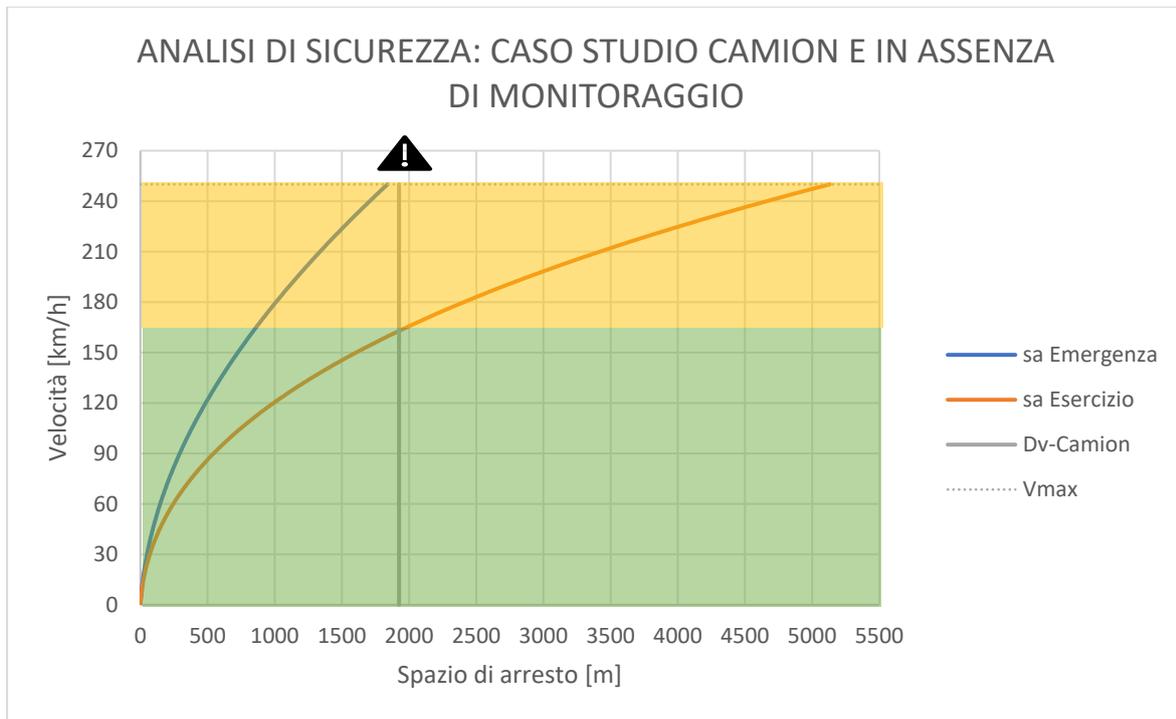
- fascia color verde: quando la distanza di visibilità dell'ostacolo è superiore allo spazio di arresto in esercizio richiesto, l'incidente è sempre scongiurato;
- fascia color giallo: quando la distanza di visibilità dell'ostacolo è compresa tra la distanza di arresto in emergenza e quella in esercizio, l'incidente potrebbe essere scongiurato a seconda della reale posizione del treno rispetto l'ostacolo;
- fascia color rosso: la distanza di visibilità è minore dello spazio di arresto in emergenza richiesto, l'incidente si verifica;

I colori, come nel diagramma generale, rappresentano le situazioni di rischio del tipo inaccettabile di color rosso, giallo rischio medio e verde rischio accettabile. La tipologia di criticità associata fa riferimento a quanto definito nella tabella 5.1 di questa tesi.

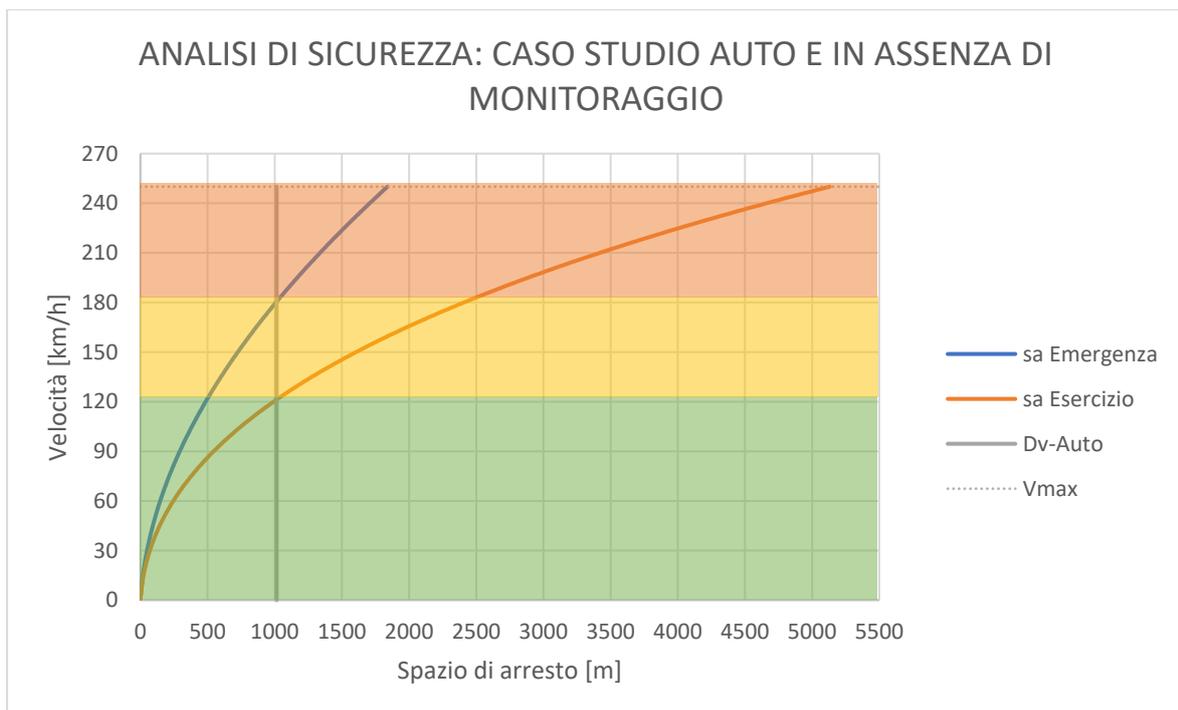
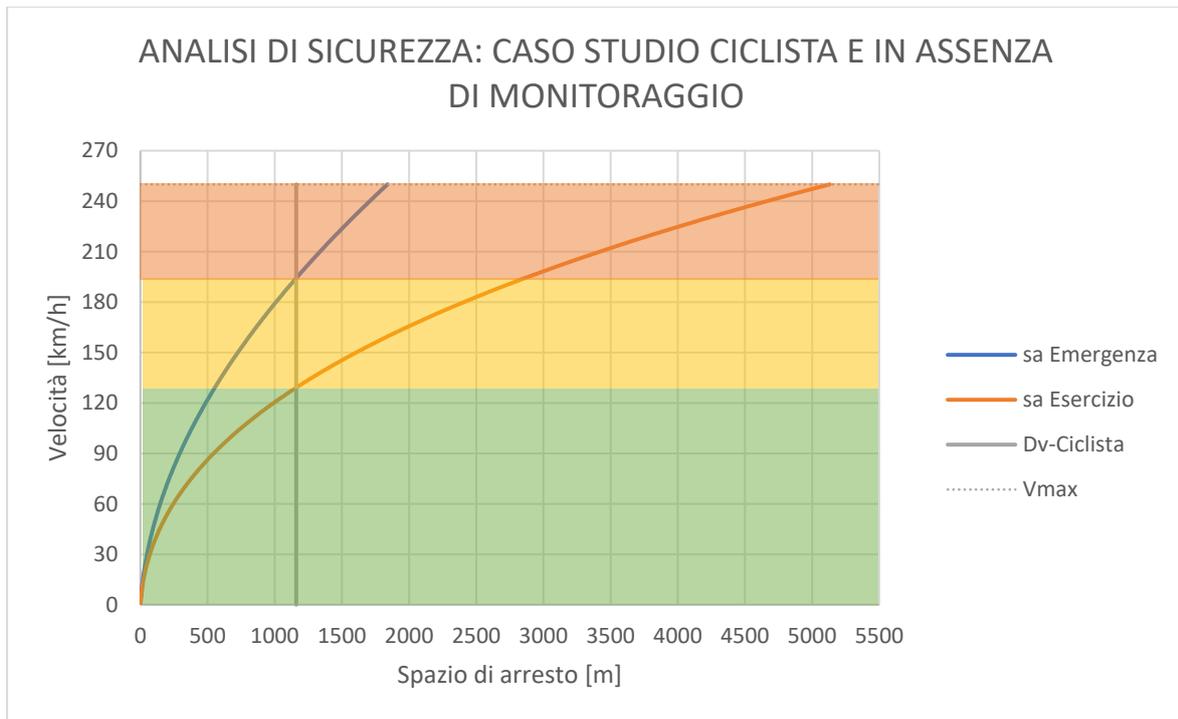


Come si era notato in precedenza dal grafico generico, il caso studio relativo all'ostacolo del tipo autobus e camion (vedi grafico successivo), non prevedono la fascia rossa di rischio inaccettabile.

Le grandi dimensioni degli ostacoli in questo caso influenzano il risultato ottenuto in termini di sicurezza. Dall'analisi si evince che pur alla massima velocità ammissibile del treno (250 km/h) con la frenata di emergenza è possibile evitare la collisione con l'ostacolo, in caso di scontro i danni riportati non saranno letali per i passeggeri a bordo di entrambi i veicoli.



In questo caso studio valgono le considerazioni precedenti, ma al contrario del bus la situazione di rischio inaccettabile può realizzarsi quando il limite dello spazio di frenatura in emergenza coincide con la distanza di visibilità, questa situazione è realizzabile se si procede alla velocità massima del treno. ⚠



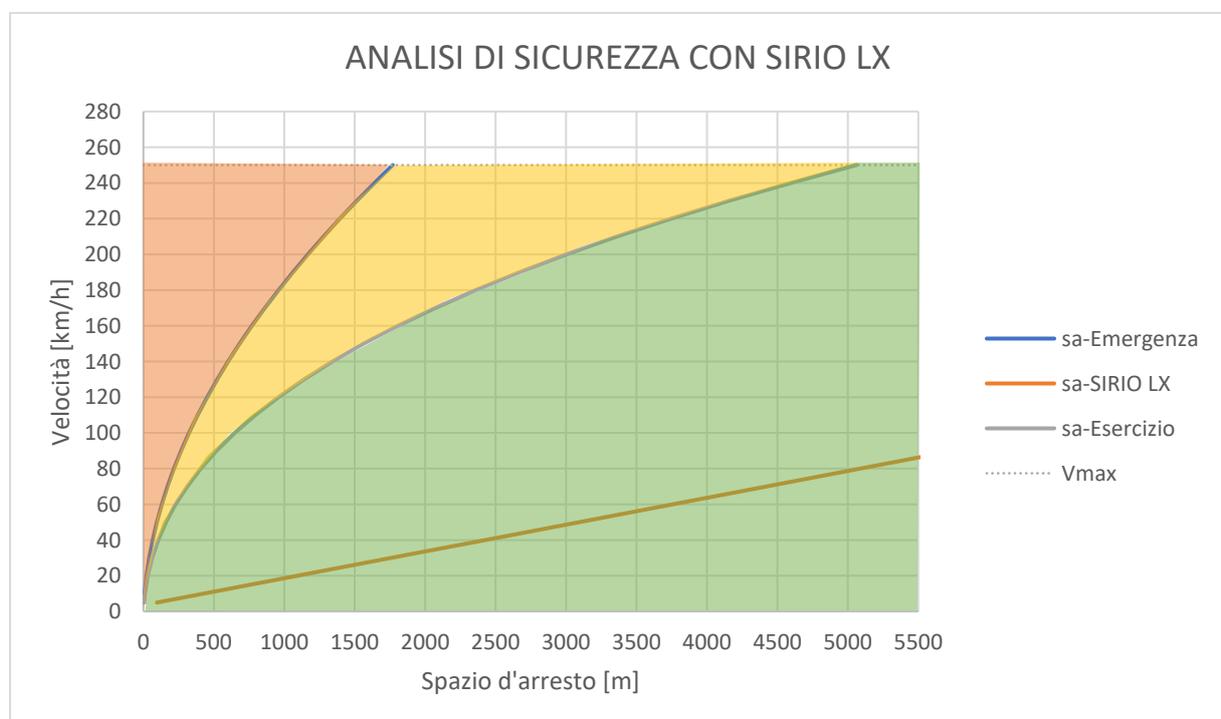
5.6.2 Risultati dell'analisi con sistema di monitoraggio

In questo paragrafo verrà svolta l'analisi di sicurezza al passaggio a livello quando è presente il sistema di protezione automatica integrativa PAI-PL della tipologia SIRIO-LX.

Quando il sistema di monitoraggio è presente, decade il concetto della distanza di visibilità del macchinista ferroviario. Il sistema è in grado di percepire l'ostacolo molto prima del conducente e svolge la mansione di occhio remoto. Il sistema comunica al macchinista, preavvisandolo rispetto alle sue personali potenzialità visive, della presenza dell'ostacolo, in questo modo l'azione frenante viene realizzata non nel momento in cui si rileva l'oggetto visivamente, ma nel momento stesso in cui il sistema SIRIO LX comunica al macchinista la presenza di un ingombro sul sedime ferroviario al passaggio a livello.

L'analisi numerica nel dettaglio viene svolta in Appendice sezione D, si riportano i dati e i risultati ottenuti in tabelle.

Il risultato ottenuto, come nel caso precedente, viene sintetizzato tramite una rappresentazione grafica:



La realizzazione delle fasce viene fatta considerando le curve degli spazi di arresto, del tipo emergenza ed esercizio. In questo caso quando il sistema SIRIO LX preavvisa il macchinista

della presenza dell'ostacolo generico, non è importante la natura dell'ostacolo, ad una distanza dal veicolo ferroviario tale da non avere sufficiente spazio per realizzare l'arresto in emergenza la fascia è di color rosso. La fascia definirà tutte le situazioni in cui non è stato sufficiente preavvisare il conducente perché il treno era già prossimo al passaggio a livello. Quando lo spazio a disposizione del macchinista al momento del preavviso è contenuto tra lo spazio di arresto in condizioni di emergenza e quella di esercizio, con il preavviso il macchinista frena, ma pur evitando una situazione di rischio inaccettabile, il rischio continua ad essere alto. Infine, quando il sistema SIRIO LX preavvisa il conducente del veicolo ferroviario e quest'ultimo è localizzato a sufficiente distanza dal passaggio a livello, distanza maggiore dello spazio di arresto richiesto in condizioni di esercizio, è possibile arrestare il veicolo entro la zona di sicurezza che precede il passaggio a livello e scongiurando ogni tipo di interazione tra il veicolo ferroviario ed il potenziale ostacolo.

Nel caso studio in questione, considerando l'ipotesi che l'ostacolo permanga lungo il tracciato per un tempo sufficiente per essere individuato dal sistema, il quale può inviare il segnale al macchinista con sufficiente anticipo, si dimostra che la presenza del sistema di monitoraggio e dunque del preavviso ha sempre un effetto benefico. Il tempo di reazione del macchinista viene in questo modo ridotto, la riduzione di velocità viene avviata alla ricezione della comunicazione da parte del sistema e ne consegue che lo spazio di arresto richiesto rispetto alle normali condizioni di esercizio, basate su una marcia a vista, diminuisce, il livello del rischio nel 100% dei casi studiati migliora. Lo "spazio di arresto" richiesto in presenza del sistema di monitoraggio è sempre maggiore di quello di emergenza ed esercizio, perché in realtà si considera lo spazio che intercorre tra il treno e l'ostacolo nel momento in cui il conducente viene preavvisato. Se lo spazio che ha a disposizione il conducente nel momento del preavviso è maggiore dei due spazi di arresto studiati, allora si avrà sempre la possibilità di arrestarsi molto prima del passaggio a livello, in condizioni di sicurezza.

Si è notato che facendo variare il tempo medio di chiusura del passaggio a livello, diminuendolo da 252 secondi (vedere l'Appendice sezione D per i calcoli) ad un valore minimo di 16 secondi, l'analisi di sicurezza non è più soddisfatta nel 100% dei casi. Quando il tempo di chiusura diminuisce e si lavora nell'intervallo temporale di [88-41] secondi, il sistema di monitoraggio lavora al limite delle sue potenzialità, perché nonostante vi sia il preavviso, l'ostacolo ha più probabilità di rimanere incastrato alla chiusura delle barriere a causa del poco tempo a disposizione ed il livello di rischio a cui si sottopone il sistema ferroviario aumenta anche in

presenza del monitoraggio al diminuire della chiusura delle barriere. Nel range [88-41] secondi si lavora con rischio medio e classificato dal color giallo.

Il confine entro cui il preavviso esercitato dal sistema SIRIO LX è ottimale, e scongiura qualsiasi interferenza tra l'ostacolo ed il treno, è funzione del tempo di chiusura della barriera, che può variare da un massimo di 330 secondi (5,5 minuti) ad un minimo di 89 secondi (1,46 minuti). Sotto la soglia temporale descritta il monitoraggio non garantisce un livello di sicurezza accettabile nel 100% delle situazioni (color verde).

5.7 Indicatore di rischio

In questo paragrafo della tesi magistrale viene realizzato un indicatore di rischio, a partire dalla definizione canonica di rischio (vedi definizione nel sotto paragrafo 5.1.1). La costruzione dell'indicatore viene effettuata per mezzo di nove passaggi significativi, i quali permettono di raggiungere l'obiettivo posto. La verifica della bontà dell'indicatore viene lasciata a futuri studi sull'argomento.

1. Dalla definizione classica di rischio R:

$$R = P \cdot M$$

Si indica con P la probabilità che avvenga un evento incidentale e con M la magnitudo o entità del danno.

2. L'analisi si conduce nella condizione di assenza di monitoraggio al passaggio a livello ed in presenza di monitoraggio del tipo SIRIO-LX al passaggio a livello.
3. Si definisce la variabile distanza D, che individua la posizione del treno nello spazio al momento della presa visione dell'ostacolo nel sedime ferroviario tra i passaggi a livello.

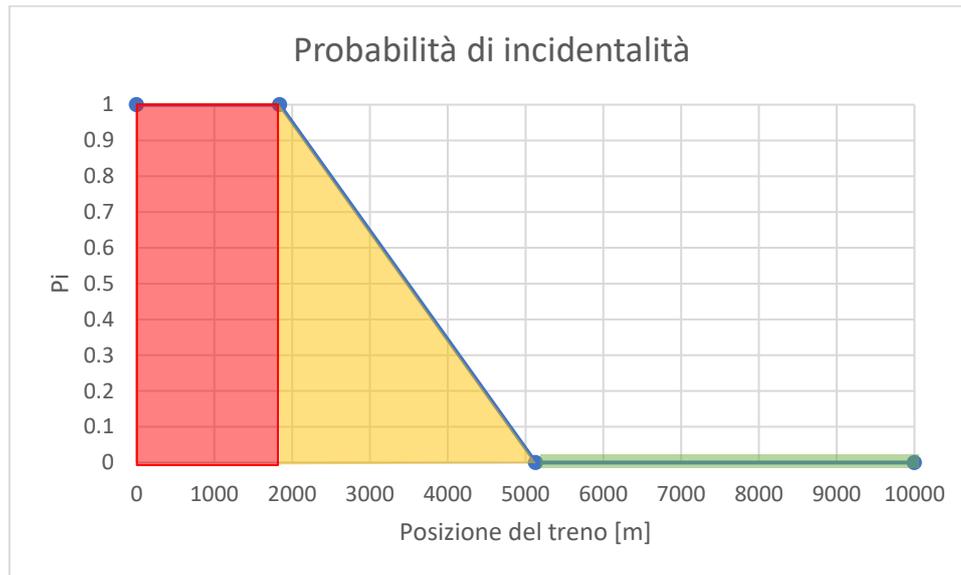
$$D = D_v \quad \text{Assenza di monitoraggio}$$

$$D = D_{SIRIOLX} \quad \text{Presenza di monitoraggio}$$

4. Definizione della probabilità P_i che si verifichi l'incidente:

$$P_i \begin{cases} \frac{1}{sa_{esercizio} - sa_{emergenza}} \cdot D + \left(\frac{sa_{esercizio}}{sa_{esercizio} - sa_{emergenza}} \right) & \text{Se } D < sa_{emergenza} \\ 0 & \text{Se } sa_{emergenza} < D < sa_{esercizio} \\ 0 & \text{Se } D > sa_{esercizio} \end{cases}$$

L'equazione di P_i viene ricavata a partire dall'applicazione della logica Fuzzy:



Le equazioni considerate in termini di spazio di arresto di emergenza e di esercizio sono espresse in forma chiusa come segue:

$$s_{a_{esercizio}} = \frac{V^2}{\frac{1,09375 \cdot \lambda}{\Phi(V)} + \frac{0,127}{\Phi(V)} \pm 0,253 \cdot i}$$

$$s_{a_{emergenza}} = v_{linea} \cdot t + \frac{(1 + \beta)}{g} \cdot \int_0^{v_{linea}} \frac{v}{\frac{F}{P} + \frac{r_r}{1000} + \frac{k \cdot s \cdot v^2}{P} \pm \frac{i [\%]}{1000}} \cdot dv$$

5. La distanza di visibilità, che ha validità solo nel caso di assenza di monitoraggio, è funzione delle dimensioni minime dell'ostacolo considerato:

$$D_v = H_{min} \cdot AV \cdot 687,5$$

6. La posizione del treno quando si ha monitoraggio, si considera, per tutte quelle situazioni in cui la variabile $D > D_v$ e l'espressione analitica associata è la stessa usata nell'analisi cinematica:

$$D_{SIRIOLX} = v_{linea} \cdot \left(t_{chiusuraPL} - t_{passaggiotreno} - \frac{t_{TD96}}{2} + t_{SIRIOLX} \right)$$

7. La probabilità P (vedere espressione del rischio) è costituita non solo dal valore di P_i , ma è funzione anche della velocità del veicolo ferroviario e del tipo di ostacolo al passaggio a livello.
- Si indica con P_{21} la probabilità che il veicolo marci con velocità superiore ai 30 km/h nel momento in cui rileva l'ostacolo.
 - Si indica con P_{22} la probabilità che il veicolo marci con velocità inferiore ai 30 km/h nel momento in cui rileva l'ostacolo.
 - Si indica con P_{3x} la probabilità che l'ostacolo al passaggio a livello sia una delle seguenti categorie numerate:

Numerazione X dell'ostacolo	Categoria X dell'ostacolo
1	Auto
2	Camion
3	Autobus
4	Pedone
5	Ciclista

8. La magnitudo deve essere valutata caso per caso, a seconda del numero di feriti gravi, vittime, danni economici, ritardi nel servizio ferroviario, problemi di segnalamento e tutti i danni derivanti dal caso specifico in esame. La magnitudo si esprime in termini economici.
9. L'indicatore di rischio, considerando tutti i punti precedenti, viene analiticamente espresso dalla formulazione matematica che segue:

$$R_{tot} = \sum_{j,x,k} P_i \cdot P_{2j} \cdot P_{3x} \cdot M_k \quad \text{con } j = 1,2; \quad x = 1,\dots,5; \quad k = 1,\dots,n \quad = \text{numero dei casi studio}$$

6 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si è focalizzato sulla valutazione del livello di rischio in ambito ferroviario durante l'esercizio ai passaggi a livello. L'analisi è stata condotta individuando tra le diverse tipologie di situazioni critiche possibili in ferrovia, una delle criticità più rilevanti, ovvero quella relativa agli incidenti del tipo tipici in ferrovia. L'attenzione è stata rivolta alla problematica dell'incidentalità ai passaggi a livello, che rappresenta in ambito ferroviario circa il 26% di tutti gli incidenti.

L'obiettivo posto è stato quello di valutare una possibile e valida alternativa all'automazione integrale in ambito ferroviario, che oggi non è perseguibile in ferrovia a causa dei limiti tecnologici e della complessità del sistema entro cui andrebbe inserito.

L'alternativa proposta in questo lavoro di tesi, sulle orme dell'attuale politica applicata da RFI ai passaggi a livello e dell'intensa attività di sensibilizzazione effettuata da ILCAD, è di perseguire la sicurezza in ambito ferroviario introducendo l'automazione parziale.

In questo lavoro di tesi l'automazione parziale viene realizzata in corrispondenza dei passaggi a livello nazionali per mezzo di un sistema tecnologico di supporto al macchinista, qualora sia presente un ostacolo sul sedime ferroviario tra i passaggi a livello, denominato SIRIO-LX.

La scelta della tipologia di sistema di monitoraggio in tempo reale non è casuale poiché questo è il sistema che attualmente RFI sta introducendo nei passaggi a livello che non possono essere soppressi e sostituiti con opere d'arte alternative.

Il lavoro svolto si basa sull'ipotesi che tutti gli attuali passaggi a livello in Italia siano dotati di un sistema di protezione automatica integrativa del tipo SIRIO-LX. L'obiettivo è quantificare con un approccio di tipo statistico, che ha utilizzato gli strumenti della Fault Tree Analysis (FTA), Event Tree Analysis (ETA) e successiva classificazione del livello del rischio con la metodologia risk analysis, se il rischio è accettabile in presenza di monitoraggio in tempo reale. La risk analysis sfrutta la matrice di rischio fornita da RFI per definire, per mezzo di un indice, il livello di rischio ai passaggi a livello prima e dopo l'introduzione del sistema di protezione automatica integrativa.

La valutazione e successiva classificazione del rischio con questa procedura ha permesso di individuare sia numericamente, con un abbassamento delle frequenze di accadimento degli itinerari di cui si compongono gli alberi logici della ETA, e sia qualitativamente per mezzo di una classificazione del livello di rischio basata su una precisa classe di colore (rosso, giallo e verde), l'abbassamento del livello di rischio nei passaggi a livello prima e dopo l'introduzione della protezione automatica integrativa.

Considerando che la metodologia statistica è affetta da aleatorietà ed incertezza, perché nonostante i dati vengano reperiti da banche dati certificate o rapporti UIC, ANSF e RFI, sono pur sempre dati basati sullo storico; si è deciso per questo motivo di procedere con una seconda analisi di tipo cinematica e tabellare, con l'obiettivo di validare e confermare i risultati ottenuti dalla prima analisi.

I risultati della seconda analisi, rappresentati per mezzo di un piano cartesiano velocità-spazio, hanno permesso l'individuazione del luogo dei punti entro cui si distinguono fasce colorate che definiscono il livello di rischio nelle diverse fasi del moto del veicolo ferroviario.

I risultati ottenuti hanno permesso di affermare che in presenza di monitoraggio in tempo reale, il miglioramento del livello di sicurezza esiste con entrambi i due approcci. L'analisi cinematica ha mostrato, considerando le migliori ipotesi per il moto del veicolo ferroviario, che il livello di sicurezza è molto alto e la valutazione del rischio mostra risultati nel 100% dei casi analizzati appartenenti alla soglia di accettabilità definita come "rischio trascurabile", identificato dalla colorazione verde. Al contrario, con l'analisi di tipo statistica la valutazione del rischio mostra che il 55% dei casi studiati appartiene alla classe di rischio definito tollerabile.

Infine, si è realizzato un indicatore di rischio in grado di valutare numericamente il livello di rischio per un dato passaggio a livello in esame in funzione di diversi parametri quali, tipo di veicolo ferroviario, tipologia del tracciato ferroviario, tipologia di ostacolo, velocità del moto del treno, tempo di preavviso e traffico stradale nell'intersezione. La bontà dell'indicatore viene lasciata a futuri studi sull'argomento.

Il sistema di monitoraggio risulta essere inefficace in tutte quelle situazioni in cui l'ostacolo si manifesta lungo il tracciato pochi istanti prima del transito del treno, in tutte queste situazioni il preavviso non è sufficiente per scongiurare la fatalità. Inoltre, un ulteriore limite è legato al

tempo di chiusura delle barriere. Dall'analisi cinematica si è constatato che facendo variare il tempo medio di chiusura della barriera, diminuendolo progressivamente, il sistema di monitoraggio perde la sua totale efficienza perché la probabilità che un veicolo resti incastrato tra le barriere all'ultimo secondo aumenta.

Le prestazioni del sistema di monitoraggio possono migliorare da un punto di vista tecnico potenziando il sistema di comunicazione in tempo reale, riducendo il tempo di inoltro ed avviso della criticità rilevata sotto la soglia dei 3 secondi (valore odierno). Potenziando il sistema di monitoraggio sarà anche possibile diminuire, entro limiti accettabili, il tempo totale di attesa, agendo prevalentemente sui tempi di chiusura ed apertura delle barriere.

Oltre ad agire sul miglioramento tecnologico del sistema di monitoraggio, si richiede che l'utente sviluppi una maggiore sensibilità e un maggior rispetto per le regole del Codice della strada, soprattutto dell'articolo 147. Le campagne di sensibilizzazione sul tema dell'incidentalità ai passaggi a livello sono presenti su tutto il territorio italiano. La sensibilizzazione verrà accompagnata da un'azione tecnologica mirata promossa da Google® e la Federal Railroad Administration, che permetterà all'utente, sempre più preso dalle tecnologie oggi in uso come lo smartphone, di visualizzare sul proprio cellulare un pop-up che avvisi l'utente che si approssima al passaggio a livello della presenza dello stesso. La segnalazione avrà natura prevalentemente grafica, ma sarà accompagnata da un avviso di tipo visivo ed acustico prima di giungere al passaggio a livello, sia esso pubblico che privato.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] ANFS (2016): "La sicurezza ferroviaria nel 2016, relazione preliminare", "s.l.", Aprile 2016.
- [2] Angelelli D. (2018): "La gestione dei rischi connessi ad attraversamenti e parallelismi nell'esercizio ferroviario: metodi di analisi e valutazione". Tesi magistrale, Ingegneria Civile, Politecnico di Torino.
- [3] ANSF (2010): "L'andamento della sicurezza della circolazione nel 2010.", "s.l.", "s.d."
- [4] ANSF (2016): "Rapporto annuale sulla sicurezza delle ferrovie ricadenti nell'ambito di competenza dell'Agenzia nazionale per la sicurezza delle ferrovie", Firenze, 2016
- [5] Baric D. et al (2017) "Introducing experiment in pedestrian behaviour and risk perception study at urban level crossing", Zagreb, Croazia, Luglio 2017
- [6] Business Assurance (2014): "La sicurezza funzionale per l'automazione ferroviaria", "s.l.", Settembre 2014
- [7] CTAI S.r.l. (s.d.): "Sicurezza funzionale-SIL", Milano, "s.d."
- [8] Dalla Chiara B. (2017): "Slide: Sicurezza nel trasporto ferroviario", Torino, Politecnico di Torino, Ingegneria civile, Dicembre 2017.
- [9] Danise F. (2014): "Sviluppo di uno strumento di simulazione dell'esercizio ferroviario: analisi di potenzialità di linee con segnalamento basato sul blocco radio". Tesi magistrale, Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino.
- [10] DIGIFEMA (s.d.): "Analisi del fattore umano negli eventi incidentali dei settori ferroviario e marittimo"; "s.l.", "s.d."
- [11] DLF (s.d.): "Ferrovie italiane 1839-2013 dalla Napoli-Portici al Frecciarossa 1000", Roma, "s.d."
- [12] European Union Agency For Railways (2016): "Railway safety performance in the european union", Bruxelles, Belgio, Settembre 2016.
- [13] European Union Agency For Railways (s.d.): "Integrare il fattore umano nelle ferrovie europee"; "s.l.", "s.d."
- [14] Fantini M. (2014): "Veicoli su rotaia", "s.l.", CIFI.
- [15] FMP (s.d.): " Studi sugli aspetti energetici ed ambientali delle ferrovie", Mantova-Peschiera, "s.d."
- [16] Gebauer et al (s.d.): "Autonomously driving trains on open tracks-concepts, system architecture and implementation aspects", Salzburg, Austria, (s.d.)
- [17] Genovesi P. (2013): "L'operatore ferroviario e l'analisi del rischio: dalle metodologie allo sviluppo operativo", Roma, Giugno 2013.

- [18] Genovesi P. et al: " Il fattore umano nella valutazione del rischio – Tecnica HEART", III Convegno Nazionale “Sicurezza ed esercizio ferroviario” – Tecnologie e Regolamentazione per la Competizione, Roma, 7 giugno 2013
- [19] Giunta M. (s.d.): " Lecture 10-Sicurezza in campo ferroviario"; Reggio Calabria, Università mediterranea di Reggio Calabria, Ingegneria civile, "s.d."
- [20] Iannino A. (2006): "Sicurezza ed incidentalità nella circolazione ferroviaria". Tesi magistrale, Ingegneria civile, Politecnico di Torino.
- [21] Impastato S. et al (2013): "Sicurezza ed esercizio ferroviario: Tecnologie e regolamentazione per la competizione", Roma, Giugno 2013
- [22] Imperatrice F. et al (s.d.): "Il sistema di gestione della sicurezza di Trenitalia", "s.l.", "s.d."
- [23] Magenta G. (2014): "Il segnalamento ferroviario e i sistemi di controllo della marcia", Genova, Novembre 2014.
- [24] Maggi S. (s.d.): "Ferrovie: nascita e sviluppo", "s.l.", "s.d."
- [25] Masini M. (2015): " Trentino trasporti esercizio", "s.l.", Ottobre 2015.
- [26] Mazzini M. (2001): "Corso di sicurezza ed analisi di rischio", Università degli studi di Pisa, Facoltà di ingegneria meccanica, Pisa, 2001
- [27] NedeliakovàE. Et al (2016): "A new approach to the identification of rail risk at level crossing", Slovakia, 2016
- [28] RFI (2003): "Istruzione per l'esercizio dei passaggi a livello dell'infrastruttura ferroviaria nazionale", "s.l.", Settembre 2003
- [29] Rupi F. et al (2015): "Dispense del corso Tecnica ed economia dei trasporti", Bologna, 2015.
- [30] STARS-Railway System Brochure (2018): "SIRIO-LX", Roma, 2018
- [31] UIC Safety Report (2017): "Significant accidents 2016", Parigi, Francia, Ottobre 2017
- [32] Zampiero L. (2016): "Il segnalamento: principi e tecnologie per la regolazione del traffico ferroviario", Tesi magistrale Ingegneria dell'energia elettrica, Università degli studi di Padova.

8 Sitografia

[a] <Altervista> <http://paolomarzano.altervista.org/blog/ferrovie-italiane/>

Data presa visione: 02/05/2018

[b]<Ferrovie><http://www.ferrovie.info/index.php/it/13-treni-reali/3196-l-uic-pubblica-il-rapporto-del-2017-sugli-incidenti-ferroviari-in-europa>

Data presa visione: 06/05/2018

[c]<LaRepubblica>http://bari.repubblica.it/cronaca/2016/07/12/news/puglia_scontro_fra_treni_tra_andria_e_corato_morti_e_decine_di_feriti-143896174/

Data presa visione: 30/05/2018

[d] <Wikipedia> http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=app:imp_blocco_4

Data presa visione: 07/05/2018

[e] <Wikipedia> http://www.leferrovie.it/leferrovie/wiki/doku.php?id=app:imp_blocco_2

Data presa visione: 25/05/2018

[f]<ANSF> <https://www.ansf.it/compiti>

Data presa visione: 01/06/2018

[g]<RFI><http://www.rfi.it/cms/v/index.jsp?vgnextoid=066fd0b61d40a410VgnVCM1000008916f90aRCRD&vgnnextchannel=091e24186e27a410VgnVCM1000008916f90aRCRD>

Data presa visione: 04/06/2018

[h]<Blog di Antonio Martino> http://www.rsifn.it/sfi/it/sa/N_bra.htm

Data presa visione: 31/05/2018

[i] <Confetra><https://www.confetra.com/centro-studi-statistiche/>

Data presa visione: 11/07/2018

[j]<Ferpress><https://www.ferpress.it/sicurezza-ferroviaria-2016-ansf-buoni-risultati-sulla-rete-rfi-ma-resta-lallarme-pedoni-presentata-la-relazione/>

Data presa visione: 11/07/2018

[k] <Portale di Amedeo Lucente><https://www.amedeolucente.it/decimi-e-diottrie.html>

Data presa visione: 20/08/2018

[l]<RFI><https://www.fsitaliane.it/content/dam/fsi-lavora-con-noi/lavora-con-noi/Requisiti%20fisici%20speciali%20visite%20assunzione.pdf>

Data presa visione: 20/08/2018

[m]<Medicina Online><https://medicinaonline.co/2017/03/12/laltezza-media-italiana-nel-2017-di-maschi-e-femmine/>

Data presa visione: 20/08/2018

[n]<La Stampa motori><http://www.lastampa.it/2018/01/02/motori/mercato-auto-ecco-le-auto-pi-vendute-in-italia-fiat-panda-sempre-la-regina-0e15NP4XUmQjG48IZN0dyK/pagina.html>

Data presa visione: 20/08/2018

[o] http://www.italiansped.com/System/00/01/58/15873/633930318054742500_1.pdf

Data presa visione: 20/08/2018

[p]<Presto>http://www.rupprechtconsult.eu/uploads/tx_rupprecht/12_PRESTO_Infrastrutture_Parcheggi_e_depositi_per_biciclette.pdf

Data presa visione:

[q]<Sei>https://seieditrice.com/progettazionecostruzioniimpianti/files/2012/04/29_1_dimensioni_e_standard.pdf

Data presa visione: 20/08/2018

[r] <Wikipedia>https://it.wikipedia.org/wiki/Passaggio_a_livello

Data presa visione: 06/09/2018

[s]<IDS><https://www.idscorporation.com/pf/sirio-lx/#1481041686080-8fb5db07-2d845f68-79c04d94-0c00396a-a133>

Data presa visione: 09/09/2018

[t]<Ferrovie><http://www.ferrovie.info/index.php/it/17-approfondimenti?start=51>

Data presa visione: 07/09/2018

[u] <Wikipedia>https://it.wikipedia.org/wiki/Elettrotreno_FS_ETR.460

Data presa visione: 18/09/2018

9 APPENDICE

9.1 Appendice sezione A: frequenze di accadimento per FTA

In questa sezione si spiegherà nel dettaglio come è stata effettuata la valutazione delle probabilità/frequenze di accadimento associate ai singoli box che compongono la struttura ramificata dell'albero dei guasti. Si riporteranno i riferimenti bibliografici, le banche dati e i report da cui sono stati estratti i dati analizzati. Le assunzioni e semplificazioni adottate in caso di valori non disponibili verranno spiegate per ogni caso analizzato.

TOP EVENT: Ostacolo al passaggio a livello (PL)

L'albero è suddiviso in box che sono stati diversamente denominati a seconda dell'oggetto in esso contenuto, evento (E) o gruppo (G).

1. VANDALISMO (E1)

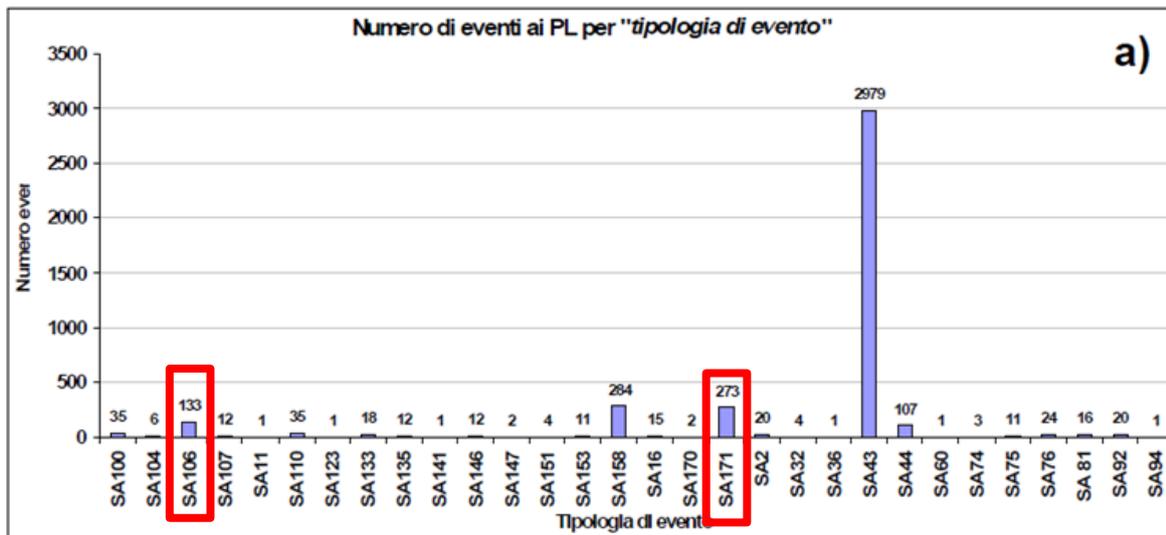
Per la valutazione della frequenza/probabilità di accadimento relativa ad atti vandalici e/o manomissioni volontarie al passaggio a livello, sono stati presi in considerazione i valori riportati nel documento del *Ministero delle infrastrutture e dei trasporti* denominato "Studio analitico sul tema dell'incidentalità ferroviaria in corrispondenza dei passaggi a livello".

All'interno del documento sono presenti dati certificati perché derivanti da uno studio effettuato direttamente da RFI, relativamente a tutti gli eventi verificatisi presso la rete ferroviaria che gestisce.

L'arco temporale di indagine è di 410 giorni, sono stati considerati ai fini dell'analisi solo i codici SA171 e SA106 del documento citato. I codici in questione rappresentano il numero di eventi ai passaggi a livello relativamente al danneggiamento/manomissione del PL (SA171) ed atto vandalico (SA106).

I dati sono stati reperiti a partire dalla tabella che segue:

- SA106 numero di eventi 133 in 410 giorni di indagine;
- SA171 numero di eventi 273 in 410 giorni di indagine.



Il numero totale di passaggi a livello attivi presente nell'analisi, come riportato nel documento, è di 5637.

La frequenza di accadimento annuale di un evento del tipo vandalismo (E1) per ogni passaggio a livello sulla rete italiana viene calcolata come di seguito:

$$f_{E1} = \frac{(273 + 133)\text{eventi}}{410\text{gg} \cdot 5637\text{PL}} \cdot 365\text{gg} = \frac{0,0641 \frac{\text{eventi}}{\text{PL}}}{\text{anno}}$$

2. ROTTURA AVVISATORE LUMINOSO (E2)

I passaggi a livello considerati in questa analisi presentano lato strada un avvisatore luminoso. Questo sistema di protezione utilizzato da RFI risponde alla classificazione CENELEC SIL 2. Considerando le specifiche del livello di sicurezza garantito, è possibile valutare la probabilità annuale di rottura del sistema tecnologico per ogni PL.

Safety Integrity Level (SIL)	Average Probability of Failure on Demand (PFD _{avg})	Probability of Failure per Hour (PFH)	Risk Reduction Factor (RRF)
SIL 4	$10^{-5} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-4}$	$10^{-9} \leq \text{PFH} < 10^{-8}$	$10000 \leq \text{RRF} \leq 100000$
SIL 3	$10^{-4} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-3}$	$10^{-8} \leq \text{PFH} < 10^{-7}$	$1000 \leq \text{RRF} \leq 10000$
SIL 2	$10^{-3} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-2}$	$10^{-7} \leq \text{PFH} < 10^{-6}$	$100 \leq \text{RRF} \leq 1000$
SIL 1	$10^{-2} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-1}$	$10^{-6} \leq \text{PFH} < 10^{-5}$	$10 \leq \text{RRF} \leq 100$

Figura 9.1 Caratteristiche CENELEC SIL.

L'analisi procede considerando la probabilità di rottura oraria PHF relativa al livello SIL 2:

$$10^{-7} \leq PHF < 10^{-6}$$

Si considera per questa analisi l'estremo di destra con valore numerico 10^{-6} per tenere conto della situazione meno favorevole per questa tipologia di sistema di protezione. Si considera dunque la probabilità di rottura massima nel range associato al SIL 2.

$$f_{E2} = 10^{-6} \frac{\text{rottura}}{h} \cdot 24 h \cdot 365 gg = 8,76 \cdot 10^{-3} \frac{\text{rottura}}{\text{anno}}$$

Il valore si riferisce al singolo passaggio a livello.

3. ROTTURA DELLA BARRIERA TD 96/2 (E3)

Le barriere utilizzate da RFI per la protezione dei passaggi a livello sono della tipologia denominata TD 96/2.



Figura 9.2 PL con barriera TD 96/2 e avvisatore luminoso.

Questa tipologia di barriera rappresenta un sistema che deve essere in grado di garantire un elevato livello di sicurezza, motivo per cui il produttore ha creato un sistema tecnologico che risponde ai requisiti CENELC SIL 4.

L'analisi segue la stessa logica del caso precedente (rottura avvisatore luminoso). Il valore relativo alla probabilità di rottura oraria è compreso nel range: (vedi Figura 9.1)

$$10^{-9} \leq PHF < 10^{-8}$$

Per gli stessi motivi considerati in precedenza si considera l'estremo destro dell'intervallo 10^{-8} per la valutazione della frequenza di rottura annuale della barriera per ogni passaggio a livello:

$$f_{E2} = 10^{-8} \frac{\text{rottura}}{h} \cdot 24 h \cdot 365 gg = 8,76 \cdot 10^{-5} \frac{\text{rottura}}{\text{anno}}$$

4. ROTTURA AVVISATORE ACUSTICO (E4)

La tipologia di avvisatore acustico attualmente utilizzata da RFI per la protezione sonora dei passaggi a livello ha un livello di sicurezza secondo la CENELEC SIL 2.

I ragionamenti sono gli stessi svolti nei casi che precedono. Come nel caso dell'avvisatore luminoso la valutazione della frequenza di accadimento della rottura del sistema di sicurezza sonoro risulta essere per ogni passaggio a livello:

$$f_{E2} = 10^{-6} \frac{\text{rottura}}{h} \cdot 24 h \cdot 365 gg = 8,76 \cdot 10^{-3} \frac{\text{rottura}}{\text{anno}}$$

5. ERRORE UMANO (G3)

Il gruppo denominato G3 raccoglie in sé la valutazione degli errori di tipo umano commessi dagli utenti della strada. Con “utente della strada” si fa riferimento al guidatore di un veicolo stradale, sia esso un'autovettura, un autobus o un camion. Si escludono da questa analisi l'errore umano commesso da ciclisti e pedoni.

Lo studio viene effettuato considerando i dati storici riportati nel documento del *Ministero delle infrastrutture e dei trasporti* denominato “Studio analitico sul tema della incidentalità ferroviaria in corrispondenza dei passaggi a livello”.

Il codice riportato nel documento e considerato per l'analisi è SA43 relativo all'indebito attraversamento/tallonamento da parte dei veicoli stradali ai passaggi a livello.

L'arco temporale di indagine è di 410 giorni su un campione di 5637 passaggi a livello. Il numero di eventi che rispondono al codice SA43 è di 2979.

$$f = \frac{2979 \text{ eventi}}{410 \text{ gg}} = 7,26 \frac{\text{eventi}}{\text{gg}}$$

$$f_{G3} = \frac{7,26 \frac{\text{eventi}}{\text{gg}}}{5637 \text{ PL}} \cdot 365 \text{ gg} = \frac{0,47 \text{ eventi}}{\text{anno}}$$

6. GUASTO FERROVIARIO (G5)

La presente voce studiata, considerando che il guasto ferroviario nel caso di passaggi a livello può avere duplice natura, può essere legata alla rottura del pedale o al malfunzionamento del sistema centralizzato di controllo.

Si studiano in un primo momento i due eventi separatamente.

Il produttore del pedale usato sulle linee RFI ha definito secondo la CENELC che il valore del Safety Integrity Level del pedale è SIL 4. L'analisi procede con la stessa modalità del caso "rottura della barriera TD 96/2".

Si considera la probabilità di rottura oraria associata al SIL 4 nel range:

$$10^{-9} \leq PHF < 10^{-8}$$

Si considera il caso con probabilità di rottura di 10^{-8} si ha così maggiore probabilità di rottura oraria:

$$f_{G5.1} = 10^{-8} \frac{\text{rottura}}{h} \cdot 24 h \cdot 365 gg = 8,76 \cdot 10^{-5} \frac{\text{rottura}}{\text{anno}}$$

Il valore trovato fa riferimento al singolo passaggio a livello.

Si considera ora il secondo caso di studio, quello relativo al malfunzionamento del sistema centralizzato. La presente voce viene studiata come un errore umano e viene valutata con la tecnica usata da RFI, metodo HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique).

Lo studio della valutazione dell'errore umano consiste nel moltiplicare un valore di probabilità nominale di base (P_0) per un fattore di performance (PF) e si fa riferimento alla voce tabellata di "mancanza di tempo per il rilevamento o la correzione dell'errore" (vedere tabella in Allegato 2).

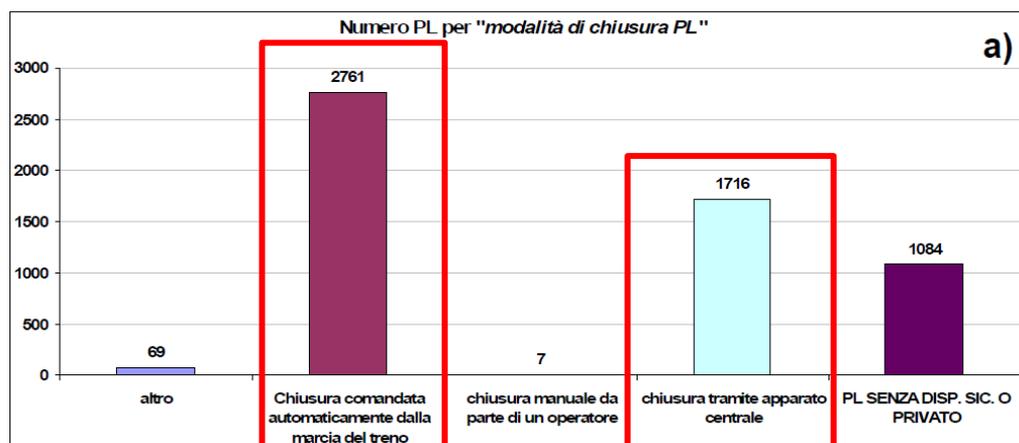
Si considera un fattore di peso AP, ipotizzato con un valore compreso tra 0 ed 1, a seconda dell'importanza che si vuole conferire alla condizione in esame, per questo caso studio si è scelto il valore intermedio 0,5.

Nel caso di studio proposto si considerata la tipologia di mangione tabellata di tipo G:

Generiche mansioni		P ₀
A	Completamente nuova, eseguita velocemente senza la reale idea delle possibili conseguenze	0,55
B	Cambiare/riportare il sistema in un nuovo stato/nello stato iniziale con un solo tentativo senza procedure di controllo	0,26
C	Compito complesso che richiede un elevato livello di comprensione e competenza	0,16
D	Compito abbastanza semplice eseguito rapidamente o con poca attenzione	0,09
E	Compito routinario che richiede un non elevato livello di competenze	0,02
F	Cambiare/riportare il sistema nello stato iniziale o in un nuovo stato seguendo procedure + controllo	0,003
G	Compito completamente familiare, ben progettato, routinario, che ricorre diverse volte per ora, eseguito secondo i migliori standard, da persone molto motivate, ben formate e con esperienza, completamente consapevoli delle implicazioni di un esito negativo, con il tempo necessario per correggere un potenziale errore ma senza aiuti significativi	0,0004
H	Rispondere correttamente ad un comando di sistema anche in presenza di un sistema automatizzato di supervisione che fornisce interpretazione accurata dello stato del sistema	0,000002
M	Compito per il quale non è disponibile alcuna descrizione	0,03

VALUTAZIONE ANALITICA		
P ₀	0,0004	Probabilità nominale di errore: mansione G
CFE	11	Condizione favorevole all'errore: n°2
AP	0,5	Fattore di peso
PF	6	Fattore di performance
$f_{G5.2} = P$	$2,4 \cdot \frac{10^{-3} \text{eventi}}{\text{anno}}$	Probabilità di errore umano (Metodo HEART)

I dati relativi alla modalità di chiusura dei passaggi a livello nazionali sono forniti dal documento del *Ministero delle infrastrutture e dei trasporti* denominato "Studio analitico sul tema della incidentalità ferroviaria in corrispondenza dei passaggi a livello".



Sono esclusi dall'analisi i passaggi a livello privati e quelli con chiusura manuale perché trascurabili nel calcolo.

Si procede alla valutazione della frequenza di accadimento del G5 per mezzo della media pesata tra i valori di frequenza $f_{G5.1}$ e $f_{G5.2}$ trovati in precedenza:

$$f_{G5} = \frac{(8,76 \cdot 10^{-5} \cdot 2761 + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1716) \frac{\text{eventi}}{\text{anno}}}{(2761 + 1716)PL} = 9,74 \cdot \frac{10^{-4} \frac{\text{eventi}}{PL}}{\text{anno}}$$

7. ERRORE UMANO (G6)

La tipologia di errore umano appartenente al gruppo denominato G6 è relativo all'errore umano commesso dall'attraversamento indebito del passaggio a livello da parte di pedoni e/o ciclistici. Nei dati non è prevista una distinzione tra pedone e ciclista, motivo per cui i dati relativi a queste due entità sono aggregate. Avendo a disposizione solo dati aggregati anche in questa tesi le analisi verranno svolte considerando i pedoni ed i ciclisti insieme.

I dati sono reperiti sempre dal documento del *Ministero delle infrastrutture e dei trasporti* denominato "Studio analitico sul tema della incidentalità ferroviaria in corrispondenza dei passaggi a livello".

Il dato reperito nel documento è codificato come SA44 e denominato "indebito attraversamento da parte di pedoni e/o ciclisti".

I giorni di indagine del documento sono 410 e sono stati investigati 5637 passaggi a livello nazionali. Il numero di eventi appartenenti al codice SA44 è di 107.

Si valuta di seguito la frequenza di accadimento relativa all'indebito attraversamento da parte di pedoni e ciclisti ai passaggi a livello nazionali in un anno:

$$f_{G6} = \frac{107 \text{ eventi}}{410 \text{ gg} \cdot 5637 \text{ PL}} \cdot 365 \text{ gg} = \frac{0,016 \frac{\text{eventi}}{PL}}{\text{anno}}$$

8. SUICIDIO (G7)

Il suicidio viene trattato in questa tesi come un evento realizzato solo da pedoni e ciclisti così come effettuato nel report annuale della Polizia di Stato Italiana. Dai report è stato possibile studiare la frequenza di accadimento legata ai suicidi ai passaggi a livello, perché annualmente nei report erano riportati il numero di “evento suicidio”.

ANNO	2014	2015	2016
Evento suicidi ai PL	200	191	212

Il numero totale di “eventi suicidio” in tre anni è dato dalla somma degli eventi relativo al singolo anno di indagine, ed è pari a 603 “eventi suicidio” totali in tre anni. Il numero di passaggi a livello investigato ogni anno è di 5637.

Si calcola la frequenza di accadimento del gruppo G7 come riportato di seguito:

$$f_{G7} = \frac{603 \text{ eventi}}{3 \cdot 365 \text{ gg} \cdot 5637 \text{ PL}} = \frac{0,035 \frac{\text{eventi}}{\text{PL}}}{\text{anno}}$$

9.2 Appendice sezione B: probabilità rami dell'albero degli eventi

In questa sezione della tesi si valutano di seguito i valori di probabilità o frequenze di accadimento associati ai Pivotal Events relativi alle quattro strutture ad albero degli eventi studiati. I casi studio sono divisibili in due grandi famiglie di indagine:

- indagine in assenza di sistema di monitoraggio SIRIO LX ai passaggi a livello nazionali, sia nel caso in cui l'ostacolo è un veicolo stradale sia quando è un pedone e/o ciclista;
- indagine con sistema di monitoraggio SIRIO LX ai passaggi a livello con automazione parziale con monitoraggio del tipo SIRIO LX, sia nel caso in cui l'ostacolo è un veicolo stradale, sia quando è un pedone e/o ciclista.

- **MACCHINISTA FRENA**

Questo caso studio si riferisce al passaggio a livello privo di sistema di monitoraggio. La metodologia scelta per la valutazione della probabilità che il macchinista in presenza di un ostacolo del tipo veicolo stradale, pedone o ciclista non freni, viene valutata con la metodologia HEART.

Per i valori usati come “condizioni favorevoli all'errore” (CFE) vedere Allegato 2 e per la probabilità nominale di base P_0 vedere Allegato 2.

VALUTAZIONE ANALITICA		
P_0	0,0004	Probabilità nominale di errore: mansione G
CFE_2	11	Condizione favorevole all'errore: n°2
CFE_{12}	4	Condizione favorevole all'errore: n°12
AP_2	1	Fattore di peso
AP_{12}	1	Fattore di peso
PF_2	11	Fattore di performance
PF_{12}	4	Fattore di performance
$f_{G5.2} = P$	$0,0176 \frac{\text{eventi}}{\text{anno}}$	Probabilità di errore umano (Metodo HEART)
1-P	$0,9824 \frac{\text{eventi}}{\text{anno}}$	Probabilità che non ci sia errore umano

- **ARRESTO DEL TRENO**

Si richiede al veicolo ferroviario di arrestarsi al passaggio a livello. La valutazione della probabilità che un generico veicolo ferroviario si arresti segue alcuni step:

- step 1: identificazione della distanza di visibilità dell'ostacolo

In questa parte di analisi si distinguerà tra due tipologie di possibili ostacoli, il veicolo stradale ed il pedone/ciclista. Secondo l'Allegato 2, alla disposizione 55/06 di RFI, il requisito fisico di tipo visivo richiesto per un macchinista è di avere 10/10 in ciascun occhio in termini di acutezza visiva.

Sfruttando la definizione ottica di acutezza visiva (AV) fornita da Snellen è possibile invertendo la formula valutare la distanza di visibilità (D_v) relativa ad un particolare ostacolo.

$$AV = \frac{1}{60 \cdot \arctg \frac{H1}{5 \cdot Dv}} \rightarrow Dv [m]$$

La distanza di visibilità è stata valutata tenendo conto delle dimensioni effettive degli ostacoli. La dimensione di riferimento da considerare tra lunghezza ed altezza dell'oggetto è la minore per lavorare in favore di sicurezza.

Come da normativa antincendio la larghezza di un uomo è considerata di 0,60 m, mentre da studi ISTAT l'altezza media di un uomo in Italia è di 1,68 m, valore mediato su tutta la popolazione maschile e femminile.

Nel caso del ciclista si assume che mediamente l'altezza di un soggetto in bici sia prossima all'altezza media di un individuo in piedi, in termini di larghezza si è considerata la dimensione dei parcheggi per biciclette, che hanno una lunghezza media di 2 m.

Definendo con H1 l'altezza media tra pedoni e ciclisti e L1 la lunghezza media tra pedoni e ciclisti si considera ai fini dell'analisi il valore L1 medio pari a 1,3 m.

Caso Pedoni/Ciclisti		
Dato	Valore	Dimensione
AV	1	Decimi
H1	1,687	m
L1	1,3	m

Si è considerata L1 perché è mediamente la dimensione minore, che permette di svolgere le analisi considerando la situazione di visibilità meno favorevole per il macchinista.

Invertendo la formula di Snellen ed utilizzando i valori nella tabella che precede, è stato possibile ricavare il valore della distanza di visibilità di un pedone/ciclista in metri:

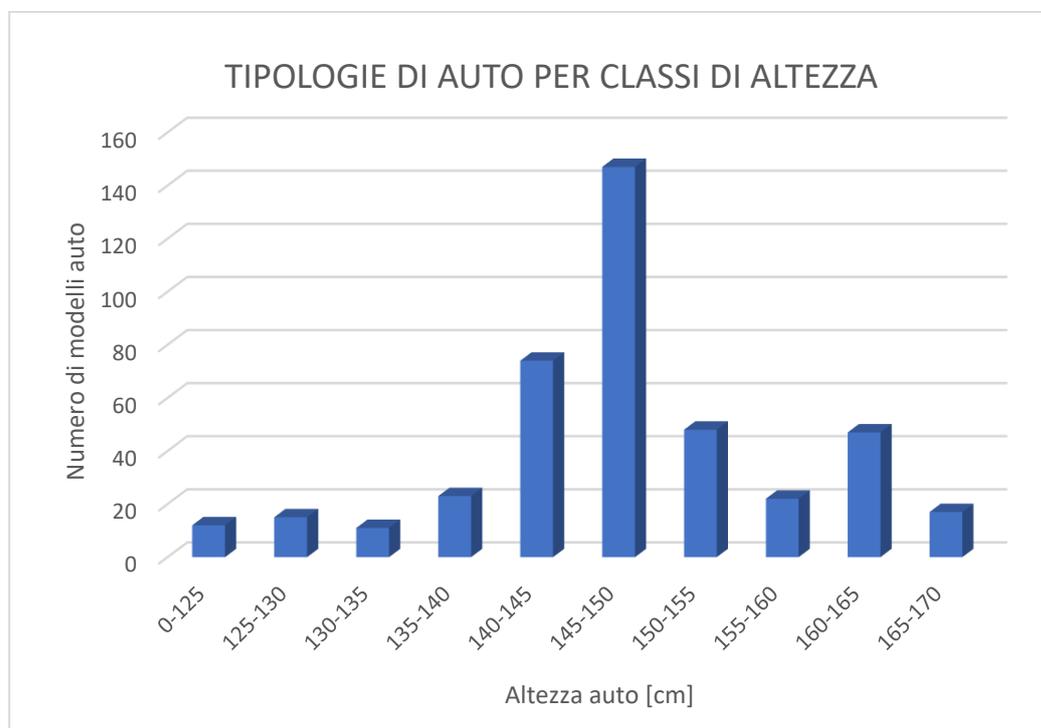
$$AV = \frac{1}{60 \cdot \arctan \frac{H1}{5 \cdot Dv}} \rightarrow Dv = 894 \text{ m}$$

La formula di Snellen permette di valutare il parametro AV considerando il massimo contrasto possibile nella sua definizione, contrasto color nero su sfondo bianco.

Nel caso stradale il ragionamento svolto per valutare la distanza di visibilità relativa ad un generico veicolo stradale si è svolta considerando i seguenti veicoli:

- autobus della compagnia Setra modello S415 HD, classico autobus extraurbano;
- la tipologia di camion usata è sia quella denominata “Motrice”, sia quella denominata “Bilico”, risultano essere le classiche tipologie di camion sulle strade urbane ed extraurbane;
- auto privata, il ragionamento si è condotto considerando intervalli dimensionali di 5 cm per identificare in quale classe di altezza si avessero maggiori modelli di auto a disposizione. Considerando l’applicazione sul sito <https://it.automobiledimension.com>, è stato possibile creare l’istogramma che segue, il quale è stato utilizzato per identificare la classe di altezza con il maggior numero di modelli di auto in circolazione. La classe con il numero massimo di modelli all’interno è quella di altezza tra 145-150 cm, con 147 modelli al suo interno. Trascurando le classi estreme, in cui ricadono auto sportive di lusso e veicoli per il trasporto di nove persone, la classe 145-150 cm ha al suo interno il 70% di modelli in circolazione. Successivamente si è considerata l’altezza media del range 147,5 cm come valore da usare nell’analisi relativa alla acutezza visiva. Per ogni modello è stata valutata la lunghezza ed il risultato medio risulta essere 450,7 cm. Le

tipologie di auto in questo range dimensionale sono molte, a titolo illustrativo si riporta in appendice una Citroën C3, auto che risponde ai parametri usati nell'analisi di visibilità.



Il requisito visivo resta sempre il medesimo dell'Allegato 2 alla disposizione 55/06 di RFI di 10/10 per ciascun occhio. La formula dell'acutezza visiva usata è ancora quella di Snellen, si procede come in precedenza, considerando le dimensioni in altezza e lunghezza delle tre tipologie di ostacolo definite in precedenza. I dati dimensionali sono stati presi a partire dalle schede tecniche delle case produttrici (vedi allegato n°4).

Individuato il valore dimensionale minore, corrispondente all'altezza del veicolo in esame, si è valutato il valore da usare nella formula analitica considerando la media pesata del numero totale di veicoli in circolazione relativi a quella specifica categoria, auto, camion o autobus, in relazione alla dimensione minore del veicolo. I dati relativi al parco veicoli sono stati valutati grazie ai report Confetra.

Dato	Valore	Dimensione	Numero medio di veicoli annuale	Media totale
AV	1	Decimi	-	[m]
H1A	1,475	m	37436041	1,61
L1A	4,507	m	37436041	
H1B	3,550	m	97907	
L1B	12,200	m	97907	
H1C	2,800	m	3964510	
L1C	10,800	m	3964510	
A=Auto, B= Autobus, C= Veicoli pesanti				

$$AV = \frac{1}{60 \cdot \arctan \frac{H1}{5 \cdot Dv}} \rightarrow Dv = 1104 \text{ m}$$

Per completezza si sottolinea che è stato condotto uno studio da parte della Monash University di Melbourne nel 2007 intitolato “*An investigation into the relationship between vehicle colour and crash risk*”. In questo studio emerge che, considerando tutti gli incidenti avvenuti tra il 1987 ed il 2004, l’incidentalità stradale è fortemente influenzata dalle tonalità di colore del veicolo. Nello specifico, dall’analisi risultò evidente che i veicoli a tinta scura erano più coinvolti in sinistri stradali rispetto a quelli con tinte chiare.

Il risultato dello studio mostrò che le auto di colore bianco risultavano essere le più sicure, mentre quelle di color nero o grigio le meno sicure, poiché l’occhio umano confondeva la tinta del veicolo con la pavimentazione stradale.

Lo studio si conclude dicendo che questi sono risultati di natura statistica ed affetti da aleatorietà, per cui nel momento in cui tutti gli automobilisti decidessero di comprare solo auto colorate con tinte forti, non è corretto supporre che l’incidentalità tenderà a zero, ma al contrario potrebbe aumentare a causa dell’inesistente variazione di colorazioni di vernici delle auto su strada.

Lo studio dimostra che la sicurezza stradale è funzione proprio della variazione delle tinte delle auto su strada, non è la differenza di tonalità come si potrebbe pensare in un primo momento.

In questa tesi, a causa delle scarse informazioni relative ai singoli veicoli coinvolti negli incidenti ai passaggi a livello, non si è tenuto conto dell’influenza del colore del veicolo per studiare l’incidentalità al passaggio a livello.

- step 2: analisi di tipo cinematica

Si considera la presenza di un ostacolo lungo il tracciato ferroviario nell'area inerente al passaggio a livello. L'ostacolo considerato è sempre del tipo veicolo stradale, pedone o ciclista.

Si considera una decelerazione a [m/s^2], il cui valore è stato determinato per iterazione a partire da un'analisi cinematica tabellare, il tempo medio t_m [s] che tiene in considerazione sia il tempo medio di reazione del macchinista ferroviario, sia il tempo di reazione meccanica del veicolo per attuare la frenatura. Si hanno inoltre altri dati a disposizione quali la differenza tra lo spazio a disposizione iniziale s_i , coincidente con la distanza di visibilità del macchinista D_v , e lo spazio che definisce il punto di arresto, che nel sistema di riferimento coincide con l'intersezione degli assi e risulta una quantità nulla s_f . Il sistema in esame deve garantire che il veicolo ferroviario riesca a performare la frenatura e riesca ad arrestarsi completamente nel punto origine del sistema di riferimento.

L'obiettivo dello studio cinematico è quello di valutare la massima velocità iniziale alla quale è possibile arrestare il veicolo considerando i dati precedenti. Il calcolo prevede la risoluzione di un'equazione di secondo grado nella forma:

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

Nelle tabelle che seguono sono riportati i termini a , b , c per semplicità, nell'applicazione numerica, si riportano di seguito le corrispettive espressioni analitiche riferite ai singoli parametri:

$$a = \frac{1}{2 \cdot a} \quad \left[\frac{1}{\frac{m}{s^2}} \right]$$

$$b = t_m \quad [s]$$

$$c = \left(\frac{v_f^2}{-2 \cdot a} - \Delta s \right) \quad [m]$$

- Caso stradale:

Valutazione della velocità massima iniziale per arrestare il veicolo ferroviario				
Dati	Valore	Unità di misura	Valore	Unità di misura
t_m	3	s		
a	1,49	m/s^2		*a= Decelerazione
Δs	1104			
s_i	1104	m		
s_f	0	m		
v_f^2	0	$(km/h)^2$	0,00	$(m/s)^2$
v_f	0	km/h	0,00	m/s
a	0,3356	$1/(m/s^2)$		
b	3	s		
c	-1104,00	m		
v_i	54,53	m/s	196,3	km/h

- Caso pedoni/ciclisti

Valutazione della velocità massima iniziale per arrestare il veicolo ferroviario				
Dati	Valore	Unità di misura	Valore	Unità di misura
t_m	3	s		
a	1,49	m/s^2		*a= Decelerazione
Δs	894	0		
s_i	894	m		
s_f	0	m		
v_f^2	0	$(km/h)^2$	0,00	$(m/s)^2$
v_f	0	km/h	0,00	m/s
a	0,3356	$1/(m/s^2)$		
b	3	s		
c	-894,00	m		
v_i	48,81	m/s	175,71	km/h

Una volta valutata la velocità massima iniziale v_i [km/h] della linea, alla quale è possibile effettuare con successo e al limite l'arresto del treno al passaggio a livello, considerando i valori della linea ferroviaria tramite un approccio probabilistico, si valuta la probabilità che il treno si arresti in sicurezza al PL, ovvero riesca ad arrestarsi completamente prima di provocare un impatto con l'ostacolo lungo il tracciato ferroviario.

- step 3: risultati

Si considerano i dati riportati nel documento del *Ministero delle infrastrutture e dei trasporti* denominato "Studio analitico sul tema della incidentalità ferroviaria in corrispondenza dei passaggi a livello":

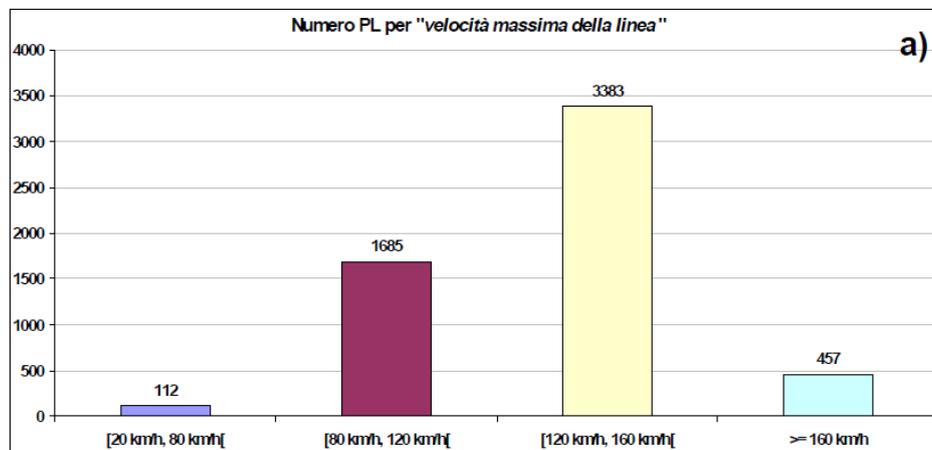


Figura 9.3 Classificazione dei PL per range di velocità massima della linea.

Considerando nell'analisi sempre un numero di PL pari a 5637 si valuta per ogni caso studio, differenziando tra il caso del veicolo stradale e quello relativo ai pedoni/ciclisti la probabilità che il veicolo ferroviario, in funzione della velocità della linea, riesca ad arrestarsi al passaggio a livello, evitando il contatto diretto con l'ostacolo.

- Caso stradale

Calcolo la probabilità che il veicolo proceda con v nulla al PL	
n° tot PL	5637
PL [20; 80[km/h	112
PL [80; 120[km/h	1685
PL [120; 160[km/h	3383
PL [160; 300]km/h	457
P PL con v<160 km/h	0,92
P PL con v>160 km/h	0,08
Con velocità inferiore a 196,3 km/h riesce a raggiungere i 0 km/h al PL	
Blocco quattro considero una distribuzione uniforme	
Numero di PL nel quarto range con v al massimo di 196,3 km/h	119
Probabilità di arrestarsi al PI	0,940
Probabilità di non arrestarsi al PI	0,060

Solo i treni che hanno una velocità al massimo di 196,30 km/h hanno la possibilità di arrestarsi al passaggio a livello e scongiurare qualsiasi criticità. Quando la velocità è superiore alla soglia 196,30 km/h è inevitabile il contatto con l'ostacolo. L'entità del danno è proporzionale alla velocità del veicolo ferroviario al momento dell'impatto. Maggiore sarà la velocità di impatto, maggiore sarà la criticità registrata al passaggio a livello.

- Caso pedoni/ciclisti

Calcolo la probabilità che il veicolo proceda con v nulla al PL	
n° tot PL	5637
PL [20; 80[km/h	112
PL [80; 120[km/h	1685
PL [120; 160[km/h	3383
PL [160; 300] km/h	457
P PL con v<160 km/h	0,92
P PL con v>160 km/h	0,08
Con velocità inferiore a 175,71 km/h riesce a raggiungere i 0 km/h al PL	
Blocco quattro considero una distribuzione uniforme	
Numero di PL nel quarto range con v al massimo di 175,71 km/h	51
Probabilità di arrestarsi al PI	0,928
Probabilità di non arrestarsi al PI	0,072

Solo i treni che hanno una velocità al massimo di 175,71 km/h hanno la possibilità di arrestarsi al passaggio a livello e scongiurare qualsiasi criticità. Quando la velocità è superiore alla soglia di 175,71 km/h è inevitabile il contatto con l'ostacolo. Vale lo stesso discorso fatto in

precedenza con l'ostacolo di tipo stradale, solamente che nel caso di ostacolo del tipo pedone ciclista la velocità di impatto per avere un evento critico è di molto inferiore a quella del caso critico di tipo stradale.

- **IL VEICOLO STRADALE LIBERA L'INTERSEZIONE AL PL**

La valutazione di questo ramo dell'albero degli eventi viene effettuata mediante lo studio con la metodologia HEART, per studiare la probabilità di fallire in un'attività di tipo umana.

In questa analisi si considera che il guidatore sia il vero responsabile nel riuscire a performare tempestivamente una manovra che possa garantire la liberazione del passaggio a livello. Essendo un compito non ben identificabile nelle mansioni dell'uomo nell'analisi si è considerata la tipologia di condizione favorevole all'errore di tipo M (vedi tabella in Allegato 2). Per la valutazione dei CFE vedi tabella Allegato 2.

VALUTAZIONE ANALITICA		
P_0	0,03	Probabilità nominale di errore: mansione M
CFE_2	11	Condizione favorevole all'errore: n°2
CFE_{12}	4	Condizione favorevole all'errore: n°12
CFE_{15}	3	Condizione favorevole all'errore: n°15
AP_2	0,5	Fattore di peso
AP_{12}	0,5	Fattore di peso
AP_{15}	0,5	Fattore di peso
PF_2	6	Fattore di performance
PF_{12}	2,5	Fattore di performance
PF_{15}	2	Fattore di performance
P	0,90	Probabilità di errore umano (Metodo HEART)
$1-P$	0,10	Probabilità che non ci sia errore umano

- **IL PEDONE/CICLISTA LIBERA L'INTERSEZIONE**

In questa sessione di analisi si considerano i dati relativi ai report annuali della Polizia di Stato Italiana, focalizzandosi sulle analisi condotte ai passaggi a livello. Grazie a questi dati è possibile definire quando l'occupazione da parte del pedone/ciclista dello spazio relativo al passaggio a livello è di tipo volontario (suicidio) o dettato da cause di forza maggiore o non curanza, mancata percezione del reale pericolo. Nel caso in cui l'occupazione dell'area risulti involontaria, si ipotizza che l'ostacolo permanga sui binari per un tempo sufficiente, affinché, nel caso di sistema di monitoraggio possa essere identificato nel tempo di reazione del sistema e sia comunicata la sua presenza al macchinista.

ANNO	2014	2015	2016
SUICIDI AI PL	18	12	19
SUICIDI TOT	144	135	159
PROB. SUICIDI AI PL ANNUALE	0,1250	0,0889	0,1195
% SUICIDI AI PL ANNUALE	12,50	8,89	11,95

La probabilità che il passaggio a livello annualmente sia occupato, con un'occupazione intenzionale è così calcolata:

$$P = \frac{365 \cdot (0,1250 + 0,0889 + 0,1195)}{3 \cdot 365} = 0,111 \frac{\text{eventi}}{\text{anno}}$$

La probabilità che il passaggio a livello risulti libero è il complementare della probabilità P:

$$1 - P = 1 - 0,111 = 0,889 \frac{\text{eventi}}{\text{anno}}$$

- **CASO 1: VELOCITÀ DI IMPATTO CON UN VEICOLO STRADALE**

Il primo caso studio di questa tipologia di analisi fa riferimento alla situazione in cui il macchinista inizia a frenare, ma l'impatto con il veicolo è inevitabile perché l'ostacolo è stato recepito visivamente troppo tardi per fermare in tempo il veicolo ferroviario in moto.

Si utilizza come velocità di soglia quella di 30 km/h al passaggio a livello, corrispondente alla marcia a vista. Lo studio si focalizza sull'identificazione della velocità massima del convoglio ferroviario, che per ipotesi si assume coincidente con la velocità massima della linea ferroviaria. Lo studio viene condotto con l'approccio di tipo cinematico utilizzato nella valutazione del

punto “ARRESTO DEL TRENO”. Le ipotesi di base sono le stesse del caso studio precedente, ma la velocità finale non è più nulla ma pari a 30 km/h. Impatti a velocità superiori alla soglia delimitata sono tendenzialmente più critici di quelli che avvengono a velocità inferiori ai 30 km/h, dove i danni riportati risultano essere contenuti e senza presenze di vittime, ma solo feriti.

- Caso stradale:

Velocità massima della linea per raggiungere al PL i 30 km/h				
Dati	Valore	Unità di misura	Valore	Unità di misura
t_m	3	s		
a	1,49	m/s^2		*a=Decelerazione
Δs	1104			
s_i	1104	m		
s_f	0	m		
v_f^2	900	$(km/h)^2$	69,44	$(m/s)^2$
v_f	30	km/h	8,33	m/s
a	0,3356	$1/(m/s^2)$		
b	3	s		
c	-1127,30	m		
v_i	55,13	m/s	198,5	km/h

- Caso pedoni/ciclisti:

Velocità massima della linea per raggiungere al PL i 30 km/h				
Dati	Valore	Unità di misura	Valore	Unità di misura
t_m	3	s		
a	1,49	m/s^2		*a=Decelerazione
Δs	894	m		
s_i	894	m		
s_f	0	m		
v_f^2	900	$(km/h)^2$	69,44	$(m/s)^2$
v_f	30	km/h	8,33	m/s
a	0,3356	$1/(m/s^2)$		
b	3	s		
c	-917,30	m		
v_i	49,47	m/s	178,11	km/h

Considerando i valori dei range relativi alle linee ferroviarie ai passaggi a livello nazionali (vedi Figura 9.3) si procede con un approccio di tipo probabilistico nella valutazione della probabilità che il veicolo che procede alla velocità iniziale, pari a quella della linea ferroviaria, riesca ad arrivare alla soglia dei 30 km/h al passaggio a livello.

- Caso stradale:

Calcolo la probabilità che il veicolo proceda con v al max di 30 km/h al PL	
n° tot PL	5637
PL [20; 80[km/h	112
PL [80; 120[km/h	1685
PL [120; 160[km/h	3383
PL [160; 300] km/h	457
P PL con v<160 km/h	0,92
P PL con v>160 km/h	0,08
Con velocità inferiore a 198,5 km/h riesce a raggiungere i 30 km/h al PL	
Blocco quattro considero una distribuzione uniforme	
Numero di PL nel quattro range con v al massimo di 198,5 km/h	126
Probabilità v< 30 km/h	0,941
Probabilità v>30 km/h	0,059

Solo quando la velocità iniziale del veicolo risulterà inferiore o uguale a 198,5 km/h sarà possibile per il veicolo ferroviario raggiungere al passaggio a livello la velocità soglia di 30 km/h, in caso contrario la velocità registrata sarà superiore e le conseguenze dell'impatto, se l'ostacolo è sul tracciato, saranno ingenti.

- Caso ciclisti/pedoni:

Calcolo la probabilità che il veicolo proceda con v al max di 30 km/h al PL	
n° tot PL	5637
PL [20; 80[km/h	112
PL [80; 120[km/h	1685
PL [120; 160[km/h	3383
PL [160;300] km/h	457
P PL con v<160 km/h	0,92
P PL con v>160 km/h	0,08
Con velocità inferiore a 178,11 km/h riesce a raggiungere i 30 km/h al PL	
Blocco quattro considero una distribuzione uniforme	
Numero di PL nel quarto range con v al massimo di 178,11 km/h	59
Probabilità v< 30 km/h	0,929
Probabilità v>30 km/h	0,071

Solo quando la velocità iniziale del veicolo risulterà inferiore o uguale a 178,11 km/h sarà possibile per il veicolo ferroviario raggiungere al passaggio a livello la velocità soglia di 30 km/h, in caso contrario la velocità registrata sarà superiore e come nel caso stradale le conseguenze dell'impatto saranno importanti, con possibile presenza di feriti gravi o morti.

- **CASO 2: VELOCITÀ DI IMPATTO CON UN VEICOLO STRADALE**

Il secondo caso studio di questa tipologia di analisi fa riferimento alla situazione in cui il macchinista non frena perché a causa di mal tempo, nebbia o disattenzione non ha percepito la presenza dell'ostacolo e continua a mantenere la velocità della linea nell'attraversare il PL.

In questo caso l'analisi ha un approccio probabilistico e si ipotizza che la velocità della linea al PL possa essere maggiore di 30 km/h o minore. Utilizzando i dati della Figura 9.2 si ha un approccio di tipo probabilistico per studiare la probabilità che l'impatto con un qualsiasi ostacolo, sia di tipo stradale che del tipo pedone/ciclista, avvenga alla velocità della linea superiore o inferiore ai 30 km/h.

Calcolo la probabilità che il veicolo proceda con v inferiore ai 30 k/h al PL	
n tot PL	5637
PL [20; 80[km/h	112
PL [80; 120[km/h	1685
PL [120; 160[km/h	3383
PL v>160 km/h	457
P PL con v<160	0,92
Velocità richiesta al PL [km/h]	30
Numero di PL primo range con v al massimo di 30 km/h	19
Probabilità v<30 km/h	0,00331
Probabilità v>30 km/h	0,99669

- **TIPOLOGIA DI VEICOLO STRADALE CHE OCCUPA IL PL**

Si è considerato il numero di veicoli immatricolati in tre anni successivi come da tabella che segue, in cui sono stati sintetizzati nella voce "veicoli totali" il numero totale di veicoli immatricolati nell'anno di riferimento senza distinguere la tipologia:

	Numero di veicoli totale immatricolati		
ANNO	2014	2015	2016
VEICOLI TOTALI	49150439	49488646	50181849

Lo step successivo è relativo all'immatricolazione di diverse tipologie di veicolo negli stessi anni. Si sintetizzano in una tabella i risultati annuali per tipologia di veicolo relativi al numero di immatricolazioni:

ANNO	2014	2015	2016
NUM. BUS	97914	97991	97817
NUM. AUTOCARRI MERCI	3930858	3943964	4018708
NUM. AUTOVETTURE	37080753	37351233	37876138

Si considera per questa analisi che la probabilità di avere una specifica classe di veicoli, sia autobus, autocarri merci ed autovetture, in circolazione sull'infrastruttura stradale, coincida con la probabilità che queste diverse tipologie di veicoli stradali possano essere localizzati sul tratto dell'infrastruttura stradale relativa alla zona del passaggio a livello. Con questa ipotesi si quantificano le singole probabilità come da tabella che segue:

ANNO	2014	2015	2016	PROB. ANNUALE MEDIA
PROB. BUS	0,001992	0,00198	0,001949	0,001974
PROB. AUTOCARRI MERCI	0,079976	0,079694	0,080083	0,079918
PROB. AUTOVETTURE	0,754434	0,754743	0,754778	0,754653

Nel caso relativo all'albero degli eventi di tipo pedoni/ciclisti non ci sono dati ufficiali che permettano di elaborare un'analisi separata tra i due ostacoli.

Si procede da questo punto in poi all'analisi dei valori di probabilità o frequenze di accadimento associati ai Pivotal Events relativi al caso studio con monitoraggio SIRIO LX ai passaggi a livello, sia nel caso di ostacolo di tipo stradale che del tipo pedone/ciclista.

• SISTEMA SIRIO LX ATTIVO

La casa produttrice del sistema di monitoraggio in tempo reale, per passaggi a livello dotati di protezione automatica integrativa in Italia, è la IDS S.p.A. (Ingegneria dei sistemi). Il suo prodotto SIRIO LX ha uno standard di sicurezza SIL 4 secondo la CENELEC.

A questo proposito si è valutata la probabilità di rottura annuale del sistema, parametro che viene usato nel relativo albero degli eventi per comprendere quante volte in un anno si ha la possibilità di incontrare un passaggio a livello con sistema PAI-PL che non sta funzionando.

L'approccio, come nel caso di altri sistemi tecnologici di cui si compone il passaggio a livello, vedi l'allarme di tipo sonoro o la barra TD 96/2, è il seguente:

Safety Integrity Level (SIL)	Average Probability of Failure on Demand (PFD _{avg})	Probability of Failure per Hour (PFH)	Risk Reduction Factor (RRF)
SIL 4	$10^{-5} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-4}$	$10^{-9} \leq \text{PFH} < 10^{-8}$	$10000 \leq \text{RRF} \leq 100000$
SIL 3	$10^{-4} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-3}$	$10^{-8} \leq \text{PFH} < 10^{-7}$	$1000 \leq \text{RRF} \leq 10000$
SIL 2	$10^{-3} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-2}$	$10^{-7} \leq \text{PFH} < 10^{-6}$	$100 \leq \text{RRF} \leq 1000$
SIL 1	$10^{-2} \leq \text{PFD}_{\text{avg}} < 10^{-1}$	$10^{-6} \leq \text{PFH} < 10^{-5}$	$10 \leq \text{RRF} \leq 100$

Il valore relativo alla probabilità di rottura oraria è compreso nel range:

$$10^{-9} \leq \text{PHF} < 10^{-8}$$

Per gli stessi motivi considerati nei casi esaminati in precedenza, si considera l'estremo destro dell'intervallo 10^{-8} per la valutazione della frequenza di rottura annuale del sistema di monitoraggio SIRIO LX per ogni passaggio a livello:

$$P = 10^{-8} \frac{\text{rottura}}{h} \cdot 24 h \cdot 365 gg = 8,76 \cdot 10^{-5} \frac{\text{rottura}}{\text{anno}}$$

La probabilità che il sistema funzioni correttamente è il complementare del valore P:

$$1 - P = (1 - 8,76 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{rottura}}{\text{anno}} = 0,9999 \frac{\text{rottura}}{\text{anno}}$$

La probabilità P e il suo complementare sono usati sia nel caso dell'albero con ostacolo di tipo stradale sia del tipo pedone/ciclista. Le probabilità fanno riferimento al singolo passaggio a livello.

Come si può notare dal valore numerico di P, la probabilità di avere una rottura annuale, è molto bassa, motivo per cui il sistema SIRIO LX garantisce elevatissimi standard di sicurezza tutto l'anno.

- **MACCHINISTA FRENA**

Quando il sistema di sicurezza del passaggio a livello consta del monitoraggio in tempo reale, l'evento identificato con l'azione frenante del macchinista, non viene più studiata con un approccio di tipo cinematico, perché in questo caso non si parla più di distanza di visibilità del singolo ostacolo lungo il tracciato. In questo caso gli occhi del conducente soprattutto a distanze importanti dal punto in cui si può localizzare un potenziale ostacolo, sono il sistema di rilevamento video e radar del SIRIO LX. Decade a questo proposito il tipo di analisi prima effettuata.

In questo caso studio si considera il metodo HEART, e la generica mansione da svolgere, perché l'attivazione del sistema frenante è sempre gestito dal macchinista e non dal sistema di monitoraggio al passaggio a livello, è identificata dal codice H "Rispondere correttamente ad un comando di sistema anche in presenza di un sistema automatizzato di supervisione che fornisce interpretazione accurata dello stato del sistema". Per stato del sistema si intende la libertà o meno dell'intersezione al passaggio a livello.

VALUTAZIONE ANALITICA		
P_0	0,000002	Probabilità nominale di errore: mansione H
CFE_2	11	Condizione favorevole all'errore: $n^{\circ}2$
CFE_{12}	4	Condizione favorevole all'errore: $n^{\circ}12$
AP_2	1	Fattore di peso
AP_{12}	1	Fattore di peso
PF_2	11	Fattore di performance
PF_{12}	4	Fattore di performance
P	$8,8 E - 05$	Probabilità di errore umano (Metodo HEART)
1-P	0,9999	Probabilità che non ci sia errore umano

I restanti rami dell'albero degli eventi sono analizzati come nel caso senza sistema di monitoraggio in tempo reale, sia nel caso di ostacolo di tipo stradale che del tipo pedone/ciclista.

La differenza da tenere in mente è che il sistema SIRIO LX non necessita della definizione ottica di distanza di visibilità, che è il punto chiave nell'analisi senza monitoraggio. Tramite il preavviso è possibile azionare la frenatura ancor prima di visualizzare l'ostacolo sul tracciato da parte del macchinista.

9.3 Appendice sezione C: risoluzione albero dei guasti e degli eventi

9.3.1 Risoluzione albero dei guasti

L'albero dei guasti riportato nel paragrafo 5.5.1, viene risolto considerando le operazioni descritte nel paragrafo 5.5.1 e considerando i valori analizzati nella sezione Appendice Sezione A.

I risultati sono sintetizzati in una tabella, dove oltre a riportare la denominazione dei vari eventi analizzati e relative frequenze di accadimento, si riportano le frequenze di accadimento dei gruppi composti da più eventi e si pesano i risultati ottenuti rispetto alla soluzione finale per comprendere l'aspetto che incide maggiormente nell'analisi.

RISOLUZIONE ALBERO DEI GUASTI AL PL					
DATI	VALORI SINGOLI CONTRIBUTI	UNITA' DI MISURA	BLOCCO	VALORI BLOCCO	PESO DEL BLOCCO
-	4,70E-01	eventi/pl/anno	Errore umano (G3)	0,47	8,02E-01
Vandalismo (E1)	6,41E-02	eventi/pl/anno	Guasto del PI (G4)	6,41E-02	1,09E-01
Rottura avvisatore luminoso (E2)	8,76E-03	eventi/pl/anno	Rottura del PI (G8)	6,72E-09	1,15E-08
Rottura barriera TD 96/2 (E3)	8,76E-05	eventi/pl/anno			0,00E+00
Rottura avvisatore acustico (E4)	8,76E-03	eventi/pl/anno			0,00E+00
-	9,74E-04	eventi/pl/anno	Guasto ferroviario (G5)	0,000974	1,66E-03
-	1,60E-02	eventi/pl/anno	Errore umano (G6)	0,016	2,73E-02
-	3,50E-02	eventi/pl/anno	Suicidio (G7)	0,035	5,97E-02

Frequenza di accadimento voce "VEICOLO STRADALE SUL PL"	5,35E-01	eventi/pl/anno
Frequenza di accadimento voce "PEDONE/CICLISTA SUL PL"	0,051	eventi/pl/anno
OSTACOLO AL PL	5,86E-01	eventi/pl/anno

Dall'analisi risulta interessante notare che il blocco che pesa maggiormente nel generare eventi pericolosi ai passaggi a livello deriva da errori di tipo umano, e nello specifico relativo ai veicoli stradali. L'infrazione del Codice della Strada (art.147) ha un'incidenza elevatissima nel tasso di incidentalità ai passaggi a livello.

Al contrario la rottura del passaggio a livello non è tra le cause primarie dell'incidentalità ai passaggi a livello, la frequenza di accadimento è molto contenuta, dell'ordine di 10^{-8} .

Da questa analisi si nota che il problema dell'incidentalità ai passaggi a livello non è dovuto al malfunzionamento dei sistemi di protezione che il gestore della rete fornisce lato strada, ma è l'utente della strada, che sorpassando questi sistemi di protezione, spesso ai limiti delle tempistiche di chiusura del passaggio a livello, resta intrappolato nel sedime ferroviario ai passaggi a livello.

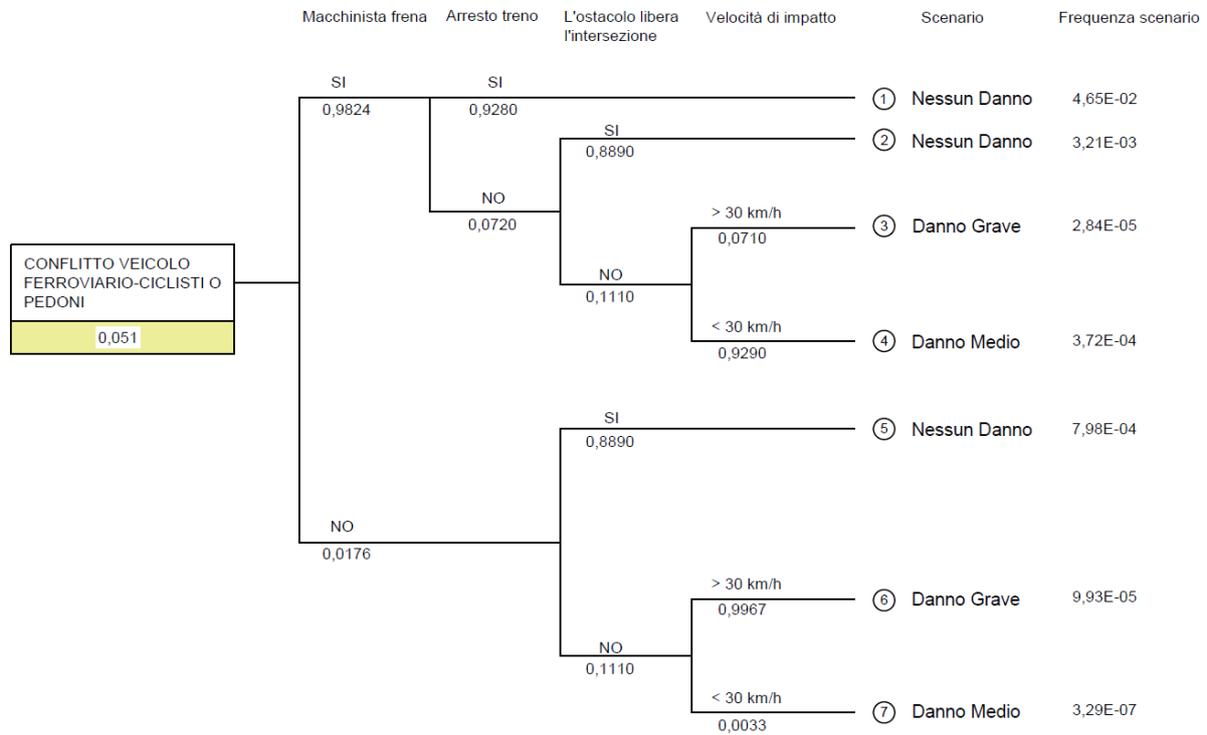
Nasce quindi la necessità di un sistema tecnologico che permetta di localizzare l'occupazione del passaggio a livello quando vi è una carenza del rispetto del Codice Stradale e non solo.

9.3.2 Risoluzione albero degli eventi

In questa parte di analisi vengono considerati gli alberi degli eventi riportati nel paragrafo 5.5.2. La risoluzione prevede l'applicazione della logica di Boole come spiegato nel paragrafo 5.5.2 ed i dati utilizzati sono studiati nella sezione B dell'appendice.

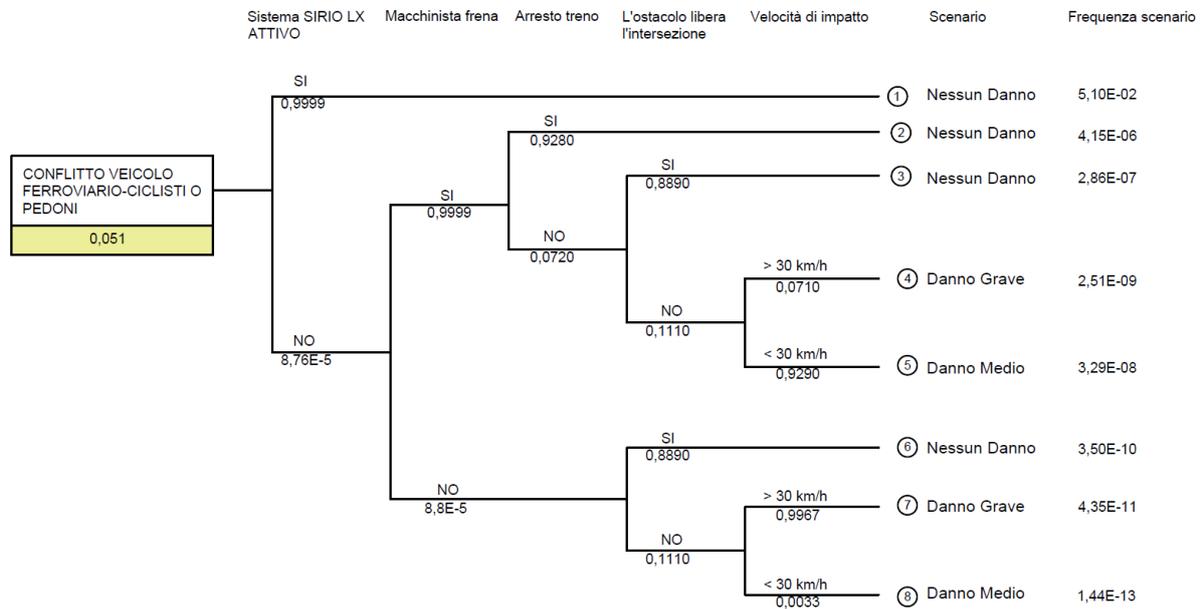
Si riportano nei paragrafi che seguono gli alberi degli eventi con i dati relativi ad ogni diramazione, l'analisi booleana completa e la classificazione della tipologia di danno come da tabella 5.1.

9.3.2.1 ALBERO DEGLI EVENTI CON OSTACOLO PEDONE/CICLISTA SENZA SIRIO LX



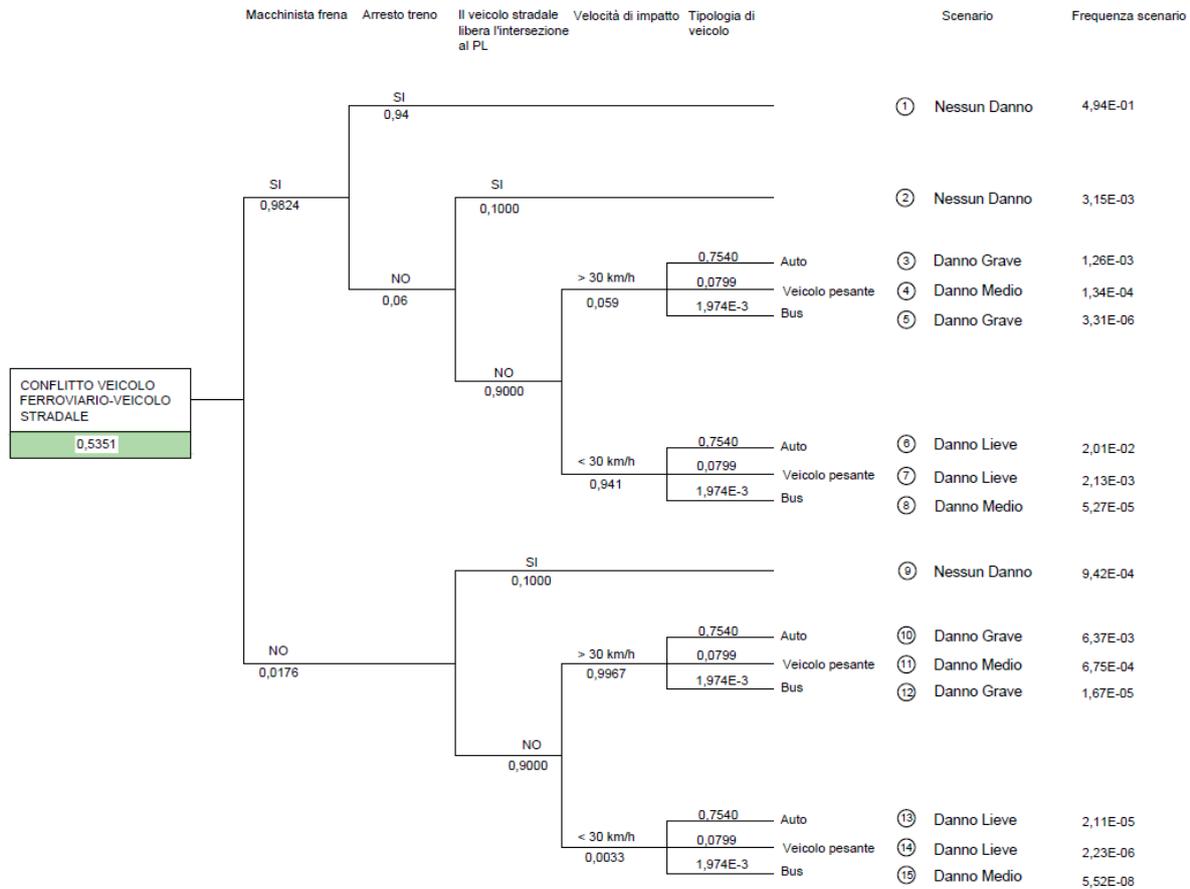
ANALISI PEDONI E CICLISTI SENZA SIRIO LX	
N. Percorso	Frequenza di accadimento
1	4,65E-02
2	3,21E-03
3	2,84E-05
4	3,72E-04
5	7,98E-04
6	9,93E-05
7	3,29E-07

9.3.2.2 ALBERO DEGLI EVENTI CON OSTACOLO PEDONE/CICLISTA CON SIRIO LX



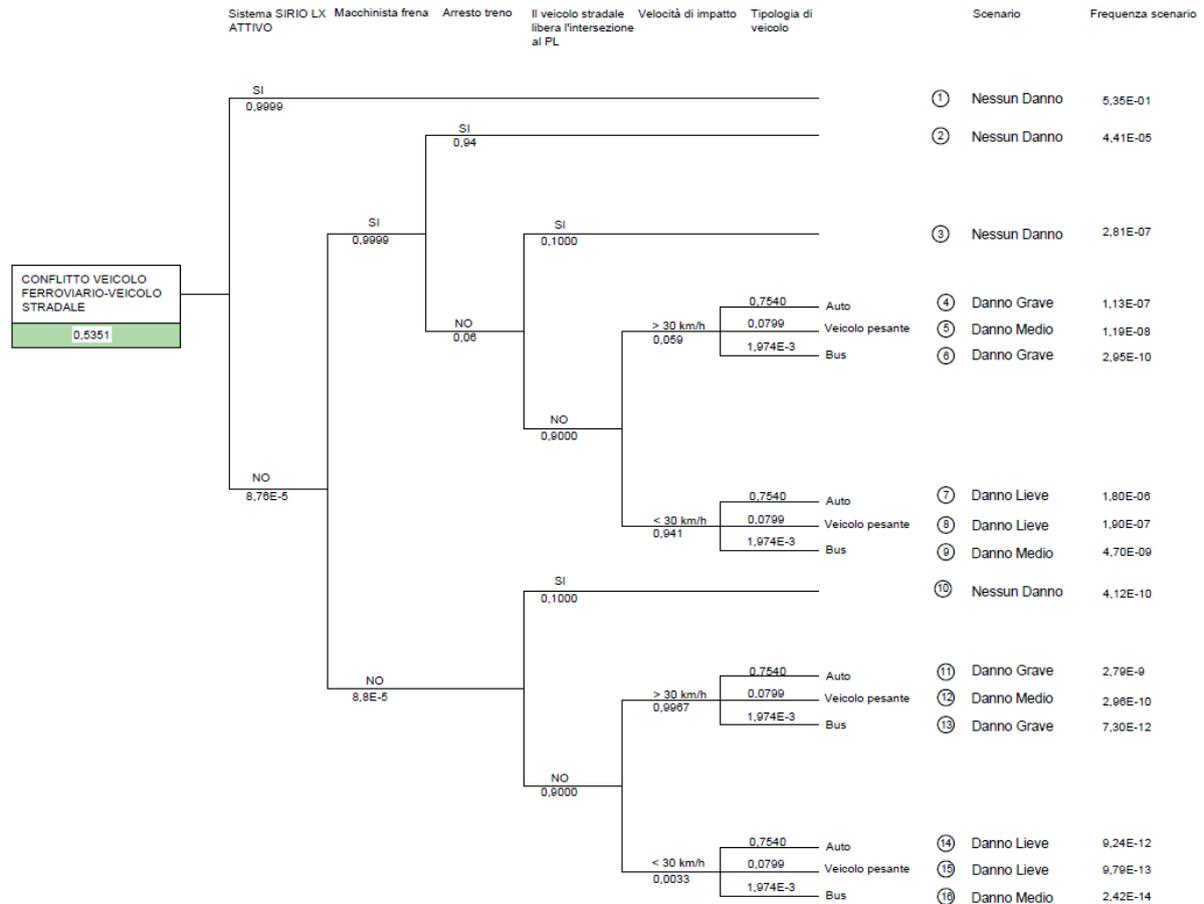
ANALISI PEDONI E CICLISTI CON SIRIO LX	
N. Percorso	Frequenza di accadimento
1	5,10E-02
2	4,15E-06
3	2,86E-07
4	2,51E-09
5	3,29E-08
6	3,50E-10
7	4,35E-11
8	1,44E-13

9.3.2.3 ALBERO DEGLI EVENTI CON OSTACOLO STRADALE SENZA SIRIO LX



ANALISI VEICOLI STRADALI SENZA SIRIO LX	
N. Percorso	Frequenza di accadimento
1	4,94E-01
2	3,15E-03
3	1,26E-03
4	1,34E-04
5	3,31E-06
6	2,01E-02
7	2,13E-03
8	5,27E-05
9	9,42E-04
10	6,37E-03
11	6,75E-04
12	1,67E-05
13	2,11E-05
14	2,23E-06
15	5,52E-08

9.3.2.4 ALBERO DEGLI EVENTI CON OSTACOLO STRADALE CON SIRIO LX



ANALISI VEICOLI STRADALI CON SIRIO LX	
N. Percorso	Frequenza di accadimento
1	5,35E-01
2	4,41E-05
3	2,81E-07
4	1,13E-07
5	1,19E-08
6	2,95E-10
7	1,80E-06
8	1,90E-07
9	4,70E-09
10	4,12E-10
11	2,79E-09
12	2,96E-10
13	7,30E-12
14	9,24E-12
15	9,79E-13
16	2,42E-14

9.4 Appendice sezione D: analisi di rischio con integrazione tabellare

9.4.1 Le resistenze al moto: formulazioni analitiche

La resistenza al moto totale di un veicolo ferroviario è espressa mediante il contributo di diverse tipologie di resistenza:

$$R_{tot} = R_o \pm R_i + R_c + R_a$$

I simboli appena utilizzati si riferiscono a:

1. R_o sono le resistenze ordinarie, comprende tutte le resistenze dovute agli attriti, al rotolamento e quella aerodinamica:

- $R_{rot} = \frac{2 \cdot P \cdot \delta}{D}$ con $r_{rot} = \frac{2 \cdot \delta}{D} \left[\frac{kg}{t} \right]$
- $R_{attr_{perni}} = 1000 \cdot f_{att} \cdot (P - Q) \cdot \frac{d}{D} \quad [kg]$
- $R_{aer} = \frac{1}{2} \cdot C_r \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad [N]$

2. R_i è la resistenza dovuta alla livelletta del tracciato:

- $R_i = 1000 \cdot P \cdot i \quad [kg]$ con $r_i = 1000 \cdot i$

3. R_{add} è la resistenza in galleria:

- $R_{add} = \varepsilon \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad [kg]$

4. R_c è la resistenza in curva:

- $R_c = f \cdot P \cdot \frac{c}{R}$

5. R_a è la resistenza d'inerzia:

- $R_a = 1000 \cdot \frac{P}{g} \cdot \frac{dv}{dt}$ con $r_a = \frac{1000}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad \left[\frac{kg}{t} \right]$

9.4.2 Integrazione tabellare: valutazione dello spazio di arresto in emergenza

L'integrazione tabellare è stata condotta con un passo di 1 km/h in termini di velocità, in questo lavoro di tesi il passo nelle tabelle che seguono sarà di 10 km/h con il fine di mostrare i risultati ottenuti. Si riporta il primo caso di studio, il veicolo ferroviario procede a 250 km/h e deve arrestarsi in condizioni di emergenza.

V [km/h]	v [m/s]	Δv [m/s]	v_m [m/s]	F [N]	R_{tot} [N]	R_{ord} [N]	R_{LIV} [N]	R_{curva} [N]
250	69,44	0,28	69,31	712'800	62'900	62'900	0	0
240	66,67	0,28	66,53	712'800	59'100	59'100	0	0
230	63,89	0,28	63,75	712'800	55'500	55'500	0	0
220	61,11	0,28	60,97	712'800	52'000	52'000	0	0
210	58,33	0,28	58,19	712'800	48'700	48'700	0	0
200	55,56	0,28	55,42	712'800	45'400	45'400	0	0
190	52,78	0,28	52,64	712'800	42'400	42'400	0	0
180	50,00	0,28	49,86	712'800	39'400	39'400	0	0
170	47,22	0,28	47,08	712'800	36'600	36'600	0	0
160	44,44	0,28	44,31	712'800	34'000	34'000	0	0
150	41,67	0,28	41,53	712'800	31'400	31'400	0	0
140	38,89	0,28	38,75	712'800	29'000	29'000	0	0
130	36,11	0,28	35,97	712'800	26'800	26'800	0	0
120	33,33	0,28	33,19	712'800	24'700	24'700	0	0
110	30,56	0,28	30,42	712'800	22'700	22'700	0	0
100	27,78	0,28	27,64	712'800	21'000	21'000	0	0
90	25,00	0,28	24,86	712'800	19'300	19'300	0	0
80	22,22	0,28	22,08	712'800	17'800	17'800	0	0
70	19,44	0,28	19,31	712'800	16'500	16'500	0	0
60	16,67	0,28	16,53	712'800	15'500	15'500	0	0
50	13,89	0,28	13,75	712'800	14'300	14'300	0	0
40	11,11	0,28	10,97	712'800	13'400	13'400	0	0
30	8,33	0,28	8,19	712'800	12'800	12'800	0	0
20	5,56	0,28	5,42	712'800	12'300	12'300	0	0
10	2,78	0,28	2,64	712'800	12'000	12'000	0	0
5	1,39	0,28	1,25	712'800	11'900	11'900	0	0
0	0,00	0,00	0,00	712'800	11'800	11'800	0	0

Nella pagina che segue si riporta la seconda parte dell'integrazione tabellare che è successiva a quella riportata in questa pagina.

F-R [N]	$d=\Delta v/\Delta t$ [m/s ²]	d_{media} [m/s ²]	Δt [s]	Δs [m]	Σt [s]	Σs [m]
775'700	1,528	1,527	0,182	12,61	0,182	12,61
771'900	1,520	1,520	0,183	12,16	2,006	136,21
768'300	1,513	1,513	0,184	11,71	3,838	255,32
764'800	1,506	1,506	0,184	11,25	5,679	369,86
761'500	1,500	1,499	0,185	10,78	7,528	479,78
758'200	1,493	1,493	0,186	10,31	9,385	585,01
755'200	1,487	1,487	0,187	9,83	11,250	685,50
752'200	1,481	1,481	0,188	9,35	13,122	781,18
749'400	1,476	1,476	0,188	8,86	15,001	872,02
746'800	1,471	1,470	0,189	8,37	16,887	957,94
744'200	1,466	1,465	0,190	7,87	18,780	1038,90
741'800	1,461	1,461	0,190	7,37	20,679	1114,86
739'600	1,457	1,456	0,191	6,86	22,584	1185,76
737'500	1,452	1,452	0,191	6,35	24,494	1251,56
735'500	1,448	1,448	0,192	5,83	26,410	1312,22
733'800	1,445	1,445	0,192	5,31	28,330	1367,70
732'100	1,442	1,442	0,193	4,79	30,255	1417,96
730'600	1,439	1,439	0,193	4,26	32,184	1462,97
729'300	1,436	1,436	0,193	3,73	34,117	1502,70
728'300	1,434	1,434	0,194	3,20	36,053	1537,11
727'100	1,432	1,432	0,194	2,67	37,991	1566,19
726'200	1,430	1,430	0,194	2,13	39,933	1589,91
725'600	1,429	1,429	0,194	1,59	41,876	1608,27
725'100	1,428	1,428	0,195	1,05	43,821	1621,23
724'800	1,427	1,427	0,195	0,51	45,766	1628,80
724'700	1,427	1,427	0,195	0,24	46,739	1630,55
724'600	1,427	0,713	0,000	0,00	0,000	1839,32

Alla velocità iniziale di 250 km/h è richiesto uno spazio di arresto in emergenza di 1839,32 m.

L'analisi viene svolta per tutte le velocità iniziali che vanno nel range [250-1] km/h, per ogni velocità iniziale si è trovato il corrispettivo spazio di arresto in condizioni di emergenza richiesto tramite l'integrazione tabellare. Si riportano i risultati con intervalli di 10 km/h nella tabella che segue:

V [km/h]	s_a [m]	d [m/s ²]
250	1839	1,48
240	1707	1,47
230	1579	1,47
220	1456	1,47
210	1337	1,46
200	1223	1,46
190	1114	1,46
180	1009	1,45
170	909	1,45
160	815	1,45
150	725	1,45
140	640	1,44
130	560	1,44
120	486	1,44
110	416	1,44
100	352	1,44
90	293	1,43
80	239	1,43
70	190	1,43
60	147	1,43
50	109	1,43
40	77	1,43
30	49	1,43
20	27	1,43
10	11	1,43
5	5	1,43

Per la valutazione degli spazi di arresto si è tenuto conto anche del contributo relativo al tempo di reazione del conducente e di intervento meccanico del freno t_m pari a 3 secondi.

9.4.3 Formula UIC: valutazione dello spazio di arresto in esercizio

Usando la formula analitica riportata nel paragrafo 5.6 di questa tesi ed aggiungendo a quest'ultima il contributo dato dal t_m , relativo al tempo di reazione del conducente e di intervento meccanico del freno si è realizzata per ogni velocità iniziale V_i lo studio dello spazio di arresto necessario in condizioni di normale esercizio ferroviario. I risultati sono riportati in tabella con un passo di 10 km/h.

V_i [km/h]	v_i [m/s]	Φ	s_a [m]	d [m/s ²]
250	69,44	0,087537	5131,12	0,49
240	66,67	0,086096	4662,15	0,50
230	63,89	0,084655	4221,12	0,51
220	61,11	0,083214	3807,26	0,52
210	58,33	0,081773	3419,78	0,52
200	55,56	0,080331	3057,91	0,53
190	52,78	0,07889	2720,87	0,54
180	50,00	0,077449	2407,88	0,55
170	47,22	0,076008	2118,17	0,56
160	44,44	0,074567	1850,95	0,58
150	41,67	0,073126	1605,45	0,59
140	38,89	0,071685	1380,89	0,60
130	36,11	0,070244	1176,49	0,61
120	33,33	0,068803	991,47	0,62
110	30,56	0,067362	825,06	0,64
100	27,78	0,06592	676,48	0,65
90	25,00	0,064479	544,94	0,66
80	22,22	0,063038	429,68	0,68
70	19,44	0,061597	329,91	0,70
60	16,67	0,060156	244,86	0,71
50	13,89	0,058715	173,74	0,73
40	11,11	0,057274	115,79	0,75
30	8,33	0,055833	70,21	0,77
20	5,56	0,054392	36,24	0,79
10	2,78	0,052951	13,10	0,81
5	1,39	0,05223	5,34	0,82

9.4.4 Risultati dell'analisi in assenza di sistema di monitoraggio SIRIO-LX

Di seguito si riportano in via tabellare i risultati mostrati nei grafici del paragrafo 5.6.1 di questa tesi:

V [km/h]	s _{a-emergenza} [m]	s _{a-esercizio} [m]	PEDONE	CICLISTA	BUS	AUTO	CAMION
250	1839,32	5131,12	ROSSO	ROSSO	GIALLO	ROSSO	GIALLO
240	1706,93	4662,15	ROSSO	ROSSO	GIALLO	ROSSO	GIALLO
230	1579,04	4221,12	ROSSO	ROSSO	GIALLO	ROSSO	GIALLO
220	1455,71	3807,26	ROSSO	ROSSO	GIALLO	ROSSO	GIALLO
210	1336,99	3419,78	ROSSO	ROSSO	GIALLO	ROSSO	GIALLO
200	1222,95	3057,91	ROSSO	ROSSO	GIALLO	ROSSO	GIALLO
190	1113,66	2720,87	ROSSO	GIALLO	GIALLO	ROSSO	GIALLO
180	1009,15	2407,88	ROSSO	GIALLO	VERDE	GIALLO	GIALLO
170	909,50	2118,17	ROSSO	GIALLO	VERDE	GIALLO	GIALLO
160	814,75	1850,95	ROSSO	GIALLO	VERDE	GIALLO	VERDE
150	724,96	1605,45	ROSSO	GIALLO	VERDE	GIALLO	VERDE
140	640,16	1380,89	ROSSO	GIALLO	VERDE	GIALLO	VERDE
130	560,42	1176,49	ROSSO	GIALLO	VERDE	GIALLO	VERDE
120	485,77	991,47	ROSSO	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
110	416,26	825,06	ROSSO	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
100	351,93	676,48	GIALLO	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
90	292,82	544,94	GIALLO	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
80	238,95	429,68	GIALLO	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
70	190,36	329,91	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
60	147,08	244,86	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
50	109,13	173,74	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
40	76,54	115,79	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
30	49,31	70,21	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
20	27,48	36,24	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
10	11,04	13,10	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE
5	4,84	5,34	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE	VERDE

9.4.5 Risultati dell'analisi con sistema di monitoraggio SIRIO-LX

I risultati ottenuti con l'analisi tabellare precedente e con la formulazione UIC non sono utilizzati in questa analisi. I valori utilizzati, con le stesse modalità di realizzazione tabellare, prevedono l'utilizzo di un tempo di reazione del macchinista e di azionamento meccanico non più di 3 secondi, ma è diminuito, ed ai fini dell'analisi si è considerato il valore 2 secondi. Si è potuta a questo punto definire l'entità del rischio associato al passaggio a livello dotato di protezione automatica integrativa con monitoraggio del tipo SIRIO-LX.

Per la costruzione dello spazio di "arresto" del veicolo ferroviario al momento del preavviso, coincidente con la distanza che il veicolo ha dal passaggio a livello sono stati usati alcuni parametri tra i quali, il tempo di chiusura dei passaggi a livello nazionali.

I dati sono forniti dal documento del *Ministero delle infrastrutture e dei trasporti* denominato "Studio analitico sul tema della incidentalità ferroviaria in corrispondenza dei passaggi a livello".

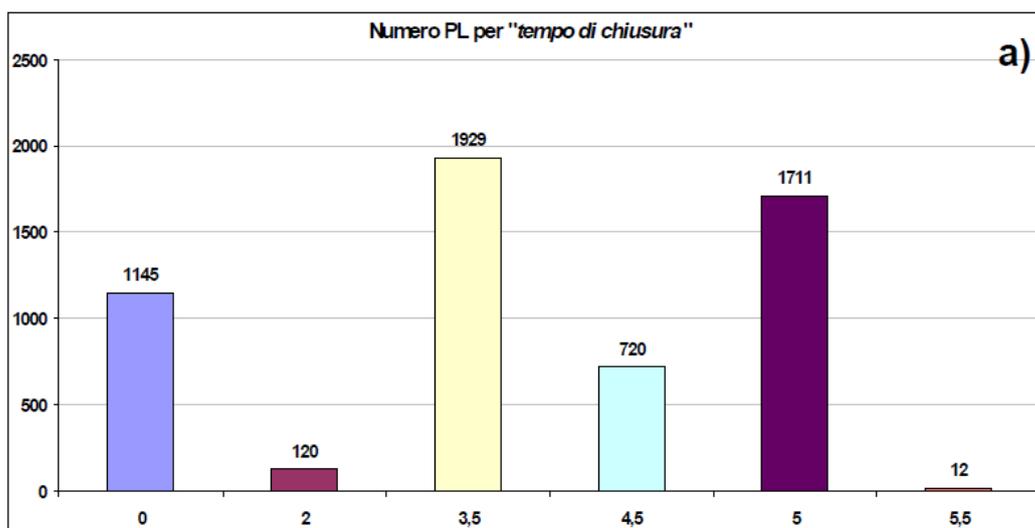


Figura 9.4 Classificazione dei PL per tempo di chiusura in minuti.

Si è effettuata una media pesata a partire dai dati riportati in figura 9.4 con l'obiettivo di identificare il valore medio di apertura del passaggio a livello.

	n.PL	$t_{chiusuraPL}$ [min]
	120	2
	1929	3,5
	720	4,5
	1711	5
TOT	4480	
Media pesata $t_{chiusuraPL}$	4,19	[min]
Media pesata $t_{chiusuraPL}$	252	[s]

Ulteriori dati sono il tempo di reazione-comunicazione del sistema di monitoraggio SIRIO-LX, il tempo di chiusura della barriera del tipo TD96/2, la lunghezza del treno ETR 460, tutti questi dati sono stati reperiti grazie alle schede tecniche dei sistemi e del modello di treno in analisi.

Analisi dello spazio di arresto con SIRIO LX		
$t_{chiusuraPL}$	[s]	252
$t_{SIRIOLX}$	[s]	3
$t_{TD96/2apertura}$	[s]	15

Per l'analisi si sono considerate le velocità nel range [0-250] km/h con un passo di 1 km/h.

Si considera il tempo necessario al treno per attraversare il passaggio a livello valutato come di seguito, per ogni velocità V_i della linea:

$$t_{passaggio\ treno} = \frac{L_{treno}}{v_{linea}}$$

Si considera un ulteriore tempo, quello che intercorre tra l'abbassamento totale della barriera e l'impatto con il potenziale ostacolo lungo il tracciato:

$$t_x = t_{chiusuraPL} - t_{passaggio\ treno} - t_{TD96/2apertura} + t_{SIRIOLX}$$

Lo spazio di "arresto" o posizione del treno rispetto al passaggio a livello viene calcolata come il prodotto tra la velocità della linea al momento della ricezione del segnale da parte del sistema di monitoraggio ed il tempo t_x .

Dallo studio emerge che la posizione del treno al momento della ricezione dell'avviso relativo all'ingombro della linea da parte di un ostacolo e quindi il momento in cui il macchinista inizia

a frenare è sempre sufficientemente abbondante rispetto allo spazio di arresto in condizioni di esercizio e di emergenza richieste per la tipologia di veicolo considerato.

Si riporta in una tabella con velocità della linea con passo 10 km/h i risultati ottenuti dall'analisi.

V_{Linea} [km/h]	v_{Linea} [m/s]	$S_{\text{a-emergenza}}$ [m]	$S_{\text{a-esercizio}}$ [m]	L_{ETR460} [m]	$t_{\text{passaggiotreno}}$ [s]	t_x [s]	$S_{\text{a SIRIO LX}}$	Livello di sicurezza
250	69,44	1770	5062	236,60	3,41	236,20	16402,63	VERDE
240	66,67	1640	4595	236,60	3,55	236,06	15737,06	VERDE
230	63,89	1515	4157	236,60	3,70	235,90	15071,49	VERDE
220	61,11	1395	3746	236,60	3,87	235,73	14405,92	VERDE
210	58,33	1279	3361	236,60	4,06	235,55	13740,35	VERDE
200	55,56	1167	3002	236,60	4,26	235,35	13074,78	VERDE
190	52,78	1061	2668	236,60	4,48	235,12	12409,21	VERDE
180	50,00	959	2358	236,60	4,73	234,87	11743,65	VERDE
170	47,22	862	2071	236,60	5,01	234,59	11078,08	VERDE
160	44,44	770	1807	236,60	5,32	234,28	10412,51	VERDE
150	41,67	683	1564	236,60	5,68	233,93	9746,94	VERDE
140	38,89	601	1342	236,60	6,08	233,52	9081,37	VERDE
130	36,11	524	1140	236,60	6,55	233,05	8415,80	VERDE
120	33,33	452	958	236,60	7,10	232,51	7750,23	VERDE
110	30,56	386	795	236,60	7,74	231,86	7084,66	VERDE
100	27,78	324	649	236,60	8,52	231,09	6419,09	VERDE
90	25,00	268	520	236,60	9,46	230,14	5753,52	VERDE
80	22,22	217	407	236,60	10,65	228,96	5087,95	VERDE
70	19,44	171	310	236,60	12,17	227,44	4422,38	VERDE
60	16,67	130	228	236,60	14,20	225,41	3756,82	VERDE
50	13,89	95	160	236,60	17,04	222,57	3091,25	VERDE
40	11,11	65	105	236,60	21,29	218,31	2425,68	VERDE
30	8,33	41	62	236,60	28,39	211,21	1760,11	VERDE
20	5,56	22	31	236,60	42,59	197,02	1094,54	VERDE
10	2,78	8	10	236,60	85,18	154,43	428,97	VERDE
5	1,39	3	4	236,60	170,35	69,25	96,18	VERDE

10 Allegati

10.1 Allegato 1

Tabella relativa alla valutazione della resistenza ordinaria specifica.

$$r_{ord} = a + b V^2 \text{ [Kg/tonn]}$$

$2.5+0.00030 V^2$	Locomotori elettrici veloci
$3.0+0.00050 V^2$	Locomotori elettrici merci
$2.5+0.00025 V^2$	Vetture passeggeri a carrelli
$2.5+0.00033 V^2$	Vetture passeggeri a 2 assi
$2.5+0.00040 V^2$	Carri merci carichi
$2.5+0.0010 V^2$	Carri merci scarichi
$3.5+0.6(S/L) [(V+12)/10]^2$	Locomotori Diesel elettrici (S sezione area frontale, L peso totale in t)
$3.0+0.0006 V^2$	Automotrici con perni e cuscinetti
$1.5+0.0006 V^2$	Automotrici con cuscinetti a sfera
$2.5+0.00040 V^2$	Valore medio per convoglio ferroviario
$3.2+0.034V+0.00047 V^2$	Convoglio metropolitano
+30%	Per scartamento ridotto
$7\div 9 \text{ kg/t}$	Tramvie con $V < 50 \text{ km/h}$

10.2 Allegato 2

Condizioni favorevoli all'errore HEART (Kirwan, 1994):

	Condizioni favorevoli all'errore	CFE
1	Poca familiarità con una situazione nuova o infrequente, potenzialmente importante	17
2	Mancanza di tempo per il rilevamento o la correzione dell'errore	11
3	Segnali disturbati o confusi	10
4	Strumenti di annullamento dell'informazione o per poterla non considerare	9
5	Nessun mezzo per far arrivare, fisicamente o funzionalmente, l'informazione all'operatore	9
6	Interfaccia di sistema/utente inadeguata	8
7	Nessun chiaro mezzo per recuperare un'azione involontaria	8
8	Sovraccarico di informazioni	6
9	Tecnica dimenticata	6
10	Trasferimento di informazioni da un compito ad un altro	5
11	Poca chiarezza negli standard relativi alle performance attese	5
12	Discrepanza tra il rischio reale e quello percepito	4
13	Feed-back inadeguato, ambiguo o non contestualizzato	4
14	Nessuna conferma chiara/diretta/tempestiva dal sistema dell'azione voluta	4
15	Inesperienza	3
16	Scarse istruzioni o procedure	3
17	Controllo o analisi degli output poco o del tutto non oggettivi	3

Probabilità nominale di base nel metodo HEART (Kirwan, 1994):

Generiche mansioni		P ₀
A	Completamente nuova, eseguita velocemente senza la reale idea delle possibili conseguenze	0,55
B	Cambiare/riportare il sistema in un nuovo stato/nello stato iniziale con un solo tentativo senza procedure di controllo	0,26
C	Compito complesso che richiede un elevato livello di comprensione e competenza	0,16
D	Compito abbastanza semplice eseguito rapidamente o con poca attenzione	0,09
E	Compito routinario che richiede un non elevato livello di competenze	0,02
F	Cambiare/riportare il sistema nello stato iniziale o in un nuovo stato seguendo procedure + controllo	0,003
G	Compito completamente familiare, ben progettato, routinario, che ricorre diverse volte per ora, eseguito secondo i migliori standard, da persone molto motivate, ben formate e con esperienza, completamente consapevoli delle implicazioni di un esito negativo, con il tempo necessario per correggere un potenziale errore ma senza aiuti significativi	0,0004
H	Rispondere correttamente ad un comando di sistema anche in presenza di un sistema automatizzato di supervisione che fornisce interpretazione accurata dello stato del sistema	0,000002
M	Compito per il quale non è disponibile alcuna descrizione	0,03

10.3 Allegato 3

Modalità di monitoraggio relativo ad eventi naturali:

Cause	Modalità di monitoraggio	Fattori/criteri di Interesse per impatto	Documentazione di riferimento
FRANA/ SMOTTAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> - Estensimetri, - Fessurimetri, - Distometri, - Mire Ottiche; - Tubi Inclinoetrici, - Inclinoetri Fissi, - Estensimetri Profondi; - Piezometri; - Antenne GPS, - Sistemi Topografici; - Radiazione Infrarossa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apertura o allargamento delle fessure sulla massicciata - Rottura o deformazioni delle rotaie o variazione dello scartamento - Rigonfiamenti del terreno - Inclinazioni o traslazioni di pali per supporto dei cavi di tensionamento - Distanza della ferrovia dal versante - Quantità di materiale naturale o blocchi rocciosi 	<ul style="list-style-type: none"> - Documenti dell'ANSF - Carte geologiche dell'Arpa - Carte geologiche della Regione - Linee guida e banche dati presenti sui siti di RFI, Arpa e della Regione - Evoluzione dei fenomeni sul sito di Ispra Ambiente
ALLAGAMENTO/ INONDAZIONE	<ul style="list-style-type: none"> - Pluviometri, - Termometri, - Idrometri - Sistemi di Videosorveglianza fluviale, - Pali con Soglie idrometriche 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento livello idrico di un corso d'acqua - Aumento della portata di un corso d'acqua o della sua velocità di movimento - Quantità di pioggia caduta - Aree interessate da esondazione del corso d'acqua - Distanza della ferrovia da corso d'acqua 	<ul style="list-style-type: none"> - Documenti dell'ANSF - Carte alluvionali dell'Arpa - Dati eventi alluvionali su sito di Ispra Ambiente - Linee guida e banche dati
TERREMOTO	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema di Sensori per rilevare sismi in arrivo - Uso di strumentazioni per rilevare distorsioni dei binari o spostamenti della massicciata - Controlli specifici sui ponti ferroviari 	<ul style="list-style-type: none"> - Apertura delle fratture dopo la scossa sismica su rotaie o sulla massicciata - Spostamenti trasversali - Variazione dello scartamento - Rotture di sottoservizi - Nascita di fessure o deformazioni su pile o campate di ponti ferroviari - Classificazione delle zone 	<ul style="list-style-type: none"> - Evoluzione dei fenomeni sul sito dell'IGV - Linee guida e banche dati

10.4 Allegato 4

10.4.1 Citroën C3 caratteristiche dimensionali [mm] (da automobiledimension.com)



10.4.2 Dimensioni camion di tipo motrice e bilico in metri [o]



MOTRICE

Dimensioni (LxLxH): 8,00x2,44x2,60 Capacità in Q.li: 50/100

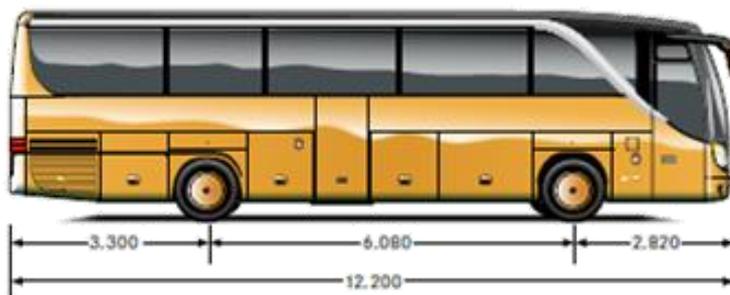


BILICO

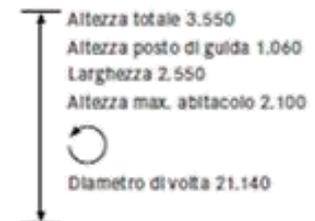
Dimensioni (LxLxH): 13,60 x 2,44 x 2,60 Capacità in Q.li: 240

10.4.3 Autobus Setra di tipo extraurbano [mm] (da scheda tecnica compagnia Setra)

S 415 HD



Tutte le misure in mm.



10.4.4 Dimensioni di un parcheggio per biciclette (da scheda tecnica Intelligent Energy Europe) [p]

