



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2023/2024

Sessione di Laurea Novembre 2024

IL CANTIERE E LA VIABILITÀ AUTOSTRADALE

Proposta di un indice di esposizione per la valutazione
del rischio interferenziale

Relatore:

Prof. Giuseppe Chiappinelli

Correlatore:

Ing. Giorgia Rizzo

Candidata:

Elena Barra

A chi è sempre stato al mio fianco.

A chi non c'è più, ma resta nel cuore.

A chi è qui da poco, ma sembra esserci da sempre.

INDICE

SOMMARIO	9
ABSTRACT	10
INTRODUZIONE.....	11
1 INCIDENTI STRADALI E STRATEGIE DI CONTRASTO	13
1.1 STRATEGIE PER LA RIDUZIONE DEGLI INCIDENTI NEL MONDO	13
1.2 STRATEGIE PER LA RIDUZIONE DEGLI INCIDENTI IN EUROPA	15
1.3 STRATEGIE PER LA RIDUZIONE DEGLI INCIDENTI IN ITALIA.....	17
1.4 INCIDENTALITÀ STRADALE IN ITALIA	19
1.5 LA SICUREZZA DEI CANTIERI STRADALI	21
1.5.1 LA SITUAZIONE IN AMERICA	22
1.5.2 LA SITUAZIONE IN SPAGNA.....	24
1.5.3 LA SITUAZIONE IN GERMANIA	24
1.5.4 LA SITUAZIONE IN FRANCIA	25
1.5.5 LA SITUAZIONE IN ITALIA.....	26
2 IL CANTIERE AUTOSTRADALE.....	29
2.1 SEGNALETICA TEMPORANEA.....	35
2.2 BARRIERE STRADALI.....	47
2.2.1 PROVE D'URTO E MARCATURA CE	49
2.2.2 DEFLESSIONE DINAMICA, LARGHEZZA OPERATIVA ED INTRUSIONE	51
2.2.3 BARRIERE RIGIDE	52
2.2.4 DISPOSITIVI INNOVATIVI.....	58
3 SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI.....	63
3.1 ANALISI DELLA NORMATIVA DI RIFERIMENTO	64

3.2	TESTO UNICO PER LA SICUREZZA DEI LAVORATORI	65
3.3	CONCETTO DI RISCHIO E DOCUMENTI DI CANTIERE	66
3.4	ANALISI DEI RISCHI NEI CANTIERI AUTOSTRADALI	71
3.5	HIGHWAY SAFETY MANUAL E IL METODO PREDITTIVO.....	73
4	VALUTAZIONE DEL RISCHIO INTERFERENZIALE TRA CANTIERE E TRAFFICO AUTOSTRADALE	81
4.1	TRENDS DELLE INTRUSIONI NELLE ZONE DI LAVORO.....	81
4.2	FATTORI CHE INFLUENZANO LA SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI.....	84
4.2.1	LAYOUT DI CANTIERE.....	85
4.2.2	DURATA, LUNGHEZZA E TRAFFICO GIORNALIERO MEDIO	89
4.2.3	LA VELOCITÀ.....	96
4.2.4	CURVE PLANIMETRICHE	98
4.2.5	LARGHEZZA CORSIE	102
4.2.6	RACCORDI ALTIMETRICI	103
4.2.7	DEGRADO DELLA PAVIMENTAZIONE.....	104
4.2.8	LE CONDIZIONI METEOROLOGICHE	106
4.3	RIASSUNTO DEI RISULTATI.....	109
5	SVILUPPO DI UN MODELLO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO INTERFERENZIALE.....	113
5.1	SCELTA DEI COEFFICIENTI DI PONDERAZIONE, X_i	114
5.2	COEFFICIENTI DI RISCHIO C_i	116
5.2.1	COEFFICIENTI LEGATI AL LAYOUT (C_{LAYOUT}):	117
5.2.2	COEFFICIENTE LEGATO ALLA DURATA (C_{DURATA}). 122	
5.2.3	COEFFICIENTE LEGATO ALLA LUNGHEZZA ($C_{LUNGHEZZA}$).....	124
5.2.4	COEFFICIENTE LEGATO AL TRAFFICO ($C_{TRAFFICO}$) 125	

5.2.5	COEFFICIENTE LEGATO ALLA PRESENZA DELLE CURVE PLANIMETRICHE (C_CURVE)	127
5.2.6	COEFFICIENTE LEGATO ALLE CONDIZIONI DELLA PAVIMENTAZIONE(C_PAVIMENTAZIONE)	130
5.3	INDIVIDUAZIONE DELLE CLASSI DI RISCHIO	133
5.4	CASO STUDIO.....	138
6	SOLUZIONI PER IMPLEMENTARE LA SICUREZZA	141
6.1	DISPOSITIVI PER IL LIVELLO DI RISCHIO BASSO.....	143
6.2	CONTROMISURE PER IL LIVELLO DI RISCHIO MEDIO	144
6.2.1	PANNELLI A MESSAGGIO VARIABILE	145
6.2.2	SISTEMI DI CONTROLLO DELLA VELOCITÀ	148
6.2.3	CORRETTO DIMENSIONAMENTO DELLA BUFFER AREA	151
6.2.4	LUCI DI AVVISO SEQUENZIALI	153
6.3	CONTROMISURE PER IL LIVELLO DI RISCHIO ALTO	155
6.3.1	SISTEMI DI AVVISO DI CODA.....	156
6.3.2	SISTEMI DI ALLARME PER L'INTRUSIONE.....	158
6.4	CONTROMISURE PER IL LIVELLO DI RISCHIO CRITICO.....	161
	CONCLUSIONI	163
	APPENDICE A	165
	INDICE DELLE FIGURE.....	179
	INDICE DELLE TABELLE.....	183
	INDICE DELLE EQUAZIONI	185
	RIFERIMENTI	187

SOMMARIO

Il presente lavoro di tesi si propone di identificare i principali fattori che influenzano il rischio interferenziale derivante dall'interazione tra le attività di cantiere autostradale e il traffico veicolare, al fine di adottare misure efficaci per la tutela di tutti gli operatori coinvolti.

Per raggiungere tale obiettivo è stata condotta un'analisi preliminare delle disposizioni legislative vigenti per la delimitazione e la segnalazione delle aree di lavoro, seguita da un'approfondita valutazione dei rischi nei cantieri stradali, con particolare attenzione al rischio di intrusione veicolare, una delle minacce più rilevanti per la sicurezza in queste aree.

Per valutare il rischio di intrusione, la tesi propone un modello basato su diversi parametri chiave, quali il layout del cantiere, la sua durata e lunghezza, il traffico medio giornaliero, le caratteristiche geometriche del tracciato e le condizioni della pavimentazione e meteorologiche. Ogni parametro viene ponderato in base alla sua importanza, permettendo così di calcolare un indice di esposizione complessivo che rappresenta il livello di rischio intrusione all'interno del cantiere.

Sulla base del valore assunto dall'indice di esposizione, si individuano quattro fasce di rischio, ciascuna associata a specifiche misure di sicurezza proporzionali alla gravità del rischio individuato. Questo modello si pone l'intento di standardizzare l'uso di adeguate misure preventive al fine di supportare i responsabili della sicurezza nella corretta gestione dei rischi e garantire una protezione sufficiente sia ai lavoratori sia agli utenti della strada.

ABSTRACT

This thesis aims to identify the key factors that influence interference risk arising from the interaction between highway construction site and vehicular traffic. The objective is to implement effective measures to protect all operators involved.

To achieve this, a preliminary analysis of current legislation regarding the delimitation and marking of work areas was conducted, followed by an in-depth assessment of risks specific to road construction sites, with particular focus on vehicular intrusion risk, one of the most significant safety threats in these environments.

To assess intrusion risk, this thesis presents a model based on several key parameters, including construction site layout, duration and length, average daily traffic, road geometry, as well as pavement and weather conditions. Each parameter is weighted according to its importance, enabling the calculation of an overall exposure index that reflects the level of intrusion risk within the construction site.

Based on the exposure index value, four risk levels are defined, each linked to specific safety measures proportional to the identified risk severity. This model seeks to standardize the application of preventive measures, in order to support safety managers in effective risk management and to ensure adequate protection for both workers and road users.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi nasce dalla collaborazione tra il Politecnico di Torino e Tecne S.P.A., società del Gruppo Autostrade per l'Italia (ASPI), impegnata nella gestione e manutenzione della rete autostradale italiana. Tra i temi centrali affrontati vi è la gestione della sicurezza nei cantieri autostradali, una sfida resa ancor più complessa dalla dinamicità del traffico e dalle caratteristiche intrinseche delle lavorazioni stradali. La presenza di cantieri temporanei lungo le arterie autostradali comporta infatti rischi significativi, sia per i lavoratori che per gli utenti della strada, aumentando la probabilità di incidenti. Per questo motivo, è fondamentale adottare misure di sicurezza adeguate che mitigano tali rischi e garantiscano un equilibrio tra l'operatività del cantiere e la sicurezza stradale.

Lo studio si è concentrato sull'analisi del tasso di incidentalità nei cantieri autostradali, con particolare attenzione alle aree di lavoro che presentano maggiori rischi, andando a valutare l'efficacia della segnaletica temporanea utilizzata. L'obiettivo principale è identificare i fattori di rischio associati all'interazione tra cantieri e traffico veicolare al fine di adottare misure volte a rafforzare la protezione dei lavoratori e aumentare la sicurezza degli utenti della strada.

Questo lavoro mira a colmare le lacune normative nella gestione del rischio intrusione nei cantieri autostradali. I Decreti Ministeriali del 22 gennaio 2019 e del 10 luglio 2002 non offrono indicazioni chiare sulla protezione fisica dei cantieri stradali e non forniscono istruzioni specifiche riguardo all'uso di dispositivi volti a ridurre il rischio di intrusione. In questo contesto di incertezza normativa, il Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione (CSP) ha la facoltà, a suo insindacabile giudizio, di stabilire le prescrizioni per i dispositivi di sicurezza da adottare e di valutare la necessità di installare barriere temporanee. Sebbene questa libertà di scelta possa permettere l'adozione di soluzioni più adeguate e personalizzate alle specifiche circostanze di ciascun cantiere, essa introduce anche un grado di discrezionalità nelle decisioni operative che potrebbe rivelarsi problematica.

Particolare attenzione è stata posta all'analisi dell'attuale quadro normativo, che integra le disposizioni del Testo Unico sulla Sicurezza e le metodologie predittive descritte nel

Highway Safety Manual (HSM). In questo modo è stato possibile identificare le principali criticità e i fattori di rischio più rilevanti, ponendo le basi per un'accurata valutazione della sicurezza dei cantieri. L'integrazione di queste fonti normative e metodologiche, ha reso possibile proporre un approccio più completo alla gestione della sicurezza che consideri sia gli aspetti normativi che le pratiche predittive e preventive.

Lo studio focalizza l'attenzione sull'analisi dei cantieri autostradali caratterizzati da condizioni standard, escludendo deliberatamente quelli già riconosciuti come particolarmente pericolosi. In particolare, non verranno considerati interventi in spartitraffico, lavori in bordo ponte e operazioni su muro di sostegno con rimozione delle barriere esistenti, poiché tali lavorazioni comportano rischi elevati e, per legge, richiedono l'installazione di barriere New Jersey per garantire la massima sicurezza. In questo modo è possibile concentrare l'analisi su situazioni più comuni e gestibili, con l'obiettivo di elaborare linee guida pratiche per migliorare la sicurezza dei cantieri autostradali in condizioni standard.

Per valutare il livello di pericolosità dei cantieri autostradali, si propone l'uso di un indice di esposizione al rischio, costruito considerando una serie di fattori, quali la configurazione del cantiere, la durata e la lunghezza dei lavori, i livelli di traffico e la sua composizione, lo stato della pavimentazione e le condizioni metereologiche.

Attraverso tale indice sarà possibile classificare i cantieri in quattro classi di rischio differenti e per ognuna si propongono specifiche misure di mitigazione dei rischi come il rafforzamento della segnaletica temporanea, l'adozione di sistemi di controllo della velocità o l'utilizzo di dispositivi innovativi per la protezione dei lavoratori. Nelle situazioni di maggiore rischio, si considera anche l'installazione di barriere di protezione che offrono una protezione fisica efficace contro l'intrusione dei veicoli nelle aree di lavoro.

In conclusione, attraverso questo approccio, si intende fornire un metodo il più possibile standardizzato per migliorare la gestione della sicurezza nei cantieri autostradali, al fine di ridurre le casistiche in cui la scelta delle procedure da adottare è affidata alla discrezionalità del CSP.

1 INCIDENTI STRADALI E STRATEGIE DI CONTRASTO

Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità [1], un incidente stradale è definito come un evento improvviso ed inaspettato che avviene su una strada pubblica o privata aperta alla circolazione, che coinvolge almeno un veicolo in movimento e che può avere conseguenze sulla salute di chi vi è coinvolto. Gli incidenti stradali comprendono collisioni tra veicoli, scontri con pedoni o ciclisti, uscite di strada, ribaltamenti e altre tipologie di impatto.

Gli incidenti stradali rappresentano, ogni anno, una delle principali cause di morte e feriti permanenti in tutto il mondo, divenendo pertanto una priorità assoluta per la sanità pubblica. Per ridurre al minimo gli impatti di questa grave problematica sociale è necessario utilizzare un approccio integrato che combini infrastrutture sicure, formazione dei lavoratori, applicazione delle leggi e innovazione tecnologica.

1.1 STRATEGIE PER LA RIDUZIONE DEGLI INCIDENTI NEL MONDO

Vista la rilevanza del fenomeno e le numerose conseguenze associate, negli ultimi anni l'individuazione e l'implementazione di strategie efficaci per migliorare la sicurezza stradale hanno ricevuto un notevole impulso grazie alla "internazionalizzazione" della questione. Un contributo significativo a questo processo è stato dato dall'*Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile* adottata dalle Nazioni Unite nel 2015. Essa rappresenta un piano d'azione globale ed è costituita da 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) e 169 targets. Attraverso questi obiettivi si vuole promuovere uno sviluppo sostenibile che consideri aspetti economici, sociali e ambientali in modo olistico, trattandoli come interconnessi piuttosto che concentrandosi su un singolo settore alla volta [2].

Gli Obiettivi 3.6 e 11.2 evidenziano come la sicurezza stradale sia un fondamento essenziale per assicurare una vita sana, il benessere e lo sviluppo di città inclusive, sicure e sostenibili. In particolare essi prevedono di:

- dimezzare, entro il 2020, il numero globale di morti e feriti a causa dagli incidenti stradali rispetto al 2011 (obiettivo 3.6).

- assicurare a tutti, entro il 2030, l'accesso a sistemi di trasporto sicuri, economici e sostenibili, migliorando la sicurezza stradale, in particolare potenziando i trasporti pubblici, con particolare attenzione alle esigenze di coloro che si trovano in situazioni vulnerabili, bambini, persone con disabilità e persone anziane (obiettivo 11.2).

Tali obiettivi hanno dato nuovo impulso all'ONU che ha proclamato la *Decade of Action for Road Safety* per il periodo 2011-2020 e hanno stimolato ulteriormente l'azione degli Stati Membri, che nel novembre 2017 a Ginevra hanno concordato 12 obiettivi in materia di sicurezza stradale [3], riassunti in Fig. 1.1.

GLOBAL ROAD SAFETY PERFORMANCE TARGETS

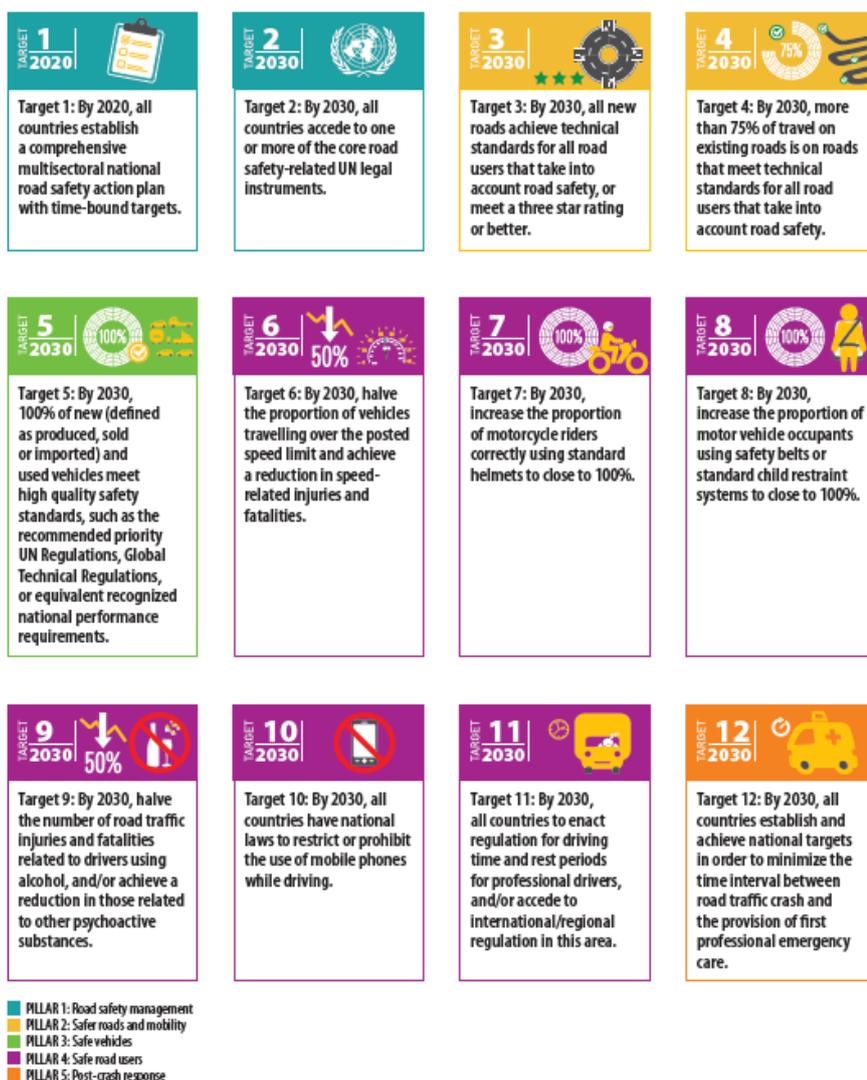


Figura 1.1: Global road safety performance targets

L'obiettivo globale del 2020 di dimezzare i decessi e gli infortuni sulla strada non è stato raggiunto, anche se in alcune regioni sono stati compiuti progressi significativi. Tuttavia, questo sforzo ha evidenziato l'importanza dell'argomento, aumentando la consapevolezza sulla necessità di migliorare la sicurezza stradale e portando alla nascita di una serie di iniziative.

Si sono nel complesso rinnovate le politiche stradali, innanzitutto andando ad agire sui tre costituenti - veicoli, strade e utenti - sui quali si basa la sicurezza. Molti Paesi hanno effettuato investimenti non indifferenti per ristrutturare, nel modo più efficace possibile, le infrastrutture stradali.

Di fondamentale importanza risultano le campagne educative e di sensibilizzazione all'argomento riuscendo a indirizzare il comportamento dei conducenti verso pratiche di guida sicura e rispetto delle norme. Inoltre, un contributo importante alla prevenzione dell'incidentalità è stato fornito dalle nuove tecnologie incorporate negli autoveicoli, tra cui frenata automatica di emergenza e controllo degli angoli ciechi. L'implementazione delle soluzioni più efficaci è stata possibile grazie alla collaborazione internazionale tra governi, organizzazioni e società.

L'impegno per migliorare la sicurezza stradale continua, con una particolare attenzione agli obiettivi fissati per il 2030. L'Agenda 2030 mira a rendere le strade più sicure per tutti e a diminuire ulteriormente il numero degli incidenti. In questo contesto, nel settembre 2020, l'Assemblea Generale ha approvato la dichiarazione di Stoccolma, dando avvio alla *Second Decade of Action for Road Safety 2021–2030*. L'obiettivo di questa iniziativa è quello di ridurre del 50% il numero di morti e feriti causati da incidenti stradali entro il 2030, contribuendo così al raggiungimento degli ulteriori obiettivi stabiliti dall'Agenda per lo Sviluppo Sostenibile [3].

1.2 STRATEGIE PER LA RIDUZIONE DEGLI INCIDENTI IN EUROPA

L'UNECE (Commissione Economica per l'Europa delle Nazioni Unite) ha lavorato in sinergia con l'Organizzazione Mondiale della Sanità e altre commissioni regionali delle Nazioni Unite per elaborare il *Piano di Azione per il decennio 2021- 2030* [4]. In questo documento si sottolinea la necessità di un approccio integrato noto come Safe System. Esso si pone l'obiettivo di garantire adeguati livelli di sicurezza tramite

un'interazione coordinata tra persone, veicoli e infrastrutture. Il Safe System è strutturato attorno a cinque misure chiave:

- Utenti sicuri: l'attenzione è rivolta alla protezione di tutti gli utenti della strada, inclusi pedoni e ciclisti.
- Veicoli sicuri: prevede l'uso delle ultime tecnologie sui veicoli
- Velocità sicura: ridurre le velocità minimizza gli impatti e le eventuali lesioni risultano tollerabili dal corpo umano
- Strade sicure: progetta infrastrutture che mitigano gli errori umani e proteggono gli utenti.
- Cura post-incidente: Assicura interventi rapidi e supporto medico per ridurre le conseguenze degli incidenti.

Il concetto del *Safe System* segna una svolta significativa rispetto alle pratiche del passato: abbandonando l'idea fatalistica che gli incidenti stradali siano un inevitabile prezzo da pagare per la mobilità, si pone l'obiettivo ambizioso di ridurre quasi completamente le vittime di incidenti stradali e le lesioni gravi a lungo termine. Questo obiettivo è supportato da traguardi intermedi da stabilire nel corso degli anni, con lo scopo di sviluppare un sistema di trasporto su strada più tollerante e adattabile.

Un Safe System, pertanto:

- Anticipa e gestisce gli errori umani.
- Limita le forze di impatto a livelli tollerabili per l'essere umano così da prevenire morti o lesioni gravi.
- Auspica una corresponsabilità tra chi progetta, costruisce, gestisce e utilizza l'infrastruttura. In caso di incidente non ci si limita ad incolpare esclusivamente il conducente o altri utenti, ma si analizzano i punti deboli del sistema stesso.
- Persegue un impegno verso il miglioramento proattivo e continuo delle strade e dei veicoli, in modo che l'intero sistema risulti sicuro e non solo i luoghi o le situazioni dove si sono già verificati incidenti.
- Aderisce al principio secondo cui il sistema di trasporto deve prevenire qualsiasi morte o lesione grave e che la sicurezza non deve essere sacrificata per fattori come i costi o la riduzione dei tempi di trasporto.

Tra i vari documenti strategici europei, è importante menzionare la comunicazione *L'Europa in movimento – Una mobilità sostenibile per l'Europa: sicura, interconnessa e pulita*, pubblicata nel maggio 2018. Essa delinea una nuova strategia per la sicurezza stradale nell'Unione Europea, con l'ambizioso obiettivo di “azzerare” le vittime sulle strade entro il 2050, estendendo il medesimo traguardo ai feriti gravi. Inoltre, sono stati fissati obiettivi intermedi, che prevedono una riduzione del 50% delle vittime e dei feriti gravi tra il 2020 e il 2030. Per raggiungere questi obiettivi, nel giugno 2019, la Commissione Europea ha pubblicato un documento di lavoro intitolato *Sicurezza stradale: prossimi passi verso la Vision Zero*, in cui ha confermato l'adozione del concetto di *Safe System* come base del suo approccio per migliorare la sicurezza stradale [5].

Le istituzioni internazionali che si dedicano alla sicurezza stradale concordano sull'importanza di perseguire la Vision Zero: un obiettivo di mobilità stradale che mira a eliminare completamente morti e feriti gravi sulle strade. Tuttavia, le azioni intraprese e gli investimenti finora effettuati sono risultati globalmente insufficienti nel frenare e invertire il trend di crescita della mortalità stradale. Nonostante ciò, analisi provenienti da diversi Paesi, come l'Australia, il Canada, la Francia, la Svezia, il Regno Unito e l'Olanda, dimostrano che importanti progressi nella riduzione degli incidenti stradali sono effettivamente realizzabili.

1.3 STRATEGIE PER LA RIDUZIONE DEGLI INCIDENTI IN ITALIA

Il nostro Paese, pur registrando una diminuzione degli incidenti stradali meno marcata rispetto ad altri Stati membri dell'Unione Europea, mira ad allinearsi con le linee guida internazionali ed europee per la sicurezza stradale nei prossimi dieci anni, risultando in questo modo fortemente integrato con la programmazione strategica dell'ONU. In questo contesto, il Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibile ha elaborato il *Piano Nazionale della Sicurezza Stradale 2030*, che promuove l'implementazione di sistemi di sicurezza stradale attuali, come il Safe System.

La strategia e le azioni descritte nel Piano spiegano in dettaglio l'importanza di avere una visione olistica del problema della sicurezza stradale. È essenziale considerare contemporaneamente la qualità dei mezzi di trasporto, delle infrastrutture e dei

comportamenti sia degli attori istituzionali che degli utenti del sistema stradale. Inoltre, bisogna tenere conto delle problematiche che portano questi ultimi, in particolare i conducenti dei mezzi di trasporto, a sottovalutare i rischi e, a volte, ad adottare stili di guida pericolosi per sé e per gli altri.

La manutenzione delle strade e l'adozione di nuove tecnologie per la sicurezza delle infrastrutture sono delegate, dal Piano, agli enti locali. Per dare impulso a questi miglioramenti, dopo quasi dieci anni di scarsi investimenti, con la Legge di Bilancio 2022-2024 sono stati stanziati 10,8 miliardi. Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) investe nella mobilità sostenibile, con l'obiettivo di rendere il sistema dei trasporti più sicuro e più green.

Le strategie d'azione sono organizzate su due livelli distinti e tengono conto delle diverse componenti del sistema stradale (utenti, infrastrutture e veicoli):

- Linee strategiche generali in grado di influenzare l'intero sistema, suddivise secondo i cinque pilastri della sicurezza stradale stabiliti dall'ONU (Fig. 1.2);
- Linee strategiche specifiche destinate alle categorie a maggiore rischio.



Figura 1.2: I cinque pilastri della sicurezza stradale dell'ONU

Il Piano rappresenta un obiettivo ambizioso, ma realizzabile. La sua implementazione è urgente e richiede non soltanto un adeguato finanziamento, ma anche una solida cooperazione tra tutti i livelli istituzionali, in particolare Regioni, Province e Comuni. Il Ministero si impegnerà con la massima determinazione nell'attuazione delle 44 linee

strategiche specifiche previste, con l'obiettivo di apportare una trasformazione radicale al sistema della mobilità rendendolo sicuro per tutti [3].

1.4 INCIDENTALITÀ STRADALE IN ITALIA

Il 2023, secondo le stime Istat [6], è caratterizzato da una stabilizzazione nella mobilità rispetto al 2022, anno nel quale era stato rilevato un netto incremento, in termini di spostamenti, rispetto al periodo delle fasi più acute della pandemia.

I dati relativi all'incidentalità stradale su strade urbane, autostrade e strade extraurbane nel 2023 rilevano un lieve miglioramento per il numero delle vittime rispetto all'anno precedente; tuttavia, seppur in maniera contenuta, aumentano incidenti e feriti. Come mostrato in Fig 1.3 nel 2023 sono 3.039 le vittime di incidenti stradali in Italia (-3,8% rispetto all'anno precedente), 224.634 i feriti (+0,5%) e 166.525 gli incidenti stradali (+0,4%). Si registra ancora, invece, una diminuzione nel confronto con il 2019 per incidenti, vittime e feriti (rispettivamente -3,3, -4,2% e -6,9%).

I comportamenti errati alla guida più frequenti sono la distrazione, il mancato rispetto della precedenza e la velocità troppo elevata.

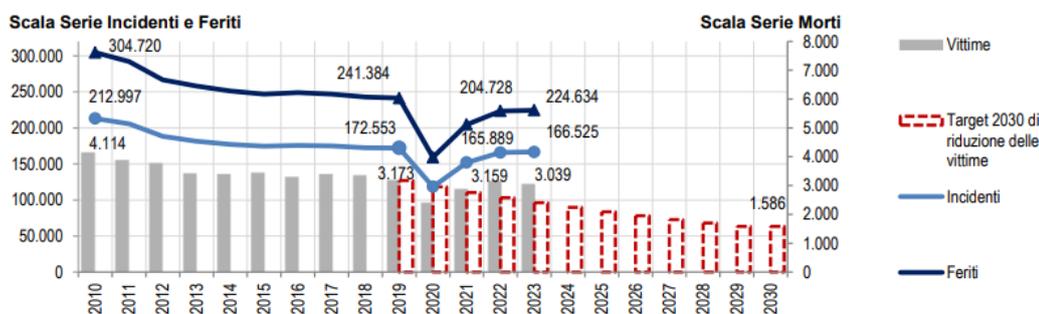


Figura 1.3: incidenti stradali con lesioni a persone, morti e feriti. Anno 2010-2023 e target 2030, valori assoluti

Il costo sociale degli incidenti stradali con lesioni a persone nel 2023, ammonta a quasi 18 miliardi di euro nel 2023 (1% del Pil nazionale). Se si considerano anche i costi legati ai sinistri con soli danni alle cose (circa 4,3 miliardi di euro stimati da ANIA), si arriva ad una cifra pari a circa 22,3 miliardi di euro.

Le percorrenze sulla rete autostradale per tutti i veicoli hanno registrato una crescita del 3,8% nel 2023 rispetto al 2022. Le percorrenze per i veicoli pesanti sono aumentate dello 0,9%, mentre per i veicoli leggeri sono in aumento del 4,7%. In termini assoluti, le percorrenze totali nel 2023 hanno superato la quota di 86,7 miliardi di veicoli per km, dato persino più elevato di quello del 2019, che rappresentava fino ad allora il massimo mai registrato lungo l'intera rete autostradale a pedaggio.

Nel 2023 si osserva un lieve incremento degli incidenti stradali e dei feriti in tutti i settori stradali rispetto al 2022, ma i valori rimangono inferiori rispetto al 2019. Nelle autostrade, si registra un aumento del 5,5% negli incidenti e del 6,6% nei feriti. I dati relativi alle strade urbane ed extraurbane sono pressoché stabili. Per quanto riguarda il numero delle vittime, si evidenzia una diminuzione rispetto al 2022 in tutti gli ambiti stradali. In particolar modo, si riscontra un calo significativo nelle autostrade, pari al 19,0%, mentre sulle strade urbane il calo è stato dello 0,3% e sulle strade extraurbane del 3,9%.

Nel confronto con il 2019 i valori sono ancora tutti in diminuzione, nel complesso -3,3% per gli incidenti e -4,2% per le vittime, ma si arriva ad una diminuzione del 22,9% dei deceduti per incidente stradale sulle autostrade. La distribuzione percentuale mostra che gli incidenti avvengono con maggior frequenza sulle strade urbane (73,3%), mentre il maggior numero di vittime si concentra sulle strade extraurbane (48,4%). Sulle autostrade si registrano, invece, il 5,3% degli incidenti e il 7,9% dei deceduti (Fig 1.4).

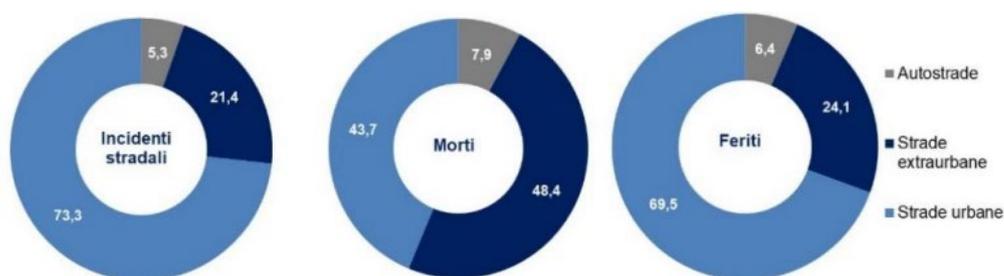


Figura 1.4: incidenti stradali con lesioni a persone, morti e feriti per categoria di strada. Anno 2023, valori percentuali.

1.5 LA SICUREZZA DEI CANTIERI STRADALI

Nel presente elaborato ci si concentrerà sugli incidenti avvenuti in presenza dei cantieri autostradali, che rappresentano un significativo fattore di rischio aggiuntivo. I cantieri autostradali, infatti, introducono una serie di variabili che complicano ulteriormente la già complessa dinamica della sicurezza autostradale esponendo sia i conducenti che i lavoratori ad un rischio elevato di incidenti. Questi siti di lavoro temporanei modificano la configurazione standard delle carreggiate, riducono la larghezza delle corsie, alterano la segnaletica costringendo i veicoli a deviazioni improvvise. Inoltre, vi è un aumento del rischio di collisioni dovuto dalla presenza di operai, macchinari e materiali sulla carreggiata. Per questi motivi è essenziale fornire una valutazione dettagliata e mirata per garantire l'efficacia delle strategie di mitigazione.

Reperire dati specifici relativi agli incidenti nei cantieri autostradali risulta complesso, poiché i dati disponibili spesso non distinguono tra incidenti avvenuti in contesti stradali o autostradali. La maggior parte delle statistiche include entrambe le tipologie di cantieri, senza un'ulteriore suddivisione per tipologia di strada. Tuttavia, anche in assenza di una distinzione netta, l'analisi dei dati complessivi sugli incidenti nei cantieri stradali offre un punto di partenza rilevante per comprendere la portata del fenomeno e per avviare una riflessione sulle misure di sicurezza necessarie.

Inizialmente, si procederà all'analisi dei dati provenienti dagli Stati Uniti, poiché gran parte degli studi e delle ricerche sul tema della sicurezza nei cantieri stradali, che verranno approfonditi nel corso di questa tesi, ha origine proprio dal contesto americano.

Successivamente, si procederà con un'analisi a livello europeo. In linea con le ricerche precedentemente svolte presso il Politecnico di Torino in collaborazione con Tecne S.p.A., verranno esaminati i dati relativi agli incidenti nei cantieri stradali di Italia, Spagna, Germania e Francia. Questo confronto risulta particolarmente significativo, in quanto consente di valutare l'efficacia delle politiche di sicurezza adottate in questi Paesi, con l'obiettivo di individuare eventuali lacune nella regolamentazione italiana e proporre interventi mirati per migliorarla.

1.5.1 LA SITUAZIONE IN AMERICA

I dati sugli incidenti mortali nelle zone di lavoro stradali provengono dal Fatality Analysis Reporting System (FARS), gestito dalla National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) [7]. Questi dati comprendono incidenti avvenuti nelle zone di lavoro in tutti i 50 stati degli Stati Uniti, nel Distretto di Columbia e a Porto Rico. Le informazioni vengono raccolte attraverso i rapporti sugli incidenti compilati dalle forze dell'ordine, la cui accuratezza dipende dalla correttezza e completezza dei dati riportati. È possibile che alcuni incidenti, pur verificatisi in zone di lavoro, non siano stati correttamente identificati come tali, e pertanto non inclusi nelle statistiche ufficiali.

Nel 2021, il totale delle vittime nelle zone di lavoro stradali è stato di 963, pari al 2,2% delle vittime complessive della strada, mentre nel 2022 le vittime sono state 891, pari al 2,1% del totale. Le categorie delle vittime sono suddivise come segue (Fig 1.5):

- Conducenti e passeggeri: 784 decessi nel 2021 e 742 nel 2022.
- Pedoni e ciclisti: 174 decessi nel 2021 e 145 nel 2022.
- Altri (inclusi occupanti sconosciuti di veicoli a motore in transito, veicoli non in transito e persone su dispositivi di trasporto personale): 5 decessi nel 2021 e 4 nel 2022.

Da questi dati si evince una leggera riduzione delle vittime tra il 2021 e il 2022. Inoltre si può osservare che la maggior parte delle vittime è costituita da conducenti, passeggeri e pedoni, il che sottolinea l'importanza di cercare soluzioni al fine di implementare la sicurezza sia per gli utenti della strada sia per i lavoratori nelle zone di cantiere.

	<u>2021</u>	<u>2022</u>
 Drivers and passengers	963 784	891 742
 Bicyclists and persons on foot	174	145
 Others Unknown occupant types of a motor vehicle in transport, occupants of a motor vehicle not in transport, and persons on personal conveyances.	5	4

Figura 1.5: Numero di vittime diviso per categorie

I dati sugli incidenti stradali mortali del 2021 e del 2022, suddivisi per tipo di strada, sono rappresentati attraverso due grafici a torta (Fig 1.6). Nel 2021, si sono verificati 880 incidenti totali, dei quali la maggior parte è avvenuta su autostrade e strade arteriali: 354 incidenti sono stati registrati sulle autostrade, mentre 430 si sono verificati su strade arteriali, (paragonabili alle strade extraurbane principali in base al codice della strada italiano). Gli altri incidenti si sono distribuiti su strade di raccolta (77 incidenti), strade locali (18 incidenti) e un singolo incidente è avvenuto su altre tipologie di strade.

Nel 2022, il numero totale di incidenti è diminuito a 821. Anche in questo caso, la maggior parte degli incidenti si è concentrata su autostrade (321 incidenti) e strade arteriali (405 incidenti). Le strade di raccolta hanno registrato 63 incidenti, mentre sulle strade locali si sono verificati 32 incidenti.

Da questi dati emerge che le autostrade e le strade arteriali presentano un rischio significativamente più elevato rispetto ad altre tipologie di strade, rendendo necessario l'implemento di interventi specifici e mirati per ridurre tali statistiche.

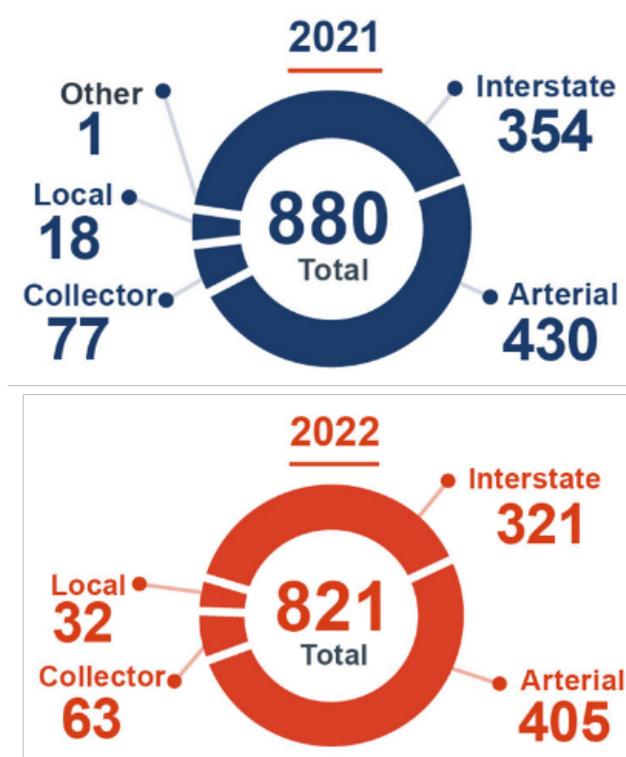


Figura 1.6: Numero incidenti nei cantieri stradali per tipologia di strada

1.5.2 LA SITUAZIONE IN SPAGNA

La Spagna, con una popolazione di circa 47 milioni di abitanti, dispone di una vasta rete stradale che si estende per un totale di 15585 km, comprendendo sia le "Autopistas" (autostrade) che le "Autovías" (strade extra-urbane a due carreggiate).

Secondo i dati del *Registro Nacional de Víctimas de Accidentes de Tráfico* [8], nel 2021 si sono verificati 158 incidenti stradali legati a lavori di manutenzione e conservazione delle strade, di cui 17 hanno coinvolto operatori che lavoravano o si trovavano nelle vicinanze come pedoni. Di queste 17 vittime, 2 hanno perso la vita dopo essere state investite da veicoli che attraversavano il cantiere a velocità eccessiva, rispetto al limite specifico indicato per quel tratto, o a causa della distrazione del conducente. Gli altri 141 incidenti hanno coinvolto operatori della manutenzione e i loro veicoli.

Sebbene non vi siano variabili univoche nelle fonti statistiche sulla sinistrosità stradale e quella lavorativa, diversi studi tecnici e ricerche accademiche evidenziano alcuni aspetti fondamentali. In particolare, si osserva che la maggior parte degli incidenti nei cantieri di manutenzione stradale sono investimenti, spesso causati da veicoli non appartenenti al cantiere e che si verificano durante le operazioni di segnalazione. Inoltre, il fattore più determinante in questi incidenti è la velocità.

1.5.3 LA SITUAZIONE IN GERMANIA

Con quasi 84 milioni di abitanti, la Germania è uno dei paesi più popolati d'Europa e dispone di una rete autostradale che si estende per circa 13.000 chilometri. Negli ultimi anni, si è osservato un aumento significativo degli incidenti nelle aree di costruzione delle autostrade tedesche.

Nel 2021 sono stati registrati complessivamente quasi 1.200 [9] incidenti nelle zone di costruzione sulle autostrade in Germania in cui sono rimaste coinvolte 1.869 persone, 19 sono morte, 242 sono rimaste gravemente ferite e 1.608 sono rimaste leggermente ferite.

Un'analisi dell'ADAC suggerisce che il crescente traffico di camion possa contribuire all'incremento del rischio di incidenti. Inoltre, molti cantieri hanno attualmente limiti di velocità fissati a soli 60 km/h, a fronte dei precedenti 80 km/h, il che può causare

ingorghi più prolungati e un conseguente aumento del rischio. In effetti, la semplice visione del cartello “abolizione del limite di velocità massimo consentito” provoca spesso accelerazioni brusche, contribuendo a un incremento degli incidenti.

1.5.4 LA SITUAZIONE IN FRANCIA

La Francia, con una popolazione di circa 68 milioni di abitanti, dispone di una rete autostradale che si estende per circa 11.000 chilometri. Nel 2023, si sono registrati 144 incidenti nei cantieri stradali, una diminuzione rispetto ai 169 del 2022 e ai 126 del 2021 [10]. Inoltre, si sono verificati 18 incidenti con feriti, rispetto ai 13 del 2022 e ai 12 del 2021 (Fig 1.7). Dall'inizio del 2002, 28 persone che lavoravano sulla rete autostradale hanno tragicamente perso la vita.

La maggior parte degli incidenti si verifica in circostanze specifiche: nel 2023, il 37% degli incidenti è stato causato da operatori che allestivano cantieri, mentre il 36% si è verificato durante interventi di emergenza per soccorrere i clienti coinvolti in incidenti. I sorpassi sulla corsia di emergenza, in particolare quelli effettuati da camion, rappresentano una delle principali cause di collisioni con veicoli fermi per motivi di servizio; infatti, un incidente su quattro del personale autostradale avviene proprio su questa corsia.

	2023	2022	2021
Incidenti	144	169	126
Feriti	18	13	12
Deceduti	1	4	0
Feriti ricoverati in ospedale	6	4	2
Feriti lievi	16	12	10

Figura 1.7: Statistiche incidenti stradali nei cantieri in Francia nel 2023, 2022 e 2021

1.5.5 LA SITUAZIONE IN ITALIA

Nel 2022 [11], l'Osservatorio ASAPS ha registrato 104 incidenti stradali nei cantieri, considerando solo quelli con vittime o feriti. Questo dato segna una diminuzione del 16,1% rispetto ai 124 del 2021. Tra questi sinistri, 31 persone hanno perso la vita, di cui otto erano operai o cantonieri, e 128 sono rimaste ferite, con un calo del 21%. Le autostrade e le strade a carreggiate separate sono state teatro di 51 incidenti, mentre i restanti 53 sono avvenuti su strade ordinarie. La maggior parte degli eventi è stata causata da velocità eccessiva, distrazione o mancato rispetto della distanza di sicurezza, con solo un caso legato al consumo di alcol o droghe. Il 23,1% dei sinistri ha coinvolto mezzi pesanti. A livello regionale, Liguria e Piemonte sono state le più colpite con 17 incidenti, seguite da Marche ed Emilia Romagna (10), Veneto (7) e Toscana (6).

Nel 2023, l'Osservatorio [12] ha rilevato 110 incidenti nei cantieri, con un aumento del 5,8% rispetto all'anno precedente. Il numero di vittime è diminuito leggermente, passando a 29, mentre il numero di feriti è salito del 37,5%, raggiungendo 176 persone. Fra le vittime, 11 erano lavoratori. Di questi 110 incidenti, 50 si sono verificati su autostrade o strade a carreggiate separate. La causa degli incidenti per il 98,2% dei casi è stata attribuita a velocità elevata, distrazione e mancato rispetto della distanza di sicurezza. Il 17,3% degli episodi ha coinvolto mezzi pesanti. Liguria ha registrato il maggior numero di incidenti (17), seguita da Abruzzo, Emilia Romagna e Lombardia (10 ciascuna), mentre l'Umbria ne ha contati 8. Trentino Alto Adige e Sardegna hanno riportato 7 incidenti ciascuna, seguite da Piemonte con 6 e altre regioni con numeri minori.

Nel 2023, specificamente nei cantieri autostradali, si sono verificati 50 incidenti che hanno causato la morte di 14 persone, tra cui 3 operai, e 90 feriti. Di questi sinistri, il 36% si è verificato in cantieri con scambio di carreggiata e nel 28% dei casi era coinvolto un mezzo pesante.

Nei primi due mesi del 2024, sono stati segnalati 13 incidenti nei pressi di cantieri autostradali, con un decesso di un operaio. Il 46% degli incidenti è stato causato da tamponamenti e il 38% è avvenuto durante lo scambio di carreggiata. In 4 casi, pari al 31%, è stato coinvolto un mezzo pesante [13].

In conclusione, la presenza di mezzi pesanti e le situazioni di cambio di carreggiata rappresentano le condizioni che più impattano sull'incidentalità nei cantieri autostradali italiani. Questi fattori dovranno quindi essere considerati con debita attenzione al fine di implementare misure di sicurezza efficaci per ridurre i rischi e prevenire ulteriori sinistri.

Lo scopo di questo studio è identificare le soluzioni più efficaci per migliorare la sicurezza delle zone di lavoro autostradali. A tal fine, di seguito verranno analizzate nel dettaglio le caratteristiche dei cantieri autostradali.

2 IL CANTIERE AUTOSTRADALE

Un cantiere autostradale è un'area delimitata e temporanea situata lungo un'autostrada, in cui vengono eseguiti lavori di costruzione, manutenzione, riparazione o miglioramento della strada. I cantieri sono caratterizzati da specifiche misure di sicurezza per proteggere sia i lavoratori che operano sul sito sia gli automobilisti che transitano nelle vicinanze. La gestione di un cantiere autostradale prevede quindi una segnalazione adeguata dell'area, la deviazione del traffico e l'adozione di protocolli volti a minimizzare i rischi e a prevenire incidenti.

I cantieri autostradali possono essere suddivisi in due categorie principali in accordo con il D.M. 10/07/2002 [14]:

- Cantieri fissi: non subiscono spostamenti per almeno mezza giornata e richiedono l'utilizzo di segnaletica di avvicinamento/posizione/fine prescrizione;
- Cantieri mobili: subiscono spostamenti e prevedono l'utilizzo di segnali mobili di preavviso e protezione e di paletti o coni che delimitano la zona;

Inoltre, prendendo in esame il tempo di esecuzione dei lavori, le tipologie di cantieri stradali sono:

- Cantieri di durata non superiore a 2 giorni, che richiedono l'utilizzo di segnali mobili;
- Cantieri di durata da 2 a 7 giorni, che richiedono l'utilizzo di segnali parzialmente fissi;
- Cantieri di durata superiore a 7 giorni, che richiedono l'utilizzo di segnali fissi e segnaletica orizzontale gialla.

Le zone di lavoro tendono a causare condizioni di pericolo per i conducenti dei veicoli e per i lavoratori, poiché si generano conflitti tra le attività lavorative e i flussi di veicoli, aggravando le condizioni di traffico. Come evidenziato da numerosi studi, gli incidenti nelle aree di cantiere autostradale presentano una distribuzione disomogenea. Esistono infatti zone più pericolose di altre, che richiedono pertanto un incremento degli standard di sicurezza.

Il "Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways" [15] negli Stati Uniti definisce comunemente il cantiere autostradale in quattro aree principali (Fig 2.1):

- Area di preavviso (Advance warning area):

Questa è la zona in cui vengono installati i primi segnali di avvertimento per informare i conducenti della presenza di un cantiere stradale imminente. È progettata per dare agli automobilisti il tempo di ridurre la velocità e prepararsi alle modifiche della viabilità.

- Area di transizione (Transition area):

In questa zona, il traffico viene deviato dalle normali corsie di marcia. Include coni, delineatori e segnaletica che guidano il traffico verso le corsie temporanee o i percorsi alternativi.

- Area di lavoro (Activity area):

L'activity area è la zona principale dove si svolgono i lavori stradali effettivi. Quest'area è suddivisa in due sottozone:

- Zona cuscinetto (Buffer area): serve come zona di sicurezza tra l'Activity Area e il traffico in movimento. Qui non devono essere presenti lavoratori e fornisce spazio sufficiente per eventuali manovre di emergenza.
- Zona di lavoro (Working area): è lo spazio effettivo destinato alle attività di costruzione, manutenzione o riparazione. Questa parte dell'activity area è organizzata per specifiche operazioni stradali e gestisce direttamente i lavori in corso.

- Area di chiusura (Termination Area):

Questa è la zona dove il traffico viene reindirizzato verso le normali corsie di marcia dopo aver attraversato l'area del cantiere. Include segnaletica che

informa gli automobilisti della fine del cantiere e della ripresa delle condizioni stradali normali.

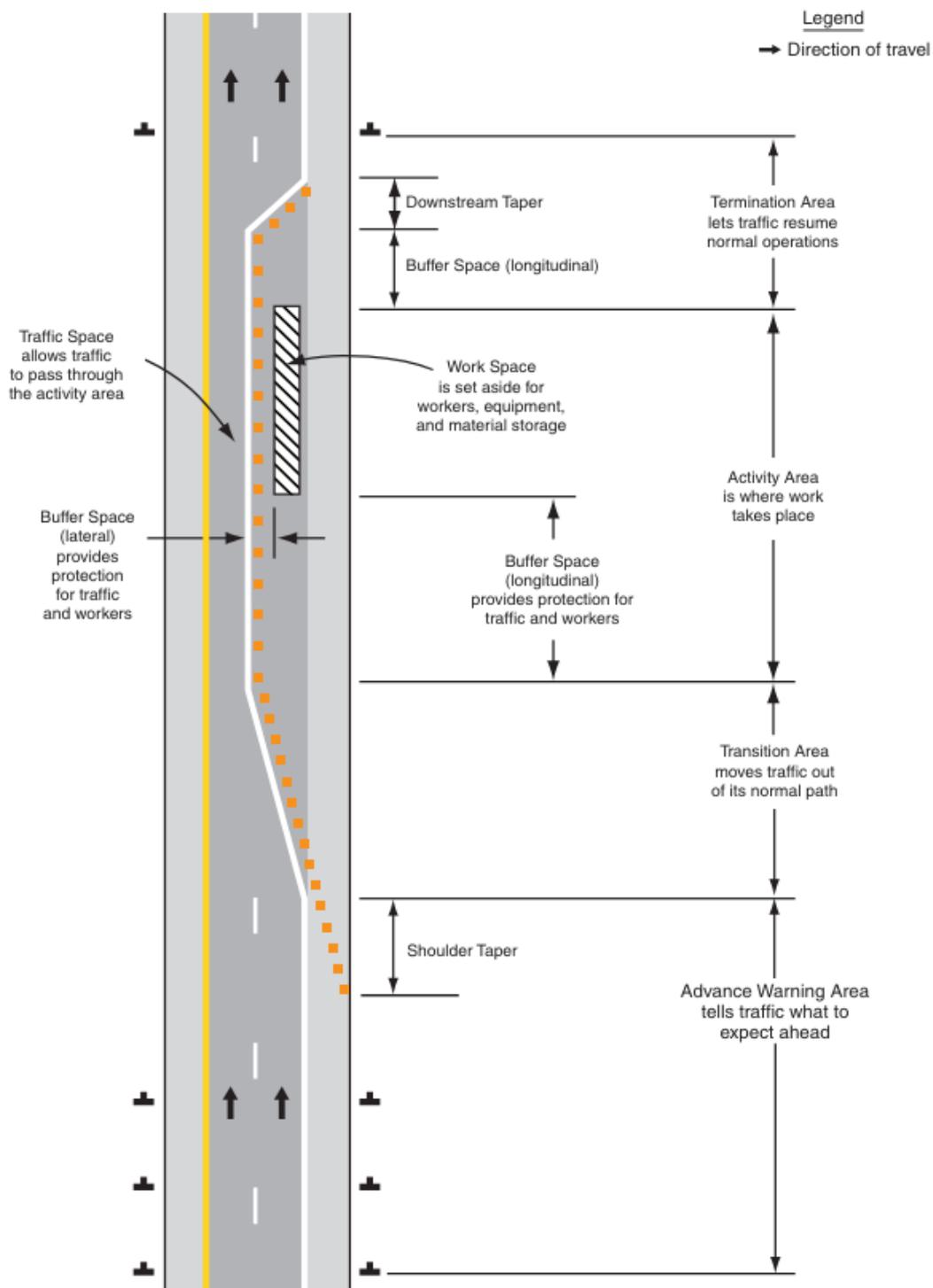


Figura 2.1: Area di cantiere

I ricercatori Nicholas J. Garber e Ming Zhao, nel loro studio “*Distribution and Characteristics of Crashes at Different Locations within Work Zones in Virginia*” (2001), hanno analizzato gli incidenti verificatisi tra il 1996 e il 1999 in prossimità delle aree di lavoro autostradali della Virginia, esaminandone la distribuzione all’interno delle cinque aree di cantiere analizzate precedentemente [16]. È importante notare che questo studio considera cinque aree di cantiere anziché quattro, distinguendo separatamente la working area e la buffer space.

Si osserva in Fig.2.2 che il 70% di incidenti è avvenuto nell'area di lavoro. Gli incidenti restanti sono stati registrati nelle altre zone del cantiere, con l'area di transizione che rappresenta il 13% delle collisioni, seguita dall'area di preavviso con il 10%, la zona cuscinetto con il 5% e infine l'area di chiusura con il 2% che risulta essere la zona più sicura.

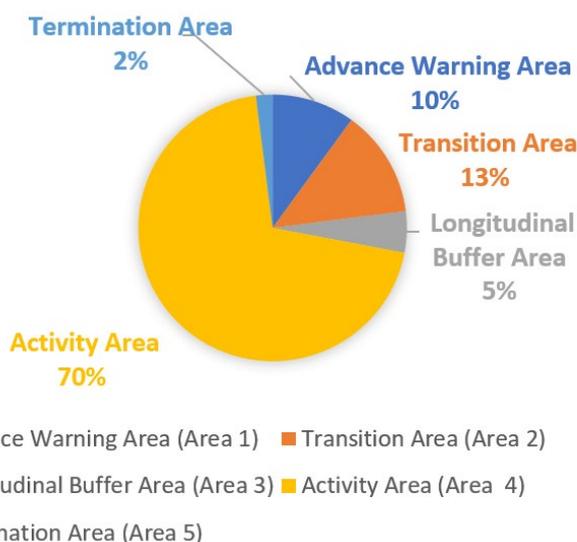


Figura 2.2: Distribuzione degli incidenti nelle cinque zone dei cantieri autostradali

Tuttavia, esistono anche altri studi, come quello di Pigman e Agent [17], che, attraverso lo sviluppo di un indice di gravità degli incidenti nelle zone di lavoro, hanno riscontrato una maggiore incidenza di collisioni gravi nella zona di preavviso rispetto all’area di transizione o all’area di attività. Successivamente, Jin e Saito hanno analizzato sezioni di cinque miglia a monte e a valle delle aree di attività in zone di lavoro nello Utah,

riscontrando che l'area di transizione registrava il numero più elevato di incidenti, indipendentemente dal tipo di controllo del traffico adottato.

Nello studio condotto da Janice R. Daniel [18], la distribuzione degli incidenti rispecchia quanto emerso nella ricerca effettuata in Virginia: la maggior parte degli incidenti nelle zone di lavoro si verifica prevalentemente all'interno dell'area di attività (77,6% del totale), seguita dall'area di preavviso (14,8%), dall'area di transizione (4,1%) e, infine, dall'area di terminazione (3,5%) (Fig 2.3).

Tuttavia, i ricercatori non hanno tenuto conto della diversa lunghezza delle sezioni, il che potrebbe aver distorto i risultati, poiché l'area di lavoro, essendo significativamente più lunga rispetto alle aree di preavviso e di transizione, tende a mostrare un numero maggiore di incidenti. Tenendo conto della lunghezza effettiva di ciascuna sezione, è possibile calcolare il tasso di incidentalità utilizzando la formula seguente:

$$R = \frac{A \times 10^6}{V \times D \times L}$$

Equazione 2.1: Tasso di incidentalità per sezione di cantiere

Dove:

- A è il numero medio di incidenti nella zona di studio,
- V rappresenta il volume di traffico (AADT),
- D è la durata in giorni del periodo di studio,
- L è la lunghezza dell'area considerata.

La distribuzione del tasso di incidenti rivela che le aree di transizione e di terminazione sono anch'esse soggette a un rischio significativo di incidenti. Di conseguenza, l'ordine di priorità del rischio, in termini di probabilità di incidenti, è stato ridefinito come segue (Fig. 2.3):

- Area di lavoro (38,4%)
- Area di preavviso (11,4%)
- Area di transizione (28,3%)
- Area di terminazione (21,8%).

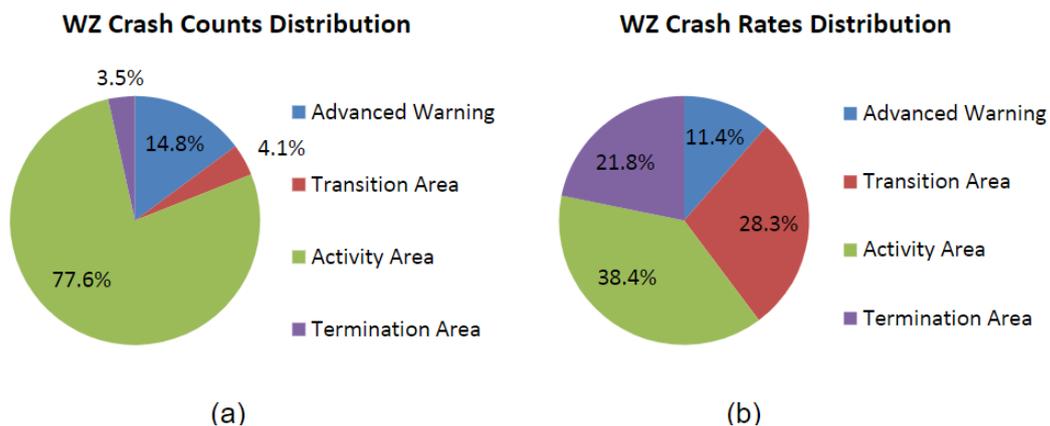


Figura 2.3: Numero di incidenti effettivi (a) e tasso di incidentalità tarato sulla lunghezza (b) nelle diverse aree di cantiere

Sulla base di queste considerazioni, è possibile concludere che le aree che richiedono maggiore attenzione in termini di protezione e segnalazione sono principalmente le prime tre: l'area di preavviso, l'area di transizione e l'area di lavoro. In queste zone, infatti, si concentra quasi l'80% degli incidenti totali. Tale distribuzione evidenzia la necessità di adottare misure di sicurezza più efficaci proprio in queste sezioni, in modo da ridurre il rischio di incidenti e garantire una gestione più sicura dei flussi di traffico.

Per quanto riguarda la tipologia di sinistri, la quasi totalità degli studi effettuati concorda che i tamponamenti (Rear End – RE) sono il tipo di incidente più comune nelle zone di lavoro autostradali, spesso causati dalla differenza di velocità tra i veicoli che transitano lungo il cantiere. Altre tipologie di incidenti significativi includono gli urti laterali (Sideswipe - SS) tra veicoli e gli incidenti dovuti alla presenza non intenzionale di oggetti o materiali di lavoro sulla carreggiata (Foreign Object - FO) (Fig.2.4). In particolare la maggior parte degli incidenti (83%) nell'area di preavviso (Area 1) sono di tipo RE. Gli incidenti del tipo SS aumentano quando il traffico si sposta dall'Area 1 all'area di transizione (Area 2). Spostandosi dall'Area 2 all'area di lavoro (combinando le Aree 3 e 4), degli incidenti di tipo RE e SS diminuiscono, mentre aumentano gli incidenti di tipo FO e AN [16].

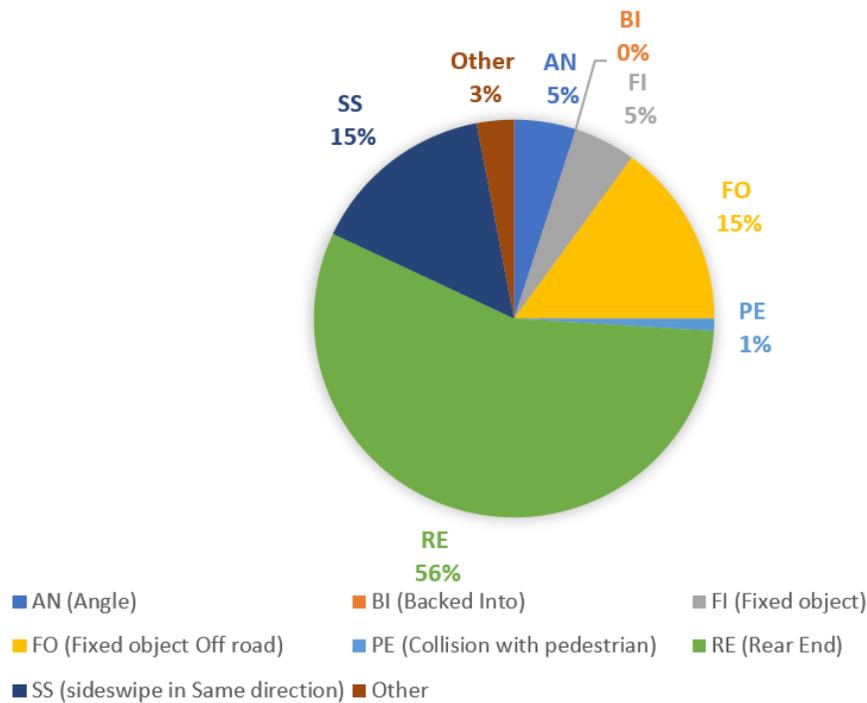


Figura 2.4: Distribuzione della tipologia di incidenti in autostrada

2.1 SEGNALETICA TEMPORANEA

Nella gestione di un cantiere autostradale la segnaletica temporanea gioca un ruolo importante nel garantire la sicurezza dei lavoratori e degli utenti. Il suo compito principale è prevenire comportamenti pericolosi, informare riguardo ai rischi esistenti e fornire indicazioni sulle modifiche del tracciato.

Per ridurre i rischi e assicurare livelli di sicurezza adeguati, è essenziale delimitare le aree di cantiere con precisione utilizzando coni, delineatori flessibili, barriere fisiche e segnaletica orizzontale temporanea. Il posizionamento di tali dispositivi deve essere conforme alle normative vigenti, come stabilito nel Decreto Ministeriale del 22 gennaio 2019, che specifica le procedure per la revisione, l'integrazione e l'installazione della segnaletica stradale temporanea durante le attività lavorative in presenza di traffico veicolare [19]. La collocazione dei segnali sulla pavimentazione stradale segue schemi standardizzati, che possono essere adattati in base alle specifiche esigenze del cantiere. Questo decreto fornisce linee guida dettagliate per assicurare un ambiente sicuro sia per i lavoratori che per i conducenti.

Inoltre, la segnaletica deve essere visibile e leggibile, con dimensioni e colori conformi alle normative e in buono stato di manutenzione.

Un sistema segnaletico temporaneo completo comprende di norma [20]:

- Una segnaletica di avvicinamento, posizionata a monte della zona pericolosa da segnalare;
- Una segnaletica di posizione, che viene collocata immediatamente a ridosso e lungo la zona interessata;
- Una segnaletica di fine prescrizione, situata a valle della zona interessata.

L'obiettivo di questo studio è analizzare quando sia più opportuno installare barriere di sicurezza per la delimitazione dei cantieri autostradali, al fine di ottimizzare la sicurezza generale per gli utenti della strada e per i lavoratori. Pertanto, si tralasciano i dettagli sul posizionamento della segnaletica e si focalizza l'attenzione sui dispositivi di delimitazione.

La segnaletica temporanea di cantiere è costituita dai seguenti gruppi di segnali [14]:

1. Segnali di pericolo: sono di forma triangolare, su sfondo giallo e con bordo rosso. Comprendono un gran numero di segnali diversi.
2. Segnali di prescrizione: sono di forma rotonda, con pittogramma bianco su sfondo azzurro.
3. Segnali di indicazione: sono di forma rettangolare e si sviluppano in verticale, con pittogramma rosso o nero su sfondo giallo.
4. Segnali per cantieri mobili o su veicoli: progettati per fornire avvisi temporanei e visibili, si adattano dinamicamente alle condizioni del traffico e garantiscono la sicurezza nelle aree di lavoro in movimento o lungo la strada.
5. Segnali luminosi: dotati di illuminazione interna o retroilluminata, mantengono forme, colori e pittogrammi simili a quelli dei cartelli tradizionali.
6. Segnali complementari: usati per la delimitazione dell'area di lavoro comprendono barriere normali, barriere direzionali, paletti di delimitazione, coni e delineatori flessibili.
7. Segnaletica orizzontale temporanea

Nella Tab. 2.1 sono mostrati i principali segnali delle categorie appena discusse. Come già accennato, le ultime due categorie risultano di particolare interesse; per questo motivo, verranno analizzate nello specifico nel seguito.

1. SEGNALI DI PERICOLO	
 <p>Figura II 383 Art. 31</p> <hr/> <p>LAVORI</p>	 <p>Figura II 388 Art. 31</p> <hr/> <p>MEZZI DI LAVORO IN AZIONE</p>
2. SEGNALI DI PRESCRIZIONE	
 <p>Figura II 82/a Art. 122</p> <hr/> <p>PASSAGGIO OBBLIGATORIO A SINISTRA</p>	 <p>Figura II 80/f Art. 122</p> <hr/> <p>PREAVVISO DI DIREZIONE OBBLIGATORIA A DESTRA</p>

3. SEGNALI DI INDICAZIONE	
	
<p>Figura II 411/a Art. 43</p> <hr/> <p>SEGNALE DI CORSIA CHIUSA (CHIUSURA CORSIA DI SINISTRA)</p>	<p>Figura II 414 Art. 43</p> <hr/> <p>USO CORSIE DISPONIBILI</p>
4. SEGNALI PER CANTIERI MOBILI O SU VEICOLI	
	
<p>Figura II 398 Art. 38</p> <hr/> <p>PASSAGGIO OBBLIGATORIO PER VEICOLI OPERATIVI</p>	<p>Figura II 400 Art. 39</p> <hr/> <p>SEGNALE MOBILE DI PREAVVISO</p>
5. SEGNALI LUMINOSI	
	

Tabella 2.1: Segnaletica temporanea

Si analizzano ora i segnali complementari e la segnaletica orizzontale temporanea.

Barriera di segnalazione stradale:

Utilizzata per delimitare i cantieri stradali, questa barriera è composta da strisce oblique di colore bianco e rosso rifrangente (Fig. 2.5). È possibile aggiungere lanterne con luce rossa fissa durante le ore notturne o in caso di visibilità limitata. Le barriere devono essere installate sui lati dei cantieri stradali per proteggere i lavoratori e i veicoli in movimento.

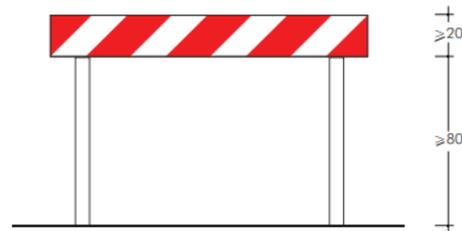


Figura II 392 Art. 32

Figura 2.5: Barriera normale

Barriere di direzione:

Questi dispositivi sono impiegati per indicare deviazioni temporanee che implicano curve strette, cambi improvvisi di direzione, attraversamenti o contorni di cantieri, e altre situazioni temporanee (Fig. 2.6). Anche le barriere di direzione necessitano di illuminazione adeguata in condizioni di scarsa visibilità, mediante luci rosse fisse.

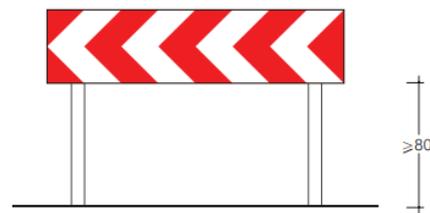


Figura II 393/a Art. 32

Figura 2.6: Barriere di direzione

Paletti di delimitazione:

Servono per marcare i bordi longitudinali e le aree di accesso delle zone di lavoro. È fondamentale che la base dei paletti sia ben ancorata o pesata per evitare che vengano abbattuti dal vento o dal passaggio dei veicoli (Fig. 2.7).



Figura II 394 Art. 33

Coni:

Figura 2.7: Paletti di delimitazione

I coni stradali [21], anche denominati cono segnaletici o birilli stradali, vengono utilizzati per delimitare deviazioni, guidare nelle canalizzazioni e separare temporaneamente i sensi di marcia.

I coni stradali sono realizzati in plastica, resistente agli urti ed agli agenti atmosferici, hanno strisce riflettenti rosse e bianche per renderli visibili anche in condizioni di scarsa illuminazione come nebbia o di notte (Fig.2.8).

Il loro utilizzo e posizionamento è regolamentato dalla normativa del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e dalla norma EN 13422. Per l'utilizzo in aree di lavoro autostradali devono avere un'altezza superiore a 50 cm e tre bande bianche. Inoltre è necessario posizionarli ad intervalli regolari lungo il perimetro del cantiere con una spaziatura di 12 metri sui rettilinei e 5 metri sulle curve [20]. Una manutenzione regolare è cruciale per garantire l'efficacia dei coni e mantenere alta la sicurezza stradale.

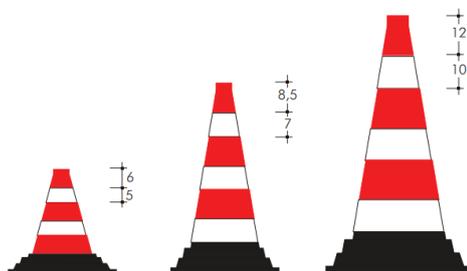


Figura II 396 Art. 34

Figura 2.8: Coni stradali

Delineatori flessibili:

I delineatori vengono utilizzati per delimitare le aree di lavoro di media e lunga durata, nonché per deviazioni, canalizzazioni e separazioni di corsie, fornendo una soluzione più duratura ed efficace rispetto ai coni stradali.

Sono realizzati in materiali resistenti come poliuretano o gomma, capaci di assorbire urti e tornare alla forma originale senza danneggiarsi. Generalmente di colore rosso, la loro visibilità in ogni condizione è garantita da strisce riflettenti. Per i cantieri su autostrade e strade urbane di scorrimento, i delineatori devono avere fasce bianche e un'altezza superiore a 30 cm [14] (Fig. 2.9).

I sistemi di fissaggio per questi dispositivi sono viti, adesivi o basi rimovibili e consentono una facile installazione e rimozione. Il loro uso risulta quindi ottimale nei cantieri che cambiano molto frequentemente la loro configurazione. Il processo di installazione prevede la preparazione del manto stradale, il montaggio ed infine è necessario verificarne la stabilità e la visibilità. I delineatori flessibili devono essere in grado di flettersi sotto l'urto del traffico, per poi tornare alla loro posizione verticale originaria senza staccarsi dalla pavimentazione. La loro installazione è prevista ogni 12 metri nelle sezioni rettilinee e ogni 5 metri nelle curve [21].

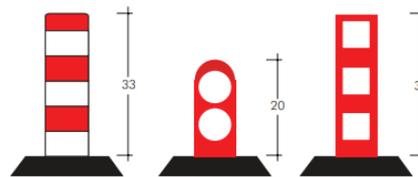


Figura II 397 Art. 34

Figura 2.9: Delineatori flessibili

Segnaletica orizzontale temporanea:

I segnali orizzontali a carattere temporaneo devono essere applicati in corrispondenza di cantieri, lavori o deviazioni di durata superiore a sette giorni lavorativi. Tale segnaletica occupa un ruolo cruciale all'interno di un cantiere autostradale poiché informa i lavoratori e i conducenti rispetto ai pericoli e rischi presenti, fornisce

indicazioni sulle uscite di sicurezza e modalità di soccorso garantendo così la sicurezza degli attori coinvolti.

La segnaletica orizzontale temporanea è progettata per essere visibile e resistente, anche se utilizzata per periodi limitati. Generalmente è realizzata con vernici speciali, nastri adesivi o materiali termoplastici che garantiscono una buona adesione al manto stradale e una visibilità ottimale, anche in condizioni di scarsa illuminazione. Essa è di colore giallo e ha le stesse dimensioni della segnaletica orizzontale permanente prevista per il tipo di strada o tratto di strada risultante dalla presenza del cantiere lungo la quale è installata [20].

La normativa [22] prevede nei rettifili strisce longitudinali continue o discontinue. Le lunghezze dei tratti e degli intervalli delle strisce discontinue sono stabilite nella Fig.2.10 seguente:

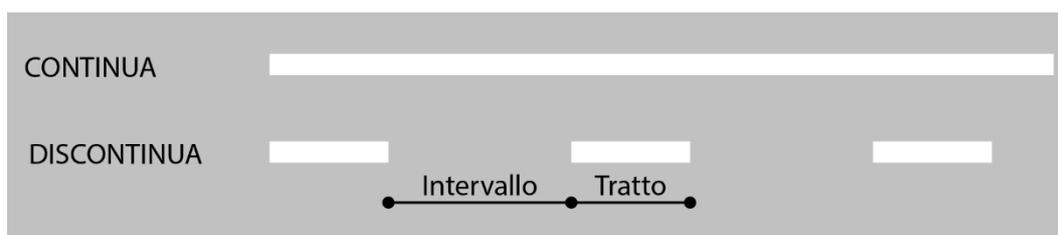


Figura 2.10: Tipologie di strisce longitudinali

Gli intervalli tra le diverse strisce sono regolamentati in funzione all'ambito di applicazione come mostrato in Tab 2.2.

Ambito di applicazione	Tratto [m]	Intervallo [m]
Separazione sensi di marcia e corsie ($V_p > 110$ km/h)	4,5	7,5
Separazione sensi di marcia e corsie (50 km/h $< V_p < 110$ km/h)	3,0	4,5
Separazione sensi di marcia e corsie ($V_p < 50$ km/h o in galleria)	3,0	3,0
Preavviso di avvicinamento di una striscia continua	4,5	1,5
Delimitazione corsie di accelerazione e decelerazione	3,0	3,0
Strisce di margine, interruzione di linee continue	1,0	1,0
Strisce di guida sulle intersezioni	1,0	1,5
Strisce di separazione delle corsie reversibili	4,5	3,0

Tabella 2.2: Lunghezza tratti e intervalli per linee longitudinali discontinue

La larghezza minima delle strisce longitudinali, escluse quelle di margine, è di 15 cm per le autostrade. Le strisce di margine della carreggiata sono continue in corrispondenza delle corsie di emergenza e delle banchine, mentre sono discontinue in corrispondenza di corsie di accelerazione e decelerazione e delle piazzole di sosta. La larghezza minima delle strisce di margine è di 25 cm per le autostrade e di 15 cm per le rampe delle autostrade.

I materiali utilizzati devono assicurare una buona aderenza e una resistenza adeguata all'usura dovuta al passaggio dei veicoli e alle condizioni atmosferiche. Le vernici temporanee sono semplici da applicare e rimuovere, rendendole perfette per lavori di breve durata. I nastri adesivi, disponibili in rotoli, possono essere stesi rapidamente sul manto stradale e offrono un'ottima visibilità. I materiali termoplastici, applicati tramite riscaldamento, garantiscono una maggiore durabilità e sono spesso impiegati per segnaletica che deve rimanere in situ per periodi prolungati.

Di seguito vengono riportate tre tavole, estratte dal D.M. 10 Luglio 2002, che rappresentano schemi cantieristici differenti in base alla durata del cantiere (Fig. 2.11, Fig. 2.12, Fig. 2.13). Esse illustrano in modo visivo le informazioni precedentemente fornite sull'uso dei coni, dei delineatori flessibili e della segnaletica orizzontale temporanea, per una maggiore chiarezza [14].

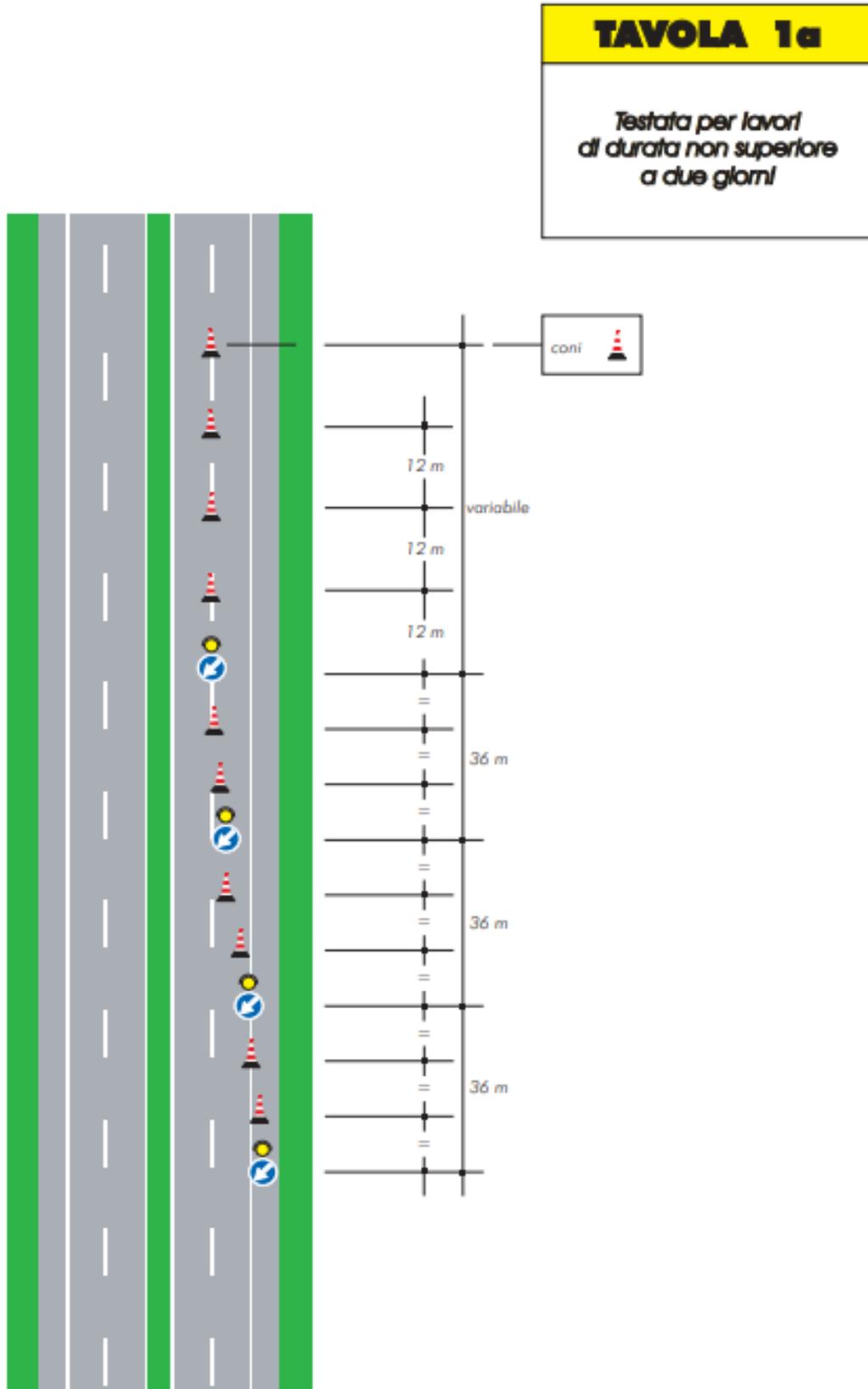


Figura 2.11: Schema cantiere inferiore a 2 giorni

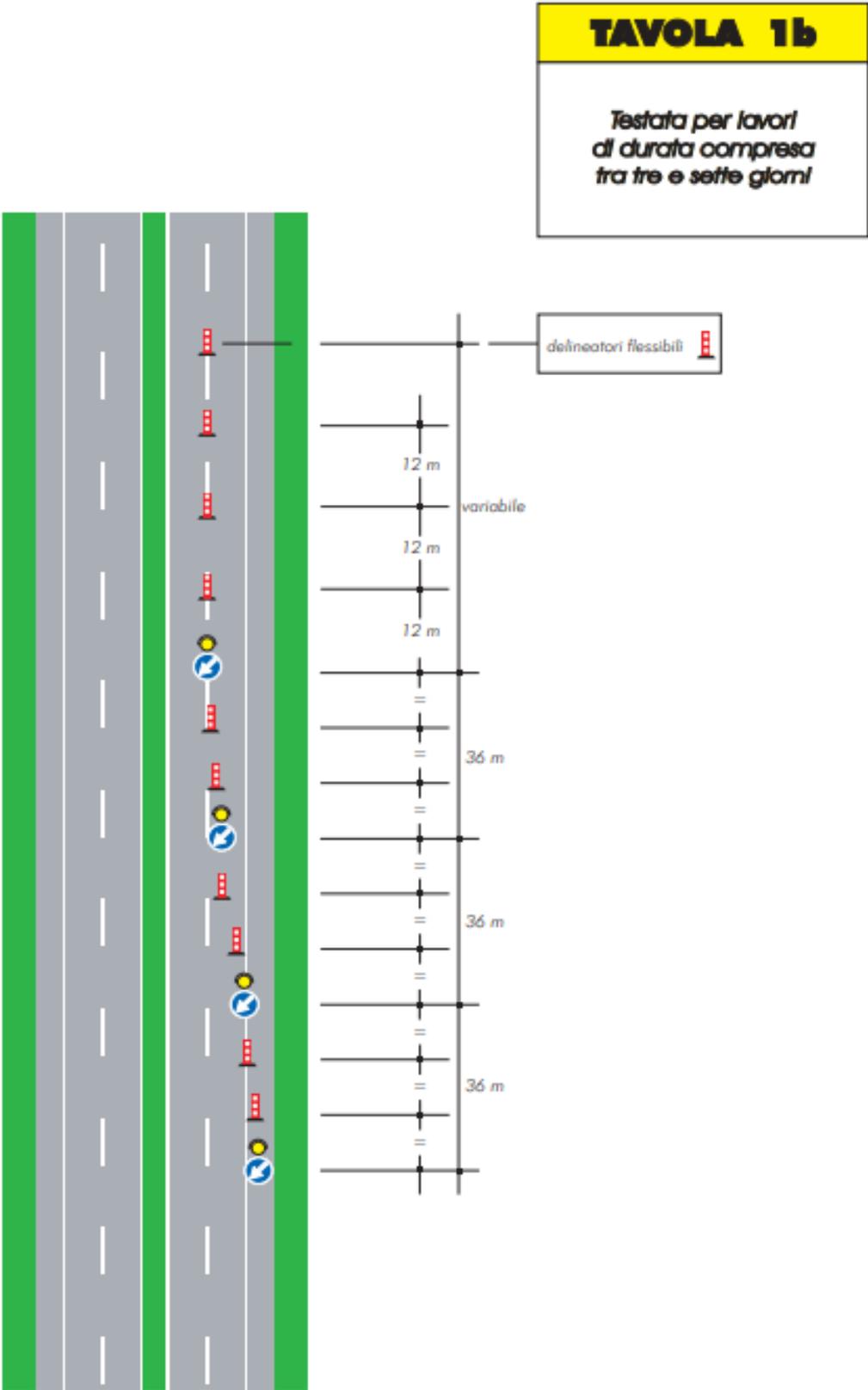


Figura 2.12: Schema cantiere tra 3 e 7 giorni

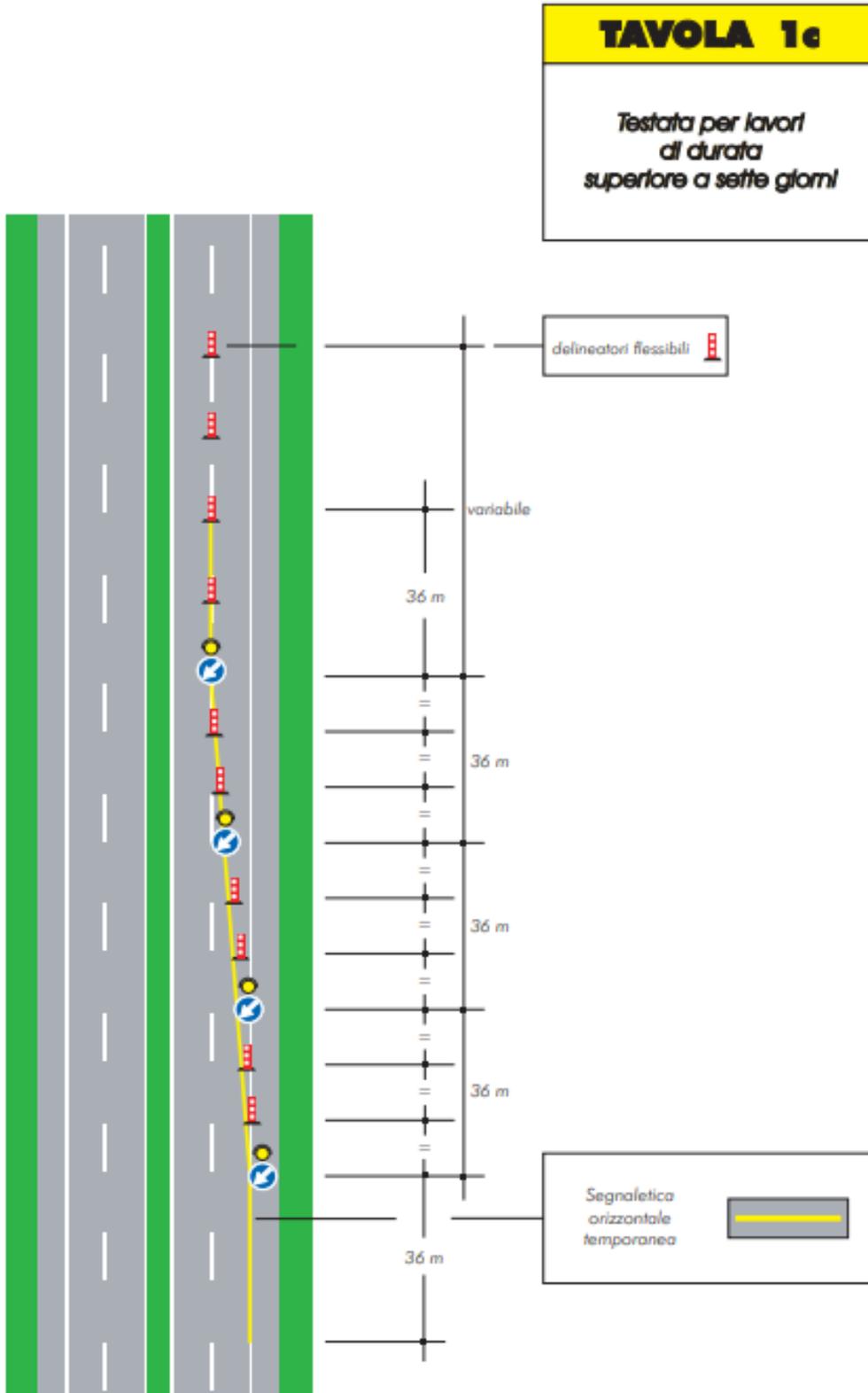


Figura 2.13: Schema cantiere durata maggiore 7 giorni

Si prosegue a questo punto con un'approfondita analisi sulle barriere stradali, al fine di valutarne le prestazioni e individuare quali possono essere più adeguate per la delimitazione di un cantiere autostradale.

2.2 BARRIERE STRADALI

Oltre ai dispositivi descritti nel paragrafo precedente, i cantieri autostradali possono essere delimitati e protetti anche mediante l'uso di barriere stradali temporanee. Tuttavia attualmente, non esiste una normativa specifica che stabilisca in quali circostanze risulti obbligatorio l'uso di tali dispositivi; pertanto, la decisione spetta al responsabile della sicurezza del cantiere, sulla base della sua personale sensibilità al rischio. Analizziamo quindi i dispositivi di ritenuta, al fine di valutarne le caratteristiche e comprendere meglio in quali situazioni risulti opportuno il loro utilizzo.

I dispositivi di ritenuta [23] hanno la funzione di contenere i veicoli che dovessero tendere alla fuoriuscita della carreggiata. L'urto contro una barriera stradale deve arrecare danni minori dell'eventuale fuoriuscita incontrollata del veicolo. Questi sistemi hanno quindi il compito di assorbire parte dell'energia generata da un eventuale impatto e contemporaneamente limitare i danni ai passeggeri. Inoltre, in seguito all'impatto, devono impedire che il veicolo superi la barriera stessa e, al contempo, farlo rientrare gradualmente nella carreggiata in modo da non interferire con i veicoli in transito.

Le barriere stradali possono essere classificate in base alla ubicazione:

- Barriere bordo laterale: installate lungo i margini della strada se il dislivello tra terreno naturale e piano stradale è maggiore di 1 metro e se la pendenza della scarpata è maggiore di 2/3.
- Barriere centrali da spartitraffico: posizionate al centro delle carreggiate a doppio senso per impedire l'attraversamento della mediana e le collisioni frontali.
- Barriere per opere d'arte (ponti, viadotti, sottovia, muri, ecc.): moderano i rischi derivanti da un possibile scavalco sulle opere d'arte;
- Barriere, o dispositivi, per punti singolari: comunemente utilizzate per la protezione di punti critici interni al margine stradale come pile di ponti, pali

ecc. Sono costituite da barriere per la chiusura di varchi, attenuatori d'urto, terminali speciali e simili.

Si possono classificare anche in base al materiale utilizzato [24]:

1. Barriere in acciaio

Le barriere in acciaio sono le più comuni e sono costituite dai seguenti elementi strutturali:

- montanti: infissi a terra o vincolati tramite bulloni al supporto;
- nastro: costituito da una o più lamiere sagomate a doppia o tripla onda;
- correnti longitudinali: elementi disposti parallelamente al nastro, inferiori (pararuota) o superiori (in corrispondenza delle opere d'arte);
- distanziatori: se presenti, posti tra i nastri e i montanti, hanno la funzione di dissipare l'energia. Il nastro durante l'urto sale verso l'alto al fine di impedire lo scavalco dei veicoli;
- diagonali di controvento, se presenti;
- bulloneria di collegamento e vincolo;
- supporti per l'ancoraggio o per l'infissione dei montanti

2. Barriere in calcestruzzo

Le barriere in calcestruzzo sono sistemi di sicurezza modulari, progettati per guidare il traffico, gestire situazioni di emergenza e delimitare i cantieri stradali. Per una descrizione maggiormente dettagliata si rimanda al paragrafo 2.

3. Barriere composite

Le barriere composite combinano diversi materiali per sfruttare le proprietà di ciascuno.

- Barriere in acciaio-calcestruzzo: presentano alla base una barriera in cemento armato tipo New Jersey alla cui sommità è collocata una trave (Fig.2.14). Migliorano la resistenza e l'assorbimento dell'energia abbinando le caratteristiche deformative dell'acciaio e del calcestruzzo.

- Barriere in acciaio-legno: costituite da una struttura in acciaio rivestita con elementi in legno (Fig. 2.14). Utilizzate in aree di alto pregio ambientale per integrarsi con il contesto circostante.



Figura 2.14: Esempi barriere composite

2.2.1 PROVE D'URTO E MARCATURA CE

Le normative italiane ed europee richiedono la marcatura CE per i dispositivi di ritenuta stradale che devono quindi essere sottoposti ad una serie di crash test prima di poter essere utilizzati. I test sono dunque essenziali per certificare che le prestazioni del dispositivo soddisfino i già menzionati requisiti:

- capacità di contenimento del veicolo di progetto;
- corretto rinvio del veicolo sulla carreggiata in seguito all'urto;
- minimizzazione dei rischi di lesioni per gli occupanti dei mezzi leggeri attraverso la limitazione delle decelerazioni.

La corretta selezione del livello di contenimento [24] è cruciale per la sicurezza stradale. Una barriera con un livello di contenimento adeguato deve essere scelta in base alla velocità del traffico, alla tipologia di veicoli in circolazione e alle caratteristiche dell'ambiente stradale (ad esempio, presenza di ostacoli fissi o di aree pedonali).

Considerando la massa del veicolo (M), la sua velocità (v) e l'angolo di impatto (α), si può esprimere il livello di contenimento (L_c) della barriera con la formula:

$$L_c = \frac{1}{2} M(v \sin \alpha)$$

Equazione 2.2: Livello di contenimento di una barriera

Questa formula rappresenta l'energia cinetica coinvolta nell'impatto, prendendo in considerazione la componente della velocità perpendicolare alla barriera.

Le politiche italiane ed europee classificano le barriere stradali in diverse categorie di contenimento, a seconda della loro capacità di resistere a impatti di vari livelli di severità:

- contenimento con angolo basso (livelli T1, T2 e T3)
- contenimento normale (livelli N1 e N2),
- contenimento più elevato (livelli H1, L1, H2, L2, H3 e L3)
- contenimento molto elevato (livelli H4a, H4b, L4a, L4b).

Queste classificazioni sono stabilite attraverso test di impatto standardizzati che simulano diverse situazioni di incidente. Ai diversi livelli di contenimento corrispondono diverse prove d'urto, eseguite con diversi veicoli, velocità, angolo d'urto e massa totale, così da conseguire i vari livelli energetici come si osserva nella Fig. 2.15.

CONTAINMENT		LEVEL	TEST	Vehicle	Mass (kg)	Speed (km/h)	Angle (°)	
TERMINALS	low angle	T1	TB 21	TB 11	Car	900	100	20
		T2	TB 22	TB 21	Car	1 300	80	8
		T3	TB 41 + TB 21	TB 22	Car	1 300	80	15
LONGITUDINAL BARRIER	normal	N1	TB 31	TB 31	Car	1 500	80	20
		N2	TB 32 + TB 11	TB 32	Car	1 500	110	20
	high	H1	TB 42 + TB 11	TB 41	Rigid Truck	10 000	70	8
		H2	TB 51 + TB 11	TB 42	Rigid Truck	10 000	70	15
		H3	TB 61 + TB 11	TB 51	Bus	13 000	70	20
	very high	H4a	TB 71 + TB 11	TB 61	Rigid Truck	16 000	80	20
		H4b	TB 81 + TB 11	TB 71	Rigid Truck	30 000	65	20
					TB 81	Articulated Truck	38 000	65

Figura 2.15: Livelli di contenimento e corrispondenti crash test

La corretta selezione del livello di contenimento è cruciale per garantire la sicurezza stradale. Una barriera con un livello di contenimento adeguato deve essere scelta in base alla velocità del traffico, alla tipologia di veicoli in circolazione e alle caratteristiche dell'ambiente stradale, come la presenza di ostacoli fissi o di aree pedonali.

Per quanto riguarda la severità dell'urto, esistono degli indici che forniscono una misura probabilistica del rischio di lesione per gli occupanti del veicolo. I più diffusi sono l'ASI e il THV.

- L'ASI (Acceleration Severity Index) esprime il livello di accelerazioni subito dagli occupanti del veicolo, considerati seduti, con cinture di sicurezza allacciate.
- Il THIV (Theoretical Head Impact Velocity) rappresenta invece la velocità teorica con cui la testa impatta su un'ipotetica superficie interna del veicolo.

2.2.2 DEFLESSIONE DINAMICA, LARGHEZZA OPERATIVA ED INTRUSIONE

I crash test forniscono informazioni importanti su come il sistema di ritenuta si deforma in seguito ad un urto. I parametri che descrivono gli spostamenti trasversali della barriera, mostrati in Fig. 2.16, sono: la deflessione dinamica (D_m), la larghezza operativa (W_m) e l'intrusione del veicolo (V_{im}) [24]. I valori assunti da questi parametri sono cruciali quando si progettano i dispositivi di ritenuta in quanto aiutano a stabilire le giuste distanze davanti agli ostacoli per garantire il corretto funzionamento del sistema.

- Larghezza di lavoro W_m : la distanza trasversale misurata dalla faccia della barriera più vicina alla strada al punto più lontano raggiunto da qualsiasi parte del sistema durante un impatto. Questo parametro è cruciale perché determina lo spazio necessario attorno alla barriera per garantire che, durante un impatto, la barriera e il veicolo non invadano aree che potrebbero essere occupate da altri veicoli o pedoni;
- Deflessione dinamica D_m : è una misura diretta di quanto la barriera si sposta dalla sua posizione originale quando un veicolo la urta. Controllare la deflessione è essenziale per garantire che la barriera non invada altre corsie o le aree di cantiere. Le barriere che presentano basse deflessioni tendono ad essere più rigide e forniscono una resistenza immediata al veicolo, rendendole adatte ad aree in cui lo spazio è limitato. Tuttavia, una barriera con una deflessione maggiore assorbe l'energia dell'impatto più lentamente, riducendo le forze sul veicolo e sui suoi occupanti.
- Intrusione del veicolo V_{im} : misura quanto un veicolo penetra nell'area dietro alla barriera. È una misura essenziale per valutare l'efficacia della barriera e per evitare che i veicoli coinvolti in un incidente attraversino la barriera stessa

raggiungendo aree non sicure come zone di cantiere o corsie di traffico contrario. Le barriere che limitano efficacemente l'ingresso dei veicoli sono fondamentali in situazioni ad alto rischio, come sui ponti, lungo gli argini o vicino a infrastrutture critiche.

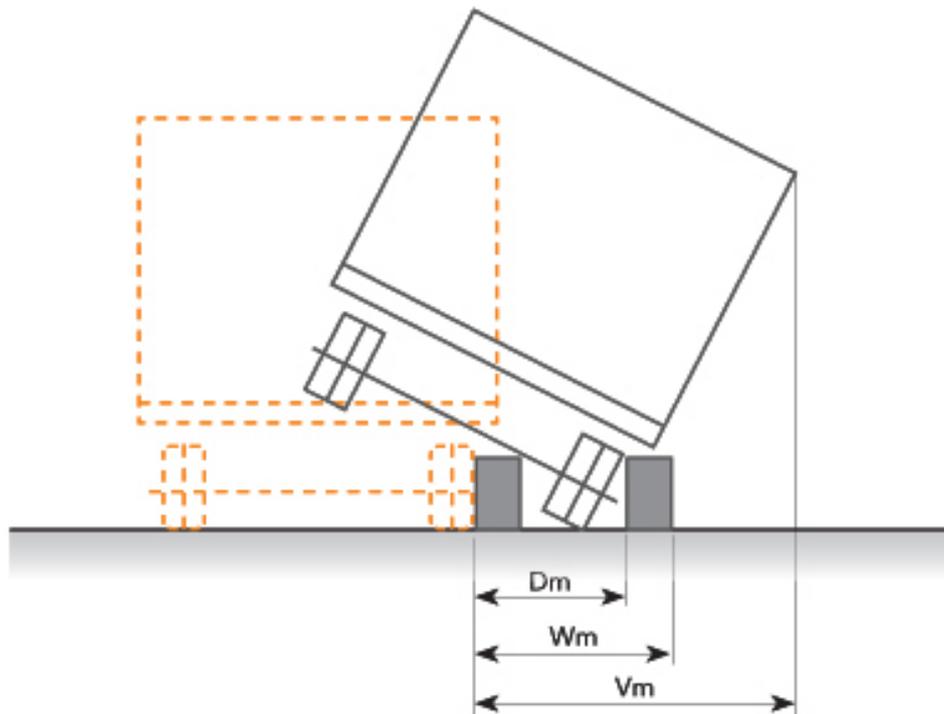


Figura 2.16: Schemi per la misura dei parametri geometrici D_m , W_m , V_m

2.2.3 BARRIERE RIGIDE

Tra le varie tipologie di barriere, quelle rigide rappresentano una soluzione efficace in contesti dove la deflessione della barriera stessa non è tollerata, come nelle zone di lavoro. Questi sistemi non subiscono una deviazione significativa al momento dell'impatto, dissipando l'energia attraverso il sollevamento e l'abbassamento del veicolo e la deformazione della lamiera della carrozzeria. Il principale meccanismo di dissipazione dell'energia è l'attrito, che avviene sia tra la lamiera del veicolo e la barriera sia tra la barriera e la superficie stradale.

Con l'aumentare dell'angolo d'impatto, aumentano le forze di decelerazione della barriera a causa della bassa deflessione. L'installazione di un sistema rigido è dunque appropriata dove ci si aspettano angoli d'impatto bassi.

Una tipologia di barriera stradale rigida è la barriera New Jersey, ampiamente utilizzata per incanalare il flusso veicolare oppure per delimitare temporaneamente un'area di cantiere.

Sviluppate originariamente negli Stati Uniti negli anni '50, il design delle barriere New Jersey [25] è distintivo, caratterizzato da una forma a trapezio rovesciato come mostrato in Fig. 2.17. Questo design è

stato progettato per ridurre i danni ai veicoli e ai loro conducenti in caso di impatti accidentali. Al contempo, previene le intrusioni verso la corsia opposta facilitando il rientro del veicolo nella carreggiata. Le ruote del veicolo possono infatti salire sul piede a base inclinata e proprio questa pendenza forza il veicolo ad allontanarsi dalla barriera. Queste barriere si sviluppano longitudinalmente alla strada in modo uniforme mantenendo inalterate le

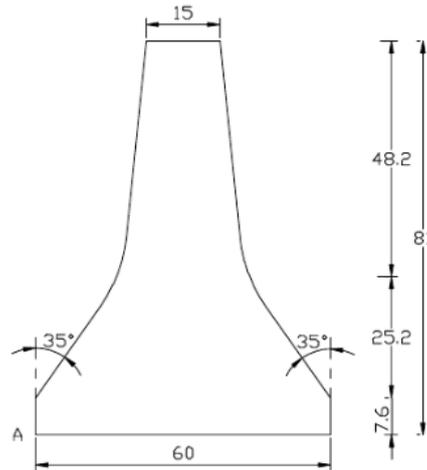


Figura 2.17: Barriera tipo "New Jersey"

caratteristiche geometriche oltre a quelle di rigidità, rugosità e natura del materiale. Proprio questa uniformità le contraddistingue: risultano infatti molto più sicure rispetto alle altre tipologie di barriere che presentano elementi più rigidi, come i paletti dei guardrail, e che sono quindi molto più pericolosi in caso di impatto.

La loro altezza è stata determinata per tentativi [26]: inizialmente misurava 46 cm, successivamente è stata aumentata a 51 cm. Tuttavia, poiché queste altezze non riuscivano sempre a impedire ai veicoli di valicarla, è stata infine portata a 81 cm. La superficie laterale è sagomata in modo tale che, in caso di urto con un angolo ridotto, nessuna parte del veicolo colpisca direttamente la barriera. La larghezza è stata calcolata non solo per garantire protezione al veicolo, ma anche per prevenire il ribaltamento della barriera stessa.

Le barriere New Jersey sono comunemente composte da corpi monolitici in calcestruzzo armato, collegati tra loro sia longitudinalmente che verticalmente in maniera più o meno flessibile.

Le connessioni orizzontali possono essere di tre tipologie:

- barre rullate passanti nel New Jersey: sono barre in acciaio passanti in ogni modulo e collegate tramite manicotti
- piastre al piede: sono delle piastre bullonate al piede che collegano due moduli adiacenti
- mancorrente antiribaltamento: utilizzato generalmente a bordo ponte, consiste in un tubolare in acciaio, composto da più moduli connessi tramite giunzioni bullonate e connesso alla barriera tramite montanti in acciaio bullonati in testa al profilo New Jersey

In aggiunta, le testate dei New Jersey sono sagomate in modo da accoppiarsi attraverso un sistema di connessione "maschio-femmina" (Fig. 2.18). Questo sistema svolge una duplice funzione: non solo serve come ulteriore punto di collegamento, ma semplifica anche il posizionamento durante la fase di installazione [25].

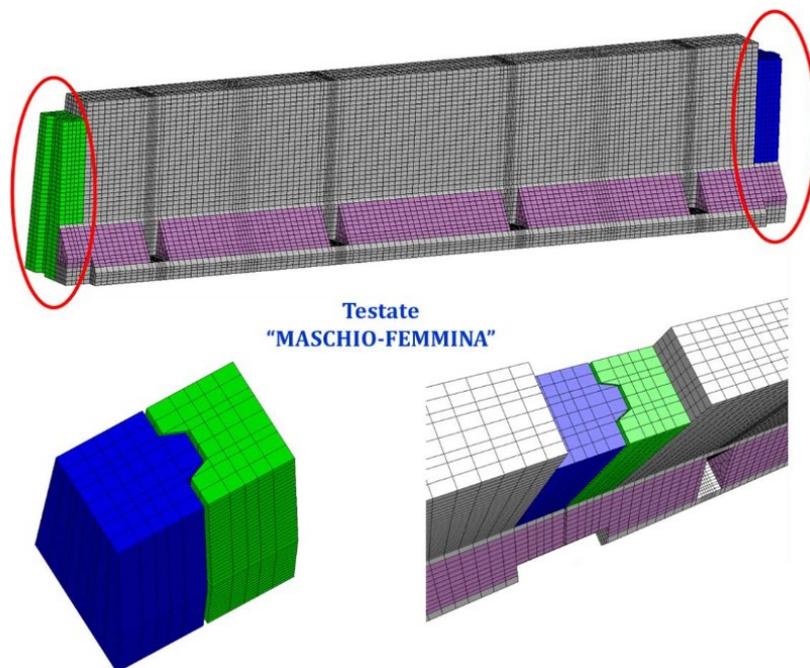


Figura 2.18: New Jersey con particolari delle testate maschio-femmina

L'uso dei New Jersey offre numerosi vantaggi. Innanzitutto, come già descritto, rinviano la vettura verso la sede stradale favorendo un buon controllo della traiettoria del veicolo. Ma i vantaggi delle barriere in calcestruzzo non si limitano al solo caso di urto [27]. La forma e le dimensioni ridotte migliorano anche la visibilità in curva rispetto alle barriere in acciaio, che sono sempre più alte e larghe. Inoltre, la scelta del calcestruzzo offre indubbi vantaggi in termini di maggiore durabilità, minori esigenze di manutenzione ordinaria e post-incidente. Oltre a questi vantaggi in termini di sicurezza, le barriere in cemento sono a basso costo, proteggono quasi il doppio dei chilometri di carreggiata rispetto alle barriere in acciaio e sono così veloci da installare che riducono significativamente i costi di assemblaggio.

Le barriere New Jersey sono impiegate in diversi contesti stradali per garantire la sicurezza. Ad esempio nelle autostrade e superstrade, esse vengono collocate tra le corsie opposte per impedire attraversamenti accidentali e ridurre il rischio di collisioni frontali. Nelle aree di cantiere, le barriere New Jersey servono a proteggere gli operai e a separare in modo sicuro le zone di lavoro dal traffico veicolare circostante. Infine su ponti e viadotti, vengono installate per fornire una barriera robusta dove le conseguenze di un'uscita di strada risulterebbero particolarmente gravi.

Le caratteristiche fin qui descritte riguardo ai New Jersey ci portano a concludere che il loro utilizzo si adatti alle caratteristiche richieste per delimitare i cantieri autostradali. L'efficacia delle barriere New Jersey è supportata da uno studio dettagliato condotto secondo le linee guida del report “*Stiffening Guidance for Temporary Concrete Barrier Systems in Work Zone and Construction Situations*” di Karla Lechtenberg, Chen Fang e Ronald Faller [28]. I test condotti in questo studio hanno dimostrato la capacità delle barriere New Jersey di mitigare i rischi in contesti complessi come i cantieri autostradali, utilizzando metodologie e standard rigorosi. Una comprensione approfondita di tali aspetti risulta essenziale per assicurare un'applicazione sicura ed efficiente delle barriere stradali, con l'obiettivo di tutelare la sicurezza sia dei lavoratori che degli utenti della strada.

I PCB (portable concrete barrier) possono mostrare grandi deflessioni quando sono colpiti, il che può essere problematico in spazi ristretti come i ponti o in presenza di

corsie limitate. Per questo motivo si utilizzano diverse configurazioni di irrigidimento e ancoraggio.

Le travi scatolari irrigidite (Fig. 2.19) costituiscono un componente fondamentale nelle moderne barriere di sicurezza stradale, contribuendo in modo significativo al miglioramento delle prestazioni e alla protezione dagli impatti. Tali irrigidimenti, fissati alle barriere prefabbricate mediante bullonatura, hanno la funzione di rinforzare l'intera struttura, riducendo notevolmente la deflessione. Grazie alle loro proprietà di resistenza e stabilità, risultano particolarmente adatte all'impiego su ponti, autostrade, cantieri stradali e in altre aree in cui la sicurezza dei pedoni e degli utenti della strada è di importanza prioritaria.

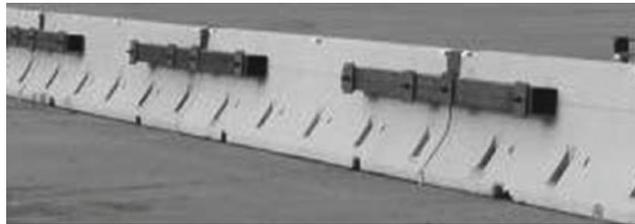


Figura 2.19: Travi scatolari irrigidite

Per quanto riguarda gli ancoraggi si possono distinguere tra ancoraggi pinnati e bullonati.

Gli ancoraggi pinnati sono costituiti da perni in acciaio che si inseriscono in fori appositamente predisposti nel pavimento. Si garantisce in questo modo un collegamento stabile e resistente in grado di supportare sia le forze orizzontali che verticali generate dagli urti dei veicoli.

Nell'ancoraggio bullonato il fissaggio delle barriere al pavimento è garantito tramite l'uso di bulloni e dadi. Questi bulloni attraversano fori praticati nella base delle barriere e nel pavimento stesso e sono fissati con i dadi. Questo metodo è preferibile quando è necessario un fissaggio robusto e sicuro, permettendo anche una certa flessibilità nell'installazione e nella rimozione delle barriere, soprattutto in contesti dove potrebbe essere necessario spostarle temporaneamente.

In breve, nell'ancoraggio pinnato i perni si inseriscono direttamente nella pavimentazione senza bisogno di perforare la barriera, mentre nell'ancoraggio bullonato i bulloni attraversano sia la barriera che il pavimento (Fig. 2.20).

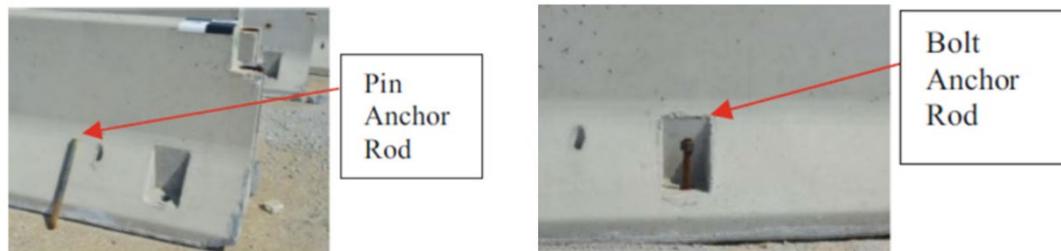


Figura 2.20: Ancoraggi pinnati e bullonati

Considerando quindi le diverse configurazioni di ancoraggio e irrigidimento sono stati condotti dei crash test. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei parametri ricavati (Tab. 2.3):

N. test	Deflessione dinamica (mm)	Larghezza di lavoro (mm)	Spazio libero dietro la barriera (mm)
NJPCB-2, NJPCB-3, NJPCB-4	Sistemi Autoportanti Senza Ancoraggio		
	1008.7	1617.7	1008.7
NJPCB-1 NYTCB-5	Sistemi Autoportanti con Travi Scatolari Irrigidite		
	763.5	1379.5	769.5
NJPCB-1, NJPCB-5, NJPCB-6, NJPCB-7	Sistemi con Ancoraggio Pinnato		
	385	945.5	324.5
NJPCB-2	Sistemi con Ancoraggio Bullonato		
	125	610	0

Tabella 2.3: valori medi dei parametri ottenuti da crash test standardizzati

I sistemi autoportanti senza ancoraggio mostrano le deflessioni maggiori quando urtati da un veicolo. Si evidenzia che i valori di deflessione dinamica e spazio libero dietro la barriera sono simili, vi è quindi un elevato rischio di intrusione oltre la barriera.

I sistemi autoportanti con travi scatolari irrigidite risultano più stabili dei precedenti ma la loro efficacia dipende dalla corretta installazione delle travi che possono influenzare in maniera significativa le prestazioni del sistema.

L'utilizzo di ancoraggi pinnati e bullonati riduce notevolmente i tre parametri precedentemente considerati. Questi ancoraggi sono progettati per limitare la rotazione e il movimento della struttura durante un impatto, migliorando la stabilità generale e riducendo il rischio di intrusione oltre la barriera.

Tutte le configurazioni esaminate soddisfano i requisiti stabiliti dal MASH 2016 e dimostrano la conformità ai più severi standard di sicurezza stradale. Il rispetto di queste norme è essenziale per garantire la tutela sia degli utenti della strada che degli operai.

Da questa descrizione dettagliata si evince l'importanza della selezione e della corretta progettazione delle barriere temporanee. La selezione della tipologia e dell'ancoraggio si basa su un'attenta valutazione delle condizioni specifiche del sito.

2.2.4 DISPOSITIVI INNOVATIVI

Questo paragrafo si pone l'intento di analizzare alcune tipologie di barriere temporanee innovative che si adattano al meglio alle esigenze di cantiere.

Una soluzione all'avanguardia per delimitare le zone di lavoro autostradali è stata sviluppata dalle aziende Ticopter Srl e Safital Srl [29]. Si tratta di una barriera temporanea altamente performante, facile da trasportare e riposizionare così da seguire l'evoluzione dei lavori e implementarne la sicurezza prevenendo l'ingresso di veicoli erranti nei cantieri. I risultati a seguito delle prove d'urto garantiscono il massimo livello di protezione per le barriere mobili in caso di angoli di impatto contenuti e si possono riassumere come:

- livello di contenimento: T3;
- ASI: A;
- larghezza di lavoro: 0,8 m (W2);
- deflessione dinamica: 0,2 m;
- intrusione del veicolo: 0,7 m –VI2

La barriera è realizzata in acciaio ed è dotata di moduli interconnessi senza ancoraggio diretto al suolo (Fig. 2.21). Il dispositivo si distingue per la presenza di carrelli integrati che consentono una semplice movimentazione da parte dei lavoratori senza la necessità di mezzi di sollevamento. Questa flessibilità non solo ottimizza le operazioni di installazione e rimozione, ma consente anche di adattare rapidamente l'area di cantiere secondo le esigenze del progetto e di ripristinare la viabilità ordinaria durante il giorno, particolarmente vantaggioso per lavori notturni.

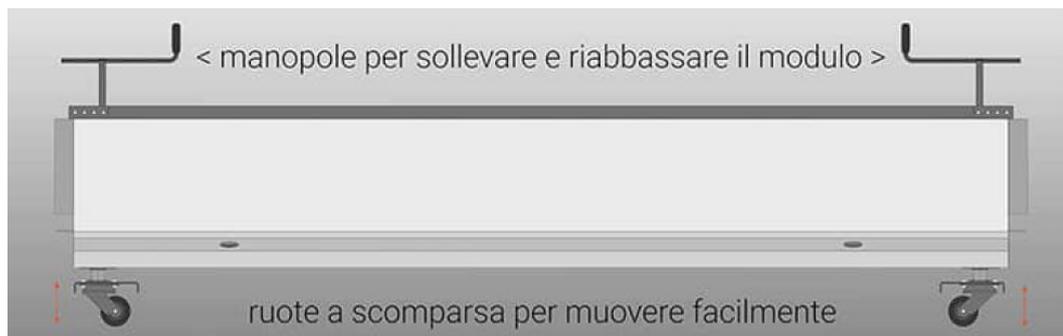


Figura 2.21: Nuova barriera temporanea in classe T3

Il peso ridotto del dispositivo è un vantaggio di significativa importanza, offrendo agevolazioni rilevanti: un autoarticolato standard può trasportare 144 metri di barriera, suddivisi in 24 moduli da 6 metri. Un guadagno rispetto alle barriere in calcestruzzo tradizionali, le quali incrementano la complessità del trasporto sia dal punto di vista logistico sia economico per il loro peso.

Inoltre, l'adattabilità della barriera temporanea alle esigenze del cantiere rappresenta un altro aspetto di grande innovazione. Durante le operazioni di movimentazione, una volta posizionati i moduli e attivati i carrelli integrati, è possibile spostare fino a 60 metri di barriera alla volta (cioè dieci moduli) senza necessità di mezzi di sollevamento. Questo consente un avanzamento graduale dell'area di cantiere, ottimizzando i tempi e migliorando l'efficienza delle operazioni.

Un'altra soluzione innovativa, che si presta bene nei cantieri autostradali nel caso di corsie con larghezza limitata è la barriera Deltabloc DB50SL [30].

Questo dispositivo seppur testato ai sensi della UNI EN 1317 non è dotato di marcatura CE ed è ancora poco presente sul mercato.

Di seguito sono sintetizzati i risultati dei test e le caratteristiche geometriche e di peso di questa tipologia di prodotti (Fig. 2.22):

- lunghezza degli elementi: 6.0 m
- classe di prestazione: T3
- larghezza utile di lavoro: 0.7 (W2)
- ASI: A
- altezza del modulo: 0.50 m
- larghezza del modulo: 0.32 m
- massa di ciascun modulo: 1'090 kg (182 kg/m)
- lunghezza del modulo testato (senza elementi terminali): 60 m
- ancoraggio richiesto alle estremità: No

Si evidenzia la larghezza estremamente ridotta che passa dai 66 cm della barriera ABESCA 120 (schema standard di riferimento) ai 32 cm del Deltabloc. Anche la massa è molto ridotta (182 kg/ma fronte dei circa 800 kg/m della ABESCA 120). Grazie a queste caratteristiche è possibile movimentare tali dispositivi in maniera rapida, nonché trasportarne uno sviluppo lineare piuttosto elevato per ciascun carico. Il loro utilizzo risulta ottimale per spazi ridotti dove non ci siano particolari fattori di rischio e per la separazione dei flussi veicolari nel caso di scambi di carreggiata di lunga durata.

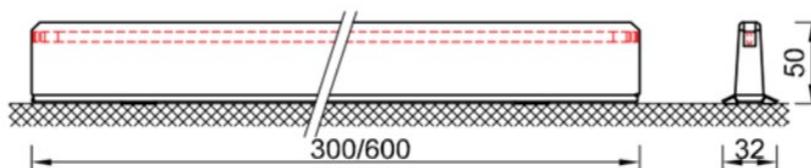


Figura 2.22: Dispositivo DELTABLOC DB50SL

Un' ultima soluzione all'avanguardia è il sistema RoadZipper, le cui caratteristiche tecniche sono riassunte di seguito:

- livello di contenimento H2;
- altezza: 815 mm
- larghezza di 460 mm e una larghezza operativa 1.9m
- marcatura CE

Questo sistema, già ampiamente utilizzato in diversi Paesi per separare i flussi di traffico, si adatta facilmente all'evoluzione del cantiere e ottimizza il traffico con l'apertura o la chiusura di corsie supplementari, garantendo la sicurezza in base alle diverse condizioni di traffico. La tecnologia Road Zipper [31] consente infatti il movimento di una barriera fisica tra flussi di traffico opposti tramite un macchinario autonomo, eliminando la necessità di chiusure di carreggiata (Fig. 2.23).

La barriera, costituita da moduli simili ai new jersey, è spostata mediante nastri trasportatori, permettendo una rapida rimodulazione della carreggiata. Durante la fase sperimentale, è stata osservata una riduzione del tempo di attraversamento del cantiere fino al 50% per il traffico in direzione predominante. La barriera può essere spostata fino a 7,3 metri a una velocità massima di 15 km/h, creando spazi di lavoro per le squadre e migliorando la viabilità sulle autostrade in condizioni di intensa circolazione.

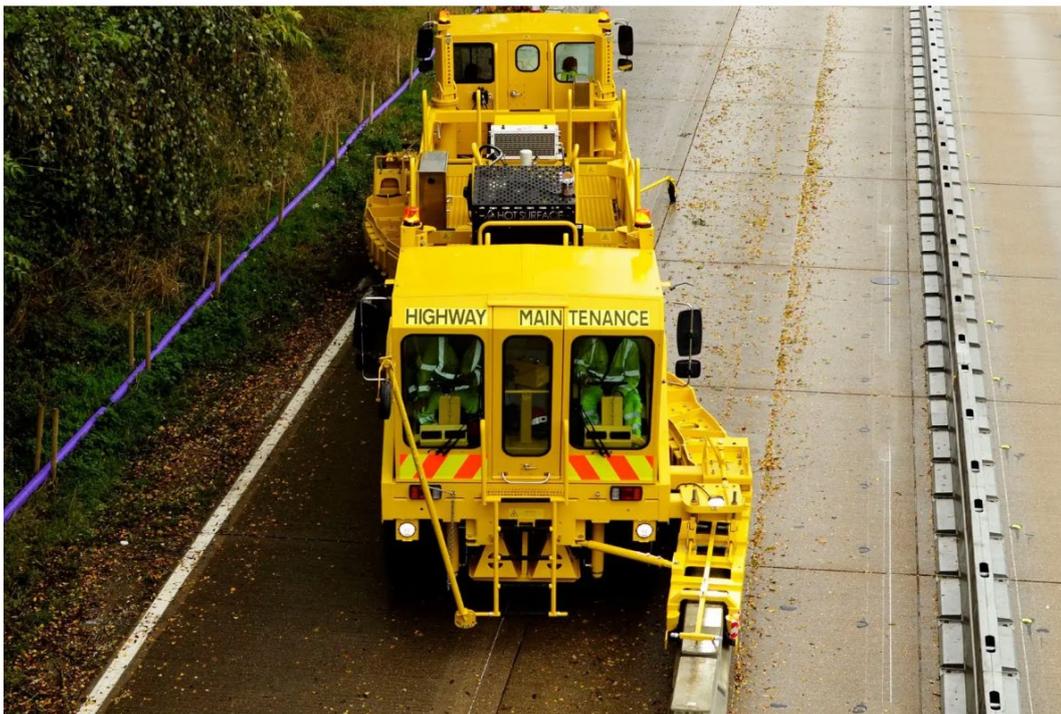


Figura 2.23: Sistema Road Zipper per l'installazione di barriere temporanee

3 SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

In questo capitolo si vuole di mettere in luce un significativo vuoto normativo riguardo la gestione del rischio di intrusione nei cantieri autostradali. Sebbene i Decreti Ministeriali del 22 gennaio 2019 e del 10 luglio 2002 forniscano un inquadramento normativo relativo al segnalamento temporaneo, non forniscono indicazioni dettagliate sulla protezione fisica delle aree di cantiere né direttive specifiche per l'uso di dispositivi volti a contenere il rischio di intrusione.

Come già espresso in precedenza, in un contesto caratterizzato da incertezze legislative, il Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione (CSP) ha la facoltà di stabilire prescrizioni sui dispositivi di sicurezza da utilizzare, decidendo sull'installazione di barriere temporanee. Pur consentendo l'adozione di soluzioni più adeguate alle esigenze specifiche di ogni cantiere, questa libertà introduce un certo grado di discrezionalità nelle decisioni operative, il che può comportare problematiche.

Per approfondire gradualmente tale aspetto, verrà effettuata un'analisi della normativa pertinente. Oltre ai decreti menzionati, saranno considerati anche il Testo Unico sulla Sicurezza e le normative relative alla sicurezza stradale, che si sono evolute nel tempo, evidenziando l'interconnessione tra la protezione dei lavoratori nei cantieri e la sicurezza degli utenti della strada. Questa ricca cornice normativa mira a garantire un ambiente sicuro e a ridurre il rischio di incidenti sia nei cantieri che lungo le autostrade. La cooperazione tra queste dimensioni normative rappresenta la base per affrontare in modo efficace le sfide legate alla sicurezza, consentendo una gestione del rischio più integrata e completa.

La ricerca si concentra sull'analisi dei cantieri autostradali che operano in condizioni standard, escludendo deliberatamente quelli classificati come particolarmente pericolosi, come gli interventi in spartitraffico, i lavori in bordo ponte e le operazioni su muro di sostegno. Queste attività, infatti, comportano rischi significativi e, secondo la normativa vigente, necessitano dell'installazione di barriere New Jersey per garantire la massima sicurezza. Tale scelta permette di focalizzare l'analisi su situazioni più comuni e gestibili, con l'obiettivo di sviluppare linee guida pratiche per migliorare la

sicurezza nei cantieri autostradali, attraverso un'attenta analisi dei rischi e l'applicazione di dispositivi e contromisure adeguate.

3.1 ANALISI DELLA NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Il quadro normativo relativo alla sicurezza dei lavoratori nei cantieri stradali si fonda sul Testo Unico per la Sicurezza sul Lavoro (D.Lgs. 81/2008), che rappresenta il principale riferimento legislativo per la tutela della salute e della sicurezza in tutti i luoghi di lavoro. In esso si raccolgono e aggiornano le precedenti norme in materia di gestione generale dei rischi, tra cui la prevenzione, la sorveglianza sanitaria, la segnaletica temporanea di sicurezza, il primo soccorso e la protezione antincendio. Lo scopo centrale del Testo Unico è quello di garantire la tutela della salute dei lavoratori attraverso un approccio preventivo, che obbliga i datori di lavoro a valutare e gestire in modo proattivo i rischi connessi alle attività svolte.

In particolare, l'articolo 161, comma 2-bis del D.Lgs. 81/2008 [32] si collega al DM 22 gennaio 2019, demandando ai Ministeri competenti l'emanazione di regolamenti specifici per la revisione e integrazione della segnaletica stradale destinata alle attività lavorative che si svolgono in presenza di traffico veicolare. Questo è fondamentale per le operazioni svolte nei cantieri stradali, dove i rischi per i lavoratori e per gli utenti della strada sono particolarmente elevati.

Il cantiere stradale è quindi fortemente regolamentato, con diverse normative che svolgono ruoli specifici nella gestione della sicurezza. Da un lato, il Testo Unico per la Sicurezza sul Lavoro (D.Lgs. 81/2008) disciplina la protezione della salute e della sicurezza dei lavoratori, inclusa la prevenzione e la gestione dei rischi nei luoghi di lavoro. A questo si aggiunge il Decreto del 10 luglio 2002, che stabilisce le regole tecniche per gli schemi segnaletici da utilizzare per il segnalamento temporaneo, differenziati in base alla categoria di strada. Il Decreto del 22 gennaio 2019, infine, definisce le procedure per la revisione, l'integrazione e l'installazione della segnaletica stradale nelle aree di lavoro esposte al traffico veicolare.

Parallelamente, il cantiere deve conformarsi anche al Codice della Strada (D.Lgs. 285/1992) e al relativo Regolamento di Attuazione (D.P.R. 495/1992), che disciplinano l'interazione del cantiere con la rete stradale e impongono standard

specifici per la segnaletica e la gestione del traffico. In questo contesto, oltre alla protezione dei lavoratori all'interno del cantiere, si pone l'accento sulla sicurezza degli utenti della strada, garantendo che il traffico venga regolato e segnalato in modo efficace, per prevenire incidenti nelle vicinanze del cantiere.

L'ampia normativa di riferimento per i cantieri stradali mira a tutelare sia la salute dei lavoratori sia quella dei conducenti. Questa complessa regolamentazione impone una gestione integrata della sicurezza, considerando non solo i rischi per chi opera nei cantieri, ma anche quelli derivanti dall'interazione con il traffico veicolare.

3.2 TESTO UNICO PER LA SICUREZZA DEI LAVORATORI

Nel contesto del D.Lgs. 81/2008 [32], la sicurezza sul lavoro si riferisce “all'insieme di interventi da adottare per salvaguardare la salute e l'incolumità dei lavoratori durante lo svolgimento della loro attività.” Rispetto al passato, il Testo Unico introduce un cambiamento significativo, spostando l'attenzione sulla prevenzione e imponendo l'obbligo di valutare i rischi in anticipo. Questo approccio, di intervenire prima che il danno si verifichi, rappresenta una modalità di prevenzione eticamente più corretta.

Il D.Lgs. 81/2008, composto da 306 articoli e 51 allegati, è suddiviso in 13 titoli. Di particolare interesse per il nostro studio sono il Titolo I (art. 1-61), che tratta i Principi comuni riguardanti le disposizioni generali, il sistema istituzionale, la gestione della prevenzione nei luoghi di lavoro e le disposizioni penali, e il Titolo IV, dedicato ai cantieri temporanei o mobili, che disciplina le misure per la salute e sicurezza nei cantieri, le norme per la prevenzione degli infortuni nelle costruzioni e nei lavori in quota, nonché le sanzioni previste.

Le misure previste dal decreto legislativo per la sicurezza sul lavoro sono numerose e articolate, applicandosi sia ai dipendenti pubblici e privati, sia ai lavoratori autonomi che operano in contesti aziendali. Tra le principali si possono includere [33]:

- Formazione mirata per lavoratori, preposti, dirigenti e rappresentanti per la sicurezza.
- Controlli sanitari periodici per gli operatori.
- Valutazione dei rischi specifici per ciascuna attività lavorativa.

- Gestione attenta di agenti fisici, chimici e biologici negli ambienti di lavoro, con l'obiettivo di prevenire incidenti e mantenere sicuri e agibili i luoghi di lavoro, a tutela sia dei lavoratori che di chiunque entri in quegli spazi.
- Gestione e mitigazione dei rischi tramite un servizio di prevenzione e protezione che prevede la redazione del Documento di Valutazione dei Rischi (DVR), la nomina e la formazione di Responsabili (RSPP) e addetti (ASPP) alla sicurezza, e ispezioni e controlli periodici.

L'insieme di queste misure è finalizzato alla riduzione degli infortuni sul lavoro, un obiettivo centrale del Testo Unico, che sottolinea l'importanza della valutazione preventiva dei rischi.

3.3 CONCETTO DI RISCHIO E DOCUMENTI DI CANTIERE

L'art. 2, comma 1, lett. r) e s) del D.Lgs 81/08 definisce [32]:

- Pericolo: proprietà o qualità intrinseca di un determinato fattore avente il potenziale di causare danni;
- Rischio: probabilità di raggiungimento del livello potenziale di danno nelle condizioni di impiego o di esposizione ad un determinato fattore o agente oppure alla loro combinazione.
- Danno: qualunque conseguenza negativa derivante dal verificarsi dell'evento, comprende qualunque lesione fisica o danno alla salute, indica la gravità delle conseguenze che si verificano al concretizzarsi del pericolo

Il rischio quindi è un concetto probabilistico che indica la possibilità che si verifichi un evento in grado di causare danni alle persone. La sua definizione implica l'esistenza di una sorgente di pericolo e la probabilità che questa possa trasformarsi in un danno reale. Il pericolo, invece, è una proprietà intrinseca di una situazione, sostanza o oggetto, che per le sue caratteristiche ha il potenziale di arrecare danno, indipendentemente da fattori esterni. Il danno infine rappresenta le conseguenze negative che un evento può avere sulle persone, e può essere stimato attraverso dati statistici, registri degli infortuni o previsioni.

A questo punto entra in gioco la valutazione dei rischi, che nel contesto normativo italiano è definita dal D.Lgs. 81/2008 come una “valutazione globale e documentata di tutti i rischi per la salute e sicurezza dei lavoratori presenti nei luoghi di lavoro, finalizzata a individuare le misure di prevenzione e protezione e ad elaborare il programma delle misure di miglioramento nel tempo dei livelli di salute e sicurezza.”

Per quantificare il rischio, si utilizza la formula:

$$R = P \times D$$

Equazione 3.1: Equazione del rischio

Dove:

- R rappresenta il rischio,
- P è la probabilità che un evento si verifichi
- D è la gravità del danno che tale evento può causare.

La probabilità di accadimento (P) rappresenta la stima della probabilità che il danno associato a un determinato fattore di rischio si verifichi effettivamente. Tale probabilità viene espressa attraverso una scala da 1 a 4, corrispondente a diverse soglie di probabilità [34], come descritto nella tabella seguente (Tab 3.1):

SOGLIA	DESCRIZIONE DELLA PROBABILITÀ DI ACCADIMENTO	VALORE
Altamente probabile	1) Sono noti episodi in cui il pericolo ha causato danno 2) Il pericolo può trasformarsi in danno con una correlazione 3) Il verificarsi del danno non susciterebbe sorpresa	P4
Probabile	1) È noto qualche episodio in cui il pericolo ha causato danno 2) Il pericolo può trasformarsi in danno anche se non in modo automatico 3) Il verificarsi del danno susciterebbe scarsa sorpresa	P3

Poco probabile	1) Sono noti rari episodi già verificati 2) Il danno può verificarsi solo in circostanze particolari 3) Il verificarsi del danno susciterebbe sorpresa	P2
Improbabile	1) Non sono noti episodi già verificati 2) Il danno si può verificare solo per una concatenazione di eventi improbabili 3) Il verificarsi del danno susciterebbe incredulità	P1

Tabella 3.1: Descrizione delle classi di probabilità di accadimento

Allo stesso modo, il danno rappresenta la stima del potenziale impatto derivante da un fattore di rischio. Anche in questo caso, la gravità del danno può essere classificata su una scala da 1 a 4, in base a una serie di soglie che ne definiscono l'entità (Tab 3.2).

SOGLIA	DESCRIZIONE DELL'ENTITÀ DEL DANNO	VALORE
Gravissimo	1) Infortunio con lesioni molto gravi irreversibili e invalidità totale o conseguenze letali 2) Esposizione cronica con effetti letali o totalmente invalidanti	D4
Grave	1) Infortunio o inabilità temporanea con lesioni significative irreversibili o invalidità parziale 2) Esposizione cronica con effetti irreversibili o parzialmente invalidanti	D3
Medio	1) Infortunio o inabilità temporanea con disturbi o lesioni significative reversibili a medio termine 2) Esposizione cronica con effetti reversibili	D2
Lieve	1) Infortunio o inabilità temporanea con effetti rapidamente reversibili 2) Esposizione cronica con effetti rapidamente reversibili	D1

Tabella 3.2: Descrizione delle classi di entità del danno

Il rischio [R] viene calcolato combinando la probabilità di accadimento e la gravità del danno, assumendo un valore compreso tra 1 e 16. Questo valore può essere rappresentato graficamente da una matrice di rischio (Fig. 3.1), che rappresenta uno strumento molto utile per la valutazione dei rischi. La matrice visualizza i rischi associati a specifici processi lavorativi, consentendo di identificare e comprendere rapidamente le aree più critiche.

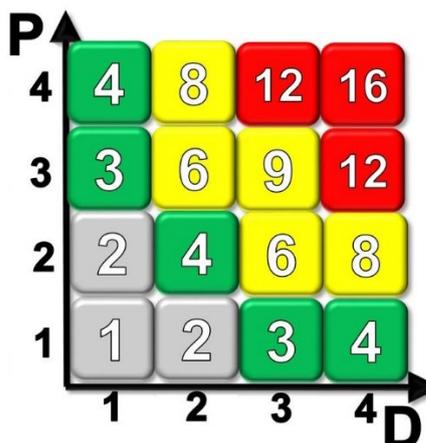


Figura 3.1: Esempio matrice per la valutazione dei rischi

In base al valore ottenuto nella matrice, è possibile classificare il rischio in quattro categorie, che indicano il livello di pericolosità della situazione lavorativa [35]:

1. Rischio basso ($1 \leq R \leq 2$): In questa categoria, il rischio residuo è tale che gli incidenti o le esposizioni acute causano solo infortuni lievi, con inabilità temporanea e facilmente reversibile, o esposizioni croniche con effetti rapidamente risolvibili.
2. Rischio accettabile ($3 \leq R \leq 4$): In questo caso, la situazione di rischio può provocare infortuni o esposizioni acute con inabilità reversibile, oppure esposizioni croniche i cui effetti si risolvono nel medio termine.
3. Rischio notevole ($6 \leq R \leq 9$): La situazione di rischio è più grave e può portare a infortuni o esposizioni acute con invalidità parziale, oppure esposizioni croniche con effetti irreversibili o parzialmente invalidanti.

4. Rischio elevato ($12 \leq R \leq 16$): Livello di rischio più alto, in cui possono verificarsi incidenti o esposizioni acute con conseguenze letali o con invalidità totale. Le esposizioni croniche a questo livello possono portare a effetti letali o invalidanti in modo permanente.

La valutazione dei rischi è un elemento imprescindibile in due documenti fondamentali per la gestione della sicurezza nei cantieri: il Piano Operativo di Sicurezza (POS) e il Piano di Coordinamento della Sicurezza (PSC).

Il POS [36] redatto dal datore di lavoro è un documento che descrive la valutazione dei rischi specifici ai quali sono esposti i dipendenti dell'impresa nello svolgimento delle attività in un cantiere. Ciò include una descrizione del lavoro, l'organizzazione del cantiere, le misure preventive e protettive da adottare e un elenco delle attrezzature utilizzate, come impalcature e materiali pericolosi.

Nel presente documento, oltre alla valutazione dei rischi, vengono fornite delle linee guida per la gestione di tali rischi, classificati in base alla gravità e alla probabilità. Il POS infatti garantisce che i rischi bassi o accettabili vengano costantemente monitorati, mentre i rischi più significativi, vengano mitigati tramite l'applicazione di interventi specifici.

Parallelamente, il PSC è un documento tecnico redatto dal Coordinatore della Sicurezza in fase di Progettazione (CSP) e supervisionato dal Coordinatore della Sicurezza in fase di Esecuzione (CSE). Esso identifica le fasi di lavoro più a rischio nel cantiere e stabilisce le misure di sicurezza collettiva da adottare. Il PSC include una valutazione dettagliata dei rischi, con un focus particolare sui rischi esterni come, ad esempio, la circolazione di veicoli nell'area adiacente al cantiere. Le soluzioni proposte mirano a ridurre o prevenire tali rischi attraverso azioni concrete e mirate alla protezione della salute e della sicurezza.

Il PSC è obbligatorio solo nei cantieri dove operano più imprese, anche non contemporaneamente, secondo quanto stabilito dall'art. 100 del D.Lgs. 81/2008. Questo documento è essenziale per coordinare le misure di sicurezza tra le diverse imprese presenti e prevenire interferenze tra le attività svolte da soggetti diversi. Nel caso di un unico appaltatore, non è necessario redigere il PSC, ma è sufficiente il POS.

Tuttavia, se nel corso dei lavori vengono coinvolte più imprese, anche attraverso subappalti, il PSC diventa obbligatorio per garantire un'adeguata armonizzazione delle misure di sicurezza e una gestione coordinata del cantiere.

3.4 ANALISI DEI RISCHI NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Nella gestione della sicurezza nei cantieri autostradali, è fondamentale tenere conto, per la protezione dei lavoratori, non solo dei rischi interni al cantiere stesso, ma anche e soprattutto dei rischi interferenziali prodotti dagli utenti dell'infrastruttura. I rischi interferenziali emergono quando attività distinte, spesso svolte da soggetti differenti ma su aree contigue, si sovrappongono, creando potenziali situazioni di pericolo. Il traffico veicolare, per l'appunto, è un elemento esterno che può interferire con le operazioni all'interno del cantiere, richiedendo dunque un'attenta valutazione.

Il Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro (D.Lgs. 81/2008), all'interno dell'Allegato XV, punto 2.2.1.b [32], evidenzia la necessità che il Piano di Sicurezza e Coordinamento (PSC) includa un'analisi dell'eventuale presenza di fattori esterni che comportano rischi per il cantiere. Nei cantieri autostradali, questa indicazione è particolarmente rilevante, poiché le interferenze tra operazioni di cantiere e traffico veicolare possono amplificare i rischi sia per i lavoratori sia per gli automobilisti.

I rischi interferenziali nei cantieri autostradali derivano principalmente dall'interazione tra:

- Le attività di costruzione o manutenzione svolte dagli operai;
- Il traffico veicolare che scorre vicino alle aree di lavoro, anche se regolato da deviazioni o riduzioni di corsia;
- L'utilizzo di macchinari pesanti e la movimentazione di materiali all'interno del cantiere.

Queste interazioni creano un ambiente di lavoro particolarmente pericoloso, in cui gli incidenti possono verificarsi facilmente a causa di manovre errate, distrazioni, o veicoli in transito a velocità eccessiva. L'interferenza tra le attività del cantiere e il traffico veicolare può, infatti, esporre operai e automobilisti a rischi di collisioni o investimenti,

soprattutto se le misure di sicurezza, come la segnaletica temporanea e le barriere protettive, non vengono gestite in modo adeguato.

Nella gestione della sicurezza nei cantieri autostradali, è fondamentale identificare i principali rischi a cui sono esposti gli operatori. Tra i rischi più significativi vi sono:

- Caduta di oggetti dall'alto
- Cadute dall'alto nei lavori su ponti o sopraelevazioni
- Rischi correlati all'utilizzo di macchinari pesanti, come gru, escavatori e rulli compattatori.
- Rischio di seppellimento/schiacciamento
- Rischio di esposizione a polveri e sostanze chimiche
- Rischi organizzativi e gestionali quali mancanza di formazione adeguata o una comunicazione insufficiente tra i vari attori coinvolti (operai, responsabili della sicurezza e utenti della strada)

Per quanto riguarda i rischi interferenziali, essi comprendono:

- Esposizione al traffico veicolare: i lavoratori corrono il rischio di essere investiti dai veicoli in transito vicino al cantiere.
- Segnaletica temporanea inadeguata: la segnaletica temporanea non chiara può confondere i conducenti e aumentare il rischio di incidenti.
- Cambiamenti improvvisi del tracciato: curve impreviste, restringimenti della carreggiata possono sorprendere i conducenti e aumentare il rischio di collisione.
- Condizioni meteorologiche avverse: pioggia e nebbia possono ridurre la visibilità e rendere difficile vedere i lavori o le modifiche della carreggiata.
- Eccesso di velocità dei veicoli: nonostante il limite di velocità, alcuni conducenti potrebbero non rispettarlo, aumentando il rischio di incidente.
- Comportamento del conducente distratto o imprudente: l'uso di un dispositivo mobile o la guida sotto l'influenza di alcol o droghe può aumentare il rischio incidenti.

Sulla base di tali considerazioni, è essenziale concentrarsi sulla gestione dei rischi interferenziali per migliorare la sicurezza in primis dei lavoratori, ma anche dei conducenti che transitano nelle vicinanze dei cantieri. Oltre alla sicurezza in cantiere normata dal D.Lgs. 81/2008, anche le buone pratiche di sicurezza stradale svolgono un ruolo cruciale, soprattutto nei cantieri autostradali, dove l'interazione tra operai e veicoli può generare situazioni pericolose.

In conclusione è necessario adottare un approccio olistico che integri le normative relative alla salute e sicurezza dei lavoratori alle raccomandazioni fornite dall'Highway Safety Manual (HSM). Quest'ultimo è un riferimento fondamentale per valutare gli impatti dei cantieri sulla sicurezza stradale e, di conseguenza, le adeguate misure protettive da implementare.

Solo in questo modo risulta possibile avere una visione integrata della sicurezza stradale e della gestione dei rischi nei cantieri autostradali permettendo di adottare strategie più efficaci per ridurre il numero di incidenti, proteggendo così sia i lavoratori sia gli utenti della strada.

3.5 HIGHWAY SAFETY MANUAL E IL METODO PREDITTIVO

L'Highway Safety Manual (HSM) è il documento di riferimento principale per integrare l'analisi quantitativa della sicurezza nei processi di pianificazione e sviluppo dei progetti di trasporto stradale. Esso fornisce una base di conoscenze e strumenti per supportare i professionisti nel prendere decisioni relative alla sicurezza stradale. Attraverso il metodo predittivo, l'HSM permette di stimare e prevedere il numero e la gravità degli incidenti stradali per diverse tipologie di strade e di intersezioni, in funzione del traffico e delle caratteristiche geometriche [37]. I metodi predittivi migliorano l'accuratezza delle attività di screening, utili a individuare le aree con maggiore potenziale di intervento, e permettono di effettuare valutazioni più dettagliate sulle caratteristiche geometriche e operative di un'infrastruttura.

Il metodo predittivo è fondamentale per:

- Valutare strutture esistenti considerando i volumi di traffico passati o futuri.

- Confrontare progetti alternativi per strutture esistenti in base ai volumi di traffico passati o futuri.
- Confrontare progetti alternativi per nuove strutture in base ai futuri volumi di traffico.
- Valutare l'efficacia delle contromisure dopo una fase di attuazione.
- Valutare l'efficacia delle contromisure proposte sulle strutture esistenti prima dell'implementazione.

L'edizione 2014 dell'Highway Safety Manual (HSM) ha introdotto diversi nuovi capitoli, tra cui uno dedicato alle autostrade. Il capitolo 18 dell'HSM, in particolare, descrive un metodo predittivo per le autostrade, offrendo una procedura dettagliata per stimare la frequenza media attesa degli incidenti (in totale, per tipo di incidente o per gravità) per un determinato segmento autostradale. Questa metodologia predittiva può essere applicata sia alle infrastrutture esistenti sia ai progetti di nuove autostrade, fornendo stime per periodi passati o futuri e supportando così i processi decisionali relativi alla sicurezza.

Il metodo predittivo stima la frequenza media di incidenti prevista per uno specifico segmento o rete autostradale in un determinato periodo di tempo, assumendo che le caratteristiche geometriche, i dispositivi di controllo del traffico e i volumi di traffico (AADT) rimangano costanti. Questa stima si basa tipicamente su modelli di regressione sviluppati a partire dai dati di incidentalità osservati in più siti simili.

Per ogni sito, la frequenza di incidenti prevista ($N_{\text{predicted}}$) viene calcolata utilizzando gli SPF e aggiustata in base alle condizioni geometriche e di traffico locali utilizzando i CMF. Per i siti esistenti, la frequenza di incidenti osservata (N_{observed}) può essere combinata con quella prevista per migliorare l'affidabilità statistica della stima. Il risultato finale è la frequenza media di incidenti prevista (N_{expected}), che rappresenta la frequenza media di incidenti a lungo termine che ci si aspetterebbe nel tempo, date le condizioni stabili.

Una volta calcolate le frequenze di incidente previste per i singoli siti, la loro somma rappresenta la frequenza media di incidente prevista per l'intera struttura o rete autostradale. Questo approccio cumulativo è essenziale per prendere decisioni

consapevoli sul miglioramento della sicurezza. Il metodo predittivo per le autostrade è illustrato nella Fig. 3.2 estratta dall'HSM e di seguito riportata [38].

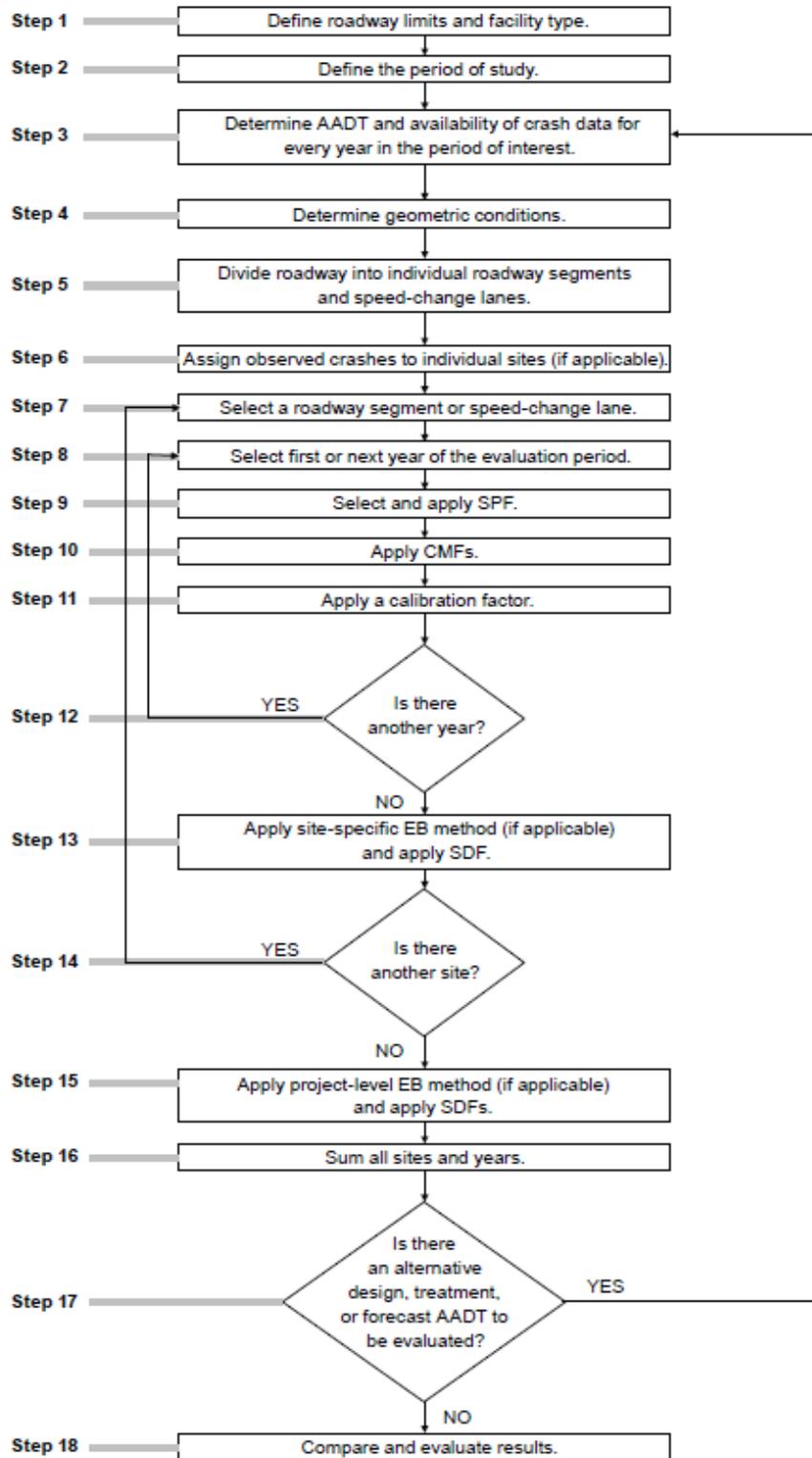


Figura 3.2: Step del metodo predittivo per le autostrade

La frequenza media degli incidenti è stimata utilizzando una combinazione di Safety Performance Functions (SPF) e Crash Modification Factors (CMF), oltre a un fattore di calibrazione per regolare le condizioni locali (C) espressa nella sua forma generale dall'equazione:

$$N_{predicted,w,x,y,z} = N_{SPF,w,x,y,z} \times (CMF_1 \times CMF_2 \times \dots \times CMF_n) \times C_{w,x,y,z}$$

Equazione 3.2: Frequenza media di incidenti prevista in un anno in un sito specifico

Dove:

- $N_{predicted, w,x,y,z}$: frequenza media di incidenti prevista per un anno specifico per il tipo di sito w, la sezione trasversale o il tipo di controllo x, il tipo di incidente y e la gravità z (incidenti/anno);
- $N_{spf, w,x,y,z}$: frequenza media prevista di incidenti determinata per le condizioni di base dell'SPF sviluppato per il tipo di sito w, la sezione trasversale o il tipo di controllo x, il tipo di incidente y e la gravità z (incidenti/anno);
- $CMF_{w,x,y,z}$: fattori di modifica degli incidenti specifici per il tipo di sito w, la sezione trasversale o il tipo di controllo x, il tipo di incidente y e la gravità z;
- $C_{w,x,y,z}$: fattore di calibrazione per adattare l'SPF alle condizioni locali per il tipo di sito w, la sezione trasversale o il tipo di controllo x, il tipo di incidente y e la gravità z.

Gli elementi chiave del metodo predittivo includono le funzioni di prestazione della sicurezza (SPF), i fattori di modifica degli incidenti (CMF) e i fattori di calibrazione. Questi elementi sono essenziali per comprendere come il metodo stima la frequenza degli incidenti sulle autostrade. Per questo motivo, verranno analizzati dettagliatamente nel seguito [37].

1. Funzioni di prestazione della sicurezza (SPF)

Le SPF sono modelli di regressione utilizzati per prevedere la frequenza media degli incidenti per un particolare tipo di segmento stradale o intersezione in “condizioni di base”. Queste condizioni di base si riferiscono a un insieme di caratteristiche tipiche e standard che non riflettono necessariamente le

condizioni uniche di ogni sito, ma forniscono una base generale per il confronto. Gli SPF tengono conto principalmente del Traffico Giornaliero Medio Annuale (AADT), il numero medio di veicoli che transitano ogni giorno su un segmento stradale, poiché volumi di traffico più elevati comportano generalmente un maggior numero di incidenti. Queste funzioni possono anche incorporare altre variabili, come il tipo di strada, il numero di corsie o la classificazione della strada. Tuttavia, questa previsione di base non riflette ancora le condizioni reali del sito specifico, ma è solo una previsione generale basata sul volume di traffico.

2. Crash Modification Factor (CMF)

I Crash Modification Factor (CMF) vengono applicati per aggiustare la frequenza degli incidenti prevista dall'SPF per tenere conto delle condizioni specifiche del sito che si discostano dalle condizioni base. I CMF sono moltiplicatori che rappresentano l'influenza di diverse caratteristiche di progettazione stradale, misure di controllo del traffico o altri fattori che possono aumentare o diminuire la probabilità di incidente. Ogni CMF corrisponde a una particolare caratteristica o condizione della strada e modifica l'output dell'SPF. Un CMF può essere maggiore di 1, indicando un aumento del rischio di incidente rispetto alle condizioni di base, o minore di 1, indicando un rischio di incidente ridotto.

Il CMF è dunque il rapporto tra le frequenze degli incidenti in due diverse condizioni (a e b), mantenendo costanti tutte le altre caratteristiche del sito.

$$CMF = \frac{\mu_a}{\mu_b}$$

Equazione 3.3: Crash Modification Factor

3. Fattori di calibrazione (C)

Il fattore di calibrazione tiene conto delle variazioni locali che non vengono colte dagli SPF e dai CMF. Le SPF e i CMF sono spesso sviluppati sulla base di dati nazionali, tuttavia in Stati diversi si possono registrare tassi di incidentalità differenti a causa di fattori quali il comportamento di guida locale, le condizioni meteorologiche o i livelli di controllo.

I fattori di calibrazione aiutano a regolare il modello predittivo per allinearlo alle condizioni locali, migliorandone l'accuratezza per la specifica giurisdizione in cui si svolge lo studio.

L'equazione 3.3 viene perciò utilizzata per stimare la frequenza media di incidentalità per un periodo passato o futuro quando non vi è disponibilità di dati relativi agli incidenti osservati in un determinato periodo di studio. Nel caso in cui fossero disponibili dati relativi alla frequenza media osservata $N_{observed}$ è possibile calcolare la frequenza media attesa di incidentalità $N_{expected}$ in modo da ottenere un risultato più attendibile dal punto di vista statistico.

Dunque, l'espressione che descrive la frequenza media attesa è data dalla seguente:

$$N_{expected} = \alpha \times N_{predicted} + (1 - \alpha) \times N_{observed}$$

Equazione 3.4: Frequenza media attesa di incidentalità

dove:

$N_{expected}$: frequenza media attesa di incidentalità per il sito specifico [inc./anno];

$N_{predicted}$: frequenza media prevista di incidentalità del sito specifico [inc./anno];

$N_{observed}$: frequenza media osservata dell'incidentalità del sito specifico [inc./anno];

α : coefficiente di ponderazione pari a:

$$\alpha = \frac{1}{1 + k \times \left(\sum_{\substack{\text{all} \\ \text{study} \\ \text{year}}} N_{predicted} \right)}$$

Equazione 3.5: Coefficiente di ponderazione

dove k è il parametro di sovradisersione della SPF utilizzata per la previsione.

Il metodo predittivo dunque fornisce un approccio robusto e basato sui dati per stimare la frequenza degli incidenti sulle autostrade, sia per le strutture esistenti che per

i nuovi progetti. Combinando SPF, CMF e fattori di calibrazione, questo metodo supporta lo sviluppo di infrastrutture stradali più sicure, consentendo previsioni accurate della frequenza degli incidenti e strategie di miglioramento della sicurezza ben informate.

Nel prossimo capitolo si analizzeranno singolarmente i fattori di rischio interferenziali tra cantiere e traffico, integrandoli con i dati forniti dall'HSM o da studi correlati, così da individuarne i relativi CMF e ottenere una valutazione più completa del rischio.

4 VALUTAZIONE DEL RISCHIO INTERFERENZIALE TRA CANTIERE E TRAFFICO AUTOSTRADALE

La presenza del cantiere in una tratta autostradale può generare un pericolo di incidente che può essere gestito attraverso un'analisi del rischio interferenziale (durante la stesura del PSC) tra la viabilità ordinaria e il cantiere stesso. La criticità maggiore è l'intrusione di uno o più veicoli nelle zone di lavoro autostradali, poiché comportano rischi significativi sia per gli occupanti dei veicoli che per gli operai intenti a svolgere le lavorazioni previste in progetto. Sebbene siano state implementate diverse iniziative per tutelare i lavoratori, è stata data meno attenzione alla prevenzione di tali intrusioni, che rimane un'area chiave per migliorare la sicurezza complessiva delle zone di lavoro. L'obiettivo di questo capitolo è valutare i principali fattori che influenzano questo rischio e identificare potenziali misure in grado di aumentare il livello di sicurezza generale.

4.1 TRENDS DELLE INTRUSIONI NELLE ZONE DI LAVORO

Uno studio condotto dal Texas Transportation Institute, basato sull'analisi del database di incidenti stradali del Dipartimento dei Trasporti dello Stato di New York (NYSDOT), rivela che le intrusioni di veicoli nelle zone di lavoro rappresentano una percentuale relativamente ridotta degli incidenti complessivi che si verificano in queste aree [39].

Come mostrato nella Tabella 4.1, gli incidenti da intrusione rappresentano il 7,5% degli incidenti in zona di lavoro diurni quando i lavori sono in corso e il 12,4% di tali incidenti durante i lavori notturni. Un sottoinsieme minore di incidenti da intrusione (circa il 4%) si è verificato anche in periodi in cui non erano in corso attività lavorative.

Diversi fattori possono spiegare la disparità delle percentuali di incidenti da intrusione tra giorno e notte. I lavori notturni spesso si affidano esclusivamente a dispositivi di canalizzazione per separare il traffico dalla zona di lavoro, mentre le operazioni diurne sono più spesso protette da barriere. Inoltre, i volumi di traffico più bassi di notte possono contribuire ad aumentare la probabilità che gli incidenti si verifichino

all'interno o in prossimità dell'area di lavoro stessa, mentre la maggiore congestione diurna può causare incidenti a monte della zona di lavoro.

Key Crash Types	Daytime Work Operations, Daytime Crashes (n=1762)	Nighttime Work Operations, Nighttime Crashes (n=315)
Rear End	49.0%	35.6%
Other Multi-Vehicle	16.8%	14.3%
Single Vehicle Run-Off-Road	9.4%	9.8%
Intrusion Impacts with Workers, Equipment, or Debris	7.5%	12.4%
Non-intrusion Impacts with Workers, Equipment, or Debris	10.8%	15.6%
Impacts with TMA	2.7%	9.8%
Other Miscellaneous Types	3.8%	2.5%

Tabella 4.1: Tipologia di incidenti nelle zone di lavoro (NYSDOT Database)

Per quanto riguarda i tipi di oggetti colpiti durante le intrusioni (riassunti nella Tabella 4.2), i lavoratori hanno rappresentato il 15,7% degli impatti, mentre una quota maggiore di collisioni ha coinvolto veicoli o attrezzature da costruzione (49%) e materiali da costruzione o detriti (35,3%).

Item Struck	Percent of Intrusion Crashes
Worker	15.7%
Construction Vehicle or Equipment	49.0%
Construction Material or Debris	35.3%

Tabella 4.2: Tipologia di oggetti colpiti durante le intrusioni nelle aree di lavoro

Infine, la Tabella 4.3 presenta i dati sulla gravità degli incidenti. Circa il 44% degli incidenti da intrusione ha provocato feriti o vittime, mentre il restante 56,2% è stato classificato come evento con soli danni alle cose.

Crash Severity	Percent of Intrusion Crashes
Severe (Injury & Fatalities)	43.8%
Property Damage Only	56.2%

Tabella 4.3: Gravità degli incidenti di intrusione

I dati della Tabella 4.4 sono stati ottenuti da un sondaggio online e da interviste telefoniche condotte con il personale di Caltrans (California Department of Transportation) e i contractor autostradali. Dall'analisi dei risultati emerge che quasi due terzi delle intrusioni di veicoli sono state registrate sulle autostrade. La maggior parte di queste intrusioni (circa l'80%) è avvenuta durante le ore diurne, una tendenza che rispecchia i risultati del database NYSDOT. Inoltre, il numero maggiore di intrusioni notturne è stato registrato sulle autostrade rispetto alle strade statali. Questo fenomeno può essere attribuito alla pratica comune di condurre lavori notturni su strade ad alto traffico, al fine di evitare la congestione diurna.

Time of Day	Facility Type		
	Freeway (n=19)	State Highway (n=11)	Total (n=30)
Daytime	47%	33%	80%
Nighttime	17%	3%	20%
Total (n=30)	64%	36%	100%

Tabella 4.4: Percentuale di incidenti di intrusione classificati per tipologia di strada e momento della giornata

La Tabella 4.5 illustra infine la ripartizione di queste collisioni in base al primo oggetto colpito. Il 63 % delle intrusioni in cantieri autostradali ha coinvolto un veicolo da lavoro, per contro, solo l'11% ha coinvolto un lavoratore a piedi.

Object Struck	Freeway (n=30)	State Hwy (n=11)	Both Roadway Types Combined (n=30)
Work Vehicle	63%	27%	50%
Worker On Foot	11%	27%	17%
Other Vehicle	5%	9%	7%
Fixed Object or TCD Object	16%	9%	13%
Nothing	5%	27%	13%
Total	100%	100%	100%

Tabella 4.5: Percentuale di intrusioni classificate in base alla tipologia di strada e al primo oggetto colpito

4.2 FATTORI CHE INFLUENZANO LA SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Nelle zone di lavoro autostradali, diversi fattori influenzano la sicurezza, in particolare quando si considera il rischio interferenziale tra le attività di costruzione e il traffico dei veicoli. La combinazione di questi fattori gioca un ruolo cruciale nel determinare la probabilità di intrusioni nell'area di lavoro. Attraverso la loro analisi, è dunque possibile identificare il livello di rischio nei cantieri e valutare correttamente le misure preventive.

I fattori chiave che influenzano la sicurezza in una zona di lavoro autostradale sono:

- Disposizione della zona di lavoro: chiusura delle corsie, chiusura delle banchine, scambi di carreggiata
- Durata della zona di lavoro
- Lunghezza della zona di lavoro
- Volume e composizione del traffico
- Limiti di velocità e comportamento dei conducenti
- Condizioni di illuminazione e di visibilità

- Caratteristiche geometriche della carreggiata:
 - Curve longitudinali
 - Curve verticali
 - Larghezza della corsia
- Condizioni della pavimentazione
- Condizioni meteorologiche

Ognuno di questi fattori sarà analizzato in dettaglio per capire come contribuiscono al rischio di interferenze e intrusioni, aiutando a sviluppare protocolli di sicurezza più efficaci.

4.2.1 LAYOUT DI CANTIERE

La sicurezza stradale nelle aree di lavoro autostradali dipende fortemente dalla configurazione del cantiere, che può variare in base al numero di corsie e alle modalità di deviazione del traffico. Le chiusure di corsie, infatti, influenzano la fluidità del traffico e il rischio di incidenti, richiedendo una gestione accurata per minimizzare i pericoli.

In questo contesto si inserisce il progetto PRACT [40] (Road Accident Prediction - Collision Mitigation Tools), un'iniziativa di ricerca finalizzata a migliorare la sicurezza stradale tramite lo sviluppo e la valutazione dei Crash Modification Factors (CMF), con particolare focus sulle contromisure adottate nelle autostrade europee.

Il progetto ha analizzato approfonditamente i cantieri in Italia, esaminando dati raccolti su circa 3000 km di rete autostradale gestita da Autostrade per l'Italia (ASPI). Sono stati utilizzati due approcci metodologici per stimare i CMF: l'Empirical Bayes Before-After (EB) e modelli di regressione, scelti in base al tipo di fattore analizzato e alla disponibilità dei dati.

I dati, provenienti da oltre 30.000 cantieri fissi istituiti tra il 2007 e il 2012, comprendono dettagli su circa 105.000 incidenti verificatisi nello stesso periodo. Il database risultante offre informazioni dettagliate sulle caratteristiche stradali di circa 2100 km di carreggiate, volumi di traffico e specifiche delle aree di lavoro, come ubicazione, durata e segnaletica. Ogni incidente è stato analizzato considerando

variabili come condizioni meteorologiche, gravità delle vittime e tipo di veicolo coinvolto.

Per quanto riguarda le configurazioni di cantiere, il documento analizza i diversi layout riportati nella Tabella 4.6 e Tabella 4.7, suddivisi in base alla presenza di due o tre corsie di marcia.

Carreggiata a Due Corsie		
Emergency2:	Chiusura della corsia di emergenza (corsia esterna pavimentata).	
Slow2:	Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia di sorpasso.	
Fast2:	Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia lenta.	
Fast2(2):	Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso le corsie lenta e di emergenza.	
Cross2(0+1):	Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia di sorpasso; chiusura della corsia di sorpasso e deviazione totale del traffico verso la carreggiata opposta attraverso un crossover a corsia singola.	

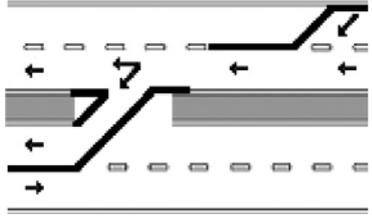
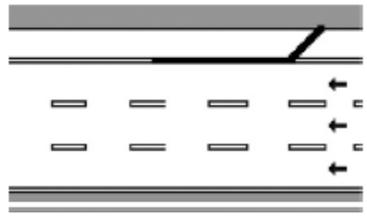
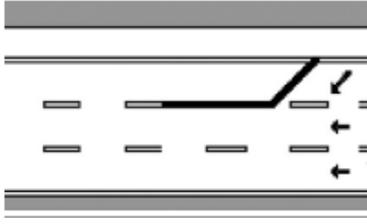
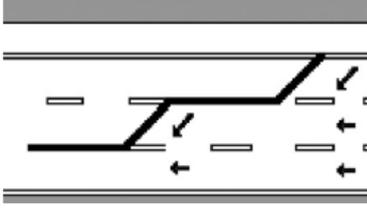
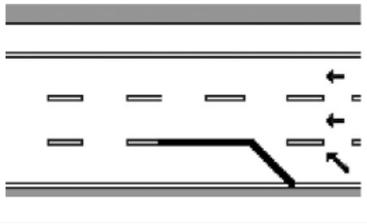
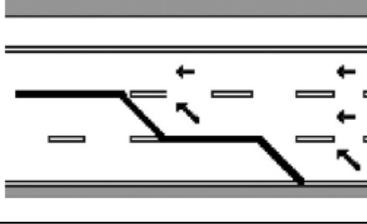
<p>Cross2(1+1):</p>	<p>Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia di sorpasso; deviazione parziale del traffico verso la carreggiata opposta attraverso un crossover a corsia singola (il conducente può scegliere se rimanere sulla corsia di sorpasso o spostarsi sulla carreggiata opposta).</p>	
----------------------------	---	--

Tabella 4.6: Diverse configurazioni di cantiere per carreggiata a due corsie

<p>Carreggiata a tre corsie</p>		
<p>Emergency3:</p>	<p>Chiusura della corsia di emergenza (corsia esterna pavimentata).</p>	
<p>Slow3:</p>	<p>Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia centrale.</p>	
<p>Slow&Middle3:</p>	<p>Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale con traffico deviato verso la corsia di sorpasso.</p>	
<p>Fast3:</p>	<p>Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia centrale.</p>	
<p>Middle&Fast3:</p>	<p>Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale con traffico deviato verso la corsia lenta.</p>	

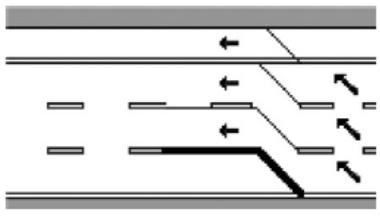
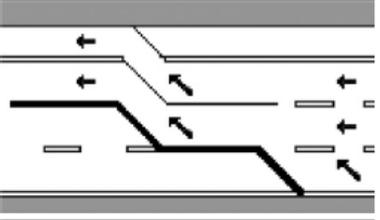
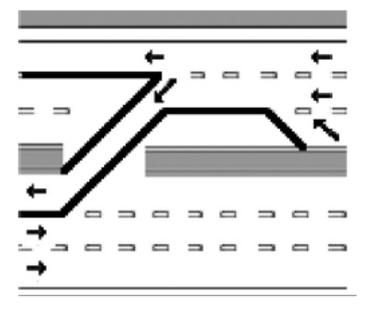
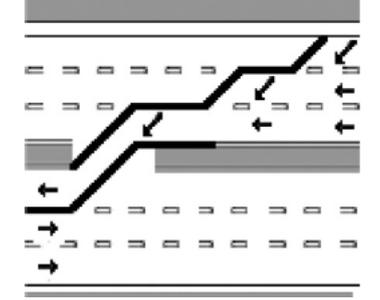
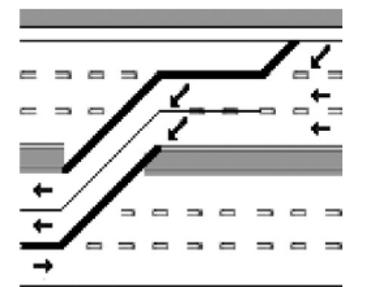
<p>Fast3(3):</p>	<p>Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso le corsie centrale, lenta e di emergenza.</p>	
<p>Middle&Fast3(2):</p>	<p>Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale con traffico deviato verso le corsie lenta ed emergenza.</p>	
<p>Cross3(1+1):</p>	<p>Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale e deviazione parziale del traffico verso le corsie lenta e opposta attraverso un crossover a corsia singola (il conducente può scegliere tra la corsia lenta e quella opposta).</p>	
<p>Cross3(0+1):</p>	<p>Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale con traffico deviato verso la corsia di sorpasso e deviazione totale del traffico verso la carreggiata opposta attraverso un crossover a corsia singola.</p>	
<p>Cross3(0+2):</p>	<p>Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale e deviazione totale del traffico verso la carreggiata opposta attraverso un crossover a due corsie.</p>	

Tabella 4.7: Configurazioni di cantiere per carreggiata a tre corsie

I risultati del progetto PRACT relativi a queste configurazioni sono presentati nella Fig. 4.1 e mostrano le stime dei CMF per le zone di lavoro autostradali italiane.

Layout	CMF	Std. Dev. (CMF)	95% Confidence Interval (lower limit)	95% Confidence Interval (upper limit)
Cross2(1+1)	3.11	0.56	2.01	4.22
Cross3(1+1)	2.80	0.52	1.79	3.81
Cross3(0+1)	2.15	0.52	1.13	3.16
Cross2(0+1)	2.08	0.09	1.90	2.27
Slow&Middle3	1.91	0.56	0.81	3.01
Middle&Fast3	1.90	0.71	0.52	3.29
Fast2(2)	1.64	0.08	1.49	1.80
Slow2	1.62	0.12	1.39	1.85
Fast3(3)	1.51	0.18	1.16	1.87
Fast3	1.49	0.10	1.29	1.70
Emergency2	1.27	0.04	1.20	1.35
Cross3(0+2)	1.25	0.10	1.05	1.44
Fast2	1.08	0.06	0.95	1.20
Slow3	1.03	0.05	0.93	1.13
Emergency3	1.00	0.04	0.92	1.07
Middle&Fast3(2)	0.84	0.07	0.70	0.99
All	1.33	0.02	1.30	1.37

Figura 4.1: CMF stimati per le diverse configurazioni di cantiere

4.2.2 DURATA, LUNGHEZZA E TRAFFICO GIORNALIERO MEDIO

I primi fattori analizzati, sono la lunghezza del cantiere, la sua durata e l'esposizione al traffico. Un aumento di questi parametri comporta un maggiore rischio per i conducenti, che si trovano ad affrontare interazioni più frequenti sia con i mezzi pesanti utilizzati dagli operai che con altre vetture, a causa della probabile congestione. Questo è confermato nello studio *Effects of Work Zone Presence on Injury and Non-Injury Crashes* [41] condotto dai docenti Khattak et al., in cui è stato confrontato il numero di collisioni avvenute prima e durante i lavori, utilizzando il seguente tasso di incidentalità totale:

$$CR = \frac{\sum T}{\sum(A \cdot L \cdot D)/10^6}$$

Equazione 4.1: Tasso dell'incidentalità totale

dove:

- T: è il numero totale di collisioni in una zona di lavoro;
- A: rappresenta il traffico giornaliero medio (traffico/giorno);
- L: indica la lunghezza del cantiere (Km);
- D: è la durata dell'osservazione [giorni].

Il tasso di incidentalità totale si ottiene sommando la percentuale degli incidenti che hanno causato solo danni alle cose (*pdo*) e la proporzione delle collisioni che vedono coinvolti dei feriti.

Il tasso totale di incidenti nel periodo precedente ai lavori è di 0,65 incidenti per milione di chilometri percorsi dai veicoli (MVKM). Questo tasso si suddivide in 0,42 incidenti senza lesioni e 0,23 incidenti con lesioni per MVKM.

Il tasso totale di incidenti durante la fase di lavori era di 0,79 incidenti per MVKM, con un aumento del 21,53% rispetto al tasso del periodo pre-lavori sugli stessi tratti stradali.

I tassi di incidenti senza lesioni e con lesioni durante il periodo dei lavori sono rispettivamente di 0,52 e 0,27 per MVKM, mostrando un aumento del 23,8% e del 17,4% rispetto ai tassi del periodo pre-lavori.

In conclusione i tassi totali di incidenti sono aumentati durante il periodo dei lavori rispetto al periodo precedente e l'aumento dei tassi di incidenti senza lesioni è stato maggiore rispetto a quello degli incidenti con lesioni.

Nello specifico, lo studio condotto da Khattak e Council [41], ha investigato i tassi di incidenti nei periodi "pre-lavoro" e "durante-lavoro" utilizzando un dataset delle zone di lavoro sulle autostrade della California, che includeva dati sugli incidenti e dati sulle zone di lavoro durante un periodo di 2 anni (1992-1993). Hanno considerato durate delle zone di lavoro da 16 a 714 giorni, lunghezze delle zone di lavoro da 0,80 a 19,63

km e un Traffico Medio Giornaliero Annuale (AADT) da 4.000 a 237.000 veicoli/giorno. Sono stati sviluppati dunque 5 modelli distinti (Tab 4.8):

MODELLO 1	MODELLO 2	MODELLO 3	MODELLO 4	MODELLO 5
Frequenza totale degli incidenti durante i lavori (lesioni e pdo)	Frequenza degli incidenti pdo (periodo prima dei lavori)	Frequenza degli incidenti pdo (durante i lavori)	Frequenza degli incidenti con lesioni (periodo prima dei lavori)	Frequenza degli incidenti con lesioni (durante i lavori)

Tabella 4.8: Descrizione dei 5 modelli presi in esame

I risultati relativi al tasso di incidenti sono riassunti nella tabella sottostante (Tab 4.9):

	MODELLO 1	MODELLO 2	MODELLO 3	MODELLO 4	MODELLO 5
AADT (veicoli per giorno)	1.2659	1.3071	1.3331	1.2392	1.1984
Durata (days)	1.1149	0.9919	1.2317	0.7862	1.2549
Lunghezza (km)	0.6718	0.6291	0.6112	0.6911	0.7482

Tabella 4.9: Tasso di incidenti nei 5 modelli al variare del ADT, durata e lunghezza cantiere

Da questi valori è possibile trarre le seguenti informazioni:

- Durante i cantieri autostradali, l'AADT, la lunghezza e la durata del cantiere aumentano il numero di incidenti rispetto alle condizioni pre-cantiere. In particolar modo, l'aumento dell'1% del AADT provoca 1,2659 incidenti in più, l'aumento del 1% della durata del cantiere provoca 1,1149 incidenti in più e l'aumento della lunghezza del cantiere provoca un aumento degli incidenti di 0,6718.
- Confrontando i modelli 2 e 3 è possibile osservare come l'effetto della lunghezza del cantiere rimane sostanzialmente invariato tra i periodi prima e durante la zona di lavoro, il che implica che ridurre la lunghezza della zona di

lavoro potrebbe non essere un aspetto cruciale per la riduzione della frequenza degli incidenti nelle zone di lavoro. Un aumento dell'1% della lunghezza dei segmenti che successivamente sono diventati zone di lavoro può aumentare gli incidenti senza feriti dello 0,6718% e la lunghezza della zona di lavoro aumenta gli incidenti senza feriti dello 0,6112%.

- La durata dei lavori risulta essere il parametro che più impatta sulla frequenza di incidenti sia pdo che con feriti. Questo implica che ridurre la durata della zona di lavoro probabilmente ridurrà la frequenza degli incidenti con feriti, e lo farà a un tasso leggermente maggiore rispetto al periodo precedente alla zona di lavoro.

L'Highway Safety Manual (HSM) ha sintetizzato la ricerca precedente di Khattak e Council, per fornire una valutazione quantitativa della sicurezza nelle zone di lavoro in funzione della durata e della lunghezza delle zone di lavoro [37].

Per quanto riguarda la durata della zona di lavoro, il manuale presenta la seguente equazione:

$$AMF_{d,all} = 1 + \left(\frac{\% \text{ aumento della durata} \times 1,11}{100} \right)$$

Equazione 4.2: AMF relativo alla durata del cantiere ¹

La condizione base, in cui il AMF=1, corrisponde a 16 giorni. L'andamento del AMF in funzione dell'aumento della durata è illustrato nel grafico sottostante (Fig. 4.2). Si evidenzia che l'aumento percentuale massimo dell'AMF è pari al 100%; oltre questo valore, l'AMF non cresce ulteriormente, ma si stabilizza.

¹ CMF (Crash Modification Factor) e AMF (Accident Modification Factor) sono entrambi utilizzati per prevedere l'effetto di modifiche sul numero di incidenti. Il CMF si applica principalmente a interventi infrastrutturali (ad esempio, allargamento della corsia), mentre l'AMF include anche altri fattori come i comportamenti dei conducenti o l'impatto di eventi esterni (es. condizioni meteorologiche o cambiamenti nel traffico).

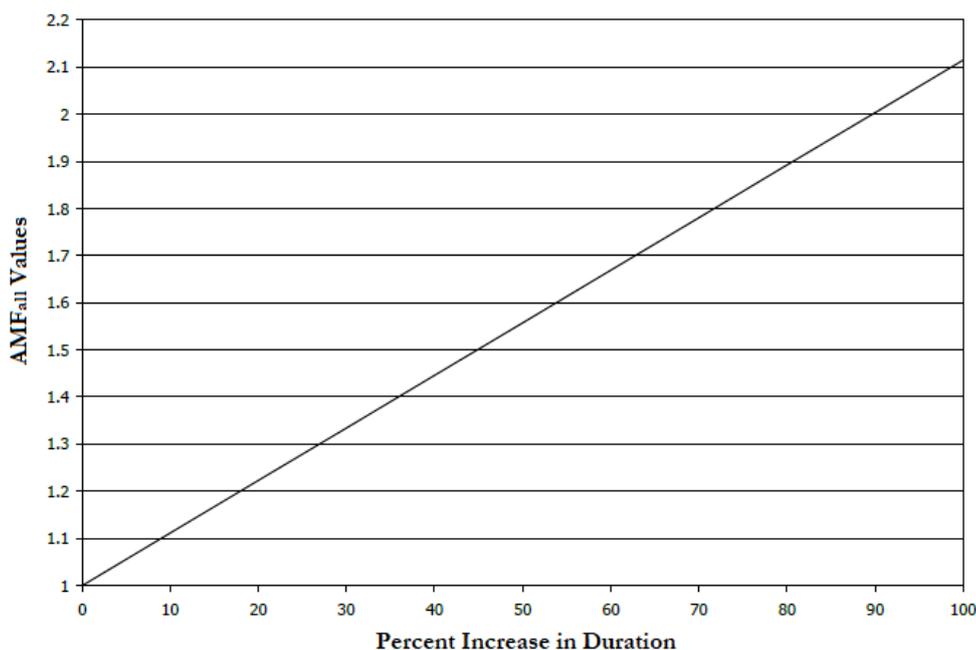


Figura 4.2: Frequenza media attesa di incidenti all'aumentare della durata della zona di lavoro

Per quanto concerne il AMF relativo alla lunghezza della zona di lavoro, l'HSM fornisce la seguente equazione:

$$AMF_{l,all} = 1 + \left(\frac{\% \text{ aumento della lunghezza} \times 0,67}{100} \right)$$

Equazione 4.3: AMF relativo alla lunghezza del cantiere

La condizione base, in cui il $AMF = 1$, è fissata a 0,84 km (0,51 miglia). Anche in questo caso, l'andamento del AMF in relazione all'aumento della lunghezza è rappresentato nel grafico sottostante (Fig. 4.3). Anche in questo caso, l'aumento percentuale massimo della lunghezza è pari al 100%, dopodiché l'AMF raggiunge un plateau.

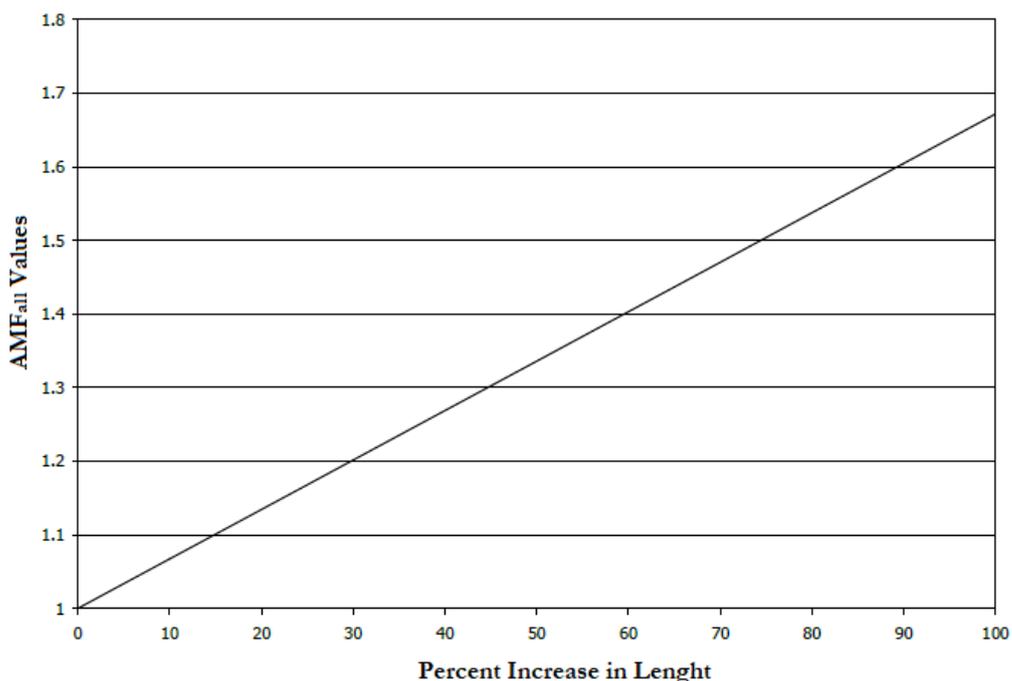


Figura 4.3: Frequenza media attesa di incidenti all'aumentare della lunghezza della zona di lavoro

Come già evidenziato, l'incidentalità a ridosso dei cantieri stradali è strettamente legata al numero di veicoli che transitano nella zona. Con l'aumento dei volumi di traffico, infatti, cresce il rischio di interferenze tra gli utenti della strada e i lavoratori presenti sul cantiere. Questa situazione può portare a un incremento degli incidenti, poiché un maggior numero di veicoli significa maggiori probabilità di collisioni o di situazioni di pericolo. In base ai dati riportati nello studio [41], è possibile dedurre per analogia, a partire dalle due equazioni precedenti che evidenziano l'aumento del numero di incidenti in relazione alla durata e alla lunghezza, la seguente equazione:

$$AMF_{TGM,all} = 1 + \left(\frac{\% \text{ aumento della durata} \times 1,26}{100} \right)$$

Equazione 4.4: AMF relativo al TGM

Questa formulazione non è stata verificata sperimentalmente e non è riportata nel HSM, ma viene proposta per confrontare in modo uniforme l'impatto relativo dei diversi fattori analizzati sulla sicurezza nei cantieri autostradali.

Analogamente a quanto già osservato per la durata e la lunghezza, è possibile rappresentare graficamente l'andamento dell'AMF in funzione dell'aumento del traffico (Fig. 4.4), con un limite massimo del 100% dell'aumento percentuale.

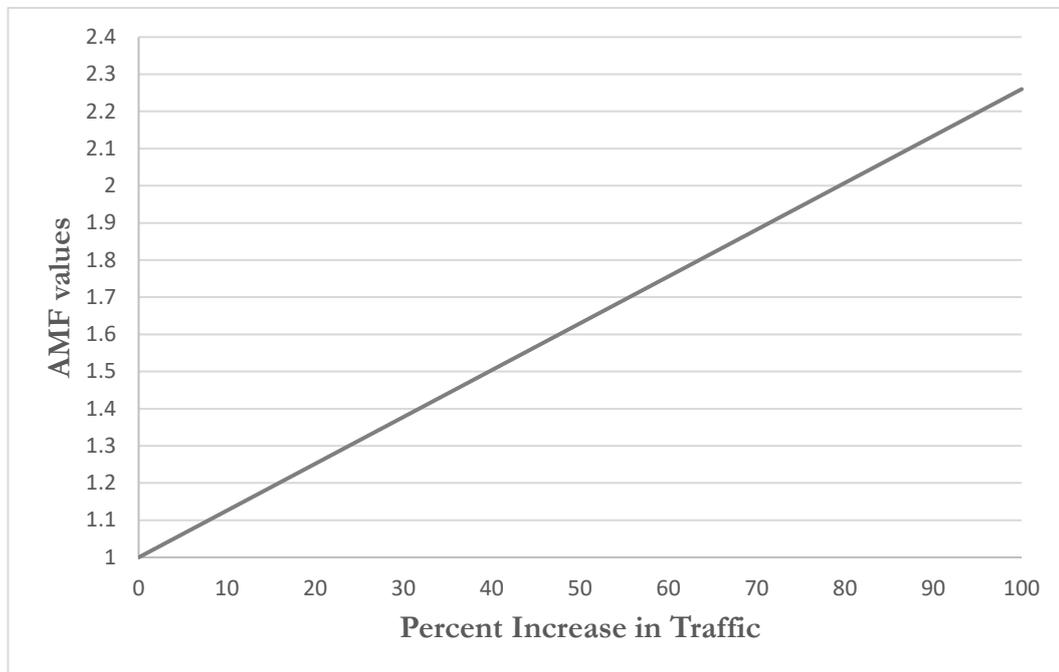


Figura 4.4: Frequenza media attesa di incidenti all'aumentare del traffico nella zona di lavoro

Risulta dunque fondamentale prestare una particolare attenzione alle condizioni del traffico e alla sua composizione. Non solo è importante monitorare il numero di veicoli in transito, ma è anche essenziale considerare la tipologia dei veicoli stessi. I veicoli pesanti, ad esempio, possono avere un impatto significativo sul flusso del traffico. Essi tendono a rallentare la circolazione, aumentando la variazione delle velocità medie. Inoltre, come già analizzato in precedenza, la loro massa e dimensioni li rendono meno manovrabili rispetto ai veicoli leggeri, perciò risulta più difficile evitare ostacoli o adeguarsi a cambiamenti improvvisi.

La combinazione di traffico pesante e condizioni di lavoro in corso richiede una gestione accurata e attenta da parte delle autorità responsabili, che devono assicurarsi che le misure di sicurezza siano sufficienti e adeguate.

4.2.3 LA VELOCITÀ

La velocità svolge un ruolo molto importante per la valutazione dei rischi interferenziali che si verificano nei cantieri autostradali. Questo aspetto è esaminato nello studio dell'Ispettore Gallo [42] il quale analizza i limiti di velocità e le contromisure da applicare in prossimità dei cantieri autostradali al fine di incrementare i livelli di sicurezza. Lo studio rivela che le condizioni di deflusso più sicure si ottengono quando gli utenti transitano a velocità simili tra loro. La percezione di pericolo, come la presenza di un'area di lavoro con operai e mezzi di cantiere, induce i conducenti a ridurre la velocità anche quando non necessario, aumentando così la variazione di velocità tra i veicoli.

Le linee guida raccomandano una riduzione moderata della velocità, generalmente tra i 10 e i 20 km/h rispetto al limite normale, come strategia ottimale per ridurre il tasso di incidenti. Ad esempio, una riduzione del limite di velocità di 16 km/h è stata associata al minimo aumento del tasso di incidenti, particolarmente per quanto riguarda gli incidenti mortali e con feriti. Questo suggerisce che una riduzione di questa entità è sufficiente per migliorare la sicurezza senza indurre i conducenti a ignorare i nuovi limiti [43].

In Italia, i limiti di velocità in prossimità delle aree di lavoro tendono a essere ridotti a intervalli di 20 km/h. Tuttavia, gli studi indicano che queste riduzioni più ampie possono non essere sempre efficaci [40]. In effetti, i tassi di incidenti totali non mostrano una riduzione statisticamente significativa quando si applicano riduzioni di velocità più elevate, mentre i tassi di incidenti mortali o con feriti aumentano notevolmente se i limiti di velocità vengono ridotti di oltre 20-25 km/h. Di seguito si riporta una tabella (Tab 4.10) che illustra i tassi di incidenti mortali e con feriti in base alla riduzione del limite di velocità [43]:

Riduzione del limite di velocità (km/h)	Aumento percentuale del tasso di incidenti mortali e con feriti
0	98,6%
16	4,1%
24	147,9%
32	112,5%

Tabella 4.10: Aumento percentuale dei tassi di incidenti rispetto alla riduzione del limite di velocità

Nel report 945 del NCHRP [39], si confermano i risultati emersi sulle riduzioni dei limiti di velocità. Il documento evidenzia come queste riduzioni vengano spesso applicate in risposta a variazioni delle condizioni della strada, come cambiamenti nella geometria, nel volume di traffico o nel rischio di incidenti, specialmente nelle zone di lavoro. Oltre tali aree, i limiti di velocità vengono riportati ai valori normali.

L'abbassamento dei limiti di velocità nelle zone di lavoro offre diversi benefici, primo tra tutti quello di incoraggiare il rispetto delle regole e migliorare la sicurezza dei lavoratori. Tuttavia, studi indicano che ridurre la velocità di oltre 16 km/h (10 miglia orarie) può aumentare la varianza tra le velocità dei veicoli, incrementando così il rischio di incidenti. Per questo motivo, il MUTCD raccomanda di limitare la riduzione a non più di 16 km/h, per garantire sia la sicurezza che la coerenza del flusso di traffico.

La tabella (Fig. 4.5) presenta i valori dei CMF relativi alle variazioni dei limiti di velocità a titolo esemplificativo. È importante notare che questi CMF sono stati ottenuti da studi condotti su strade non interessate da lavori, quindi la loro applicabilità specifica alle zone di lavoro non è ancora completamente chiara. Per maggiore chiarezza, si evidenzia che 5 mph corrispondono a 8 km/h, 10 mph a 16 km/h, 15 mph a 24 km/h e 20 mph a 32 km/h.

Crash Type	Crash Severity	Facility Type	Volume Range	CMF	Standard Error
Lower posted speed by 5 mph					
All	All	Urban and rural freeways	Not specified	1.17	Not specified
Lower posted speed by 10 mph					
All	All	Urban and rural freeways	Not specified	0.96	Not specified
Lower posted speed by 15 to 20 mph					
All	All	Urban and rural freeways	Not specified	0.94	Not specified
NOTE: The CMFs were derived from past studies on non-work zone roads, so their potential applicability to a work zone situation is unclear. Use these values with caution for work zones, because reduced work zone speed limits are often connected to other changes in the roadway cross section. CMF = crash modification factor.					

Figura 4.5: CMF relativi alle riduzioni del limite di velocità

Riassumendo, riduzioni troppo severe dei limiti di velocità tendono ad essere ignorate, mentre riduzioni troppo lievi potrebbero non offrire sufficiente protezione. Una

riduzione moderata, di circa 10-20 km/h, rappresenta quindi il compromesso ideale per migliorare la sicurezza senza compromettere la fluidità del traffico.

4.2.4 CURVE PLANIMETRICHE

Le condizioni di visibilità sono fondamentali per garantire la sicurezza nei cantieri autostradali. La visibilità si riferisce alla capacità dei conducenti di vedere chiaramente la strada, gli ostacoli e gli altri veicoli, nonché la segnaletica ed eventuali lavoratori in cantiere. Quando la visibilità è ridotta, il rischio di incidenti aumenta perché i conducenti hanno meno tempo per reagire a situazioni impreviste.

In curva la visibilità è spesso limitata a causa della geometria della strada. I conducenti non possono vedere oltre le curve, il che significa che hanno meno tempo per reagire agli ostacoli o ai cambiamenti improvvisi, come la presenza di un cantiere. Al contrario, su una strada in rettilineo, il conducente può vedere più lontano offrendo più tempo per osservare e reagire a eventuali ostacoli o cambiamenti, riducendo il rischio di incidenti.

I dati provenienti dal Sistema di Analisi dei Decessi (FARS) indicano che nel 2002 sono stati registrati 42.815 decessi in 38.309 incidenti mortali nel sistema autostradale degli Stati Uniti [44]. Circa il 25 per cento di questi incidenti mortali è avvenuto lungo curve orizzontali. Questi incidenti si sono verificati principalmente su autostrade rurali a due corsie che spesso non fanno parte del sistema DOT (Department of Transportation) statale. Considerando questi dati e il fatto che il tasso medio di incidenti per le curve orizzontali è circa tre volte quello dei tratti rettilinei autostradali (Glennon et al., 1983), l'implementazione di strategie volte a migliorare la sicurezza sulle curve orizzontali contribuirà al raggiungimento dell'obiettivo complessivo del Piano Strategico per la Sicurezza delle Autostrade dell'AASHTO.

Anche nel contesto italiano si osserva una tendenza simile. In particolare, i tassi di incidenti più elevati in curva si registrano nelle regioni montuose o collinari, dove la conformazione del territorio costringe le infrastrutture autostradali a seguire percorsi più tortuosi. In queste aree, il rischio di incidenti è accentuato dalle caratteristiche intrinseche delle curve, che limitano la visibilità, richiedono riduzioni di velocità, e impongono manovre più complesse per i conducenti, soprattutto per quelli alla guida di mezzi pesanti. I dati, estratti dal sito dell'ISTAT [45], mostrano che le regioni

prevalentemente montuose come la Liguria, la Valle d'Aosta e la Basilicata registrano una percentuale di incidenti in curva superiore al 30%, evidenziando come la configurazione geografica incida sulla sicurezza stradale. Le regioni collinari mostrano con una percentuale di incidenti in curva tra il 20% e il 30%. Al contrario, regioni prevalentemente pianeggianti, come la Lombardia, l'Emilia-Romagna e il Veneto, registrano percentuali di incidenti in curva inferiori al 20%, a conferma dell'influenza determinante della conformazione geografica sul rischio stradale (Tab 4.11).

Regione	% incidenti in curva	% montagne colline	% colline
Liguria	34.7	65	35
Valle d'Aosta	33.6	100	0
Basilicata	33.4	47	45
Umbria	28.1	30	70
Abruzzo	26.7	65	35
Sicilia	26.5	24	61
Sardegna	26.4	14	68
Toscana	26.2	25	66
Calabria	25.6	42	49
Marche	24.4	31	69
Friuli Venezia Giulia	24.2	42	19
Molise	24.1	55	45
Campania	23.1	35	50
Piemonte	22.9	43	30
Puglia	19.4	1	45
Lombardia	19.2	40	12
Emilia Romagna	18.4	25	27
Veneto	17.7	29	14
Lazio	17.3	26	54
Trentino Alto Adige	nd	100	0

Tabella 4.11: Percentuale incidenti in curva per Regione in funzione della morfologia del territorio

Nel report di Sarbaz Othman [46], è stata analizzata la sicurezza delle curve stradali in base al raggio di curvatura, classificato in diverse categorie: superiore a 1250 metri, 1000 metri, 700 metri, 400 metri e inferiore a 250 metri. Le curve con raggio inferiore a 700 metri comprendono principalmente ingressi e uscite autostradali, mentre le curve con raggio superiore a 1250 metri sono considerati come tratti stradali rettilinei. L'analisi mostra che le curve con raggio superiore a 1.000 metri sono almeno due volte più sicure delle curve strette con un raggio inferiore a 500 metri.

Come illustrato in Fig. 4.6, il tasso di incidenti diminuisce all'aumentare dei raggi di curvatura sia per le curve a destra che per quelle a sinistra.

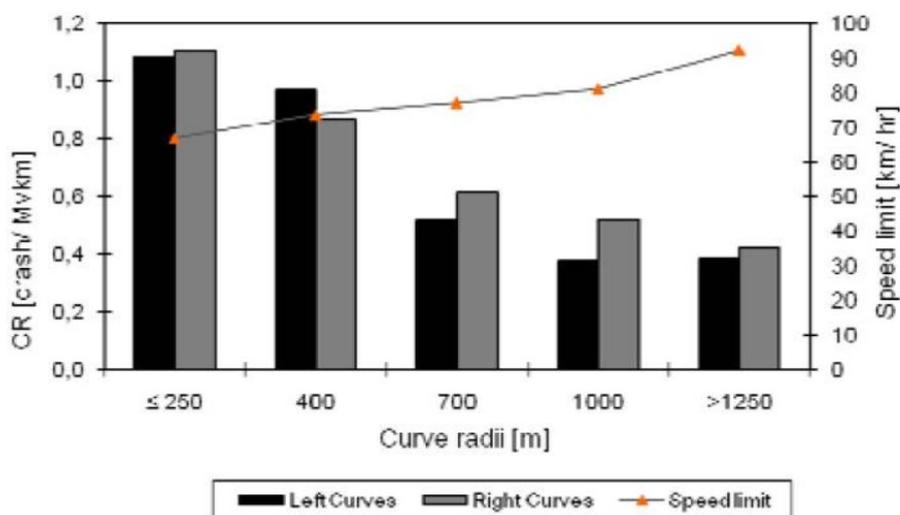


Figura 4.6: Variazione del tasso di incidentalità in funzione del raggio di curvatura

Le curve strette, che si trovano principalmente nelle rampe di uscita e di ingresso delle autostrade, sono i luoghi dove si verificano maggiormente gli incidenti. Una possibile spiegazione è che la velocità diminuisce in modo significativo quando si esce da un'autostrada, rendendo difficile valutare la velocità o rimanere nella corsia.

Nell'Highway Safety Manual – Supplement del 2014, [38], la frequenza di incidenti prevista nei segmenti autostradali in curva è descritta dal seguente Crash Modification Factor (CMF):

$$CMF_{1,y} = 1 + a \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{5,730}{R_i^*} \right)^2 \cdot P_{c,i} \right]$$

Equazione 4.5: Fattore di modifica per gli incidenti in curva in un segmento autostradale

dove:

- $CMF_{1,y}$: fattore di modifica per gli incidenti dovuti alla curvatura orizzontale in un segmento autostradale, in funzione del tipo di incidente y (ad esempio, incidente con un solo veicolo o incidente tra più veicoli).
- m : numero di curve orizzontali nella tratta considerata
- R_i^* : raggio della curva i (in piedi);
- $P_{c,i}$: proporzione, espressa in percentuale, della lunghezza della tratta autostradale occupata dalla curva i . Solo la parte di curva che ricade all'interno della tratta viene inclusa nel calcolo del CMF. Per esempio: se la tratta autostradale è lunga 2 km e la curva è lunga 0,8 km, ma solo metà di questa curva (0,4 km) si trova all'interno della tratta considerata, $P_{c,i}=0,20$, cioè il 20% della lunghezza della tratta.

I coefficienti per gli incidenti mortali e con feriti da utilizzare nell'equazione sono forniti dalla tabella sottostante (Tab. 4.12) in funzione al tipo di incidente (incidente con singolo veicolo o incidente tra più veicoli).

Tipo di incidente (y)	Coefficiente a
Incidente con singolo veicolo	0,0719
Incidente tra più veicoli	0,0172

Tabella 4.12: Coefficienti per gli incidenti sulle autostrade

In termini pratici, questa equazione consente di quantificare l'influenza della curvatura delle tratte autostradali differenziando tra gli incidenti che coinvolgono un solo veicolo da quelli con più veicoli. I CMF sono applicabili alle curve con un raggio superiore a 304,8 m. Il raggio R_i di ciascuna curva viene misurato lungo il bordo interno della carreggiata, tenendo in considerazione la proporzione $P_{c,i}$ della tratta occupata dalla

curva i (Fig. 4.7). Questo metodo si applica a tutte le curve orizzontali presenti nel segmento.

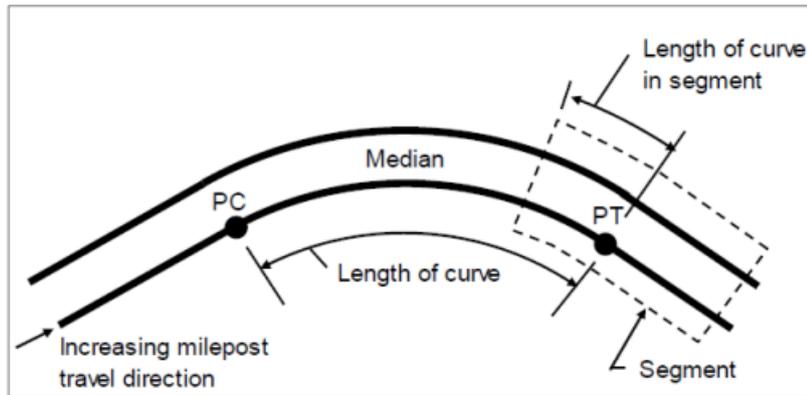


Figura 4.7: Misura del raggio e della lunghezza della curva

4.2.5 LARGHEZZA CORSIE

In Italia, la larghezza minima di una corsia autostradale è stabilita dalle *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade* del Decreto Ministeriale del 5 novembre 2001 [47]. Secondo questa norma, la larghezza standard di una corsia autostradale è di 3,75 metri, misura che garantisce la sicurezza dei veicoli in transito, offrendo un margine di manovra adeguato.

In caso di cantieri la larghezza delle corsie sulle autostrade può essere ridotta fino a 3,25 metri, con l'obbligo di mantenere un'adeguata segnaletica orizzontale e verticale per informare gli automobilisti della riduzione della carreggiata.

I fattori di modifica degli incidenti stradali (CMF) che descrivono la relazione tra la larghezza media della corsia e la frequenza prevista degli incidenti sono stati calcolati utilizzando le seguenti equazioni riportate nell'Highway Safety Manual [38]:

$$CMF_2 = \begin{cases} \exp[-0.0376(W_i - 12)] & \text{se } W_i < 13 \text{ ft} \\ 0.963 & \text{se } W_i > 13 \text{ ft} \end{cases}$$

Equazione 4.6: Fattore di modifica degli incidenti per la larghezza della corsia in autostrada

Dove:

- CMF_2 è il fattore di modifica degli incidenti per la larghezza della corsia in un segmento autostradale per incidenti mortali o con feriti, sia per veicoli singoli che per veicoli multipli;
- W_i è la larghezza media della corsia (in piedi).

I valori dei CMF sono gli stessi sia per gli incidenti con veicoli multipli che per quelli con veicolo singolo e sono riportati nel grafico in Fig. 4.8. Il CMF è discontinuo, con una rottura a una larghezza di corsia di 3,96 metri ed è applicabile a larghezze di corsia comprese tra 3,20 e 4,27 metri.

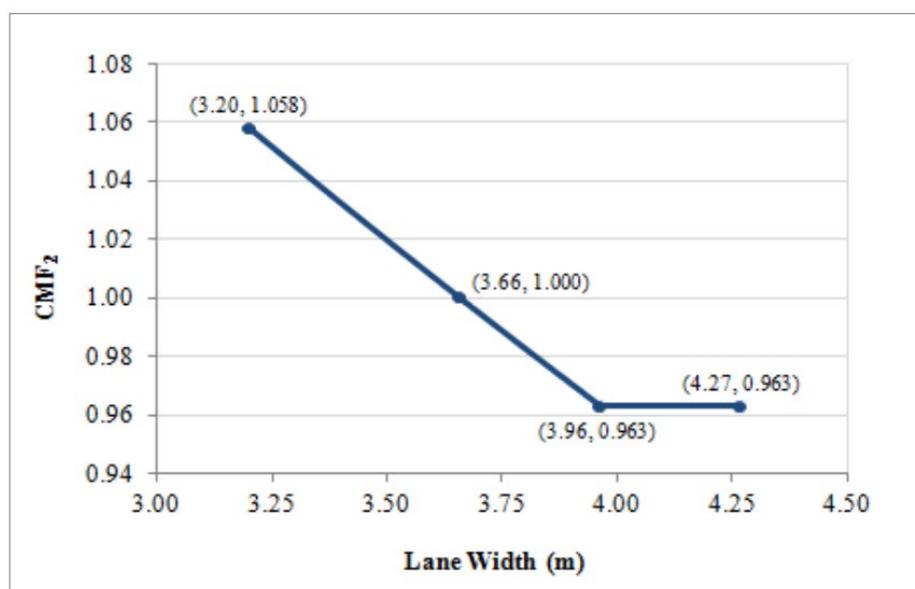


Figura 4.8: Relazione tra la larghezza media della corsia e il CMF

4.2.6 RACCORDI ALTIMETRICI

Nel presente paragrafo vengono valutati gli effetti sulla sicurezza legati ai raggi di curvatura adottati per raccordare le livellette. In particolare, dossi e sacche possono ostacolare la visibilità dei conducenti, aumentando il rischio di incidenti, specialmente in prossimità di cantieri se non visibili con sufficiente anticipo. Il profilo altimetrico di una strada è costituito da tratti a pendenza costante, chiamati livellette, collegati da raccordi verticali convessi e concavi. Il Decreto Ministeriale del 5 novembre 2001 [47] stabilisce le linee guida per la progettazione di questi raccordi, con limiti di pendenza del 6% per le autostrade in aree urbane e del 5% in aree extraurbane.

Tuttavia, nonostante queste norme tecniche siano utili nella progettazione, non permettono di valutare adeguatamente la visibilità in tutte le situazioni. Per questo motivo, nel lavoro di tesi di Gian Rocco Nuccio [48] è stata verificata la visibilità in condizioni limite. Sono stati considerati due tratti di strada con pendenza del 5% e un raggio del cerchio osculatore appena superiore al minimo normativo. I requisiti geometrici sono stati tutti soddisfatti, e anche la visibilità è risultata conforme alle normative. A differenza delle curve, i dossi offrono una visibilità molto più ampia, sufficiente a mantenere gli schemi cantieristici standard.

Inoltre, il Decreto Ministeriale del 10 luglio 2002 [14] richiede una visibilità minima di 300 metri per ogni segnale, un parametro che risulta sempre garantito in presenza di dossi. Per questi motivi, i raccordi altimetrici non costituiscono un rischio significativo tale da richiedere ulteriori approfondimenti.

4.2.7 DEGRADO DELLA PAVIMENTAZIONE

La pavimentazione stradale [49] è una struttura composta da più strati, progettata per sostenere il traffico veicolare, garantendo comfort e sicurezza. Essa ripartisce i carichi statici e dinamici dei veicoli sul sottofondo e protegge il terreno dagli agenti atmosferici. Le pavimentazioni devono soddisfare requisiti strutturali (portanza e durabilità) e funzionali (regolarità della superficie e aderenza). Le caratteristiche essenziali per garantire la sicurezza includono elevata capacità portante, buona stabilità, bassa permeabilità e buona adesione.

Le pavimentazioni flessibili, la tipologia più diffusa sulle reti stradali, sono soggette a progressivo deterioramento dovuto al traffico e agli agenti atmosferici, con impatti sulle proprietà superficiali e, successivamente, strutturali.

Poiché il degrado della pavimentazione incide direttamente sulla sicurezza stradale, è necessario monitorarne lo stato e programmare tempestivamente interventi di manutenzione per ripristinare la qualità del servizio e ridurre il rischio di incidenti.

Per valutare il deterioramento delle sovrastrutture vengono utilizzati vari indici, di seguito ne analizzeremo due.

Present Serviceability Index (PSI), introdotto dall'AASHTO [50], è una misura empirico-meccanicistica utilizzata per valutare il degrado delle sovrastrutture stradali. Questo indice tiene conto di vari parametri, come la pendenza longitudinale, la profondità delle ormaie, i danni superficiali dovuti a buche o riparazioni.

Può essere calcolato con la seguente equazione:

$$PSI = 5,03 - 1,9 \log(1 + SV) - 0,01\sqrt{C + P} - 1,38RD$$

Equazione 4.7: Equazione del Present Serviceability Index

con:

- SV = media delle variazioni di pendenza del profilo longitudinale;
- C = area delle buche e dei rappezzi, per unità di superficie;
- P = area fessurata o lesionata con particolari caratteristiche, per unità di superficie;
- RD = media delle misure di profondità delle ormaie.

I valori del PSI variano su una scala da 0 a 5, dove 5 rappresenta una pavimentazione in condizioni perfette, mentre 0 indica un pavimento inutilizzabile. Per le autostrade, il PSI terminale, ossia il valore minimo accettabile prima di dover effettuare interventi di ripristino o ricostruzione, è fissato intorno a 2.50.

Il Pavement Condition Index (PCI) [51] è una valutazione complessiva delle condizioni della pavimentazione, ottenuta considerando la gravità di ciascun dissesto.

PCI varia da 0 a 100: un valore pari a 0 indica una pavimentazione completamente deteriorata, mentre 100 indica che la superficie è in perfette condizioni. Il PCI aiuta gli ingegneri e i responsabili della manutenzione a monitorare le condizioni della pavimentazione, a identificare gli interventi necessari e a dare priorità alle attività di ripristino. Si basa principalmente sull'ispezione visiva, analizzando le diverse tipologie di ammaloramenti e la loro gravità.

Nello specifico:

- Un indice PCI compreso tra 70 e 100 indica che il manto stradale è in buone condizioni.
- Un PCI compreso tra 50 e 69 indica che le condizioni sono accettabili ma è consigliabile programmare nel breve termine una manutenzione.

Nel già citato studio condotto sulle autostrade in Cina [52], è stato osservato che, al diminuire del PCI, i tassi medi di incidenti aumentano. Questo risultato evidenzia come il deterioramento della pavimentazione influisca negativamente sulla stabilità del conducente e sulle condizioni di guida. In figura (Fig. 4.9) si può osservare come varia il CMF collegato a tale variabile.

Variables	CS					
	Coefficients	X _{base}	X _{min}	X _{max}	CMF(X _{min})	CMF(X _{max})
PCI	-0.015	95	74	100	1.370	0.928

Figura 4.9: Valori del CMF al variare del PCI

Il sito del CMF Clearinghouse [53], gestito dalla Federal Highway Administration (FHWA), fornisce i Crash Modification Factors (CMF) relativi alle variazioni del Present Serviceability Index (PSI). In questo modo è possibile valutare la correlazione tra condizioni della pavimentazione e tassi di incidenti. Quando il valore del PSI varia da X a Y, il CMF è calcolato con la seguente formula:

$$CMF = e^{-0,345(Y-X)}$$

Equazione 4.8: Calcolo del CMF al variare del PSI

Questa espressione permette di quantificare l'impatto delle variazioni del PSI sulla sicurezza.

4.2.8 LE CONDIZIONI METERELOGICHE

Come ultimo fattore che influenza la sicurezza dei cantieri autostradali analizziamo le condizioni metereologiche. Numerosi studi hanno tentato di quantificare l'impatto di condizioni climatiche avverse e sicurezza delle aree di lavoro autostradali.

Uno primo studio [54] condotto nello stato di Washington e relativo agli incidenti dal 2009 al 2013 ha utilizzato un modello di regressione ordinale per determinare come variano gli impatti relativi agli incidenti stradali in funzione delle caratteristiche della strada, comportamento del conducente e condizioni ambientali e metereologiche.

Dai risultati è emerso che circa il 24% degli incidenti sono causati dal maltempo, in particolare, la pioggia è responsabile del 15,11% dei sinistri, seguita da nebbia (0,64%) e neve (0,57%).

È importante sottolineare che sebbene l'incidenza degli incidenti causati da neve e nebbia sia relativamente bassa, questi eventi possono avere ripercussioni maggiori sulla gravità degli incidenti a causa della ridotta visibilità e delle condizioni stradali scivolose. Gli incidenti tendono ad essere più gravi al tramonto o quando la visibilità è scarsa e la combinazione di oscurità e maltempo limita fortemente la capacità del conducente di reagire rapidamente agli ostacoli o ai cambiamenti nel traffico.

Un secondo studio [55] condotto in Florida ed esaminando gli incidenti sul lavoro dal 1999 al 2004 ha riscontrato un aumento significativo degli incidenti lungo i cantieri. Parte di questo drammatico aumento è dovuto agli effetti del maltempo, che aggrava i rischi già presenti in tali aree. Sebbene gli incidenti tendano a verificarsi meno frequentemente quando il tempo è bello, la presenza di nuvole, la pioggia e la nebbia si sono rivelati fattori di rischio significativi.

In particolare, è stato osservato che, sebbene gli automobilisti tendano a prestare maggiore attenzione, la pioggia costituisce comunque una delle principali cause di incidenti a causa della ridotta visibilità e dei tempi di frenata più lunghi.

Lo studio ha calcolato l'indice RAIR (Relative Accident Involvement Ratio), un rapporto che misura il coinvolgimento relativo negli incidenti, al fine di analizzare la frequenza degli incidenti in diverse condizioni meteorologiche, distinguendo tra quelli che coinvolgono un solo veicolo (incidenti autonomi) e quelli che coinvolgono più veicoli (incidenti non autonomi). Il RAIR consente di confrontare la probabilità di coinvolgimento in incidenti nelle zone di lavoro rispetto a quelle non di lavoro, permettendo così di individuare l'influenza delle variabili ambientali sugli incidenti nei cantieri. I risultati ottenuti sono raccolti nella Fig.4.10.

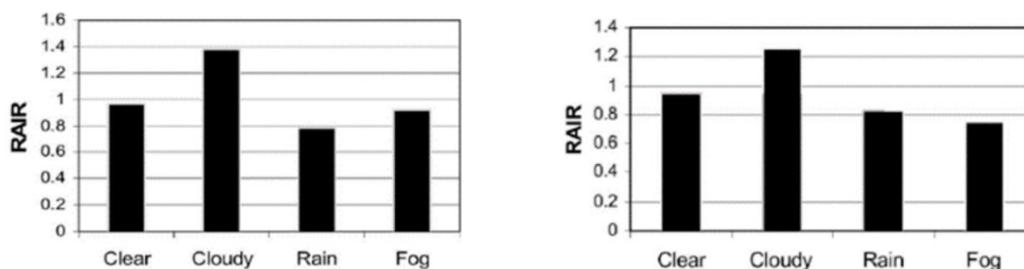


Figura 4.10: Indici RAIR per incidenti autonomi e incidenti tra due veicoli

I grafici evidenziano che il numero di incidenti nei cantieri autostradali è maggiore durante le giornate nuvolose rispetto a quelle soleggiate o piovose, poiché gli automobilisti tendono ad adottare stili di guida più prudenti in condizioni di visibilità ridotta e molti lavori autostradali vengono annullati in caso di maltempo. L'analisi combinata di questi studi evidenzia la complessità del rapporto tra condizioni meteorologiche e sicurezza stradale. Alcuni fenomeni atmosferici, come la pioggia, possono aumentare significativamente la frequenza degli incidenti, mentre altri, come la nebbia, possono aumentarne la gravità quando si verificano.

Un ultimo studio condotto sulle autostrade montane cinesi [52] ha analizzato gli impatti della pioggia sulla sicurezza stradale. I risultati mostrano, attraverso i CMF relativi ai giorni di pioggia leggera/moderata (SMR), che la percentuale di questi eventi meteorologici in una stagione influisce significativamente sulla sicurezza dei vari segmenti autostradali. In particolare si dimostra che la media mensile delle precipitazioni giornaliere è positivamente correlata con la frequenza degli incidenti, supportando le conclusioni di questo studio. Gli effetti della pioggia sulla sicurezza autostradale sono principalmente legati a due fattori: (1) la ridotta visibilità per i conducenti, che limita lo spazio per operazioni di guida sicure, e (2) la diminuzione dell'aderenza tra la superficie stradale e gli pneumatici, in particolare nei tratti frequentati da veicoli pesanti, che sono più soggetti a perdere il controllo.

Per quanto riguarda i giorni di pioggia torrenziale (TR), i CMF indicano sorprendentemente un miglioramento della sicurezza autostradale. Questo risultato può essere spiegato attraverso due fattori: (1) le piogge intense o tempeste scoraggiano i viaggi, riducendo indirettamente il volume di traffico e, di conseguenza, la probabilità

di incidenti; (2) le piogge torrenziali aumentano il livello di attenzione dei conducenti, migliorando così la sicurezza complessiva alla guida. I risultati per i giorni di pioggia leggera/moderata e torrenziale su autostrade a tre corsie sono riassunti nella seguente immagine (Fig. 4.11).

Variables	THS					
	Coefficients	X_{base}	X_{min}	X_{max}	$CMF(X_{min})$	$CMF(X_{max})$
SMR	0.883	0.4	0.135	0.663	0.791	1.261
TR	-1.325	0.07	0	0.187	1.097	0.856

Figura 4.11: Valori dei CMF in caso di pioggia moderata e torrenziale

Sulla base dei risultati di questi studi, diventa chiaro quanto sia importante adottare misure preventive per ridurre il rischio di incidenti e la loro gravità. Le raccomandazioni principali includono l'introduzione di un'illuminazione adeguata nei luoghi di lavoro, soprattutto di notte e in condizioni di scarsa visibilità, l'uso di segnali luminosi per avvisare i conducenti e limitazioni di velocità.

4.3 RIASSUNTO DEI RISULTATI

Per una maggiore chiarezza espositiva, i risultati ottenuti sono riassunti nella tabella seguente (Tab. 4.13). Queste considerazioni serviranno da base per il capitolo successivo, dove verrà elaborato un modello finalizzato alla valutazione del rischio nei cantieri autostradali tramite un indice di esposizione al rischio.

Parametro	Descrizione	Modello
Layout di cantiere	Numero di corsie chiuse o deviazioni durante i lavori	2 corsie:
		Fig. 4.9
		3 corsie:
		Fig. 4.9
Durata del cantiere	Tempo totale in cui il cantiere è attivo.	<p>CMF relativo alla durata della zona di lavoro:</p> $CMF_{d,all} = 1 + \left(\frac{\% \text{ aumento della durata} \times 1,11}{100} \right)$ <p>Aumento degli incidenti con feriti fino all'1,11% per ogni 1% di aumento della durata del cantiere.</p>
Lunghezza del cantiere	Distanza totale del cantiere stradale.	<p>CMF relativo alla lunghezza della zona di lavoro:</p> $CMF_{l,all} = 1 + \left(\frac{\% \text{ aumento della lunghezza} \times 0,67}{100} \right)$ <p>Aumento degli incidenti totali dello 0,67% per ogni 1% di aumento della lunghezza del cantiere.</p>
Traffico medio giornaliero (TGM)	Flusso medio di veicoli per giorno.	<p>CMF relativo al traffico giornaliero medio:</p> $CMF_{TGM} = 1 + \left(\frac{\% \text{ aumento del TGM} \times 1,26}{100} \right)$ <p>Aumento del tasso di incidentalità dell'1,26% per ogni 1% di aumento del TGM.</p>
Limite di velocità	Riduzione del limite di velocità.	<p>Riduzione della velocità suggerita: 10-20 km/h rispetto al limite normale.</p> <p>Riduzione dei limiti di velocità coerenti con quello che i conducenti si aspettano</p>

Caratteristiche geometriche dell'infrastruttura	Include curve longitudinali, larghezza corsia. Curve e corsie più ampie risultano più sicure delle strette	<p>Curve:</p> $CMF_{1,y} = 1 + a \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{5,730}{R_i^*} \right)^2 \cdot P_{c,i} \right]$ <p>dove</p> <p>a=0,0172 (incidenti autonomi); a=0,0719 (incidenti multi-veicolo)</p>
		<p>Larghezza corsia:</p> $CMF_2 = \begin{cases} \exp[-0.0376(W_i - 12)] & \text{se } W_i < 13 \text{ ft} \\ 0.963 & \text{se } W_i > 13 \text{ ft} \end{cases}$
Condizioni della pavimentazione	Maggiore degrado della pavimentazione, maggiori gli incidenti	CMF relativo alle condizioni della pavimentazione in PSI: $CMF = e^{-0,345(Y-X)}$ <p>Dove:</p> <p>X = valore del PSI iniziale; Y = valore del PSI finale</p>
Condizioni meteorologiche	Condizioni meteorologiche durante il cantiere.	Indice RAIR: Sole = 0,96; Nuvole = 1,25; Pioggia = 0,8; Nebbia = 0,75 Maggiore rischio incidenti con nuvole: i conducenti sono meno prudenti rispetto a quando piove o c'è nebbia.

Tabella 4.13: Riepilogo dei fattori di rischio nell'interazione tra cantiere e viabilità autostradale

5 SVILUPPO DI UN MODELLO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO INTERFERENZIALE

In questo capitolo si è cercato di determinare un modello di calcolo semplificato in grado di misurare attraverso un Indice di Esposizione il rischio legato al pericolo di intrusione nel cantiere di veicoli esterni. Tale parametro indica quanto un cantiere sia più o meno soggetto al rischio interferenziale con la viabilità ordinaria.

Di seguito viene illustrato il procedimento di calcolo dell'indice di esposizione, le ipotesi d'impiego, i fattori di rischio e i relativi coefficienti. L'elaborazione è stata implementata in un foglio di calcolo Excel, che compilandolo con le informazioni relative al cantiere restituisce, oltre all'indice di esposizione, la classe di rischio collegata.

L'indice è calcolato come media ponderata del rischio di diversi fattori. I fattori considerati sono il layout di cantiere, la durata e la lunghezza del cantiere, i livelli di traffico, la larghezza delle corsie, la geometria della strada se in curva o rettilineo e le condizioni della pavimentazione.

L'equazione utilizzata per il calcolo dell'indice di esposizione è così definita:

$$I_e = \frac{(a \times C_{layout} + b \times C_{lunghezza} + c \times C_{durata} + d \times C_{traffico} + e \times C_{curva} + f \times C_{pav})}{a + b + c + d + e + f + g}$$

Equazione 5.1: Equazione dell'indice di esposizione al rischio intrusione in forma generale

Ogni fattore C_i rappresenta il livello di rischio associato all'intrusione veicolare per quel parametro specifico. I coefficienti di ponderazione x_i sono invece applicati per definire il peso relativo di ciascun fattore nell'indice complessivo, in modo da riflettere con precisione il contributo effettivo di ogni variabile alla sicurezza del cantiere.

Nei paragrafi seguenti, verranno esaminati nel dettaglio sia i coefficienti di ponderazione sia i valori di rischio di ciascun fattore, per evidenziare il contributo di ogni elemento al risultato complessivo.

5.1 SCELTA DEI COEFFICIENTI DI PONDERAZIONE, X_i

Per calcolare i pesi o coefficienti di ponderazione associati ai diversi fattori di rischio da inserire nell'equazione, è innanzitutto necessario stabilire l'importanza relativa di ciascun fattore rispetto al rischio complessivo. Ciò si ottiene utilizzando i fattori di modifica degli incidenti (CMF) riportati in bibliografia e analizzati nel Capitolo 4. Il CMF fornisce una misura quantitativa dell'impatto di un dato fattore sul rischio di collisione, fornendo così una solida base per valutare il peso di ciascuno di essi.

Per ciascun fattore analizzato nel paragrafo precedente, è stato calcolato il valore massimo possibile del CMF, così da valutare le condizioni più critiche per la sicurezza complessiva del cantiere e identificare l'impatto potenziale di ogni fattore. Questo approccio ha permesso di classificare i fattori in base alla loro influenza: quelli con un CMF massimo più elevato sono stati considerati più rilevanti, mentre quelli con valori più bassi sono stati ritenuti meno significativi.

Dopo aver stabilito questa classificazione, i valori ottenuti sono stati scalati proporzionalmente, mantenendo così una proporzione uniforme tra i fattori ma riducendone il loro valore assoluto per semplicità di calcolo. I fattori di ponderazione così calcolati saranno utilizzati per regolare l'influenza di ciascun coefficiente di rischio, contribuendo a una valutazione del rischio complessiva più bilanciata e accurata.

Di seguito si riportano per chiarezza espositiva le equazioni dei CMF analizzati e i valori massimi che possono assumere. (Tab 5.1).

Parametro	Equazione	Valore max
Layout cantiere	CMF forniti dalla tabella 4. (PRACT)	3,11
Durata cantiere	$CMF_{d,all} = 1 + \left(\frac{\% \text{ aumento della durata} \times 1,11}{100} \right)$ dove il massimo aumento percentuale di durata è 100%	2,11
Lunghezza cantiere	$CMF_{l,all} = 1 + \left(\frac{\% \text{ aumento della lunghezza} \times 0,67}{100} \right)$ dove il massimo aumento percentuale di lunghezza è 100%	1,67
Traffico Giornaliero Medio	$CMF_{TGM}^2 = 1 + \left(\frac{\% \text{ aumento del TGM} \times 1,26}{100} \right)$ dove il massimo aumento percentuale di traffico è 100%	2,26
Curva	$CMF_{1,y} = 1 + a \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{5,730}{R_i^*} \right)^2 \cdot P_{c,i} \right]$ dove il raggio minimo considerato in autostrada vale 339m (1222,2 ft) e $P_{c,i}$ vale 1, cioè tutto il cantiere è in curva.	2,91
Condizione pavimentazione	$CMF_{PSI} = e^{-0,345(Y-X)}$ dove Y vale 2,5 e rappresenta il valore minimo di PSI accettabile in autostrada, X vale 4,5 è rappresenta il massimo valore che il PSI può effettivamente raggiungere	1,99

Tabella 5.1: Riassunto tabellare di valori ottenuti dai CMF

A questo punto, per determinare i valori dei coefficienti di ponderazione, è necessario scalare proporzionalmente i valori massimi, al fine di ottenere valori più contenuti e facilmente gestibili (Tab 5.2).

² L'equazione per il CMF_TGM è stata dedotta dall'autore per analogia con le due equazioni tratte da manuali tecnici, che indicano l'aumento del numero di incidenti in funzione della durata e della lunghezza del cantiere. Questa formulazione non è stata verificata sperimentalmente, ma viene proposta per confrontare in modo uniforme l'impatto relativo dei diversi fattori analizzati sulla sicurezza nei cantieri autostradali.

Parametro	Valore max	Coefficiente di ponderazione	Simbolo
CMF layout	3.11	1.86	a
CMF durata	2.11	1.26	b
CMF lunghezza	1.67	1.00	c
CMF tgm	2.26	1.35	d
CMF curva	2.91	1.74	e
CMF pavimentazione	2.37	1.19	g

Tabella 5.2: Valori dei coefficienti di ponderazione ottenuti tramite normalizzazione del range di variazione dei CMF

L'equazione finale per calcolare l'indice di esposizione al rischio di un cantiere autostradale assume quindi la forma:

$$I_e = \frac{(1,86 \times C_{layout} + 1,26 \times C_{durata} + 1,00 \times C_{lunghezza} + 1,35 \times C_{traffico} + 1,74 \times C_{curva} + 1,19 \times C_{pav})}{8,40}$$

Equazione 5.2: Equazione per il calcolo dell'indice di esposizione al rischio intrusione con i coefficienti di ponderazione esplicitati

5.2 COEFFICIENTI DI RISCHIO C_i

Per ciascuno fattore di rischio specifico, sono stati assegnati i relativi coefficienti di rischio C_i, con un valore variabile da 1 a 4, in base al potenziale rischio di intrusione nel cantiere oggetto di valutazione. Come già discusso, il rischio è il prodotto tra la probabilità che un evento si verifichi e il danno che esso potrebbe causare. In questo studio, si assume che il danno associato a un'intrusione sia sempre molto elevato, e quindi la variazione del coefficiente C_i da 1 a 4 è legata unicamente alla probabilità che

l'intrusione effettivamente accada. Un valore di 1 indica una bassa probabilità di intrusione, mentre un valore di 4 riflette una probabilità significativamente più alta.

5.2.1 COEFFICIENTI LEGATI AL LAYOUT (C_LAYOUT):

Riprendendo le configurazioni di cantiere proposte dal progetto PRACT [40], ad ognuna è stato assegnato un valore che varia da 1 a 4 come descritto nel paragrafo precedente (Tab 5.3 e Tab 5.4).

Carreggiata a Due Corsie		C_layout	Commento
Emergency2:	Chiusura della corsia di emergenza (corsia esterna pavimentata).	1.5	La chiusura della corsia di emergenza comporta una bassa probabilità di intrusione poiché non vengono interessate le corsie di marcia principali. Il rischio di invasione dell'area di cantiere deriva principalmente da eventuali sbandamenti dei veicoli,
Slow2:	Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia di sorpasso.	2	Il rischio in questa configurazione aumenta leggermente, in quanto il traffico viene deviato verso la corsia di sorpasso. Tuttavia, poiché la corsia lenta è solitamente percorsa a velocità moderate, c'è una maggiore possibilità di frenare o correggere la traiettoria, il che riduce il rischio di intrusione rispetto a configurazioni che coinvolgono la corsia di sorpasso.

Fast2:	Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia lenta.	2.5	La corsia di sorpasso è generalmente utilizzata da veicoli che viaggiano a velocità sostenuta. Deviare il traffico verso la corsia lenta rappresenta una manovra complessa che può indurre a collisioni o intrusioni, in quanto i conducenti potrebbero non ridurre la velocità in maniera adeguata o sottovalutare la necessità di cambiare corsia.
Fast2(2):	Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso le corsie lenta e di emergenza.	1.8	Anche se la chiusura della corsia di sorpasso può sembrare rischiosa, in questo scenario il rischio di intrusione rimane relativamente basso perché viene mantenuto lo stesso numero di corsie disponibili per il traffico. Tuttavia, la deviazione verso la corsia di emergenza può creare confusione per i conducenti e condurre ad errori di manovra.
Cross2(0+1):	Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia di sorpasso; chiusura della corsia di sorpasso e deviazione totale del traffico verso la carreggiata opposta attraverso un crossover a corsia singola.	3.5	La chiusura di entrambe le corsie di marcia e il conseguente scambio di carreggiata attraverso un crossover a corsia singola aumenta significativamente la probabilità di intrusione. La complessità della manovra richiesta ai conducenti, combinata con la riduzione del numero di corsie, crea un rischio elevato di errore e quindi di incidente.

Cross2(1+1):	Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia di sorpasso; deviazione parziale del traffico verso la carreggiata opposta attraverso un crossover a corsia singola (il conducente può scegliere se rimanere sulla corsia di sorpasso o spostarsi sulla carreggiata opposta).	4	Configurazione risulta particolarmente complessa e pericolosa, poiché i conducenti devono scegliere se rimanere sulla corsia di sorpasso o deviare verso la carreggiata opposta. La possibilità di errore aumenta notevolmente, rendendo questa situazione una delle più rischiose in termini di intrusione, soprattutto per la difficoltà di comprendere correttamente la manovra da eseguire.
---------------------	--	---	---

Tabella 5.3: Valori del coefficiente di rischio intrusione per le diverse configurazioni di cantiere (carreggiata a due corsie)

Carreggiata a Tre Corsie		C_layout	Commento
Emergency3:	Chiusura della corsia di emergenza (corsia esterna pavimentata).	1.5	Come per la carreggiata a due corsie, la probabilità di intrusione rimane bassa, poiché la corsia di emergenza non è una corsia di marcia attiva. Lo sbandamento rimane la principale fonte di rischio di intrusione.
Slow3:	Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia centrale.	2.2	Il traffico viene deviato verso la corsia centrale, ma le velocità medie sulla corsia lenta non sono particolarmente elevate, lasciando spazio a manovre correttive in caso di necessità.
Slow&Middle3:	Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale con traffico deviato verso la corsia di sorpasso.	3	Il coefficiente di rischio risulta più elevato rispetto alla chiusura di una sola corsia. Questa configurazione richiede infatti manovre più complesse, portate dalla chiusura di due corsie di marcia.

Fast3:	Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia centrale.	2.8	La chiusura della corsia di sorpasso con deviazione verso la corsia centrale comporta un rischio più elevato rispetto alle due corsie, in quanto i veicoli devono ridurre la velocità nel passaggio verso una corsia più lenta. Tuttavia, poiché rimangono due corsie aperte, il rischio non è altissimo.
Middle&Fast3:	Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale con traffico deviato verso la corsia lenta.	3	La chiusura di entrambe le corsie veloci (centrale e di sorpasso) comporta un rischio significativo, dato che il traffico veloce viene deviato su corsie più lente. La complessità e la velocità rendono questa configurazione particolarmente rischiosa per le intrusioni.
Fast3(3):	Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso le corsie centrale, lenta e di emergenza.	2	Anche se viene chiusa la corsia di sorpasso, le altre corsie rimangono aperte e il traffico viene distribuito su tre corsie. La probabilità di intrusione è contenuta, ma la gestione del traffico richiede un'attenzione maggiore a causa dei cambi di corsia.
Middle&Fast3(2):	Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale con traffico deviato verso le corsie lenta ed emergenza.	2.8	Rischio medio, il traffico veloce è deviato verso le corsie più lente, ma attraverso il temporaneo l'utilizzo della corsia di emergenza come corsia di marcia si mantiene il numero originario di corsie, garantendo una buona gestione del flusso

<p>Cross3(1+1):</p>	<p>Chiusura della corsia di sorpasso con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale e deviazione parziale del traffico verso le corsie lenta e opposta attraverso un crossover a corsia singola (il conducente può scegliere tra la corsia lenta e quella opposta).</p>	<p>4</p>	<p>Rischio intrusione molto elevato. Questa configurazione mette i conducenti di fronte ad una scelta difficile: devono scegliere se rimanere sulla corsia lenta o passare sulla carreggiata opposta. Oltre ad essere una manovra complessa di per sé, può generare molta confusione nei conducenti.</p>
<p>Cross3(0+1):</p>	<p>Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale con traffico deviato verso la corsia di sorpasso e deviazione totale del traffico verso la carreggiata opposta attraverso un crossover a corsia singola.</p>	<p>3.8</p>	<p>Il rischio è elevato, poiché tutto il traffico deve essere deviato verso la carreggiata opposta. La complessità della deviazione aumenta il rischio di intrusione, soprattutto per la riduzione del numero di corsie a disposizione.</p>

<p>Cross3(0+2):</p>	<p>Chiusura della corsia lenta con traffico deviato verso la corsia centrale; chiusura della corsia centrale e deviazione totale del traffico verso la carreggiata opposta attraverso un crossover a due corsie.</p>	<p>3</p>	<p>Anche se la deviazione rimane complessa, la disponibilità di due corsie sul crossover riduce leggermente il rischio rispetto al crossover a corsia singola. Tuttavia, la manovra rimane rischiosa per i conducenti meno esperti o attenti.</p>
----------------------------	--	----------	---

Tabella 5.4: Valori del coefficiente di rischio intrusione per le diverse configurazioni di cantiere (carreggiata a tre corsie)

I valori utilizzati per la carreggiata a tre corsie sono uguali o leggermente più elevati di quelli a due corsie poiché:

- Maggiore velocità: sulle carreggiate a tre corsie, le velocità medie sono generalmente più alte, il che aumenta il rischio di intrusioni in generale.
- Maggiore complessità: la gestione del traffico con tre corsie richiede più attenzione e introduce potenziali errori di manovra.
- Chiusure multiple: chiudere più corsie, in particolare quelle più veloci (centrale e di sorpasso), aumenta il rischio più rapidamente rispetto alle configurazioni a due corsie.

5.2.2 COEFFICIENTE LEGATO ALLA DURATA (C_DURATA)

Per attribuire un coefficiente di durata ai cantieri, si è scelto di suddividere la durata del cantiere in cinque fasce temporali. Questa suddivisione consente di quantificare in modo più dettagliato l'impatto della durata del cantiere sulla sicurezza stradale. Le fasce considerate sono: da 7 a 15 giorni, da 16 a 30 giorni, da 31 a 60 giorni, da 61 a 90 giorni e oltre i 90 giorni.

In questo contesto si fa riferimento al progetto IRIS (Incursion Reduction to Increase Safety at Road Work Zones – Riduzione dell'incidentalità aumentando la sicurezza

nelle zone di lavoro) [56] mettendo in luce il cosiddetto “effetto dell’abitudine”: inizialmente, quando i conducenti si trovano di fronte a un nuovo cantiere stradale, l’incidenza degli incidenti tende ad essere alta, poiché la situazione è nuova e sconosciuta. Si ha dunque una fase iniziale con un numero elevato di incidenti, dovuti alla mancanza di familiarità con le nuove condizioni. Questo porta i guidatori a prestare maggiore attenzione ai segnali stradali e a mantenere un livello di allerta più elevato. Con il passare del tempo, la consapevolezza dei rischi e maggiori competenze da parte dei conducenti abituali riduce la frequenza degli incidenti. Tuttavia, a lungo andare, entra in gioco “l’effetto dell’abitudine”: sia i conducenti che i lavoratori iniziano a considerare la situazione meno rischiosa, portando a una riduzione della percezione del pericolo.

Dunque, per valutare correttamente i valori da assegnare ai coefficienti, è necessario tenere in considerazione non solo l’aumento dell’esposizione al rischio ma anche l’effetto dell’abitudine, il cui andamento è rappresentato in Fig.5.1.

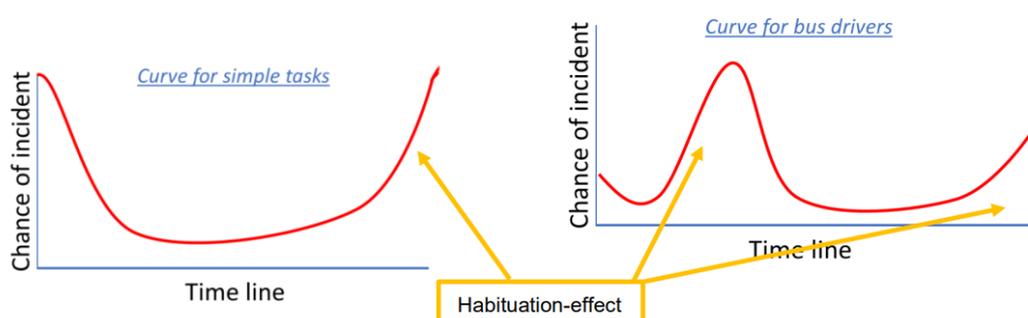


Figura 5.1: Effetto dell’abitudine sul numero di incidenti nei cantieri in autostrada

Per ciascuna fascia è stato attribuito un coefficiente specifico, che riflette l’intensità dell’impatto:

- Cantiere da 7 a 15 giorni: In questa fase iniziale di adattamento, il rischio è elevato ma l’esposizione è bassa, pertanto si attribuisce un coefficiente pari a 2.
- Cantiere fino a 30 giorni: Con l’aumento della familiarità, il rischio diminuisce leggermente per l’effetto della abitudine. Si assegna un coefficiente di 1,5.

- Cantiere fino a 60 giorni: Si osserva un incremento a causa dell'aumento dell'esposizione. In questo contesto, si considera un coefficiente pari a 2,5.
- Cantiere fino a 90 giorni: Con il prolungarsi della durata del cantiere, l'esposizione al rischio aumenta in modo significativo. Si assegna, pertanto, un coefficiente di 3,5.
- Oltre i 90 giorni: in questa fascia si attribuisce il valore massimo possibile pari a 4.

5.2.3 COEFFICIENTE LEGATO ALLA LUNGHEZZA (C_LUNGHEZZA)

Per la lunghezza del cantiere stradale, è opportuno distinguere inizialmente tra due macrocategorie: i cantieri standard, con una lunghezza massima di 2 km, e i cantieri continui. Questi ultimi sono tipici delle grandi opere e vengono suddivisi in tratte di 5-7 km, con una cantierizzazione sfalsata per evitare che gli automobilisti percepiscano un unico cantiere continuo.

Tenendo conto di questa distinzione, è stata sviluppata una classificazione in cinque fasce, finalizzata all'assegnazione di un coefficiente di rischio adeguato. Le fasce individuate sono le seguenti: lunghezza inferiore a 0,5 km, tra 0,5 e 1 km, tra 1 km e 1,5 km, tra 1,5 e 2 km e oltre 2 km.

I coefficienti di rischio sono stati stimati in base alla lunghezza del cantiere come segue:

- Per lunghezze inferiori o uguali a 0,5 km, il coefficiente è 1,5.
- Per lunghezze maggiori di 0,5 km e fino a 1 km ($0,5 < \text{lunghezza} \leq 1 \text{ km}$), il coefficiente è 2.
- Per lunghezze maggiori di 1 km e fino a 1,5 km ($1 < \text{lunghezza} \leq 1,5 \text{ km}$), il coefficiente è 2,5.
- Per lunghezze maggiori di 1,5 km e fino a 2 km ($1,5 < \text{lunghezza} \leq 2 \text{ km}$), il coefficiente è 3.
- Per lunghezze superiori a 2 km, il coefficiente è 4.

5.2.4 COEFFICIENTE LEGATO AL TRAFFICO (C_TRAFFICO)

Per valutare l'impatto del traffico sui cantieri autostradali e definire il coefficiente C, questo studio utilizza il livello di servizio (LOS) come parametro di riferimento per il tratto autostradale interessato dai lavori.

In questa sezione, non entreremo nei dettagli del calcolo del LOS specifico per i cantieri autostradali, a cui è dedicata l'appendice A, ma esamineremo i principali fattori che influenzano la capacità e la velocità di flusso libero. Le aree di cantiere, infatti, possono ridurre significativamente la capacità e la velocità dei tratti autostradali, con un impatto evidente sul livello di servizio complessivo.

La sezione 4 del capitolo 10 dell'HCM [57] fornisce indicazioni specifiche sui fattori correttivi da applicare al modello standard per adattarlo alle condizioni dei cantieri. In questi contesti, la capacità e la velocità di flusso libero dipendono da diversi elementi, tra cui:

- Configurazione e numero delle corsie chiuse in prossimità dell'area di lavoro, sintetizzati dall'indice di gravità della chiusura delle corsie (LCSI).
- Spazio laterale tra la corsia adiacente alla zona di lavoro e la barriera o i coni: nelle zone di lavoro con spazi laterali ridotti, delimitati da barriere rigide, la capacità e la velocità di flusso libero (VFS) diminuiscono rispetto alle stime standard, poiché i veicoli hanno meno possibilità di manovra o di correzione in caso di errori (Fig. 5.2).



Figura 5.2: Esempio di cantiere delimitato da New Jersey

- **Larghezza delle corsie:** la riduzione della larghezza delle corsie comporta una diminuzione della velocità di flusso libero e, di conseguenza, del livello di servizio (LOS), in quanto i conducenti non si sentono sicuri a guidare su strade troppo strette. Come già osservato, la larghezza delle corsie può variare da un valore standard di 3,75 metri fino a un minimo di 3,25 metri, in base alle esigenze del cantiere. Tale riduzione, pur presentando alcune difficoltà per gli utenti della strada, in particolare per i mezzi pesanti che richiedono spazi di manovra maggiori, offre anche un vantaggio per la sicurezza del cantiere: aumenta il buffer laterale, ovvero lo spazio libero tra l'area di lavoro e il flusso veicolare, riducendo la probabilità di invasioni accidentali dell'area di lavoro occupata dai lavoratori.
- **Presenza di mezzi pesanti:** l'impatto dei mezzi pesanti sulla viabilità nelle zone di lavoro è simile a quello dei tratti senza lavori; di conseguenza, non vengono applicati fattori di correzione specifici per questi veicoli nelle aree di cantiere. Tuttavia, occorre particolare attenzione quando una sola corsia è aperta, poiché i veicoli non possono sorpassare quelli più lenti. Nei tratti in pendenza, i mezzi pesanti possono rallentare considerevolmente, obbligando il traffico che segue a procedere a velocità ridotte, riducendo così la capacità della zona di lavoro.

Considerando questi fattori, è possibile determinare i parametri di aggiustamento per la capacità e per la velocità a flusso libero (FFS), e di conseguenza valutare il livello di servizio (LOS) per il tratto autostradale interessato dai lavori. Come già accennato per i dettagli computazionali si rimanda all'Appendice A.

Valutando il livello di servizio (LOS) prima e durante il cantiere, si possono attribuire i coefficienti C relativi al rischio di intrusione in base al peggioramento del LOS e al LOS effettivo durante i lavori. Condizioni già congestionate prima del cantiere comportano un rischio di intrusione ridotto, poiché le basse velocità limitano il movimento dei veicoli verso l'area di lavoro. Tuttavia, si registra un aumento di incidenti, come tamponamenti e scontri laterali, nella zona immediatamente precedente al cantiere, dove gli automobilisti devono rallentare, cambiare corsia e accodarsi ai veicoli già fermi, aspetti che non sono oggetto di questo studio. In sintesi è possibile definire i coefficienti C_{traffico} come illustrato nella tabella seguente (Tab 5.5):

		LOS DURANTE IL CANTIERE				
		A/B	C	D	E	F
LOS PRE-CANTIERE	A/B	1	2.5	3.5	4	3
	C	/	1.5	2.5	3,5	2.5
	D	/	/	2	3	2
	E	/	/	/	2.5	1
	F	/	/	/	/	0

Tabella 5.5: Coefficienti di rischio intrusione relativi al traffico

5.2.5 COEFFICIENTE LEGATO ALLA PRESENZA DELLE CURVE PLANIMETRICHE (C_CURVE)

L'analisi dell'impatto delle curve sulla sicurezza nei cantieri autostradali si basa su diversi fattori, tra cui il numero di corsie per senso di marcia, il raggio della curva, la direzione della curva (destrorsa o sinistrorsa) e la posizione del cantiere rispetto alle corsie.

1. Numero di corsie: la valutazione si differenzia in base alla presenza di due o tre corsie per senso di marcia.
2. Raggio della curva: le curve vengono classificate in base al loro raggio, suddividendole in quattro categorie:
 - Raggio da 340 m (velocità di 90 km/h) a 450 m
 - Raggio da 450 (velocità di circa 100 km/h) m a 800 m
 - Raggio da 800 m (velocità di 130 km/h) a 1700 m
 - Raggi superiori a 1700 m sono considerati come rettilinei, con un valore di rischio pari a 0. Questo accade perché, indipendentemente dal tipo di strada, la pendenza trasversale delle falde della carreggiata è almeno pari al 2,5%. Questa pendenza è applicata quando il raggio di

curvatura è uguale o superiore al cosiddetto $R_{2,5}$. Per definizione, $R_{2,5}$ è calcolato come

$$R_{2,5} = 5 \cdot R^*$$

Dove R^* è il raggio di curvatura associato a una velocità di 90 km/h, che risulta pari a 340 m. Pertanto, calcolando $R_{2,5}$:

$$R_{2,5} = 340 \cdot 5 = 1700m$$

Sulle autostrade, il raggio di curvatura $R_{2,5}$, associato a una pendenza trasversale del 2,5%, viene calcolato utilizzando la velocità di progetto massima, piuttosto che quella minima, come nel nostro caso. Di conseguenza, per le autostrade, il valore di $R_{2,5}$ risulta pari a 4820 m.

Nel contesto della presente valutazione, è stata adottata la velocità di progetto minima per le autostrade, in quanto nei cantieri autostradali il limite di velocità è ridotto a 60 km/h. Sebbene la pendenza trasversale della curva possa risultare superiore al 2,5%, la velocità ridotta contribuisce significativamente a ridurre il rischio associato alla curvatura. Pertanto, per scopi di valutazione del rischio, il tratto può essere considerato come un rettilineo, garantendo condizioni di sicurezza adeguate.

3. Direzione della curva e posizione del cantiere: la direzione della curva influisce notevolmente sul rischio di intrusione per via della forza centrifuga. Nelle curve destrorse, se il cantiere è situato nella corsia di sorpasso, il rischio di intrusione è elevato a causa della forza centrifuga che spinge i veicoli verso l'esterno. In questo caso, i veicoli in marcia presentano un rischio maggiore di invadere il cantiere. Al contrario, se il cantiere è in marcia, il rischio diminuisce. Nelle curve sinistrorse, la situazione si inverte, con il rischio di intrusione che aumenta quando il cantiere è in marcia rispetto alla posizione nella corsia di sorpasso.

Nelle carreggiate a tre corsie, il rischio di intrusione è generalmente più basso. Nelle curve destrorse, i veicoli che viaggiano nella corsia centrale hanno la stessa probabilità di invadere il cantiere rispetto al caso delle due corsie. Tuttavia, i veicoli nella corsia di marcia hanno più spazio per “correggere” la loro traiettoria, riducendo ulteriormente la probabilità di intrusione. Una media dei valori assegnati in entrambe le configurazioni porta a una probabilità finale di intrusione leggermente più bassa nelle carreggiate a tre corsie. In generale, le carreggiate a tre corsie tendono a offrire un margine di sicurezza maggiore. Questo perché, in caso di chiusura di una corsia, i veicoli possono deviare su corsie adiacenti, riducendo il rischio di intrusione nel cantiere.

Le tabelle di seguito (Tab 5.6, Tab 5.7, Tab 5.8 e Tab 5.9) mostrano i valori di rischio associati a diverse configurazioni di cantiere in relazione al raggio, alla direzione della curva e alla posizione del cantiere. I risultati indicano una tendenza generale, in cui il rischio di intrusione aumenta con la diminuzione del raggio della curva e varia in base alla posizione del cantiere. Nel caso in cui il cantiere occupi l'intera carreggiata e il traffico venga deviato nella direzione di marcia opposta, si utilizza il valore di C più alto tra i due proposti, considerando il numero di corsie e il raggio di curvatura.

Carreggiata a due corsie – Curva destrorsa			
Raggio di curvatura			
	340 ÷ 450	450 ÷ 800	800 ÷ 1700 m
Cantiere in marcia	3	2,5	1,8
Cantiere in sorpasso	4	3	2,5

Tabella 5.6: Valori dei coefficienti di rischio intrusione per curva destrorsa - carreggiata a due corsie

Carreggiata a due corsie – Curva sinistrorsa			
Raggio di curvatura			
	340 ÷ 450	450 ÷ 800	800 ÷ 1700 m
Cantiere in marcia	4	3	2,5
Cantiere in sorpasso	3	2,5	1,8

Tabella 5.7: Valori dei coefficienti di rischio intrusione per curva sinistrorsa - carreggiata a due corsie

Carreggiata a tre corsie – Curva destrorsa			
Raggio di curvatura			
	340 ÷ 450	450 ÷ 800	800 ÷ 1700 m
Cantiere in marcia	2,5	2	1,5
Cantiere in sorpasso	3,5	2,8	2

Tabella 5.8: Valori dei coefficienti di rischio intrusione per curva destrorsa - carreggiata a tre corsie

Carreggiata a tre corsie – Curva sinistrorsa			
Raggio di curvatura			
	340 ÷ 450	450 ÷ 800	800 ÷ 1700 m
Cantiere in marcia	3,5	2,8	2
Cantiere in sorpasso	2,5	2	1,5

Tabella 5.9: Valori dei coefficienti di rischio intrusione per curva sinistrorsa - carreggiata a tre corsie

5.2.6 COEFFICIENTE LEGATO ALLE CONDIZIONI DELLA PAVIMENTAZIONE(C_PAVIMENTAZIONE)

Una pavimentazione bagnata, ghiacciata o una scarsa visibilità possono aumentare notevolmente il rischio di intrusione, oltre a accelerare il processo di invecchiamento della pavimentazione, rendendola meno efficace.

In generale, le pavimentazioni hanno una vita utile di circa cinque anni, che può estendersi fino a sette per le pavimentazioni drenanti. Quest'ultimo tipo di manto stradale è stato progettato specificamente per contrastare pericoli come l'aquaplaning e migliorare l'aderenza del veicolo in presenza di piogge intense o altre condizioni atmosferiche avverse [58]. Grazie alla sua struttura porosa, composta da un particolare mix di inerti, bitume e polimeri, l'asfalto drenante riduce significativamente lo strato d'acqua che si forma sulla superficie durante le piogge, migliorando la sicurezza della circolazione.

Oltre ai vantaggi legati alla sicurezza, l'asfalto drenante si distingue anche per la sua durata, che è circa del 30% superiore rispetto agli asfalti tradizionali, con una vita utile

di circa sette anni rispetto ai cinque di un asfalto convenzionale. Questo lo rende una scelta più conveniente in termini di rapporto qualità-prezzo.

Per analizzare l'influenza delle condizioni meteorologiche, si fa riferimento alla media climatica italiana degli ultimi anni. Le quattro mappe che seguono (Fig. 5.3, Fig. 5.4, Fig. 5.5 e Fig. 5.6) illustrano la copertura nuvolosa media, le temperature medie, la frequenza di giornate di gelo e le precipitazioni annue in Italia [59].

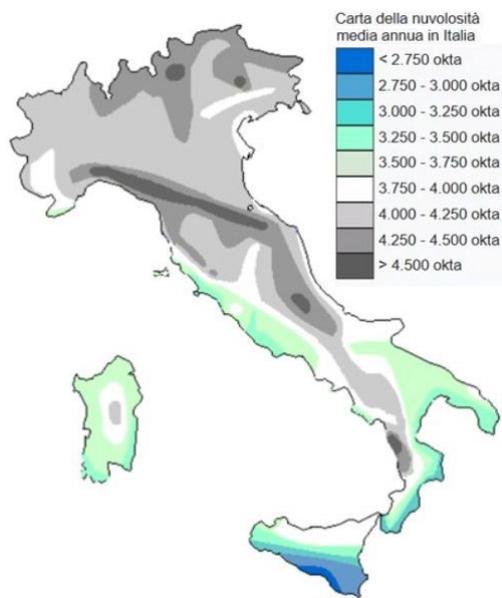


Figura 5.3: Copertura nuvolosa media (serie temporali) 1961-1990

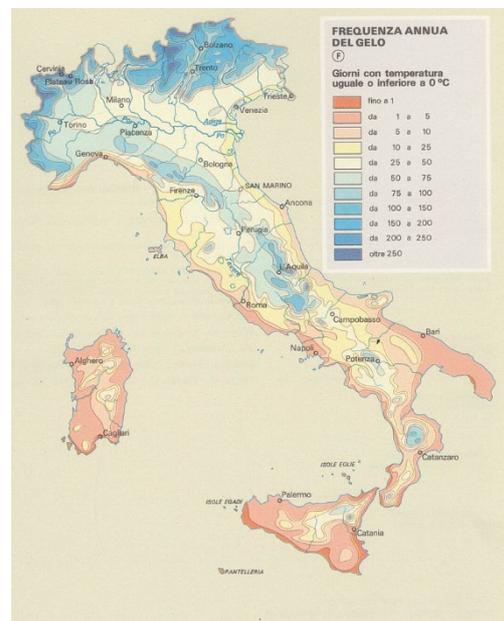


Figura 5.4: Frequenza annua del gelo nel territorio italiano (Atlante tematico d'Italia,

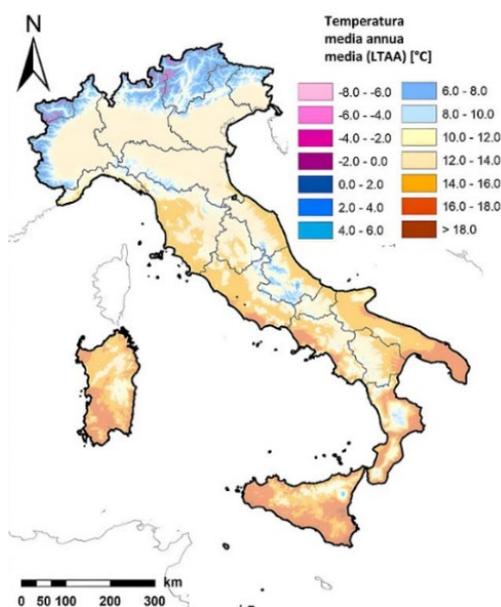


Figura 5.5: Carta della Temperatura media annua in Italia calcolata sul periodo 1951-2019, a cura di ISPRA

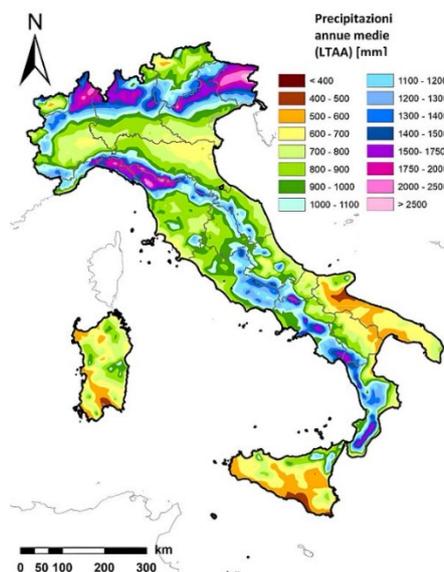


Figura 5.6: Carta delle precipitazioni medie in Italia, calcolate sul periodo 1951-2019 e a cura di ISPRA

In base a queste informazioni, è possibile suddividere l'Italia in quattro macro-regioni climatiche: Nord, Centro, Sud e Isole.

1. Suddivisione delle macro-regioni:

- Nord Italia: caratterizzato da inverni freddi, nebbia, frequenti piogge e neve.
- Centro Italia: clima più mite, ma con nebbia in alcune zone interne e piogge stagionali e neve sugli Appennini.
- Sud Italia e isole: clima stabile, rare nevicata, ma occasionali piogge intense.

Durante l'autunno e l'inverno, il rischio legato alla nebbia e alle precipitazioni è più elevato nelle regioni del Nord, mentre in primavera ed estate le condizioni meteorologiche sono generalmente più stabili in tutta Italia, con un rischio complessivamente inferiore. Sulla base di queste considerazioni, è possibile creare la seguente matrice di coefficienti di rischio (Tab 5.10).

			PAVIMENTAZIONE					
			ASFALTO TRADIZIONALE			ASFALTO DRENANTE		
			0-2 ANNI	2-3 ANNI	3-5 ANNI	0-3 ANNI	3-5 ANNI	5-7 ANNI
CONDIZIONI METEOROLOGICHE	PRIMAVER A ESTATE	Nord	2.5	3	3.5	2	2.5	3
		Centro	2	2.5	3	1.5	2	2.5
		Sud e Isole	1.5	2	2.5	1	1.5	2
	AUTUNNO INVERNO	Nord	3	3.5	4	2.5	3	3.5
		Centro	2.5	3	3.5	2	2.5	3
		Sud e Isole	2	2.5	3	1.5	2	2.5

*Tabella 5.10: Valori dei coefficienti $C_{pavimentazione}$ basati sull'invecchiamento della
pavimentazione e sulle condizioni meteorologiche*

5.3 INDIVIDUAZIONE DELLE CLASSI DI RISCHIO

Dopo aver definito tutti i coefficienti da inserire nell'equazione per il calcolo dell'indice di esposizione al rischio, è possibile procedere con l'analisi dei risultati ottenibili. Per rappresentare in modo completo le possibili configurazioni di rischio, è stata costruita una distribuzione uniforme di tutti i valori che l'indice di esposizione può assumere, includendo tutte le combinazioni teoriche di variabili che contribuiscono al calcolo del rischio (Fig. 5.7). Questa distribuzione, composta da 113.400 combinazioni, ci permette di valutare una gamma molto ampia di scenari potenziali.

L'indice può variare da un valore minimo di 22 fino a un massimo di 100. Questa analisi ha permesso di individuare quattro fasce di rischio: basso, medio, alto e critico. Le fasce sono state individuate sulla base del numero di parametri che raggiungono il valore massimo mentre gli altri si mantengono al minimo.

Dall'analisi delle 113.400 combinazioni, è emerso che circa il 60% dei risultati si colloca in un intervallo compreso tra 53,0 e 70,5 nell'indice di esposizione, che rappresenta quindi un'ampia fascia di situazioni possibili. Questa concentrazione di valori in un determinato intervallo evidenzia che, nonostante vi sia una variazione relativamente ridotta dell'indice in questo range, sono comunque rappresentate molte configurazioni

di rischio diverse. Questo spiega il motivo per cui alcune fasce presentano una variazione apparentemente limitata nei valori dell'indice di esposizione ma includono comunque numerose configurazioni di rischio.

È cruciale, inoltre, tener conto della probabilità con cui queste configurazioni possono effettivamente presentarsi nella pratica. Le combinazioni generate nella simulazione includono anche scenari teorici molto rari o addirittura estremi, che potrebbero non manifestarsi mai nella realtà. Pertanto, alcune delle 113.400 combinazioni rappresentano situazioni altamente improbabili, mentre altre rispecchiano configurazioni di rischio che è più probabile riscontrare nei cantieri reali. Questa distinzione tra probabilità teorica e realtà operativa è essenziale per interpretare correttamente i risultati dell'analisi e applicarli ai contesti concreti. Ad esempio, condizioni di cantiere in curva sono statisticamente meno frequenti rispetto a quelle in rettilineo, poiché il numero di chilometri in curva è notevolmente inferiore rispetto ai chilometri rettilinei.

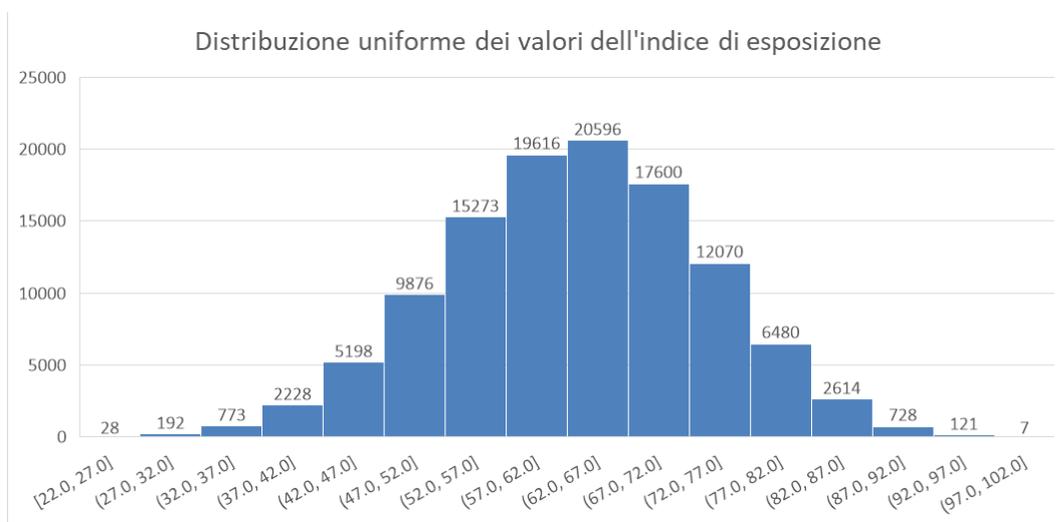


Figura 5.7: Distribuzione uniforme dei valori dell'indice di esposizione

Fascia di Rischio Basso ($I_e \leq 42,8$)

La soglia di 42,8 rappresenta il valore massimo raggiunto quando solo un parametro di rischio, il più critico, si trova al valore massimo, mentre tutti gli altri parametri sono al minimo. Questo approccio garantisce che, in situazioni in cui un solo fattore di rischio raggiunge il massimo, il punteggio complessivo resti nella fascia di rischio basso.

È possibile che alcune combinazioni con due parametri massimi ricadano comunque nella fascia di rischio basso. Questo accade perché i parametri non hanno tutti lo stesso impatto: il sistema di pesi attribuisce maggiore importanza ad alcuni rispetto ad altri. Tale distinzione è fondamentale, poiché mostra che la presenza di più parametri al massimo non implica necessariamente un rischio elevato, ma dipende dalla specifica interazione e dal peso di ciascun parametro. Questo criterio favorisce una gestione del rischio mirata e un'adeguata risposta in termini di sicurezza, evitando allarmismi ingiustificati per combinazioni che, pur presentando elementi di criticità, non raggiungono livelli di rischio alti. Di seguito sono riportati due esempi di cantieri che rientrano nella fascia di rischio basso. Uno dei due casi è completamente compreso nell'intervallo di rischio basso, mentre l'altro si colloca sulla soglia di questo intervallo.

Esempio 1: Cantiere installato in primavera nel nord Italia: layout di tipo Slow 2, con la chiusura della corsia lenta e il traffico deviato verso la corsia di sorpasso. La durata del cantiere è di 25 giorni e la lunghezza è contenuta a 0,8 km. Le condizioni di traffico sono buone, con un passaggio da LOS B a LOS C durante il cantiere. Il cantiere si trova in rettilineo, con condizioni della pavimentazione tradizionale ottimali. L'indice di esposizione assume il valore di 41,5.

Esempio 2: Cantiere installato in estate in Sicilia: layout di tipo Emergency, caratterizzato dalla chiusura della corsia di emergenza. La durata del cantiere è pari a 20 giorni e la lunghezza è contenuta a meno di 0,5 km. Le condizioni di traffico risultano già molto congestionate, con un livello di servizio pari a F, già da prima dell'inizio dei lavori. Il cantiere si trova in una curva stretta, sinistrorsa, con un raggio inferiore a 450 metri. Le condizioni della pavimentazione di asfalto drenante sono ottimali. L'indice di esposizione assume il valore di 42,8.

Fascia di Rischio Medio ($42,8 < I_e \leq 58,8$)

La soglia superiore di 58,8 si basa su combinazioni che coinvolgono due dei parametri più rilevanti al massimo, con tutti gli altri fissati al minimo. Questo livello segnala un incremento significativo del rischio: l'influenza combinata di due parametri massimi spinge il punteggio oltre il limite della fascia bassa, suggerendo che la probabilità di incidenti o altre problematiche aumenta considerevolmente. In questa fascia possono anche rientrare situazioni in cui tre parametri sono al massimo, ma si tratta di parametri

con pesi minori; pur raggiungendo il valore massimo, questi non generano un rischio elevato. La classificazione in fascia media permette quindi di individuare scenari che richiedono maggiore attenzione e possibili misure preventive, assicurando che le risorse di sicurezza siano allocate in modo proporzionato al rischio effettivo. Analogamente al caso precedente, vengono illustrati di seguito due esempi di cantieri che rientrano nella fascia di rischio medio. Il primo esempio è pienamente compreso in questo intervallo, mentre il secondo si trova esattamente al limite superiore della fascia

Esempio 1: Cantiere in inverno nel Centro Italia con layout Slow 3, caratterizzato da una carreggiata a 3 corsie, con la chiusura della corsia lenta e il traffico deviato verso la corsia centrale. La durata del cantiere è inferiore a 30 giorni e la lunghezza è pari a 0,8 km. Le condizioni di traffico sono scarse, passando da un LOS A a un LOS D. Il cantiere si trova in una curva sinistrorsa con un raggio di 1400 m e la pavimentazione tradizionale è nuova. In queste condizioni, l'indice di esposizione al rischio assume valore pari a 57,0.

Esempio 2: Cantiere estivo nel Sud Italia: layout di tipo Emergency, con chiusura della corsia di emergenza. La durata del cantiere è di 20 giorni, e la lunghezza è inferiore a 0,5 km. Le condizioni di traffico vedono un peggioramento da LOS A a LOS E dopo l'installazione del cantiere. Il tratto si trova in una curva stretta a sinistra, con un raggio inferiore a 450 m. Le condizioni della pavimentazione in asfalto drenante sono ottimali. L'indice di esposizione al rischio è pari a 58,8.

Fascia di Rischio Alto ($58,8 < I_e \leq 72,5$)

La soglia di 72,6 è stata definita considerando le combinazioni in cui tre dei parametri più rilevanti sono al massimo, mentre gli altri tre restano ai valori minimi. In questa fascia, il rischio associato a tre parametri massimi è tale da indicare una situazione di elevato rischio, in cui il potenziale di incidenti gravi è maggiore. È possibile che in questa fascia rientrino anche alcune combinazioni in cui i quattro parametri meno impattanti sono al massimo, pur mantenendo i parametri più influenti ai loro valori minimi. Questo dimostra che anche combinazioni di parametri con peso minore possono generare un livello di rischio alto, richiedendo dunque maggiore attenzione e azioni preventive adeguate.

Esempio 1: Cantiere in inverno nel Nord Italia con layout Cross 2 (0+1), caratterizzato dalla chiusura della corsia lenta con traffico deviato nella corsia di sorpasso e chiusura della corsia di sorpasso con deviazione del traffico nella carreggiata opposta. La durata del cantiere è di 85 giorni e la lunghezza è pari a 2 km. Le condizioni di traffico sono scarse, passando da un LOS B a un LOS D. Il cantiere si trova in rettilineo e la pavimentazione è di tipo tradizionale, con condizioni medie. In queste condizioni, l'indice di esposizione al rischio assume valore pari a 68.

Esempio 2: Cantiere estivo in Sardegna: Layout di tipo Cross2(1+1), con chiusura della corsia lenta e traffico deviato sulla corsia di sorpasso. Il traffico è parzialmente deviato verso la carreggiata opposta attraverso un crossover a corsia singola, consentendo al conducente di decidere se rimanere sulla corsia di sorpasso o spostarsi sulla carreggiata opposta. La durata del cantiere è pari a 26 giorni e la lunghezza è limitata a meno di 0,5 km. Le condizioni di traffico mostrano una transizione da un Level of Service (LOS) B prima del cantiere a un LOS E all'interno del cantiere, indicando un significativo deterioramento della qualità del servizio. Inoltre, il cantiere si trova in una curva stretta, sinistrorsa, con un raggio inferiore a 450 metri e le condizioni della pavimentazione di asfalto drenante sono ottimali. Il valore dell'indice di esposizione è di 72,5

Fascia di Rischio Critico ($I_e > 72,5$)

Questa fascia raccoglie le situazioni più pericolose, in cui quattro o più fattori di rischio raggiungono il valore massimo, determinando condizioni di sicurezza estremamente critiche. In questi casi, è necessario adottare misure di protezione significative e rafforzare le precauzioni per garantire la massima sicurezza. Nella fascia critica rientrano principalmente le situazioni in cui cinque parametri di rischio sono al massimo, con anche alcune combinazioni che vedono quattro parametri massimi. Questo segnala condizioni in cui la probabilità di eventi avversi è molto elevata, richiedendo risposte rapide e incisive per proteggere la sicurezza.

Esempio: Cantiere nel Nord Italia in primavera: layout di tipo Cross2(1+1), in cui è prevista la chiusura della corsia lenta e il traffico è deviato sulla corsia di sorpasso. La deviazione parziale del traffico avviene verso la carreggiata opposta tramite un crossover a corsia singola, permettendo al conducente di scegliere se rimanere sulla corsia di sorpasso o spostarsi sulla carreggiata opposta. La durata del cantiere è di 56 giorni e la lunghezza è

superiore a 2 km. Le condizioni di traffico sono caratterizzate da un passaggio da LOS B a LOS E. Il cantiere si trova in una curva, sinistrorsa, con un raggio pari a 500 metri. Le condizioni della pavimentazione drenante sono nella media. In questa situazione, l'indice di esposizione al rischio assume un valore pari a 84.

Questa struttura di classificazione consente di disporre di un sistema di gestione del rischio dettagliato e differenziato, che considera non solo i valori massimi raggiunti dai parametri, ma anche le loro interazioni. Una gestione efficace della sicurezza non si limita a una semplice somma dei rischi, ma richiede un'analisi profonda delle condizioni e delle interazioni tra i fattori di rischio. I valori delle fasce proposte rappresentano un punto di partenza ragionevole; tuttavia, per una maggiore efficacia, essi dovrebbero essere calibrati in base a dati reali, come la frequenza degli incidenti, il volume di traffico e la velocità media nei cantieri.

5.4 CASO STUDIO

In questo paragrafo viene analizzato un caso studio relativo a un cantiere sulla Autostrada A14 Bologna–Taranto, direzione Nord, nel territorio del Comune di Foggia. L'intervento riguarda la manutenzione della pavimentazione e di altre strutture della piattaforma autostradale, come svincoli e aree di parcheggio. I dati e le informazioni per l'analisi sono stati forniti dalla collaborazione con l'azienda TECNE SPA, e risultano sufficienti per determinare i coefficienti C da inserire nell'equazione per la valutazione dell'esposizione al rischio, come mostrato di seguito:

- **Layout:** Per quanto riguarda la disposizione del cantiere, è stato adottato un layout di tipo Cross 2(0+1). In questo schema, in una carreggiata a due corsie, la corsia lenta viene chiusa al traffico, il quale viene temporaneamente deviato sulla corsia di sorpasso. Successivamente, anche questa corsia viene chiusa, e il flusso veicolare è interamente deviato sulla carreggiata opposta (Fig. 5.8). Questa configurazione presenta un livello significativo di complessità e rischio, motivo per cui al coefficiente C_layout è attribuito un valore di 3,5.

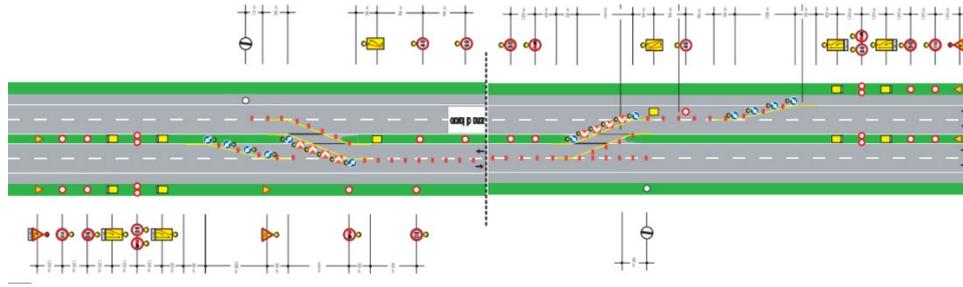


Figura 5.8: Esempio layout Cross 2

- Durata: La durata pianificata è di 38 giorni, dunque assegniamo al coefficiente C_{durata} un valore di 2,5.
- Lunghezza: La lunghezza del cantiere risulta compresa tra 1 km e 1,5 km, di conseguenza, il coefficiente $C_{lunghezza}$ è anche in questo caso pari a 2,5.
- Traffico: Il valore del traffico giornaliero medio è pari a circa 17000 veicoli di cui il 20% sono mezzi pesanti. L'analisi del livello di servizio (LOS) indica che, in condizioni normali, la tratta autostradale presenta un LOS A. Tuttavia, con l'installazione del cantiere, il livello di servizio è sceso a LOS D, per cui il coefficiente $C_{traffico}$ assume valore di 3,5.
- Curvatura: Il tratto interessato è rettilineo, quindi il coefficiente C_{curva} è pari a 0.
- Condizioni della pavimentazione: Considerando che il cantiere è dedicato al rifacimento del manto stradale, le condizioni della pavimentazione risultano scarse. Ci troviamo inoltre nel Sud Italia, pertanto, si attribuisce un valore di 2,5 al coefficiente relativo alla pavimentazione.

Andando quindi a sostituire questi valori nell'equazione:

$$I_e = \frac{(1,86 \times C_{layout} + 1,26 \times C_{durata} + 1,00 \times C_{lunghezza} + 1,35 \times C_{traffico} + 1,74 \times C_{curva} + 1,19 \times C_{pav})}{8,40}$$

Equazione 5.3: Equazione per il calcolo dell'indice di esposizione al rischio intrusione con i coefficienti di ponderazione esplicitati

Otteniamo

$$I_e = \frac{1,86 \times 3,5 + 1,26 \times 2,5 + 1,00 \times 2,5 + 1,35 \times 3,5 + 1,74 \times 0 + 1,19 \times 2,5}{8,40}$$

$$= 59,0$$

Equazione 5.4: Calcolo dell'indice di esposizione relativo al caso studio

L'indice di rischio ottenuto colloca il cantiere in una fascia di rischio alto, il che rende imprescindibile l'adozione di consistenti misure di protezione efficaci per la tutela dei lavoratori. Tale risultato evidenzia la necessità di una pianificazione dettagliata e di una scelta attenta dei dispositivi di sicurezza da impiegare.

Per prevenire intrusioni non autorizzate, è quindi essenziale effettuare una valutazione specifica che consenta di identificare le misure di protezione più idonee ad ogni fascia di rischio. Nel prossimo capitolo si presenta un'analisi dettagliata delle principali contromisure applicate per migliorare la sicurezza operativa in base al livello di rischio calcolato.

6 SOLUZIONI PER IMPLEMENTARE LA SICUREZZA

In questo capitolo, come già accennato, si descrivono alcuni dispositivi che possono implementare la sicurezza nei cantieri autostradali, calibrati sulle quattro fasce di rischio identificate.

Secondo quanto stabilito dal Testo Unico sulla Sicurezza, prima di ricorrere a misure di protezione collettiva o individuale, è opportuno valutare se una diversa organizzazione del cantiere possa contribuire a ridurre i rischi in modo efficace. Integrare la sicurezza nella pianificazione delle attività fin dalle fasi iniziali consente non solo di ottimizzare le operazioni, ma anche di contenere i costi legati a interventi correttivi successivi. Questo approccio può ridurre l'indice di esposizione al rischio, favorendo una riclassificazione del cantiere in una fascia di rischio inferiore. Per esempio, programmare l'avvio dei lavori durante la stagione estiva, caratterizzata da condizioni atmosferiche più favorevoli rispetto a quelle invernali, rappresenta una soluzione concreta per mitigare i rischi e migliorare l'efficienza complessiva delle attività.

L'attenzione principale di questo lavoro è rivolta alla fase operativa dei cantieri; tuttavia, un rischio elevato o critico durante questa fase costituisce un chiaro segnale d'allarme anche per l'allestimento. La complessità delle attività preliminari aumenta proporzionalmente al livello di rischio individuato per il cantiere operativo, rendendo necessario un approccio particolarmente accurato già durante l'installazione. Pur non affrontando nel dettaglio le misure specifiche per questa fase, è fondamentale riconoscerne l'importanza per garantire la sicurezza complessiva del cantiere e ridurre l'esposizione iniziale dei lavoratori.

I dispositivi proposti per migliorare la sicurezza stradale e la protezione dei cantieri possono essere classificati in sei categorie principali [60]:

1. Misure di avvertimento per i conducenti: dispositivi come i pannelli a messaggio variabile (PMV), bande rumorose e luci di avvertimento sequenziale forniscono informazioni in tempo reale e segnalano modifiche temporanee al layout della strada, in particolare nei punti di ingresso del cantiere. Rendendo

visibili i lavori stradali, soprattutto in condizioni di scarsa visibilità o durante le ore notturne. Questi sistemi aumentano la consapevolezza dei conducenti sui pericoli imminenti e migliorano il loro tempo di reazione.

2. Misure di controllo della velocità: controllare la velocità nelle aree di lavoro è cruciale, poiché ridurre la velocità consente ai conducenti di avere più tempo per reagire a situazioni impreviste. Dispositivi come i Tutor o i box e i sistemi per il controllo variabile della velocità (PVSLs) mirano a uniformare la velocità dei veicoli, riducendo le differenze di velocità tra i mezzi. L'integrazione di questi sistemi con una presenza reale o percepita delle forze di polizia può inoltre disincentivare comportamenti di guida non sicuri, aumentando l'efficacia di questi dispositivi di regolamentazione.
3. Sistemi di allerta per i lavoratori: sono dispositivi ancora innovativi che si stanno sviluppando molto negli ultimi anni proprio per la loro alta efficienza. Attraverso questi strumenti è possibile allertare gli operai con sufficiente anticipo dell'eventuale intrusione di veicoli nell'area di lavoro così da permettergli di spostarsi in un luogo sicuro.
4. Misure di separazione dell'area di lavoro: Le barriere in cemento forniscono una protezione costante, rendendole ideali per i cantieri a lungo termine. Tuttavia, questo tipo di barriera comporta costi elevati, e la sua installazione espone i lavoratori a condizioni di pericolo poiché devono posizionarla molto vicino alle corsie aperte al traffico. Per questi motivi non risulta conveniente la loro installazione in casi di cantieri di breve durata. In questi casi, l'uso di barriere mobili è vantaggioso, poiché fornisce una protezione temporanea ma efficace e riduce i tempi di preparazione sul posto. Oltre a queste soluzioni, l'automazione del montaggio e dello smontaggio dei coni stradali fornisce una soluzione innovativa che riduce il contatto con il traffico e protegge i lavoratori.
5. Misure di controllo del traffico: L'uso di dispositivi come coni stradali, delineatori, e barriere direzionali permette di dirigere in sicurezza il traffico attorno alle aree di lavoro e ridurre il rischio di collisioni tra veicoli e lavoratori. Possono inoltre essere utilizzati sensori di traffico e i sistemi di gestione del traffico per evitare congestioni. In situazioni particolari, le deviazioni

temporanee per mezzi pesanti possono ridurre il carico sui tratti autostradali coinvolti, minimizzando i rischi nelle zone di lavoro.

6. Misure di controllo dell'area di lavoro: le operazioni che rientrano in questa categoria includono l'utilizzo di adeguati dispositivi di protezione individuale, la formazione del personale e l'uso delle corsie di emergenza per il passaggio dei veicoli.

6.1 DISPOSITIVI PER IL LIVELLO DI RISCHIO BASSO

In questa fascia, il livello di rischio è contenuto e non richiede particolari misure di sicurezza aggiuntive rispetto a quelle già previste dalla normativa vigente. A tale proposito, si rimanda agli schemi cantieristici riportati nel D.M. 10 luglio 2002 [14] e descritti nel capitolo 2 del presente elaborato (si veda Fig. 2.11, 2.12, 2.13).

Sebbene in Italia non esista una normativa esplicita riguardo all'uso di misure di sicurezza integrative a tali schemi segnaletici, una ricerca condotta da Autostrade per l'Italia ha rivelato che le strisce rumorose possono migliorare la sicurezza stradale in particolari situazioni. Secondo il *Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)* del 2009 [61], le bande rumorose trasversali sono definite come strisce di materiale ruvido posizionate trasversalmente sulle corsie di marcia. Questo meccanismo è particolarmente utile in situazioni in cui è necessario avvisare gli automobilisti di cambiamenti nel percorso o di condizioni stradali che richiedono cautela. Queste bande, attraverso il rumore e le vibrazioni che producono, attirano l'attenzione del conducente su cambiamenti inaspettati dell'allineamento e su situazioni che richiedono un arresto.

Le bande rumorose temporanee sono utilizzate in prossimità delle zone di lavoro per avvisare i conducenti riguardo a condizioni potenzialmente pericolose. Generalmente, sono di natura temporanea e vengono rimosse una volta completati i lavori. Sono disponibili in due tipologie: le bande rumorose portatili in plastica, che rimangono in posizione grazie al loro peso e non richiedono l'uso di chiodi, adesivi o fissaggi, e le bande rumorose arancioni in polimero con adesivo preapplicato, utilizzate per una maggiore sicurezza nel fissaggio.

Negli Stati Uniti sono state delineate delle linee guida specifiche in diversi stati per l'utilizzo di questi dispositivi. In Texas è richiesto l'uso delle strisce rumorose portatili nel caso di chiusure di corsie con limiti di velocità pari a 70 miglia orarie (circa 110 km/h), mentre la Virginia prevede il loro utilizzo in ogni cantiere diurno su strade a due corsie con limiti di velocità superiori a 35 miglia orarie (circa 55 km/h).

In Italia, un'indagine basata su dati di incidenti in prossimità di deviazioni di corsia ha raccomandato l'uso di strisce rumorose per lavori della durata superiore ai 30 giorni. A supporto di questa raccomandazione, l'articolo 179, comma 3 [62], del Codice della Strada stabilisce che lo spessore delle strisce rumorose deve essere di 5 mm nelle aree di riduzione di corsia o all'inizio delle deviazioni. Autostrade per l'Italia ha proposto uno schema segnaletico specifico (Fig. 6.1.) da adottare, evidenziando ulteriormente l'importanza di queste misure nella sicurezza stradale.

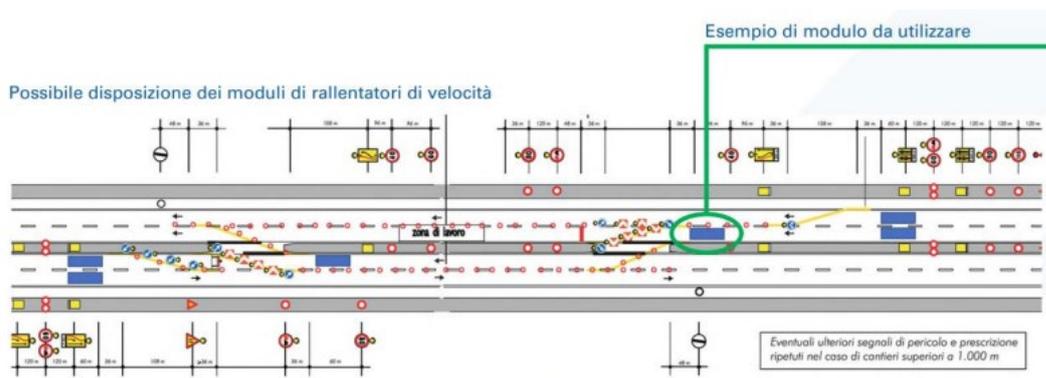


Figura 6.1: Esempio schema segnaletico con rallentatori di velocità

6.2 CONTROMISURE PER IL LIVELLO DI RISCHIO MEDIO

Il rischio in questa classe è moderato, ma ancora gestibile con l'implementazione di misure che non comportano interventi strutturali invasivi, tra questi analizziamo:

- Pannelli a messaggio variabile
- Sistemi di controllo della velocità
- Corretto dimensionamento della buffer area
- Luci sequenziali

6.2.1 PANNELLI A MESSAGGIO VARIABILE

I pannelli a messaggio variabile forniscono informazioni in tempo reale sulle condizioni dell'infrastruttura, mostrando avvertimenti in caso di code, incidenti o lavori in corso. Si distinguono in due categorie: permanenti e portatili [63].

I primi sono installati su strutture fisse generalmente sull'intera larghezza della carreggiata, posizionandosi in questo modo direttamente nel campo visivo del conducente e offrendo una maggiore visibilità. Un vantaggio significativo dei PMV permanenti è la possibilità di visualizzare messaggi di dimensioni maggiori. La maggior parte dei PMV permanenti può visualizzare tre righe, con un numero di caratteri compreso tra 13 e 24 per riga. Pertanto, interi messaggi possono generalmente essere mostrati su un solo pannello, eliminando molte difficoltà relative al contenuto del messaggio, al testo e all'uso di abbreviazioni. È necessario prestare particolare attenzione sia all'uso che alla posizione dei PMV permanenti, poiché possono essere costosi e non possono essere riposizionati in base alle necessità.

I pannelli a messaggio variabile, invece, sono montati su appositi rimorchi che possono essere trasportati nelle sedi necessarie, adattandosi bene alle situazioni di rischio temporanee causate dai cantieri. Rispetto a quelli permanenti, i PMV mobili sono meno costosi ma hanno dimensioni molto più ridotte. Le loro dimensioni limitate restringono la grandezza del messaggio visualizzabile su un singolo pannello a tipicamente tre righe, con otto-dieci caratteri ciascuna. Questa limitazione ha un impatto significativo sul contenuto del messaggio, sul testo e sull'uso di abbreviazioni.

Per garantire l'efficacia dei PMV portatili, è essenziale seguire alcune linee guida nella loro implementazione [64]:

- Posizionamento strategico: è necessario un adeguato posizionamento dei PMV, collocandoli ad una distanza sufficiente dalla zona di rischio, tale per cui vi sia il tempo necessario dei conducenti di reagire.
- Messaggi chiari e semplici: I messaggi visualizzati sui PMV devono essere semplici, specifici e facilmente comprensibili (Fig. 6.2). Si raccomanda di

limitare i messaggi a due parti, con tre parole ciascuna, in quanto messaggi più lunghi non sono facilmente leggibili alle velocità tipiche delle autostrade.

- Gestione del Traffico: se non necessari, devono essere spenti per evitare di causare distrazioni agli automobilisti



Figura 6.2: Messaggi adoperati nelle autostrade italiane

L'installazione e il posizionamento dei pannelli a messaggio variabile (PMV) in Italia sono regolati dal Codice della Strada, che ne stabilisce con precisione dimensioni, distanze e inclinazioni per garantire una visibilità ottimale in base al tipo di strada e alla posizione del pannello (ad esempio, a lato strada o a portale sopra la carreggiata). I PMV devono essere collocati a una distanza calcolata rispetto al cantiere o alla zona di lavoro per consentire ai conducenti di rallentare e reagire adeguatamente.

Il Codice della Strada [65] fornisce linee guida specifiche per i segnali di preavviso, che devono rispettare uno spazio di avvistamento proporzionato alla velocità predominante sulla strada. Per velocità di:

- 130 km/h, la distanza minima dal segnale deve essere 250 metri,
- 110 km/h, 200 metri,
- 90 km/h, 170 metri,
- 70 km/h, 140 metri,
- 50 km/h, 100 metri.

In situazioni particolari, come in presenza di viadotti o gallerie, dove lo spazio di avvistamento è ridotto, i PMV possono essere posizionati a una distanza superiore, a patto che questa sia riportata su un pannello integrativo, in modo da informare i conducenti con sufficiente anticipo.

Sulle autostrade e principali arterie extraurbane, dove il traffico è intenso o la sicurezza necessita di particolare attenzione, il segnale principale deve essere preceduto da uno o più segnali simili, posizionati a distanze progressive e segnalate con pannelli integrativi. Inoltre, in presenza di corsie di emergenza, i segnali di indicazione per le svolte devono essere installati a 500 metri dal punto di svolta, con un'indicazione precisa della distanza residua.

È importante sottolineare che i pannelli a messaggio variabile sono spesso utilizzati insieme ad altri sistemi, come i Queue Warning Systems, o integrati con radar per il rilevamento della velocità,

Lo schema cantieristico (Fig. 6.3) proposto dal Dipartimento dei Trasporti di New York, che combina, per l'appunto, pannelli a messaggio variabile e rilevamento della velocità.

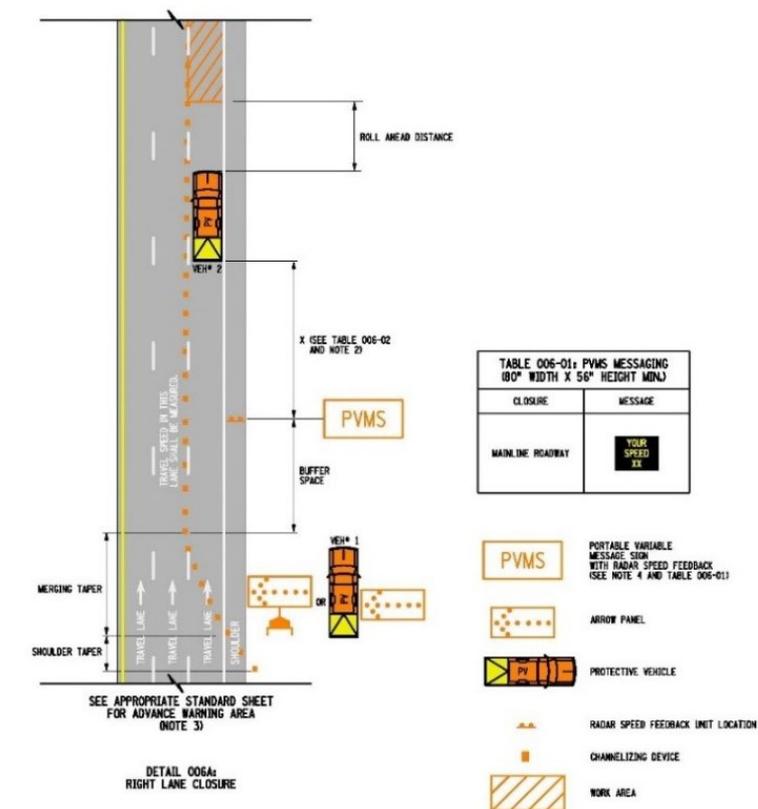


Figura 6.3: Esempio schema segnaletico con PMV e rilevatore di velocità

6.2.2 SISTEMI DI CONTROLLO DELLA VELOCITÀ

Tra i fattori che incrementano la sicurezza dei cantieri autostradali vi è la riduzione della variabilità della velocità media. Per raggiungere tale obiettivo, è dunque necessario l'installazione di sistemi di monitoraggio fissi, mobili o appartenenti alle forze di polizia.

In Italia, i principali strumenti per la regolazione della velocità sono l'Autovelox e il Tutor. Consolidati da anni, questi dispositivi vengono utilizzati su strade urbane e autostrade per monitorare i veicoli in due modalità diverse. L'Autovelox rileva la velocità istantanea in un singolo punto, mentre il Tutor calcola la velocità media su un determinato tratto, incentivando così una riduzione più costante lungo il percorso. Entrambi si sono dimostrati efficaci nel ridurre la velocità nelle aree più a rischio, contribuendo a una significativa diminuzione degli incidenti grazie alla loro funzione dissuasiva. Per questi motivi, si consiglia il loro utilizzo anche nei cantieri.

L'uso del Box Autovelox mobile (Fig. 6.4) si posiziona, di norma, lungo il margine destro della prima corsia di transito adiacente alla zona di lavoro [66]. L'installazione della postazione dovrà avvenire a una distanza minima pari a 1 chilometro dal segnale indicante il limite massimo di velocità, nel caso in cui il limite imposto sia diverso da quello fissato in linea generale per quella categoria di strada.

Il Box Autovelox deve essere sempre preceduto da un cartello di preavviso

Ad integrazione dell'Autovelox, può essere previsto, l'impiego di un impianto dissuasore con misuratore radar della velocità, da posizionare sempre sul margine destro circa 500 metri prima del dispositivo di controllo (Fig. 6.4).

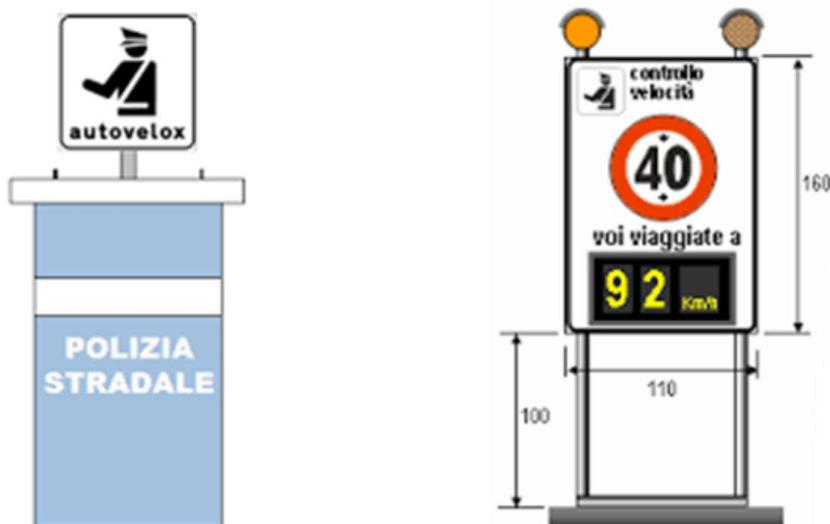


Figura 6.4: Box autovelox mobile per cantieri a sinistra, cartello dissuasore con rilevatore radar di velocità a destra

In alcuni cantieri fissi, è possibile infine valutare la presenza della volante della polizia nelle aree di cantiere. Essa è riconosciuta come una delle misure più efficaci per ridurre la velocità dei veicoli. La semplice presenza delle forze dell'ordine agisce come un potente deterrente, riducendo significativamente l'eccesso di velocità e i comportamenti di guida aggressivi. Inoltre, gli agenti possono rispondere rapidamente a incidenti o inconvenienti, riducendo al minimo le interruzioni e ripristinando il flusso del traffico in modo efficiente.

Nel Code of Federal Regulations, in particolare titolo 23 CFR 630, sotto parte K³, delineano condizioni specifiche in cui l'intervento della polizia è altamente raccomandato nelle zone di lavoro. Tra queste, gli scenari in cui i lavoratori sono esposti al traffico ad alta velocità senza barriere protettive o a lavori notturni in cui la visibilità è limitata. Inoltre, l'applicazione della legge è fondamentale sulle strade ad alta velocità, dove è probabile che si formino code improvvise, creando condizioni di pericolo sia per i lavoratori che per gli utenti della strada. Gli studi hanno dimostrato

³ Raccolta di regolamenti federali negli Stati Uniti. Il titolo 23 riguarda i trasporti, e la sottoparte K riguarda in particolare la "Gestione della Sicurezza nelle Aree di Lavoro Stradali" (Work Zone Safety and Mobility)

una riduzione dell'eccesso di velocità compresa tra il 16% e il 24%, con una diminuzione della velocità media fino a 6,5 miglia orarie.

Negli Stati Uniti esistono specifici schemi di segnaletica che regolano il posizionamento dei veicoli della polizia e delle misure di controllo della velocità intorno alle zone di lavoro. È comune posizionare un veicolo della polizia a circa 400 metri dall'ingresso della zona di lavoro, moderando efficacemente la velocità del traffico e riducendo il rischio di tamponamenti ad alta velocità (Fig. 6.5).

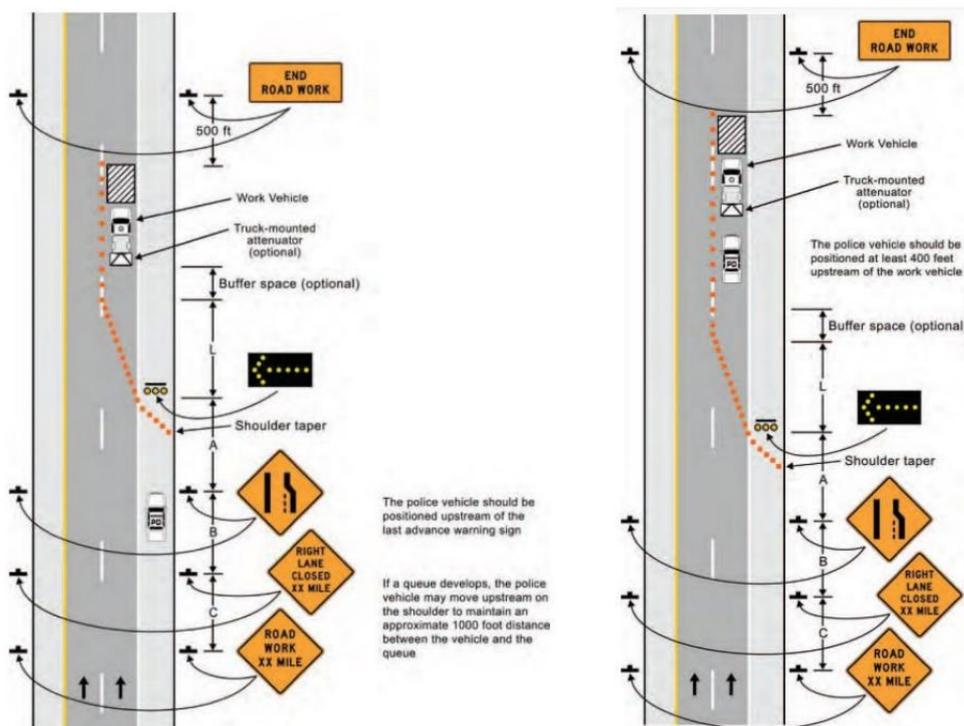


Figura 6.5: Schemi segnaletici con veicolo della polizia

Infine il *Portable Variable Speed Limit System* (PVLS) cioè il limite di velocità variabile aggiunge un ulteriore livello di regolamentazione. Il *Portable Variable Speed Limit System* (PVLS) [61], è un sistema di regolazione dinamica dei limiti di velocità che si avvale di tecnologie per monitorare le condizioni del traffico, il meteo e lo stato della superficie stradale, permettendo di adattare i limiti di velocità in tempo reale (Fig. 6.6). Il PVLS utilizza pannelli a messaggio variabile (PMV) per segnalare ai conducenti la velocità consigliata o obbligatoria, tenendo conto di fattori quali la densità del traffico, la visibilità e la presenza di cantieri. Questo sistema è particolarmente utile nelle aree di

lavoro, dove la portabilità e la facilità di installazione dei PMV permettono una gestione flessibile e immediata del traffico. Tuttavia, per via dei costi di installazione abbastanza elevati i Portable Variable Speed Limit System risultano maggiormente indicati per cantieri con una durata superiore ai 30 giorni.



Figura 6.6: limite di velocità portatile variabile

6.2.3 CORRETTO DIMENSIONAMENTO DELLA BUFFER AREA

La principale funzione della zona cuscinetto o buffer area è quella di garantire uno spazio di sicurezza tra l'area di lavoro e la chiusura di una o più corsie, motivo per cui quest'area deve essere libera da lavoratori o macchinari. In questo modo si permette ai conducenti di effettuare manovre di emergenza, fornendo loro sufficiente spazio per fermarsi prima di invadere l'area di cantiere. Per assicurare un livello di protezione adeguato, la lunghezza della sezione di buffer (L) dovrebbe essere progettata considerando la distanza di arresto (SSD) e includendo un margine di sicurezza aggiuntivo.

In uno studio condotto da Zhepu Xu [67], è stato proposto un metodo innovativo per la valutazione rapida della sicurezza della sezione cuscinetto nelle zone di

manutenzione stradale. Rispetto ai metodi tradizionali basati sull'analisi dei dati storici di incidenti, questa metodologia consente una valutazione preventiva della sicurezza, utilizzando dati comportamentali dettagliati raccolti direttamente dai veicoli che attraversano la zona di lavoro. A tale scopo, è stato sviluppato un dispositivo portatile per la raccolta dati e sono stati proposti schemi di raccolta flessibili, adattabili sia a contesti di piccola che di grande scala.

L'analisi dei dati avviene in due fasi: la segmentazione automatica dei comportamenti estremi dei veicoli e l'uso di clustering spaziale per escludere comportamenti specifici e rappresentare le caratteristiche della maggioranza. La posizione ad alta densità ottenuta dal clustering identifica il punto in cui i veicoli iniziano manovre di evitamento del rischio. Valutando la distanza tra questo punto, la SSD e la lunghezza della sezione cuscinetto, è possibile determinare la sicurezza della zona di buffer.

Se la lunghezza reale della buffer area (L') supera $L + SSD$, i veicoli hanno spazio sufficiente per fermarsi completamente prima di entrare nella zona di lavoro, rendendo la sezione sicura. Tuttavia, se L' è inferiore a $L + SSD$, aumenta il rischio di intrusioni nel cantiere, e quando L' è inferiore a SSD , la situazione diventa pericolosa, poiché il veicolo non ha spazio sufficiente per fermarsi (Fig. 6.7).

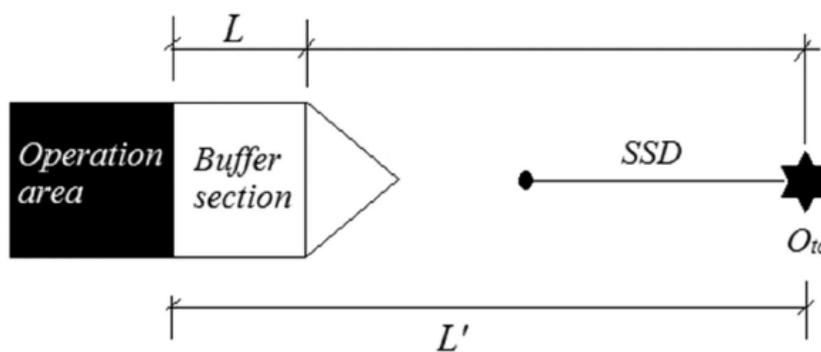


Fig. 3 Safety assessment for buffer section of maintenance work zone

Figura 6.7: Rappresentazione della lunghezza di buffer, SSD e L'

In genere, la SSD può essere calcolata secondo la formula:

$$SSD = 0,278Vt + \frac{V^2}{254(\varphi \pm i)}$$

Equazione 6.1: Relazione per il calcolo della stopping side distance

Dove V è la velocità del veicolo, t il tempo di percezione-reazione del conducente, φ il coefficiente di attrito tra pneumatici e pavimentazione e i la pendenza longitudinale della strada.

La sperimentazione di questo metodo ha dimostrato la sua efficacia nel verificare rapidamente la sicurezza delle zone cuscinetto, offrendo un'alternativa ai metodi basati solo su dati storici di incidenti.

6.2.4 LUCI DI AVVISO SEQUENZIALI

Le luci di avviso sequenziali vengono posizionate in prossimità di chiusure di corsie per guidare i conducenti lungo il percorso designato, contribuendo a una riduzione della velocità dei veicoli. Il costo contenuto e la semplice installazione rendono le SEQ un'alternativa sempre più fruibile. [68].

Il Manuale delle Disposizioni Uniformi di Controllo del Traffico (MUTCD) [69] analizza un sistema di luci di segnalazione, composto da una serie di luci lampeggianti individuali, interconnesse e sincronizzate, che sono montate su tamburi di canalizzazione utilizzati per formare il cono di chiusura della corsia. Le luci sincronizzate creano l'effetto di una luce che "si muove" in modo continuo e sequenziale dall'inizio alla fine del cono di chiusura (Fig. 6.8).

Nello studio si dimostra che le luci sequenziali sono percepite in maniera positiva dai conducenti, senza causare confusione, pertanto è raccomandato il loro utilizzo nelle zone di transizione. Le reazioni dei conducenti ai sistemi di luci di avviso hanno mostrato che questi sistemi incoraggiavano a liberare la corsia chiusa a una distanza maggiore prima della chiusura, senza causare confusione.

Ad esempio, quando il sistema di luci è stato attivato in un test su un'autostrada urbana, è stato registrato un cambiamento significativo nel comportamento dei conducenti. In particolare, si è osservato che il numero di autovetture nella corsia chiusa è diminuito

di un quarto (25%), mentre per i camion la riduzione è stata ancor più marcata, con una diminuzione di due terzi (67%) a una distanza di 305 metri (1000 piedi) prima della chiusura della corsia (Fig. 6.8). Questo indica che le luci di avviso hanno avuto un effetto positivo nel far sì che i conducenti abbandonassero la corsia chiusa prima di arrivarci, contribuendo così a una maggiore sicurezza.

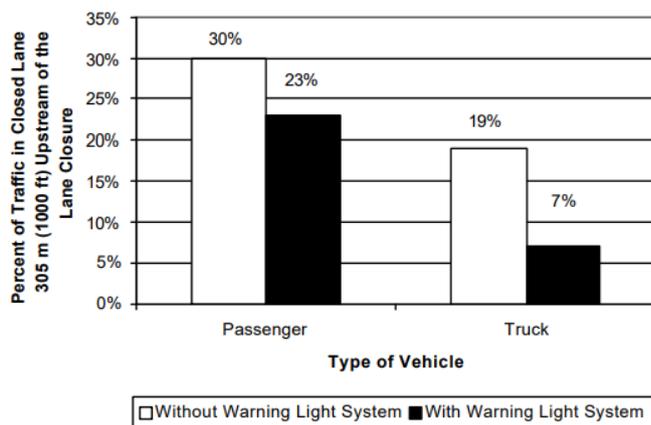


Figura 6.8: Percentuale di traffico nella corsia chiusa (305 m a monte del cantiere)

Tuttavia, è importante notare che il sistema di luci non ha avuto lo stesso impatto in un test condotto in un'area rurale, dove la corsia era già stata chiusa per sei mesi. In questa situazione, le luci di avviso non hanno mostrato un effetto significativo sulla scelta delle corsie da parte dei conducenti. Ciò suggerisce che, poiché i conducenti erano già a conoscenza della chiusura, non hanno percepito la necessità di modificare il loro comportamento alla luce delle nuove indicazioni.

Pertanto, il massimo potenziale beneficio per la sicurezza del sistema di luci di avviso potrebbe realizzarsi quando è utilizzato in progetti di manutenzione o costruzione di breve durata o intermedi, oppure in situazioni in cui ci sono pochi conducenti familiari alla strada. In questi casi, i conducenti sono meno propensi a conoscere già le condizioni della strada e possono quindi trarre maggiore vantaggio dalle indicazioni fornite dal sistema di luci.

In linea con questo principio, la società ASPI, nel documento *Nuovi standard finalizzati a migliorare la sicurezza del traffico e degli operatori nei cantieri di lavoro in autostrada* [70], prevede

l'uso di lampade sequenziali a LED nelle testate di chiusura delle corsie e nelle testate di deviazione, come illustrano nella figura seguente (Fig. 6.9).



Figura 6.9: Esempio testata di chiusura di una corsia con l'uso di lampade sequenziali a led

6.3 CONTROMISURE PER IL LIVELLO DI RISCHIO ALTO

Nella fascia di rischio alto, risulta essenziale l'applicazione di contromisure più restrittive per garantire la sicurezza. In questa fascia di rischio, l'uso di barriere di tipo New Jersey è caldamente raccomandato per proteggere i lavoratori e gli utenti della strada.

L'adozione di tali misure è fondamentale per mitigare i rischi legati alle intrusioni veicolari; per le caratteristiche tecniche si rimanda al paragrafo 2.2.3. La scelta della tipologia di barriera, che può essere connessa stabilmente alla pavimentazione o appoggiata, richiede un'attenta valutazione da parte di esperti del settore. Tale valutazione si basa su criteri come lo spazio libero laterale disponibile, la larghezza di deflessione della barriera e le caratteristiche del traffico, inclusi volume e velocità dei veicoli.

Le barriere connesse direttamente alla pavimentazione garantiscono una maggiore resistenza agli impatti, rendendole così adatte a contesti con elevate percentuali di traffico pesante. Tuttavia i tempi di installazione risultano particolarmente dilatati e i costi decisamente maggiori. Al contrario, le barriere semplicemente appoggiate e

ancorate tra loro sono caratterizzate da un'installazione più rapida, risultando preferibili per progetti di breve durata.

L'importanza di scegliere la tipologia di barriera più adatta non riguarda solo l'aspetto della sicurezza passiva, ma anche la necessità di mantenere un equilibrio tra protezione e flusso del traffico. Una barriera eccessivamente invasiva potrebbe infatti aumentare i disagi per gli automobilisti e potenzialmente compromettere la sicurezza stradale complessiva. Per questo motivo, la decisione deve essere basata su un'analisi dettagliata delle condizioni specifiche del cantiere e delle esigenze di sicurezza, assicurando così che la soluzione adottata sia quella più efficace e sostenibile nel contesto operativo.

Tuttavia, è fondamentale considerare che l'installazione di barriere di qualsiasi genere comporta un aumento della durata del cantiere, richiedendo alcuni giorni per essere completata. L'installazione è quindi giustificata nei cantieri di durata prolungata, dove l'investimento di tempo è bilanciato da un significativo miglioramento della sicurezza. Tra le soluzioni disponibili, si possono considerare anche le barriere mobili proposte da Ticopter Srl e Safital Srl, così come le barriere Deltabloc, già descritte in dettaglio nel capitolo 2.2.4, entrambe caratterizzate da una maggiore flessibilità e rapidità di movimentazione rispetto ai sistemi tradizionali.

Nei progetti brevi o in situazioni in cui il montaggio delle barriere comporta rischi operativi elevati, si possono considerare altre misure di sicurezza, come

- Sistemi di avviso di coda (Queue Warning Systems): sistemi altamente efficaci nel prevenire rallentamenti improvvisi, avvisando i conducenti in anticipo sulla presenza di congestioni.
- Sistemi di allarme per intrusioni: questi sistemi allertano sia i lavoratori sia i conducenti in caso di ingresso non autorizzato di veicoli nelle aree di lavoro, prevenendo potenziali incidenti.

6.3.1 SISTEMI DI AVVISO DI CODA

I sistemi di avviso di coda (QWS) [61] rilevano il traffico stop-and-go e forniscono avvisi in tempo reale agli automobilisti. I QWS utilizzano algoritmi e vari sensori di traffico (come videocamere, radar Doppler e dispositivi a infrarossi) per monitorare le

condizioni del traffico in tempo reale, comprese le velocità dei veicoli e l'occupazione delle corsie. Quando la velocità dei veicoli scende al di sotto di una soglia prestabilita, i sistemi QWS attivano i pannelli portatili a messaggio variabile (PMV) che visualizzano messaggi specifici per avvisare gli automobilisti a monte della zona di lavoro della presenza di traffico lento o fermo. Questi sistemi si disattivano quando le condizioni del traffico tornano alla normale velocità di scorrimento.

Un QWS è costituito da tre componenti principali: dispositivi di rilevamento del traffico posizionati a monte della zona di lavoro, un server che riceve e analizza i dati dei sensori in tempo reale e schede PCMS per la visualizzazione degli avvisi. Questi componenti lavorano in sincrono per fornire ai conducenti informazioni tempestive, riducendo la probabilità di frenate improvvise e cambi di corsia che spesso contribuiscono agli incidenti in prossimità delle zone di lavoro (Fig. 6.10).

Nel 2017, il Wisconsin Department of Transportation (WisDOT) ha installato un QWS nella contea di Manitowoc ottenendo una riduzione del 15% degli incidenti legati alle code e del 63% degli incidenti con feriti. Inoltre, l'uso del QWS ha ridotto del 13% i costi degli incidenti nelle zone di lavoro legati alle code.

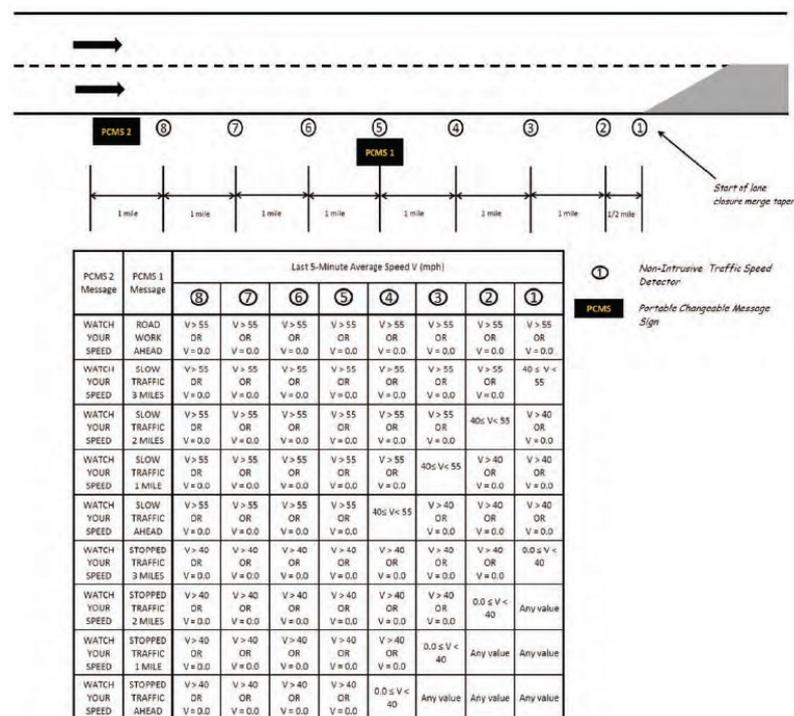


Figura 6.10: Esempio piano di utilizzo di un sistema QWS

6.3.2 SISTEMI DI ALLARME PER L'INTRUSIONE

I sistemi di allerta per l'intrusione nelle zone di lavoro autostradali rappresentano uno strumento fondamentale per salvaguardare i lavoratori da veicoli non autorizzati o erranti che entrano inavvertitamente in aree riservate. Questi allarmi si basano in genere su tecnologie di rilevamento dei veicoli e forniscono avvisi acustici, visivi o tattili per dare ai lavoratori il tempo sufficiente per reagire e allontanarsi dal pericolo. [61]

Le prime versioni dei WZIA, sviluppate nell'ambito dello Strategic Highway Research Program, utilizzavano tecnologie come sensori a microonde, raggi infrarossi e tubi pneumatici per il rilevamento dei veicoli. Tuttavia, questi sistemi sono stati abbandonati a causa di vari limiti, tra cui la persistenza di falsi allarmi, i costi elevati e le difficoltà di implementazione. Nonostante queste prime sfide, i progressi tecnologici hanno portato allo sviluppo di WZIA più sofisticati e affidabili.

Tra i moderni WZIA più comuni descriviamo il Worker Alert System (WAS), il SonoBlaster, l'Intellicone, e il sistema AWARE.

Il sistema WAS [71] comprende un tubo a pressione leggero e facilmente trasportabile, collegato a un sensore che invia segnali wireless a un allarme ricaricabile e a una luce lampeggiante, coprendo una distanza fino a 300 metri (Fig. 6.11). Questo tubo viene posizionato sulla strada a una distanza tale da fornire un avviso tempestivo in caso di attraversamento da parte di un veicolo. Il dispositivo rileva le variazioni di pressione tramite sensori inseriti nel tubo, attivando un altoparlante e una luce lampeggiante in caso di intrusione, consentendo in questo modo ai lavoratori di spostarsi rapidamente. All'aumentare della velocità del flusso di traffico, deve aumentare anche la distanza tra il tubo a pressione e l'area di lavoro per garantire un preavviso sufficiente.



Figura 6.11: Componenti del sistema WAS

Il sistema SonoBlaster [71] è costituito da una cartuccia di CO₂ che può essere facilmente installata su coni o barriere di delimitazione (Fig. 6.12). In caso di impatto con un veicolo errante, la tromba alimentata a CO₂ del SonoBlaster emette un suono di circa 125 dB, segnalando ai lavoratori la violazione della loro zona protetta e dando loro il tempo necessario per reagire e spostarsi al sicuro. Inoltre, il forte allarme del SonoBlaster può allertare anche i conducenti distratti o assopiti, permettendo loro di sterzare fuori dalla zona di lavoro o frenare prima di raggiungere i lavoratori. Un limite di tale dispositivo tuttavia risiede nel fatto che ogni unità opera in modo completamente autonomo. Di conseguenza, se un cono dotato di SonoBlaster viene colpito, solo quel dispositivo attiverà l'allarme, senza che il segnale venga trasmesso ad altre unità.



Figura 6.12: Sistema SonoBlaster

Intellicone è un dispositivo che integra sensori di movimento all'interno di un cono stradale, capace di rilevare veicoli che si scontrano o attraversano il cono stesso [72]. Quando un veicolo impatta, il sistema non solo attiva un allarme, ma invia anche un segnale a un portale web per segnalare automaticamente l'incidente. È facile da installare e permette agli operatori della gestione del traffico di avvisare immediatamente i lavoratori se un veicolo entra nel cantiere. Questo avviene premendo un pulsante che attiva un allarme locale e avvisa gli allarmi portatili posizionati nelle aree di lavoro, senza limitazioni di distanza. Inoltre, Intellicone consente di allarmare elettronicamente i punti di chiusura, monitorando eventuali accessi non autorizzati da remoto.

Il sistema AWARE [73], è un ulteriore sistema di rilevamento delle intrusioni e di allerta. A differenza dei sistemi tradizionali che si basano su perimetri fissi e metodi di rilevamento limitati, come tubi pneumatici o raggi infrarossi, AWARE utilizza una metodologia avanzata per monitorare in tempo reale la velocità, la posizione e la traiettoria dei veicoli in avvicinamento.

Il sistema è composto da due aree di rilevamento: una regione a lungo raggio che si estende fino a circa 152 metri (500 piedi) e una regione a corto raggio che arriva fino a circa 61 metri (200 piedi) (Fig. 6.13). Quando un veicolo entra in queste aree protette, il sistema AWARE calcola se il veicolo invaderà l'area di lavoro, basandosi su calcoli che utilizzano l'equazione della Distanza di Arresto (SSD).

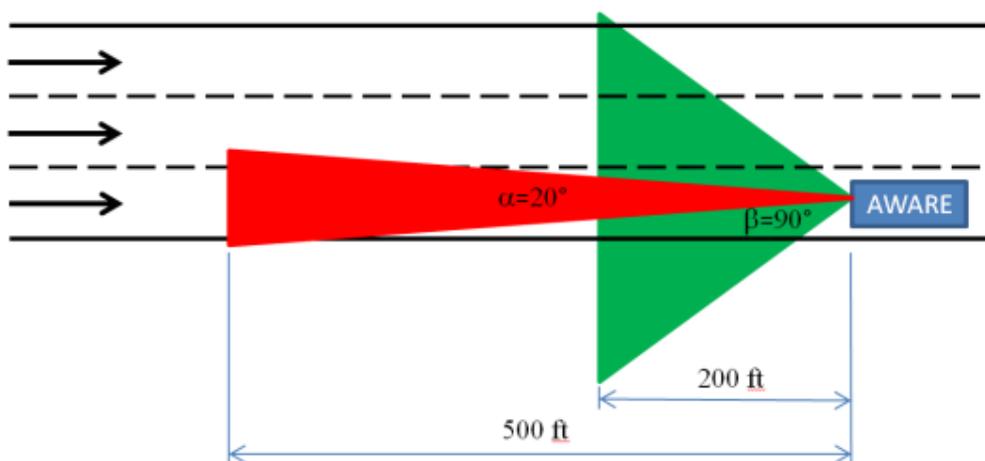


Figura 6.13: Le due aree di rilevamento

Se il sistema determina che la traiettoria del veicolo rappresenta una minaccia, vengono attivate luci LED lampeggianti per allertare l'automobilista e avvisare i lavoratori nel cantiere. Inoltre, se la soglia di distanza di arresto conservativa viene superata, viene attivato anche un allarme acustico. L'obiettivo principale è ridurre il rischio di intrusioni, attirando l'attenzione dell'automobilista con le luci lampeggianti e aumentando la consapevolezza dei lavoratori tramite l'allarme acustico.

In aggiunta, il sistema AWARE include dispositivi portatili chiamati Worktrax, che possono essere indossati dai lavoratori come parte dei loro dispositivi di protezione individuale (DPI). Questi dispositivi sono connessi al sistema principale e producono avvisi sia tattili che sonori quando viene attivato il sistema AWARE, garantendo che i lavoratori siano prontamente avvisati in caso di un veicolo in avvicinamento. Queste caratteristiche innovative del sistema AWARE mirano a migliorare la sicurezza nelle zone di lavoro, riducendo il rischio di incidenti e fornendo agli operatori gli strumenti necessari per reagire in modo efficace a potenziali minacce.

6.4 CONTROMISURE PER IL LIVELLO DI RISCHIO CRITICO

In questa fascia di rischio è essenziale l'adozione di misure di sicurezza particolarmente robuste, poiché si ha un'elevata probabilità che si verifichino intrusioni nell'area di cantiere. Pertanto, oltre alle misure precedentemente descritte, si raccomanda l'installazione di barriere New Jersey ancorate alla pavimentazione.

Queste barriere offrono un'elevata capacità di contenimento e resistenza agli urti, risultando ideali per questa fascia di rischio critico. Tramite l'ancoraggio alla pavimentazione si migliora l'efficacia della protezione, diminuendo la larghezza operativa della barriera e rendendole adatte a situazioni di spazi particolarmente limitati.

Come nel caso precedente, la scelta della tipologia di barriera da installare è demandata al Responsabile della Sicurezza in fase di Progettazione (RSP) e agli esperti del settore. Questi professionisti devono valutare attentamente le condizioni del cantiere, tenendo conto di fattori come lo spazio libero laterale disponibile, la larghezza di deflessione della barriera e le caratteristiche del traffico. Una valutazione accurata consente di scegliere la soluzione più adatta ad ogni tipologia di cantiere.

Anche in questo caso si vuole incentivare l'utilizzo di sistemi innovativi che possono offrire ulteriori benefici sia in termini di sicurezza che di flessibilità operativa. Tra questi sistemi vi sono il *Road Zipper*, una tecnologia che consente di spostare rapidamente le barriere per adattare la configurazione delle corsie alle esigenze del traffico, e il già citato *Deltabloc*, un sistema modulare che combina flessibilità e resistenza per una protezione ottimale. Questi sistemi sono descritti nel dettaglio nel paragrafo 2.2.4 e rappresentano soluzioni moderne e versatili, in grado di migliorare la gestione della sicurezza nei cantieri autostradali.

In conclusione, questo capitolo ha presentato una serie di dispositivi di protezione e misure che possono essere adottati per ciascuna fascia di rischio individuata. Man mano che il livello di rischio aumenta, i responsabili della sicurezza del cantiere hanno la possibilità di integrare progressivamente dispositivi e misure più sofisticate e incisive rispetto a quelle già implementate. L'obiettivo è quello di creare un sistema flessibile che permetta di rispondere in maniera adeguata e proporzionata alle specifiche esigenze di ogni cantiere.

È fondamentale sottolineare che il contenuto di questo capitolo rappresenta un primo studio preliminare. Per implementare correttamente i dispositivi nelle diverse fasce di rischio identificate è necessario intraprendere uno studio dettagliato per ognuno di essi. Tuttavia in questo momento si vuole mettere in luce il fatto che esistono ampie opportunità di miglioramento e di approfondimento per sviluppare un'analisi più dettagliata. La varietà e la complessità delle situazioni che si possono verificare nei cantieri autostradali richiedono ulteriori ricerche e approfondimenti così da ottenere un livello di sicurezza adeguato.

Diventa dunque imprescindibile proseguire nella ricerca e nell'implementazione di dispositivi innovativi, i quali rappresentano una valida opzione per migliorare la sicurezza. Pertanto, è fondamentale incentivare la sperimentazione di questi dispositivi, promuovendo un approccio che ne incoraggi l'utilizzo. Solo in questo modo si potrà dare impulso alla loro diffusione e creare un ambiente di lavoro più sicuro per tutti gli operatori coinvolti.

CONCLUSIONI

Questa tesi ha sviluppato un indice di esposizione al rischio di intrusione, proposto sotto forma di media ponderata di diversi fattori che influenzano la sicurezza all'interno dei cantieri. I fattori presi in esame includono la configurazione del cantiere, la lunghezza e la durata del cantiere, il traffico e la sua composizione, nonché le caratteristiche geometriche del tracciato e le condizioni della pavimentazione e meteorologiche.

L'indice di esposizione così ottenuto è stato suddiviso in quattro fasce di rischio e, per ciascuna, sono state valutate specifiche misure per garantire la sicurezza. Le fasce identificate sono:

- Fascia di rischio bassa: Questa fascia indica un livello di rischio contenuto. In questi casi, è opportuno monitorare continuamente la situazione, applicare tutte le disposizioni normative e, per cantieri di durata superiore a 30 giorni, si consiglia l'installazione di bande rumorose.
- Fascia di rischio media: In questa fascia, il rischio è più elevato e potrebbero esserci fattori di preoccupazione che richiedono maggiore attenzione. È consigliabile adottare misure di sicurezza come pannelli a messaggio variabile, sistemi di monitoraggio della velocità e l'uso delle luci sequenziali.
- Fascia di rischio alta: Qui il rischio di intrusione è significativo. È essenziale attuare misure di sicurezza robuste, come l'installazione di barriere fisiche. Qualora non fosse possibile, si consiglia di utilizzare sistemi di allerta in caso di intrusioni, dispositivi di avviso di fine coda e di dimensionare correttamente l'area di buffer longitudinale.
- Fascia di rischio critica: Questa fascia rappresenta una situazione in cui il rischio di incidenti è molto elevato. In queste condizioni è estremamente consigliato installare delle barriere di tipo New Jersey per proteggere adeguatamente l'area.

Grazie alla natura della media ponderata utilizzata per calcolare l'indice di esposizione, in futuro sarà possibile integrare nuovi fattori di sicurezza senza modificare le fasce di rischio già individuate, ma semplicemente aggiornando i calcoli secondo il procedimento descritto in questa tesi.

Questo modello si propone di standardizzare l'approccio alla gestione del rischio nei cantieri autostradali, riducendo la discrezionalità attuale nella scelta delle misure di sicurezza, che oggi è interamente in mano al responsabile della sicurezza (RSP).

È fondamentale, tuttavia, riconoscere le limitazioni di questo studio. Ogni modello richiede una fase di calibrazione basata su dati reali; in questo modo sarà possibile valutare correttamente se gli intervalli delle quattro fasce di rischio sono stati definiti in maniera appropriata. Guardando al futuro, si suggerisce non solo l'implementazione del modello con dati reali, ma anche ulteriori ricerche e approfondimenti sulle misure di sicurezza proposte, con particolare riguardo alle soluzioni tecnologicamente innovative.

In conclusione, questo lavoro rappresenta un passo significativo verso una maggiore standardizzazione delle pratiche di sicurezza nei cantieri stradali, al fine di migliorare la sicurezza di tutti gli operatori coinvolti, sia i lavoratori che i conducenti.

APPENDICE A

Di seguito è descritto il metodo proposto dal *Highway Capacity Manual* (HCM) [57] per calcolare il Livello di Servizio (LOS) nei tratti autostradali soggetti a cantieri.

I tratti base (Fig. A.1) sono segmenti autostradali con flusso di traffico ininterrotto, non influenzato da rampe di ingresso, uscita o scambio. Pertanto, vengono esclusi dall'analisi i tratti compresi tra:

- 150 metri a monte e 900 metri a valle delle rampe di ingresso;
- 900 metri a monte e 150 metri a valle delle rampe di uscita;
- 150 metri a monte e a valle delle zone di scambio.



Figura A.1: Tratti base di una autostrada

Le condizioni base sono quelle ottimali, nelle quali si raggiungono i massimi valori di capacità e portata per ciascun Livello di Servizio (LOS). Secondo il Manuale, le condizioni base includono [74]:

- larghezza delle corsie non inferiore a 3,60 m;
- distanza tra il bordo della carreggiata e ostacoli laterali a destra non inferiore a 1,80 m;
- distanza tra il bordo della carreggiata e ostacoli laterali a sinistra non inferiore a 0,60 m;
- corrente di traffico composta solo da autovetture;
- svincoli distanti almeno 3 km;
- tratti pianeggianti con pendenze longitudinali non superiori al 2%;
- traffico composto principalmente da utenti abituali;
- buone condizioni meteorologiche e di visibilità;

- configurazione stradale che consente una velocità di flusso libero (VFL) pari o superiore a 110 km/h.

La procedura di calcolo del LOS si articola in tre step principali:

1. Calcolo del LOS in condizioni pre-cantiere
2. Determinazione dei fattori di aggiustamento per velocità e capacità (SAF e CAF) in presenza di cantieri
3. Ricalcolo del LOS durante il cantiere applicando i coefficienti di aggiustamento

Di seguito esamineremo ogni passaggio in dettaglio.

Step 1. Calcolo del LOS in Condizioni Pre-Cantiere

Per calcolare il LOS in assenza di cantieri, è necessario disporre dei seguenti dati di input:

- Traffico Medio Giornaliero (TGM) della sezione autostradale;
- Percentuale di mezzi pesanti P_t ;
- Lunghezza del tratto autostradale (corrispondente alla lunghezza del cantiere una volta installato);
- Larghezza delle corsie.

Calcolo del volume orario di progetto Q_{VPH}

A partire dal TGM, è possibile ottenere il volume orario di progetto (Q_{VPH}) utilizzando la formula:

$$Q_{VPH} = TGM \cdot K \cdot D \quad [veic/h]$$

Equazione A.1: Calcolo volume orario di progetto

dove:

- K rappresenta la percentuale di TGM durante l'ora di punta (valore tipico di 0,12 per le autostrade italiane),

- D indica la percentuale massima del traffico nella direzione più trafficata (valore tipico di 0,59 per le autostrade italiane).

Se il volume orario di progetto è già noto, questo passaggio può essere saltato.

Calcolo della Velocità di Flusso Libero (VFL)

La velocità di flusso libero (VFL) si calcola come segue:

$$VFL = BVFL - f_c - f_b - f_s \quad [km/h]$$

Equazione A.2: Calcolo della velocità di flusso libero

dove:

- BVFL è la velocità di flusso libero in condizioni base (solitamente 120 km/h),
- f_c è il fattore di correzione per la larghezza delle corsie,
- f_b è il fattore di correzione per la distanza dagli ostacoli laterali,
- f_s è la riduzione della velocità dovuta alla frequenza degli svincoli.

I valori di f_c , f_b e f_s sono riportati nelle tabelle seguenti (Tab A.1, Tab A.2 e Tab A.3).

Larghezza corsie [m]	f_c [km/h]
3.60	0.00
3.5	1.00
3.40	2.10
3.30	3.10
3.20	5.60
3.10	8.10
3.00	10.60

Tabella A.1: Fattori di correzione per la larghezza corsia

Distanza ostacoli laterali [m]	f_b [km/h]	
	n° corsie per senso di marcia	
	2	3
>1.80	0.00	0.00
1.50	1.00	0.70
1.20	1.90	1.30
0.90	2.90	1.90
0.60	3.90	2.60
0.30	4.80	3.20
0.00	5.80	3.90

Tabella A.2: Fattori di correzione per la distanza dagli ostacoli laterali

Numero di svincoli per km	fs (km/h)
≤ 0.3	0.00
0.4	1.10
0.5	2.10
0.6	3.90
0.7	5.00
0.8	6.00
0.9	8.10
1.0	9.20
1.1	10.20
1.2	12.10

Tabella A.3: Fattori di correzione per la presenza di svincoli

La capacità C è calcolata come:

$$C = 1800 + 5 \cdot VFL \quad [\text{vett}/\text{h}/\text{corsia}]$$

Equazione A.3: Calcolo della capacità

A partire dal volume di progetto nell'ora di punta si può determinare la portata oraria (o tasso di flusso) media per corsia e per il quarto d'ora di picco tramite:

$$Q = \frac{Q_{VPH}}{N \cdot phf \cdot f_{HV} \cdot f_p} \quad [\text{autovett}/\text{h}/\text{corsia}]$$

Equazione A.4: Calcolo del tasso di flusso

In cui:

- QVPH è la portata oraria media per corsia in autovetture equivalenti,
- N è il numero di corsie,
- phf è il fattore dell'ora di punta (assunto 0,85 per le autostrade italiane),
- f_{HV} tiene conto dei veicoli lenti, e
- f_p è il coefficiente per utenti non abituali (assunto 1 se non diversamente noto).

Il coefficiente f_{HV} per i mezzi pesanti si calcola come:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_t (E_t - 1)}$$

Equazione A.5: Calcolo per il coefficiente collegato ai mezzi pesanti

dove P_t è la percentuale di mezzi pesanti e E_t il fattore di equivalenza autovetture-mezzi pesanti. In autostrada si considerano mezzi pesanti tutti quelli che superano le 3,5 t di peso. Per calcolare il valore di E_t si fa riferimento alle tabelle seguenti basate sulla lunghezza del tratto considerato e la sua pendenza (Tab A.4, Tab A.5).

Pendenza (%)	Lunghezza (km)				
	$L < 0.2$	$0.2 \leq L < 0.5$	$0.5 \leq L < 0.8$	$0.8 \leq L < 1.0$	$L \geq 1.0$
$i < 1$	P	P	P	P	P
$1 \leq i < 2$	P	P	P	P	O
$2 \leq i < 3$	O	O	O	O	O
$3 \leq i < 4$	O	O	M	M	M
$4 \leq i < 5$	O	O	M	M	M
$i \geq 5$	O	O	M	M	M

Tabella A.4: Classificazione della morfologia del terreno in funzione della lunghezza della tratta e della pendenza

Coefficiente di equivalenza	Tipo di terreno		
	Pianeggiante	Ondulato	Montuoso
E_t	1.5	2.5	4.5
E_r	1.2	2.0	4

Tabella A.5: Valori del coefficiente E_t

Calcolo del Livello di Servizio (LOS)

Infine, si determina la densità e di conseguenza il livello di servizio:

$$D = \frac{Q}{\bar{V}} \quad [\text{autovett}/\text{km}/\text{corsia}]$$

Equazione A.6: Calcolo della densità

In cui \bar{V} è la velocità media delle vetture espressa in km/h il cui andamento è rappresentato in figura (Fig. A.2):

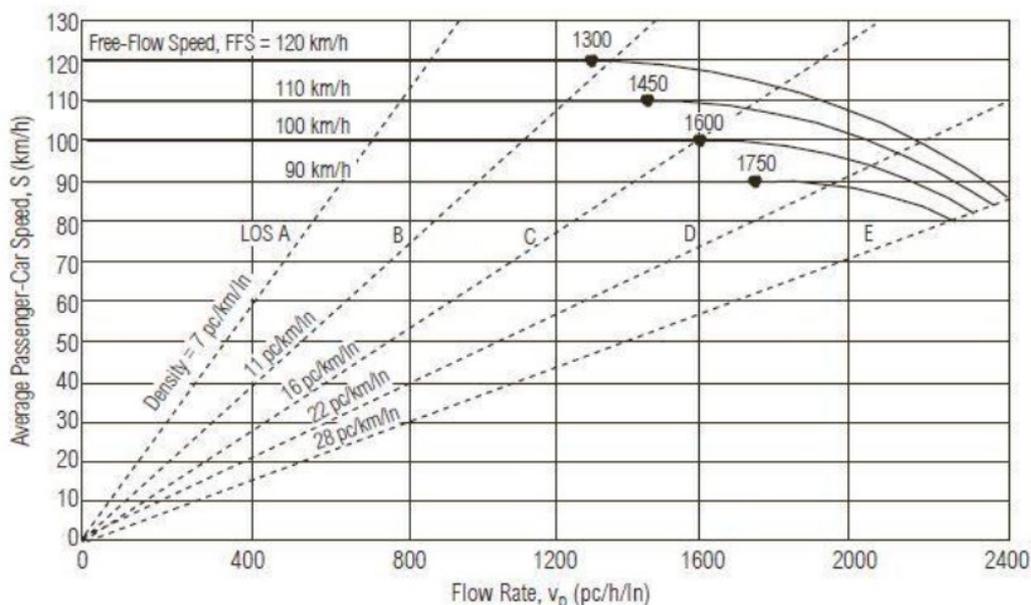


Figura A.2: Andamento delle velocità in funzione del tasso di flusso

Calcolando la portata Q* come $Q^* = 3100 - 15 VFL$ risulta:

$$\begin{cases} \bar{V} = VFL & \text{se } Q < Q^* \\ \bar{V} = VFL - \left[\frac{1}{28} (23 \cdot VFL - 1800) \cdot \left(\frac{Q + 15 VFL - 3100}{20 VFL - 1300} \right)^{2,6} \right] & \text{se } Q > Q^* \end{cases}$$

Equazione A.7: Calcolo della velocità media

Step 2: Determinazione dei fattori di aggiustamento per velocità e capacità (SAF e CAF) in presenza di cantieri

La procedura descritta di seguito, tratta dal capitolo 10 dell'Highway Capacity Manual (HCM [57]), consente di calcolare i coefficienti di correzione riduttivi della velocità e della capacità rispetto alle condizioni base. Come accennato nel capitolo 5 di questa tesi, le attività di costruzione in autostrada possono ridurre la capacità e la velocità di flusso libero, influenzando così il rapporto tra velocità e flusso.

Le ricerche mostrano che diversi fattori incidono sulla capacità della zona di lavoro, tra cui la configurazione delle corsie, il tipo di barriera, la distanza laterale della zona di lavoro dalle corsie di marcia e le condizioni di illuminazione (giorno/notte). Questi fattori, insieme al limite di velocità nella zona di lavoro e alla presenza di svincoli, influenzano la velocità di flusso libero.

Il primo passo per calcolare i coefficienti CAF e SAF considera la configurazione delle chiusure delle corsie in una zona di lavoro, esprimendola attraverso l'Indice di severità della chiusura delle corsie (LCSI), calcolato con la formula:

$$LCSI = \frac{1}{OR \cdot N_0}$$

Equazione A.8: Indice di severità della chiusura delle corsie

dove:

- LCSI è l'indice di severità della chiusura delle corsie,
- OR è il rapporto tra il numero di corsie aperte durante i lavori e il numero totale di corsie in condizioni normali,
- N_0 è il numero di corsie aperte nella zona di lavoro.

Un valore più alto di LCSI indica una chiusura più severa. Se l'LCSI supera il valore di 2, l'indice viene limitato a 2. Nei casi di chiusura totale della carreggiata, quindi, si pone il valore massimo pari a 2.

È importante notare che non tutte le zone di lavoro comportano effetti di chiusura delle corsie. Ad esempio, i lavori che coinvolgono solo la banchina o configurazioni di

deviazione (crossover) non riducono il numero complessivo di corsie e possono essere trattati con la stessa metodologia, adattata per situazioni senza chiusure di corsie.

Le possibili configurazioni e i rispettivi LCSI sono riassunti nella tabella seguente (Tab A.6):

Numero di corsie totali	Numero di corsie aperte	LCSI
2	2	0.5
2	1	2.00
2	0	2.00
3	3	0.33
3	2	0.75
3	1	2.00
3	0	2.00

Tabella A.6: Possibili valori di LCSI nei cantieri autostradali in Italia

Capacità delle zone di lavoro

Per calcolare la capacità massima di una zona di lavoro su un'autostrada, ossia il flusso massimo di veicoli che può essere gestito prima che si verifichi un rallentamento o un blocco (il cosiddetto "pre-breakdown"), si affronta una difficoltà. In particolare, monitorare il flusso esatto di traffico poco prima di un ingorgo risulta complicato. Una soluzione alternativa è misurare il "tasso di scarico della coda", che rappresenta il numero di veicoli che riescono a passare subito dopo che si è formato un collo di bottiglia e la coda è già visibile.

Per stimare la capacità della zona di lavoro prima che si verifichi il rallentamento, i ricercatori utilizzano modelli che predicano il tasso di scarico della coda in relazione alla configurazione della zona di lavoro, come ad esempio il numero di corsie aperte e le condizioni di traffico. Questo tasso di scarico della coda viene poi riconvertito in un flusso pre-breakdown utilizzando un apposito rapporto di conversione.

Il tasso di scarico della coda è definito come il numero medio di veicoli che passano a valle del collo di bottiglia, misurato in un intervallo di 15 minuti, mentre la coda è

ancora presente a monte. La formula per calcolare questo tasso è espressa nell'equazione:

$$QDR_{wz} = 2093 - 154 \times LCSI - 194 \times f_{BR} - 179 \times f_{AT} + 9 \times f_{LAT} - 59 \times f_{DN}$$

Equazione A.9: Tasso di scarico di coda

In questa equazione, diversi fattori influenzano negativamente il tasso di scarico della coda nella zona di lavoro. Secondo la definizione fornite dall'HCM, i fattori sono:

- LCSI: l'indice di severità della chiusura delle corsie,
- f_{BR} : variabile indicatore per il tipo di barriera. Se il valore è 0, si riferisce a una barriera rigida o in cemento, mentre se è 1, si tratta di una separazione con coni, o delineatori.
- f_{AT} : variabile indicatore per il tipo di area. Se il valore è 0, l'area è urbana (caratterizzata da densità elevate di sviluppo e popolazione). Se il valore è 1, l'area è rurale (con sviluppo meno concentrato e densità di abitazioni e impieghi più basse).
- f_{LAT} : distanza laterale dalla corsia di marcia adiacente alla zona di lavoro fino alla barriera, ai delineatori o ai coni (questa misura è espressa in piedi, e può variare tra 0 e 12 piedi).

Per adattarsi meglio agli obiettivi di questo studio e al contesto italiano, mantenendo sempre un livello adeguato di sicurezza, l'equazione precedente è stata semplificata. In particolare, sono stati attribuiti i seguenti valori ai fattori:

- $f_{BR} = 1$: Questo studio si concentra sull'individuazione dei sistemi di delimitazione delle aree di cantiere più idonei, senza conoscere a priori se verranno utilizzati coni o barriere in cemento. Ponendo il valore di f_{BR} pari a 1, otteniamo una stima della capacità inferiore, il che ci pone in una condizione a favore di sicurezza. Anche nel caso in cui venissero installate barriere rigide, il livello di servizio non peggiorerebbe.
- $f_{At} = 1$: Il valore di f_{At} è stato fissato a 1 per adattarsi al contesto italiano, dove le autostrade sono generalmente considerate come strade in aree rurali.

- $f_{DN} = 1$: Questo parametro assume il valore 1 poiché il nostro studio riguarda cantieri fissi, che rimangono in loco sia di giorno che di notte. In questo caso, come per i precedenti fattori, fissare f_{DN} a 1 ci permette di assicurarci che la valutazione resti in una condizione di sicurezza.

L'equazione finale dunque diventa:

$$QDR_{wz} = 1661 - 154 \cdot LCSI + 9 f_{LAT}^4$$

Equazione A.10: Equazione del tasso di scarico di coda adattata al contesto italiano

Per ottenere la capacità pre-breakdown (ovvero il flusso massimo possibile prima che si formi una coda), si parte dal tasso di scarico della coda e lo si aggiusta con un fattore di correzione, come mostrato nell'Equazione seguente. La capacità pre-breakdown c_{wz} si calcola moltiplicando il tasso di scarico della coda per un fattore che tiene conto della perdita di capacità dovuta alla coda:

$$c_{wz} = \frac{QDR_{wz}}{100 - \alpha_{wz}} \times 100$$

Equazione A.11: Capacità prima che si formi la congestione

dove:

- c_{wz} è la capacità pre-breakdown della zona di lavoro (il massimo flusso prima della formazione della coda),
- α_{wz} è la percentuale di perdita di capacità causata dalla coda,
- QDR_{wz} è il tasso di scarico della coda.

Studi hanno stimato che la perdita di capacità α_{wz} è mediamente del 13,4% nelle zone di lavoro autostradali, rispetto a circa il 7% su tratti senza lavori. In assenza di dati locali, questi valori possono essere utilizzati come riferimento.

⁴ f_{Lat} è espresso in piedi (ft)

Infine, la capacità calcolata della zona di lavoro non può superare la capacità della strada in condizioni normali. Pertanto, se necessario, il risultato dell'Equazione 10-9 deve essere limitato.

Velocità di flusso libero per le zone di lavoro

Un modello per calcolare la velocità di flusso libero (FFS) nelle zone di lavoro è stato sviluppato ed è riassunto nell'equazione seguente:

$$FFS_{wz} = 9,95 + 33,49 \times f_{Sr} + 0,53 \times SL_{wz} - 5,60 \times LCSI - 3,84 \times f_{Br} \\ - 1,71 \times f_{Dn} - 8,7 \times TRD$$

Equazione A.12: Calcolo della velocità di flusso libero nel cantiere

Secondo quanto definito nell'Highway Capacity Manual (HCM):

- FFS_{wz} : rappresenta la velocità di flusso libero nella zona di lavoro, espressa in miglia orarie (mi/h).
- f_{Sr} : indica il rapporto tra il limite di velocità del tratto di strada precedentemente alla zona di lavoro e quello imposto all'interno della zona di lavoro, espresso come numero decimale. È importante notare che il rapporto di velocità f_{Sr} deve essere compreso all'interno dell'intervallo 1 e 1.2; in caso contrario, è necessario limitarlo a tali valori.
- SL_{wz} : rappresenta il limite di velocità all'interno della zona di lavoro, espresso in miglia orarie (mi/h).
- TRD : indica la densità totale delle rampe lungo il tratto stradale, calcolata come il numero di rampe per miglio. Nel caso di analisi di segmenti isolati, le rampe devono essere conteggiate fino a 3 miglia prima e 3 miglia dopo il centro della zona di lavoro.

La FFS nella zona di lavoro diminuisce con l'aumento dell'LCSI, quando vengono utilizzate barriere morbide, di notte e con l'aumento della densità delle rampe. Inoltre, un rapporto di velocità più alto porta a una maggiore FFS nella zona di lavoro. La FFS

calcolata per la zona di lavoro non deve superare la FFS del tratto autostradale senza lavori.

Adattando l'equazione al contesto italiano, si stabilisce quanto segue:

A f_{Br} e f_{Dn} sono posti uguali a 1, come discusso in precedenza.

A f_{Sr} assume un valore fisso di 1,2. Questa scelta è motivata dal fatto che sulle autostrade italiane il limite minimo di velocità in condizioni standard è di 90 km/h, mentre nelle aree di cantiere viene ridotto a 60 km/h. Questo rapporto di velocità risulta quindi sempre superiore a 1,2, e si adotta pertanto tale valore come limite finale per f_{Sr} .

L'equazione aggiornata risulta quindi:

$$VFL_{wz} = 44,608 + 0,53 \cdot SL_{wz}^5 - 5,60 LCSI - 8,7 TRD$$

Equazione A.13: Velocità di flusso libero nell'area di cantiere adattata al contesto italiano

Modello Velocità-Flusso della Zona di Lavoro

I cambiamenti nella capacità pre-breakdown e nella FFS della zona di lavoro influenzano la forma complessiva del modello velocità-flusso nei segmenti autostradali interessati dai lavori.

Avendo a questo punto calcolato la VFL e la capacità nelle zone di lavoro è possibile andando a confrontarli rispettivamente con la velocità di flusso libero calcolata nello step 1 prima del cantiere e la capacità base c del tronco autostradale prima del cantiere si ottengono i due coefficienti riduttivi SAF E CAF:

$$CAF_{wz} = \frac{c_{wz}}{c}$$

Equazione A.14: Calcolo del coefficiente riduttivo per la capacità

⁵ SL_{wz} è espresso in mi/h

$$SAF_{wz} = \frac{VFL_{ws}}{VFL}$$

Equazione A.15: Calcolo del coefficiente riduttivo per la velocità

Step 3 Ricalcolo del LOS durante il cantiere applicando i coefficienti di aggiustamento

A questo punto, si ripercorre l'intero processo dello step 1, correggendo i valori della capacità e della velocità utilizzando i due coefficienti appena calcolati, applicando il tutto alle specifiche condizioni di cantiere. In sintesi:

- La portata viene calcolata con la formula:

$$Q_{VPH} = TGM \cdot K \cdot D \quad [veic/h]$$

Equazione A.16: Calcolo volume orario di progetto

Questo valore rimane invariato.

- **Velocità di Flusso Libero (VFL):**

La velocità di flusso libero VFL viene corretta tenendo conto di eventuali variazioni nella larghezza delle corsie o nella distanza dagli ostacoli laterali, applicando i coefficienti f_c , f_b , e f_s come da tabelle precedenti.

$$VFL = BVFL - f_c - f_b - f_s \quad [km/h]$$

Equazione A.17: Calcolo della velocità di flusso libero

Successivamente, si applica il fattore di correzione SAF con la formula:

$$VFL_{adj} = VFL \cdot SAF \quad [km/h]$$

Equazione A.18: Valore della velocità di flusso libero corretto

- **Calcolo della Capacità (C):**

La capacità iniziale si calcola con:

$$C = 1800 + 5 \cdot VFL \quad [vett/h/corsia]$$

Equazione A.19: Calcolo della capacità

Successivamente, questo valore viene corretto applicando il coefficiente CAF con la formula:

$$C_{adj} = C \times CAF \quad [vett/h/corsia]$$

Equazione A.20: Valore della capacità corretto

- **Calcolo del Tasso di Flusso (Q):**

Il tasso di flusso Q viene ricalcolato tenendo conto del numero effettivo di corsie aperte. Il numero N di corsie è l'unico parametro che può variare rispetto allo step 1, in base alla configurazione del cantiere. Nel caso in cui il layout preveda la chiusura totale della carreggiata e lo scambio di corsie nella carreggiata opposta, N corrisponderà al numero di corsie aperte nella direzione presa in esame. La formula per calcolare Q è:

$$Q = \frac{Q_{VPH}}{N \cdot phf \cdot f_{HV} \cdot f_p} \quad [autovett/h / corsia]$$

Equazione A.21: Calcolo del tasso di flusso

- **Determinazione del Livello di Servizio (D):**

Il livello di servizio si determina con la formula:

$$D = \frac{Q}{\bar{V}} \quad [autovett/km/corsia]$$

Equazione A.22: Calcolo della densità

Calcolando la portata Q* come $Q^* = 3100 - 15 VFL$ risulta:

$$\begin{cases} \bar{V} = VFL_{adj} & \text{se } Q < Q^* \\ \bar{V} = VFL_{adj} - \left[\frac{1}{28} (23 \cdot VFL_{adj} - 1800) \cdot \left(\frac{Q + 15 VFL_{adj} - 3100}{20 VFL_{adj} - 1300} \right)^{2,6} \right] & \text{se } Q > Q^* \end{cases}$$

Equazione A.23: Calcolo della velocità media in condizioni di cantiere

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1: Global road safety performance targets	14
Figura 1.2: I cinque pilastri della sicurezza stradale dell'ONU	18
Figura 1.3: incidenti stradali con lesioni a persone, morti e feriti. Anno 2010-2023 e target 2030, valori assoluti.....	19
Figura 1.4: Numero di vittime diviso per categorie.....	22
Figura 1.5: Numero incidenti nei cantieri stradali per tipologia di strada	23
Figura 1.6: Statistiche incidenti stradali nei cantieri in Francia nel 2023, 2022 e 2021.....	25
Figura 2.1: Area di cantiere	31
Figura 2.2: Distribuzione degli incidenti nelle cinque zone dei cantieri autostradali..	32
Figura 2.3: Numero di incidenti (a) e tasso di incidentalità (b) nelle diverse aree di cantiere.....	34
Figura 2.4: Distribuzione della tipologia di incidenti in autostrada	35
Figura 2.5: Barriera normale	39
Figura 2.6: Barriere di direzione.....	39
Figura 2.7: Paletti di delimitazione.....	40
Figura 2.8: Coni stradali.....	40
Figura 2.9: Delineatori flessibili.....	41
Figura 2.10: Tipologie di strisce longitudinali	42
Figura 2.11: Schema cantiere inferiore a 2 giorni	44
Figura 2.12: Schema cantiere tra 3 e 7 giorni	45
Figura 2.13: Schema cantiere durata maggiore 7 giorni.....	46
Figura 2.14: Esempi barriere composite	49
Figura 2.15: Livelli di contenimento e corrispondenti crash test	50
Figura 2.16: Schemi per la misura dei parametri geometrici D_m , W_m , V_m	52
Figura 2.17: Barriera tipo "New Jersey"	53

Figura 2.18: New Jersey con particolari delle testate maschio-femmina.....	54
Figura 2.19: Travi scatolari irrigidite.....	56
Figura 2.20: Ancoraggi pinnati e bullonati	57
Figura 2.21: Nuova barriera temporanea in classe T3	59
Figura 2.22: Dispositivo DELTABLOC DB50SL.....	60
Figura 2.23: Sistema Road Zipper per l'installazione di barriere temporanee.....	61
Figura 3.1: Esempio matrice per la valutazione dei rischi.....	69
Figura 3.2: Step del metodo predittivo per le autostrade	75
Figura 4.1: CMF stimati per le diverse configurazioni di cantiere	89
Figura 4.2: Frequenza media attesa di incidenti all'aumentare della durata della zona di lavoro.....	93
Figura 4.3: Frequenza media attesa di incidenti all'aumentare della lunghezza della zona di lavoro	94
Figura 4.4: Frequenza media attesa di incidenti all'aumentare del traffico nella zona di lavoro	95
Figura 4.5: CMF relativi alle riduzioni del limite di velocità	97
Figura 4.6: Variazione del tasso di incidentalità in funzione del raggio di curvatura	100
Figura 4.7: Misura del raggio e della lunghezza della curva	102
Figura 4.8: Relazione tra la larghezza media della corsia e il CMF	103
Figura 4.9: Valori del CMF al variare del PCI.....	106
Figura 4.10: Indici RAIR per incidenti autonomi e incidenti tra due veicoli	108
Figura 4.11: Valori dei CMF in caso di pioggia moderata e torrenziale.....	109
Figura 5.1: Effetto dell'abitudine sul numero di incidenti nei cantieri in autostrada	123
Figura 5.2: Esempio di cantiere delimitato da New Jersey	125
Figura 5.3: Copertura nuvolosa media (serie temporali) 1961-1990.....	131
Figura 5.4: Frequenza annua del gelo nel territorio italiano (Atlante tematico d'Italia, Touring Club Italiano, 1989).....	131
Figura 5.5: Carta della Temperatura media annua in Italia calcolata sul periodo 1951-2019, a cura di ISPRA	132

Figura 5.6: Carta delle precipitazioni medie in Italia, calcolate sul periodo 1951-2019 e a cura di ISPRA	132
Figura 5.7: Distribuzione uniforme dei valori dell'indice di esposizione	134
Figura 5.8: Esempio layout Cross 2.....	139
Figura 6.1: Esempio schema segnaletico con rallentatori di velocità.....	144
Figura 6.2: Messaggi adoperati nelle autostrade italiane	146
Figura 6.3: Esempio schema segnaletico con PMV e rilevatore di velocità	147
Figura 6.4: Box autovelox mobile per cantieri a sinistra, cartello dissuasore con rilevatore radar di velocità a destra	149
Figura 6.5: Schemi segnaletici con veicolo della polizia	150
Figura 6.6: limite di velocità portatile variabile	151
Figura 6.7: Rappresentazione della lunghezza di buffer, SSD e L'.....	152
Figura 6.8: Percentuale di traffico nella corsia chiusa (305 m a monte del cantiere)	154
Figura 6.9: Esempio testata di chiusura di una corsia con l'uso di lampade sequenziali a led	155
Figura 6.10: Esempio piano di utilizzo di un sistema QWS	157
Figura 6.11: Componenti del sistema WAS.....	159
Figura 6.12: Sistema SonoBlaster.....	159
Figura 6.13: Le due aree di rilevamento.....	160
Figura A.1: Tratti base di una autostrada.....	165
Figura A.2: Andamento delle velocità in funzione del tasso di flusso.....	170

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1: Segnaletica temporanea	38
Tabella 2.2: Lunghezza tratti e intervalli per linee longitudinali discontinue.....	42
Tabella 2.3: valori medi dei parametri ottenuti da crash test standardizzati.....	57
Tabella 3.1: Descrizione delle classi di probabilità di accadimento	68
Tabella 3.2: Descrizione delle classi di entità del danno.....	68
Tabella 4.1: Tipologia di incidenti nelle zone di lavoro (NYSDOT Database)	82
Tabella 4.2: Tipologia di oggetti colpiti durante le intrusioni nelle aree di lavoro	82
Tabella 4.3: Gravità degli incidenti di intrusione	83
Tabella 4.4: Percentuale di incidenti di intrusione classificati per tipologia di strada e momento della giornata.....	83
Tabella 4.5: Percentuale di intrusioni classificate in base alla tipologia di strada e al primo oggetto colpito	84
Tabella 4.6: Diverse configurazioni di cantiere per carreggiata a due corsie	87
Tabella 4.7: Configurazioni di cantiere per carreggiata a tre corsie	88
Tabella 4.8: Descrizione dei 5 modelli presi in esame	91
Tabella 4.9: Tasso di incidenti nei 5 modelli al variare del ADT, durata e lunghezza cantiere.....	91
Tabella 4.10: Aumento percentuale dei tassi di incidenti rispetto alla riduzione del limite di velocità.....	96
Tabella 4.11: Percentuale incidenti in curva per Regione in funzione della morfologia del territorio	99
Tabella 4.12: Coefficienti per gli incidenti sulle autostrade.....	101
Tabella 4.13: Riepilogo dei fattori di rischio nell'interazione tra cantiere e viabilità autostradale	111
Tabella 5.1: Riassunto tabellare di valori ottenuti dai CMF	115
Tabella 5.2: Valori dei coefficienti di ponderazione ottenuti tramite normalizzazione del range di variazione dei CMF	116

Tabella 5.3: Valori del coefficiente di rischio intrusione per le diverse configurazioni di cantiere (carreggiata a due corsie).....	119
Tabella 5.4: Valori del coefficiente di rischio intrusione per le diverse configurazioni di cantiere (carreggiata a tre corsie).....	122
Tabella 5.5: Coefficienti di rischio intrusione relativi al traffico	127
Tabella 5.6: Valori dei coefficienti di rischio intrusione per curva destrorsa in carreggiata a due corsie.....	129
Tabella 5.7: Valori dei coefficienti di rischio intrusione per curva sinistrorsa in carreggiata a due corsie.....	129
Tabella 5.8: Valori dei coefficienti di rischio intrusione per curva destrorsa in carreggiata a tre corsie	130
Tabella 5.9: Valori dei coefficienti di rischio intrusione per curva sinistrorsa in carreggiata a tre corsie	130
Tabella 5.10: Valori dei coefficienti $C_{\text{pavimentazione}}$ basati sull'invecchiamento della pavimentazione e sulle condizioni metereologiche.....	133
Tabella A.1: Fattori di correzione per la larghezza corsia.....	167
Tabella A.2: Fattori di correzione per la distanza dagli ostacoli laterali.....	167
Tabella A.3: Fattori di correzione per la presenza di svincoli	168
Tabella A.4: Classificazione della morfologia del terreno in funzione della lunghezza della tratta e della pendenza.....	169
Tabella A.5: Valori del coefficiente E_t	169
Tabella A.6: Possibili valori di LCSI nei cantieri autostradali in Italia	172

INDICE DELLE EQUAZIONI

Equazione 2.1: Tasso di incidentalità per sezione di cantiere	33
Equazione 2.2: Livello di contenimento di una barriera	49
Equazione 3.1: Equazione del rischio	67
Equazione 3.2: Frequenza media di incidenti prevista in un anno in un sito specifico	76
Equazione 3.3: Crash Modification Factor	77
Equazione 3.4: Frequenza media attesa di incidentalità	78
Equazione 3.5: Coefficiente di ponderazione	78
Equazione 4.1: Tasso dell'incidentalità totale	90
Equazione 4.2: AMF relativo alla durata del cantiere	92
Equazione 4.3: AMF relativo alla lunghezza del cantiere	93
Equazione 4.4: AMF relativo al TGM	94
Equazione 4.5: Fattore di modifica per gli incidenti in curva in un segmento autostradale	101
Equazione 4.6: Fattore di modifica degli incidenti per la larghezza della corsia in autostrada	102
Equazione 4.7: Equazione del Present Serviceability Index	105
Equazione 4.8: Calcolo del CMF al variare del PSI	106
Equazione 5.1: Equazione dell'indice di esposizione al rischio intrusione in forma generale	113
Equazione 5.2: Equazione per il calcolo dell'indice di esposizione al rischio intrusione con i coefficienti di ponderazione esplicitati	116
Equazione 5.3: Equazione per il calcolo dell'indice di esposizione al rischio intrusione con i coefficienti di ponderazione esplicitati	139
Equazione 5.4: Calcolo dell'indice di esposizione relativo al caso studio	140
Equazione 6.1: Relazione per il calcolo della stopping side distance	153
Equazione A.1: Calcolo volume orario di progetto	166

Equazione A.2: Calcolo della velocità di flusso libero	167
Equazione A.3: Calcolo della capacità	168
Equazione A.4: Calcolo del tasso di flusso	168
Equazione A.5: Calcolo per il coefficiente collegato ai mezzi pesanti	169
Equazione A.6: Calcolo della densità	170
Equazione A.7: Calcolo della velocità media	170
Equazione A.8: Indice di severità della chiusura delle corsie	171
Equazione A.9: Tasso di scarico di coda	173
Equazione A.10: Equazione del tasso di scarico di coda adattata al contesto italiano	174
Equazione A.11: Capacità prima che si formi la congestione	174
Equazione A.12: Calcolo della velocità di flusso libero nel cantiere	175
Equazione A.13: Velocità di flusso libero nell'area di cantiere adattata al contesto italiano	176
Equazione A.14: Calcolo del coefficiente riduttivo per la capacità	176
Equazione A.15: Calcolo del coefficiente riduttivo per la velocità	177
Equazione A.16: Calcolo volume orario di progetto	177
Equazione A.17: Calcolo della velocità di flusso libero	177
Equazione A.18: Valore della velocità di flusso libero corretto	177
Equazione A.19: Calcolo della capacità	178
Equazione A.20: Valore della capacità corretto	178
Equazione A.21: Calcolo del tasso di flusso	178
Equazione A.22: Calcolo della densità	178
Equazione A.23: Calcolo della velocità media in condizioni di cantiere	178

RIFERIMENTI

- [1] Istituto Superiore di Sanità (ISS), «Incidenti stradali - Informazioni generali,» [Online]. Available: <https://www.epicentro.iss.it/stradale/>.
- [2] Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile (ASVIS), «L'Agenda 2030 dell'Onu per lo sviluppo sostenibile,» [Online]. Available: <https://asvis.it/l-agenda-2030-dell-onu-per-lo-sviluppo-sostenibile/>.
- [3] Ministero della mobilità e della mobilità sostenibili (Delibera CIPRESS n. 13), «Piano Nazionale Sicurezza Stradale 2030,» 14 Aprile 2022. [Online]. Available: https://mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/progetti/2022-09/20220916_Piano%20Nazionale%20Sicurezza%20Stradale_Def.pdf.
- [4] Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), «Global Plan: decade of action for road safety 2021-2030,» 2021.
- [5] Commissione Europea, «L'EUROPA IN MOVIMENTO: Una mobilità sostenibile per l'Europa: sicura, interconnessa e pulita,» Bruxelles, 2018.
- [6] Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), «INCIDENTI STRADALI Anno 2023,» 25 Luglio 2024. [Online]. Available: <https://www.istat.it/wp-content/uploads/2024/07/REPORT-INCIDENTI-STRADALI-2023.pdf>.
- [7] Federal Highway Administration, «FHWA Work Zone Facts and Statistics,» 10 Aprile 2024. [Online]. Available: https://ops.fhwa.dot.gov/wz/resources/facts_stats.htm#ftnref8.
- [8] Gobierno de España, Ministerio del Interior, «La Dirección General de Tráfico y la Dirección General de Carreteras presentan los conos conectados para obras,» 24 Ottobre 2022. [Online]. Available: <https://www.interior.gob.es/opencms/eu/detalle/articulo/La-Direccion-General-de-Trafico-y-la-Direccion-General-de-Carreteras-presentan-los-conos-conectados-para-obras/>.

- [9] Statista, «Anzahl der Unfälle in Baustellenbereichen auf deutschen Autobahnen in den Jahren 2000 bis 2021,» 5 Luglio 2024. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/155376/umfrage/unfaelle-in-baustellenbereichen-auf-autobahnen/>. [Consultato il giorno 4 Ottobre 2024].
- [10] Le site de la sécurité du personnel autoroutier, «Accidents des personnels en intervention,» Luglio 2024. [Online]. Available: [https://www.personnel-autoroutes.fr/fr/les-chiffres/le-bilan-des-accidents.htm#:~:text=Accidents%20des%20personnels%20en%20intervention&text=En%202023%2C%20144%20accidents%20\(169,r%C3%A9seau%20autoroutier%20ont%20%C3%A9t%C3%A9%20tu%C3%A9s.](https://www.personnel-autoroutes.fr/fr/les-chiffres/le-bilan-des-accidents.htm#:~:text=Accidents%20des%20personnels%20en%20intervention&text=En%202023%2C%20144%20accidents%20(169,r%C3%A9seau%20autoroutier%20ont%20%C3%A9t%C3%A9%20tu%C3%A9s.)
- [11] (ASAPS), Associazione Sostenitori ed Amici della Polizia Stradale, «Osservatorio ASAPS sugli incidenti nei cantieri stradali 2022,» 15 Marzo 2023. [Online]. Available: https://www.asaps.it/76859-_osservatorio_asaps_sugli_incidenti_nei_cantieri_stradali_2022_104_episodi_che_h.html.
- [12] (ASAPS), Associazione Sostenitori ed Amici della Polizia Stradale, «Osservatorio ASAPS sugli incidenti nei cantieri stradali 2023,» 17 Settembre 2024. [Online]. Available: [https://www.asaps.it/80282-Osservatorio_ASAPS_sugli_incidenti_nei_cantieri_stradali_2023110_episodi_che_hanno_causato_29_vittime_\(11_erano_operai_o_cantonieri_che_lavoravano_nel_cantiere\)_e_176_feriti50_sinistri_sono_avv.html](https://www.asaps.it/80282-Osservatorio_ASAPS_sugli_incidenti_nei_cantieri_stradali_2023110_episodi_che_hanno_causato_29_vittime_(11_erano_operai_o_cantonieri_che_lavoravano_nel_cantiere)_e_176_feriti50_sinistri_sono_avv.html).
- [13] ASAPS Associazione sostenitori e amici della polizia stradale, «Database incidenti nei cantieri 2023-2024 (Database non pubblicato. Ricevuto tramite comunicazione privata),» 2024.
- [14] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, «D.M. 10 Luglio 2002,» Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2022.
- [15] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Manual on Uniform Traffic Control Devices, Washington D.C., 2003.
- [16] M. Z. Nicholas J. Garber, Distribution and Characteristics of Crashes at Different Locations within Work Zones in Virginia, 2001.

- [17] S. Hallmark, G. Basulto-Elias e N. Oneyear, «Work Zone Characteristics,» in *Evaluation of Work Zone Safety Using the SHRP2 Naturalistic Driving Study Data*, 2022, pp. 3-4.
- [18] Janice R. Daniel, Ozbay, Kaan e Chien, Steven, «Work Zone Safety Analysis,» 2013, pp. 59-60.
- [19] Ministero del lavoro e delle politiche sociali, «D.M. 19 gennaio 2019,» *Gazzetta Ufficiale*, 2019.
- [20] Fabris Securitas, «ISTRUZIONE PER L'ALLESTIMENTO DI CANTIERI SU STRADA E POSA SEGNALETICA».
- [21] Presidente della Repubblica, «Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada - D.P.R., 16/12/1992 n° 495 - Art. 34,» *Gazzetta Ufficiale*, 1992.
- [22] Presidente della Repubblica, «Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada - D.P.R., 16/12/1992 n° 495 - art. 138,» *Gazzetta Ufficiale*, 1992.
- [23] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, «D.M. 21 Giugno 2004 n.2367,» *Gazzetta Ufficiale*, 2004.
- [24] ANAS Gruppo FS Italiane, «I quaderni tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture - Volume VI Dispositivi di ritenuta stradale,» 2019.
- [25] F. Bontempi, A. Greco e P. Olmati, «Aspetti delle caratteristiche prestazionali di barriere stradali tipo New Jersey – Confronto tra tipologie diverse,» 2014.
- [26] S. Leonardi e G. Pappalardo, «Analisi critica delle caratteristiche prestazionali delle barriere di sicurezza,» 2000.
- [27] ABESCA. [Online]. Available: https://www.abesca.com/wp-content/uploads/2022/01/Brochure_ABESCA_ITA.pdf.

- [28] K. Lechtenberg, C. Fang e R. Faller, «Stiffening Guidance for Temporary Concrete Barrier Systems in Work Zone and Construction Situations,» 2022.
- [29] E. Burzi, «La nuova barriera temporanea di cantiere in classe “T3”,» *Strade e Autostrade*, 2022.
- [30] Vegvesen, «DELTABLOC® DB 50SL,» [Online]. Available: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/teknologi/vegutstyr/delta-bloc/db-50sl/db-50sl-product-data-sheet.pdf>.
- [31] F. Ravaldini, «Il Road Zipper: attivato sull’A26 il sistema Autostrade per l’Italia per ridisegnare i cantieri secondo il traffico stradale,» 30 Gennaio 2023. [Online]. Available: <https://www.mobilitafutura.eu/terra/auto/il-road-zipper-attivato-sulla26-il-sistema-autostrade-per-litalia-per-ridisegnare-i-cantieri-secondo-il-traffico-stradale/28114/>.
- [32] Ispettorato tecnico del lavoro, D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2008.
- [33] Soterikon, «D.lgs. 81/08 - Testo Unico sulla sicurezza,» [Online]. Available: <https://www.soterikon.it/sicurezza-sul-lavoro/normative/testo-unico-sulla-sicurezza/>. [Consultato il giorno 1 Ottobre 2024].
- [34] BibLus Informazione e approfondimento tecnico per i professionisti dell'edilizia, «Matrice di rischio, cos’è e a cosa serve,» 7 Settembre 2022. [Online]. Available: <https://biblus.acca.it/matrice-di-rischio-cose-e-a-cosa-serve/#:~:text=La%20matrice%20di%20rischio%2C%20detta,causare%20un%20danno%20ai%20lavoratori..> [Consultato il giorno 1 Ottobre 2024].
- [35] A. Lauria, «Sicurezza nei cantieri - D.Lgs. 81/08 - Titolo 1,» A.A 2021-2022.
- [36] M. Gelao, «POS e PSC: quali sono le differenze e quando servono,» 20 Luglio 2018. [Online]. Available: <https://www.studioessepi.it/magazine/sicurezza-sul-lavoro/pos-e-psc-differenze-e-quando-servono.> [Consultato il giorno 1 Ottobre 2024].
- [37] AASHTO, Highway Safety Manual, 2010.

- [38] AASHTO, Highway Safety Manual - Supplement 2014, 2014.
- [39] G. L. Ullman, . M. D. Finley e L. Thei, «Work zone intrusion countermeasure identification, assessment, and implementation guidelines,» 2010.
- [40] PRACT , «PRACT Predicting Road Accidents - a Transferable methodology across Europe,» 2015.
- [41] A. J. Khattak, A. J. Khattak e F. M. Council, «Effects of work zone presence on injury and non-injury crashes,» 2000.
- [42] F. Gallo, «La gestione della sicurezza nei cantieri stradali».
- [43] R. C. Lloyd e S. O. Kenneth, «Procedure for Determining Work Zone Speed Limits,» *NCHRP (National Cooperative Highway Program)*, p. 21, Settembre 1996.
- [44] R. Liu, «Strategies for Improving Safety at Horizontal Curves,» 2017.
- [45] Istituto Nazionale di Statistica, «ISTAT - Istituto Nazionale di Statistica,» [Online]. Available: <https://www.istat.it/>.
- [46] S. Othman, «Identifying Critical Road Geometry Parameters Affecting Crash Rate and Crash Type,» 2009.
- [47] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, «D.M. del 05 Novembre 2001,» *Gazzetta Ufficiale*, 2001.
- [48] G. R. Nuccio, «Cantieri autostradali in condizioni di scarsa visibilità: confronto tra le normative e proposte integrative,» 2023.
- [49] ANAS, «I quaderni tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture - Volume V,» 2019.

- [50] AASTHO, «Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials.» Washington, D.C, 1993.
- [51] Fiveable, «Pavement Condition Index (PCI),» [Online]. Available: <https://library.fiveable.me/key-terms/introduction-civil-engineering/pavement-condition-index-pci>. [Consultato il giorno 18 Ottobre 2024].
- [52] L. Zhang, Z. Huang, A. Kuang e J. Yu, «Estimation of Crash Modification Factors (CMFs) in Mountain Freeways: Considering Temporal Instability in Crash Data,» 2024.
- [53] Crash Modification Factors ClearingHouse, «Improve pavement distress from PSI of X to Y,» 2009. [Online]. Available: <https://cmfclearinghouse.fhwa.dot.gov/detail.php?facid=1986>. [Consultato il giorno 18 Ottobre 2024].
- [54] A. Ghasemzadeh e M. M. Ahmed, «Exploring factors contributing to injury severity at work zones considering adverse weather conditions,» 2018.
- [55] R. Harb, E. Radwan, X. Yan, A. Pande e M. Abdel-Aty, «Freeway Work-Zone Crash Analysis and Risk Identification Using Multiple and Conditional Logistic Regression,» 2008.
- [56] C. T. R. R. P. C. Safety, «IRIS Incursion Reduction to Increase Safety in road work zones,» 2019.
- [57] Transportation Research Board, «Highway Capacity Manual 7th Edition,» Washington, D.C., 2022.
- [58] CO.RI S.R.L, «Asfalto Drenante: Sai Davvero Come Funziona?,» 29 Aprile 2021. [Online]. Available: <https://cori-srl.com/asfalto-drenante/>. [Consultato il giorno 25 Ottobre 2024].
- [59] Wikipedia, «Clima italiano,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Clima_italiano&action=history. [Consultato il giorno 25 Ottobre 2024].

- [60] G. L. Ullman, M. D. Finley e L. Thei, «Work zone intrusion countermeasure identification, assessment and implementation guidelines,» 2010.
- [61] NCHRP RESEARCH REPORT 945, «Strategies for Work Zone Transportation Management Plans,» 2020.
- [62] M. d. I. e. d. Trasporti, «Codice della Strada art. 179 c. 3,» 1992 e successive modifiche.
- [63] NYSDOT Office of Traffic Safety and Mobility, «Variable Message Sign Guidelines,» 2018.
- [64] NYSDOT, «Portable Variable Message Signs (PVMS),» [Online]. Available: https://www.dot.ny.gov/divisions/operating/oom/transportation-systems/safety-program-technical-operations/work-zone-control/repository/Portable_Variable_Message_Signs_PVMS.pdf.
- [65] Codice della strada, «Art. 126. Regolamento di Attuazione Posizionamento dei segnali di indicazione».
- [66] Autostrade per l'Italia, «Manuale Operativo Disciplinare per l'installazione, conduzione e rimozione dei cantieri di lavoro sulla rete di Autostrade per l'Italia,» 2023.
- [67] Z. Xu e Q. Yang, «Novel fast safety assessment method for the buffer section of maintenance work zone,» 2019.
- [68] AASHTO, «Sequential Flashing Warning Lights,» [Online]. Available: tig.transportation.org.
- [69] M. D. Finley, G. L. Ullman e L. Conrad , «SEQUENTIAL WARNING LIGHT SYSTEM FOR WORK ZONE LANE CLOSURES,» 2001.
- [70] ASPI, «NUOVI STANDARD FINALIZZATI A MIGLIORARE LA SICUREZZA DEL TRAFFICO E DEGLI OPERATORI NEI CANTIERI DI LAVORO IN AUTOSTRADA,» 2007.

- [71] TAPCO Safe Travel, «Worker Alert System,» [Online]. Available: https://www.tapconet.com/product/worker-alert-system?srsltid=AfmBOoqDfxbiV3ZpjRsqiN8fM7_uWQb7idCRdd7Ia32MqfIPJNQLoUEn.
- [72] ELWC, «Sonoblaster – Work Zone Safety,» [Online]. Available: <https://www.elwc.com.au/sonoblaster-work-zone-safety/>.
- [73] HRS, «Intellicone Incursion Prevention & Warning».
- [74] L. Theiss, G. L. Ullman e T. Lindheimer, «CLOSED COURSE PERFORMANCE TESTING OF THE AWARE INTRUSION ALARM SYSTEM,» 2017.
- [75] T. Esposito e R. Mauro, «Fondamenti di infrastrutture viarie Vol. 2,» Hevelius Editori, 2003.