



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea

A.A. 2023/2024

Sessione di Laurea Ottobre 2024

**SICUREZZA NEI CANTIERI
AUTOSTRADALI**
**Analisi critica sui sistemi innovativi per la
riduzione del rischio di investimento**

Relatore:

Prof. Giuseppe Chiappinelli

Candidato:

Gabriele Stevenin

Correlatore:

Ing. Giorgia Rizzo

SOMMARIO

ABSTRACT	6
INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 1 - CANTIERE VS VIABILITA'	9
1.1 - INCIDENTALITA' - LA SITUAZIONE ITALIANA	10
1.1.1 - CONTESTO GENERALE.....	10
1.1.2 - INCIDENTI STRADALI CON COINVOLGIMENTO DI LAVORATORI SU CARREGGIATA (DATI INAIL).....	26
1.1.3 - INCIDENTI STRADALI AVVENUTI IN CORRISPONDENZA DI CANTIERI (OSSERVATORIO ASAPS).....	29
1.2 - NORME E REGOLAMENTI SULLA SICUREZZA NEI CANTIERI IN AMBITO AUTOSTRADE.....	38
1.3 - SEGNALETICA STRADALE TEMPORANEA	39
1.4 - TIPOLOGIE DI CANTIERI IN AMBITO AUTOSTRADE	41
1.4.1 - CANTIERI FISSI.....	43
1.4.2 - CANTIERI MOBILI	49
CAPITOLO 2 - RISCHI INTERFERENZIALI E DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO	53
2.1 - CASO STUDIO.....	53
2.1.1 - DESCRIZIONE DEL CONTESTO	53
2.1.2 - DINAMICA DELL'INCIDENTE	54
2.1.3 - VALUTAZIONI DEDUCIBILI DAI VERBALI E DAI DOCUMENTI DEL CSE	55
2.2 - ANALISI DELL'INCIDENTALITA' IN CORRISPONDENZA DEI CANTIERI E RELATIVE CAUSE	61
2.2.1 - FATTORI CHE INCREMENTANO IL RISCHIO INCIDENTE IN CORRISPONDENZA DI CANTIERI AUTOSTRADALI	61
2.2.2 - LA PERCEZIONE DEI CONDUCENTI SULLA PRESENZA DEI CANTIERI AUTOSTRADALI	68
2.3 - CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI	76

CAPITOLO 3 - CONFRONTO TRA NORMATIVE EUROPEE SUL TEMA DEL SEGNALAMENTO DEI CANTIERI	79
3.1 - LA NORMATIVA ITALIANA	79
3.2 - LA NORMATIVA TEDESCA	82
3.3 - LA NORMATIVA FRANCESE	87
3.4 - LA NORMATIVA INGLESE	96
3.5 - CONCLUSIONI	101
CAPITOLO 4 - SISTEMI INNOVATIVI DI PREVENZIONE (WZIA)	103
4.1 - DESCRIZIONE DEI DISPOSITIVI INNOVATIVI (WZIA)	108
4.1.1 - WORK ALERT SYSTEM	108
4.1.2 - SONOBLASTER	110
4.1.3 - INTELLICONE	112
4.1.4 - SINGLE SENTRY BEAM (PORTABLE LASER)	116
4.1.5 - AWARE	118
4.1.6 - GUARDIAN CONE	124
4.1.7 - ALPHA SAFENET PORTABLE OVERWATCH DEVICE	126
4.1.8 - WIRELESS SENSOR NETWORK (WZIA SPAGNOLO)	129
4.1.9 - CAMERA-BASED WORK ZONE INTRUSION DETECTION	133
4.2 - VALUTAZIONE DEI SISTEMI INNOVATIVI NEI TEST PILOTA E NEI CANTIERI REALI	134
4.2.1 - ANALISI DEI DISPOSITIVI DI SICUREZZA NEI TEST PILOTA	137
4.2.2 - TEST IN CANTIERI REALI (LIVE TESTING)	189
4.3 - CONCLUSIONI	226
CAPITOLO 5 - VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEI DISPOSITIVI INNOVATIVI NEL CONTESTO DEL CASO STUDIO	229
5.1 - ANALISI DEI DISPOSITIVI "NON IDONEI"	230
5.2 - ANALISI DEI DISPOSITIVI "IDONEI"	238

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

5.2.1 - VALUTAZIONE DEL TEMPO DI REAZIONE PER GARANTIRE LA SICUREZZA DEL ALVORATORE	249
5.3 - VALUTAZIONI FINALI	259
CONCLUSIONI	261
APPENDICE 1 - SISTEMA AWARE - CONFIGURAZIONI DI PROVA AGGIUNTIVE	263
INDICE DELLE FIGURE	267
INDICE DELLE TABELLE.....	277
INDICE DEI GRAFICI	281
INDICE DELLE EQUAZIONI	287
FONTI BIBLIOGRAFICHE E SITOGRAFICHE	289

ABSTRACT

Dato il crescente interesse in ambito europeo per l'innalzamento degli standard di sicurezza stradale, anche in Italia sono stati avviati degli studi interessanti su tale argomento. Un esempio è rappresentato dalla collaborazione sviluppatasi tra Tecne S.p.A. e il Politecnico di Torino, con l'obiettivo di migliorare la protezione dei lavoratori nei cantieri autostradali e ridurre il rischio di incidenti, soprattutto quelli mortali. Basando lo studio su un incidente avvenuto su una tratta autostradale italiana, è stata valutata l'efficacia delle procedure di sicurezza e delle normative vigenti. L'analisi ha approfondito gli incidenti che coinvolgono i lavoratori in prossimità dei cantieri, esaminando il quadro normativo e le misure di protezione delle aree di lavoro. Inoltre, è stato condotto uno studio comparativo sull'uso delle barriere temporanee, confrontando la normativa italiana con quella di altri Paesi europei. Un elemento chiave del lavoro è stata l'analisi dei dispositivi tecnologici innovativi per la prevenzione degli incidenti, noti come Work Zone Intrusion Alarms. L'analisi si è basata su report di test condotti in ambienti controllati e reali, fornendo dati sull'efficacia di tali dispositivi e sulle reazioni dei lavoratori al loro utilizzo. Il lavoro propone un approccio integrato che combina l'analisi normativa con l'adozione di tecnologie innovative per ridurre il rischio di incidenti e garantire maggiore sicurezza nei cantieri stradali.

Given the growing interest at the European level in raising road safety standards, Italy has also initiated significant studies on this subject. One example is the collaboration between Tecne S.p.A. and the Politecnico of Torino, aimed at improving the protection of highway construction workers and reducing the risk of accidents, especially fatal ones. Based on a study of an accident that occurred on an Italian highway, the effectiveness of safety procedures and current regulations was evaluated. The analysis focused on accidents involving workers near construction sites, examining the regulatory framework and protective measures for work areas. Additionally, a comparative study on the use of temporary barriers was conducted, comparing Italian regulations with those of other European countries. A key element of the research was the analysis of innovative technological devices for accident prevention, known as Work Zone Intrusion Alarms. The analysis relied on test reports conducted in both controlled and real environments, providing data on the effectiveness of these devices and workers' reactions to their use. The research proposes an integrated approach that combines regulatory analysis with the adoption of innovative technologies to reduce the risk of accidents and ensure greater safety in road construction zones.

INTRODUZIONE

L'impegno per migliorare la sicurezza stradale, presente tra gli obiettivi dall'Agenda 2030 della Comunità Europea, spinge l'Italia verso l'innalzamento degli standard di sicurezza attualmente presenti in ambito autostradale. Con questo obiettivo ha avuto origine la collaborazione tra Tecne S.p.A. e il Politecnico di Torino, che ha permesso lo sviluppo di questa tesi. Tecne S.p.A., attiva nella progettazione e gestione dei cantieri sulla rete autostradale italiana, ha richiesto uno studio approfondito sugli incidenti che si verificano in corrispondenza dei cantieri stradali su tratti autostradali, con l'obiettivo di individuare soluzioni per migliorare la sicurezza dei lavoratori e ridurre il rischio di incidenti. Questo approfondimento si è reso necessario per garantire il rispetto degli standard di sicurezza nei cantieri gestiti dall'azienda e per esplorare possibili miglioramenti delle attuali procedure di prevenzione e protezione.

Il lavoro ha preso avvio dall'analisi di un caso studio fornito da Tecne, relativo a un incidente mortale avvenuto su un tratto autostradale. Questo evento ha costituito il punto di partenza per i primi ragionamenti e ha stimolato l'analisi approfondita delle problematiche legate alla sicurezza nei cantieri stradali. Tuttavia, prima di affrontare nel dettaglio il caso studio, il primo capitolo è stato dedicato a un esame generale dell'incidentalità stradale in Italia, evidenziando la gravità del fenomeno. Successivamente, l'analisi si è focalizzata sugli incidenti che avvengono in prossimità dei cantieri, coinvolgendo sia i veicoli in transito, sia i lavoratori. Parallelamente è stata condotta un'analisi delle normative e dei regolamenti relativi alla segnaletica e alla sicurezza nei cantieri stradali, aspetto fondamentale per comprendere il quadro legislativo di riferimento e per valutare le procedure attualmente in vigore.

Nel secondo capitolo è stato analizzato nel dettaglio il caso studio fornito dalla Tecne, che ha incluso l'esame approfondito della documentazione disponibile e l'elaborazione di riflessioni e ragionamenti critici. È stata inoltre condotta un'analisi incrociata delle normative e dei regolamenti in materia di sicurezza e segnalamento nelle aree di cantiere, con l'obiettivo di identificare eventuali irregolarità o non conformità agli standard vigenti. Dall'analisi del caso studio è stato naturale chiedersi quali siano le cause alla base degli incidenti stradali nei cantieri: per rispondere a questa domanda è stata condotta un'indagine approfondita, basata su articoli scientifici e report specifici, al fine di ottenere una comprensione più ampia delle dinamiche e dei fattori che contribuiscono a tali incidenti.

Analizzando il caso studio e determinate le cause più comuni degli incidenti stradali nei cantieri, si è passati a individuare soluzioni concrete, come dispositivi o procedure, in grado di ridurre il rischio di

nuovi incidenti e incrementare la sicurezza dei lavoratori. A tal fine, il terzo capitolo è stato dedicato all'analisi delle normative italiane e di altri Paesi europei, quali Germania, Francia e Inghilterra, riguardanti l'uso di barriere temporanee, come le barriere New Jersey, per verificare eventuali obblighi di impiego e individuare similitudini e differenze tra le normative.

Nel quarto capitolo, invece, sono state esplorate soluzioni alternative alle barriere temporanee per migliorare la sicurezza nei cantieri. In particolare, sono stati analizzati dispositivi innovativi di rilevazione delle intrusioni di veicoli nelle aree di lavoro, noti come Work Zone Intrusion Alarms. A differenza delle barriere temporanee, che fungono da dispositivi di protezione attiva per i lavoratori, questi sistemi rappresentano una forma di prevenzione, progettati per segnalare tempestivamente la presenza di un pericolo imminente e consentire una risposta rapida da parte dei lavoratori.

La trattazione si conclude con il quinto capitolo, che presenta una riflessione critica sull'applicazione e l'efficacia dei dispositivi innovativi esaminati, valutando attentamente quali tra essi avrebbero potuto prevenire l'incidente descritto nel caso studio. Questa riflessione punta a fornire indicazioni concrete su come migliorare la sicurezza dei lavoratori in futuro, contribuendo a ridurre il rischio di incidenti gravi in corrispondenza di cantieri autostradali.

CAPITOLO 1 - CANTIERE VS VIABILITA'

Considerando gli obiettivi della Comunità Europea fissati dall'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, in particolare in materia di salute e benessere, emerge che il punto 3.6 è dedicato alla riduzione dei decessi e delle lesioni causati da incidenti stradali. Non potendo analizzare tutte le casistiche relative agli incidenti stradali, si è deciso di concentrare questa trattazione sulla valutazione del rischio incidente in presenza di cantieri, al fine di contribuire alla ricerca di soluzioni per innalzare gli standard di sicurezza sulla rete autostradale italiana, in quanto la gestione dei cantieri assume un ruolo cruciale, poiché, pur essendo necessari per il miglioramento delle infrastrutture, questi interventi possono creare situazioni che richiedono particolare attenzione. La loro presenza può infatti influire sugli standard di sicurezza, introducendo elementi imprevisti che generano insicurezza nei guidatori e costituiscono un potenziale pericolo per tutti gli utenti della strada. Allo stesso tempo, è fondamentale considerare i rischi a cui sono esposti gli operatori, costantemente vicini a veicoli in movimento. Per tutta questa serie di motivi è possibile affermare che la sicurezza nei cantieri stradali è una questione delicata e di fondamentale importanza, bisogna infatti non solo concentrarsi sulla sicurezza interna al cantiere, ma anche sull'interazione che quest'ultimo ha sulla viabilità ordinaria e sugli effetti che il traffico può avere su di essa. Come afferma l'"Istituto Superiore Di Sanità" (1), a causa dell'elevato tasso di incidentalità stradale che si registra in ogni Paese, con valori più o meno critici, i sinistri stradali rappresentano non soltanto un'emergenza dal punto di vista sociale e umano, ma anche da quello economico, per via degli elevati costi che ricadono sulla sanità pubblica. L'argomento riveste quindi un ruolo di enorme importanza per i dipartimenti di prevenzione e i sistemi sanitari di tutti i Paesi.

In questo capitolo è stata esaminata la situazione relativa all'incidentalità stradale in Italia analizzando con particolare riguardo quella relativa alla presenza di cantieri stradali. Successivamente, attraverso la normativa di riferimento, si è proceduto ad esaminare gli schemi segnaletici da adottare per la delimitazione delle aree di lavoro riportando le peculiarità e caratteristiche dei cantieri fissi e mobili, riferendosi nello specifico all'ambito autostradale. Tale esigenza è dovuta al fatto che nei successivi capitoli si analizzerà come caso studio un incidente avvenuto in un tronco autostradale a cui seguiranno una serie di riflessioni e commenti al riguardo.

1.1 - INCIDENTALITA' - LA SITUAZIONE ITALIANA

Nel seguente paragrafo si analizza la situazione relativa agli incidenti intercorsi negli ultimi anni lungo le strade italiane con il coinvolgimento di operatori e veicoli adoperati per gli interventi su carreggiata. Per fare ciò si è ritenuto utile fornire una visione complessiva del fenomeno, esponendo e commentando alcuni grafici sull'incidentalità stradale della nazione. Successivamente si entrerà nel dettaglio analizzando i dati forniti dall'INAIL¹ e dall'ASAPS² proprio in merito al caso specifico di sinistri che coinvolgono uno o più lavoratori.

Per introdurre l'argomento della trattazione si è scelto di prendere in considerazione un arco temporale che va dal 2013 al 2022. Questo perché i dati forniti dall'INAIL si riferiscono al periodo 2013-2020, mentre quelli che vanno dal 2020 al 2022 sono tratti dai reports dell'ASAPS.

1.1.1 - CONTESTO GENERALE

Per procedere all'analisi della situazione generale relativa all'incidentalità si sono ricercate, per il periodo di tempo selezionato, informazioni relative a tutti gli incidenti stradali verificatisi sulla rete stradale nazionale. La rilevazione di questi dati è condotta dall'Istat³ con la partecipazione dell'ACI⁴ e di numerosi Enti pubblici istituzionali. Le informazioni presentate sono tutte relative a incidenti, verbalizzati da un'autorità di Polizia o dai Carabinieri, che hanno avuto luogo su una strada aperta alla circolazione pubblica e che hanno causato lesioni a persone con il coinvolgimento di almeno un veicolo. Nei grafici a seguire, per esempio, verranno presentati il numero totale di incidenti stradali con lesioni alle persone, quelli che hanno generato dei feriti e quelli che hanno avuto effetti mortali.

¹ L'INAIL, Istituto Nazionale Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro, è un Ente pubblico non economico che gestisce l'assicurazione obbligatoria contro gli infortuni sul lavoro e le malattie professionali.

² ASAPS, Associazione Sostenitori ed Amici della Polizia Stradale, è un'associazione con oltre 13 mila soci che dal 1991 si impegna nella divulgazione e sensibilizzazione sul tema della Sicurezza Stradale.

³ L'Istat, Istituto Nazionale di Statistica, è un ente di ricerca pubblico. Nato nel 1926, è il principale produttore di statistica ufficiale a supporto dei cittadini e dei decisori pubblici.

⁴ L'ACI, Automobile Club d'Italia, è un Ente pubblico non economico a base associativa. È la Federazione nazionale che associa gli Automobile Club provinciali e locali che operano sul territorio nazionale. È anche Federazione nazionale per lo sport automobilistico e compie rilevanti servizi pubblici per conto dello Stato e di altre pubbliche amministrazioni.

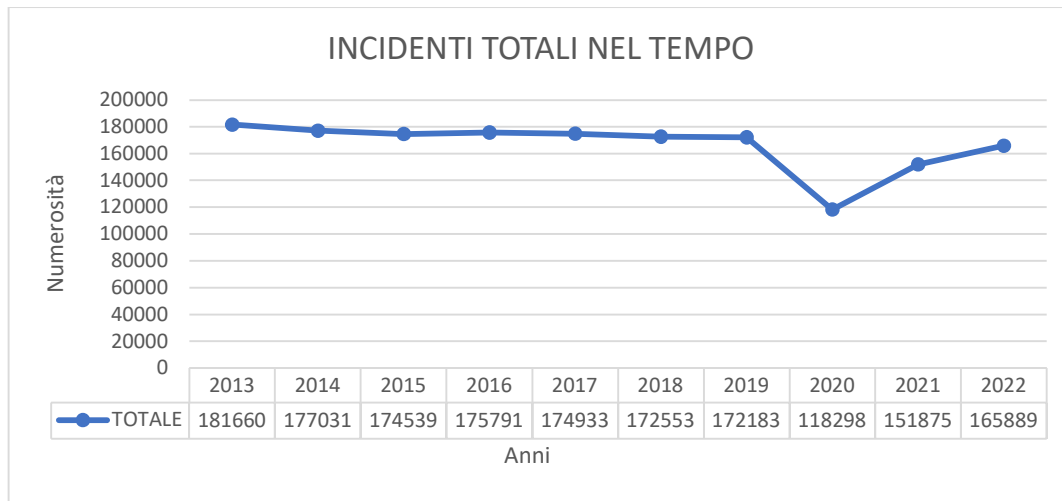


Grafico 1_Incidenti stradali totali in Italia

Osservando il grafico 1, riferito a dati scaricati dal portale ISTAT (2) e relativi agli incidenti stradali avvenuti nell'arco temporale che va dal 2013 al 2019, di anno in anno si percepisce una lieve riduzione del numero di sinistri e si può osservare che tra il 2019 e il 2020 è stato registrato un palese calo dell'incidentalità sulle strade italiane di cui non ci si deve stupire se si riflette sul fatto che il 2020 è stato l'anno segnato dalla pandemia di COVID-19 e dalle conseguenti limitazioni alla libera circolazione. Tali provvedimenti sono stati in parte applicati anche nell'anno successivo, ottenendo quindi anche per il 2021 un numero di sinistri inferiori alla media registrata nel periodo considerato. Tuttavia, con il superamento dell'emergenza sanitaria, il numero di incidenti è ricominciato a salire riavvicinandosi ai valori pre-pandemici. Va però rimarcato che nella finestra temporale presa in considerazione, già prima del 2020, si può notare una costante lieve diminuzione del numero di incidenti stradali che porta a presupporre una maggiore sensibilità nei confronti della sicurezza stradale. Per avere conferma di quanto appena ipotizzato si dovranno aspettare alcuni anni, per vedere se dopo la cesura rappresentata dagli anni caratterizzati dall'emergenza sanitaria, si ripresenterà il trend di riduzione.

Dal portale ISTAT (2) è stato possibile inoltre ricavare i dati relativi agli incidenti stradali totali osservando come questi ultimi si ripartiscano in base alla tipologia di strada, di cui la fonte presenta la distinzione in *autostrada*, *strada urbana* e *altra strada*. Per quest'ultima categoria non vengono fornite ulteriori informazioni, ma tutto lascia presupporre che in essa siano considerate tutte le altre tipologie di strade, ovvero strade extraurbane principali e secondarie, strade rurali, ecc.

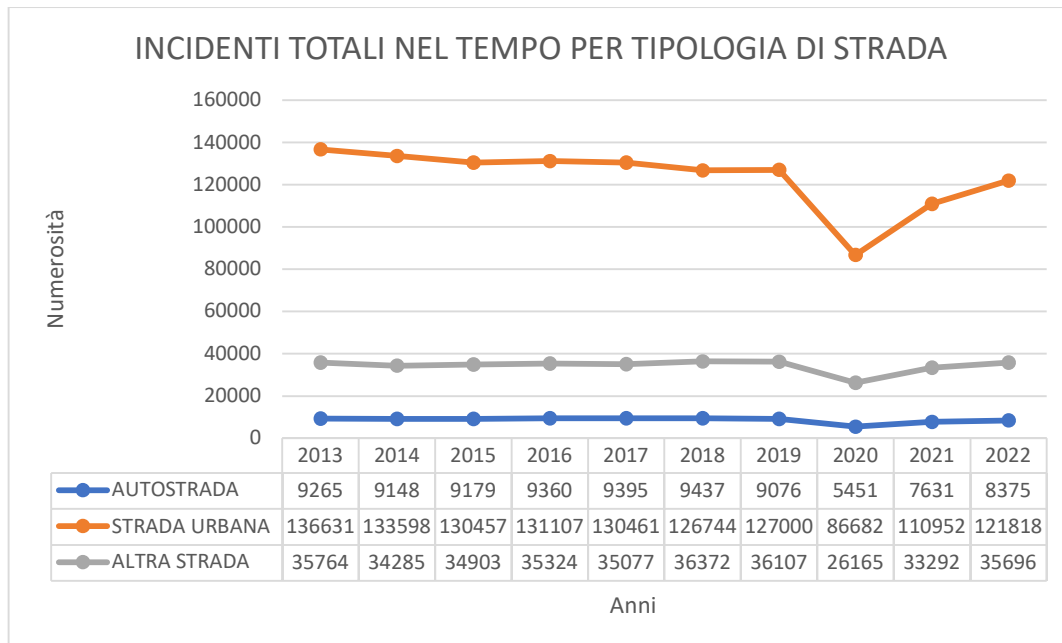


Grafico 2_Incidenti stradali totali per tipologia di strada

Dal grafico sopra riportato (grafico2) si osserva che il numero maggiore di incidenti stradali è registrato su strada urbana, pari al 75% rispetto al numero totale di sinistri mentre l’incidenza annuale per le autostrade è relativa al 5% e 20% per altre strade.

Il motivo principale per il quale in autostrada si è registrato un numero minore di incidenti nel periodo considerato rispetto alle altre strade è certamente ascrivibile alla sua minore estensione chilometrica. Consultando, infatti, un documento pubblicato dall’ACI e intitolato “Dotazione di Infrastrutture stradali sul territorio italiano” (3) si evince che le autostrade, con i loro 7143 Km, rappresentano solo il 4,63% della estesa chilometrica totale del patrimonio stradale italiano, che ammonta a ben 154166 Km (tabella 1). Tuttavia, è anche importante sottolineare che, per come è stata concepita e costruita, la rete autostradale italiana è, al netto dei comportamenti degli utenti, un luogo mediamente più sicuro delle altre tipologie di strade presenti sul territorio nazionale, grazie alla separazione del traffico, all’accesso limitato e regolamentato, al richiamo costante al rispetto dei limiti di velocità, alla regolare manutenzione e, ovviamente, ad una progettazione strutturale a regola d’arte.

Autostrade (Km)	Strade di interesse nazionale (Km)	Strade Regionali (Km)	Strade Provinciali (Km)	Strade da classificare (Km)	Estesa totale (Km)
7.143	20.423	7.971	111.514	7.115	154.166

Tabella 1_Estesa chilometrica infrastrutture italiane per tipologia di strada

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

Per supportare quanto sopra descritto, in mancanza di informazioni che permettano di suddividere in modo puntuale il numero di incidenti del grafico 2 sulle cinque tipologie di strade riportate in tabella 1, si sono raggruppate queste ultime in due sole categorie, "autostrade" e "altre strade" e prodotto una tabella che evidenzia il numero di incidenti per chilometro di infrastruttura (tabella 2) nelle diverse annate considerate.

ANNO	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
autostrade	1,30	1,28	1,28	1,31	1,32	1,32	1,27	0,76	1,07	1,17
strade urbane	1,17	1,14	1,12	1,13	1,13	1,11	1,11	0,77	0,98	1,07
altre strade										

Tabella 2_ Indicatore del numero di incidenti per chilometro di infrastruttura nei due insieme di strade considerati

Considerando la media dei valori riportati in tabella 2 si ottiene per le autostrade un valore di 1,21 incidenti/km, mentre per l'insieme di strade urbane e "altre strade" 1,07 incidenti/km.

Dai dati contenuti nel report ACI abbiamo che l'estesa chilometrica delle autostrade è di 7143 Km, mentre l'estesa chilometrica di tutte le altre strade segnalate è di 154166Km-7143Km=147023Km

Proseguendo nell'analisi dei due grafici precedenti (grafico 1, grafico 2) si è poi calcolato nel dettaglio il tasso di riduzione del numero di incidenti registrato tra gli anni 2019 – 2020 che, come già anticipato, è una conseguenza dello scoppio della pandemia per COVID-19. Nella sottostante tabella (tabella 3) si riportano i risultati:

calcolo tasso di riduzione tra gli anni 2019 e 2020			
PERIODO	2019	2020	tasso di riduzione
TOTALE	172183	118298	-31,30%
AUTOSTRADA	9076	5451	-39,94%
STRADA URBANA	127000	86682	-31,75%
ALTRA STRADA	36107	26165	-27,53%

Tabella 3_ Tasso di riduzione relativo alle annate 2019-2020

Anche in questo caso si osserva per le autostrade il valore minore comprensibile se si considera che, a causa delle limitazioni di spostamenti e il divieto di sconfinamento in regioni diverse da quella di residenza imposti in quel periodo, le autostrade, proprio perché nate e usate per trasferimenti sulle lunghe distanze, hanno visto ridurre maggiormente la propria utenza e di conseguenza registrato il tasso di riduzione maggiore.

L'analisi dei dati continua con la presentazione di due grafici, il primo relativo al numero totale di incidenti mortali (grafico 3), mentre il secondo riporta il numero di incidenti mortali per tipologia di strada (grafico 4).

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

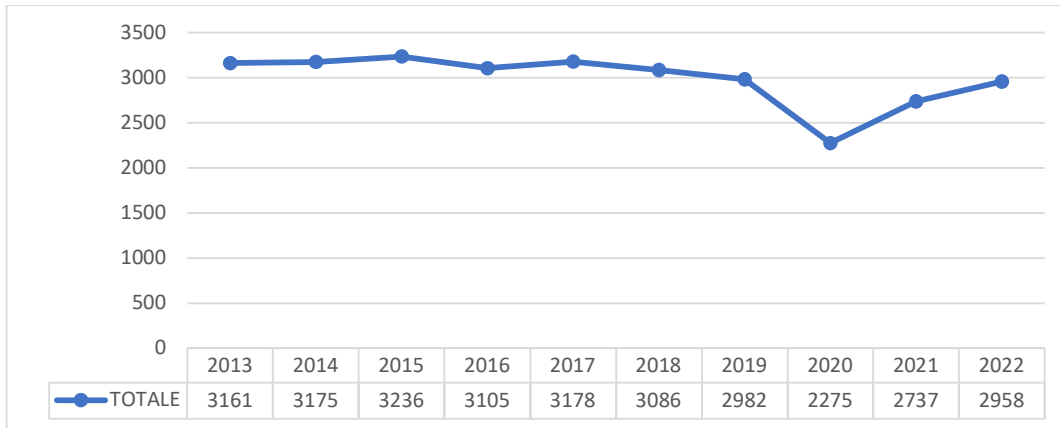


Grafico 3_Incidenti stradali mortali

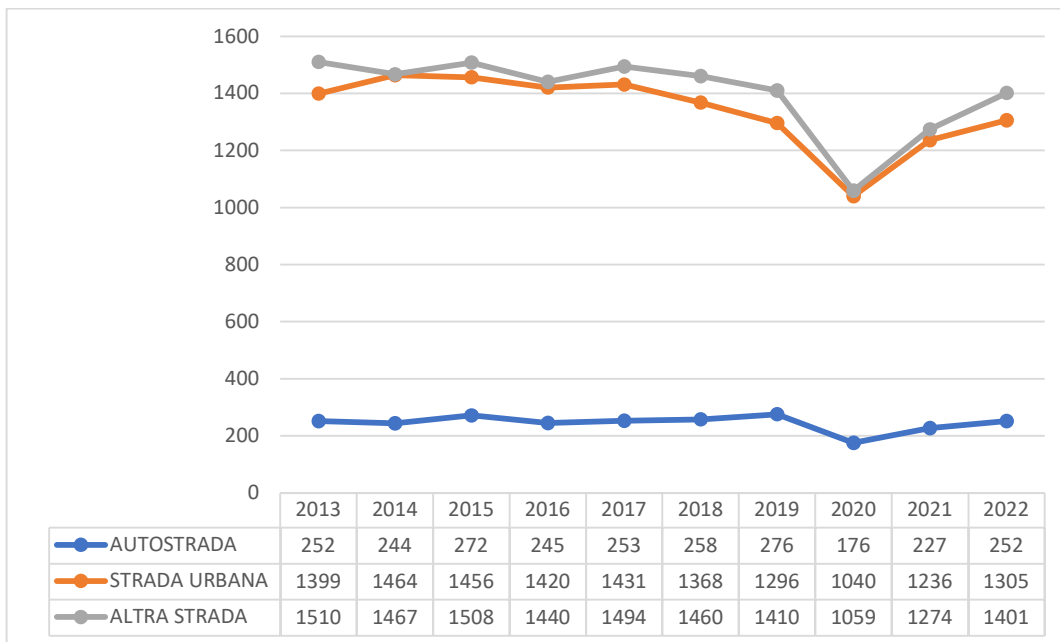


Grafico 4_Incidenti stradali mortali per tipologia di strada

Osservando i grafici 3 e 4 appena proposti è possibile notare come gli andamenti degli incidenti negli anni siano del tutto simili a quelli presentati in precedenza (grafico 1 e grafico2) da cui è possibile trarre le stesse conclusioni sopra riportate. Anche in questo caso si è voluto calcolare il tasso di riduzione tra gli anni 2019 e 2020 (tabella 4).

calcolo tasso di riduzione incidenti mortali negli anni 2019-2020			
PERIODO	2019	2020	tasso di riduzione
TOTALE	2982	2275	-23,71%
AUTOSTRADA	276	176	-36,23%
STRADA URBANA	1296	1040	-19,75%
ALTRA STRADA	1410	1059	-24,89%

Tabella 4_Tasso di riduzione relativo alle annate 2019-2020

Continuando l'analisi sui dati relativi all'incidentalità in Italia, a seguire vengono proposti quattro grafici in cui si riprendono le informazioni relative al numero totale di sinistri (grafico 5) e la loro distribuzione per categoria di strada (grafico 6, 7, 8), con l'obiettivo di mettere in evidenza anche la ripartizione degli stessi nelle tipologie osservate dall'ISTAT nella sua banca dati (2). Tale suddivisione è composta da:

- Incidenti tra veicoli
- Incidenti tra almeno un veicolo e pedoni
- Incidenti a veicolo isolato

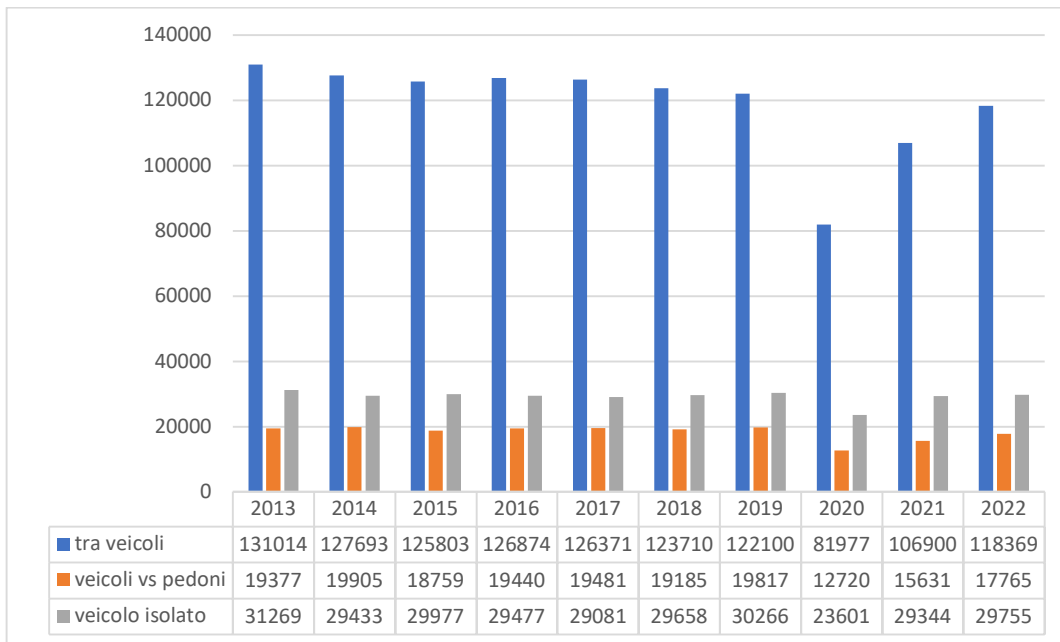


Grafico 5_Incidenti stradali totali per tipologia di sinistro

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

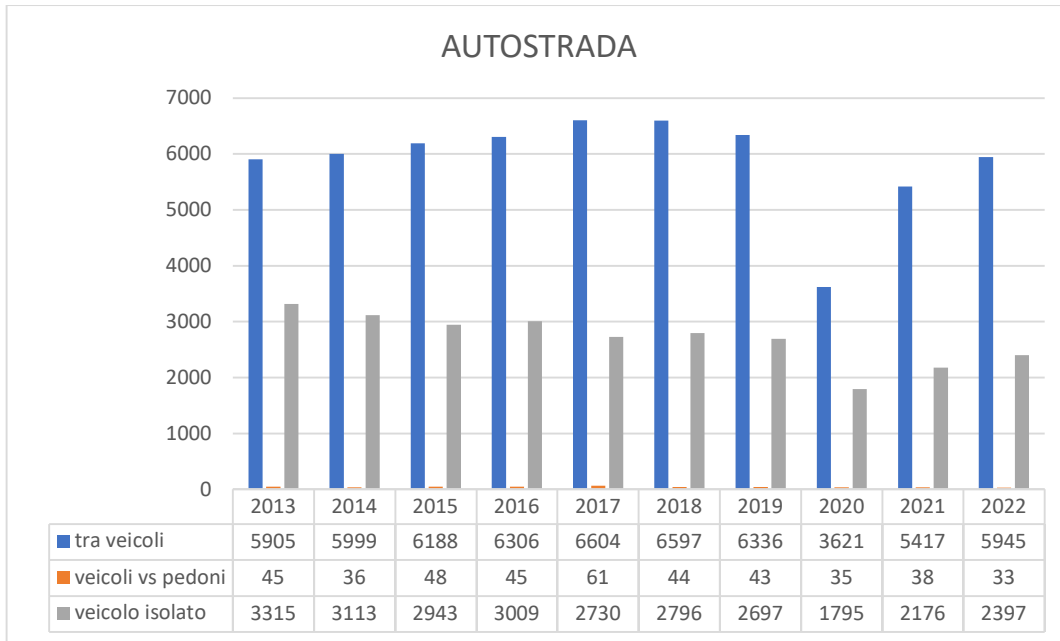


Grafico 6_Incidenti stradali in Autostrada per tipologia di sinistro

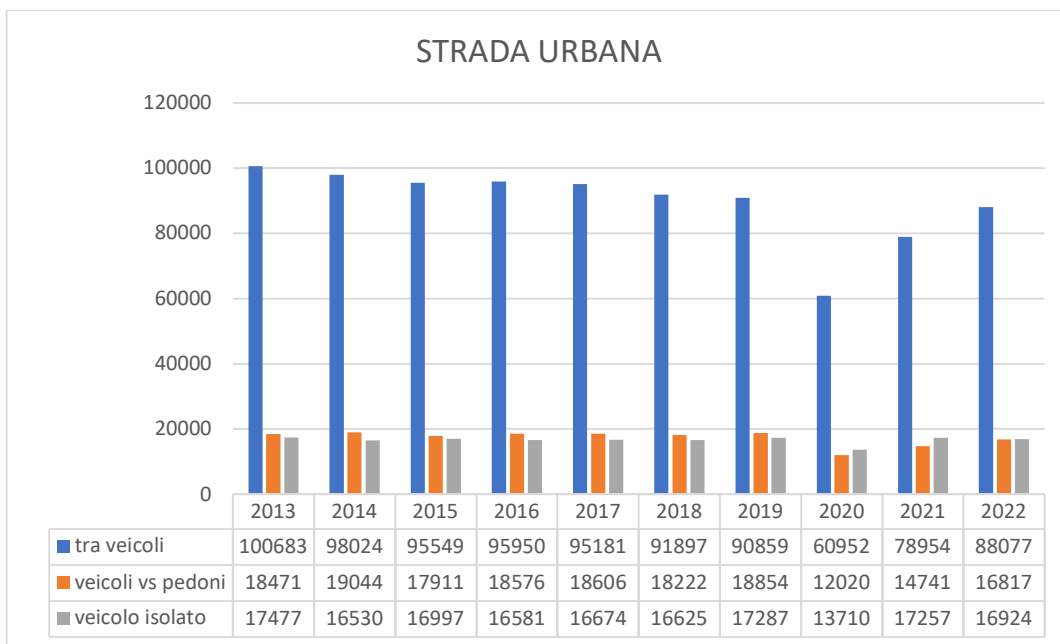


Grafico 7_Incidenti stradali su Strada Urbana per tipologia di sinistro

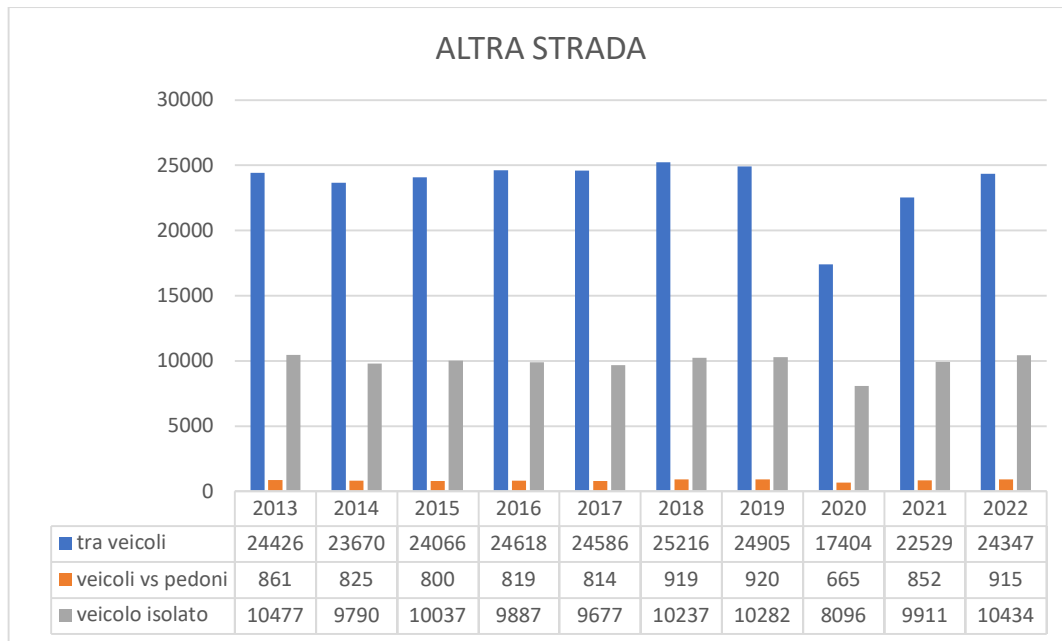


Grafico 8_Incidenti stradali su Altra Strada per tipologia di sinistro

Osservando il grafico 5 si evince che la tipologia di sinistro con il più alto numero di casi è l'incidente tra veicoli, che corrisponde a circa il 75% del numero totale di incidenti stradali registrati in Italia, seguito poi dai sinistri a veicolo isolato e da quelli che coinvolgono anche dei pedoni, che costituiscono rispettivamente il 20% e il 5% del totale.

Il grafico 6, relativo ai sinistri avvenuti in autostrada, registra un numero di incidenti tra pedone e veicolo estremamente più basso rispetto alle altre tipologie di incidenti. Ciò non deve sorprendere in quanto l'autostrada è un luogo nel quale, a parte gli operai e i cantonieri impegnati a lavorare sulla piattaforma stradale in corrispondenza di cantieri, è difficile incontrare delle persone a piedi sulla o lungo la carreggiata, dato che è interdetto loro il transito. Questi si possono però incontrare nelle aree di servizio o nelle piazzole di sosta, oppure sulla strada, nel caso in cui essi abbiano avuto un incidente o il loro veicolo sia in panne. Si può quindi concludere che la ripartizione del numero di incidenti in ambito autostradale è la seguente: 68,25% di sinistri tra veicoli, 0,50% tra veicoli e pedoni e 31,25% a veicoli isolati.

L'osservazione di quanto riportato nel grafico 7, relativo agli incidenti su strada urbana, offre l'opportunità di riflettere su più aspetti. Analizzando in primo luogo i dati grezzi della numerosità degli incidenti avvenuti su strada urbana, rispetto alle quali delle altre tipologie prese in considerazione, risulta evidente un più alto numero di incidenti che coinvolge veicoli e pedoni, ossia 17326 contro 43 in autostrada e 839 su altra strada. Ciò non deve sorprendere il lettore in quanto è

proprio in ambiente urbano che si hanno maggiori concentrazioni di passanti, cioè i cittadini, mentre in autostrada, ad esclusione dei lavoratori, il transito dei pedoni sulla carreggiata è proibito, come già accennato in precedenza. Un'altra considerazione suscitata dall'analisi del grafico 7 è che prima della pandemia per Covid-19 il numero di incidenti tra pedone e veicolo era più alto rispetto a quelli a veicolo isolato, mentre nell'anno della pandemia e in quello seguente si ha una inversione del dato. Considerando, infatti, la media della ripartizione del numero di incidenti in ambito urbano relativa agli anni 2018 e 2019, cioè precedenti all'emergenza sanitaria, e i due anni di pandemia, vale a dire 2020 e 2021, si ottiene:

TIPO INCIDENTE	STRADA URBANA			
	veicoli e pedoni		veicoli isolati	
PERIODO	pre-pandemico	post-pandemico	pre-pandemico	post-pandemico
MEDIA VALORE GREZZO	18538	13381	16956	15484
MEDIA % SU DUE ANNI	14,61%	13,58%	13,36%	15,69%

Tabella 5_ Incidenti tra veicoli e pedoni VS Incidenti a veicolo isolato _ Valori nel periodo PRE e POST pandemia

Per comprendere meglio i dati contenuti nella tabella 5 basti pensare che, come rimarcato per l'analisi dei precedenti grafici, durante la pandemia sono avvenute limitazione alla libera circolazione e, per un certo periodo, anche al libero spostamento delle persone in città e comuni ed è proprio a tali provvedimenti che si può imputare questa inversione di tendenza. Tornando al grafico 7 per l'anno 2022 si rileva un ritorno alla situazione pre-pandemica. La distribuzione media degli incidenti in ambito urbano, infine, può essere riassunta con le seguenti percentuali: incidenti tra veicoli=72,43%; incidenti tra veicoli e pedoni=14,01%; incidente a veicolo isolato=13,56%.

Per quanto riguarda, invece, il grafico 8, è possibile osservare che gli incidenti avvenuti nel periodo di riferimento su altre strade sono mediamente composti per il 68,68% da incidenti tra veicoli, per il 2,45% da incidenti tra veicoli e pedoni ed infine per il 28,87% da incidenti a veicolo isolato. È da notare come questa distribuzione risulti molto simile a quella esaminata per l'ambito autostradale, in quanto con la definizione "altra strada" dovrebbero essere considerate anche le strade extraurbane che abitualmente non vengono percorse dai pedoni e, addirittura, mai nel caso di quelle principali.

Finora si sono considerati i dati relativi al numero di incidenti stradali con particolare riguardo al numero di incidenti mortali avvenuti in Italia, riportando anche le loro ripartizioni rispetto alla categoria di strada e alla tipologia di sinistro. Nei grafici 9, 10 e 11 a seguire, invece, si analizza il numero di feriti e/o morti che sono stati registrati in seguito agli incidenti sopra esposti.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

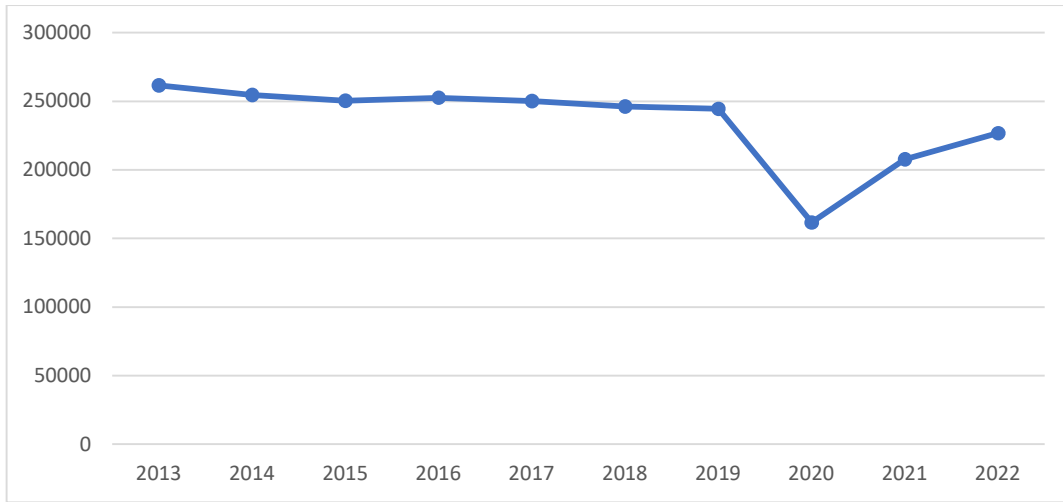


Grafico 9_Numero totale di persone coinvolte in incidenti stradali in Italia

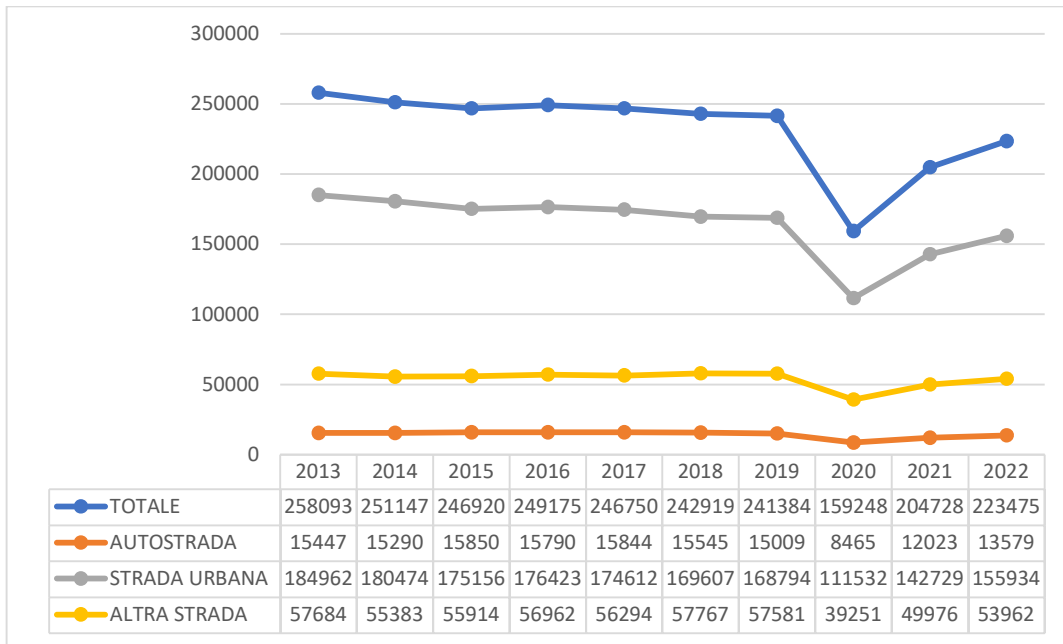


Grafico 10_Feriti negli incidenti in Italia e successiva ripartizione

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

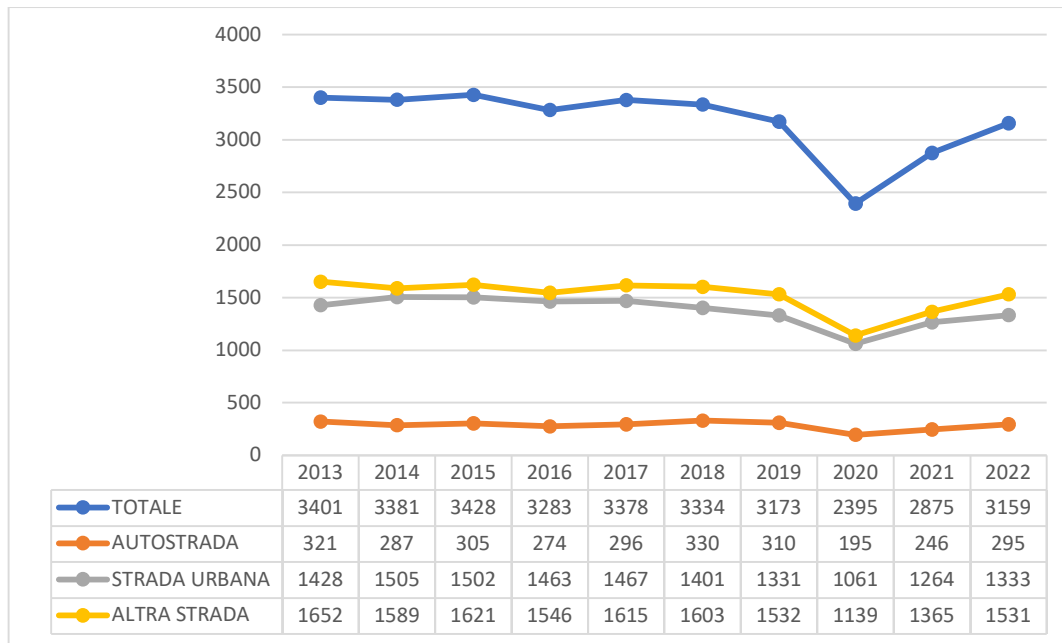


Grafico 11_Morti negli incidenti in Italia e successiva ripartizione

Anche nel caso relativo alle vittime degli incidenti stradali, in tutti e tre i grafici (grafico 9, 10, 11), è possibile notare nel 2020 la tipica flessione dovuta alla pandemia.

Soffermandosi sull'esame dei grafici 10 e 11 emergono le seguenti considerazioni:

- Il numero di morti e feriti in autostrada rappresenta sempre la quota parte minore rispetto al totale. Infatti, per quanto riguarda il numero di feriti, in autostrada ci si attesta attorno al 5,5% rispetto al totale, mentre per il numero di morti ci si aggira attorno al 9%.
- La quota di feriti rispetto al totale per la "strada urbana" e "l'altra strada", per ogni annata considerata, è rispettivamente del 70% e del 23%.
- La percentuale per ogni annata dei morti su "strada urbana" corrisponde a circa il 43% del totale, mentre su "altra strada" corrisponde circa al 48%.

È quindi possibile osservare che, anche se il numero di feriti su "altra strada" è significativamente inferiore rispetto a "strada urbana", la percentuale di morti su "altra strada" è più elevata. Questo può indicare che gli incidenti su "altra strada" tendono a essere più gravi in termini di esito fatale, nonostante coinvolgano un numero minore di feriti.

Risulta di interesse confrontare, per ogni tipologia di strada, il numero di incidenti avvenuti con il numero di persone coinvolte e il numero di sinistri mortali con il numero di vittime per ciascun incidente, come attestato dai grafici riportati qui di seguito.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

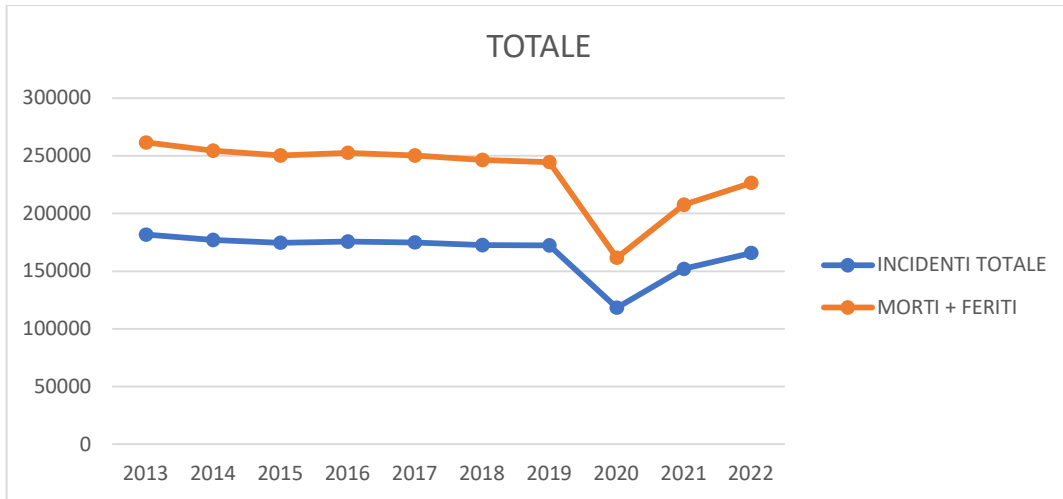


Grafico 12_Incidenti totali vs numero vittime

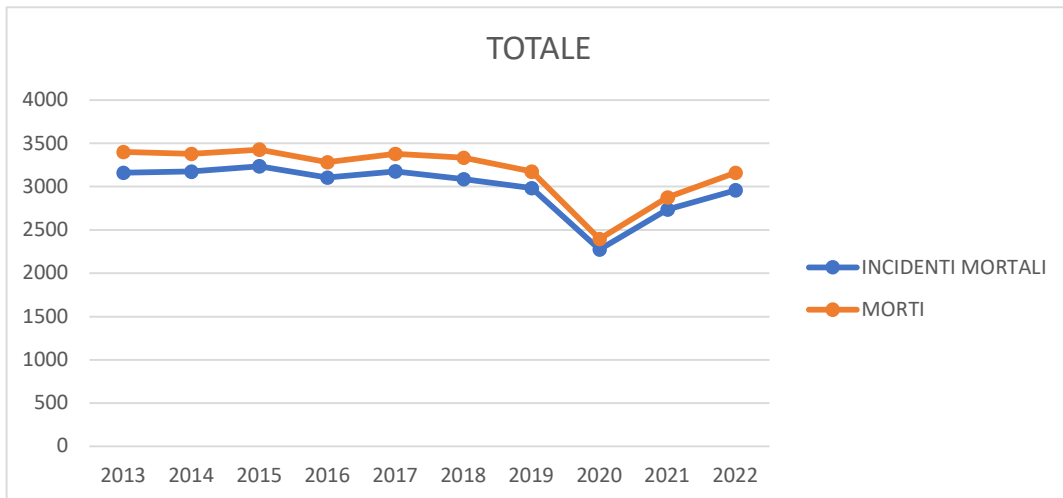


Grafico 13_Incidenti mortali totali vs numero morti

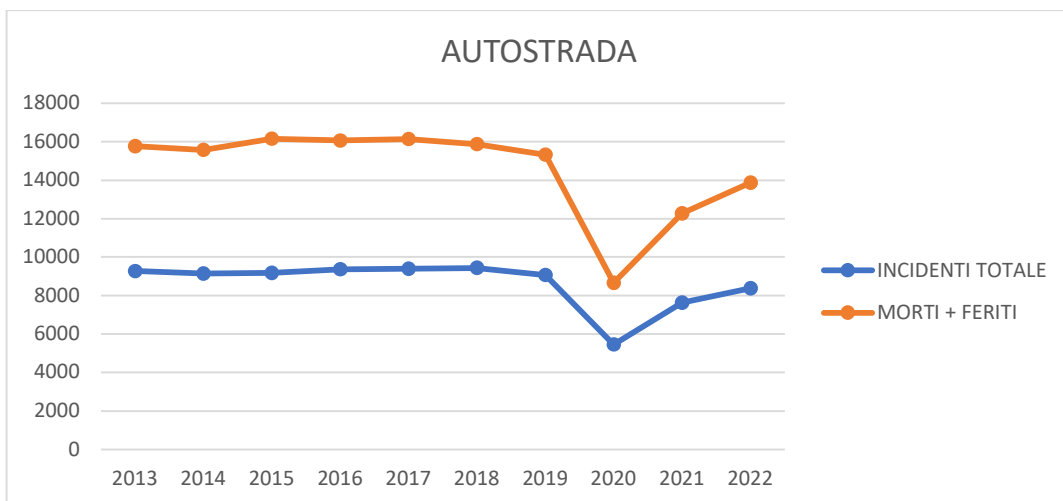


Grafico 14_Incidenti totali in autostrada vs numero vittime

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

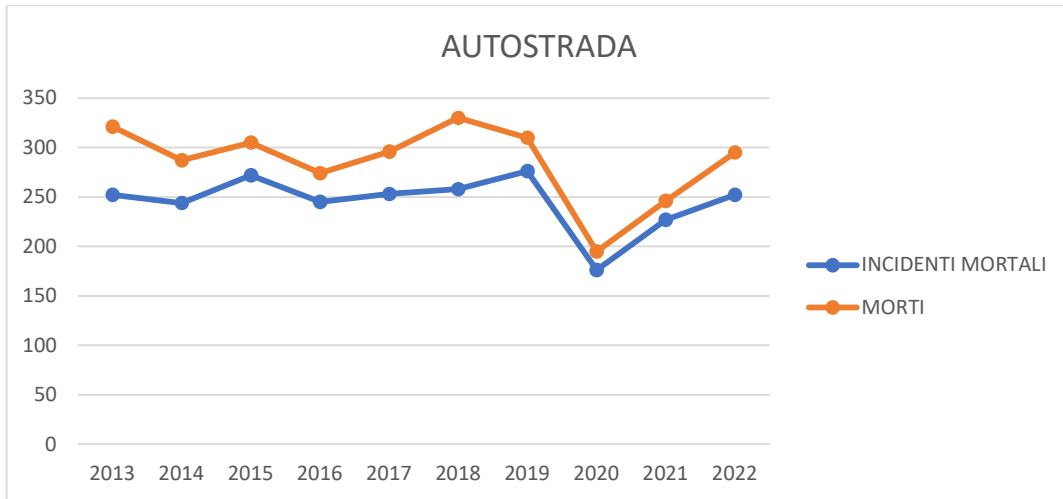


Grafico 15_Incidenti mortali in autostrada vs numero morti

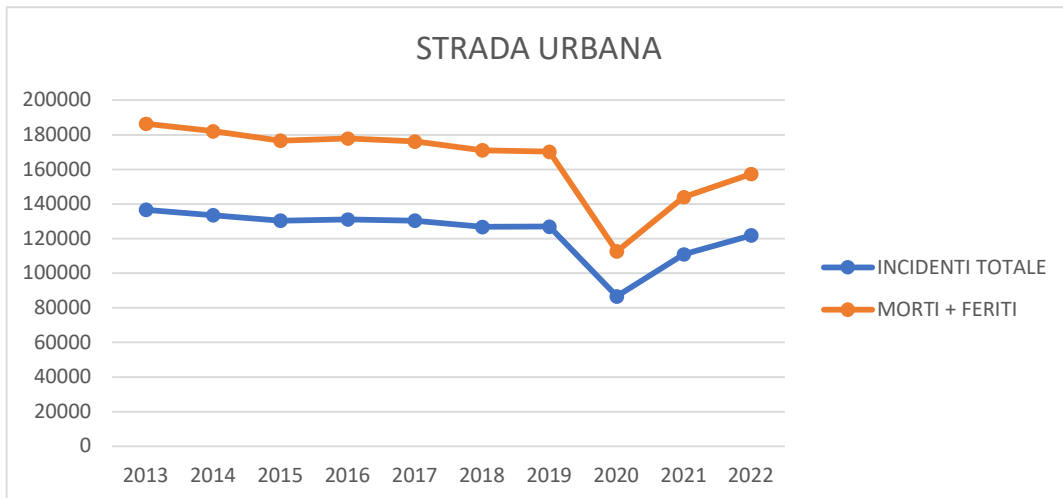


Grafico 16_Incidenti totali su strada urbana vs numero vittime

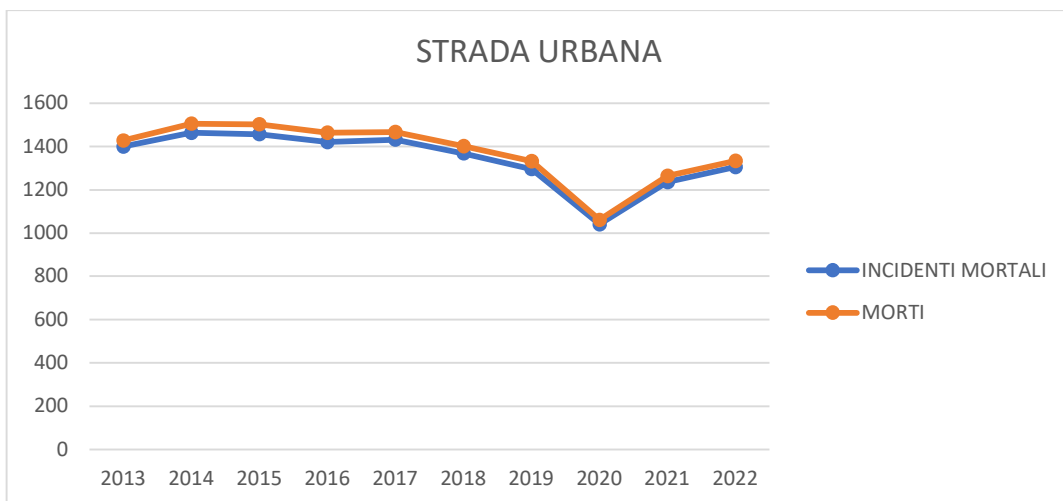


Grafico 17_Incidenti mortali su strada urbana vs numero morti

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

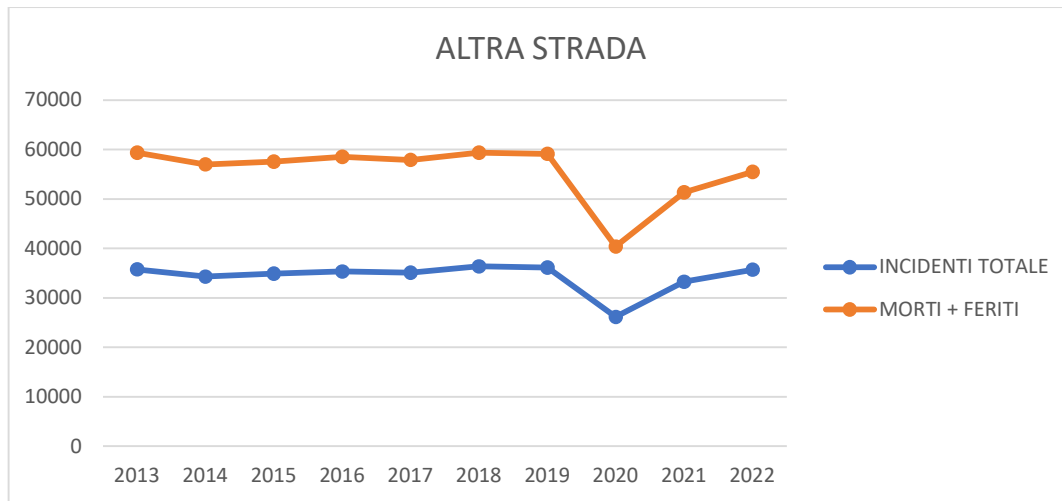


Grafico 18_Incidenti totali su altra strada vs numero vittime

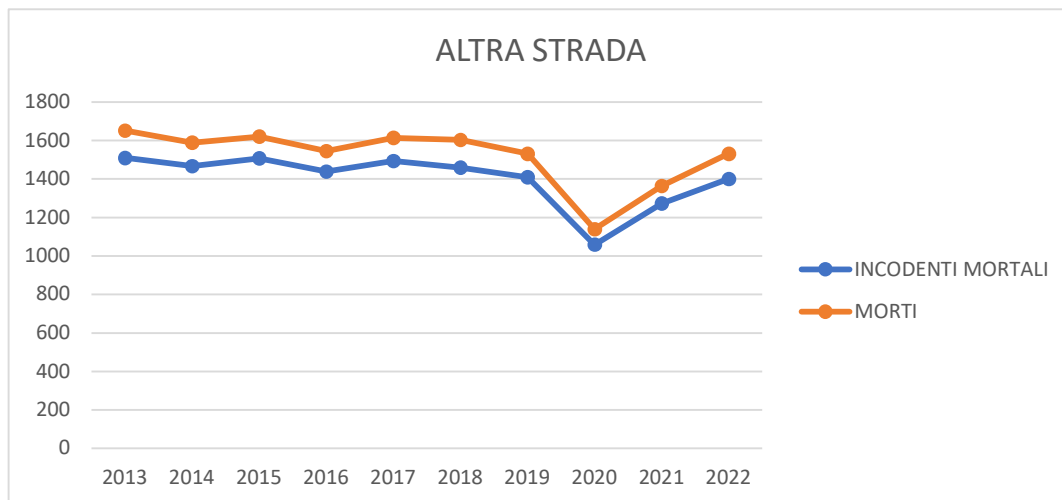


Grafico 19_Incidenti mortali su altra strada vs numero morti

Osservando le varie coppie di grafici sopra riportate, il numero di incidenti totali o mortali, è sempre inferiore rispetto al numero di vittime, cioè all'insieme dei feriti e dei morti. È possibile, quindi, affermare che, in generale, per ogni "evento incidente" si possa avere più di un ferito e/o morto. Tuttavia, dall'osservazione del grafico 17 emerge che nel caso delle strade urbane è chiara la corrispondenza perfetta delle due spezzate, ciò significa che sulle strade urbane un incidente mortale genera tipicamente un solo decesso. Una riflessione quasi analoga può essere svolta anche per il grafico 19. Ma nel caso della "altra strada" non c'è corrispondenza perfetta tra le due spezzate. Questo lieve distacco indica che in alcuni eventi si sono registrate più di una vittima, ma si può tuttavia affermare che nella maggior parte dei casi si ha sempre una relazione un incidente-un morto in quanto le due spezzate hanno lo stesso profilo. In autostrada il numero di decessi aumenta, invece, notevolmente rispetto al numero di incidenti mortali come attestato dal grafico 15. In questo caso

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

le due spezzate non hanno andamento simile, ma al contrario ci sono marcate separazioni, come ad esempio documentato per le annate 2016 e 2018. Si può quindi concludere che, anche se il numero grezzo di incidenti mortali nelle autostrade è minore rispetto a quello relativo alle altre tipologie di strade, la loro gravità è maggiore in quanto, in questo caso, ogni singolo evento genera un numero superiore di morti.

Per completezza dell'analisi, in ultimo, viene analizzata anche la numerosità degli incidenti nella quale le tre tipologie più comuni di veicoli, ovvero autovetture, mezzi pesanti e motocicli, sono coinvolti.

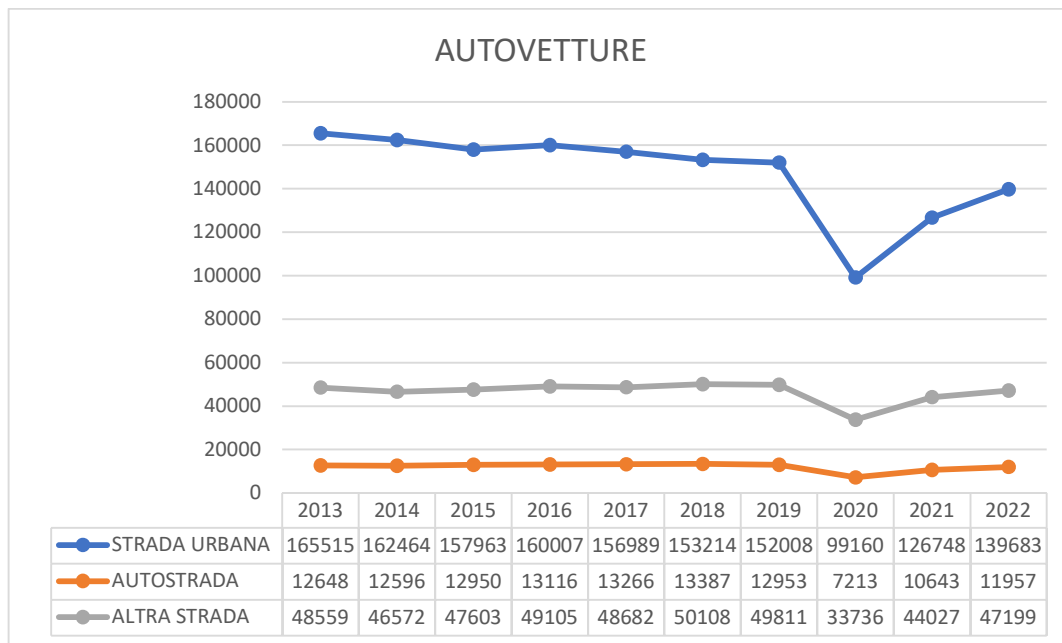


Grafico 20_Incidenti stradali con autovetture per tipologia di strada

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

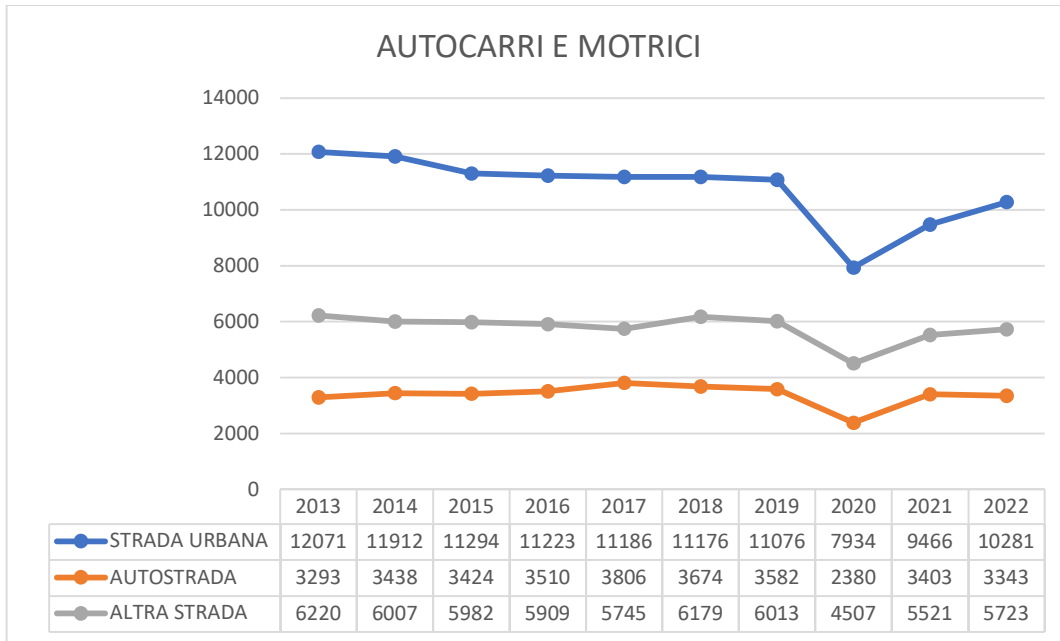


Grafico 21_Incidenti stradali con autocarri e motrici per tipologia di strada

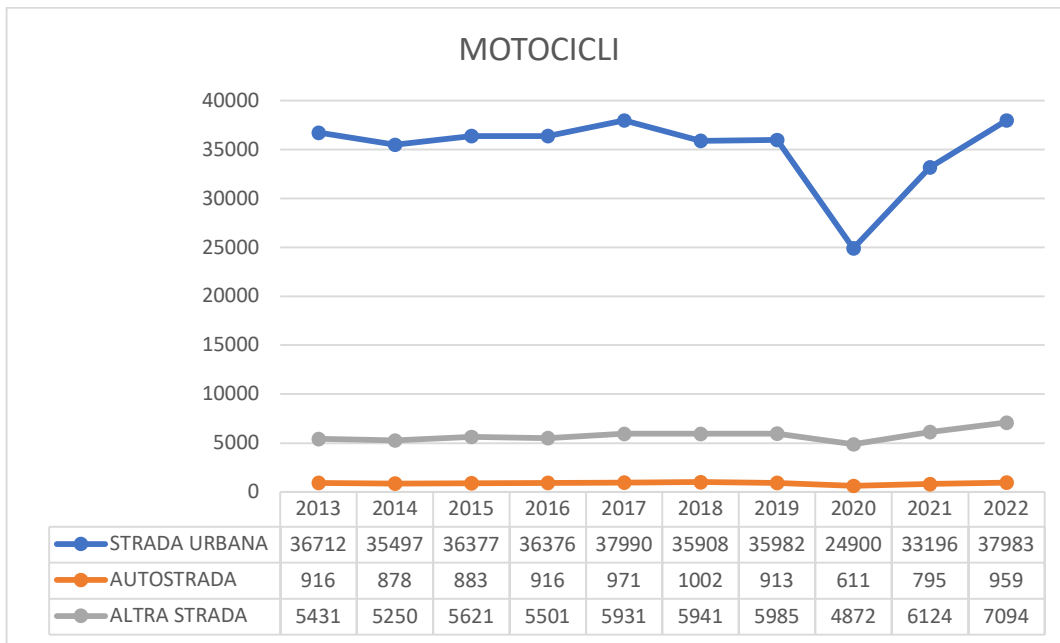


Grafico 22_Incidenti stradali con motocicli per tipologia di strada

Considerando il numero totale di mezzi coinvolti in incidenti stradali per le tre tipologie di veicoli presentate nei grafici 20, 21 e 22, è possibile osservare che le autovetture rappresentano circa il 67%, i mezzi pesanti circa il 6,5% e i motocicli il 13,7%. È quindi interessante notare che autocarri e motrici rappresentano solo una piccola parte del totale dei veicoli coinvolti in incidenti.

È altresì interessante evidenziare che, rispetto al numero totale di veicoli coinvolti in incidenti stradali nella sola rete autostradale, le autovetture ricoprono il 68%, rappresentando quindi una

corrispondenza rispetto alla situazione generale sopra riportata, mentre per gli autocarri e motrici la percentuale aumenta al 19,4%, dato che il trasporto pesante si concentra maggiormente sulle autostrade.

1.1.2 - INCIDENTI STRADALI CON COINVOLGIMENTO DI LAVORATORI SU CARREGGIATA (DATI INAIL)

In questo sottoparagrafo si è passati allo studio della situazione Nazionale prendendo in considerazione il report *“La Segnaletica Temporanea Per Cantieri Stradali”* (4) redatto dall’INAIL su base dati dell’ISTAT relativo ad un arco temporale che va dal 2013 al 2020. Consultando il report è possibile osservare che nel periodo di tempo assunto, considerando tutte le categorie di strade, sono stati accertati 830 incidenti, nei quali sono stati coinvolti uno o più veicoli e almeno un pedone al lavoro sulla carreggiata, protetto o non protetto da apposita segnaletica temporanea. Volutamente sono stati selezionati solo i casi in cui uno o più pedoni sono stati coinvolti nell’incidente e si sono esclusi tutti i casi in cui questi non fossero coinvolti, poiché nella seguente trattazione si vuole approfondire la tematica dei rischi interferenziali tra cantiere e viabilità. A seguire vengono riportati, poi, quattro diagrammi concernenti diversi aspetti legati ai sopra citati incidenti:

Nel diagramma a torta del grafico 23 viene mostrata la percentuale di incidenti stradali con pedone coinvolto, che lavorava sulla carreggiata, per tipo di strada. Si osserva che solo il 2% dei casi si è verificato in ambito autostradale, mentre il restante 98% si ripartisce tra strada extraurbana e strada urbana. Nel grafico 24, invece, è possibile osservare un grafico a torre rappresentante la suddivisione nelle diverse tipologie di veicoli coinvolti negli incidenti.

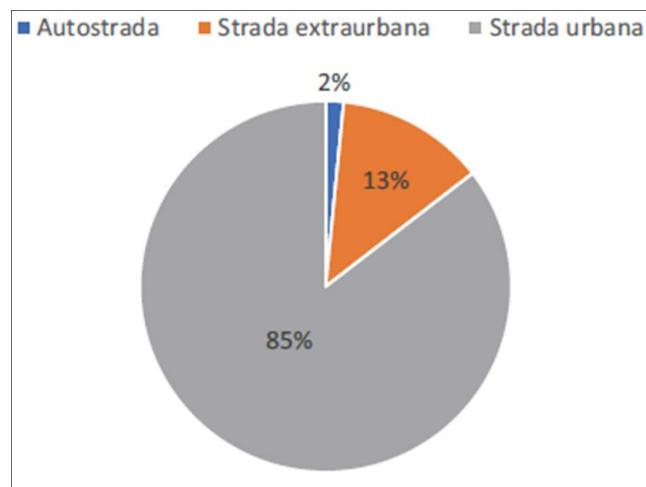


Grafico 23_Incidenti stradali con pedone coinvolto che lavora sulla carreggiata, per tipo di strada. Italia. 2013-2020.

È possibile notare fin da subito che la percentuale di incidenti è estremamente maggiore sulle strade urbane. Come riportato in un report già citato dell'Automobile Club d'Italia (3), uno dei fattori che può giustificare questo dato è da ricercare nell'estensione totale dei diversi tipi di strada. Osservando i dati riportati in tabella 1, appare subito chiara la ragione per cui nel grafico precedente (grafico 23) la fetta relativa all'autostrada è quella meno preponderante. Potenzialmente il numero di cantieri stradali è minore in autostrada rispetto ad altre tipologie di strade, poiché l'estesa chilometrica è diversa, ne consegue che la fetta più grande di incidenti in presenza di lavoratori sulla carreggiata sia legata ad altre tipologie di strade.

Il grafico seguente, in cui vengono riportate le tipologie di veicoli coinvolti in incidenti stradali in presenza di lavoratori sulla carreggiata, conferma quanto già emerso dai dati riportati sui grafici 20, 21 e 22. Va comunque tenuto presente che nel sottoparagrafo precedente si erano considerati tutti i tipi di incidenti stradali, mentre ora si esaminano solo ed esclusivamente gli incidenti stradali avvenuti in presenza di un lavoratore intento a lavorare sulla carreggiata.

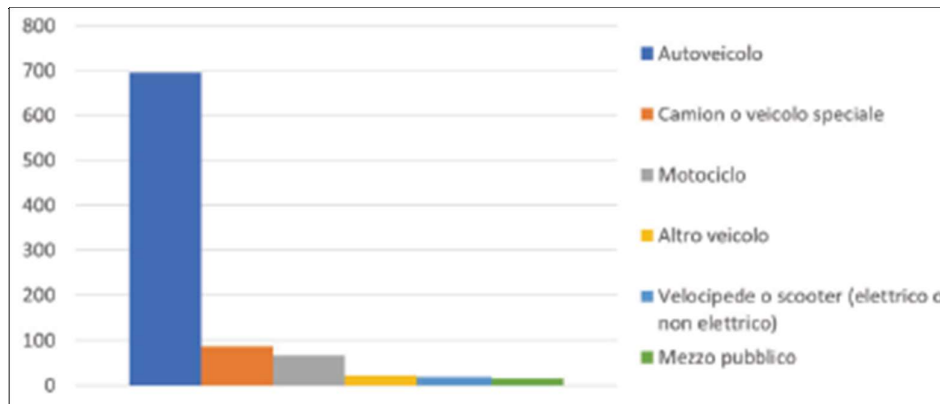


Grafico 24_ Incidenti stradali con pedone coinvolto che lavorava sulla carreggiata, per tipo di veicolo coinvolto. Italia. 2013-2020.

Nel grafico 25 si osserva la ripartizione in base al tipo di circostanza che ha condotto all'incidente. Per meglio comprendere i dati riportati è utile riflettere su quali cause scatenanti un sinistro possano essere associate ai lavoratori e quali invece siano riconducibili ai conducenti dei veicoli. Infatti, consultando il grafico si può notare che le fette indicate come "Fuoriuscita e investimento del pedone", "Mancato rispetto del semaforo", "Velocità non adeguata" e "Manovra" sono tutte accomunate dall'adozione di un comportamento non adeguato da parte dei conducenti dei veicoli, che porta al non rispetto della segnaletica stradale, permanente e/o temporanea, e di conseguenza all'assunzione di comportamenti rischiosi, quali ad esempio l'eccesso di velocità. Nel grafico vengono, poi, presentati altri due spicchi, denominati l'uno "Altre circostanze" e "Guida regolare" l'altro. La definizione "altre circostanze" può essere interpretata come l'insieme delle cause

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

scatenanti gli incidenti legate alla distrazione alla guida, per esempio causata dall'uso del cellulare, o allo stato psico-fisico alterato, per esempio dovuto al consumo di alcool e droghe. La definizione "Guida regolare" risulta di più difficile interpretazione e potrebbe riferirsi a tutti i fattori esterni, per esempio meteorologici, che possono causare degli incidenti. Si osserva infine, che solo il 4% degli incidenti stradali con lavoratore sulla carreggiata è attribuibile a quest'ultimo.

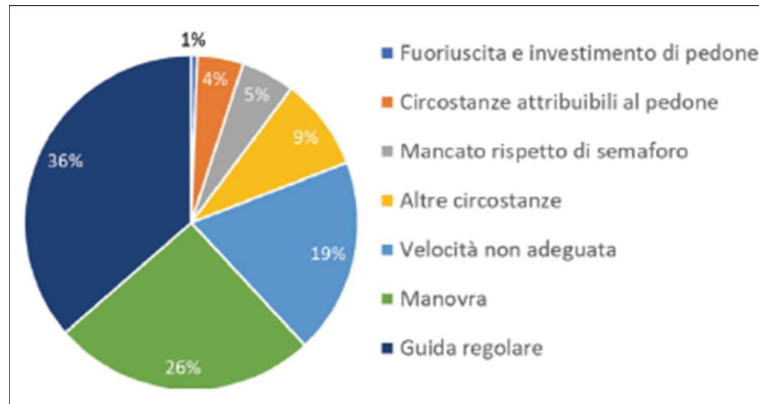


Grafico 25_ Incidendi stradali con lavoratore sulla carreggiata coinvolto e tipo di circostanza rilevata sul luogo dell'incidente. Italia, 2013-2020.

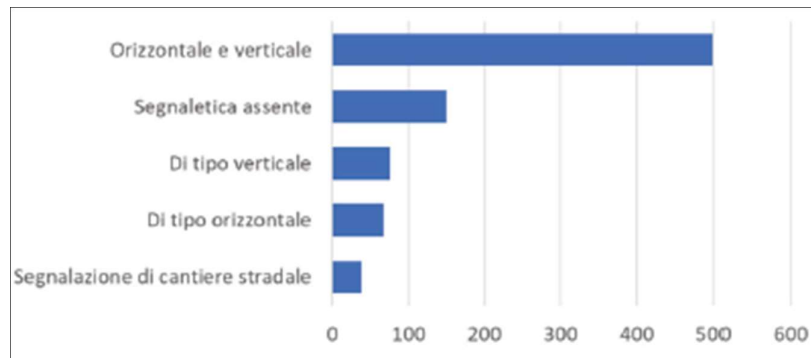


Grafico 26_ Incidendi stradali con lavoratore sulla carreggiata coinvolto, per tipo di segnaletica permanente o temporanea, rilevata sul luogo dell'incidente. Italia, 2013-2020.

Nel grafico 26 si riporta la suddivisione del numero di casi in base alla tipologia di segnaletica rilevata sul luogo dell'accaduto. Il grafico evidenzia che il numero di incidenti rilevati in presenza di segnaletica temporanea di cantiere risulta inferiore agli altri casi, mentre la sua assenza influisce sulla percezione dell'anomalia stradale e, di conseguenza, sull'adeguamento della velocità dei veicoli allo stato della strada comportando un notevole incremento del numero di sinistri. Osservando il grafico 26 è interessante notare come si sia registrato il numero maggiore di incidenti in presenza simultanea di segnaletica orizzontale e verticale. Non essendo fornite però ulteriori informazioni è solo possibile ipotizzare che si sia registrato un numero elevato di sinistri con entrambe le segnaletiche poiché l'una entrava in conflitto con l'altra, inducendo il conducente all'errore. Questo

aspetto della segnaletica verrà approfondito nei paragrafi successivi grazie alle precisazioni riportate sulle norme e leggi in materia.

1.1.3 - INCIDENTI STRADALI AVVENUTI IN CORRISPONDENZA DI CANTIERI (OSSERVATORIO ASAPS)

Per approfondire il tema dell'incidentalità in Italia, nelle pagine a seguire viene condotta un'analisi basata sui dati forniti dall'Osservatorio sugli incidenti stradali (5) nei cantieri redatto dall'Associazione Sostenitori e Amici della Polizia Stradale per gli anni 2020, 2021 e 2022. È importante notare che nel 2020, essendo il primo anno di raccolta delle informazioni, alcune voci non erano ancora previste.

Il grafico 27 è relativo al numero totale di incidenti stradali avvenuti in corrispondenza di cantieri stradali.

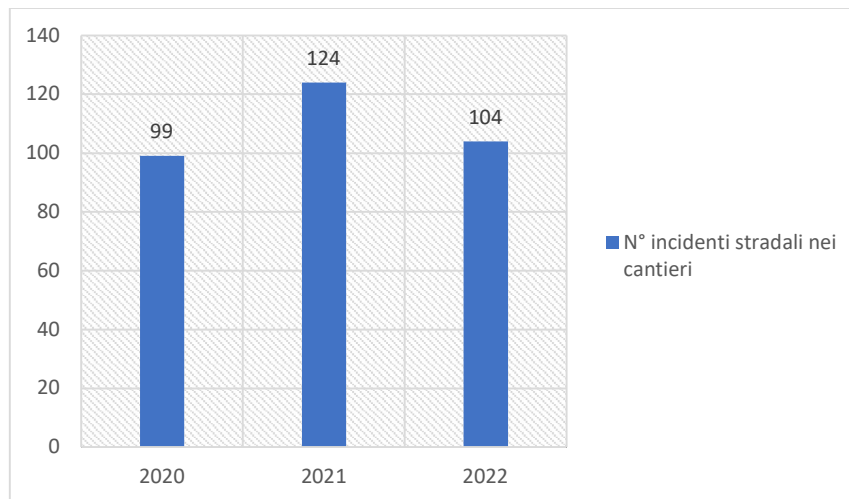


Grafico 27_Incidenti in corrispondenza di cantieri stradali

Purtroppo, non è possibile effettuare confronti con gli anni precedenti al 2020 e quindi non è noto se tra il 2019 e il 2020 ci sia la grande differenza di valori che ci si aspetterebbe come conseguenza della pandemia. Tuttavia, osservando i dati in nostro possesso, si osserva che il numero di incidenti in corrispondenza di cantieri stradali negli anni 2020 e 2022 varia di poco. Questo dato, pertanto, indica che le limitazioni al traffico imposte nel 2020 a causa del Covid-19 non hanno avuto un impatto significativo sulla riduzione del numero di incidenti.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

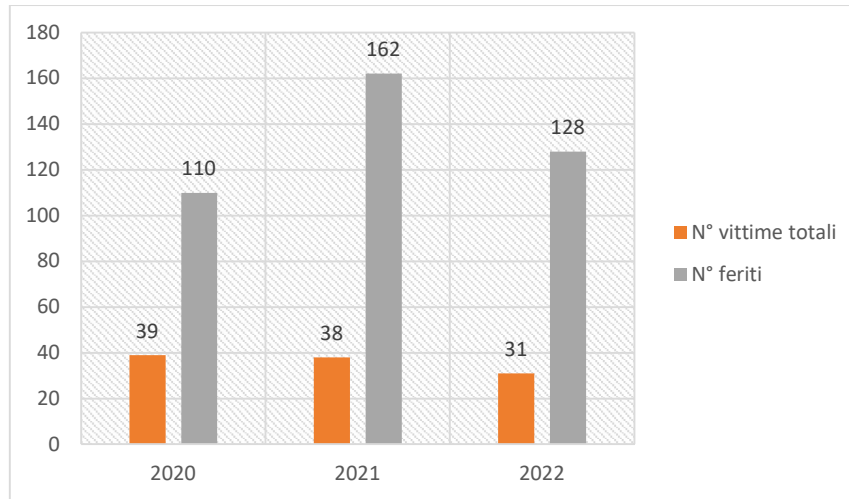


Grafico 28_Feriti e morti per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri

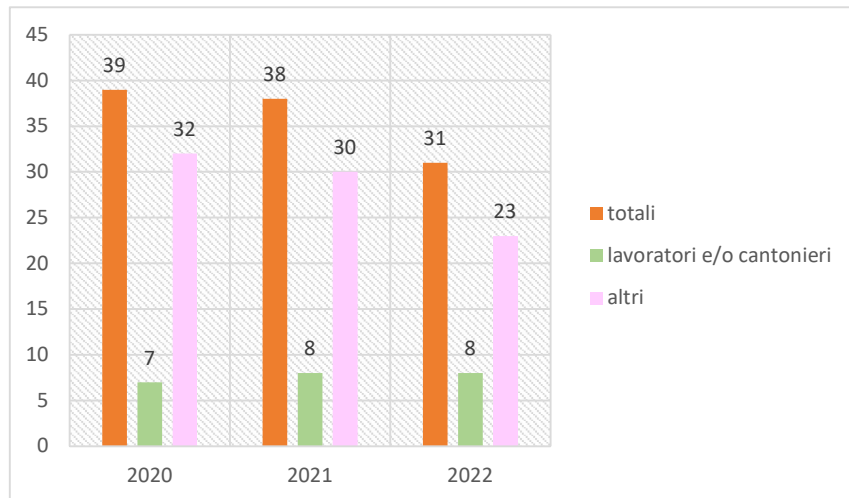


Grafico 29_Suddivisione del numero di decessi

Anno	2020	2021	2022
Tasso di Mortalità	39,39%	30,65%	29,81%
Tasso di Mortalità dei soli lavoratori	7,07%	6,45%	7,69%

Tabella 6_Tasso di mortalità

Il grafico 28 rende noto che a partire dal 2020 si è verificata una diminuzione del numero di morti totali in seguito a incidenti avvenuti in corrispondenza di cantieri stradali. Nel grafico 29 vengono riportati i dettagli dei decessi, con la distinzione tra i lavoratori e le “altre vittime”, definizione, quest’ultima, molto generica che può racchiudere sia i conducenti e i passeggeri dei veicoli sia eventuali sfortunati passanti.

Nelle tabelle a seguire viene effettuato un confronto tra la situazione generale dell'incidentalità in Italia con il caso specifico dei sinistri in corrispondenza delle aree di cantiere, da cui emerge sempre una percentuale molto bassa, ma non irrilevante.

INCIDENTI STRADALI	anno	2020	2021	2022
	TOTALE NAZIONALE	118298	151875	165889
	CANTIERI	99	124	104
	%	0,08%	0,08%	0,06%

Tabella 7_Incidenti stradali totali vs incidenti stradali in corrispondenza dei cantieri

INCIDENTI STRADALI TRA VEICOLI E PEDONI	anno	2020	2021	2022
	TOTALE NAZIONALE	12720	15631	17765
	CANTIERE	99	124	104
	%	0,78%	0,79%	0,59%

Tabella 8_Incidenti stradali tra veicoli e pedoni vs incidenti stradali in corrispondenza dei cantieri

DECESSI IN CORRISPONDENZA DI CANTIERI STRADALI	anno	2020	2021	2022
	TOTALE NAZIONALE	2395	2875	3159
	CANTIERE	39	38	31
	%	1,63%	1,32%	0,98%

Tabella 9_Decessi per incidenti stradali vs Decessi per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri

DECESSI IN CORRISPONDENZA DI CANTIERI STRADALI	anno	2020	2021	2022
	TOTALE NAZIONALE	2395	2875	3159
	LAVORATORI IN CANTIERE	7	8	8
	%	0,29%	0,28%	0,25%

Tabella 10_Decessi per incidenti stradali vs Decessi di lavoratori per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri

DECESSI SUL LAVORO	anno	2020	2021	2022
	TOTALE NAZIONALE	799	774	606
	CANTIERE STRADALE	7	8	8
	%	0,88%	1,03%	1,32%

Tabella 11_Decessi totali di lavoratori in Italia vs Decessi di lavoratori per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri

FERITI	anno	2020	2021	2022
	TOTALE NAZIONALE	159248	204728	223475
	CANTIERE	110	162	128
	%	0,07%	0,08%	0,06%

Tabella 12_Feriti per incidenti stradali vs Feriti per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri

A seguire sono presentati tre gruppi di grafici, una per ogni anno analizzato.

I primi tre grafici (grafici 30, 31 e 32) è incentrata sulle cause scatenanti gli incidenti stradali in corrispondenza di cantieri. Si osserva chiaramente che la fetta maggiore per ogni anno è relativa a comportamenti sbagliati adottati dai conducenti dei veicoli. Sorge allora spontanea la riflessione che, se tutti i conducenti adottassero dei comportamenti più corretti alla guida quali: rispettare i limiti di velocità indicati dalla segnaletica o evitare inutili distrazioni come l'uso del cellulare alla guida, si andrebbero sicuramente a ridurre, non solo il numero di incidenti in corrispondenza di cantieri stradali, ma più in generale tutti i tipi di sinistri stradali. Osservando il grafico 30 relativo al 2020 è possibile notare che, oltre a cause degli incidenti riconducibili direttamente ai conducenti dei veicoli, è presente una fetta pari al 3% denominata "altri motivi" sulla quale però non si è in grado di fornire dettagli maggiori poiché nel report dell'ASAPS (5) non vi sono indicazioni al riguardo. Tuttavia, è intuibile che con "altri motivi" si intenda per esempio fattori esterni come le condizioni metereologiche oppure motivazioni legate a comportamenti scorretti, questa volta non più dei conducenti dei veicoli, ma dei lavoratori. Per quanto riguarda, invece, i due grafici relativi agli anni 2021 e 2022 (grafici 31 e 32), si nota che sono riportate altre due cause di incidenti, ovvero la stanchezza e l'uso di sostanze stupefacenti e alcoliche. Per quanto riguarda la prima è da considerare che solo nel 2021 è stato accertato che nel 2,4% degli incidenti la causa scatenante fosse la stanchezza da parte del conducente. Per l'uso di alcol e droghe, invece, si nota che tra il 2021 e il 2022 si è registrata una diminuzione del numero di incidenti causati da guidatori sotto l'effetto di sostanze stupefacenti, passando dal 3.2% al 1%. Non bisogna ovviamente guardare con troppa soddisfazione questa riduzione, in quanto l'obiettivo dovrebbe essere quello di arrivare ad un'incidenza di queste cause prossima allo zero, perché basterebbe non mettersi alla guida se stanchi o in condizioni alterate.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

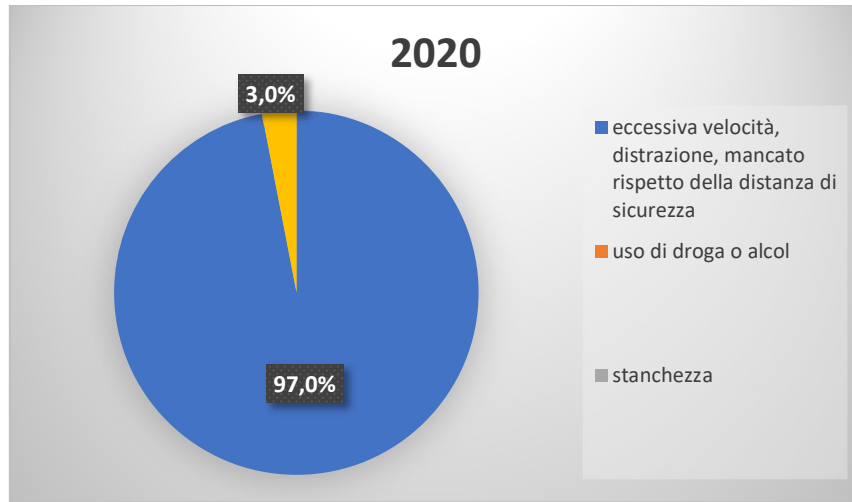


Grafico 30_Cause scatenanti gli incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2020

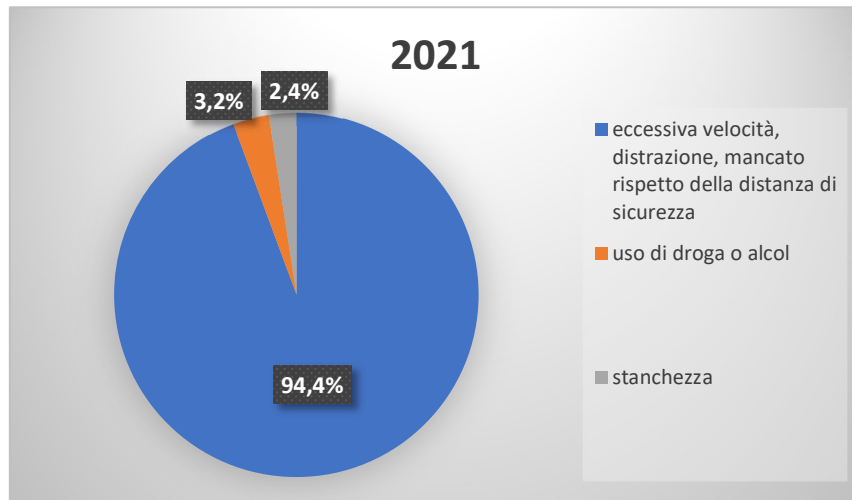


Grafico 31_Cause scatenanti gli incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2021

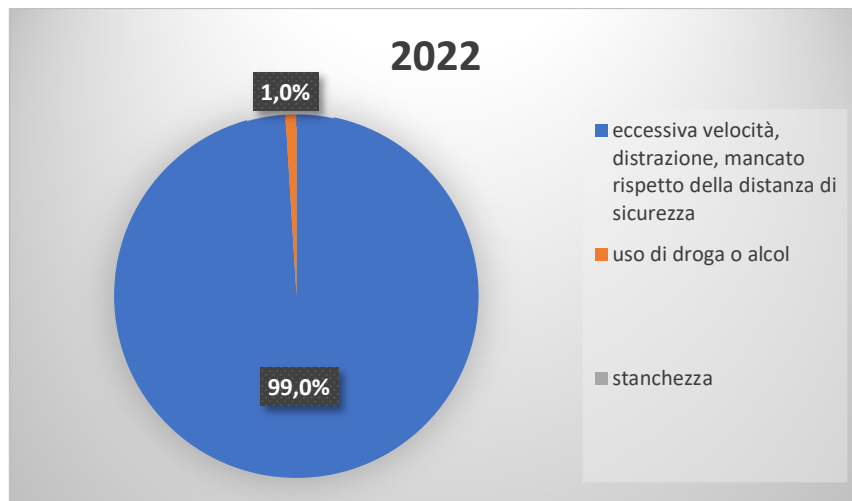


Grafico 32_Cause scatenanti gli incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2022

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

I grafici successivi (grafici 33, 34 e 35), invece, si riferiscono alla ripartizione del numero degli incidenti sopra riportati tra strade a carreggiata ordinaria e a carreggiata separata. La prima categoria comprende le strade a una sola carreggiata, come per esempio le strade urbane, le strade provinciali, le strade rurali, mentre la seconda è riferita alle autostrade o strade extraurbane principali.

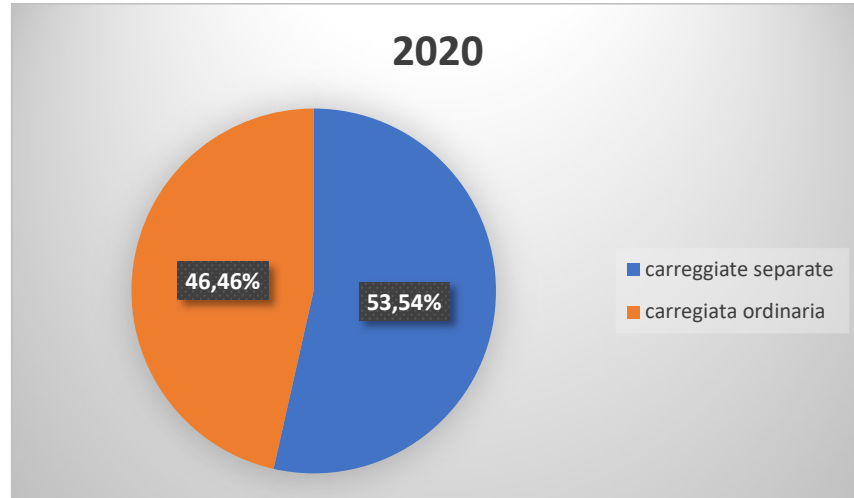


Grafico 33_ripartizione del numero degli incidenti in corrispondenza di cantieri stradali tra strade a carreggiata ordinaria e a carreggiata separata_2020

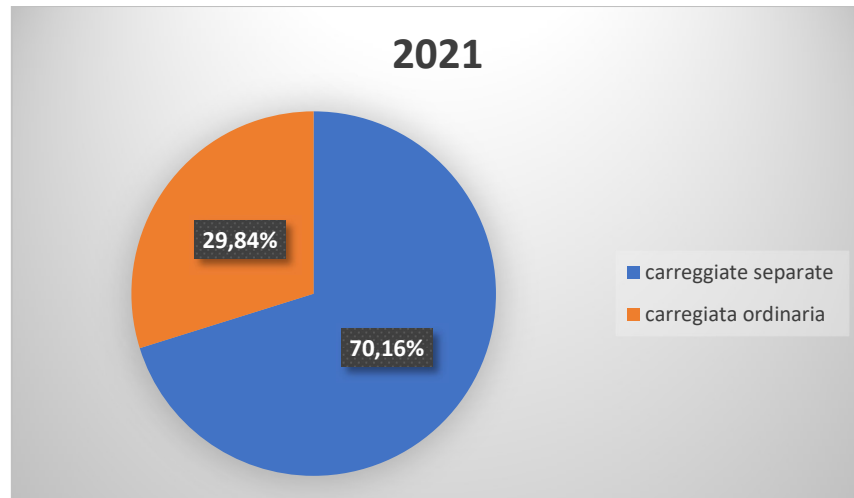


Grafico 34_ripartizione del numero degli incidenti in corrispondenza di cantieri stradali tra strade a carreggiata ordinaria e a carreggiata separata_2021

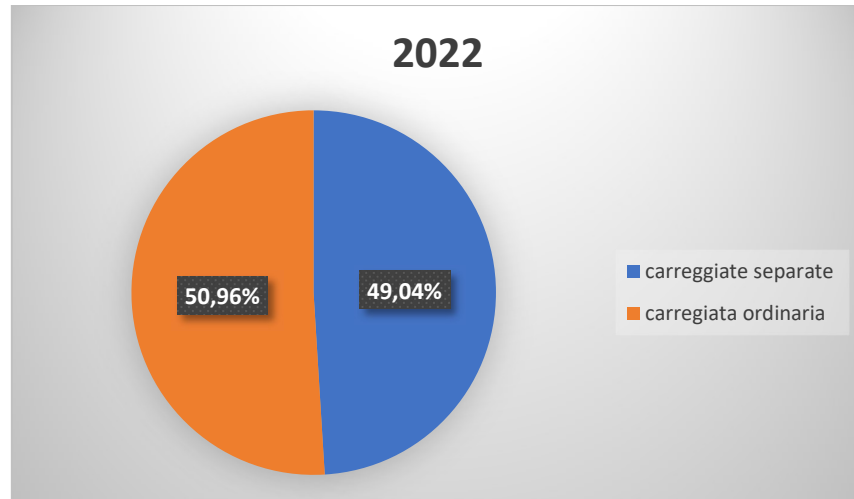


Grafico 35_ripartizione del numero degli incidenti in corrispondenza di cantieri stradali tra strade a carreggiata ordinaria e a carreggiata separata_2022

Infine, l'ultimo gruppo di grafici (grafici 36, 37 e 38) suddivide la ripartizione degli automezzi coinvolti negli incidenti in due categorie, "mezzi pesanti" e "altri veicoli".

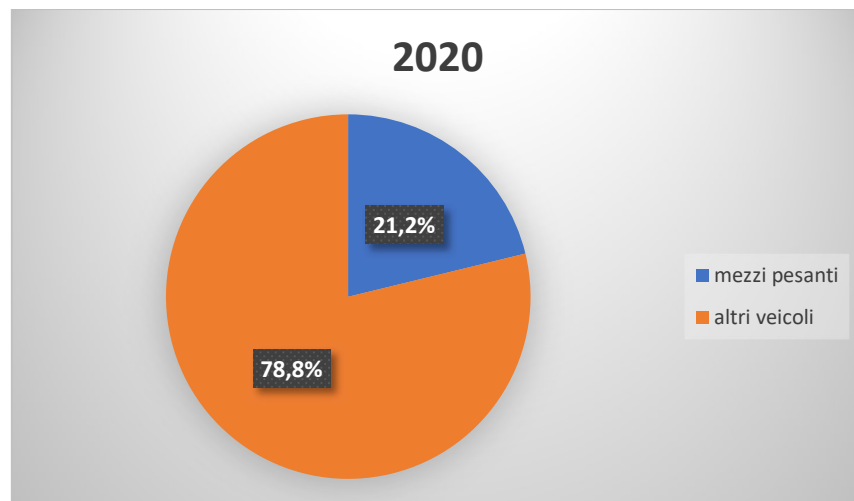


Grafico 36_Ripartizione tra gli automezzi coinvolti in incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2020

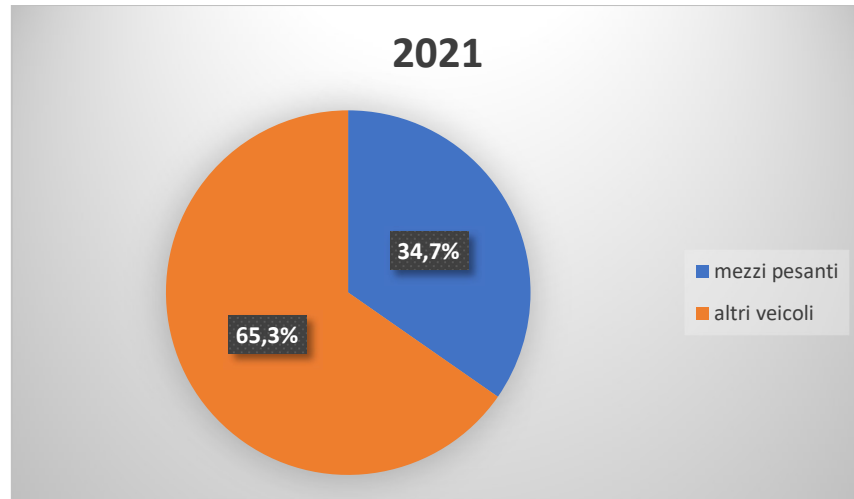


Grafico 37_Ripartizione tra gli automezzi coinvolti in incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2021

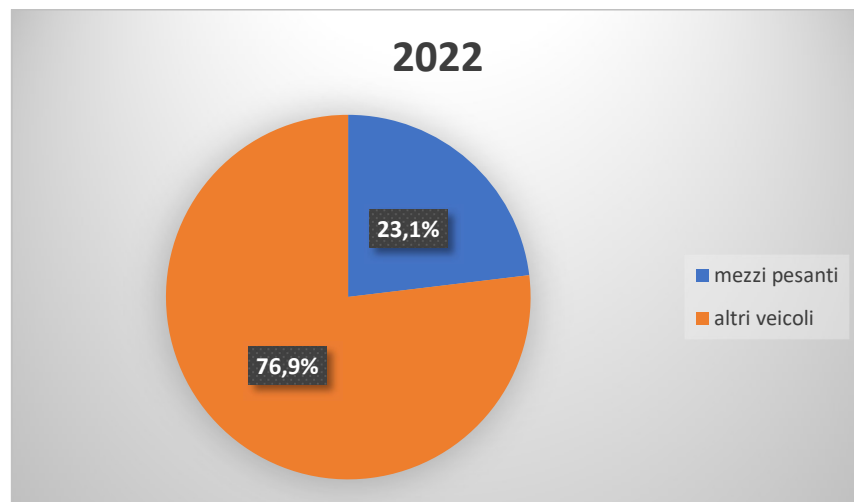


Grafico 38_Ripartizione tra gli automezzi coinvolti in incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2022

A questo punto, risulta interessante evidenziare la correlazione che emerge confrontando i dati del secondo gruppo di grafici con quelli del terzo. Nell'anno 2021 si sono registrati il 70,16% degli incidenti in corrispondenza di cantieri stradali su strade a carreggiata separata, dato notevolmente superiore rispetto a quelli degli anni precedente e successivo (2020: 53,54%; 2021: 49,04%). Nel medesimo anno si registra, inoltre, una percentuale di mezzi pesanti coinvolti in sinistri pari al 34,7% dei veicoli, anche in questo caso una quantità più grande rispetto a quanto attestato per il 2020 (21,2%) e il 2022 (23,1%). Tali eventi sono attribuibili alla concentrazione del transito di mezzi pesanti sulle strade a carreggiate separate, ovvero autostrade e superstrade, con un conseguente collegamento diretto tra i due dati.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

Volendo completare la panoramica sull'incidentalità in corrispondenza di cantieri stradali, sono proposti, infine, anche i dati relativi alla suddivisione per regione degli incidenti in corrispondenza dei cantieri stradali (grafico 39 e 40). Questo dato però è solo disponibile per le annate 2021 e 2022.

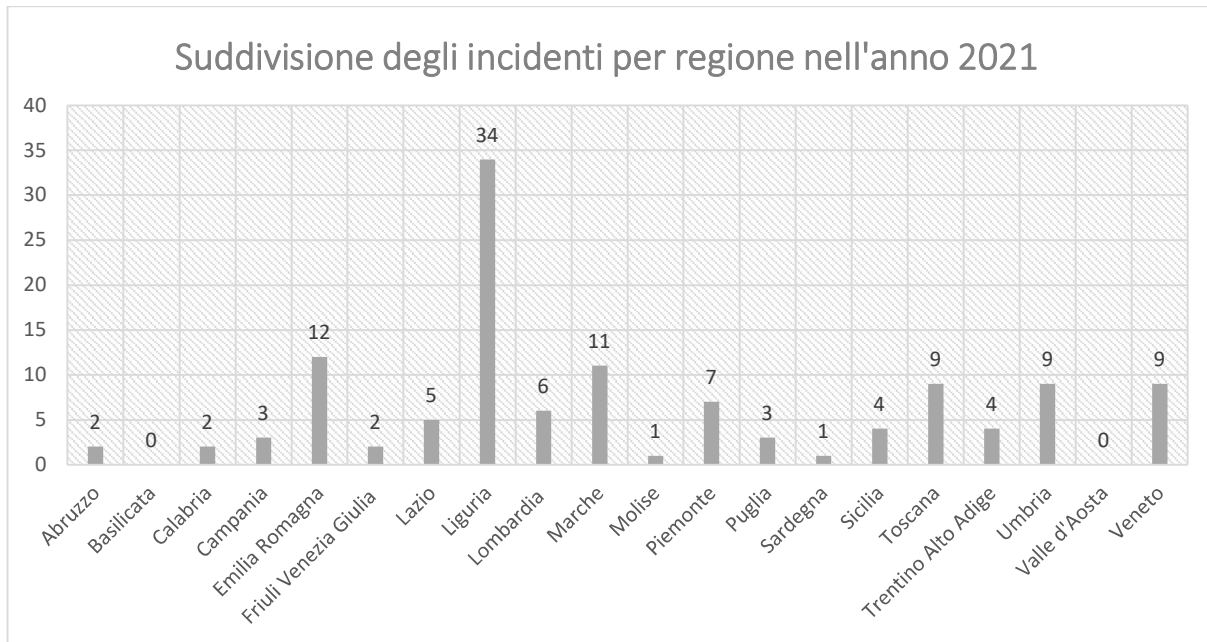


Grafico 39_Suddivisione del numero di incidenti in corrispondenza dei cantieri stradali per regione_2021

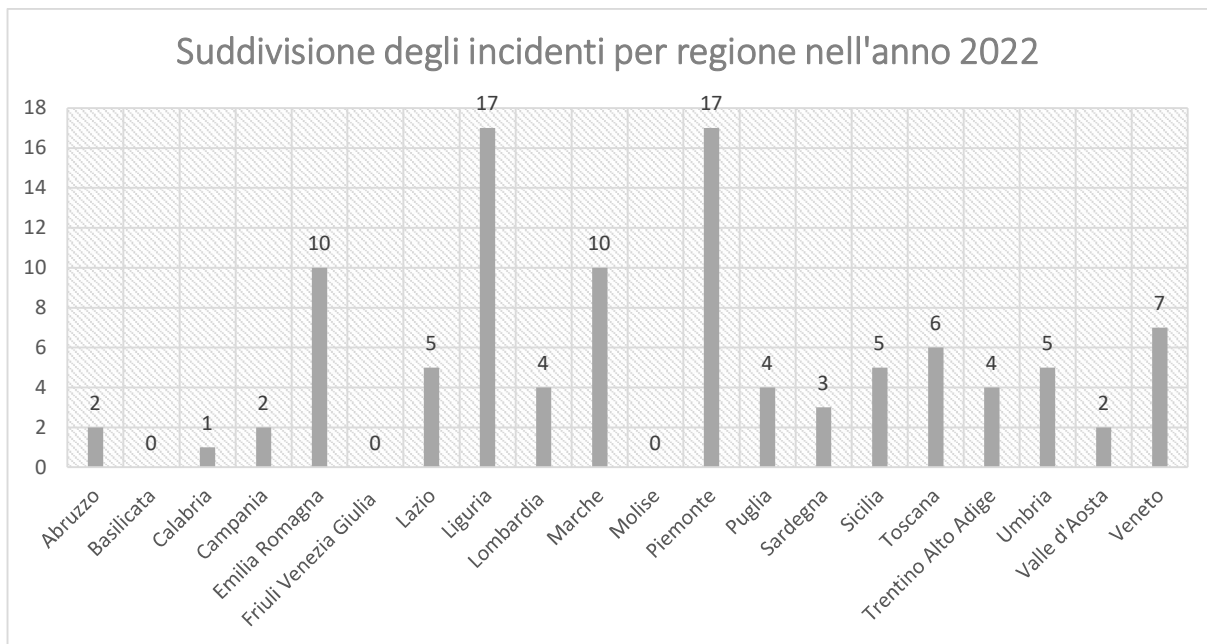


Grafico 40_Suddivisione del numero di incidenti in corrispondenza dei cantieri stradali per regione_2022

Per i due anni consecutivi 2021 e 2022, la regione che ha registrato il maggior numero di incidenti in presenza di un cantiere stradale è la Liguria, con 34 sinistri nel 2021 e 17 nel 2022, in quest'ultimo

al pari del Piemonte. Le ragioni di così tanti incidenti risultano facilmente comprensibili per chi conosce la Liguria e frequenta le sue strade. A causa di una conformazione del territorio non favorevole, sono state realizzate strade con un tracciato molto irregolare e con numerosi ponti e gallerie, opere civili che richiedono una costante e massiccia manutenzione e quindi l'apertura di molti cantieri. Per quanto riguarda il Piemonte, invece, dai dati presi dal report dell'ACI (3) si osserva che è la seconda regione per chilometri di strade, dietro alla sola Sicilia, con uno sviluppo totale di 14088 km (autostrada: 867 km, strade di interesse nazionale: 659 km, provinciali: 12512 km). Ragion per cui, dato il gran numero di strade, si può ipotizzare la presenza di numerosi cantieri stradali che comportano quindi un potenziale innalzamento del livello di rischio di incidenti.

1.2 - NORME E REGOLAMENTI SULLA SICUREZZA NEI CANTIERI IN AMBITO AUTOSTRADALE

Il seguente elaborato è stato redatto nel rispetto degli articoli contenuti nel D. Lgs. 81/2008 e delle indicazioni, principi e consultazione delle tavole esplicative contenute nel D. M. 10 luglio 2002.

- Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro (D. Lgs. 81/2008) (6)
- Disciplinare tecnico relativo agli schemi segnaletici, differenziati per categoria di strada, da adottare per il segnalamento temporaneo (D. M. 10 luglio 2002) (7)

I due Decreti sopra citati sono fondamentali per la sicurezza nei cantieri stradali.

Il primo, il Decreto Legislativo 81/2008 (6), è il testo cardine sul tema della sicurezza in Italia, in quanto disciplina la salute e sicurezza sul lavoro. Esso stabilisce le regole e gli obblighi per garantire un ambiente lavorativo sicuro e prevenire rischi per la salute dei lavoratori, fornendo misure generali di tutela della salute, che vengono poi integrate dalle misure di sicurezza previste per specifici rischi o settori di attività. Tra le sue disposizioni vi sono norme sulla valutazione dei rischi, l'adozione di misure preventive, la formazione dei lavoratori e la creazione di organi aziendali dedicati alla sicurezza.

Per quanto riguarda invece il Decreto Ministeriale 10/2002 (7), esso fornisce le linee guida e gli standard per la segnaletica temporanea sulle strade, definendo gli schemi segnaletici da utilizzare in base alla categoria della strada. Il disciplinare mira a garantire la sicurezza stradale durante lavori o situazioni temporanee che richiedono l'adozione di segnalazioni specifiche.

A compendio sono anche usati dei Regolamenti interni redatti da ASPI (Autostrade per l'Italia) basati sul recepimento dei sopracitati decreti. Essi sono documenti che approfondiscono e normano internamente alla società le corrette procedure di posa e rimozione in sicurezza della segnaletica temporanea di cantiere e nei quali sono anche riportati indicazioni di natura generale sui cantieri fissi e mobili e sulla segnaletica. Inoltre, essi presentano anche un allegato nel quale sono riportati gli schemi di segnalamento standard.

- Disciplinare per l'Installazione, conduzione e rimozione dei cantieri di lavoro sulla rete di Autostrade per l'Italia (8)
- Linee guida per la sicurezza dell'operatore su strada (9)

1.3 - SEGNALETICA STRADALE TEMPORANEA

Lo scopo principale del segnalamento temporaneo è quello di avvertire l'utenza della strada della presenza di cantieri o incidenti, ovvero di anomalie rispetto alle condizioni di circolazione ordinaria. Il segnalamento gioca un ruolo fondamentale per salvaguardare la sicurezza dei fruitori dell'infrastruttura, ma anche di tutti coloro che lavorano su di essa o nelle immediate vicinanze. Per conseguire lo scopo prefissato, la segnaletica deve essere posta in maniera tale da indurre i conducenti dei veicoli a mantenere un comportamento corretto e rispettoso della situazione non abituale nella quale si trovano, guidandoli attraverso l'anomalia.

La messa in opera della segnaletica temporanea richiede attenzione e buon senso. Per posizionare efficacemente i segnali in modo da garantire un adeguato livello di sicurezza stradale è necessario seguire i principi esposti all'intero del D.M. 10 luglio 2002 (7) e di seguito richiamati all'attenzione:

Adattamento: La segnaletica deve essere adattata alle specifiche esigenze del cantiere e alle condizioni di circolazione, valutando caso per caso i potenziali pericoli e le necessità di sicurezza. Per posizionare in maniera efficace la segnaletica temporanea bisogna considerare:

- Tipo di strada e sue caratteristiche geometriche;
- Natura e durata della situazione anomala;
- Importanza del cantiere, quindi le dimensioni dello stesso e gli effetti che esso ha sulla viabilità;
- Visibilità legata a caratteristiche geometriche della strada e/o a elementi propri o nelle vicinanze della stessa;

- Visibilità legata a particolari condizioni ambientali;
- Localizzazione, quindi considerare la categoria di strada e/o se si è in corrispondenza di un punto singolare come ad esempio intersezioni o svincoli;
- Velocità e tipologia del traffico;

Coerenza: La segnaletica predisposta deve essere coerente con la situazione del cantiere e con le indicazioni fornite, in modo da evitare confusione o fraintendimenti da parte degli utenti della strada. Per interventi uguali devono essere usati sempre gli stessi segnali ed essi devono essere disposti sempre nella stessa maniera. In determinate circostanze può succedere che la segnaletica temporanea sia in contrasto con quella già esistente sul tratto di strada oggetto dei lavori. In questi casi è necessario rimuovere o oscurare temporaneamente la segnaletica permanente che dovrà essere ripristinata al termine dei lavori.

Credibilità: La segnaletica deve essere credibile, ossia deve rispecchiare effettivamente la situazione del cantiere e fornire informazioni accurate e veritiere agli utenti. Per fare ciò, essa deve seguire lo sviluppo temporale e spaziale del cantiere. Inoltre, al termine dei lavori la segnaletica temporanea deve essere tempestivamente rimossa, mentre quella permanente deve essere riposizionata correttamente in opera.

Visibilità e leggibilità: La segnaletica temporanea deve essere chiaramente visibile e facilmente leggibile, sia di giorno che di notte, per garantire una corretta comprensione da parte degli utenti della strada. Le caratteristiche dei segnali devono essere regolamentate. Essi devono essere in buono stato e posizionati correttamente lungo la zona oggetto dei lavori.

Un altro aspetto molto importante da tenere in considerazione analizzando il segnalamento temporaneo dei cantieri è che il processo di posa e rimozione dei segnali temporanei è anch'esso un cantiere a tutti gli effetti. Infatti, gli operatori responsabili della posa o rimozione dei segnali sono soggetti a rischi per la sicurezza e devono quindi ricevere una formazione specifica. Le modalità di posa e rimozione vengono regolarmente analizzate e riviste, considerando criteri chiave come la coerenza della segnaletica in ogni momento e la riduzione al minimo dell'esposizione del personale al lavoro nella zona di circolazione.

L'attività di posa dei segnali segue un ordine specifico, assicurando una perfetta visibilità per gli utenti della strada. Il D.M. 10 luglio 2002 (7) impone uno schema segnaletico temporaneo con segnaletica di avvicinamento, posizione e fine prescrizione. In situazioni di emergenza, viene data priorità alla messa in opera di una segnaletica di posizione sufficiente, seguita da quella di avvicinamento da integrare rapidamente. La rimozione avviene invece seguendo l'ordine inverso della posa e considerando le necessità di manovra dei veicoli coinvolti nella raccolta.

Di notte, in condizioni di scarsa visibilità o in galleria, la segnaletica viene rinforzata e tutti i pannelli sono rivestiti di pellicola retroriflettente di classe 2⁵. Il primo pannello di pericolo è dotato di una luce rossa fissa. La delimitazione del raccordo obliquo tra due corsie è rinforzata con lanterne gialle in sincrono o a scorrimento. La distanza minima tra il segnale di pericolo e le lanterne è regolamentata, ad esempio, su autostrade e strade extraurbane principali aventi due corsie per senso di marcia a 750 m, che diventano 1000 m nel caso in cui esse abbiano tre corsie per senso di marcia. Queste precauzioni sono cruciali per garantire la sicurezza degli operatori e degli utenti stradali durante la gestione dei segnali temporanei.

Come evidenziato in precedenza, i cantieri stradali rappresentano una fonte di pericolo per la circolazione ordinaria, in quanto essi generano un aumento del traffico e, di conseguenza, possono incrementare il numero dei potenziali scontri tra veicoli e/o con mezzi di lavoro.

La limitazione della velocità non è sempre essenziale, poiché i segnali specifici di "Lavori" o "Altri Pericoli" inducono gli automobilisti a adottare un comportamento più prudente, tuttavia, nei casi in cui sia necessario far decelerare gli utenti, la riduzione della velocità deve avvenire a blocchi di 20 km/h sfruttando la segnaletica dedicata a tale scopo, evitando segnali di limitazione eccessivamente bassi (5, 10 o 20 km/h). Il segnale "Limite massimo di velocità" deve essere installato dopo la segnaletica di pericolo e ripetuto ogni tratto di autostrada interessato dai lavori oltre 1.0 km.

1.4 - TIPOLOGIE DI CANTIERI IN AMBITO AUTOSTRADE

Nel seguente paragrafo vengono analizzate le differenti tipologie e le peculiarità dei cantieri stradali in accordo con le normative e le leggi in vigore sul territorio nazionale, concentrandosi

⁵ La pellicola retroriflettente di classe 2 è un materiale utilizzato nella produzione di segnaletica stradale, progettato per garantire elevata visibilità in condizioni di scarsa illuminazione. La designazione "classe 2" indica che il materiale soddisfa specifici standard di retro-riflessione stabiliti dalle normative di sicurezza stradale. Questa pellicola migliora significativamente la visibilità dei segnali stradali, contribuendo a prevenire incidenti, soprattutto di notte o in condizioni di luce limitata.

maggiormente sull'ambito autostradale e fornendo esempi di schemi segnaletici e relativi segnali riportati nel D.M. 10 luglio 2002 (7).

È però doveroso, prima di iniziare l'analisi di dettaglio, fare una piccola introduzione su che cosa sia un cantiere stradale in generale.

Un cantiere stradale è un'area lungo una strada o un'autostrada nella quale si svolgono lavori di costruzione, manutenzione o riparazione. Questi lavori possono riguardare diverse attività, come la posa di nuovi strati di conglomerato bituminoso, l'adeguamento del tracciato, la riparazione in seguito a danni strutturali delle infrastrutture, l'installazione di nuovi impianti, la realizzazione di nuove intersezioni o rotonde, e così via. In generale, i cantieri stradali sono destinati a migliorare o mantenere l'infrastruttura stradale esistente. Tuttavia, come già detto in questo elaborato, i cantieri stradali rappresentano un ostacolo alla ordinaria viabilità e quindi un elemento insolito del tracciato, che può indurre nel guidatore uno stato di insicurezza e quindi essere la causa di incidenti tra veicoli o invasioni dell'area di cantiere e quindi incidenti tra i/il veicoli/o in transito e l'operatore al lavoro sulla carreggiata.

Durante i lavori in corso, è possibile trovare disposta per il tratto di strada interessato dagli stessi la segnaletica temporanea e altri dispositivi che guidano il traffico attraverso o intorno all'area di cantiere, garantendo la sicurezza degli automobilisti, dei lavoratori e di altri utenti della strada. La gestione adeguata dei cantieri stradali è essenziale per minimizzare gli impatti sul traffico, assicurare la sicurezza e completare i lavori in modo efficiente.

Quando ci si riferisce ad un cantiere stradale è importante sapere che ne esistono di più tipi in base alle caratteristiche e conformazione degli stessi. Una prima classificazione che si può adottare è quella di suddividerli i cantieri in *puntuali* o *lineari* e questa distinzione può essere usata per ogni tipo di cantiere. Si ha un cantiere puntuale quando l'area interessata dalle lavorazioni è circoscritta, limitata; questa tipologia è soprattutto riferita a cantieri edili (per le costruzioni), alcune volte in ambito stradale e raramente, quasi mai, in ambito autostradale. Al contrario, un cantiere si dice lineare quando, come suggerisce il suo nome, ha uno sviluppo rettilineo e copre una lunga distanza di tratto continuo di strada ed è questa la tipologia di cantiere che più comunemente si vede in ambito autostradale.

Può essere fatta poi un'ulteriore distinzione, una classificazione specifica dei cantieri stradali, riportata sul D.M. 10 luglio 2002 (7) in:

- Cantiere Fisso
- Cantiere Mobile

Nei seguenti sottoparagrafi verranno approfondite queste due tipologie di cantieri stradali.

1.4.1 - CANTIERI FISSI

Un cantiere fisso è caratterizzato dalla superficie occupata dallo stesso che rimane invariata dall'inizio fino al termine dei lavori e non subisce nessuno spostamento per almeno mezza giornata. Inoltre, se i lavori si protraggono per almeno tre giorni lo si definisce di lunga durata, mentre se non superano i due giorni è di breve durata. Per la delimitazione e la segnalazione delle aree di cantiere viene usata l'appropriata segnaletica temporanea disciplinata nel D. M. 10 luglio 2002 (7). Esso, come già rimarcato nel paragrafo relativo al segnalamento, richiede/impone che per la delimitazione/segnaletica dei cantieri fissi sia usata una segnaletica di "avvicinamento", una di "posizione" e una di "fine prescrizione".

- La segnaletica in avvicinamento include segnali di "lavori" o "altri pericoli", segnali di "riduzione corsie", "divieto di sorpasso" e "limite massimo di velocità", oltre ad altri segnali di pericolo o prescrizione (figura 1). In strade a carreggiate separate, lo stesso tipo di segnali deve essere installato sullo spartitraffico;



Figura 1_Segnaletica di avvicinamento_ In alto a sinistra Segnale di Pericolo; In alto a destra Segnale di prescrizione; In basso Segnali di Indicazione

- La segnaletica di posizione è usata per la delimitazione della zona di lavoro e include raccordi obliqui con barriere, coni, delineatori flessibili o paletti di delimitazione, oltre a delimitazioni longitudinali composte da coni o delineatori flessibili (figura 2). Il cantiere deve essere situato

a una distanza sicura dalla fine del raccordo obliquo. In autostrada, per esempio, si raccomanda una distanza di sicurezza di 150 metri tra la fine del raccordo e la zona di lavoro;

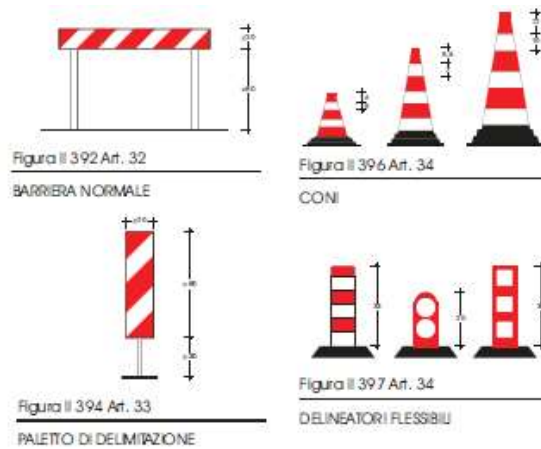


Figura 2_Segnaletica di posizione _ Segnali Complementari

- La segnaletica di fine prescrizione viene posizionata a valle del cantiere con segnali appropriati (figura 3);



Figura II 70 Art. 119

VIA LIBERA



Figura II 71 Art. 119

FINE LIMITAZIONE DI VELOCITA

Figura 3_Segnaletica di Fine Prescrizione

Per il corretto segnalamento della zona di lavoro vengono introdotti anche segnali luminosi, segnali orizzontali temporanei e ulteriori delimitatori.

Nel capitolo del D.M. 10 luglio 2002 (7) concernente i cantieri fissi è riportato anche un paragrafo relativo alla “Organizzazione degli scambi di carreggiata sulle varie tipologie di strade”. In esso sono riportate le procedure da adottare per la riduzione del numero di corsie, la stabilizzazione del flusso di circolazione, lo scambio e la separazione di correnti opposte. Questo approfondimento è reso

necessario poiché per garantire una maggiore sicurezza durante le attività lavorative e fare spazio alla zona di cantiere è essenziale cambiare temporaneamente, per tutta la durata dei lavori, la configurazione ordinaria della strada, per l'appunto imponendo delle riduzioni del numero di corsie, o degli scambi di carreggiata. Scegliere quale soluzione applicare è compito degli enti gestori delle strade a carreggiate separate (tipicamente le autostrade) che devono valutare le diverse opzioni di deviazione del traffico in base al flusso veicolare previsto e alla durata del cantiere.

Per effettuare uno scambio di carreggiata si devono rispettare i seguenti punti:

- a) Si riduce generalmente il numero di corsie;
- b) Il flusso di circolazione si stabilizza;
- c) Una o più corsie vengono scambiate sulla carreggiata opposta;
- d) Le correnti di circolazione opposte sono fisicamente separate;

Per comprendere meglio i passi sopra esplicitati si riportano in seguito due schemi segnaletici (figura 4 e 5) estratti dal D.M. 10 luglio 2002 (7):

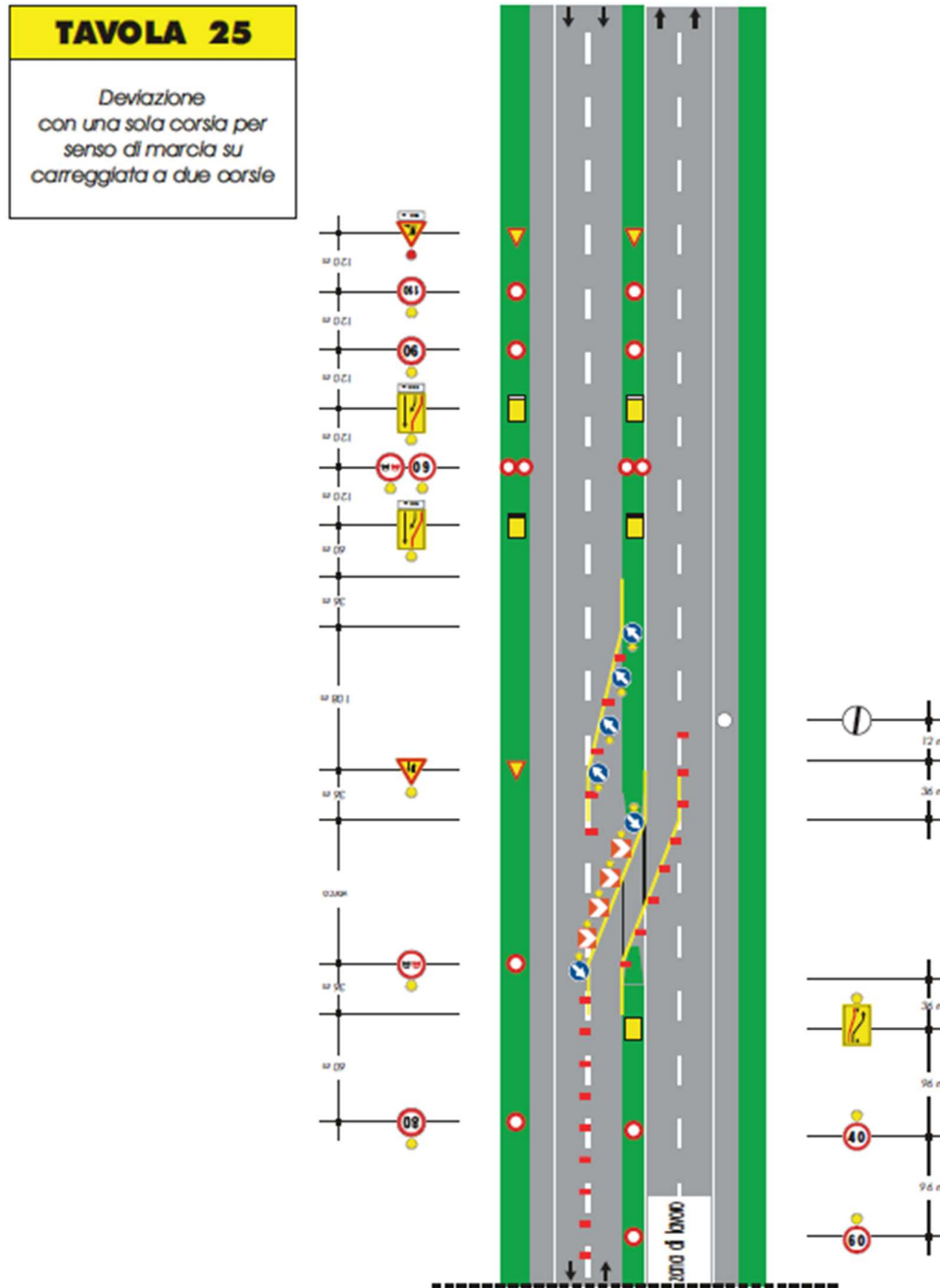


Figura 4_Deviazione con una sola corsia per senso di marcia su carreggiata a due corsie_ Parte terminale dello scambio con rientro dei veicoli deviati sulla carreggiata di appartenenza

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
 Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

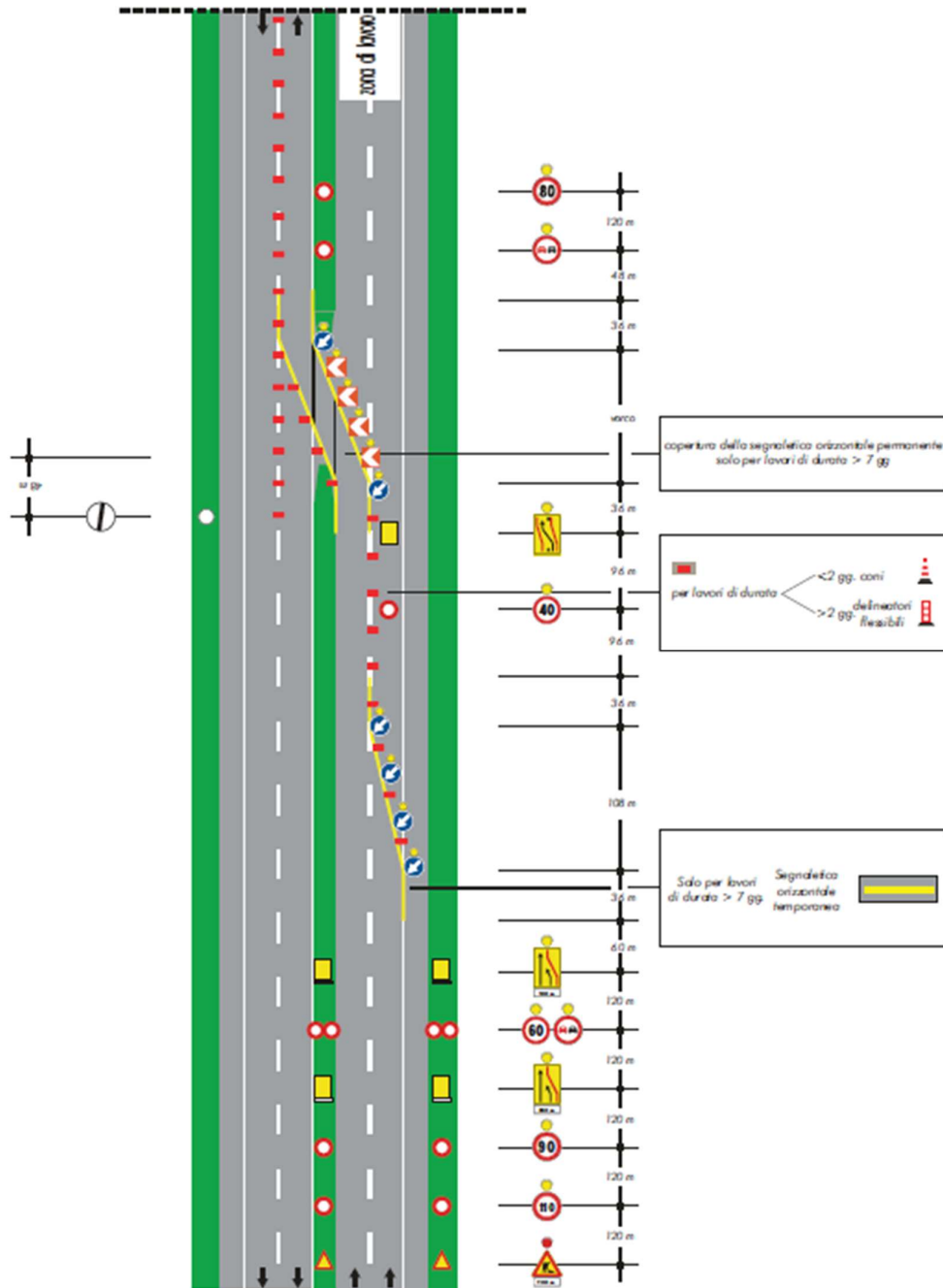


Figura 5_Deviazione con una sola corsia per senso di marcia su carreggiata a due corsie_ Parte iniziale dello scambio di carreggiata

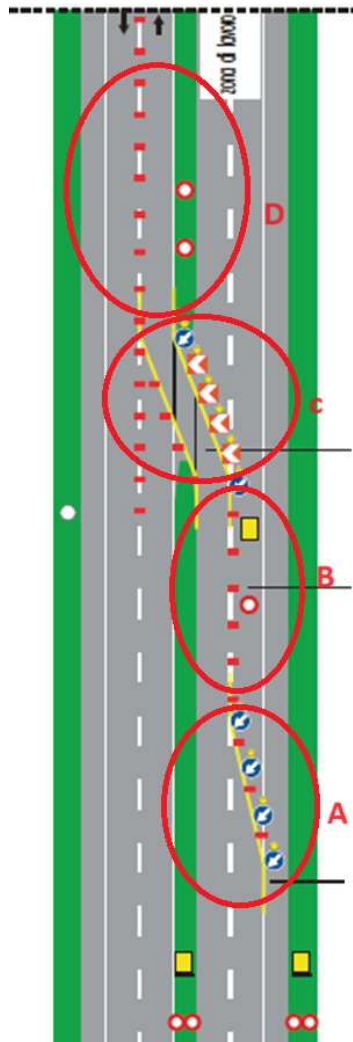


Figura 6_ parte iniziale dello scambio di carreggiata _ A: riduzione numero di corsie; B: stabilizzazione del flusso di circolazione; C: Scambio sulla carreggiata opposta di una corsia; D: separazione delle correnti di circolazione opposte

La figura 6 deriva dalla 5, ma è stata semplificata e modificata per consentire di evidenziare le fasi che compongono uno scambio di carreggiata citate in precedenza. È da notare che è possibile far deviare interamente il traffico sulla carreggiata opposta o, in alcuni casi, solo in parte. Nel primo caso si parla di scambio totale, che può essere a una o a più corsie, mentre nel secondo si parla di scambio parziale, in quanto parte del traffico rimane nella carreggiata interessata dai lavori e parte di esso viene spostato sull'altra carreggiata. Inoltre, è altrettanto importante sottolineare che, nella carreggiata dove viene dirottato il traffico, ovvero nel senso di marcia opposto al cantiere, la riduzione o deviazione delle corsie deve avvenire prima della sezione a doppio senso. Ciò è logico, in quanto fondamentale per garantire la stabilizzazione del flusso di circolazione.

Sul tema degli scambi è ancora doveroso fare due precisazioni. La prima riguarda la separazione delle correnti opposte in caso di doppio senso di circolazione che viene effettuata per mezzo di

dispositivi come coni o delineatori flessibili per cantieri di breve durata e cordoli delimitatori di corsia per quelli di lunga durata. La seconda invece è riferita agli scambi in galleria, i quali sono vietati all'interno del traforo, quindi sia il segnalamento in avvicinamento che la deviazione dei flussi di traffico devono avvenire all'esterno, utilizzando il doppio senso di marcia nel tunnel adiacente.

1.4.2 - CANTIERI MOBILI

Come per i cantieri fissi, anche per quelli mobili il D.M. 10 luglio 2022 (7) fornisce delle indicazioni relative al corretto segnalamento. Un cantiere stradale mobile (figura 7) è caratterizzato da una progressione continua a una velocità variabile da poche centinaia di metri al giorno a qualche chilometro all'ora e tipicamente questa tipologia di cantiere è usata solo su strade con almeno due corsie per senso di marcia. Inoltre, è possibile fare un'ulteriore distinzione tra cantieri in "lento movimento" e cantieri in "avanzamento". Il primo fa riferimento a lavorazioni svolte in continuo, non puntuali, con velocità di avanzamento sostanzialmente omogenea e nelle quali generalmente non sono previsti operatori a terra. La seconda, al contrario, viene usata quando è previsto personale a terra e/o le lavorazioni da eseguire sono di natura discontinua e presume che il lato esposto al traffico sia delineato con l'ausilio di coni in gomma disposti lungo il limite interno della corsia per l'intera estensione dell'area di cantiere.

Le regole per il segnalamento dei cantieri mobili sono in gran parte simili a quelle dei cantieri fissi, prevedendo segnalamento di avvicinamento e di posizione. La differenza principale tra le due tipologie risiede nei sistemi di segnalamento che variano in base alle corsie coinvolte. Per il segnalamento dei cantieri che devono occupare la banchina, la corsia di emergenza o la corsia di destra, per il segnalamento sono usati almeno due dispositivi: un segnale mobile di preavviso e uno di protezione, posizionati rispettivamente sulla banchina o sulla corsia di emergenza. Per i cantieri che occupano anche altre corsie, si impiega una segnaletica diversa, composta da due segnali mobili di preavviso e uno di protezione, posizionati sulla banchina, corsia di emergenza o corsia di destra. La distanza tra le due tipologie di segnali varia tra 200 e 500 m, a seconda del tipo di strada. Questi due segnali si spostano coordinatamente con l'avanzamento dei lavori e possono essere affissi direttamente sui veicoli operativi o su carrello trainato (figura 8).

TAVOLA 40

*Cantiere mobile su
carreggiata a due corsie
chiusura della corsia
di sorpasso*

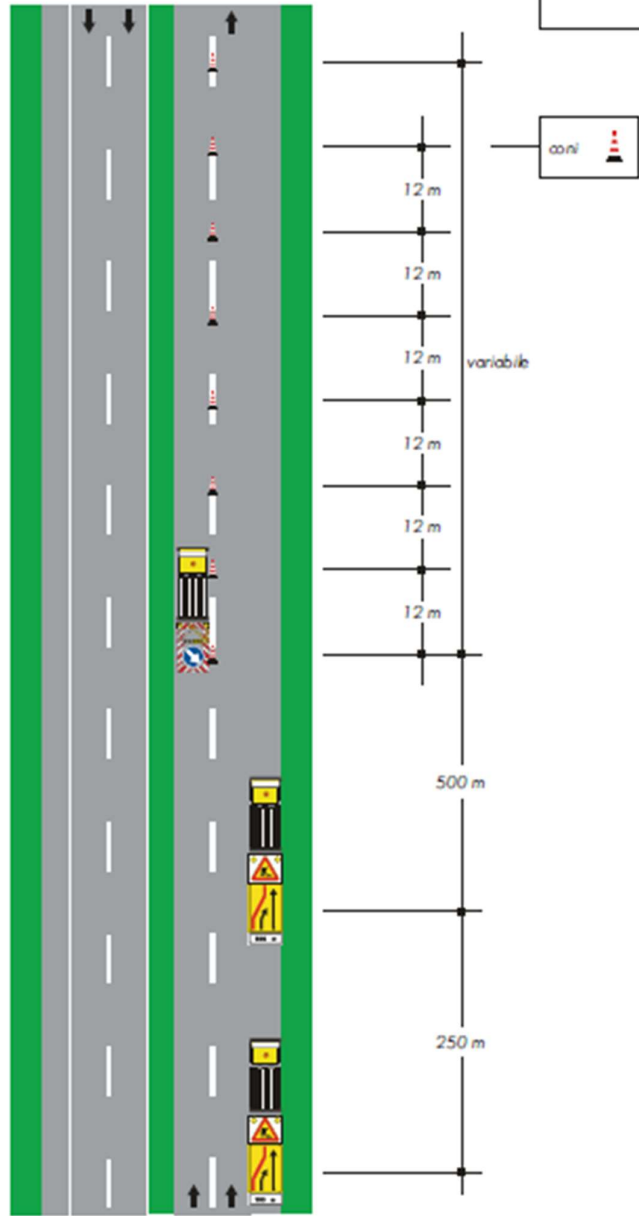


Figura 7_Cantiere mobile su carreggiata a due corsie _ chiusura della corsia di sorpasso _ La segnaletica di preavviso è posta su veicoli sulla corsia di emergenza



Figura II 400 Art. 39
SEGNALE MOBILE DI PREAVVISO



Figura II 401 Art. 39
SEGNALE MOBILE DI PROTEZIONE

Figura 8_Segnali mobili di Preavviso e Protezione montati sui veicoli operativi

L'impiego in galleria di questo tipo di cantiere è consentito solo se in quest'ultima vi sono almeno due corsie per senso di marcia ed una adeguata illuminazione.

CAPITOLO 2 - RISCHI INTERFERENZIALI E DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO

Nel seguente capitolo viene analizzato nel dettaglio un caso studio concernente un incidente stradale avvenuto su un tratto autostradale in corrispondenza di un cantiere. Successivamente, mediante una ricerca bibliografica su siti specializzati in materia di sicurezza nei cantieri stradali, si presenteranno delle evidenze e riflessioni legate alla tematica in esame.

2.1 - CASO STUDIO

In questo paragrafo verrà esaminata la dinamica di un incidente con esito mortale che ha coinvolto un operatore intento a lavorare su una carreggiata autostradale in un cantiere fisso. Le informazioni e i dati utili per l'analisi del caso studio sono stati forniti da Tecne S.p.A.⁶, che si occupa della gestione e progettazione di interventi di manutenzione sui tronchi della rete autostradale gestiti da Autostrade per l'Italia (ASPI) e li ha resi disponibili all'analisi con la speranza di ottenere dei suggerimenti utili per migliorare la situazione esistente e, di conseguenza, incrementare la sicurezza degli operai nei cantieri di sua competenza.

Sebbene il documento redatto da Tecne S.p.A. fornisca le indicazioni relative agli estremi dell'appalto, quali la tipologia dell'intervento, l'anagrafica dell'appalto, l'anagrafica delle imprese, gli indicatori dei lavori e gli allegati relativi all'infortunio redatti dagli organi preposti, l'analisi del caso evidenzierà soltanto gli aspetti ritenuti fondamentali per il seguente studio.

2.1.1 - DESCRIZIONE DEL CONTESTO

L'incidente è avvenuto durante le prime ore della notte nell'aprile del 2022 in corrispondenza di un cantiere stradale per la manutenzione della pavimentazione e delle aree, opere, impianti ed installazioni della piattaforma autostradale, degli svincoli, delle aree di parcheggio e delle pertinenze lungo un tratto autostradale del Sud Italia. I lavori erano stati commissionati da ASPI alla Tecne S.p.A., tanto che le figure professionali incaricate della progettazione e della sicurezza quali il Progettista

⁶La Tecne S.p.A. è una società di ingegneria che coordina le attività di progettazione, di direzione lavori e monitoraggio del piano di manutenzione e investimenti facente parte del gruppo Autostrade per l'Italia (ASPI)

degli interventi, il CSP⁷ e il CSE⁸ erano professionisti dipendenti di quest'ultima, mentre il DL⁹ e il RUP¹⁰ facevano capo all'ASPI stessa. Per quanto concerne la realizzazione dei lavori, invece, era stata affidata tramite accordo Quadro¹¹ a tre ditte esperte nel settore civile e specializzate anche in lavorazioni di costruzione e manutenzione di infrastrutture viarie.

2.1.2 - DINAMICA DELL'INCIDENTE

Sul luogo dell'incidente era presente una squadra di cinque operai facenti capo a una delle imprese esecutrici. Al momento del sinistro gli operatori erano impegnati sulla corsia di sorpasso della carreggiata Sud del tratto autostradale interessato per la posa di delineatori flessibili (figura 2) per delimitare longitudinalmente la zona di cantiere.

Ai cinque lavoratori erano state affidate le seguenti mansioni:

- Un operaio addetto alla guida del mezzo di lavoro per il trasporto dei dispositivi da collocare sulla carreggiata;
- Un operaio, sul cassone del mezzo d'opera, incaricato di passare i dispositivi all'operatore a terra sulla carreggiata;
- Un operaio addetto alla posa dei dispositivi di delimitazione dell'area di cantiere;
- Un operaio situato 100m più indietro rispetto all'area di lavoro per presegnalare la presenza di personale su carreggiata tramite sbandieramento;
- Un operaio addetto alla guida di un veicolo di supporto alle lavorazioni, posto tra la zona di lavoro e lo sbandieratore;

⁷ Coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione.

⁸ Coordinatore per la sicurezza in fase di esecuzione.

⁹ Direttore dei lavori

¹⁰ Responsabile unico di procedimento

¹¹ Accordo Quadro: Tipologia di contratto che stabilisce i termini e le condizioni generali per una collaborazione tra due o più parti, utilizzato di preferenza nel contesto delle acquisizioni pubbliche o degli appalti governativi, può essere anche adottato in ambito privato. La scelta di usare Accordi Quadro negli appalti pubblici, può evitare il bando di gare d'appalto per ogni singola commessa, consentendo alle parti di negoziare condizioni specifiche al momento dell'effettiva esecuzione dell'ordine o della commessa.

Per quanto riguarda il caso studio, l'Accordo Quadro era stato stipulato tra due soggetti privati.

Durante lo svolgimento della propria mansione, l'operaio sulla carreggiata addetto alla posa dei delineatori flessibili è stato investito da un mezzo pesante che aveva invaso l'area di cantiere, uccidendo sul colpo il lavoratore e trascinando il suo corpo esanime per qualche metro sulla carreggiata. Basandosi sulle testimonianze degli operai che prestavano servizio insieme alla vittima, è stato stimato che il mezzo pesante si sia introdotto nell'area di cantiere a una distanza compresa all'incirca tra i 50 e i 100 metri rispetto al punto in cui si trovava la squadra di lavoro. In seguito all'incidente si è tempestivamente recato sul posto il personale sanitario del 112, che non ha potuto far altro che constatare la morte dell'operaio, gli agenti della Polizia Stradale e gli ispettori dell'ASL per condurre gli accertamenti sull'accaduto. Dopo una prima fase di incertezza legata ai tempi e modalità di ripresa dei lavori, questi ultimi sono stati riavviati a cavallo tra aprile e maggio, vale a dire circa un mese dopo l'accaduto.

2.1.3 - VALUTAZIONI DEDUCIBILI DAI VERBALI E DAI DOCUMENTI DEL CSE

Nei due precedenti sottoparagrafi ci si è limitati a riportare le indicazioni che erano presenti nella relazione del CSE e nei documenti redatti dalle imprese esecutrici e da quella affidataria. In questo, invece, si procederà con un'analisi più dettagliata, ragionando sul contenuto delle sopraccitate relazioni e riportando delle osservazioni specifiche su aspetti legati al caso studio in esame.

Il sinistro è avvenuto su un tratto autostradale la cui infrastruttura è composta da due carreggiate, per ciascuna delle quali sono presenti due corsie di marcia più la corsia di emergenza, come raffigurato nelle immagini sottostanti (figure 9 e 10).

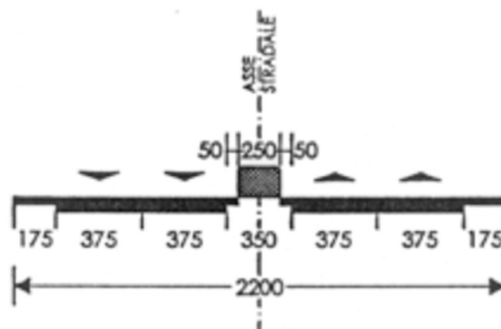


Figura 9_ Sezione strada di categoria A _ Autostrada

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento



Figura 10_ Immagine da Google Maps_ Dettaglio di un tratto autostradale a due corsie per senso di marcia

Dall'analisi dei verbali forniti si comprende che gli operai erano intenti a lavorare sulla piattaforma stradale per predisporre uno scambio di carreggiata, in quanto la carreggiata Nord avrebbe dovuto subire degli interventi di manutenzione, mentre quella Sud, ovvero quella in cui è avvenuto il sinistro, sarebbe stata adibita al passaggio del flusso veicolare nei due sensi. Ecco quindi spiegato come mai il lavoratore vittima dell'incidente stava disponendo i delineatori flessibili nella corsia di sorpasso. Al momento dell'incidente, gli operai si trovavano, quindi, nella zona cerchiata in rosso nella raffigurazione sottostante (figura 11) tratta dal D.M. 10 luglio 2002 (7).

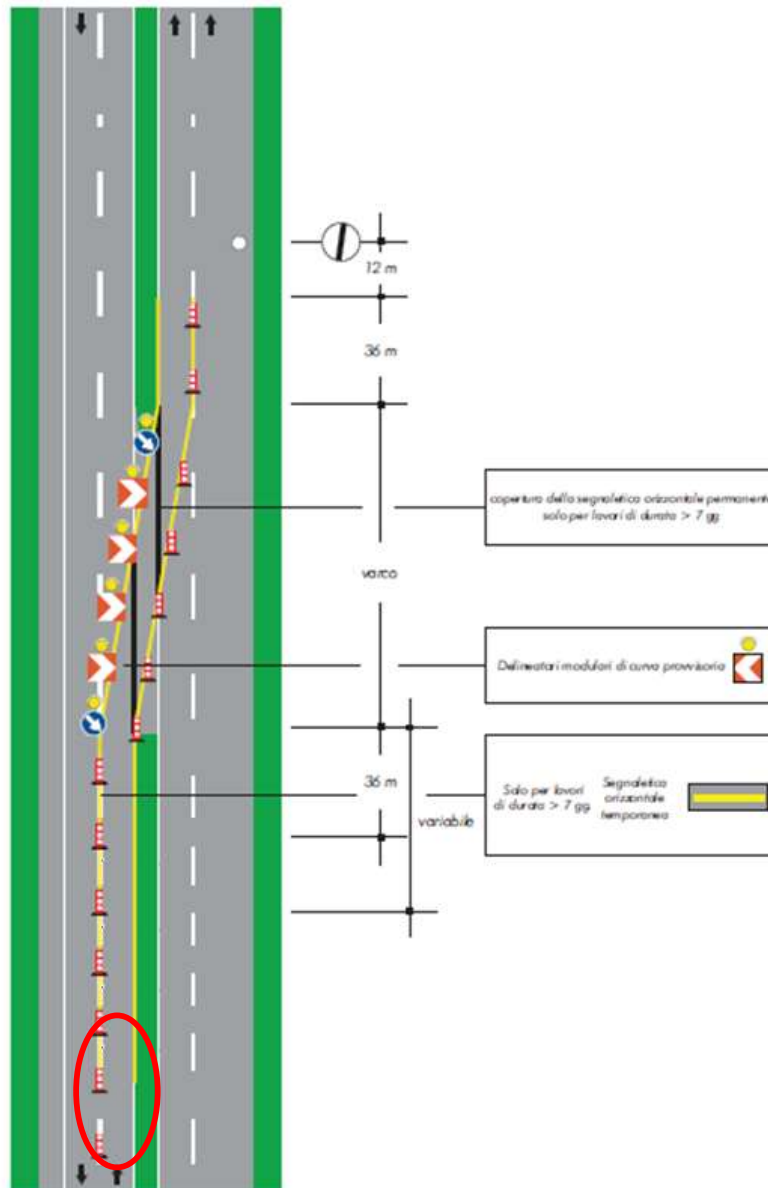


Figura 11_ Schema segnaletico per la configurazione di scambio di carreggiata

Un'altra informazione importante che traspare dall'analisi delle relazioni scritte dal CSE e dal responsabile dell'impresa esecutrice è che, all'istante dell'incidente, gli operatori avevano già predisposto la testata di esclusione della corsia di sorpasso e avevano all'incirca disposto già 1km di segnaletica provvisoria di separazione longitudinale.

Dalla documentazione sull'accaduto non traspare alcuna indicazione specifica su come erano condotti i lavori degli operai. Tuttavia, è ipotizzabile che fossero eseguiti secondo le modalità riportate nel manuale operativo per la disposizione della segnaletica provvisoria di cantiere redatto dal committente, cioè dall'ASPI (9). A dimostrazione dell'ipotesi sopra formulata si presentano, a seguire, cinque immagini estratte dal capitolo 3 delle linee guida sopra citate, che è intitolato

“Norme di comportamento per la posa, movimentazione e rimozione della segnaletica per cantieri”.

Le prime quattro immagini (figure 12, 13, 14 e 15) rappresentano le fasi dell’allestimento del raccordo obliquo, mentre le figure 16 e 17 riproducono le procedure da adottare per la delimitazione longitudinale della corsia di sorpasso, che in questo caso funge da separatore fisico delle due correnti opposte di traffico quando la configurazione di scambio di carreggiata è completa. È da osservare che le procedure riportate nelle seguenti immagini sono da attuare in presenza della corsia di emergenza, come nel caso studio analizzato, mentre in loro assenza le linee guida dell’ASPI riportano altri accorgimenti da seguire.

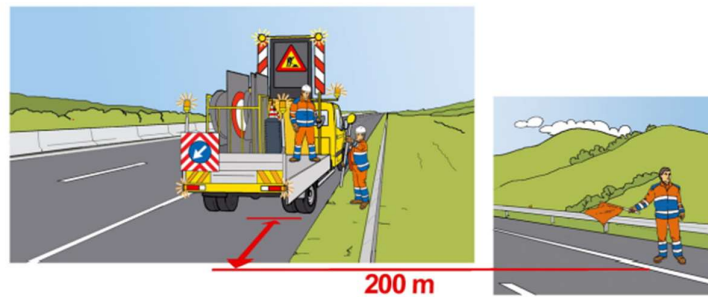


Figura 12_ Chiusura della corsia di sorpasso: arrivo del mezzo d'opera e della squadra di lavoro

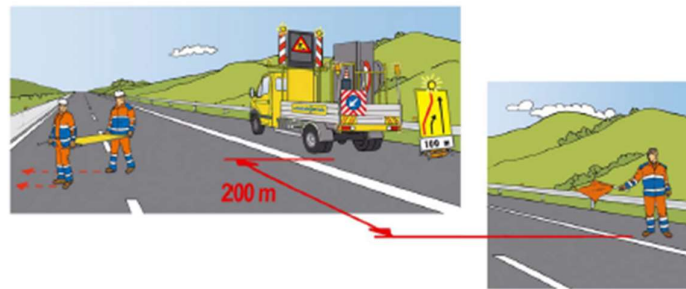


Figura 13_ Chiusura della corsia di sorpasso: trasporto della segnaletica sul margine sinistro della corsia di sorpasso

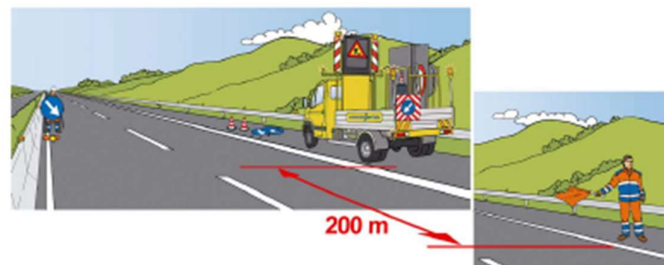


Figura 14_ Chiusura della corsia di sorpasso: Inizio dell'installazione del raccordo obliquo per la chiusura della corsia di sorpasso



Figura 15_ Chiusura della corsia di sorpasso: Installazione del raccordo obliquo completata



Figura 16_ Chiusura della corsia di sorpasso: Inizio della posa dei segnali complementari (coni, delineatori flessibili, ecc...) per la delimitazione longitudinale dell'area di cantiere o per la separazione dei due flussi veicolari contrapposti



Figura 17_ Chiusura della corsia di sorpasso: Corretta procedura e comportamento da attuare per la posa dei segnali complementari

Osservando le immagini sopra riportate (figure dalla 12 alla 17) e ragionando ulteriormente sulla dinamica dell'incidente del caso studio è possibile riportare le seguenti considerazioni:

- Si nota che lo sbandieratore per il presegnalamento del personale al lavoro sulla carreggiata è previsto solo nella prima fase di posizionamento della segnaletica (figure 12, 13 e 14), ovvero durante la predisposizione del raccordo obliquo, mentre durante la fase di

delimitazione longitudinale, essendo già presente la testata di chiusura della corsia di sorpasso, è assente (figure 15, 16 e 17). Tuttavia, nelle relazioni della dinamica del caso studio si indica che un operaio addetto allo sbandieramento era presente sul luogo dell'incidente nonostante il raccordo obliquo fosse già stato montato.

- Nel caso di presenza della corsia di emergenza l'unico mezzo d'opera previsto è quello principale usato per il trasporto della segnaletica provvisoria di cantiere in loco come attestano tutte le figure oggetto di analisi (figure dalla 12 alla 16). Tuttavia, le informazioni contenute nelle relazioni del sinistro indicano la presenza di un secondo mezzo di supporto collocato tra il luogo dell'incidente e lo sbandieratore.

Va comunque tenuto conto che le immagini oggetto dell'analisi sono riferite a condizioni diurne di lavoro, mentre il sinistro è avvenuto di notte (h 01:30). Si può quindi ipotizzare che la decisione di aggiungere un secondo mezzo di supporto e l'impiego di un operaio addetto allo sbandieramento sia motivata dal particolare momento della giornata. Consultando, infatti, il paragrafo 8.4 del D.M. 10 luglio 2002 (7) relativo proprio al segnalamento temporaneo di notte e in condizioni di scarsa visibilità, è riportato che durante il lavoro notturno la segnaletica di cantiere deve essere "rafforzata".

Va altresì considerato che nella relazione redatta dal CSE è riportato che, in seguito a sette verifiche da lui condotte sul POS¹² delle imprese esecutrici, in quattro casi aveva contestato delle non conformità. La presenza delle non congruità tra il PSC¹³ e il POS è un aspetto di fondamentale importanza in quanto lascia presagire che nei documenti redatti dalle imprese esecutrici dei lavori ci fossero carenze legate alla sicurezza. Tuttavia, non si specifica in cosa consistessero queste non conformità e dunque non è possibile ritenerle concause dell'incidente.

Per concludere l'analisi sulla dinamica del caso studio è doveroso considerare che gli altri operai coinvolti nell'incidente hanno testimoniato che la vittima si era accorta dell'invasione nell'aera di cantiere da parte del mezzo pesante, purtroppo troppo tardi per mettersi in salvo dato che non erano

¹² POS = Piano Operativo di Sicurezza; Documento specifico che dettaglia le misure operative di sicurezza che devono essere seguite durante l'esecuzione dei lavori. Si concentra sulle procedure specifiche da seguire sul cantiere per garantire la sicurezza del personale e dei terzi, nonché la conformità alle normative vigenti.

¹³ PSC = Piano di Sicurezza e Coordinamento; documento che viene redatto in fase di progettazione e realizzazione di lavori edili o di ingegneria civile. Il suo obiettivo principale è garantire la sicurezza durante tutte le fasi del progetto, identificando i rischi e le misure preventive da adottare.

presenti apparecchiature in grado di segnalare l'intrusione. La necessità di dotare i lavoratori sulla piattaforma stradale di dispositivi innovativi in grado di identificare l'invasione dell'area di cantiere da parte di un mezzo e di avvisare prontamente gli operatori sarà alla base delle ricerche condotte per la redazione del quarto capitolo del seguente elaborato.

2.2 - ANALISI DELL'INCIDENTALITA' IN CORRISPONDENZA DEI CANTIERI E RELATIVE CAUSE

Attraverso l'analisi di articoli scientifici sulla sicurezza nei cantieri stradali, si intende esplorare i fattori, i parametri e le cause che possono influenzare la pericolosità e l'incidentalità in prossimità dei cantieri autostradali.

2.2.1 - FATTORI CHE INCREMENTANO IL RISCHIO INCIDENTE IN CORRISPONDENZA DI CANTIERI AUTOSTRADALI

Innanzitutto, conviene analizzare quali implicazioni comporti la presenza di un cantiere stradale sul traffico ordinario. Per far ciò si è consultato l'articolo intitolato "Effects of stationary work zones on motorway crashes" (10). I ricercatori si sono posti l'obiettivo di valutare le variazioni nella frequenza degli incidenti attesi correlati all'installazione di cantieri stradali in autostrada e hanno quindi condotto un'analisi dettagliata su 15.570 cantieri stradali fissi collocati sulle infrastrutture italiane gestite da ASPI, integrando dati sull'incidentalità, sul flusso veicolare e su differenti tipologie di layout di cantiere. Tale ricerca è stata effettuata con lo scopo di costruire un database e stimare i fattori di modifica degli incidenti¹⁴ (CMFs) associati a diverse configurazioni della strada o della zona di lavoro.

¹⁴ Il termine "Crash Modification Factors" (CMFs) si riferisce a fattori utilizzati nell'ambito della sicurezza stradale e del traffico. I CMFs sono coefficienti che vengono applicati per stimare l'effetto di una specifica modifica o intervento su una strada o un incrocio sul numero di incidenti stradali. In sostanza, i CMFs forniscono una misura quantitativa dell'impatto di cambiamenti nelle condizioni stradali, nella segnaletica, nella geometria stradale o in altre variabili sul rischio di incidenti. Questi fattori sono spesso utilizzati nelle analisi di sicurezza stradale per valutare l'efficacia di misure di miglioramento della sicurezza stradale. Ad esempio, se si apporta una modifica a un'intersezione stradale, come l'installazione di semafori o la modifica della segnaletica stradale, i CMFs possono essere applicati per stimare quanto questa modifica potrebbe influenzare la frequenza e la gravità degli incidenti in quel luogo. In breve, i CMFs sono uno strumento utile per valutare gli impatti delle modifiche apportate alle infrastrutture stradali sulla sicurezza del traffico.

Di seguito si riportano due immagini (figura 18 e 19) estratte dall'articolo per mostrare degli esempi di configurazione di cantiere che sono state usate per condurre le indagini.

Stationary work zone	Description	Simplified sketch
1_Slow2	Closure of the slow lane with traffic diverted to the overtaking lane	
2_Fast2	Closure of the overtaking lane with traffic diverted to the slow lane	
3_Emergency2	Closure of the emergency lane (outside paved shoulder)	
4_Cross2(0+1)	Closure of the slow lane with traffic diverted to the overtaking lane; closure of the overtaking lane and total diversion of traffic to the opposite carriageway through a single-lane crossover	
5_Fast2(2)	Closure of the overtaking lane with traffic diverted to the slow and to the emergency lanes	
6_Cross2(1+1)	Closure of the slow lane with traffic diverted to the overtaking lane; partial diversion of traffic to the opposite carriageway through a single-lane crossover (the driver is allowed to choose whether to stay on the overtaking lane or move to the opposite carriageway)	

Figura 18_ Configurazioni di aree di cantiere analizzate nell'articolo per autostrada con due corsie per senso di marcia

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

Stationary work zone	Description	Simplified sketch
7_Slow3	Closure of the slow lane with traffic diverted to the middle lane	
8_Emergency3	Closure of the emergency lane (outside paved shoulder)	
9_Fast3	Closure of the overtaking lane with traffic diverted to the middle lane	
10_Slow&Middle3	Closure of the slow lane with traffic diverted to the middle lane; closure of the middle lane with traffic diverted to the overtaking lane	
11_Middle&Fast3	Closure of the overtaking lane with traffic diverted to the middle lane; closure of the middle lane with traffic diverted to the slow lane	
12_Cross3(0+1)	Closure of the slow lane with traffic diverted to the middle lane; closure of the middle lane with traffic diverted to the overtaking lane; closure of the overtaking lane and total diversion of traffic to the opposite carriageway through a single-lane crossover	
13_Cross3(1+1)	Closure of the overtaking with traffic diverted to the middle lane; closure of the middle lane and partial diversion of traffic to the slow lane and to the opposite carriageway through a single-lane crossover (the driver is allowed to choose whether to move to the slow lane or move to the opposite carriageway)	
14_Middle&Fast3 (2)	Closure of the overtaking with traffic diverted to the middle lane; closure of the middle lane with traffic diverted to the slow lane and to the emergency lane	
15_Fast3 (3)	Closure of the overtaking lane with traffic diverted to the middle lane, to the slow lane and to the emergency lane	

Figura 19_ Configurazioni di aree di cantiere analizzate nell'articolo per autostrada con tre corsie per senso di marcia

Attraverso le ricerche condotte per la scrittura di questo articolo gli autori hanno desunto che, durante il periodo di installazione del cantiere, la frequenza generale attesa degli incidenti aumenta significativamente registrando un aumento del 33% per gli incidenti con feriti e del 66% per gli incidenti con danni a proprietà. Inoltre, si osserva una variazione considerevole nei valori dei fattori di modifica degli incidenti (CMF) tra diverse configurazioni della zona di lavoro. Questi ultimi, infine, possono essere usati dagli operatori stradali per valutare gli impatti attesi sulla sicurezza delle diverse configurazioni delle zone di lavoro. Per esempio, l'analisi sugli incidenti fatali e con lesioni ha rivelato

che il numero di corsie deviate verso la carreggiata opposta è un elemento cruciale per un design ottimale degli scambi di carreggiata, che le configurazioni con deviazione totale del flusso di traffico sembrano offrire condizioni più sicure per i conducenti rispetto a quelle in cui viene solo parzialmente deviato.

A seguire vengono approfonditi altri fattori che influenzano il verificarsi di incidenti in corrispondenza dei cantieri stradali, riportando e analizzando le osservazioni e conclusioni tratte da alcuni articoli accademici.

L'articolo "Fatal and Injury Crash Characteristics in Highway Work Zones" (11) si concentra sullo studio e il confronto dei fattori che caratterizzano gli incidenti fatali da quelli con feriti. Gli autori hanno esaminato le caratteristiche di sinistri avvenuti tra il 1992 e il 2004 sui cantieri autostradali in Kansas (USA). Dall'analisi hanno ricavato che:

- Gli incidenti fatali sono legati ad un eccesso di velocità, mentre i sinistri con solo feriti avvengono su autostrade con più di tre corsie per senso di marcia, da cui si deduce che esiste una relazione tra questa tipologia di incidenti e un grande volume di traffico.
- Per quanto riguarda i fattori che contribuiscono agli incidenti nell'articolo è riportato un grafico che viene proposto anche qui di seguito:

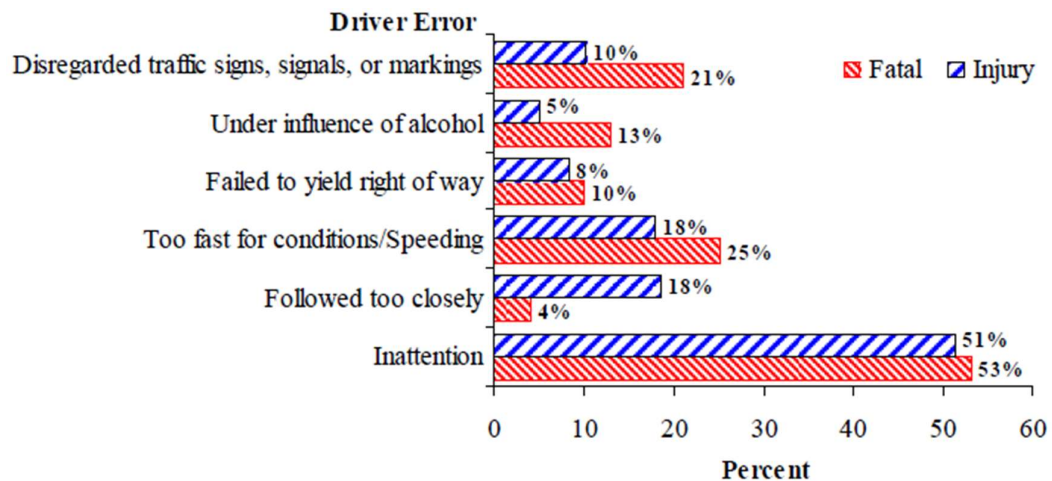


Figura 20_ Frequenza percentuale degli incidenti mortali e con infortuni dovuti a errori dei conducenti

Nel grafico sono riportate le percentuali di frequenza di incidenti causati dai diversi comportamenti errati adottati dai conducenti e la loro influenza su decessi o ferimenti. Le voci riportate nel grafico sono: disattenzione; eccesso di velocità; non rispetto della segnaletica; guida sotto l'effetto dell'alcool, il non concedere la precedenza; non mantenere

la distanza di sicurezza. Si ricorda che molti di questi fattori erano stati già osservati nell'analisi svolta sull'incidentalità in Italia con i dati dell'INAIL e dell'ASAPS riportati nel primo capitolo di questa trattazione.

- Gli autori hanno evidenziato anche la presenza di una geometria complicata della strada dovuta al cantiere stradale (come dimostrato anche in precedenza dall'articolo "Effects of stationary work zones on motorway crashes" (10)), le condizioni di illuminazione sfavorevoli e la presenza di mezzi pesanti coinvolti nell'incidente sono tutti fattori aggiuntivi che incrementano la severità dei sinistri.

Tutte queste considerazioni si adattano molto bene al caso studio analizzato nel precedente paragrafo, in quanto il veicolo coinvolto era un mezzo pesante e l'incidente è avvenuto di notte, quindi in condizioni di scarsa visibilità dovute alla poca illuminazione.

- Nell'articolo compare anche un grafico molto interessante che rappresenta la ripartizione degli incidenti autostradali in corrispondenza dei cantieri per diverse fasce orarie. Come attestato dal grafico, la fascia oraria tra le ore 10:00 e le 16:00 presenta più casi di incidenti con soli feriti in quanto, come già citato in precedenza, gli incidenti con solo feriti sono legati a grandi flussi veicolari e in questa fascia oraria ci si aspetta di avere un traffico intenso. Al contrario, sempre dallo stesso grafico, appare evidente che per quanto riguarda gli incidenti fatali si ha una fetta sostanziosa degli stessi nelle ore notturne, ovvero nella fascia oraria tra le 20:00 e le 06:00, ore della giornata caratterizzate da una scarsa visibilità.

Ritornando al caso studio, va considerato che l'incidente analizzato è avvenuto proprio nelle ore notturne, in un tratto autostradale in piena campagna e privo di illuminazione artificiale.

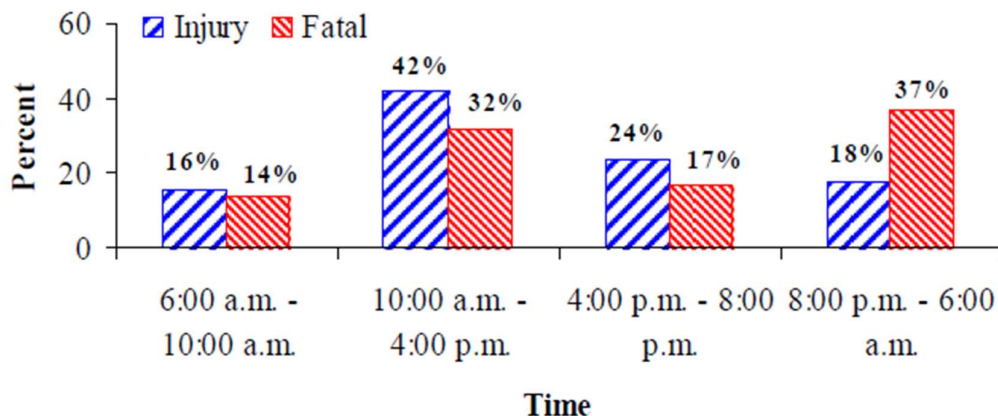


Figura 21_Frequenza percentuale degli incidenti mortali e con infortuni suddivisi in fasce orarie giornaliere

Il confronto tra la severità degli incidenti fatali in condizioni diurne e notturne è il tema di un altro articolo intitolato “Fatal Accidents in Nighttime vs. Daytime Highway Construction Work Zones” (12). Per la redazione di questo articolo gli autori hanno analizzato il numero di incidenti avvenuti in corrispondenza di cantieri autostradali nello stato dell’Illinois (USA) tra il 1996 e il 2001.

Date le diverse condizioni tra giorno e notte, per attuare un confronto che fornisse dei risultati credibili, il numero di incidenti avvenuti di notte è stato corretto con un fattore di calibrazione che tenesse conto di diversi parametri quali:

- la numerosità dei cantieri stradali di giorno vs quella di notte, dato che di giorno il numero di cantieri attivi è di molto maggiore;
- la differente dimensione del flusso di traffico tra il giorno e la notte;
- il numero di ore di osservazione, dato che la finestra temporale presa in considerazione è più ampia di giorno che di notte, cioè h06:00 - h20:00 contro h20:00 - h06:00.

Ne è quindi emerso che si ha una severità maggiore negli incidenti di notte.

Successivamente, per assicurarsi della certezza della loro analisi, gli autori hanno ottenuto che vi è evidenza statistica che la costruzione di notte è circa cinque volte più pericolosa rispetto a quella diurna.

Nonostante ciò, secondo gli autori dell’articolo, negli ultimi anni in molti stati si è continuato a incrementare il numero di cantieri notturni per via dei vantaggi da loro portati, quali ad esempio attenuare l’impatto delle operazioni di costruzione sul pubblico viaggiante, portare a un miglioramento della produttività, operare in condizioni di lavoro più fresche rispetto alle temperature diurne durante i mesi estivi e ottenere cicli di consegna dei materiali più rapidi.

Nel seguente articolo “Highway Accidents in Construction and Maintenance Work Zones” (13), gli autori hanno basato il loro studio su dati riferiti a incidenti autostradali in corrispondenza di cantieri nel Kentucky (USA) tra il 1983 e il 1986 e hanno constatato che tali sinistri sono tipicamente più severi rispetto ad altri tipi di incidenti, soprattutto se coinvolgono mezzi pesanti e/o se avvengono di notte. Inoltre, hanno rilevato che la percentuale di mezzi pesanti coinvolti in incidenti in prossimità di cantieri è significativamente superiore rispetto a quella riscontrata in altre tipologie di sinistri stradali (25.7% contro 9.6%). Tali risultati corrispondono alle informazioni riportate nei grafici 1, 21, 27, 36, 37 e 38 del capitolo 1 e relative alla situazione italiana. Il confronto dei dati presentati nell’articolo degli anni 80 con quelli italiani raccolti negli anni tra il 2020 e il 2022 fornisce uno spunto

di riflessione sulla gravità della problematica che a distanza di 40 anni apparentemente non ha conseguito nessun miglioramento.

Anche in questo articolo sono stati identificati come i fattori che influenzano maggiormente il verificarsi degli incidenti stradali la disattenzione degli autisti, il non dare la precedenza e il non rispetto della distanza di sicurezza, l'eccesso di velocità e, in piccola parte, anche all'uso di sostanze alcoliche. Come già rimarcato nel corso della trattazione, sono tutti fattori legati a comportamenti errati adottati dai conducenti. Un'ulteriore informazione interessante fornita dall'articolo riguarda il tipo più comune di incidente in prossimità di cantieri autostradali, che consiste principalmente in sinistri tra veicoli, spesso sotto forma di tamponamenti o incidenti a veicolo isolato. Inoltre, viene indicato che la zona di presegnalamento del cantiere è quella maggiormente interessata dagli incidenti e che i sinistri più severi coinvolgono un lavoratore, proprio come nel caso studio analizzato.

Un altro articolo che è stato oggetto di studio per la redazione di questo elaborato è relativo a dati su incidenti avvenuti nello stato dell'Ohio (USA) avvenuti tra il 1982 e il 1986 e intitolato "Detailed Study of Accident Experience in Construction and Maintenance Zones" (14), certifica che gli incidenti a veicoli multipli sono più frequenti di giorno. Infatti, dato che durante il giorno il flusso veicolare è maggiore gli incidenti più frequenti sono i tamponamenti e gli incidenti nei quali una macchina colpisce la fiancata di un altro veicolo; mentre di notte gli incidenti più comuni sono quelli a veicolo isolato, proprio come è successo nel caso studio analizzato in questo elaborato, ovvero l'incidente è avvenuto con un solo mezzo, che in seguito ha investito un operaio.

Infine, l'analisi dell'articolo "Managing Work Zone Safety during Road maintenance and Construction Activities: Challenges and Opportunities" (15) riporta delle informazioni relative agli incidenti che coinvolgono mezzi che invadono la zona di lavoro. Gli autori hanno analizzato 75 sinistri stradali avvenuti nel Southeast Michigan (USA) e hanno verificato che nel 45% (34 eventi) dei casi sono causati dall'intrusione di veicoli, mentre nel 55% (41 eventi) si tratta di incidenti interni al cantiere, dovuti principalmente a errori degli operai.

Secondo gli autori gli incidenti con intrusione di mezzi nel cantiere con esito fatale sono il risultato di una concausa del posizionamento improprio della segnaletica provvisoria di cantiere e di comportamenti non sicuri adottati dai conducenti.

Per quanto riguarda il non corretto controllo del traffico gli autori hanno riscontrato nei 34 incidenti con intrusione le seguenti anomalie:

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

- assenza di cartelli di riduzione di velocità (44.12%);
- mancanza di barriere temporanee (20,6%), come verificatosi nel caso studio;
- assenza dell'assorbitore d'urto montato sul veicolo di servizio (11.76%);
- presenza solo parziale della segnaletica di cantiere (2.8%).

Un'ulteriore interessante informazione fornita da questo articolo relativa agli incidenti dovuti all'invasione di un veicolo nella corsia dei lavori concerne la posizione del cantiere in cui avviene il sinistro:

- 13 incidenti avvenuti nella zona di lavoro vera e propria (38.24%);
- 9 incidenti avvenuti nella zona di preavviso dei lavori (26.47%);
- 3 incidenti avvenuti in corrispondenza del raccordo obliquo (8.83%);
- 2 incidenti nella zona di fine lavori (5.88%);
- 7 incidenti in altre zone (20.58%).

Gli autori hanno inoltre riscontrato nel loro campione di incidenti con intrusione di veicoli nell'area di cantiere che:

- nel 52.94% dei casi (18 sinistri) l'incidente accadeva in autostrade con 2 corsie;
- nel 23.53% (8 incidenti) in autostrade con 4 corsie;
- nel 17.65% (6 sinistri) in autostrade con 6 corsie;
- nel 5.88% (2 sinistri) in autostrade con 3 corsie.

e che :

- 26 incidenti (76.47%) accadevano per eccesso di velocità;
- 2 incidenti (5.88%) accaduti per l'abuso di alcool;
- 6 incidenti con cause non specificate.

2.2.2 - LA PERCEZIONE DEI CONDUCENTI SULLA PRESENZA DEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Mentre nella prima parte di questo paragrafo sono state prese in considerazione le implicazioni derivanti dalla presenza di un cantiere stradale sull'ordinaria viabilità risultanti dall'analisi dei dati statistici delle cause, ci si vuole ora soffermare su un aspetto ugualmente importante legato al rischio incidente, ovvero la percezione che i conducenti, professionisti o meno, hanno della presenza del

cantiere, partendo dai due articoli “DRIVERS PERCEPTION OF HIGHWAY WORK ZONE RISKS” (16) e “Truck Drivers' Concerns in Work Zones: Travel Characteristics and Accident Experiences” (17). Il primo dei due articoli riportati è incentrato sulla percezione del rischio legata alla presenza del cantiere stradale avvertita da comuni cittadini fruitori dell’infrastruttura, mentre il secondo si focalizza sull’analisi di una popolazione di autisti di mezzi pesanti, ovvero di persone che guidano per professione.

Per quanto riguarda il primo articolo analizzato (16), i dati sono stati raccolti attraverso una simulazione di guida e tramite le risposte a un questionario. L’intento degli autori dell’articolo era quello di studiare la relazione tra la percezione del rischio dei conducenti che viaggiano nei pressi delle zone di lavoro in autostrada e il comportamento che essi adottano, per esempio la velocità di marcia, e l’efficacia delle misure temporanee di controllo del traffico. La popolazione sulla quale si è condotto lo studio era una molto variegata, composta da membri di entrambi i sessi, con diverse età e con diversi gradi di esperienza alla guida.

Il questionario era incentrato principalmente su domande inerenti l’esperienza nell’arco delle 24 ore della popolazione di conducenti analizzata quali, per esempio, quanto spesso si spostava con il proprio veicolo e quante volte gli capitava di passare attraverso una zona dell’infrastruttura interessata da un cantiere, di giorno oppure di notte. Inoltre, erano anche presenti delle domande legate a una serie di fattori che possono influenzare la percezione del rischio incrementandola o diminuendola, come, per esempio, la velocità adottata dai conducenti, il loro comportamento e la presenza di veicoli delle forze dell’ordine. Fattori che in seguito saranno dettagliati in un grafico (grafico 43).

Si riportano nel frattempo i grafici estratti dall’articolo analizzato realizzati a partire dalle risposte ottenuto con il questionario:

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

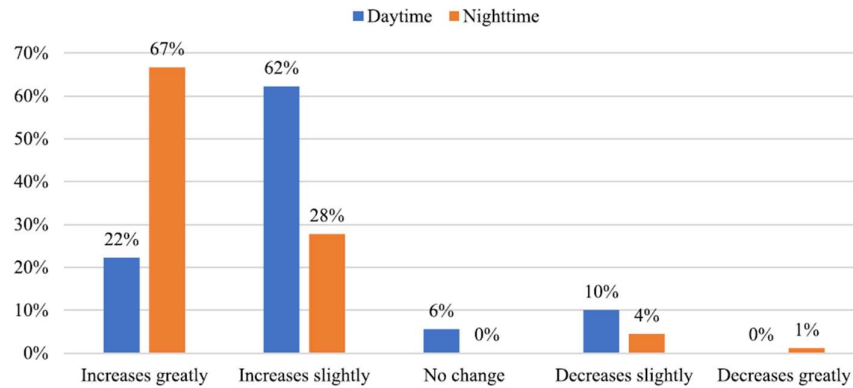


Grafico 41_ Confronto tra la percezione del rischio in condizioni ordinarie e in corrispondenza del cantiere autostradale

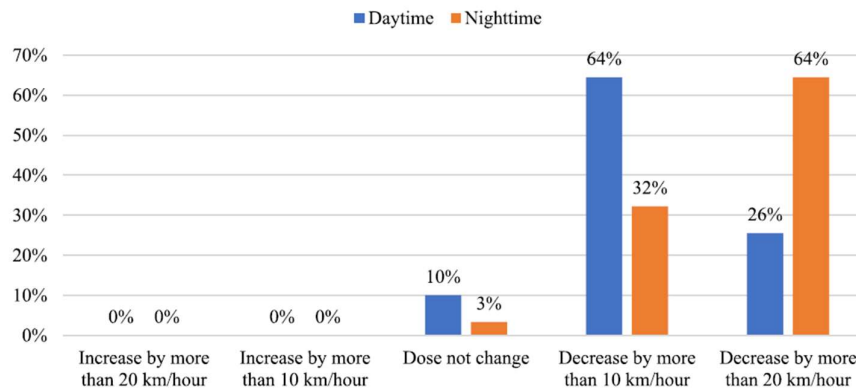


Grafico 42_ Variazione della velocità adottata durante il passaggio attraverso un cantiere autostradale

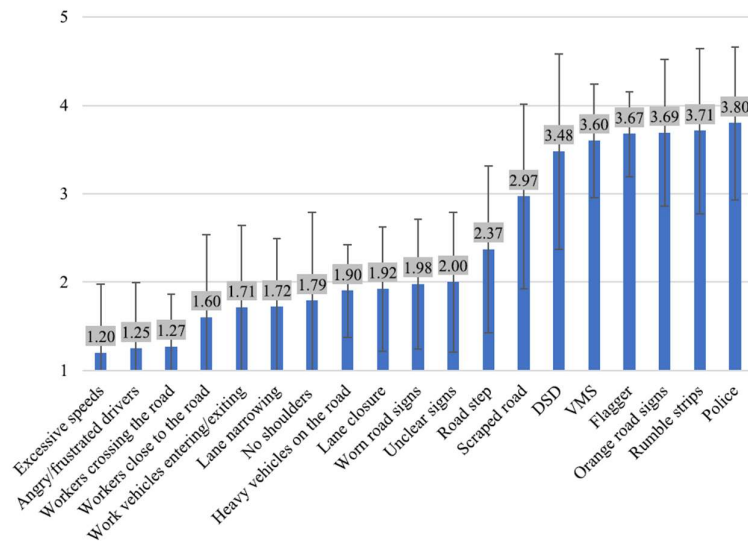


Grafico 43_ Fattori medi di rischio percepiti dalla utenza stradale in corrispondenza di cantieri autostradali

I risultati del questionario mostrano come la maggior parte dei partecipanti percepisca la guida in corrispondenza dei cantieri stradali come situazione più pericolosa, soprattutto di notte (grafico 41).

Per quanto riguarda invece la velocità adottata dai partecipanti durante il superamento del cantiere autostradale (grafico 42), si evidenzia che nessuno dichiara di incrementarla, si osserva infatti che,

mentre solo alcuni la mantengono invariata, la maggior parte la diminuisce, ma con un decremento maggiore durante la notte rispetto al giorno.

Nel grafico 43 viene rappresentato il punteggio raggiunto dai 19 attributi che sono stati testati nel questionario. Più basso è il punteggio e più alto è il rischio percepito di quel fattore¹⁵, quindi il grafico fornisce una indicazione su quali elementi sono percepiti dai fruitori della strada come fattori che incrementano o diminuiscono la pericolosità della guida in autostrada in corrispondenza di un cantiere stradale. Nel dettaglio, i fattori che vengono percepiti come pericolosi e/o incrementanti la pericolosità sono:

- Velocità eccessiva;
- Comportamenti non consoni alla guida: conducenti arrabbiati e frustrati;
- Lavoratori intenti ad attraversare la carreggiata;
- Lavoratori intenti a lavorare in zona adiacente alla strada;
- Restringimento delle corsie di marcia;
- Assenza della corsia di emergenza;
- Presenza di mezzi pesanti sulla strada;
- Chiusura di una corsia di marcia;
- Presenza di segnaletica poco chiara;
- Strada usurata.

Al contrario, gli utenti percepiscono i seguenti elementi come fattori migliorativi e cioè che portano un incremento positivo alla sicurezza:

- Segnale di velocità dinamico (DSD¹⁶);
- Segnale a messaggio variabile (VMS¹⁷);
- Sbandieratori;
- Segnaletica temporanea orizzontale di cantiere;
- Rallentatori sonori (Rumble Strips);
- Presenza della Polizia/forze dell'ordine.

¹⁵ Se il fattore registra un valore più alto di 3, allora esso è percepito dall'utenza della strada come un parametro che incrementa la sicurezza. Al contrario, se il fattore presenta un valore minore di 3, esso è percepito come un incremento del rischio.

¹⁶ Dynamic Speed Display Signs.

¹⁷ Variable Message Signs.

Gli autori, in seguito, hanno eseguito dei confronti e trovato una correlazione tra i valori dei fattori studiati nella ricerca (grafico 43) con i valori dei CMFs¹⁸ (Crush Modification Factor) presenti in letteratura sintetizzati nella sottostante tabella 13.

HWZ attributes	Average risk perception	CMF
Lane narrowing	1.72	1-1.29 (Depending on lane width)
No shoulders	1.79	1.21
Lane closure	1.92	1.26-1.9
DSD	3.48	0.98
VMS	3.60	0.84
Flagger	3.67	0.90
Police	3.8	0.56

Tabella 13_ Tabella di confronto: Fattori di rischio vs. CMFs

Per esempio, osservando l'attributo chiamato Police¹⁹, si ha un valore medio di rischio percepito di 3.8, il quale indica che le persone sottoposte al questionario hanno riconosciuto che la presenza della Polizia in corrispondenza di un cantiere rappresenta un fattore che incrementa la sicurezza e da un effetto benefico alla percezione del rischio. Analogamente, il CMFs assegna un valore minore di 1, ciò significa che anche per la letteratura la presenza della Polizia in corrispondenza di un cantiere stradale rappresenta un fattore che comporta una riduzione del rischio di incidenti.

In ultimo, i candidati hanno partecipato ad un test di guida con simulatore, studiato per osservare gli effetti indotti dalla presenza dell'area di cantiere sulla velocità di marcia adottata dai partecipanti. Il test consisteva in una guida per 6km su una strada interurbana a due carreggiate con due corsie per senso di marcia. Ogni autista ha guidato attraverso 8 scenari particolari caratterizzati da alcuni fattori che erano stati precedentemente analizzati con il questionario.

¹⁸CMFs: Vedi nota n°14

¹⁹ Polizia

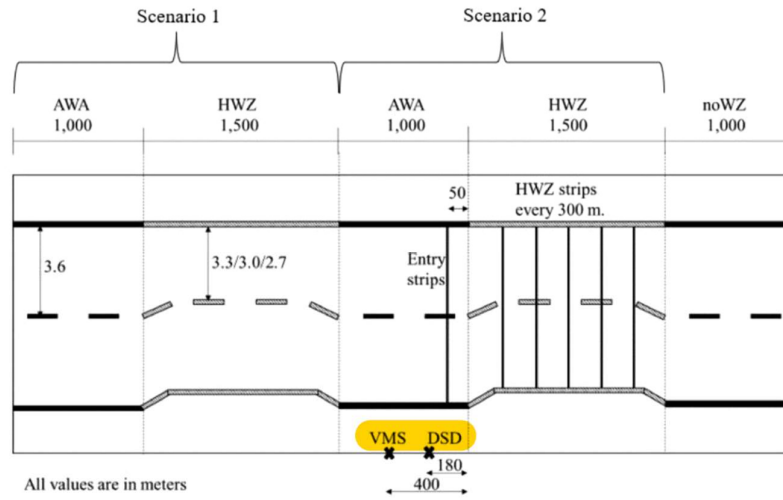


Figura 22_Layout della strada rappresentata nella simulazione di guida

Grazie al test al simulatore, gli autori dell'articolo hanno osservato che i conducenti che avevano segnalato nel questionario una percezione maggiore del rischio quando transitavano attraverso il cantiere autostradale procedevano a velocità più basse, mentre coloro che guidavano a ritmi più sostenuti erano quelli che nel questionario avevano segnalato una maggiore esperienza di guida attraverso le zone di lavoro. Gli autori dell'articolo sono quindi giunti alla conclusione che per aumentare la sicurezza in corrispondenza dei cantieri autostradali è utile aumentare la consapevolezza dei rischi che si possono riscontrare nell'attraversare un'area di cantiere; in altre parole, considerato che la percezione del rischio influenza la velocità adottata dai conducenti dei mezzi, un incremento della percezione del rischio si può tradurre in un incremento della sicurezza in corrispondenza dei cantieri stradali.

Per quanto riguarda invece il secondo articolo (17), esso si focalizza sulla percezione della presenza del cantiere e dei fattori legati al rischio. In questo caso la ricerca è stata condotta sottoponendo ai candidati, una popolazione di 930 camionisti dell'Illinois, un questionario composto da 40 domande che li interpellava su diversi aspetti relativi alla loro vita professionale, quali:

- le caratteristiche personali;
- l'esperienza lavorativa;
- le caratteristiche del veicolo guidato;
- le loro considerazioni sui cantieri stradali e i sistemi di controllo;
- eventuali incidenti subiti e causati;
- situazioni di guida difficili incontrate nel tempo;
- possibili suggerimenti su come migliorare il flusso di traffico nelle aree di lavoro.

Gli autori dell'articolo hanno deciso di dividere l'analisi in due parti. La prima parte è incentrata su delle caratteristiche generali legate alla percezione del rischio da parte dei conducenti, alla velocità adottata dagli stessi e a considerazioni sui cantieri stradali e sui dispositivi di controllo usati. A tal proposito si elencano di seguito i risultati conseguiti:

- L'esperienza alla guida della popolazione indagata era decisamente variegata, tanto che l'8% degli intervistati conduceva un camion da 2 anni o meno e il 10% da più di 30;
- La totalità dei partecipanti ha dichiarato di essere conscia del rischio legato alla guida attraverso i cantieri stradali e il 90% di loro ha anche affermato che lo considerano più pericoloso rispetto alla guida in aree al di fuori delle zone di lavoro;
- Per la maggior parte dei partecipanti la segnaletica provvisoria di cantiere risulta essere ben posizionata e esaustiva. Tuttavia, il 14% degli intervistati ha dichiarato che in alcuni cantieri avevano trovato segnali poco chiari e confusi e quindi chiedevano di collocare segnali aggiuntivi nelle zone di lavoro;
- I conducenti hanno espresso il desiderio che la segnaletica di preavviso dell'area di cantiere venga esposta spazialmente in anticipo, tanto che la metà degli intervistati vorrebbe trovare un segnale di preavviso già ad una distanza dai 5 agli 8 km (3 a 5 miglia);
- Dall'analisi si è riscontrato che i conducenti non avevano una preferenza chiara tra la chiusura di una sola corsia e le configurazioni di scambio di carreggiata;
- In un'altra domanda sottoposta ai candidati veniva anche chiesto quale velocità essi adottassero al momento del transito attraverso un cantiere con un limite di velocità fissato a 72km/h. Osservando il grafico 44 realizzato a partire dalle risposte riportate dai candidati si nota che circa il 49% ha affermato di rispettare sempre il limite o, addirittura, di transitare a velocità minori rispetto al limite imposto, mentre il 51% dei partecipanti ha dichiarato di superarlo.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
 Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

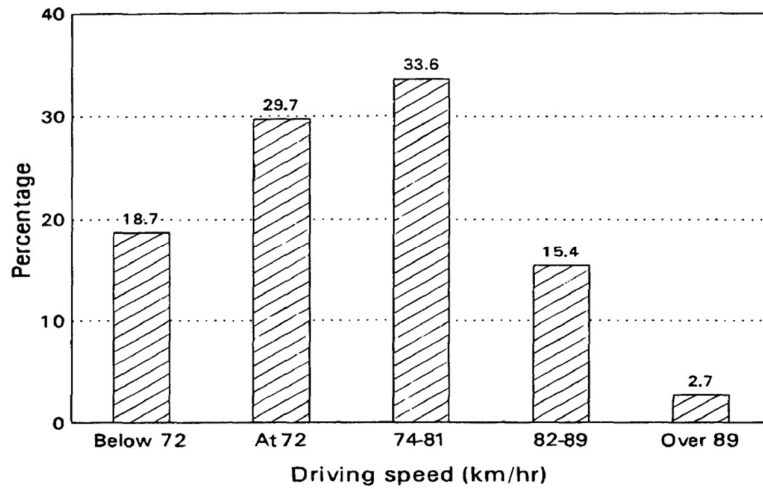


Grafico 44_Velocità adottata dichiarata dai conducenti di mezzi pesanti in corrispondenza di un cantiere stradale con limite di velocità fissato a 72km/h

Per la seconda parte dell'analisi, gli autori hanno voluto approfondire il tema della posizione degli incidenti in corrispondenza dei cantieri, poiché molto spesso hanno trovato che tale informazione non fosse presente nei verbali degli incidenti. Ai conducenti è stato quindi fornito uno schizzo di un tipico layout di cantiere autostradale (figura 23) e chiesto di identificare il numero di incidenti e le posizioni nelle quali si sono verificati.

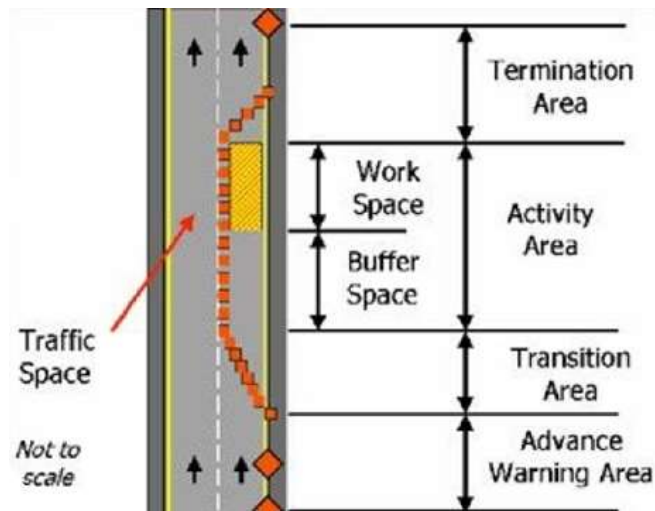
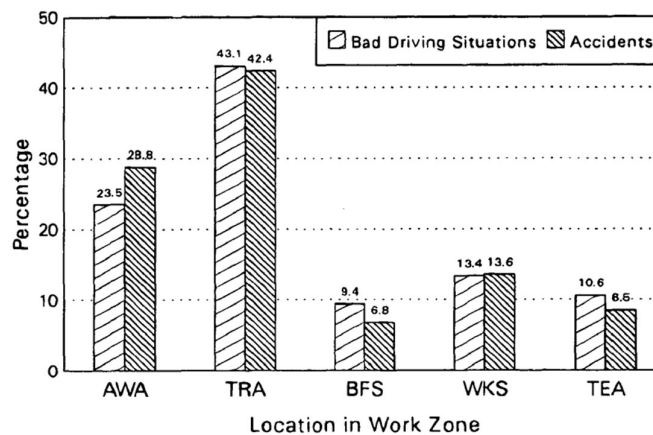


Figura 23_Layout di chiusura di una corsia in cantiere autostradale

Dall'analisi è emerso che una percentuale relativamente bassa dei partecipanti ha dichiarato di aver avuto un incidente in una o più zone di cantiere. Considerando il numero totale di sinistri dichiarati dagli intervistati, il 29% di essi è avvenuto nell'area di avvertimento anticipato (AWA), detta anche area di avvicinamento, e il 42% nell'area di transizione (TRA), cioè l'area del raccordo obliquo. Inoltre,

dai commenti rilasciati dagli intervistati è emerso che la maggior parte degli incidenti dichiarati è avvenuta tra autovetture e mezzi pesanti principalmente a causa di cambi di corsia e brusche variazioni di velocità.

Nel grafico sottostante (grafico 45) sono anche riportate le BAD DRIVING SITUATIONS²⁰ che indicano quelle situazioni che avvengono alla guida legate a comportamenti scorretti adottati dai conducenti sia di mezzi pesanti che di autovetture. Il non rispetto dei limiti di velocità, il non concedere la precedenza, il non utilizzo delle frecce direzionali, l'abuso di alcool o droghe alla guida e l'uso del telefono sono tutti esempi di BAD DRIVING SITUATIONS e ciascuna di esse implica un incrementano del rischio di incidenti. Infatti, dall'analisi condotta dagli autori dell'articolo è emerso che l'esperienza di incidenti è correlata significativamente all'esperienza di situazioni di guida difficili, ma allo stesso tempo non si sono osservate correlazioni dirette con altre caratteristiche del conducente/mezzo guidato.



Note: AWA(advanced warning area), TRA(transition area), BFS(buffer space), WKS(work space), TEA(termination area)

Grafico 45_Frequenza delle BDS e degli incidenti suddivisi per zone del cantiere autostradale

2.3 - CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

Dalle analisi effettuate nei due capitoli precedenti, risulta palese la necessità di incrementare la sicurezza degli operai che lavorano sulla carreggiata nei cantieri stradali e/o autostradali. Per questo motivo la Tecne S.p.A. ha suggerito di condurre questa analisi per riflettere sulle possibili soluzioni del problema proponendo un caso studio su un incidente avvenuto in un cantiere di loro

²⁰ Esperienze di guida negative.

competenza. Anche se da quanto scritto dal CSE per il sinistro da noi preso in considerazione, il segnalamento della zona di lavoro era stato eseguito correttamente seguendo tutte le linee guida riportate nel D.M. 10 luglio 2002 (7), ciò non è bastato per garantire la sicurezza del lavoratore. Per comprenderne la ragione si è quindi proseguita l'analisi attraverso lo studio di articoli accademici relativi al tema dell'incidentalità in corrispondenza di cantieri autostradali grazie a cui si è potuto dimostrare che la sola presenza del cantiere implichi un incremento del rischio e che la maggior parte degli incidenti sono dovuti principalmente a errori umani, legati all'adozione di comportamenti e abitudini sbagliate e nocive da parte dei conducenti. Di estremo interesse per questa trattazione sono i due ultimi articoli analizzati ("DRIVERS PERCEPTION OF HIGHWAY WORK ZONE RISKS" (16) e "Truck Drivers' Concerns in Work Zones: Travel Characteristics and Accident Experiences" (17)) poiché hanno rimarcato anche la correlazione che esiste tra la percezione del rischio dei conducenti e la velocità da essi adottata.

Si potrebbe quindi affermare che molti conducenti sottovalutino la vera pericolosità della presenza dei cantieri, forse per ignoranza sul tema o forse perché non hanno mai subito o causato un incidente, esperienza che può cambiare significativamente la percezione della pericolosità. Il primo passo per ottenere un miglioramento della situazione potrebbe quindi consistere in una campagna per sensibilizzare tutti i conducenti di veicoli nei confronti dei rischi che incorrono nel guidare attraverso un cantiere autostradale adottando dei comportamenti sbagliati, come consigliato anche dagli autori dell'articolo "DRIVERS PERCEPTION OF HIGHWAY WORK ZONE RISKS" (16). Tutto ciò però non è sufficiente. Occorrerebbe quindi che i gestori dell'infrastruttura e le imprese esecutrici fornissero dei sistemi che permettano il controllo dell'area circostante la zona di lavoro e il cantiere stesso e che efficacemente salvaguardino la salute dei cittadini e dei lavoratori. Questi aspetti verranno evidenziati e approfonditi nei prossimi capitoli di questo elaborato.

CAPITOLO 3 - CONFRONTO TRA NORMATIVE EUROPEE SUL TEMA DEL SEGNALAMENTO DEI CANTIERI

Dai verbali sulla dinamica dell'incidente si osserva che, per la delimitazione dell'area di cantiere, sono stati utilizzati solamente i delineatori flessibili e non dei sistemi di protezione (ATTIVI) come, per esempio, le classiche barriere mobili "new jersey" (figure 24 e 25). In questo capitolo si intende analizzare la normativa di riferimento italiana relativa al segnalamento temporaneo di cantieri e di confrontarla con le normative concernenti lo stesso argomento di altri stati europei. L'obiettivo è quello di verificare se in esse ci siano delle prescrizioni, indicazioni e/o informazioni riguardanti l'impiego dei dispositivi di protezione temporanei e se vi siano degli schemi segnaletici che li raffigurano.



Figura 24 _Dispositivo di protezione modulare _ Barriera "New Jersey"



Figura 25 _Disposizione delle barriere "New Jersey" sulla carreggiata

3.1 - LA NORMATIVA ITALIANA

La normativa nazionale di riferimento da consultare per il segnalamento temporaneo di cantieri su strada è il "Disciplinare tecnico relativo agli schemi segnaletici, differenziati per categoria di strada, da adottare per il segnalamento temporaneo" (D. M. 10 luglio 2002) (7) redatto dal Ministero delle

Infrastrutture e dei Trasporti. Consultando il paragrafo 9.2 “Segnaletica di posizione” relativa al capitolo 9 dedicato ai Cantieri Fissi, appare immediatamente chiaro che, oltre all’uso dei classici dispositivi di delimitazione quali coni, delineatori flessibili e paletti di delimitazione, l’impiego di barriere temporanee per la delimitazione longitudinale, come anche per la realizzazione del raccordo obliquo, è una scelta a discrezione del coordinatore della sicurezza in fase di progetto (CSP). Nel decreto ministeriale, inoltre, non compare alcuna prescrizione, descrizione o casistica in cui la disposizione di questi dispositivi sia obbligatoria. Per di più, non compare nessuno schema segnaletico raffigurante l’uso delle barriere temporanee o che, anche se non le raffigura, ne richiami nelle note il possibile impiego. È anche da specificare che nel capitolo 3 “Segnali e dispositivi segnaletici” del D.M. 10 luglio 2002 (7) vengono specificati tutti i diversi tipi di segnali e nel paragrafo 3.1.5 “Segnali complementari” vengono fornite delle informazioni sull’impiego e le casistiche di utilizzo di coni, delineatori flessibili ed anche delle barriere sia normali che direzionali, che però non hanno funzione di ritenuta e quindi non sono da confondere con la tipologia di barriere presa in considerazione per questa trattazione.

Al contrario del D.M. 10 luglio 2002 (7), nel regolamento interno di ASPI (8) è riportato un caso nel quale l’uso di barriere new jersey è obbligatorio ed è riferito al ricovero e stazionamento dei mezzi d’opera.

“In tutti i cantieri fissi che prevedono la chiusura permanente di una o più corsie di transito o anche della sola corsia di emergenza, durante le fasi di interruzione delle attività tra un turno giornaliero di lavoro e il successivo, le macchine, i veicoli e i materiali di lavoro dovranno essere ricoverati:

- *ove disponibili, su aree esterne alle pertinenze autostradali o nelle aree di parcheggio temporaneamente chiuse per la presenza del cantiere e previa autorizzazione dell’area da parte della Direzione di Tronco*
- *Lungo il margine opposto a quello esposto al traffico delle corsie chiuse, utilizzando esclusivamente lo spazio protetto dalle testate segnaletiche di chiusura e avendo cura di disporre, a tergo delle testate stesse, una protezione con analoga protezione realizzata con elementi new jersey prefabbricati debitamente collegati; (figura 26)*

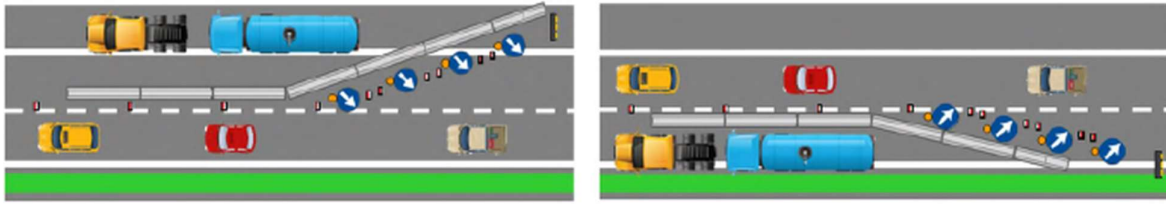


Figura 26_Ricovero dei mezzi d'opera protetto da barriere temporanee _ nel dettaglio di sinistra effettuato sulla corsia di emergenza_ nel dettaglio di destra effettuato sulla corsia di sorpasso

- in piazzole di sosta (figura 27), con la precisazione che tale soluzione deve sempre prevedere la chiusura della corsia di emergenza nel tratto strettamente interessato (A), da realizzare con le modalità previste nel successivo punto 4.2. Su tratti autostradali privi della corsia di emergenza il ricovero di mezzi o materiali in piazzola richiede alternativamente:
 - la chiusura della prima corsia di marcia in destra (B);
 - l'apposizione lungo il margine esposto al traffico della piazzola di una barriera di elementi new jersey prefabbricati, debitamente collegati e con avvio posizionato in modo da non costituire ostacolo per i veicoli in transito (C);

In tutti i casi di utilizzo della piazzola di sosta si deve prevedere l'oscuramento della relativa segnaletica verticale di preavviso e indicazione;"



Figura 27_Ricovero dei mezzi d'opera su piazzola di sosta _ Tre possibili alternative





L'assenza nei regolamenti nazionali di casistiche specifiche in cui sia obbligatorio l'uso di barriere temporanee può essere interpretata come una carenza degli stessi. Infatti, come già detto in precedenza, la scelta o meno dell'uso di barriere new jersey ricade direttamente sul progettista, creando quindi le condizioni per cui in due cantieri autostradali ubicati in diverse località, ma con caratteristiche e lavorazioni simili, in uno si utilizzino barriere in modo da proteggere attivamente gli operatori, mentre nell'altro si decida di non usarle.

Per questo motivo risulta interessante il confronto tra le Norme e i Regolamenti Italiani e quelle di altri stati europei, quali per esempio la Germania, la Francia e l'Inghilterra, per osservare se anche in queste Nazioni la scelta dell'uso di barriere temporanee sia interamente affidata al progettista.

3.2 - LA NORMATIVA TEDESCA

La normativa tedesca di riferimento RSA21 (*Richtlinien für die verkehrsrechtliche Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen*²¹) (18) è suddivisa in quattro parti: La prima chiamata *A_Allgemeines* è una parte generale che descrive misure, procedure e sistemi da adottare per garantire la sicurezza degli operatori impegnati a svolgere lavori sulla viabilità e nei cantieri stradali; La seconda e la terza parte, rispettivamente *B_Innerrörtliche Straßen* e *C_Landstraßen*, entrano nel dettaglio per quanto riguarda le strade urbane e le strade rurali e pertanto non verranno analizzate in quanto non sono di interesse per la redazione di questo elaborato. Nella parte *D_Autobahnen*, che è anche l'ultima della direttiva, è prevista tutta la casistica dedicata alle Autostrade.

Nel capitolo 3 *Verkehrseinrichtungen und Warneinrichtungen*²² della sezione A, paragrafo 3.4 *Absperrgeräte*²³ si descrive quali dispositivi usare per delimitare l'area di cantiere stradale, regolare e guidare il traffico attorno ad essa. Come in Italia, anche in Germania si possono usare barriere, griglie di sbarramento, fari, coni guida, fari di avvertimento, soglie di controllo e barriere direzionali, nonché pannelli mobili (figure 28, 29 e 30).

			
H = 30 h = 27,5	H = 50 h = 42,5	H = 75 h = 65	H = 100 h = 90
Zeichen 610-40	Zeichen 610-41	Zeichen 610-42	Zeichen 610-43
Radweg	Alle Straßen außer Autobahnen	Autobahnen	Innerrtliche Straßen im Schienenbahnbereich

H = Gesamthöhe des Leitkegels in cm
h = Höhe des Verkehrszeichenbildes in cm

Figura 28_Coni per la delimitazione dell'area di cantiere _ Immagine presa dalla normativa di riferimento

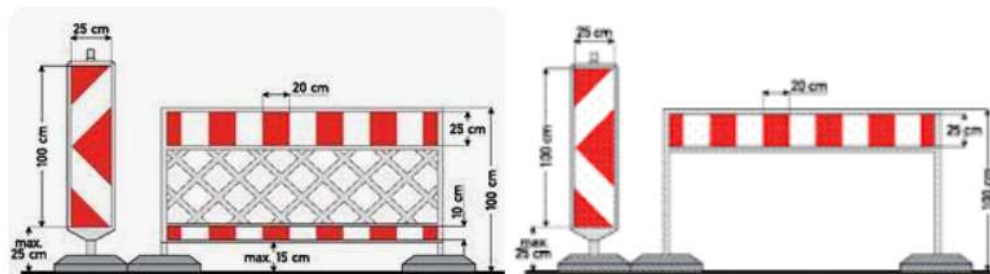


Figura 29_BARRIERA normale, griglia di sbarramento e paletti di delimitazione _ Immagini tratte dalla normativa di riferimento

²¹ Direttive di diritto dei trasporti per la sicurezza dei posti di lavoro su strada

²² Infrastrutture di trasporto e dispositivi di segnalazione

²³ Dispositivi di delimitazione



Figura 30_Faro di avvertimento _ Immagine tratta dalla normativa di riferimento

Anche nella normativa tedesca, inoltre, l'uso di dispositivi di protezione temporanei è discrezionale, come dimostrato dalle indicazioni riportate nel capitolo 5 *Leitschwellen, Leitborde und temporäre Schutzrichtungen*²⁴. Infatti, viene riportato che per aumentare l'efficacia della gestione del traffico o ridurre i rischi di incidenti, è possibile, ma non obbligatorio, adottare una serie di elementi guida continui aventi larghezza minima di 25 cm o utilizzare i dispositivi di protezione temporanei, che in tedesco prendono il nome di *temporäre Schutzrichtungen*²⁵, abbreviato con TSE (figura 31).

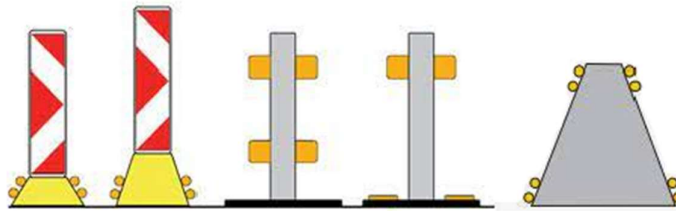


Figura 31_da sinistra: Soglie direzionali con altezza compresa tra 2,5 cm e 12 cm; Guardrail con altezza tra 12 cm e 25 cm; Dispositivi di protezione temporanei (TSE) con un'altezza di almeno 50 cm

È interessante notare che, per la normativa tedesca, i guardrail e le soglie direzionali possono essere usati per la marcatura e delimitazione temporanea, ma non posseggono la funzione di protezione. Infatti, questi dispositivi sono considerati come infrastrutture di trasporto, ciò fa sì che siano riconosciuti e normati, non soltanto dalle leggi e regolamenti in materia di segnalamento temporaneo di cantieri, ma anche all'interno dei codici dell'ordinamento dei trasporti. Al contrario, per i dispositivi di protezione temporanei, i TSE in Germania, esiste una normativa specifica chiamata *TL-Transportable Schutzrichtungen R1*²⁶ (19) che racchiude tutte le informazioni sulle caratteristiche tecniche e dimensionali che questi dispositivi devono possedere per poter compiere

²⁴ Soglie direzionali, guardrail e protezioni temporanee

²⁵ Dispositivi di protezione temporanei

²⁶ Dispositivi di protezione trasportabili

la mansione per la quale sono stati progettati. È da sottolineare che nella normativa tedesca viene specificato che oltre ad avere funzione di ritenuta e delimitazione, i dispositivi di protezione temporanei sono gli unici ad avere una effettiva funzione protettiva per gli operatori in cantiere.

Per quanto concerne la sicurezza nei cantieri sulle autostrade tedesche, come già anticipato, si deve fare riferimento alla parte D intitolata semplicemente *Autobahnen*²⁷. In particolare, il paragrafo 2.2 chiamato *Verkehrsführung*²⁸, si sofferma su degli aspetti da prendere in considerazione quando il progettista deve scegliere se usare o meno i dispositivi di protezione temporanei. Infatti, viene richiesta una valutazione dell'area trasversale da essi occupata, in quanto, se troppo estesa, può rappresentare un ostacolo per la circolazione e diventare quindi un potenziale pericolo per i conducenti. Bisogna altresì tenere conto anche del potenziale pericolo rappresentato dalle fasi di posa e rimozione degli stessi dispositivi per gli operai incaricati del montaggio e smontaggio, che verrebbero a loro volta esposti al traffico.

Per quanto concerne la delimitazione del cantiere in direzione longitudinale si deve, invece, consultare il paragrafo 2.2.5 *Längsabspernung*²⁹ nel quale si prevede che, proprio come accade nella normativa italiana (7), l'impiego dei dispositivi di protezione temporanei sia a discrezione di chi progetta e gestisce il cantiere.

Per quanto riguarda gli schemi segnaletici, questi vengono riportati nelle *Richtlinien für die verkehrsrechtliche Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen - Ausgabe 2021 - Auszug Regelpläne - Teil D*³⁰ (18) e, come si vedrà anche nei casi delle normative francese e inglese, essi non raffigurano in primo luogo le barriere o dispositivi di protezione temporanee, ma ne richiamano l'uso nelle note laterali citandole con l'acronimo TSE, che come già anticipato significa *temporäre schutzeinrichtungen*³¹.

Si riportano di seguito, a titolo di esempio, due schemi segnaletici relativi l'uno a dei lavori realizzati nella corsia di emergenza di destra (figura 32) e che quindi causa un restringimento della carreggiata, l'altro a degli interventi condotti sulla corsia di sinistra (figura 33), per esempio dei lavori per il

²⁷ Autostrade

²⁸ conduzione del traffico

²⁹ Barriere longitudinali

³⁰ Linee guida per la sicurezza stradale dei posti di lavoro su strada - Edizione 2021 - Estratto Piani di regolazione - Parte D

³¹ Dispositivi di protezione temporanei

rifacimento del manto stradale o dei provvedimenti che coinvolgano i dispositivi di ritenuta fissi che si hanno tra le due carreggiate.

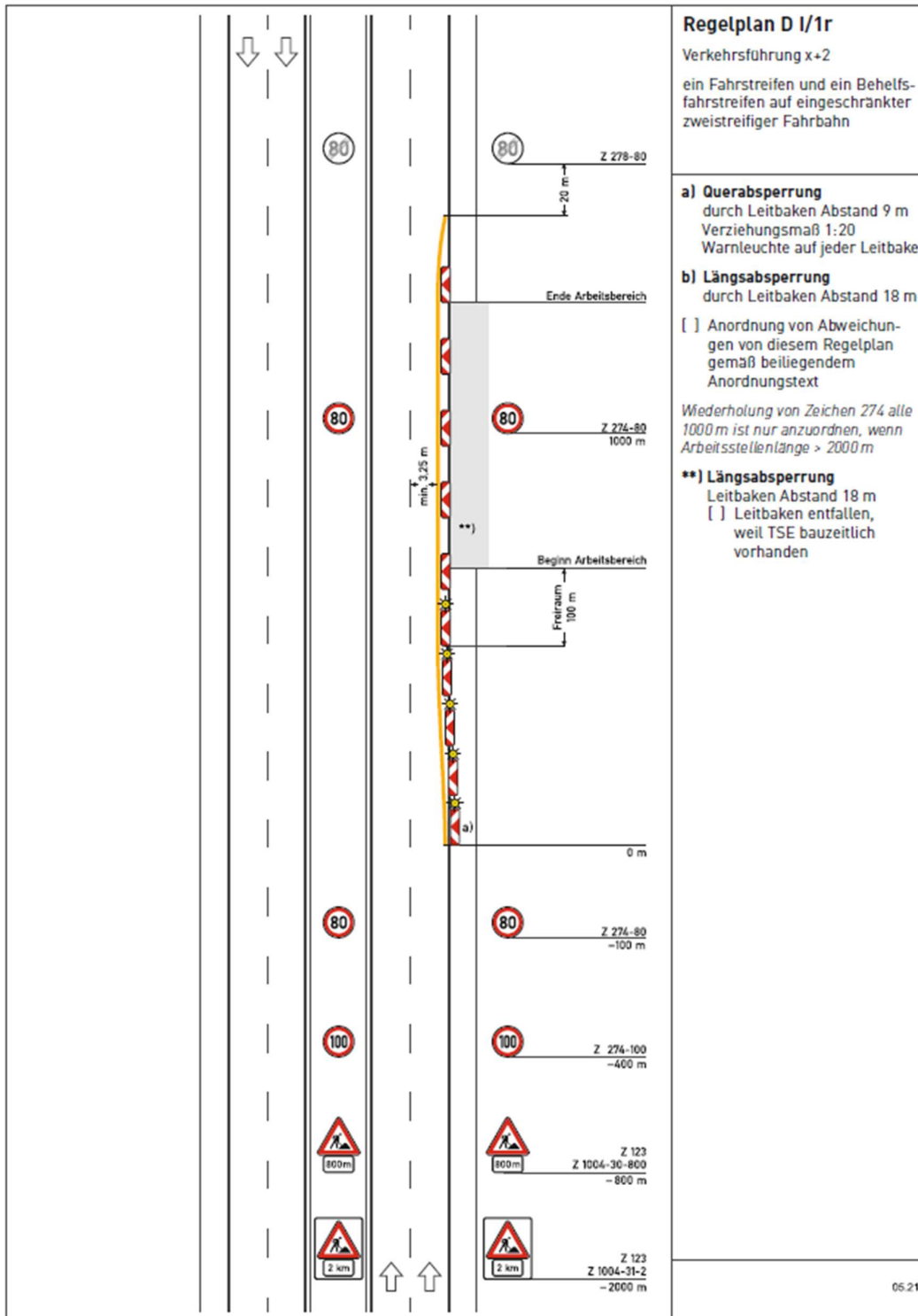


Figura 32_Schema segnaletico estratto dalla normativa tedesca di riferimento _ Disposizione della segnaletica provvisoria di cantiere per lavori su margine destro della carreggiata

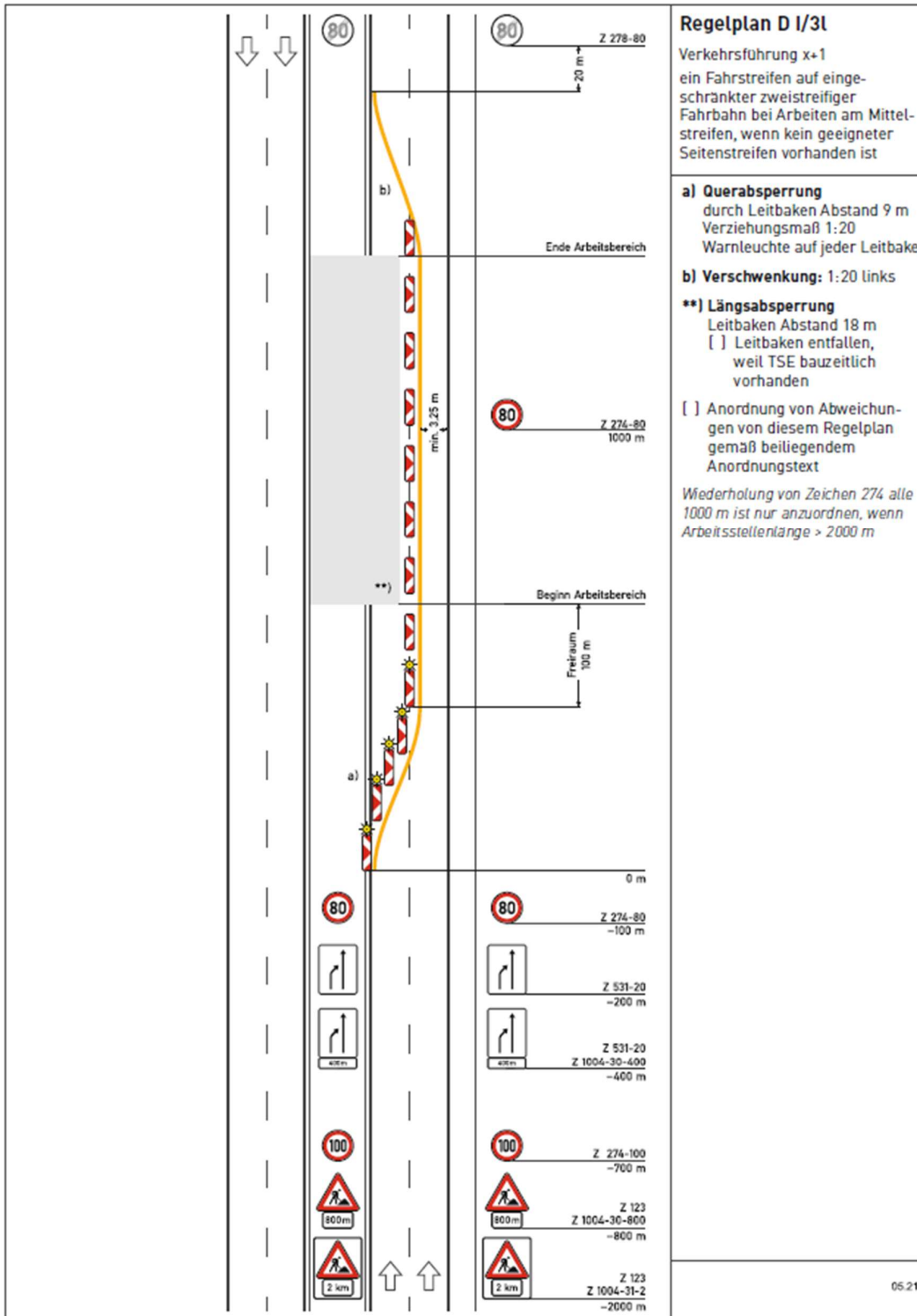


Figura 33_Schema segnaletico estratto dalla normativa tedesca di riferimento _ Disposizione della segnaletica provvisoria di cantiere per lavori che interessano la corsia di sorpasso e lo spartitraffico tra le due carreggiate

3.3 - LA NORMATIVA FRANCESE

In Francia la normativa di riferimento da consultare è l'*INSTRUCTION INTERMINISTÉRIELLE SUR LA SIGNALISATION ROUTIÈRE*³² (20) del 22 ottobre 1963 e aggiornata al 9 aprile 2021, nella sua parte ottava intitolata *Signalisation temporaire*³³.

Per la redazione di questo elaborato si sono analizzati l'articolo 130, denominato *Dangers temporaires et chantiers fixes*³⁴ e l'articolo 133 *Routes à chaussées séparées*³⁵ che è di fondamentale importanza in quanto inerente al caso autostradale, obiettivo della trattazione. Il primo dei due articoli sopracitati è di natura più generale, in quanto non è incentrato su una tipologia specifica di strada. Esso si focalizza sulla tipologia di segnaletica e sulle disposizioni da attuare in caso di carreggiata ostruita, ad esempio da un cantiere fisso, definendo i segnali per indicare l'ostacolo e segnalare il pericolo. Come già menzionato, l'articolo della normativa francese di maggiore interesse per l'analisi è senza dubbio il numero 133. Esso è relativo al caso specifico delle strade a carreggiate separate. Nel paragrafo D denominato *Délimitation du chantier et des rétrécissements de chaussée*³⁶ sono riportate le metodologie per la delimitazione delle aree di cantiere e come effettuare correttamente restringimenti o cambi di carreggiata. In sostanza, come per la normativa italiana, la delimitazione dei cantieri è realizzata tramite dispositivi come coni, delineatori e dispositivi cilindrici di guida³⁷ (figura 34) o con elementi modulari denominati nella normativa K16 (figura 35).

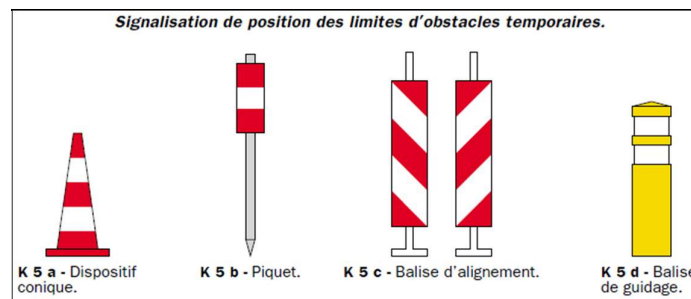


Figura 34 _Dispositivi per la delimitazione dell'area di cantiere_ K 5 a: Coni; K 5 b: Picchetti di segnalazione; K 5 c: paletti di delimitazione; K 5 d: Marcatori

³² Istruzione interministeriale sulla segnaletica stradale

³³ Segnaletica temporanea

³⁴ Pericoli temporanei e cantieri fissi

³⁵ strade a carreggiata separata

³⁶ Delimitazione del cantiere e dei restringimenti di carreggiata

³⁷ Marcatori

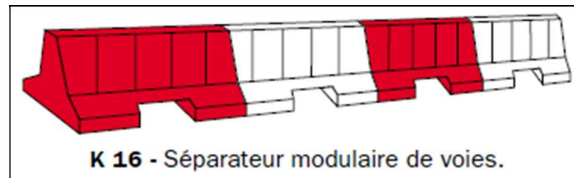


Figura 35_ Barriere modulari temporanee

Per quanto riguarda i dispositivi K16 rappresentati in figura 35, la norma francese ne gestisce diverse tipologie, in base alla funzione che essi devono ricoprire. Come si vedrà più avanti, essi possono avere una semplice funzione di guida oppure quella di ritenuta e in quel caso sono una vera e propria protezione attiva per i lavoratori.

In un primo momento si potrebbe avere l'impressione che la normativa francese ricalchi quella italiana, o viceversa, secondo cui si può interpretare che la scelta del dispositivo da usare per la delimitazione dell'area di cantiere venga interamente lasciata alla discrezione del progettista. Tuttavia, sempre il *Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement et de la Mer*³⁸ ha pubblicato una raccolta di volumi intitolata *Signalisation temporaire*³⁹ (21), il secondo dei quali è focalizzato sulle strade a più carreggiate. Questo documento è un manuale operativo per l'allestimento dei cantieri stradali e al suo interno contiene anche gli schemi per la corretta posa della segnaletica temporanea. In particolare, il capitolo 17 di questo documento, *Dispositif de séparation des voies ou d'isolement des zones de chantier*⁴⁰, è molto importante perché fornisce delle informazioni aggiuntive sui dispositivi di delimitazione delle aree di cantiere. Inizialmente esso riprende i concetti espressi nell'articolo 133 sopracitato, presentando una prima distinzione tra i possibili dispositivi discontinui, che tipicamente si usano per la delimitazione delle aree di cantiere (presentati in figura 34) e quelli modulari continui, ovvero le barriere temporanee riportate in figura 35, definiti per l'appunto continui, poiché attraverso una serie di moduli elementari collegati solidamente tra loro costituisce una separazione fisica lineare e continua. Questi ultimi, chiamati in francese *séparateurs modulaires de voies*⁴¹ e abbreviati con SMV, sono poi separati nelle due successive classi:

³⁸ Ministero delle Infrastrutture, dei Trasporti, dell'Edilizia Abitativa e del Mare

³⁹ Segnaletica temporanea

⁴⁰ dispositivi di separazione delle vie e d'isolamento delle aree di cantiere

⁴¹ Separatori modulari si corsia

- Classe A: separatori con funzione sia di separazione sia di guida, e sono principalmente rappresentati da elementi in plastica, come quelli riportati in figura 35.
- Classe B: separatori che, oltre a svolgere funzioni di separazione e guida, hanno anche una funzione di ritenuta. Sono generalmente realizzati in metallo o calcestruzzo prefabbricato (figura 36), ma alcuni prodotti in plastica, testati e approvati, possono rientrare in questa categoria se zavorrati. I dispositivi SMV di Classe B sono soggetti ad approvazione ministeriale e a loro volta sono suddivisi in quattro sottoclassi, chiamate BT1, BT2, BT3 e BT4, in base alle performance di ritenuta, secondo i criteri di prova e classificazione NF XP P 98-453 (22) forniti dalla normativa francese a riguardo.



Figura 36_Dispositivi modulari di ritenuta; a destra in calcestruzzo prefabbricato; a sinistra in metallo

Inoltre, il manuale operativo *Signalisation temporaire* (21) consiglia l'uso dei dispositivi modulari SMV, e più nello specifico quelli di Classe B, quando la protezione degli utenti è fortemente compromessa o quando il personale del cantiere è esposto a rischi elevati. In aggiunta, indica che la scelta dell'uso dei dispositivi SMV deve essere valutato in base ai rischi associati quali la natura, la durata e la posizione del cantiere, le condizioni del traffico, inclusa la velocità, il volume di traffico e la percentuale di mezzi pesanti, l'esposizione del personale del cantiere.

Lo stesso manuale illustra infine due casistiche nelle quali si consiglia l'uso di dispositivi di protezione temporanei (SMV), la prima è relativa ad un cambio di carreggiata in cui si consiglia di collocare i dispositivi modulari temporanei (dispositivi di protezione temporanei) nelle zone di ingresso e di uscita della deviazione, ovvero dove i due flussi di traffico opposti sono sulla stessa carreggiata, per 50m circa (figura 37).

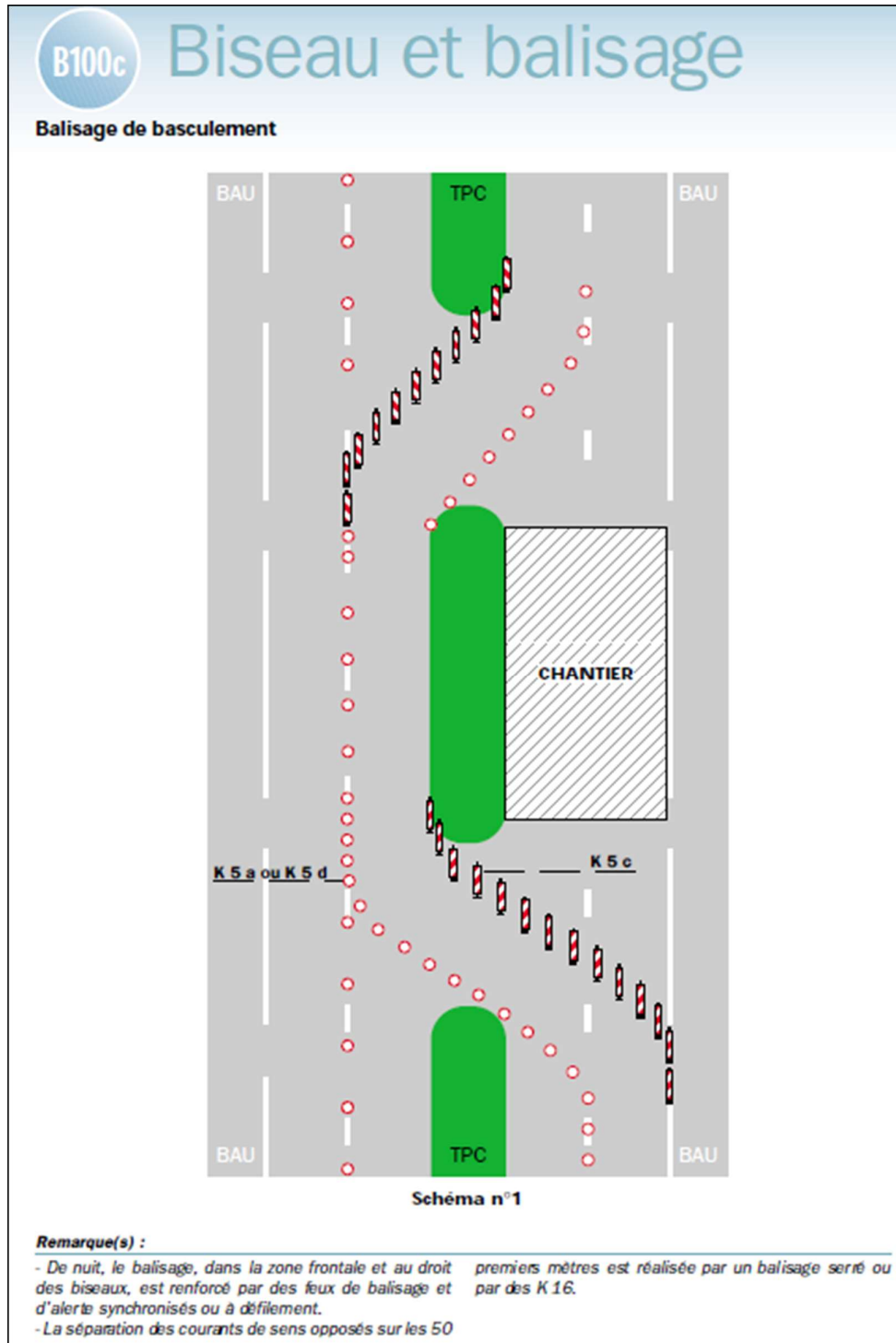


Figura 37_Dettaglio relativo a uno scambio di carreggiata (Basculement) nel quale sono indicati i dispositivi da usare per realizzare il raccordo obliquo (Biseau) e la separazione dei flussi di traffico (Balisage)

È da notare come i dispositivi di protezione temporanei non siano direttamente raffigurati nella figura 37, ma il loro uso è richiamato/suggerito nelle note a piè di pagina.

La seconda situazione, invece, consiglia di effettuare la separazione dei flussi di veicoli e quale classe di barriere usare nelle deviazioni di lunga durata del tipo "2+2 e 0", ovvero quando si ha lo

spostamento di due corsie nella carreggiata opposta. In entrambe le casistiche viene suggerito l'uso dei dispositivi di protezione temporanei per fornire protezione ai conducenti e ai passeggeri dei veicoli in transito nei pressi dell'area di cantiere e non si citano gli operatori in esso impiegati. Si può, però, osservare che l'applicazione della seguente procedura protegge attivamente anche i lavoratori su strada, in quanto permette di trasferire il traffico nella carreggiata opposta rispetto a quella interessata dai lavori, isolando così i soggetti più a rischio, ovvero gli operai.

È interessante notare come in Italia non esista un manuale operativo redatto dal Ministero e specifico per le strade a carreggiate separate che affianchi la normativa vigente come il documento sopra riportato (21). Come già osservato nel paragrafo relativo alla situazione italiana, ASPI ha supplito alla carenza normativa provvedendo alla redazione di un suo regolamento interno (9) ma, nonostante ciò, come dimostrato in questo paragrafo, per quanto riguarda le barriere temporanee si potrebbero aggiungere ulteriori precauzioni traendo ispirazione dal manuale operativo francese. Un'altra differenza sostanziale che emerge dal confronto tra le due documentazioni è la presenza in quella francese di schemi raffiguranti l'uso dei diversi dispositivi di segnalazione e delimitazione dei cantieri, compreso quello delle barriere temporanee, la cui indicazione compare sempre nelle note anche quando non sono presenti nelle immagini (figure 38 e 39). Pertanto, è possibile affermare che, a differenza dell'Italia, la Francia attribuisce alle barriere di protezione temporanee almeno la stessa importanza degli altri dispositivi di delimitazione delle aree di cantiere.

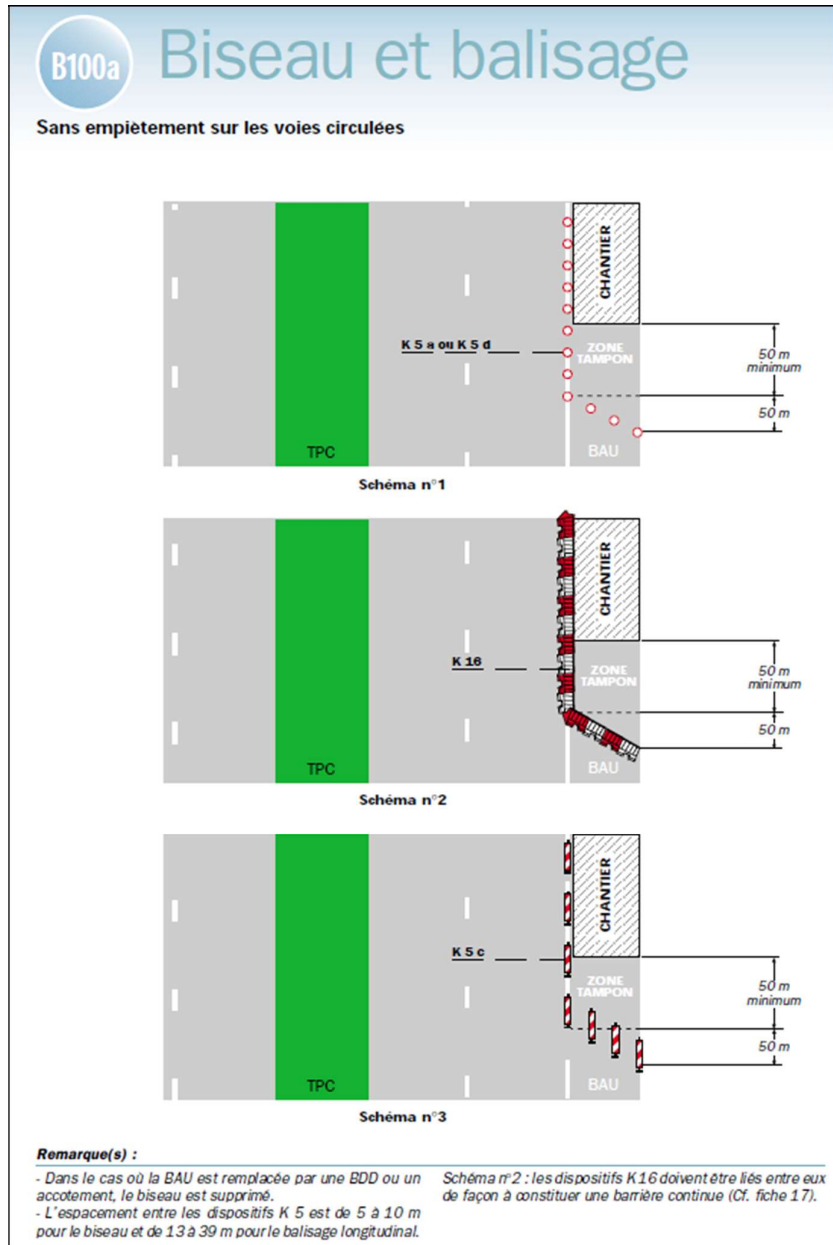


Figura 38_Dettagli sulla disposizione dei differenti tipi di dispositivi per la delimitazione della zona di lavoro a bordo strada

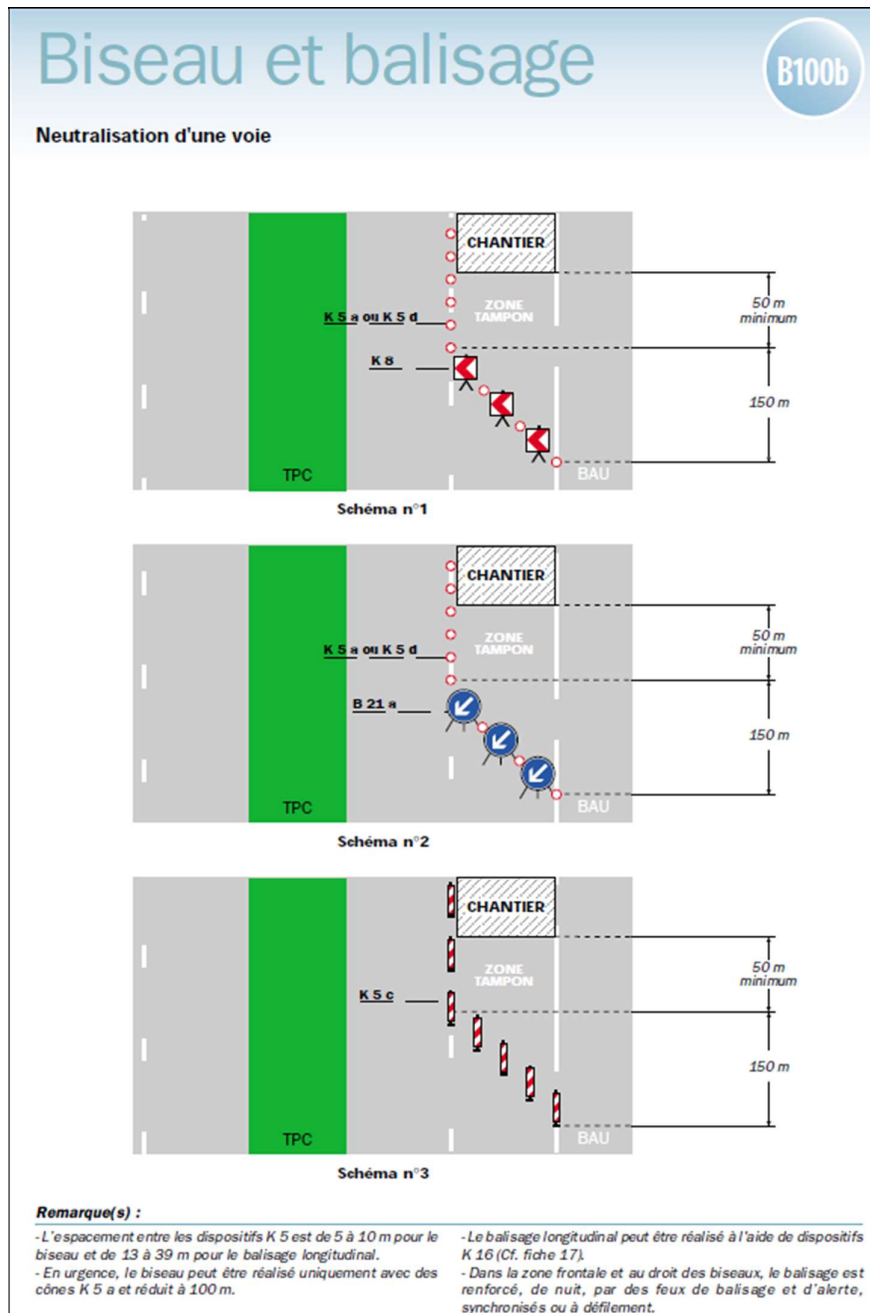


Figura 39_Dettagli sulla disposizione dei differenti tipi di dispositivi per la delimitazione della zona di lavoro sulla corsia di marcia

Osservando le figure 38 e 39 è interessante notare che in Francia, su strade a carreggiate separate, il franco di sicurezza, ovvero la distanza presente tra l'effettiva zona di cantiere e la fine del raccordo obliquo, è al minimo di 50 m, mentre sul D.M. 10 luglio 2002 (7) è consigliato, quando possibile, di avere una distanza di 150 m.

Anche in questo caso, per la normativa francese, sono riportati due schemi che presentano esempi analoghi a quelli riportati nel paragrafo relativo alla Germania. Manca nuovamente una diretta

rappresentazione dei dispositivi di protezione temporanei, ma nelle *remarques*⁴² a piè di pagina si hanno dei rimandi agli schemi di dettaglio B100a (figura 38) e B100b (figura 39) sopra proposti, nei quali si riporta come alternativa proprio la possibilità di usare i dispositivi di protezione temporanei per la delimitazione longitudinale delle aree di cantiere.

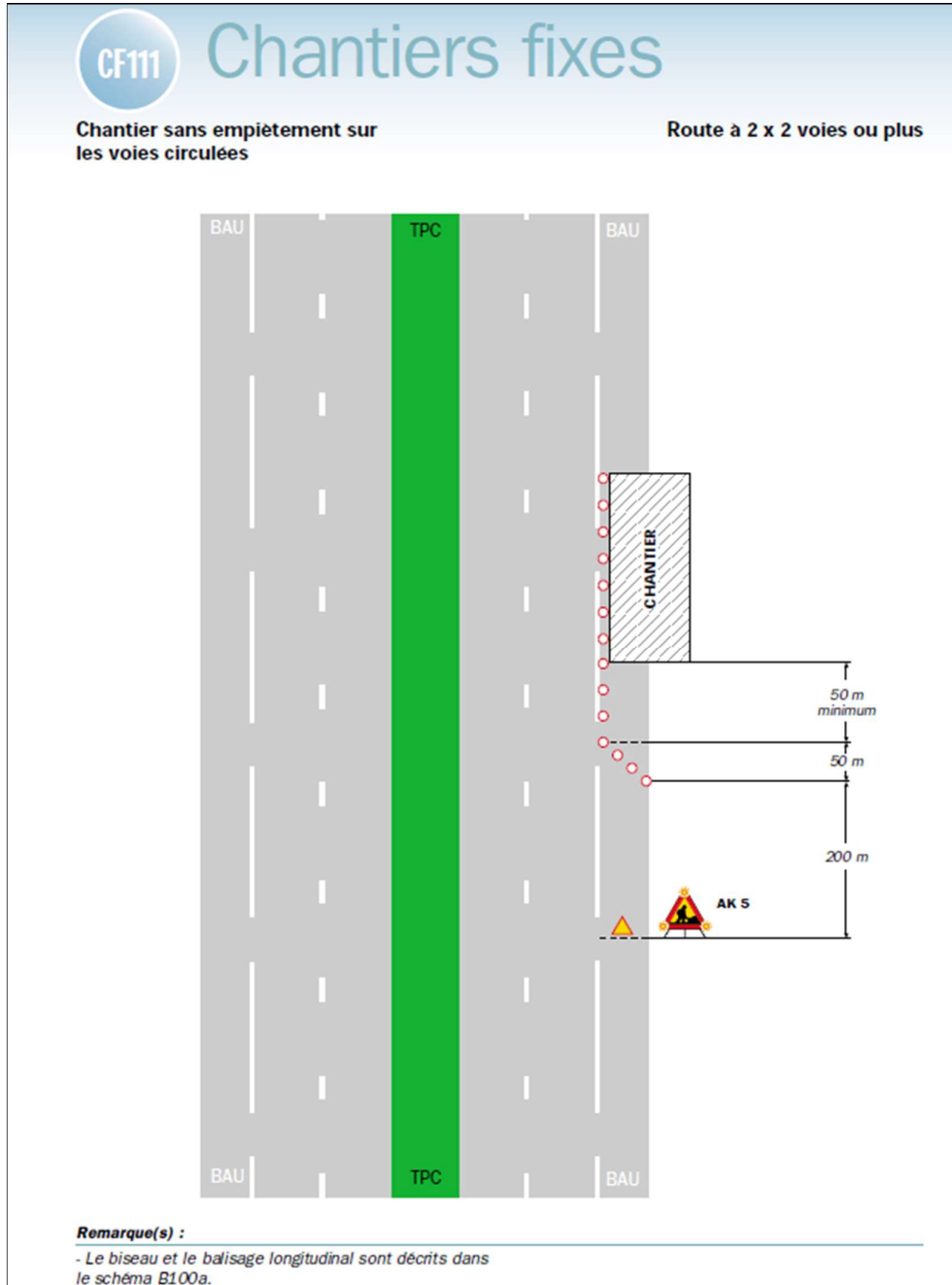


Figura 40_Schema segnaletico estratto dal manuale operativo francese _ Disposizione della segnaletica provvisoria di cantiere per lavori su margine destro della carreggiata

⁴² Note/Osservazioni

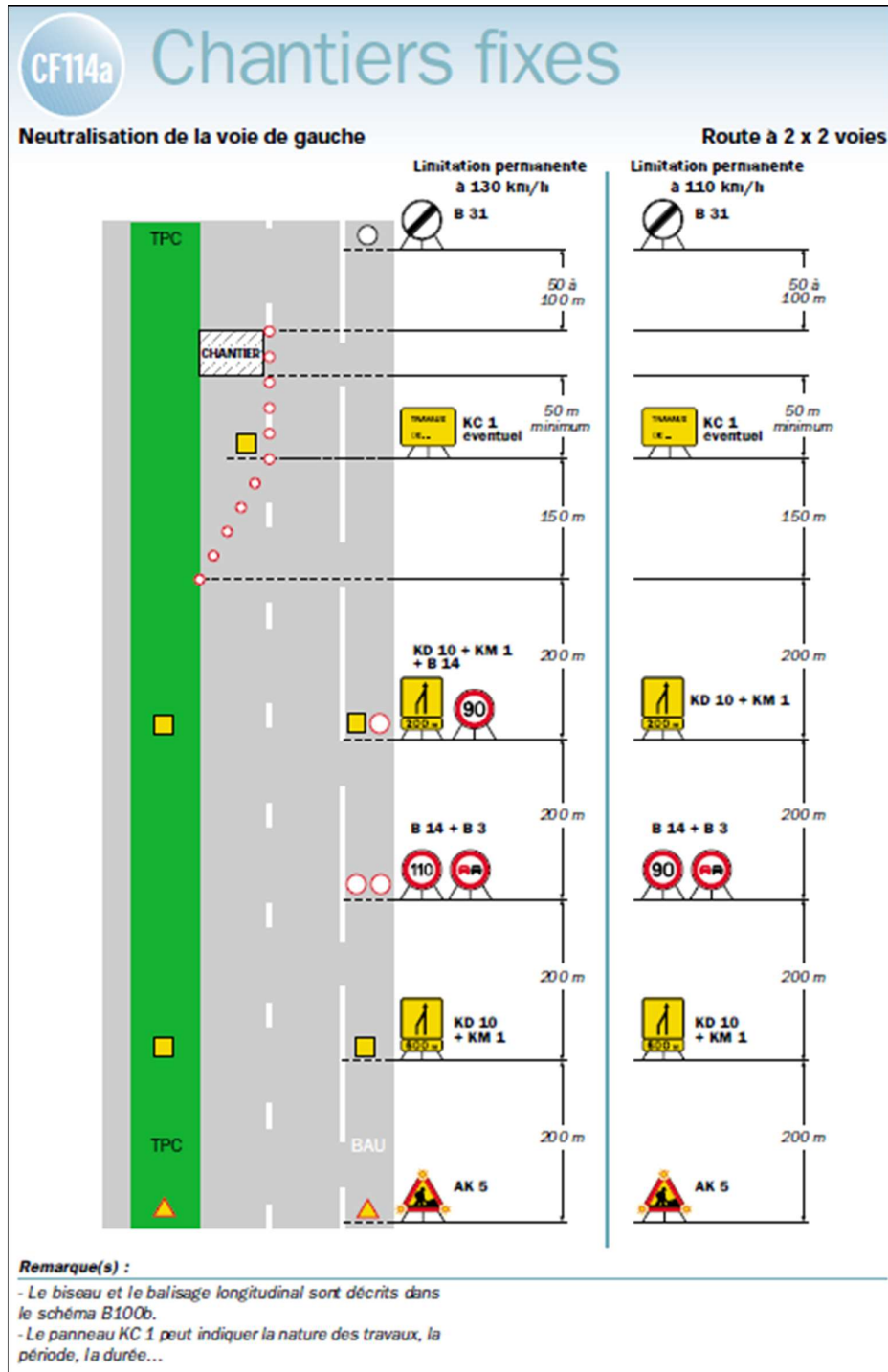


Figura 41_Schema segnaletico estratto dal manuale operativo francese _ Disposizione della segnaletica provvisoria di cantiere per lavori che interessano la corsia di sorpasso

3.4 - LA NORMATIVA INGLESE

La normativa di riferimento da consultare in Inghilterra è la *Traffic signs manual*⁴³ (Manuale della segnaletica stradale) pubblicato per conto del *Department for Transport*⁴⁴, il quale è composto da otto capitoli, di cui si è consultato l'ottavo denominato *Traffic Safety Measures and Signs for Road Works and Temporary Situations*⁴⁵ (23) utile per la redazione del seguente elaborato. Esso è composto a sua volta da tre parti, la prima intitolata *Design*, la seconda *Operations* e la terza *Update*.

Nella prima parte del manuale si osserva che in Inghilterra, così come in Italia, per la segnalazione e delimitazione dei cantieri stradali sono usati dispositivi scelti dal progettista quali coni, delineatori e barriere (figura 42).

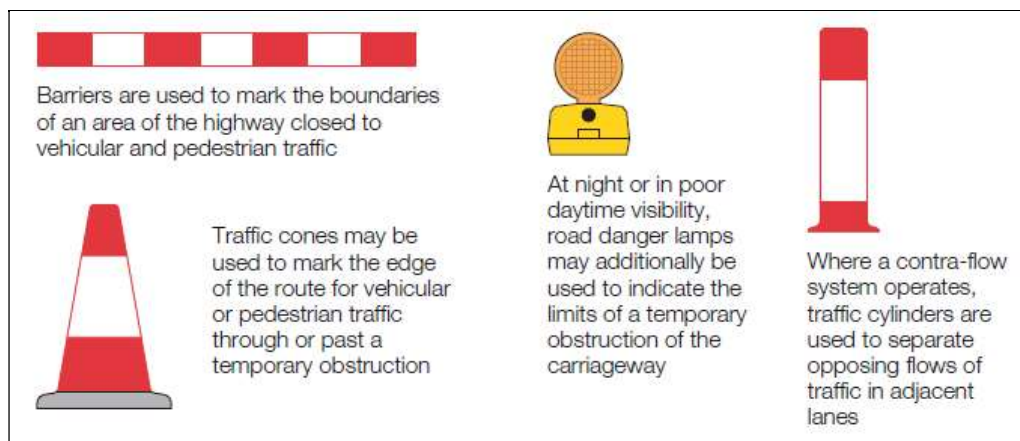


Figura 42_ Dispositivi discontinui per la delimitazione delle aree di cantiere. Partendo da in alto a sinistra: barriera normale; coni; fari per potenziare la segnaletica nelle ore notturne; marcatori cilindrici. I pittogrammi che costituiscono la figura sono tratti dal manuale "Know Your TRAFFIC SIGNS" (24)

Per quanto concerne l'uso dei dispositivi di protezione temporanei, invece, sono dedicati loro dei paragrafi sia nella parte uno che nella parte due dell'ottavo capitolo del manuale, rispettivamente il *D3.10 Use of safety barriers*⁴⁶ e il *O4.11 Use of barriers*⁴⁷. Al loro interno, in un primo momento, viene trattato l'argomento "barriere" in maniera generale, presentando tutte le differenti tipologie di barriere che si possono trovare in un cantiere stradale. Ci sono elementi che hanno solo ed esclusivamente funzione di segnalazione e di guida, ma anche dispositivi che hanno funzione di

⁴³ Manuale della segnaletica stradale

⁴⁴ Dipartimento per i Trasporti

⁴⁵ Segnali e Misure di Sicurezza per cantieri stradali e situazioni transitorie

⁴⁶ Uso delle barriere di sicurezza

⁴⁷ Uso delle barriere

ritenuta dei veicoli, cioè quelli utili per la nostra trattazione. Questo aspetto è molto interessante, poiché viene presentato un grado di completezza maggiore rispetto a quanto succede nel D.M. 10 luglio 2002 (7), dove al paragrafo 3.1.5 dello stesso vengono riportati i segnali complementari nei quali sono citate e descritte le barriere normali e quelle direzionali, ma non si entra nel dettaglio per quanto riguarda le barriere temporanee di sicurezza come invece, per l'appunto, succede nella normativa inglese di riferimento.

I sottoparagrafi D3.10.11 e O4.11.16, della normativa di riferimento inglese, sono dedicati interamente ai dispositivi di protezione temporanei e più nello specifico si concentrano sulle barriere di sicurezza con funzione di ritenuta. Analizzando i due sottoparagrafi sopracitati traspare che la scelta dell'uso o meno dei dispositivi di protezione temporanei è dettata da diversi fattori quali, per esempio, la durata dell'installazione del cantiere e una serie di aspetti legati alla sicurezza nell'installazione e rimozione, come si era già visto anche nella normativa francese. Per di più, nel sottoparagrafo compare anche la sigla TD 19 che identifica la normativa specifica relativa alle caratteristiche dimensionali e prestazionali dei dispositivi di protezione temporanei intitolata appunto TD 19 *Requirement for road restraint systems*⁴⁸ (25).

Di fondamentale importanza, infine, è tutto il capitolo D6 intitolato *Dual Carriageway roads*⁴⁹ della normativa inglese (23). Esso descrive la tipologia e la corretta disposizione dei segnali e, infine, le procedure da adottare in diverse situazioni che possono essere riscontrate su una strada a doppia carreggiata quando su di essa sono presenti dei cantieri. Nel capitolo vengono riportate, per esempio, le seguenti casistiche:

- *Tapers*: chiusura di una o più corsie in una carreggiata.
- *Contra-flow operation*: spostamento di una o più corsie nella carreggiata opposta, procedura simile a quella già menzionata nella normativa francese. In sostanza, si sceglie di chiudere completamente la carreggiata interessata dai lavori, quando essi occupano una buona parte della stessa, con l'obiettivo di isolare i lavoratori dalla fonte di pericolo, ovvero il traffico veicolare. Nella carreggiata opposta non interessata dai lavori, per garantire un certo grado di sicurezza ai conducenti, i due flussi opposti di veicoli devono essere separati da una corsia lasciata libera, chiamata *Buffer zone*. Se ne deduce che la carreggiata deve essere composta

⁴⁸ Prescrizioni relative ai sistemi di ritenuta stradale

⁴⁹ strade a due carreggiate

da almeno tre corsie; se invece così non fosse, i due flussi di veicoli devono essere separati mediante dispositivi di protezione temporanei, rendendo pertanto la procedura simile a quella francese.

- *Hard shoulder use*: uso della corsia di emergenza

Di seguito si riportano alcuni schemi segnaletici riguardanti le varie procedure che possono essere adottate nel caso di strade a più carreggiate. È da notare che negli schemi non viene raffigurata la disposizione di barriere temporanee, sebbene nelle tabelle dei dettagli sia sempre riportata la possibilità di usarle, così come accade nella normativa di riferimento francese e tedesca.

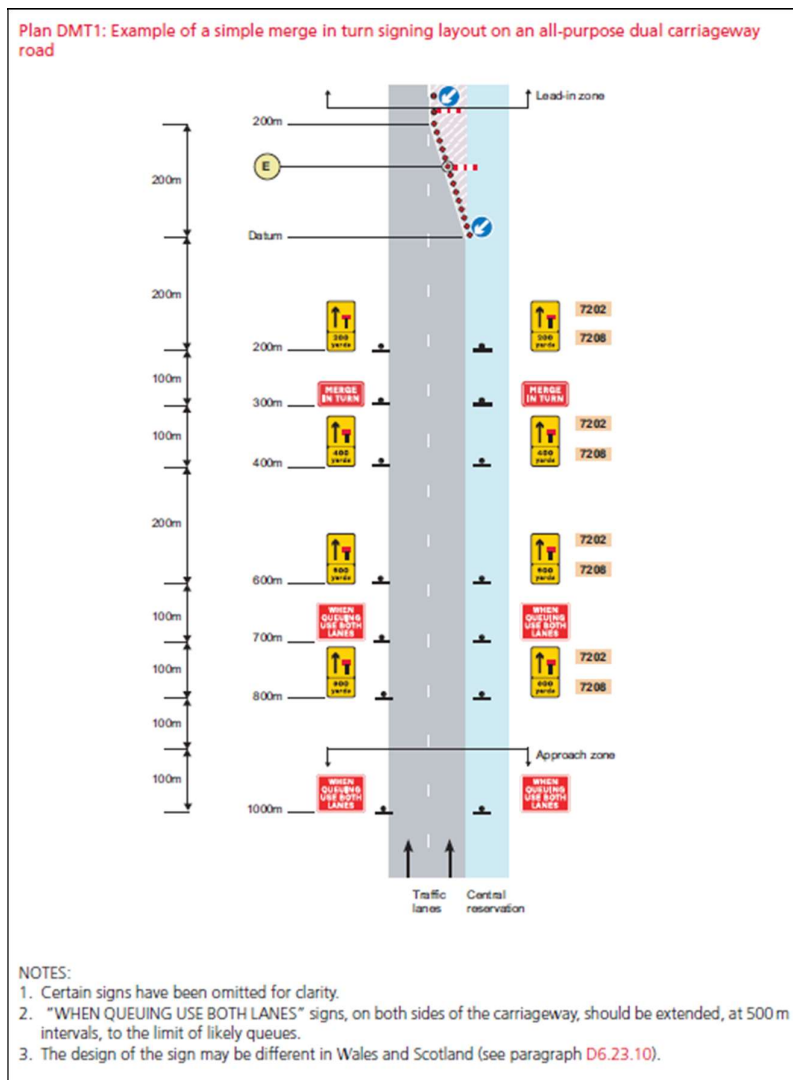


Figura 43_Schema segnaletico relativo a lavori che interessano la corsia destra (corsia di sorpasso)

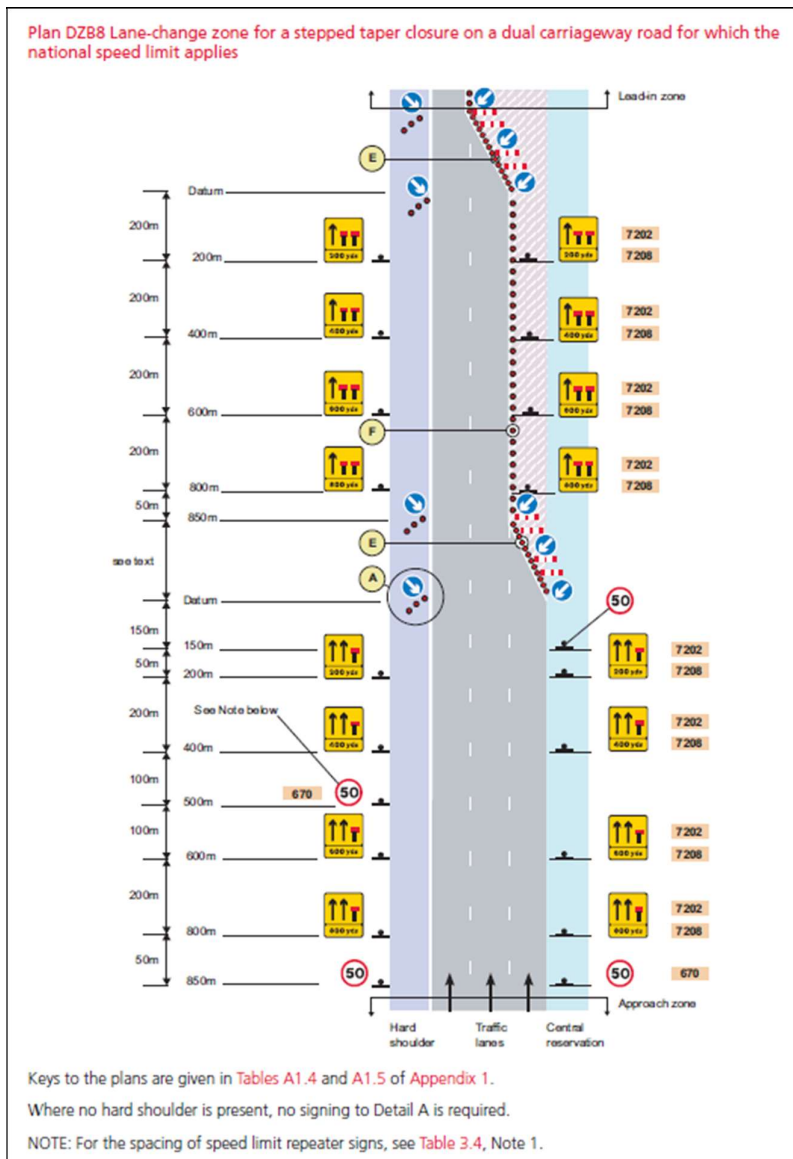


Figura 44_Schema segnaletico che rappresenta la chiusura della corsia di destra e la corsia centrale con due raccordi obliqui

I due schemi sopraindicati (figure 43 e 44), che sono stati scelti a titolo esemplificativo, raffigurano la chiusura di corsia di marcia, una nel primo e due nel secondo. È da sottolineare, che negli schemi si riportano, oltre alla rappresentazione della disposizione dei cartelli e dei dispositivi di delimitazione dell'area di cantiere, anche delle indicazioni di rimando contrassegnate dalle lettere dell'alfabeto che indicano degli approfondimenti contenuti nelle tabelle di dettaglio. Per esempio, nel secondo schema preso in considerazione, compaiono i dettagli A, E ed F, gli ultimi due dei quali sono di interesse per la redazione di questo elaborato e compaiono nelle due figure 45 e 46 riportate di seguito.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

Table A1.5 Details A to K used in plans (minimum sizes given)

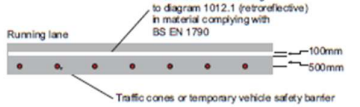
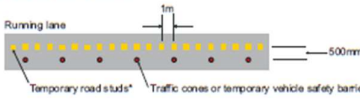
Details A to K used in plans (minimum sizes given)					
	Single carriageway road (permanent speed limit of 40mph or less)	Single carriageway road (permanent speed limit of 50mph or more)	Dual carriageway road (permanent speed limit of 40 mph or less)	Dual carriageway road (permanent speed limit of 50 mph or 60mph)	Dual carriageway road (national speed limit)
<p>Detail E</p> <p>Method E1: Using road markings and traffic cones or temporary vehicle safety barrier</p>  <p>Running lane</p> <p>Prescribed road marking to diagram 1012.1 (retroreflective) in material complying with BS EN 1790</p> <p>100mm</p> <p>500mm</p> <p>Traffic cones or temporary vehicle safety barrier</p> <p>Method E2: Using studs and traffic cones or temporary vehicle safety barrier</p>  <p>Running lane</p> <p>1m</p> <p>500mm</p> <p>Temporary road studs*</p> <p>Traffic cones or temporary vehicle safety barrier</p>	-	Cones 750mm	-	Cones 750mm	Cones 750mm (min)
	-	Cone spacing 3m Relaxation 9m	-	Cone spacing 1.5m Relaxation 3m	Cone spacing 1.5m Relaxation 3m
<p>* With fluorescent saturn yellow (yellow/green) bodies and uni-directional reflectors coloured amber when on the right and red on the left. Studs must conform to direction 57.</p> <p>NOTES:</p> <p>1) During darkness, warning lights to BS EN 12352:2006 should be provided in accordance with Table A1.3 (Appendix 1).</p> <p>2) On motorways and all-purpose dual carriageway roads with hard shoulders on which the national speed limit applies, 1m cones will be required for both standard works and works for which relaxations may be applied, for both lead tapes and the facing wall of a lane change.</p>					

Figura 45_ Tabella estratta dalla normativa di riferimento inglese _ Dettagli sulla segnaletica da disporre

A titolo di esempio, consultando la tabella soprastante (figura 45) relativa al dettaglio E, nel metodo E1, si evince che il raccordo obliquo per la chiusura della corsia di sorpasso può essere effettuato usando i dispositivi *road markings and cones*⁵⁰ oppure usando *temporary vehicle safety barrier*⁵¹.

Table A1.5 Details A to K used in plans (minimum sizes given)

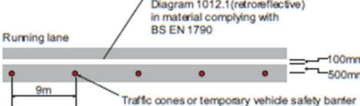
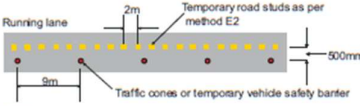
Details A to K used in plans (minimum sizes given)					
	Single carriageway road (permanent speed limit of 40mph or less)	Single carriageway road (permanent speed limit of 50mph or more)	Dual carriageway road (permanent speed limit of 40 mph or less)	Dual carriageway road (permanent speed limit of 50 mph or 60mph)	Dual carriageway road (national speed limit)
<p>Detail F</p> <p>Method F1: Using road markings and traffic cones or temporary vehicle safety barrier</p>  <p>Running lane</p> <p>Prescribed road marking to Diagram 1012.1 (retroreflective) in material complying with BS EN 1790</p> <p>100mm</p> <p>500mm</p> <p>9m</p> <p>Traffic cones or temporary vehicle safety barrier</p> <p>Method F2: Using studs and traffic cones or temporary vehicle safety barrier</p>  <p>Running lane</p> <p>2m</p> <p>500mm</p> <p>9m</p> <p>Temporary road studs as per method E2</p> <p>Traffic cones or temporary vehicle safety barrier</p> <p>NOTES:</p> <p>1) During darkness, warning lights to BS EN 12352:2006 should be provided in accordance with Table A1.3 (Appendix 1).</p>	-	Cones 750mm	-	Cones 750mm	Cones 750mm

Figura 46_ Tabella estratta dalla normativa di riferimento inglese _ Dettagli sulla segnaletica da disporre

⁵⁰ segnaletica orizzontale e coni

⁵¹ barriere di protezione temporanee

3.5 - CONCLUSIONI

Dal confronto tra le varie normative relative al segnalamento delle aree di cantiere si è potuto constatare che in tutti gli stati presi in considerazione l'uso o meno delle barriere temporanee è a discrezione del progettista; tuttavia, quella italiana risulta la più carente, in quanto, quelle degli altri paesi forniscono maggiori informazioni per quanto riguarda i dispositivi di protezione temporanei grazie a schemi, prescrizioni o indicazioni.

Tornando, quindi, a ragionare sul caso studio oggetto di questo elaborato, si può affermare che non vi è certezza che in Francia, Germania e Inghilterra si sarebbero usati dispositivi di protezione temporanei per proteggere i lavoratori, evitando così l'incidente. Tuttavia, avendo letto e analizzato le normative in materia di segnalamento dei cantieri di quelle nazioni, si può ragionevolmente supporre che, a differenza di quanto accaduto in Italia, il progettista avrebbe probabilmente fatto disporre delle barriere di protezione temporanea, alle quali all'estero viene data una maggiore importanza presentandoli come la degna alternativa ai dispositivi più tipicamente usati per la delimitazione e segnalazione delle aree di cantiere.

Ad oggi l'unico modo per poter persuadere i concessionari delle tratte autostradali a usare le barriere temporanee per fornire una protezione attiva ai propri lavoratori impegnati sulla carreggiata delle autostrade sarebbe quella di ricevere delle imposizioni dall'alto, ovvero dal Ministero delle infrastrutture e dei trasporti oppure dagli enti preposti Comunitari, andando a riscrivere o modificare la normativa esistente incentrata sui principi di segnalamento di cantiere e imponendo l'uso delle barriere temporanee per la protezione dei lavoratori. Infatti, senza chiari obblighi normativi sull'uso delle barriere in determinate situazioni, rimarrebbe sempre la discrezionalità da parte del progettista dei lavori o la scelta ricadrebbe sugli stessi concessionari e sui loro manuali interni di procedure. Tuttavia, nella nostra società, sempre più frenetica, bisogna anche fare i conti con il "tempo" dato che in alcuni casi le barriere di protezione non vengono usate poiché la loro installazione e rimozione richiederebbero troppo tempo, in alcuni casi superiori alla durata dei lavori stessi. Quanto appena riportato non può però essere una scusante per il non impiego delle barriere temporanee di protezione, per cui nel corso delle ultime decadi si sono studiati dei dispositivi innovativi e procedure per garantire un livello accettabile di sicurezza per i lavoratori, che non puntano sulla protezione attiva, ma sulla prevenzione degli incidenti e che saranno oggetto delle riflessioni nel prossimo capitolo.

CAPITOLO 4 - SISTEMI INNOVATIVI DI PREVENZIONE (WZIA)

Come evidenziato in dettaglio nei capitoli 1 e 2 della presente trattazione, gli incidenti verificatisi nei cantieri autostradali, che coinvolgono lavoratori impegnati sulla carreggiata, costituiscono un fenomeno persistente il cui tasso non ha mostrato segni di diminuzione negli ultimi anni, come illustrato nel capitolo 1. Questa problematica, che rappresenta un nodo critico sia dal punto di vista sociale che economico non solo in Italia, ma come documentato nel capitolo 2 anche in altre nazioni come ad esempio negli Stati Uniti, ha spinto gli organi preposti e gli addetti alla prevenzione ad adoperarsi costantemente per cercare di ridurre il numero di feriti e vittime in tali incidenti.

Al fine di tutelare la vita e l'incolumità dei lavoratori, è stato proposto l'utilizzo di dispositivi di protezione attiva, quali ad esempio le barriere in calcestruzzo, comunemente note come barriere New Jersey, o gli attenuatori d'urto montati come rimorchio per i mezzi di servizio nell'area di cantiere. Tale approccio mira a separare fisicamente i lavoratori, soggetti vulnerabili, dal pericolo rappresentato dal transito di veicoli e mezzi pesanti nelle immediate vicinanze del cantiere. Tuttavia, come discusso nel capitolo 3, l'impiego diffuso di tali dispositivi di protezione attiva è ostacolato da diverse sfide, come l'assenza di obblighi normativi e i costi iniziali elevati associati alla loro implementazione (“Work Zone Intrusion: Technology to Reduce Injuries & Fatalities” (26) e “Work Zone Intrusion Alert Technologies: Assessment and Practical Guidance” (27)). Da queste considerazioni sorge la necessità di garantire la sicurezza di tutti i lavoratori operanti nei cantieri autostradali sfruttando altri mezzi.

Per affrontare questa sfida, nel corso dei decenni passati si è proposto di sviluppare dispositivi che non fossero mirati alla protezione attiva degli operatori, ma bensì alla prevenzione degli incidenti. Pertanto, si è delineata una trasformazione concettuale, passando dalla protezione attiva, che pur difendendo il soggetto debole non evita l'incidente, all'approccio preventivo, basato sull'utilizzo di dispositivi dotati di sensori in grado di rilevare l'invasione di veicoli nell'area di cantiere e di trasmettere un allarme tempestivo, consentendo ai lavoratori di mettersi al sicuro e di prevenire così gravi conseguenze.

Attualmente, è disponibile una variegata gamma di dispositivi di rilevamento delle intrusioni, con differenti modalità di funzionamento. Come riportato negli articoli “Active Work Zone Safety: Preventing Accidents Using Intrusion Sensing Technologies” (28) e “Improving Work Zone Safety With Intrusion Alarms” (29), essi possono essere classificati come segue:

1. Sistemi cinematici: questi dispositivi sono concepiti per rilevare l'intrusione nell'area di cantiere in seguito a un impatto tra il sensore stesso e un veicolo errante. La capacità del sistema di rilevare l'urto è garantita dalla presenza nel dispositivo di sensori quali accelerometri, giroscopi e inclinometri;
2. Sistemi a infrarossi: questi sistemi utilizzano fasci di luce infrarossa per collegare unità di dispositivi che sono tipicamente dispiegate su coni o marcatori separati lungo il cantiere. Tali sistemi richiedono un allineamento preciso del raggio infrarosso tra la sorgente e il ricevitore. Il sistema viene attivato da un oggetto che interrompe il fascio;
3. Sistemi pneumatici: questi sistemi utilizzano sensori in grado di rilevare cambiamenti di pressione in un oggetto. Tipicamente sono usati dei tubi pneumatici collegati a un trasmettitore, posizionati sulla carreggiata perpendicolarmente al flusso del traffico all'inizio di una zona di lavoro. L'allarme viene attivato quando un veicolo intruso passa al di sopra del tubo;
4. Sistemi a microonde: questi dispositivi si avvalgono di emettitori e ricevitori che utilizzano le microonde per individuare la presenza di ostacoli nell'area da proteggere. I segnali a microonde vengono connessi all'unità di base e attivano un allarme quando un veicolo invade la zona di lavoro;
5. Sistemi basati su radar: questi dispositivi impiegano la tecnologia radar per rilevare intrusioni nell'area di cantiere. Essi includono radar a scansione elettronica, sistemi di posizionamento globale (GPS) differenziale ad alta precisione, accelerometri, giroscopi e magnetometri per il rilevamento della posizione e dell'orientamento. Questi dispositivi monitorano la vicinanza alla zona di lavoro e valutano la velocità e la traiettoria di avvicinamento dei veicoli per determinarne la possibilità di intrusione nella zona di lavoro;
6. Sistemi basati su tecnologia radio: questi dispositivi trasmettono il segnale di pericolo (intrusione di un veicolo) tra le varie apparecchiature che compongono il sistema sfruttando le onde radio.
7. Sistemi di rilevamento che sfruttano immagini: attualmente in fase di studio e sperimentazione, questi dispositivi utilizzano immagini acquisite da diverse prospettive in tempo reale per prevedere e tracciare la traiettoria dei veicoli e individuare eventuali intrusioni nell'area protetta.
8. Dispositivi basati su sensori ad ultrasuoni: sono dispositivi che sfruttano onde sonore ad alta frequenza per rilevare la presenza di veicoli o ostacoli nelle zone di lavoro.

9. Dispositivi basati sulla tecnologia LIDAR (Light Detection and Ranging): questi dispositivi utilizzano impulsi laser per misurare distanze e rilevare oggetti nell'ambiente circostante con elevata precisione.
10. Dispositivi che sfruttano l'Intelligenza Artificiale (AI) e l'Internet of Things (IoT): la sinergia tra l'uso della IA e dell'IoT permette di creare dei dispositivi intelligenti che possono raccogliere e analizzare dati in tempo reale e trasmettere informazioni e comandi ad altri apparati.

L'ampia gamma dei dispositivi identificati offre molteplici opzioni per il monitoraggio e la protezione degli operatori nei cantieri autostradali, con ogni sistema che presenta vantaggi e limitazioni specifiche in relazione alle esigenze e alle condizioni del contesto operativo.

Una ulteriore modalità di classificazione può essere basata sul metodo con il quale attivano l'allarme, distinguendo pertanto quelli ad azionamento meccanico da quelli dotati di sensori. Inoltre, è possibile differenziare i sistemi in base alla fonte di alimentazione utilizzata, che può essere costituita da batterie (corrente elettrica) o altri tipi di innesco. Tali considerazioni saranno esaminate in dettaglio nel prosieguo dell'analisi.

Come accennato in precedenza, oggigiorno è possibile osservare una grande varietà di dispositivi di individuazione delle intrusioni, molti già presenti sul mercato e altri in fase di sviluppo ed è importante sottolineare che l'inizio dell'implementazione dei primi non è recente, ma risale a circa trent'anni orsono. Secondo quanto emerso dal rapporto "Work Zone Intrusion: Technology to Reduce Injuries & Fatalities" (26) e dall'articolo "Improving Work Zone Safety With Intrusion Alarms" (29), le prime tecnologie per rilevare l'ingresso di veicoli nelle aree di cantiere sono state concepite già a partire dal 1995, anche basandosi su brevetti di tecnologie preesistenti, come quelle che sfruttavano ultrasuoni e infrarossi, in seguito a uno studio condotto dal programma SHRP⁵² negli Stati Uniti. Tuttavia, l'adozione immediata di tali dispositivi non è stata una conseguenza diretta di tali sviluppi.

Come riportato nello stesso rapporto, il limitato progresso nel corso degli anni successivi (dal 1995 fino a circa quindici anni fa) è stato in gran parte attribuito alla scarsa affidabilità dei dispositivi precedenti, i quali manifestavano numerosi falsi allarmi e presentavano complicazioni nell'utilizzo. Tuttavia, negli ultimi quindici anni, negli Stati Uniti vi è stata un'imponente spinta per lo sviluppo di

⁵² STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM: è un programma di ricerca quinquennale focalizzato sulla risoluzione delle principali problematiche legate alle infrastrutture autostradali negli Stati Uniti, con l'obiettivo di migliorare la sicurezza, l'efficienza e la durabilità delle strade.

quelli per il rilevamento delle intrusioni veicolari, grazie all'incoraggiamento degli enti federali all'impiego e allo sviluppo di tali tecnologie.

In effetti, come evidenziato nell'articolo "Cones Sound a Warning of Work Zone Intrusion" (30), negli Stati Uniti l'uso e la produzione di tali tecnologie è incoraggiato nel CFR (Code of Federal Regulations). Tale impulso è anche in parte alimentato dall'incremento dell'incidentalità legata ai cantieri stradali, come attestato dai dati del NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA) e del BUREAU OF LABOR STATISTICS (BLS), che negli ultimi anni registrano un aumento del numero di vittime.

Grazie a questa rinnovata spinta verso l'utilizzo di tali dispositivi, numerosi DOT (Department of Transportation) di vari stati Americani stanno commissionando a gruppi di ricerca universitari o a professionisti del settore la stesura di report esaustivi sulle tecnologie attualmente disponibili sul mercato e sui futuri sviluppi di nuovi dispositivi, rendendo così immediatamente accessibili e utilizzabili tali strumentazioni e promuovendo ulteriori progressi nel settore.

Nel proseguo di questa trattazione, si procederà all'analisi di alcuni report mirati, con l'intento di esaminare le tecnologie attualmente disponibili sul mercato, investigare sulle caratteristiche e il funzionamento di tali dispositivi e condurre un confronto tra i risultati ottenuti da diversi gruppi di ricerca. Ciascuno di questi report tipicamente comprende una sezione introduttiva ed esplicativa delle tecnologie in questione, seguita da una valutazione dei risultati derivanti da prove sperimentali condotte in condizioni controllate e circoscritte, nonché dall'applicazione pratica dei dispositivi in situazioni reali di cantiere. Nel prossimo paragrafo verranno approfonditi i sistemi sinteticamente riportati nella seguente tabella:

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

DISPOSITIVI	TECNOLOGIE	STATO DI IMPLEMENTAZIONE
WAS (Work Alert System)	Sistema PNEUMATICO	Commercializzato
SonoBlaster	Sistema CINEMATICO	Commercializzato
Intellicone	Sistema CINEMATICO + RADIO	Commercializzato
Single Sentry Beam	LIDAR + RADIO	Commercializzato
AWARE (Advanced Warning and Risk Evasion)	RADAR	Commercializzato
Guardian Cone	RADAR	Commercializzato
Alpha Safenet Portable Overwatch Device	LIDAR	Commercializzato
Wireless Sensor Network	ULTRASUONI + CINEMATICO	Prototipo
Camera-Based Work Zone Intrusion Detection	IMMAGINI + AI + IoT	Prototipo

Tabella 14_ Stato di implementazione attuale dei dispositivi analizzati

Un aspetto fondamentale trattato in tali report riguarda l'implementazione pratica dei dispositivi, con particolare attenzione alla fase di installazione, rimozione e utilizzo degli stessi. Benché possa sembrare scontato sottolineare l'importanza di tali operazioni, è cruciale considerare che tali

dispositivi saranno impiegati da operai e lavoratori. Pertanto, affinché essi vengano adottati con soddisfazione e fiducia, oltre a garantire affidabilità e adeguate caratteristiche, devono anche essere di semplice utilizzo e installazione (nonché rimozione), in quanto solo in tal modo possono essere pienamente accolti e utilizzati correttamente dagli operatori.

4.1 - DESCRIZIONE DEI DISPOSITIVI INNOVATIVI (WZIA)

Come precedentemente delineato, l'attuale panorama dei dispositivi di rilevamento di intrusione in zone di lavoro (Work Zone Intrusion Alarm = WZIA) comprende varie tipologie, ciascuna caratterizzata dalla propria tecnologia di funzionamento. La missione primaria di tali dispositivi consiste nell'individuare intrusioni e attivare tempestivamente l'allarme tramite meccanismi distinti, i quali saranno successivamente esaminati, al fine di avvisare prontamente gli operatori presenti sul sito, concedendo loro il tempo necessario per adottare misure protettive e mettersi in salvo. Solitamente, tali dispositivi si compongono di un sistema di rilevamento di intrusioni nell'area di lavoro e di un meccanismo di allarme, il quale comunemente si avvale di segnalazioni sonore e visive, e talvolta anche di vibrazioni. Le versioni più sofisticate di tali dispositivi sono dotate di un trasmettitore, consentendo così l'invio del segnale di allarme a ulteriori dispositivi indossabili dai lavoratori, che si integrano nel "macro-sistema" o "network" di funzionamento del dispositivo. Nella seguente sezione, verranno esaminate le peculiarità e gli elementi costitutivi di alcuni dispositivi identificati attraverso una ricerca online sul tema, con la presentazione di informazioni rilasciate dai produttori e fabbricanti relative alle attrezzature già disponibili sul mercato, in fase di sviluppo e con un accenno anche a nuovi brevetti.

4.1.1 - WORK ALERT SYSTEM

Il primo dispositivo analizzato è il sistema di allarme WAS (Work Alert System). Esso è composto da diversi elementi, tra cui un tubo di circa 3.6 metri (12 piedi) di lunghezza collegato a un sensore di pressione e a un trasmettitore di segnale. Questo dispositivo utilizza dei sensori di pressione inseriti in un tubo per rilevare variazioni di pressione causate dal passaggio di veicoli. Il sensore di pressione attiva il trasmettitore, che invia un segnale all'unità di allarme "collettivo" (Portable Alarm Case = PAC), il quale, attraverso un altoparlante e una lampada a LED, emette un segnale sonoro e luminoso per informare gli operatori sulla carreggiata dell'imminente pericolo. Inoltre, il trasmettitore invia un allarme a uno o più dispositivi di avviso personale (in inglese Personal Safety Device = PSD),

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

ciascuno dei quali può essere indossato dai lavoratori e ha la capacità di attivare un allarme sonoro e una vibrazione per avvertire direttamente l'operatore. Inoltre, il PSD è provvisto anche di un pulsante che permette di attivare e disattivare l'allarme a distanza.

Nella figura riportata di seguito (figura 47) è possibile osservare tutti i componenti del sistema WAS descritti in precedenza:



Figura 47_componenti del sistema WAS

Dalla scheda tecnica del prodotto emerge che l'unità di allarme collettivo (PAC) è alimentata da una batteria ricaricabile, mentre i dispositivi di sicurezza personale (PSD) utilizzano pile di tipo AA. Il fabbricante specifica inoltre che la massima distanza di comunicazione tra il trasmettitore montato all'estremità del tubo pneumatico e le due unità di allarme è di circa 300 metri (1000 piedi, come riportato nel report "Evaluation of Work Zone Intrusion Alarms" (31)). Tuttavia, è importante notare che, come verrà discusso nel prossimo paragrafo, questa distanza effettiva risulta leggermente inferiore.

Per quanto riguarda il costo del sistema, le informazioni sono state reperite da due report distinti. Il primo report ("Work Zone Intrusion Alert Technologies: Assessment and Practical Guidance" (27)) indica che il costo del tubo pneumatico con sensore di pressione e dell'unità di allarme collettivo PAC è di circa 600 \$ e l'informazione è confermata dal secondo report ("Work Zone Alert Systems" (32)), che riporta un prezzo di 575 \$ per gli stessi componenti. Inoltre, il secondo report fornisce anche il costo delle unità di allarme PSD, che è di 170 \$ per dispositivo.

4.1.2 - SONOBLASTER

Il SonoBlaster è un dispositivo detto “cinematico” ad azionamento meccanico concepito per essere installato sui dispositivi di delimitazione utilizzati nei cantieri stradali, come ad esempio i coni segnaletici. Questo dispositivo si compone di una cornetta, conosciuta come clacson, la quale è responsabile dell'emissione dell'allarme sonoro. Tale clacson è alimentato attraverso l'utilizzo di una bomboletta contenente biossido di carbonio (CO₂), la quale viene perforata al momento dell'impatto tra un veicolo in movimento e il dispositivo in esame, consentendo la liberazione del gas contenuto al suo interno. In conformità con le specifiche fornite dal produttore, l'allarme sonoro emesso dal dispositivo SonoBlaster raggiunge l'intensità di 125 dB per un periodo continuativo di 15 secondi. L'attivazione dell'apparato avviene istantaneamente all'atto dell'impatto del veicolo sul dispositivo, il quale è predisposto per essere innescato quando inclinato con un angolo superiore a 70 gradi. In aggiunta, il sistema è equipaggiato con uno switch che consente l'armamento e il disarmamento del dispositivo, al fine di prevenire attivazioni accidentali durante il trasporto e la posa in opera, riducendo così il rischio di falsi allarmi.

Si allega di seguito un'immagine illustrativa (fig. 48) rappresentante i livelli di intensità sonora in decibel relativi a oggetti e attività comuni, al fine di fornire una comprensione più chiara del significato di un allarme di 125 dB emesso dal dispositivo in esame.

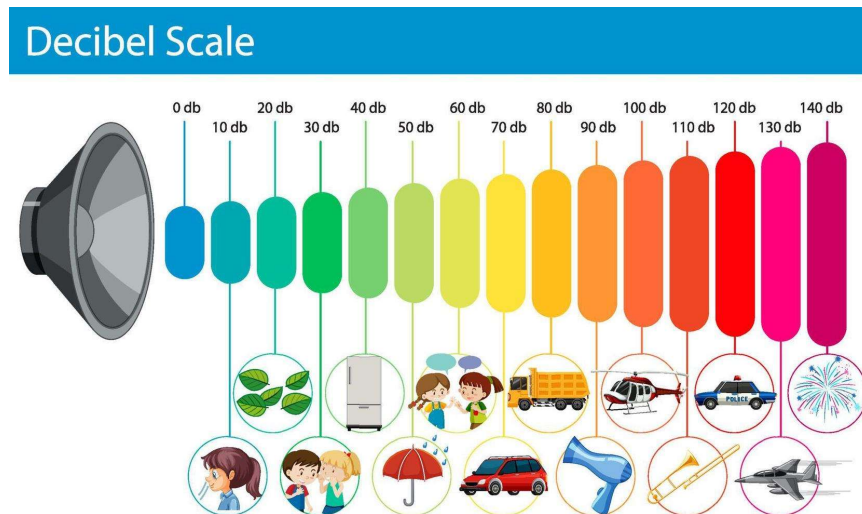


Figura 48_Scala in Db dei livelli sonori di rumori quotidiani

Un ulteriore vantaggio intrinseco del dispositivo SonoBlaster risiede nella sua indipendenza dalle fonti di energia esterne, quali l'alimentazione elettrica. L'unica componente che richiede periodica

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

manutenzione è la cartuccia di CO₂, la quale deve essere controllata e sostituita dopo ogni attivazione del dispositivo.



Figura 49_componentistica del sistema SonoBlaster

Nell'immagine soprastante (figura 49) sono riportati i vari componenti del dispositivo SonoBlaster.

In quanto dispositivo destinato all'installazione su strumenti di delimitazione delle aree di cantiere, quali coni, cilindri, e simili, per garantire una copertura adeguata dell'area di lavoro, è necessario che il cantiere disponga di un numero significativo di dispositivi, distribuiti lungo l'intero perimetro dell'area di lavoro.

La realizzazione semplice (semplicità costruttiva) del dispositivo implica che ciascuna unità installata sia logicamente indipendente. Pertanto, se un cono provvisto del SonoBlaster viene impattato, solo tale dispositivo emetterà l'allarme e esso non sarà propagato ad altri dispositivi o sistemi di supervisione o controllo. Questa caratteristica implica che se il personale operativo dovesse trovarsi a una distanza sufficientemente remota dall'allarme, potrebbe non essere in grado di percepirlo. Come sarà esposto in seguito, tale limitazione è stata superata in altri dispositivi più sofisticati nei quali sono stati implementati dei sistemi di trasmissione del segnale di pericolo.

Dal punto di vista economico, una indicazione del costo del dispositivo può essere ritrovata all'interno del report "Work Zone Intrusion Alert Technologies: Assessment and Practical Guidance" (27) nel quale è indicato che il prezzo per un elemento SonoBlaster è di 100\$.

4.1.3 - INTELLICONE

Intellicone, analogamente al SonoBlaster, è un dispositivo di tipo cinematico impiegato per l'individuazione dell'intrusioni di veicoli estranei nell'area di cantiere che si attiva inseguito al loro impatto con il dispositivo. Entrambi i sistemi sono installati sui dispositivi per la delimitazione delle aree di cantiere, quali ad esempio i coni stradali, tuttavia, a differenza del SonoBlaster, il funzionamento dell'Intellicone non è basato su un azionamento meccanico dell'allarme, ma sfrutta dei sensori per l'individuazione delle intrusioni nell'area "protetta"/"controllata" e; inoltre, impiega sistemi per la trasmissione e la propagazione del segnale di pericolo verso altri dispositivi, creando così una vera e propria "rete"/un "Network" per la protezione del cantiere.

Il "sistema" Intellicone si compone di due dispositivi che comunicano tra loro:

- Portable Site Alarm (PSA): l'unità di allarme da disporre accanto alla squadra di operai (figura 50). Tale dispositivo funge da ricevitore del segnale di pericolo e possiede delle lampade LED in due colorazioni e tre altoparlanti per lanciare un allarme sonoro e visivo. Il dispositivo è alimentato da una batteria ricaricabile non rimovibile che garantisce una autonomia di 50h. Il PSA, inoltre, possiede al suo interno un ricevitore/trasmittitore che sfrutta il segnale radio per comunicare con altri PSA potenzialmente fino a 200 unità di rilevamento, in un raggio di azione di circa 30 metri (100 piedi). Possiede inoltre un sistema che gli permette di collegarsi alla più vicina rete di telefonia mobile per comunicare con altri PSA a distanze superiori a 30m e che quindi consente a due PSA di comunicare tra loro a una distanza virtualmente illimitata.

In ultimo, il PSA possiede anche un dispositivo GPS che consente di poter tracciare la sua posizione e, attraverso una interfaccia web basata su mappe geografiche (map-based web interface), è possibile disegnare e individuare il perimetro della zona di lavoro entro il quale il PSA potrà funzionare. Inoltre, all'interno di tale regione, ogni PSA possiede un proprio e specifico ID, ciò permette quindi l'individuazione univoca della posizione di uno o più PSA, in maniera continuativa nel tempo.



Figura 50_Portable Site Alarm (PSA)

- **Intellicone System Cone Lamp:** Unità di rilevamento delle intrusioni (figure 51 e 52): questo dispositivo è installato direttamente sui coni di delimitazione ed è composto da una lampada a LED, da un sensore (accelerometro e/o inclinometro) e da un trasmettitore/ricevitore di segnale. Tale dispositivo è alimentato tramite una batteria che può essere sostituita manualmente senza l'ausilio di alcun attrezzo particolare ed è progettato per attivarsi nel momento in cui l'operatore installa il dispositivo sul cono di delimitazione.

Il faro LED ha il "semplice"/"solo" scopo di evidenziare il perimetro della zona di lavoro, specialmente in condizioni di scarsa illuminazione, attirando l'attenzione del conducente. Rappresenta quindi un contributo aggiuntivo alla segnalazione del cantiere.

Per quanto concerne invece il sensore installato all'interno del sistema, esso è il vero dispositivo che serve a individuare l'intrusione del veicolo errante. In questo caso l'accelerometro ha lo scopo di individuare quando in seguito ad un urto il dispositivo subisce uno spostamento e/o si inclina di un angolo superiore ai 45 gradi.

L'emettitore/ricevitore di segnale, invece, sfrutta segnali radio per comunicare (trasmettere) ad altre unità di rilevamento o ai PSA l'allarme di pericolo individuato dall'accelerometro fino ad una distanza di 30m (100 piedi).



Figura 51_Intellicone System Cone Lamp_ Unità di rilevamento delle intrusioni

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento



Figura 52_Installazione dell'Unità di rilevamento delle intrusioni del sistema Intellicone su un dispositivo standard di delimitazione di cantiere

Entrando nel dettaglio su come il sistema operi nell'atto di una intrusione di un veicolo si può indicare che quando una unità di rilevamento montata sul cono di delimitazione viene urtata essa trasmette il segnale radio di pericolo direttamente al PSA se si trova nel suo raggio di azione, altrimenti può trasmettere il segnale di pericolo da una lampada all'altra, per una distanza non superiore a 30m (raggio di azione del segnale radio), fino a che il segnale non arriva al PSA. Una volta che il segnale è arrivato al PSA, esso fa partire gli allarmi luminosi (di colore rosso) e sonori (allarme di circa 60 dBA) per una durata di circa 30 secondi (+2 sec.) per avvertire i lavoratori dell'intrusione di un veicolo errante nell'area di cantiere sorvegliata.

Per quanto riguarda l'aspetto economico, tale informazione può essere reperita consultando il report "Work Zone Alert Systems" (32) che indica che il costo si aggira tra i 15\$ e i 35\$ al giorno per la locazione di un PSA e 10 sensori.

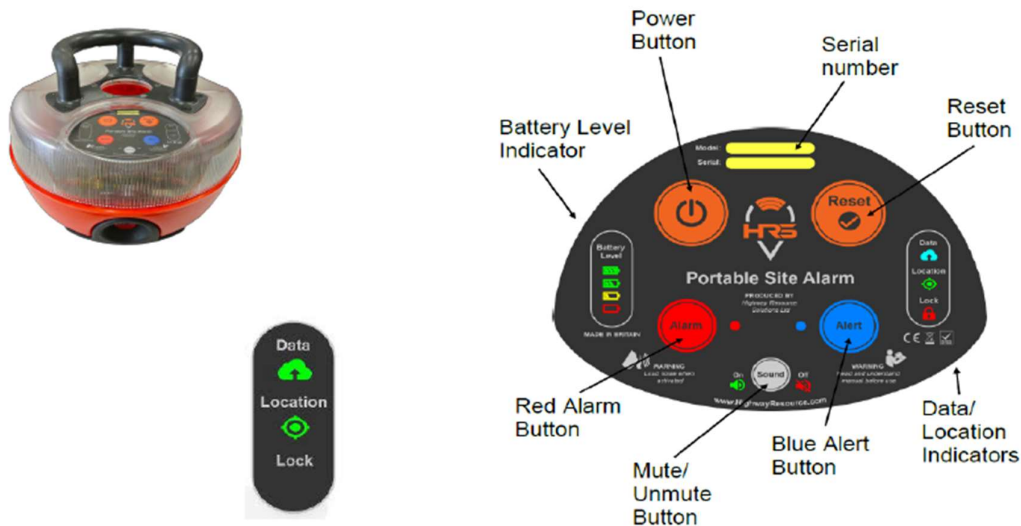


Figura 53_Dettaglio della pulsantiera del dispositivo PSA

Come è possibile osservare dalla figura 53 che mostra un ingrandimento della pulsantiera del PSA, è possibile notare il pulsante per l'accensione del sistema, il livello di batteria del sistema e il pulsante Reset per resettare l'allarme. Il pulsante chiamato Blue alert button serve per attivare manualmente l'allarme composto da una luce lampeggiante blu e un allarme sonoro monotono. Questo tipo di allarme è stato concepito dal produttore per essere attivato manualmente quando un mezzo d'opera previsto entra nell'area di cantiere, e quindi per avvisare i lavoratori che è entrato per l'appunto il mezzo d'opera. Il pulsante red alarm button serve per attivare manualmente l'allarme composto da un lampeggiante di colore rosso e un allarme sonoro di 3 toni. Questo allarme è anche quello che scatta automaticamente quando il sensore montato su cono viene impattato da un veicolo e quindi si ha l'intrusione. Si può anche vedere sulla destra del quadrante le indicazioni che riportano se il PSA è collegato a una rete cellulare e se il tracciamento GPS è attivo.



Figura 54_Tipologie di PSA presenti in commercio

In figura 54 sono raffigurate diverse varianti del PSA, in quanto il fabbricante dell'Intellicone ha diversificato la produzione, creando più modelli, ciascuno destinato a specifiche tipologie di cantieri in cui il dispositivo può essere utilizzato.

Nell'immagine riportata di seguito (figura 54) è possibile osservare l'allarme visivo del dispositivo PSA dell'Intellicone.



Figura 55_Allarme luminoso del PSA_ immagine tratta dal report "Evaluation of Work Zone Intrusion Alarms" (31)

4.1.4 - SINGLE SENTRY BEAM (PORTABLE LASER)

Il Single Sentry Beam (figura 56) rappresenta un dispositivo basato sulla tecnologia laser, progettato per individuare la presenza di corpi estranei, come pedoni o veicoli, nel suo raggio di azione. In caso di rilevamento, il sistema emette un segnale di allarme per consentire agli operatori stradali di adottare le misure necessarie per la propria sicurezza.



Figura 56_Single Sentry Beam

Per calibrare la distanza di rilevamento del laser, è necessario posizionare un oggetto solido alla distanza desiderata durante la fase di taratura del dispositivo e farlo colpire dal laser per 15 secondi.

Dopo la taratura il dispositivo può essere quindi orientato nella direzione desiderata. In questo modo, il dispositivo viene configurato e sarà in grado di rilevare gli oggetti che attraversano il fascio solo entro la distanza di taratura impostata.

Come è possibile osservare nella figura 57, la capacità di rilevamento del sistema varia a seconda delle seguenti condizioni: circa 10 metri (33 piedi) per i pedoni che indossano vestiti scuri, 20 metri (66 piedi) per i veicoli che viaggiano a circa 90 km/h e fino a 35 metri (115 piedi) per i lavoratori che indossano indumenti ad alta visibilità (catarifrangenti). Tuttavia, si deve notare che le prestazioni del laser sono influenzate dalle condizioni di illuminazione e possono variare anche in base all'angolo di avvicinamento e alle dimensioni del veicolo.

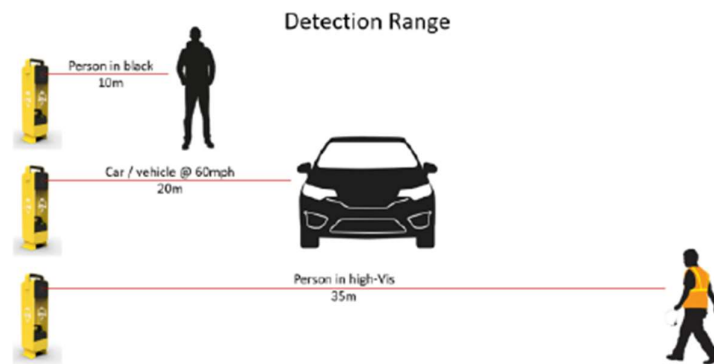


Figura 57_Range di rilevamento del sistema Single Sentry Beam

Il dispositivo è alimentato da batterie ricaricabili che garantiscono un'autonomia operativa di circa 120 ore. Va notato che il Single Sentry Beam è prodotto dalla stessa casa costruttrice del sistema Intellicone, consentendo così la comunicazione wireless con i dispositivi di allarme il PSA (come mostrato nella figura 58) per una distanza di circa 75 metri. Questo aspetto è di particolare rilievo, poiché la capacità del dispositivo di comunicare con i PSA come l'Intellicone offre la possibilità di creare una rete congiunta tra i due dispositivi. Ad esempio, il Single Sentry Beam può essere impiegato per la protezione trasversale dell'area di cantiere, mentre l'Intellicone per il rilevamento delle intrusioni lungo lo sviluppo longitudinale della stessa. Tuttavia, a differenza di quanto accade per il sistema Intellicone, il Single Sentry Beam può comunicare solo ed esclusivamente con i PSA e quindi due SSB (Single Sentry Beam) non possono comunicare tra loro e quindi non possono trasmettere il segnale per prolungare il loro raggio di azione. Però come si vede nell'immagine sottostante questa limitazione può essere superata se si impiegano più dispositivi PSA.

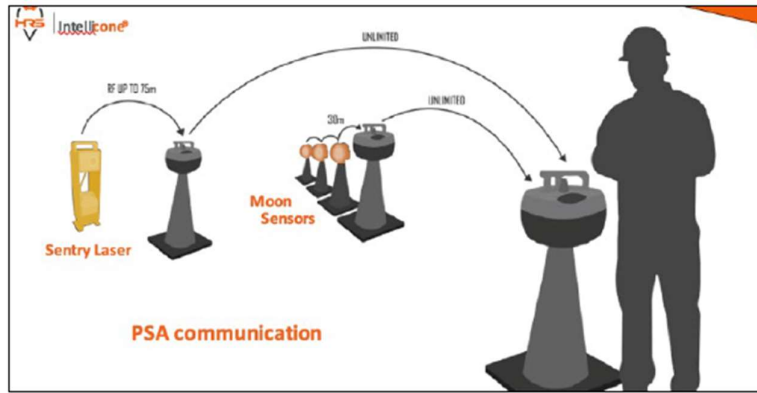


Figura 58_ Interconnessione del dispositivo Single Sentry beam con il sistema Intellicone

4.1.5 - AWARE

Il sistema AWARE (Advanced Warning and Risk Evasion) è un dispositivo basato su tecnologia radar, progettato per tracciare e rilevare veicoli che transitano nelle vicinanze delle aree di cantiere. Questo apparecchio è dotato di sensori in grado di individuare e monitorare possibili intrusioni da parte dei veicoli, fornendo un allarme tempestivo agli operatori presenti sulla carreggiata.

Il sistema è composto da un sensore radar e dai dispositivi per la segnalazione delle intrusioni, come luci e altoparlanti per segnali sonori e luminosi. Inoltre, vengono fornite delle unità di allarme personali chiamate Worktrax, che possono essere indossate dagli operatori, e che attraverso la tecnologia GPS permettono di tracciare in tempo reale la posizione degli operatori nell'area di cantiere. In aggiunta a tutto ciò, il produttore ha implementato una applicazione per cellulare utile per configurare e comandare il sistema. Nell'immagine riportata di seguito si possono osservare tutti gli elementi che compongono il sistema AWARE.



Figura 59_ Componenti del Sistema AWARE

Il sistema AWARE può essere utilizzato in due versioni distinte, che sfruttano la medesima componentistica, a seconda delle specifiche esigenze delle lavorazioni eseguite nel cantiere:

Individuazione delle intrusioni di corsia: questa versione è stata concepita per l'individuazione di intrusioni di veicoli su strade ad alta velocità. Il dispositivo, in questa configurazione, è in grado di rilevare i veicoli e analizzarne la traiettoria. Attualmente, questa versione del dispositivo non è disponibile a causa di interruzioni nello sviluppo causate dalla pandemia di Covid-19. In questa modalità, come mostrato in figura 60 il sistema è montato su veicoli di supporto alle operazioni, permettendo così di seguire i lavori in movimento.



Figura 60_AWARE in configurazione di "Individuazione delle intrusioni di corsia"

AWARE Sentry: in questa configurazione, il sistema è utilizzato per assistere nelle attività di sbandieramento durante la chiusura di una corsia su strade a lenta percorrenza. In questa modalità i vari componenti del sistema AWARE sono posizionati all'interno di uno scatolotto portatile come può essere osservato nelle figure 61 e 62.



Figura 61_AWARE SENTRY



Figura 62_componenti del sistema in configurazione AWARE Sentry

Il sensore del sistema AWARE è in grado di rilevare i veicoli in avvicinamento nei pressi del cantiere in due distinte aree, come è rappresentato nell'immagine riportata di seguito (figura 63).

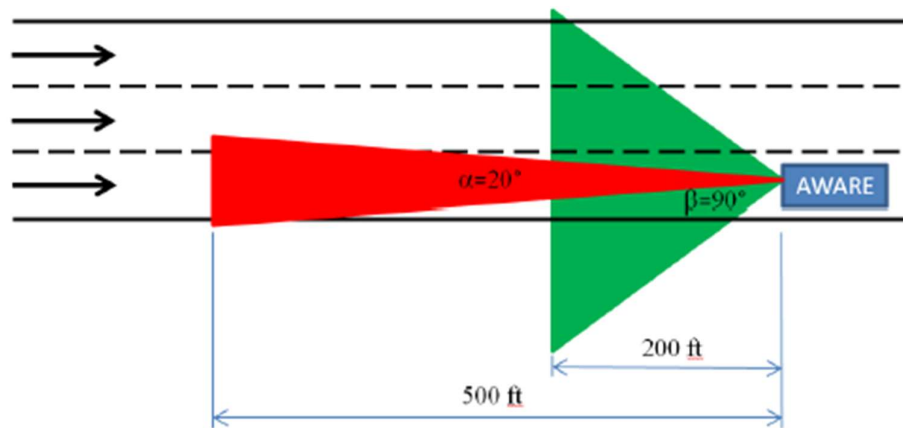


Figura 63_Regioni di individuazione delle intrusioni

Tali regioni di individuazione delle intrusioni differiscono tra loro per le dimensioni e la distanza di rilevamento. Una delle aree di rilevamento è definita a “lungo raggio”, mentre l'altra è definita “corto raggio”. L'area di rilevamento a lunga distanza si estende per circa 500 piedi (150 m) a monte del sensore, con una ampiezza di 10 gradi su ciascun lato del sensore radar, per un totale di un angolo di rilevamento totale di 20 gradi. L'area di rilevamento a breve distanza, invece, copre una lunghezza di circa 200 piedi (60 m), con un angolo di rilevamento totale di 90 gradi.

Per quanto concerne il funzionamento del dispositivo si può considerare che il sensore radar del sistema è in grado di monitorare una zona di lavoro attiva, valutando la velocità e la direzione dei veicoli all'interno dell'area di copertura radar. Nello specifico, il dispositivo, tenendo conto della velocità del veicolo in avvicinamento, calcola la distanza di arresto (in inglese Stopping Sight Distance = SSD) del veicolo una volta rilevato nella sua area di osservazione. In base a tale distanza, il sistema determina se il veicolo invaderà o meno l'area di cantiere, attivando di conseguenza uno dei tre possibili livelli di allarme previsti.

Per il calcolo della distanza di arresto i produttori dell'AWARE hanno usato l'equazione proposta dalla AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials') riportata nel volume "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets":

$$SSD = 1.47Vt + 1.075 \frac{V^2}{a} \quad \text{Equazione 1}$$

Dove:

SSD = Stopping Sight Distance = distanza di arresto [piedi];

V = velocità del veicolo in avvicinamento [mph];

t = tempo di percezione e reazione [secondi];

a = tasso di decelerazione [piedi/secondi²] = 11.2[piedi/secondi²]

L'AASHTO considera nel suo manuale un tempo t di percezione-reazione pari a 2,5 secondi. Ciò implica che se si considerassero due veicoli che sopraggiungono ad una velocità di 45mph (72,4 km/h) e 60mph (96,56 km/h), si otterrebbero delle distanze di arresto pari a 360 piedi (109,7m) nel primo caso e 566 piedi (172,5m) nel secondo caso.

Tuttavia, i produttori del sistema AWARE hanno progettato il loro dispositivo valutando anche due approcci di calcolo alternativi e più conservativi rispetto a quello proposto dall'AASHTO, considerando due tempi di percezione-reazione maggiori, t=4.5 secondi e t=6 secondi. Inserendo nella *equazione 1* questi due tempi maggiori di t=2.5 secondi si ottengono di conseguenza delle distanze di arresto maggiori come è possibile evincere anche dal grafico 46 e dalla tabella 15 riportati di seguito.

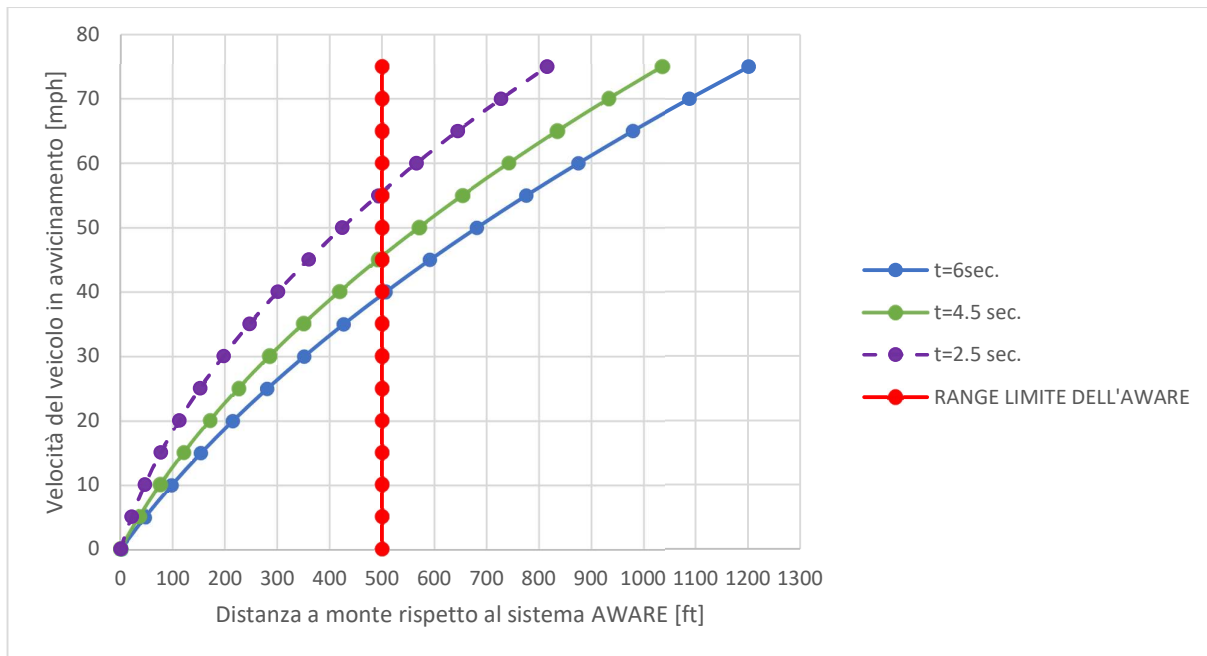


Grafico 46_ Valutazione della distanza di arresto in funzione della velocità del veicolo errante e del tempo di percezione e reazione

Il sistema è stato progettato anche con gli approcci più conservativi ($t=4.5$ secondi e $t=6$ secondi) poiché, come è osservabile dal grafico 46, in questo modo si sono potute fissare tre soglie di allarme rispetto alla massima capacità di rilevamento del sistema stesso, che per la regione a lungo raggio è fissata a 500 piedi (150m). Per esempio, se il veicolo che sta sopraggiungendo nei pressi del cantiere possiede una velocità di avvicinamento superiore a 40 mph (60,4 km/h), la SSD valutata con il tempo $t=6$ secondi eccederà il range massimo di rilevamento del sistema. Lo stesso accade per la SSD calcolata per $t=4.5$ secondi se il veicolo in avvicinamento possiede una velocità maggiore di 45 mph (72,4 km/h) o secondo l'approccio AASHTO, quindi per $t=2.5$ secondi quando il veicolo viaggia ad una velocità superiore ai 55 mph (88,5 km/h). Questo significa che la gamma di rilevamento del sistema governa l'attivazione dei suoi allarmi e avvisi.

In base al tempo di percezione/reazione t che è usato per la valutazione della SSD il sistema è in grado di attivare uno dei 3 seguenti livelli di allarme:

- Se il veicolo in avvicinamento si trova all'interno della distanza di arresto calcolata per $t=6$ secondi, vengono attivati solo gli allarmi sui dispositivi personali WorkTRAX per permettere agli operai di mettersi al sicuro.
- Se il veicolo in avvicinamento si trova all'interno della distanza di arresto calcolata per $t=4.5$ secondi, si attivano i segnali luminosi installati sul corpo principale del Sentry AWARE per avvertire principalmente il conducente del veicolo.

- Se il veicolo in avvicinamento si trova all'interno della distanza di arresto calcolata per t=2.5 secondi, vengono attivati tutti gli allarmi sui dispositivi Worktrax e i segnali luminosi e sonori sul Sentry.

velocità		DISTANZA SSD IN BASE AI DIFFERENTI TIPI DI ALLARME DELL'AWARE					
		Worktrax (t=6 sec.)		Lights (t=4.5 sec.)		Worktrax+Lights+Siren (t=2.5 sec.)	
[mph]	[km/h]	[piedi]	[m]	[piedi]	[m]	[piedi]	[m]
0	0	0	0	0	0	0	0
5	8,0	46	14	35	11	21	6
10	16,1	98	30	76	23	46	14
15	24,1	154	47	121	37	77	23
20	32,2	215	65	171	52	112	34
25	40,2	280	85	225	69	152	46
30	48,3	351	107	285	87	197	60
35	56,3	426	130	349	106	246	75
40	64,4	506	154	418	127	301	92
45	72,4	591	180	492	150	360	110
50	80,5	681	208	571	174	424	129
55	88,5	775	236	654	199	492	150
60	96,6	875	267	742	226	566	173
65	104,6	979	298	835	255	644	196
70	112,7	1088	332	933	284	728	222
75	120,7	1201	366	1036	316	816	249

Tabella 15_Distanza di arresto (SSD) in funzione della velocità di avvicinamento del veicolo errante e del tempo di percezione e reazione

Nella tabella soprastante sono stati riportati i valori che si ottengono sfruttando l'equazione 1 per i tre tempi t considerati.

Il sistema AWARE è stato progettato per non attivarsi in presenza di mezzi d'opera e attrezzature che si muovono all'interno e intorno all'area di lavoro a velocità inferiori alle 15 mph (25 km/h). Questa funzione è necessaria per evitare un eccesso di allarmi che potrebbero indurre i lavoratori a ignorare i veri allarmi nel momento di vero pericolo.

Attualmente, il dispositivo non è disponibile sul mercato. Negli ultimi anni, tuttavia, è stato oggetto di numerose campagne di prova condotte da vari gruppi di ricerca universitari e dipartimenti dei trasporti di diversi stati americani. Nonostante il produttore di AWARE utilizzi il dispositivo esclusivamente nei cantieri di propria competenza, ha fornito il dispositivo ai suddetti enti per ottenere indicazioni e dati utili a migliorare il prodotto.

Analizzando il report "Work Zone Alert Systems" (32), si è stimato che, ad oggi, la versione Sentry AWARE (l'unica che ha continuato ad essere prodotta per poter essere testata) può avere un costo

di circa 15000 \$ (13.536,3 €) ad unità. È bene sottolineare che questo costo è relativo a un prodotto che attualmente non è presente sul mercato e che quando lo sarà potrebbe diminuire perché prodotto in serie.

4.1.6 - GUARDIAN CONE

Il Guardian Cone rappresenta un dispositivo radar concepito per essere impiegato da singoli operatori o da gruppi ristretti di lavoratori, specialmente in zone remote caratterizzate da un traffico sporadico. Il suo scopo è di avvisare gli operatori in base alla velocità dei veicoli in avvicinamento all'area di lavoro o al cantiere.

Il sistema Guardian Cone si compone di un sensore installabile sui coni standard di delimitazione, orientato verso il traffico (figura 64), e di un ricevitore indossabile dai lavoratori (figura 65), responsabile della gestione delle funzioni del sistema. Attraverso segnalazioni sonore e vibrazioni, il ricevitore informa gli operatori quando un veicolo supera il sensore del Guardian Cone, trasmettendo la velocità dei veicoli in avvicinamento che superano una soglia preimpostata dall'operatore al momento dell'installazione del sensore.



Figura 64_ GUARDIAN CONE_ a sinistra è raffigurato il dispositivo montato su un cono ordinario per il segnalamento di cantiere_ a destra si osserva un dettaglio del dispositivo



Figura 65_Ricevitore personale indossato sul gilet da cantiere

La comunicazione tra sensore e ricevitore avviene mediante tecnologia Bluetooth a lungo raggio, con una distanza operativa massima di circa 150 metri (500 piedi), come rappresentato nella figura seguente.

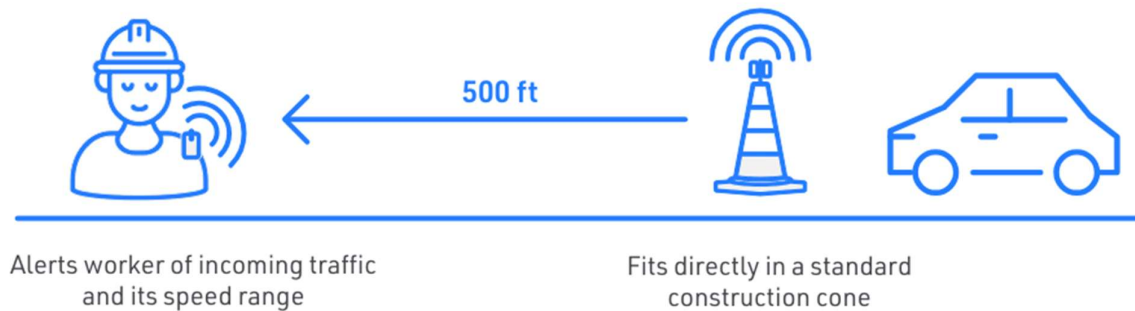


Figura 66_Range massimo di trasmissione del segnale tra il sensore e il dispositivo di allarme personale

L'avviso tramite vibrazione del ricevitore avviene sempre, per ogni passaggio di veicolo, indipendentemente dalla sua velocità, allo scopo di segnalare il transito veicolare, mentre l'allarme sonoro si attiva solamente quando il veicolo che sopraggiunge supera la velocità soglia impostata dall'operatore. Tale valore soglia, insieme ad altre impostazioni, può essere regolata tramite il ricevitore a partire da una velocità minima di 24 km/h fino ad una massima di 120 km/h. L'intensità dell'avviso sonoro varia in base alle velocità dei veicoli e alla soglia impostata. Un unico segnale acustico viene emesso se la velocità dei veicoli in avvicinamento supera la soglia di almeno 8 km/h. Per velocità comprese tra 8 e 24 km/h oltre la soglia, l'avviso sonoro è di intensità moderata, mentre per velocità superiori a 24 km/h oltre la soglia, l'avviso acustico è più marcato e frequente.

Per posizionare correttamente il sensore, è importante adottare alcune accortezze, come posizionarlo il più vicino possibile al traffico in modo sicuro, anche se è possibile distanziarlo fino a 5 metri dall'asse stradale. È fondamentale mantenere libera la linea di comunicazione tra sensore e ricevitore per evitare interferenze del segnale, poiché oggetti fissi nelle vicinanze del sensore

possono influenzare la trasmissione radio. Infine, è importante sottolineare che un solo dispositivo indossabile può essere collegato a un solo sensore del cono alla volta.

Il Guardian Cone possiede anche altre caratteristiche oltre a quella primaria di avviso per gli operatori. Come è riportato nell'immagine sottostante (figura 67), infatti, il dispositivo è anche in grado di calcolare il numero e la velocità media dei veicoli che attraversano l'area di cantiere, fornisce una indicazione GPS della posizione del dispositivo e permette di immagazzinare dati su un server dedicato.

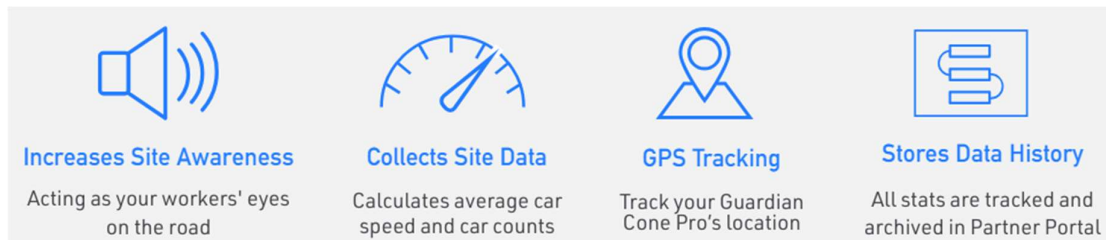


Figura 67_Funzionalità aggiuntive del dispositivo Guardian Cone

4.1.7 - ALPHA SAFENET PORTABLE OVERWATCH DEVICE

Il suddetto dispositivo si basa sulla tecnologia LiDAR, che sfrutta un fascio laser per rilevare le intrusioni dei veicoli nei cantieri. Attraverso l'emissione del fascio laser, il dispositivo genera un piano verticale che delimita l'area di cantiere. Nel momento in cui un veicolo penetra all'interno di questa area, il dispositivo rileva tale intrusione e attiva un allarme sonoro e visivo.

Questo dispositivo dispone di due modalità di funzionamento: una denominata "Targeting" e l'altra chiamata "Infinity".

- **Modalità Targeting:** Questa modalità consente di configurare la portata di rilevamento del dispositivo fino a un massimo di circa 90 metri (300 piedi), fornendo così una copertura efficace per distanze limitate. La procedura per regolare la portata prevede l'orientamento del fascio laser verso un oggetto solido posizionato alla distanza desiderata.
- **Modalità Infinity:** In questa modalità, non viene impostata una portata di rilevamento specifica, ma la portata è determinata dalla capacità strumentale, consentendo una copertura fino a oltre 200 metri (700 piedi). Tuttavia, in questa configurazione, il segnale diventa meno preciso e occorre sottolineare che anche piccoli movimenti del dispositivo possono causare significative variazioni nella direzione del fascio laser, con conseguenti possibili errori nel rilevamento delle intrusioni.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

In figura 58, si può osservare da diverse angolazioni il dispositivo trasportabile. È evidente che in questa configurazione, il dispositivo non solo include l'emettitore del fascio laser e il rilevatore, ma anche un altoparlante e delle luci destinate a lanciare un allarme acustico e visivo (luminoso). L'allarme acustico raggiunge un'intensità dichiarata dal produttore di 135 dB e il produttore indica che l'allarme sonoro può essere emesso sia da un dispositivo elettronico, quindi un altoparlante, che da un dispositivo ad aria compressa, quindi una sirena pneumatica. Il dispositivo predisposto nella configurazione portatile (figura 68) ha un peso approssimativo di 20 kg.



Figura 68_ ALPHA SAFENET PORTABLE OVERWATCH DEVICE

Inoltre, il produttore attesta la capacità di installare e personalizzare il dispositivo su qualsiasi veicolo di supporto per le operazioni, come illustrato nell'esempio riportato in figura 69.



Figura 69_ montaggio del dispositivo su veicolo di supporto alle lavorazioni

La casa produttrice offre inoltre una serie di accessori che possono essere collegati wireless e comunicano con il dispositivo principale tramite un sistema radio. Questi accessori includono

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

dispositivi di allarme supplementari, dotati di allarme acustico e visivo (luminoso), progettati per estendere la copertura dell'allarme. Tale accessorio è chiamato Overwatch Auxiliary Horn Unit (AHU) e in base al modello acquistato si ha una portata del collegamento per la comunicazione che varia tra i 60,96m (200 piedi) e i 304,8m (1000 piedi). Inoltre, è possibile collegare dispositivi di individuazione delle intrusioni costituiti da tubi pneumatici, i quali inviano un segnale di allarme quando vengono attraversati dai veicoli. Anche questi ultimi dispositivi comunicano con il dispositivo principale e con gli accessori di allarme aggiuntivi, consentendo così di delimitare e proteggere completamente l'area di lavoro o il cantiere. Tali dispositivi aggiuntivi sono raffigurati nella immagine seguente.



Figura 70_Accessori e dispositivi aggiuntivi del sistema ALPHA SAFENET PORTABEL OVERWATCH DEVICE_ a sinistra è raffigurato il sensore pneumatico (tubo giallo), mentre a destra è riportato il dispositivo di allarme portatile (scatolotto arancione)

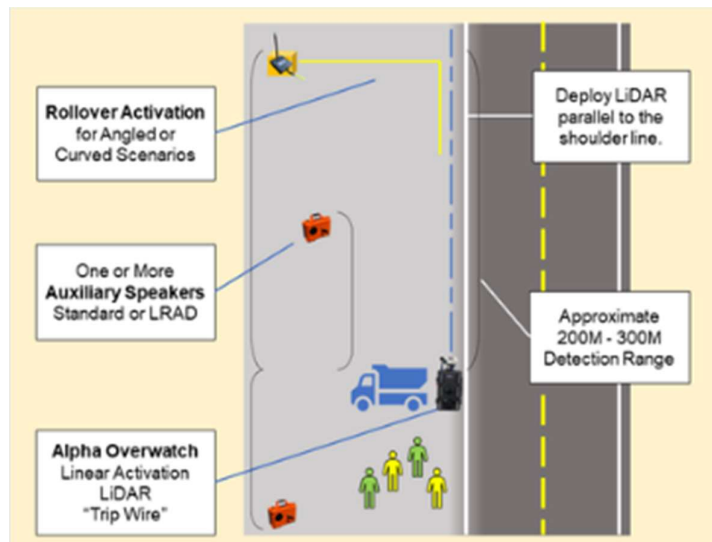


Figura 71_ Raffigurazione dell'uso dei dispositivi aggiuntivi del sistema

Il dispositivo principale ha la capacità di collegarsi e comunicare contemporaneamente con più di un accessorio, compresi i due dispositivi menzionati in precedenza. Ciò consente di creare, come

illustrato nell'immagini sottostante, una vera e propria rete per individuare le intrusioni intorno al cantiere.



Figura 72_Raffigurazione della capacità del dispositivo di comunicare contemporaneamente con molteplici accessori

Per quanto concerne il prezzo del dispositivo, essendo un prototipo in fase di sviluppo, ad oggi non esistono ancora dei listini prezzi, tuttavia il produttore afferma sul proprio sito che l'Alpha SafeNet avrà un costo variabile in base alle varie modalità di installazione, portatile o su mezzo, alla qualità e agli optional, quali ad esempio il numero e la tipologia di accessori aggiuntivi.

4.1.8 - WIRELESS SENSOR NETWORK (WZIA SPAGNOLO)

Il Wireless Sensor Network (WSN) è un dispositivo per l'individuazione di intrusioni nelle aree di cantiere ideato e sviluppato da un team di ricerca dell'Università Politecnica di Madrid. Tale sistema è composto da due parti:

- **“Sensor Node”**: è l'apparato principale del sistema e al suo interno sono contenuti tutti i sensori per l'identificazione delle intrusioni dei veicoli erranti e per la comunicazione con altri dispositivi. (figura 73)
- **Dispositivo di allarme personale**: il team di ricerca ha ricercato e implementato un dispositivo già presente sul mercato che potesse comunicare con il “Sensor Node” e fungesse da allarme personale da affidare a ciascun lavoratore sulla carreggiata.



Figura 73_Sensor Node

Per quanto concerne il “Sensor Node”, come è possibile osservare dalla figura 74, si tratta di un apparato che può essere installato su un qualsiasi dispositivo per la delimitazione dell’area di cantiere, come ad esempio i coni standard.



Figura 74_Installazione del Sensor Node su un cono stradale standard

Tale congegno è provvisto di un microcontrollore che gestisce tutta la parte sensoristica e per la comunicazione. Come è possibile osservare dalla figura 75, il “Sensor Node” è provvisto dei seguenti sistemi hardware:

- Microcontrollore: gestisce tutta la parte sensoristica e per la comunicazione del segnale di allarme;
- Sensore a ultrasuoni: è il sistema primario sfruttato dal “Sensor Node” per l’individuazione delle intrusioni nelle aree controllate. Tale sensore emette un fascio di ultrasuoni con un range variabile e che può essere impostato dagli operatori (può essere fissata una distanza soglia). Quando un oggetto passa attraverso il fascio di ultrasuoni e ne interrompe il flusso, il sensore comunica l’accaduto al microcontrollore, che a sua volta, tramite il trasmettitore radio, lancerà il segnale di pericolo. Questa funzionalità del dispositivo permette di creare una sorta di barriera per coprire tutto il perimetro del cantiere, e si avrà tanta più copertura quanti più dispositivi saranno messi in opera;

- Accelerometro: è il secondo modo con il quale il dispositivo può individuare le intrusioni. Il team di ricerca ha installato anche questo sensore per ovviare al caso in cui un veicolo errante non passi attraverso il fascio di ultrasuoni, ma colpisca il cono/dispositivo di delimitazione sul quale è montato/installato il “Sensor Node”. Così facendo in qualsiasi caso si ha l’identificazione dell’intrusione;
- Radio trasmettitore: è il dispositivo predisposto per comunicare con i dispositivi di allarme personale e con gli altri “Sensor Node”;
- Sirena: è un accessorio facoltativo. Se presente, quando il sistema individua una intrusione, se presente, fa partire anche l’allarme sonoro con la sirena per avvisare i conducenti e per avvisare i lavoratori nelle immediate vicinanze del dispositivo;
- Pulsantiera di comando;
- Batteria ricaricabile LiPo (Litio-Polimero);

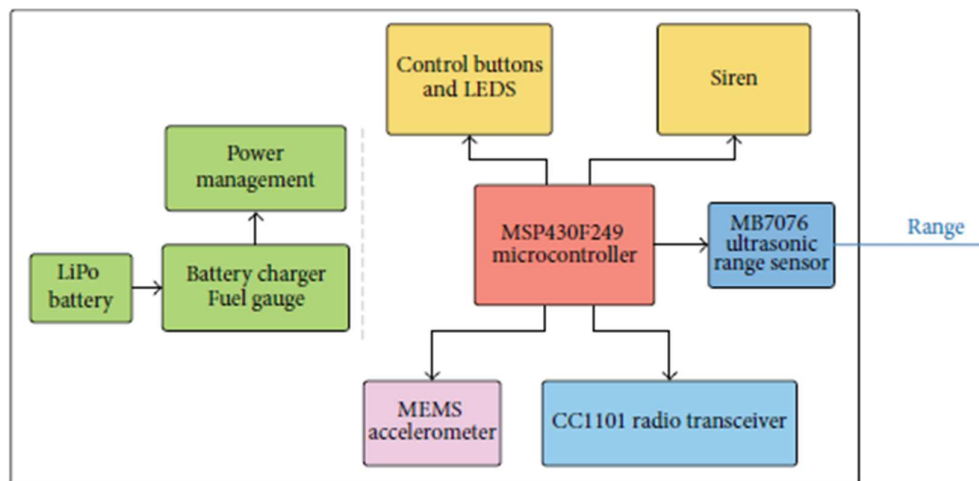


Figura 75_Architettura Hardware del Sensor Node

Per quanto riguarda nello specifico i dispositivi di allarme personale, in questi test eseguiti dal team di ricerca, essi hanno scelto dei dispositivi presenti sul mercato e che potessero comunicare wireless con i “Sensor Node”. La loro scelta, come è possibile riscontrare nella figura 76, è ricaduta su un orologio programmabile, in quanto uno strumento di dimensioni contenute e adatto ad essere indossato. In questo caso il team di ricerca ha scelto di dividere in due configurazioni tale dispositivo: “normale” e “master”. La configurazione “normale” prevede che il dispositivo funzioni con uno schema ad “Interrogazione” periodica, con periodo dinamico tarato in base alla qualità del collegamento wireless, al fine di garantire una rapida ricezione degli avvisi e un risparmio sostanziale della batteria dei dispositivi portatili. La configurazione “master”, in aggiunta, possiede anche la

capacità di poter interrompere l'allarme e ripristinare il sistema nello stato di monitoraggio dopo che esso è scattato in seguito ad un rilevamento di un veicolo errante. Grazie a questo dispositivo gli operai, in seguito all'attivazione dell'allarme, ricevono un segnale sonoro e aptico (vibrazione) per indicare l'imminente pericolo.



Figura 76_ Orologio programmabile scelto come dispositivo di allarme personale

Considerando il funzionamento congiunto di più "Sensor Node", il team di ricerca ha impostato il sistema in modo che, quando si hanno dispiegati più dispositivi, uno di essi funga da "Central Hub", quindi da dispositivo principale. Questo implica che tutti i "Sensor Node" comunicano con il "Central Hub" e quando avviene una intrusione, il "Sensor Node" invia il messaggio di pericolo al "Central Hub", il quale di conseguenza invia un segnale a tutti i "Sensor Hub" dispiegati nel cantiere, in modo che, se provvisti di sirena, facciano scattare l'allarme. In contemporanea il "Central Hub" comunica anche con tutti i dispositivi di allarme personale. La figura 77 rappresenta schematicamente il funzionamento congiunto di tutto l'ecosistema del WIRELESS SENSOR NETWORK.

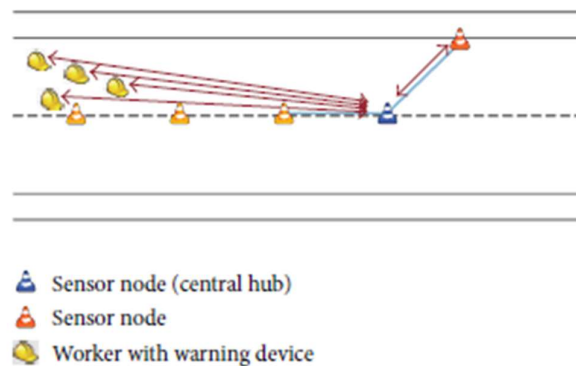


Figura 77_ Comunicazione tra il CENTRAL HUB e i dispositivi di allarme personali e i Sensor Node

Un'altra funzionalità aggiuntiva del sistema riguarda il fatto che essendo i cantieri degli "ecosistemi" che "cambiano" nel "tempo", è sempre possibile associare/collegare alla "Central Hub" dei nuovi "Sensor Node" o dei nuovi dispositivi di allarme personale al fine di ingrandire la rete di monitoraggio (per le intrusioni).

In ultimo, essendo questo dispositivo solo un prototipo in fase di studio e sviluppo, non sono disponibili delle indicazioni precise sul suo costo. Tuttavia, nel report dal quale sono state tratte le informazioni riportate sopra, è descritta in dettaglio la componentistica che costituisce il sistema, cosicché si potrebbe stimare il costo complessivo del sistema.

4.1.9 - CAMERA-BASED WORK ZONE INTRUSION DETECTION

Questo dispositivo è stato realizzato per conto del dipartimento dei trasporti dello stato del Nord Carolina (NCDOT) ed è stato sviluppato e testato da un team di ricerca della East Carolina University.

Il dispositivo basa il proprio funzionamento per la valutazione di intrusioni di veicoli erranti nelle aree di cantiere su un sistema che sfrutta l'analisi di immagini riprese da una telecamera. In questo caso specifico, è stato utilizzato dal team di ricerca un comune smartphone come sensore di rilevamento (telecamera) e dispositivo di elaborazione dei dati.

Per un corretto funzionamento del sistema, l'operatore identifica l'area da monitorare disegnando una poligonale sullo schermo dello stesso (telefono cellulare). Solo in seguito a questo primo passaggio di demarcazione il dispositivo è pronto per monitorare l'area selezionata per rilevare l'ingresso di un veicolo nella zona riservata. L'applicazione (un algoritmo che è stato implementato su un applicazione per cellulare) caricata sullo smartphone sorveglia costantemente l'area riservata grazie all'intelligenza artificiale e alla IoT (Internet of Things), che permettono un'analisi dei dati di INPUT in tempo reale e una comunicazione costante fra tutti i dispositivi collegati. Se il sistema rileva un veicolo nella poligonale disegnata dall'operatore, l'applicazione attiva un allarme sonoro generale tramite uno speaker audio e, tramite connessione con rete Wi-Fi locale, trasmette un avviso personale, audio e vibrazione, ad ogni cellulare associato al sistema.

Nella figura 78 è possibile osservare il prototipo con tutti gli elementi che lo compongono. È da notare come tutti i dispositivi siano installati su un treppiede, il quale, per poter garantire un rilevamento efficace delle intrusioni, deve essere stabile. Il sistema è interamente alimentato da una batteria ricaricabile.

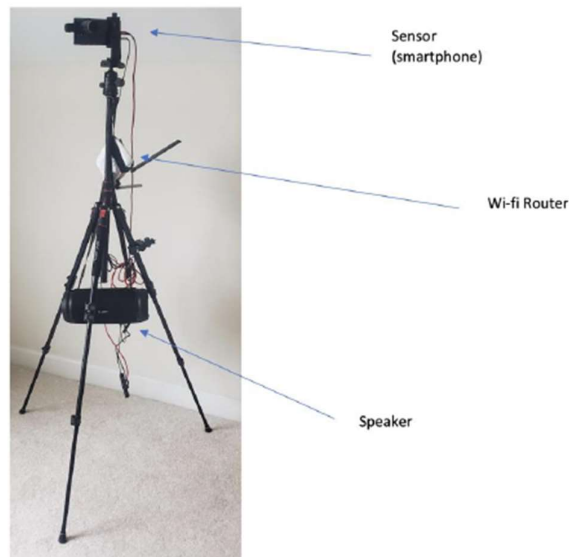


Figura 78_ Elementi che compongono il dispositivo

Per l'installazione e l'uso del prototipo, il team di ricerca suggerisce di collocare il dispositivo nelle immediate vicinanze della zona di lavoro attiva, come è rappresentato nella figura 79.

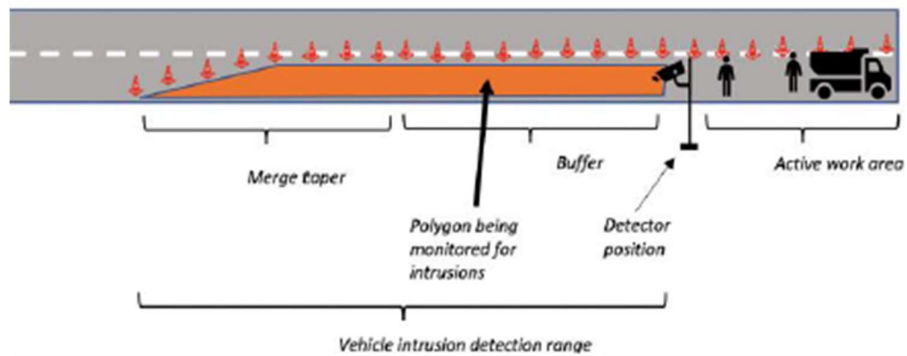


Figura 79_ Condizioni di prova _ In arancione è rappresentata la poligonale sorvegliata dal dispositivo durante il funzionamento

Trattandosi di un prototipo, ad oggi non è possibile fornire un prezzo per la produzione in serie del dispositivo, tuttavia tale valore può essere stimato a partire dal costo dei singoli componenti che costituiscono il sistema.

4.2 - VALUTAZIONE DEI SISTEMI INNOVATIVI NEI TEST PILOTA E NEI CANTIERI REALI

In questo paragrafo si presentano i risultati dei test eseguiti sui dispositivi descritti nel paragrafo precedente. In particolare, il WAS, il SonoBlaster, l'Intellicone, il Single Sentry Beam e l'AWARE sono stati oggetto di più ricerche, permettendo un confronto tra diversi risultati proposti da differenti teams di ricerca. Per gli altri sistemi (Guardian Cone, Alpha SafeNet Portable Overwatch Device, Camera-Based Work Zone Intrusion Detection e Wireless Sensor Network), invece, sono disponibili pochi documenti, poiché questi dispositivi sono o prototipi in fase di sviluppo o prodotti appena

arrivati sul mercato. Pertanto, per questi quattro dispositivi si riporteranno solo le considerazioni derivanti dai risultati ottenuti dai team di ricerca e sviluppo che li hanno ideati o testati.

Prima di esporre i risultati relativi ai test eseguiti sui dispositivi sopra menzionati, è necessario richiamare alcuni concetti fondamentali che saranno ricorrenti nel corso della trattazione e che ritroviamo frequentemente in tutti i report analizzati.

Il primo concetto da chiarire, sebbene possa sembrare banale, riguarda i risultati che un dispositivo può fornire in caso di intrusione di un veicolo errante. Quando un dispositivo anti intrusione viene impiegato in un'area di cantiere, con l'obiettivo di aumentare la sicurezza e prevenire incidenti, ci si aspetterebbe che sia infallibile e funzioni sempre correttamente, ma questo non sempre avviene per una serie di motivi che verranno approfonditi di seguito. Ne consegue che diventa particolarmente importante comprendere quali possano essere i possibili OUTPUT di questi dispositivi:

- **TRUE POSITIVE:** l'allarme è attivato correttamente poiché il dispositivo ha individuato un'intrusione effettivamente avvenuta;
- **TRUE NEGATIVE:** nessuna intrusione è avvenuta e, correttamente, il dispositivo non ha inviato alcun segnale di allarme. Questo è lo stato operativo di monitoraggio in cui il dispositivo si trova per la maggior parte del tempo;
- **FALSE POSITIVE:** nessun veicolo ha invaso l'area di cantiere, ma il dispositivo ha ugualmente lanciato l'allarme. Sebbene questo risultato non comporti un pericolo immediato, una ripetizione frequente potrebbe portare i lavoratori a sottovalutare il pericolo reale e a ignorare gli allarmi, con possibili conseguenze disastrose in caso di un'intrusione effettiva;
- **FALSE NEGATIVE:** il risultato più pericoloso, poiché implica che un'intrusione è avvenuta ma non è stata rilevata, quindi l'allarme non è stato lanciato. Questa situazione può avere conseguenze gravissime per la sicurezza dei lavoratori e può derivare da malfunzionamenti del dispositivo, cattiva manutenzione o posizionamento errato;

Un altro aspetto importante emerso dall'analisi dei vari report è che, per ottenere una valutazione scientificamente rigorosa e completa dei dispositivi, i test sono tipicamente condotti in due situazioni differenti, ma complementari:

1. **Test pilota (Pilot Testing):** prove condotte in ambienti circoscritti e isolati per valutare le potenzialità e le caratteristiche dei dispositivi, verificando la coerenza con quanto dichiarato

dai produttori. In queste condizioni vengono testati, ad esempio, i livelli degli allarmi sonori, la distanza di trasmissione del segnale, e il numero di FALSE POSITIVE e FALSE NEGATIVE.

2. **Prove in cantieri reali (Live Testing):** test condotti in situazioni reali di cantiere per valutare come i dispositivi operano in condizioni ambientali non controllate e come vengono utilizzati dai lavoratori. Queste prove servono anche per valutare la semplicità di installazione, configurazione e sostituzione dei dispositivi.

Nella tabella riportata di seguito, è possibile osservare per quali dispositivi sono state reperite informazioni riguardanti sperimentazioni effettuate in condizioni reali di cantiere, e per quali invece sono disponibili solo dati relativi a prove condotte in condizioni controllate e circoscritte.

DISPOSITIVI	TEST PILOTA	PROVE IN CONDIZIONI REALI DI CANTIERE
WAS (Work Alert System)	✓	✓
SonoBlaster	✓	✓
Intellicone	✓	✓
Single Sentry Beam	✓	✓
AWARE (Advanced Warning and Risk Evasion)	✓	✓
Guardian Cone	✓	✗
Alpha Safenet Portable Overwatch Device	✓	✗
Wireless Sensor Network	✓	✗
Camera-Based Work Zone Intrusion Detection	✓	✓

Tabella 16_ prove condotte in condizioni controllate e/o reali di cantiere in base al sistema innovativo

Un ultimo aspetto da considerare è la semplicità di messa in opera e l'efficacia dei dispositivi. Nei report analizzati è tipicamente presente una sezione dedicata ai risultati di sondaggi somministrati ai lavoratori che hanno utilizzato i dispositivi durante i test. Sebbene possa sembrare un aspetto banale, è cruciale per garantire che i dispositivi siano accettati dai lavoratori, che devono essere in grado di installarli, rimuoverli e configurarli facilmente. I dispositivi maggiormente accettati sono quelli percepiti come semplici da usare e in grado di migliorare significativamente la sicurezza sul luogo di lavoro.

4.2.1 - ANALISI DEI DISPOSITIVI DI SICUREZZA NEI TEST PILOTA

Di seguito si riportano delle considerazioni emerse dall'analisi dei risultati di test condotti sui vari dispositivi descritti nel corso del precedente paragrafo e reperiti grazie alla lettura di report specifici,

focalizzati sui “*Work Zone Intrusion Alarm*”. Tipicamente, le prove che sono state eseguite durante i test pilota avevano lo scopo di valutare le caratteristiche funzionali e prestazionali dei dispositivi e vertevano principalmente sui seguenti punti:

- accuratezza e affidabilità del dispositivo attraverso la registrazione dei falsi allarmi verificatisi durante le prove;
- relazione tra il livello sonoro dell’allarme e la distanza;
- impatto della direzione dell’allarme sulla percezione dello stesso da parete dei lavoratori;
- relazione tra l’ambiente esterno e il dispositivo di individuazione delle intrusioni: L’impatto di mezzi d’opera e attrezzature rumorose sul livello sonoro dell’allarme del dispositivo oppure l’efficacia dell’allarme sui mezzi erranti;
- valutazione del range massimo di trasmissione del segnale di allarme;
- se presenti, efficacia dei segnali luminosi e feedback aptici (vibrazioni).

WORK ALERT SYSTEM (WAS)

È stato possibile reperire le informazioni su tale dispositivo analizzando i seguenti riferimenti bibliografici (report di ricerca):

- ODOT_WORK_ZONE_INTRUSION_ALERT_TECHNOLOGIES:ASSESSMENT AND PRACTICAL GUIDANCE (2017) (27);
- CDOT_EVALUATION OF WORK_ZONE_INTRUSION_ALARMS (2019) (31);
- TDOT_WORK_ZONE_ALERT_SYSTEMS (2021) (32);
- CDOT_PILOT_TESTING OF WORK_ZONE_INTRUSION_ALARMS_FINAL_REPORT (2023) (33).

Dall’analisi dei report risulta evidente come il WAS abbia riscosso un discreto successo tra gli operatori che hanno potuto lavorare e testare tale dispositivo. Analizzando nello specifico i risultati delle prove condotte sul WAS è possibile affermare che in tutti i report si è riscontrata una corrispondenza dei valori prestazionali dichiarati del dispositivo e da quelli misurati nel campo prove:

- La durata dell'allarme sonoro è stata rilevata essere di 6 secondi nel report del 2017, 3,5 secondi nel 2019 e 4,7 secondi nel 2021, evidenziando una sostanziale stabilità nel tempo.
- Il livello sonoro dell'allarme ha mostrato lo stesso andamento decrescente con la distanza in tutti i report. Tuttavia, mentre nei report del 2017 e 2019 l'intensità media

in corrispondenza del dispositivo si attestava sugli 80-85 dB fino a scendere a circa 60 dB a 300 piedi (91,4m) di distanza, nel report del 2021 è stato registrato un aumento del livello sonoro medio del WAS, con 100 dB vicino al dispositivo e oltre i 60 dB a 300 piedi (91,4m). Questo aspetto rappresenta un miglioramento dell'intensità dell'allarme nel tempo. Di seguito è possibile osservare un grafico estratto dal report del 2021 che raffigura l'andamento dell'intensità sonora degli allarmi dei dispositivi Intellicone, AWARE e WAS con la distanza (grafico 47).

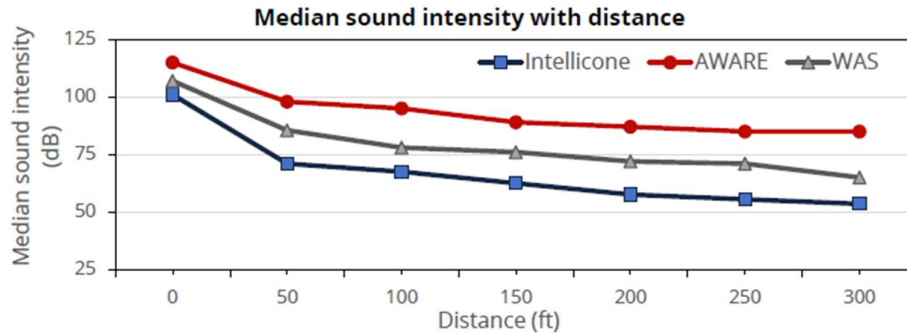


Grafico 47_ Variazione dell'intensità sonora media dei dispositivi Intellicone, AWARE e WAS in funzione della distanza

- Un ulteriore aspetto importante che è stato indagato nei report è quello relativo alla relazione tra il livello sonoro del dispositivo analizzato e l'ambiente esterno, in quanto, in un cantiere stradale la presenza di macchine operatrici e lo scorrere del traffico accanto alla zona di lavoro possono influire sulla percezione che gli operatori hanno degli allarmi sonori. Nei report del 2017 e del 2021 si sono analizzate due casistiche: con il fonometro tra la fonte rumorosa e l'allarme, e con l'allarme tra la fonte e il fonometro. In entrambe le situazioni l'allarme è risultato sempre più forte della fonte esterna (75-80 dB). Anche se nel report del 2023 non è stato eseguito un test specifico su tale argomento, i lavoratori hanno ugualmente confermato la buona udibilità dell'allarme anche in presenza di rumori esterni, in linea con i risultati precedenti.
- Un'altra caratteristica legata alla percezione dell'allarme è l'orientamento del dispositivo rispetto agli operatori. Il dispositivo WAS, con lo speaker audio su un lato (figura 80), ha mostrato livelli sonori più elevati quando l'alto parlante era rivolto verso il fonometro.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

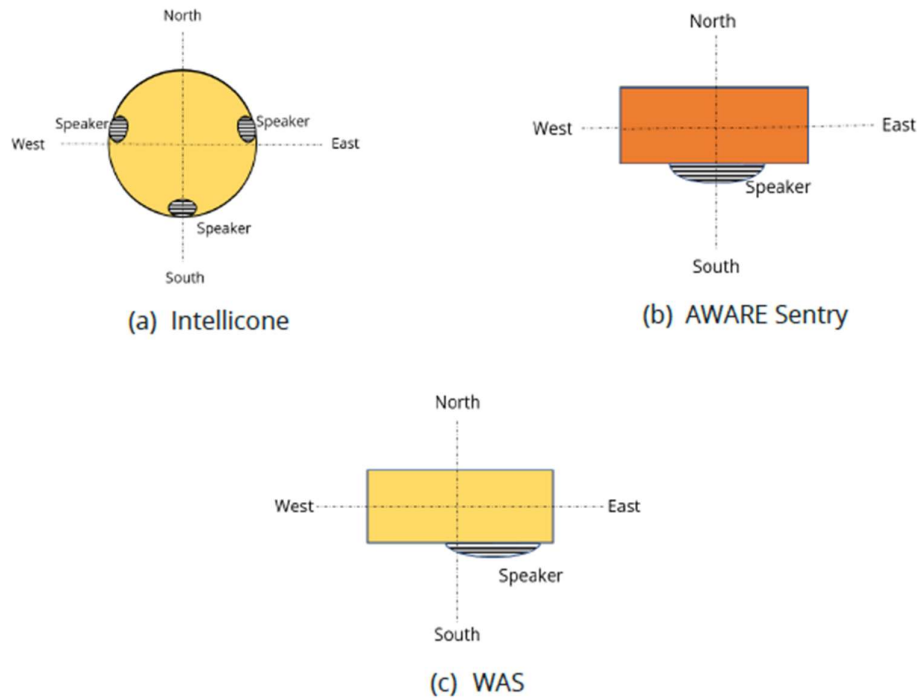


Figura 80_Disposizione dello speaker audio nell'unità di allarme dei dispositivi Intellicone, AWARE e WAS

Un altro aspetto cruciale per il corretto ed efficace funzionamento del dispositivo riguarda la distanza di trasmissione del segnale dal sensore di pressione all'unità di allarme. Nei report del 2017, 2019 e 2021, i ricercatori hanno testato l'efficacia del segnale aumentando progressivamente la distanza tra trasmettitore e ricevitore. Sebbene il fornitore indicasse una portata massima di 1000 piedi (304,8m), le prove condotte sui dispositivi hanno prodotto i seguenti risultati:

REPORT	DISTANZA MASSIMA DI TRASMISSIONE DEL SEGNALE TRA GLI ELEMENTI DEL SISTEMA WAS				
	SENSORE-PAC	SENSORE-PSD	PAC-PSD	PAC-PAC	SENSORE-SENSORE
2017	300 piedi (91,4m)	-	50 piedi (15,2m)	-	-
2019	225 piedi (68,6m)	-	75 piedi (22,9m)	175 piedi (53,3m)	75 piedi (22,9m)
2020	300 piedi (91,4m)	150 piedi (45,7m)	-	-	-

Tabella 17_Distanza massima di trasmissione del segnale tra gli elementi che compongono il sistema WAS_ PAC: dispositivo di allerta collettivo; PSD: dispositivo di allarme personale;

La tabella risulta particolarmente utile poiché consente di osservare che, nei diversi report, non sono state sempre analizzate le stesse distanze. Ciò indica che i vari team di ricerca possono aver scelto di

concentrarsi su aspetti specifici, differenti rispetto a quelli presi in considerazione da altri gruppi di studio. In particolare, dalla riga relativa al report del 2019, emerge che è stata valutata anche la distanza di trasmissione del segnale tra due sensori collegati in serie. Tale aspetto è rilevante, in quanto dimostra che il dispositivo WAS è in grado di ampliare l'area monitorata. Infatti, mantenendo i sensori a distanze inferiori a quelle riportate in tabella, è possibile garantire una trasmissione del segnale più efficiente, consentendo così di coprire un'area più estesa all'interno del cantiere.

L'affidabilità del sistema, misurata in termini di FALSE POSITIVE e FALSE NEGATIVE registrati durante i test, risulta essere un ulteriore fattore di estrema importanza nella valutazione del dispositivo. A tal riguardo, sono state condotte due tipologie di prove: una focalizzata sull'identificazione dei falsi allarmi e un'altra che ha esaminato l'influenza della velocità di avvicinamento del veicolo sulla risposta del dispositivo.

Nel report del 2017, dopo 20 test, non sono stati rilevati FALSE NEGATIVE, ma si sono verificati due FALSE POSITIVE, attribuiti a errori dell'operatore durante la manipolazione del dispositivo.

Nel report del 2019, invece, su 32 prove eseguite, i risultati sono stati:

- 18 attivazioni corrette;
- 4 FALSE NEGATIVE;
- 10 attivazioni con ritardi nella trasmissione del segnale;
- Nessun FALSE POSITIVE.

La causa dei FALSE NEGATIVE e dei ritardi di trasmissione è stata successivamente attribuita all'uso di vecchi modelli del dispositivo, problema risolto con l'introduzione di un nuovo modello fornito dalla ditta produttrice.

Nel report del 2021, infine, i ricercatori hanno valutato l'efficacia della trasmissione del segnale tra il sensore e il dispositivo di allarme personale (PSD) simulando l'intrusione di un veicolo errante all'interno dell'area di lavoro, considerando due velocità di avvicinamento del veicolo "intruso" (30mph=48.3km/h; 45mph=72.4km/h) e due distanze (100ft=30.5m; 150ft=45.7m) tra il sensore e l'operatore.

In figura 81 è rappresentata la schematizzazione della prova condotta dai ricercatori. Si nota che il sistema di allerta WAS è stato posizionato trasversalmente rispetto alla direzione di avanzamento del veicolo errante, al fine di simulare un'intrusione frontale nell'area di cantiere.

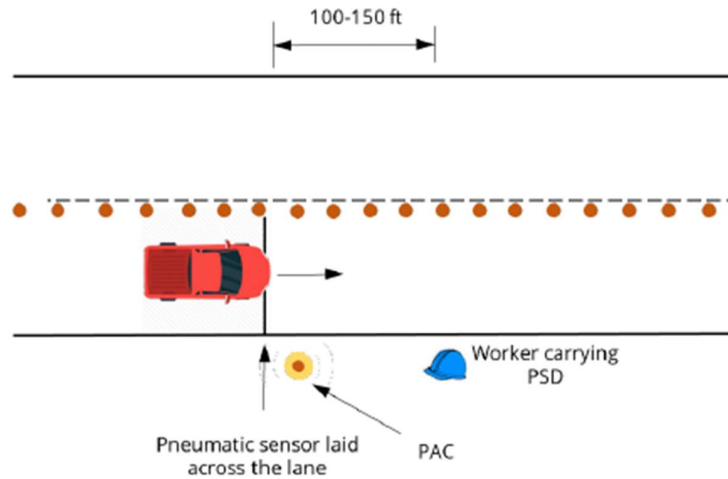


Figura 81_ Schematizzazione della configurazione di prova per determinare il numero di falsi allarmi del dispositivo WAS

I risultati riportati in tabella 18 mostrano una diminuzione del numero di allarmi riusciti con l'aumento della distanza e della velocità del veicolo.

Test Speed (mph)	Distance between sensor and PSD (ft)	Success rate	Comments
30	100	100%	Alert on all three trials
	150	66%	Only two of three attempts resulted in alarms
45	100	66%	Only two of three attempts resulted in alarms
	150	33%	Only one of three attempts resulted in an alarm

Tabella 18_Percentuale di successi dell'attivazione del PSD

Infine, nel contesto dei test condotti per valutare l'efficacia del dispositivo, il team di ricerca del report del 2021 ha analizzato i tempi di reazione dei lavoratori in risposta all'attivazione dell'allarme. Dall'analisi del grafico 48, è possibile osservare i tempi medi di reazione dei lavoratori, che comprendono sia il tempo di attivazione del dispositivo sia il tempo necessario agli operai per interrompere l'attività e percepire l'allerta (tempo di percezione e reazione).

È particolarmente significativo notare che, nella condizione corrispondente a una velocità di 45 mph (circa 72,4 km/h) e a una distanza di 150 ft, il tempo di reazione risulta nettamente superiore rispetto agli altri scenari. Questo incremento è attribuibile al fatto che, come riportato nella tabella 18, a tale velocità e distanza il dispositivo si è dimostrato inaffidabile nel 66% dei casi, con ritardi significativi nella trasmissione del segnale tra il sensore e il PSA.

Questi risultati suggeriscono che il dispositivo WAS non è idoneo per cantieri situati su strade ad alta velocità ed elevato traffico. L'affidabilità insufficiente della trasmissione del segnale di allerta comporta un prolungamento dei tempi di reazione e percezione degli operai, riducendo il tempo disponibile per una risposta adeguata. Pertanto, in tali contesti, il dispositivo potrebbe risultare inefficace nel migliorare la sicurezza.

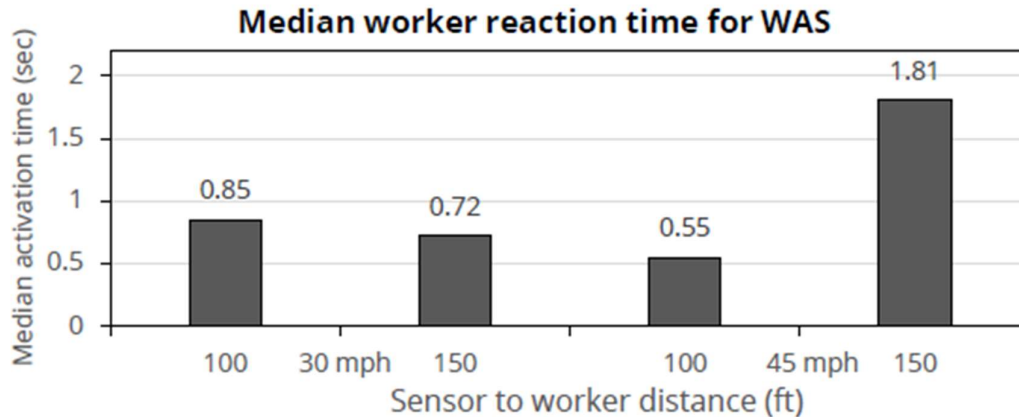


Grafico 48_ Tempi medi di reazione dei lavoratori osservati durante le prove condotte sul dispositivo WAS

SONOBLASTER:

Per tale dispositivo è stato possibile reperire informazioni e materiale utile consultando i seguenti report:

- NJDOT_WORK_ZONE_INTRUSION_ALARM_EFFECTIVENESS (2010, report dedicato al SonoBlaster) (34);
- ODOT_WORK_ZONE_INTRUSION_ALERT_TECHNOLOGIES: ASSESSMENT AND PRACTICAL GUIDANCE (2017) (27);
- CDOT_EVALUATION OF WORK_ZONE_INTRUSION_ALARMS (2019) (31);
- CDOT_PILOT_TESTING OF WORK_ZONE_INTRUSION_ALARMS_FINAL REPORT (2023) (33);

Dall'analisi dei test effettuati, il dispositivo SonoBlaster ha ricevuto delle recensioni e dei pareri discordanti dagli operatori che l'hanno utilizzato.

Come per quanto è accaduto per il WAS, anche il SonoBlaster è stato sottoposto a differenti prove al fine di valutarne i punti di forza e di debolezza. A tal proposito si riportano di seguito le considerazioni e i risultati più significativi legati al suo funzionamento.

- La prima caratteristica esaminata riguarda l'allarme, inteso sia come livello sonoro che come durata dello stesso. Per quanto concerne il primo aspetto analizzato, tutti i report consultati indicano un adeguato livello di intensità dell'allarme del SonoBlaster. In particolare, i reports del 2017 e del 2019 documentano un livello sonoro medio superiore ai 100 dB nelle immediate vicinanze del dispositivo (a 0 m di distanza) e di circa 80 dB a una distanza di 300 piedi (91 m).

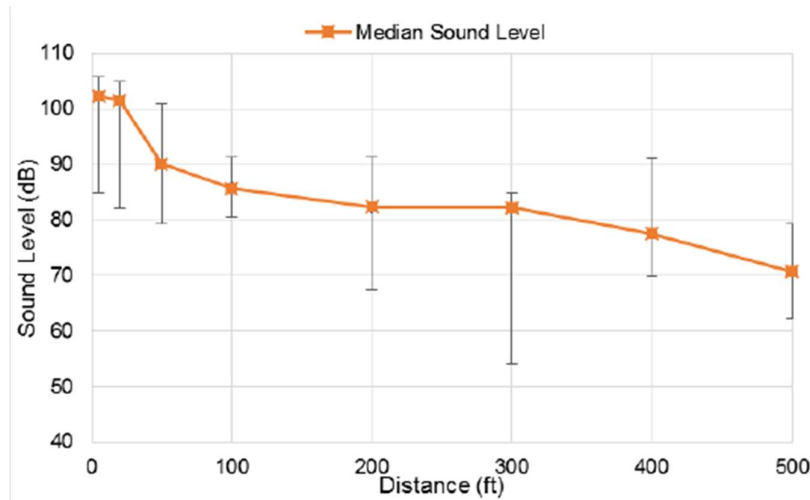


Grafico 49_Livello medio dell'intensità sonora dell'allarme del SonoBlaster valutato in funzione della distanza

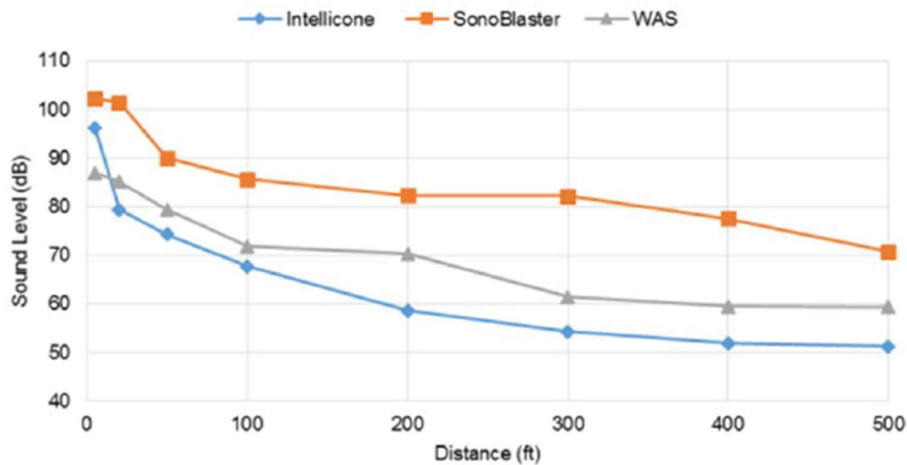


Grafico 50_Dispositivi a confronto. Livello sonoro medio degli allarmi in funzione della distanza

I grafici estratti dal report del 2017 e sopra riportati mostrano, rispettivamente, il livello sonoro medio a diverse distanze e il confronto con le altre tecnologie testate, come Intellicone e WAS, evidenziando la superiorità del SonoBlaster in termini di intensità sonora.

Un ulteriore aspetto importante riguarda la percezione dell'allarme in presenza di rumori ambientali, come quello di un mezzo pesante o all'interno di un veicolo in transito. Il SonoBlaster ha dimostrato una buona performance anche in tali condizioni grazie alla sua intensità sonora. Entrando più nel dettaglio del secondo caso (allarme udito anche con il veicolo in transito), si è osservato che, essendo la sirena del SonoBlaster montata sui coni che delimitano l'area di cantiere, a differenza di altri dispositivi che collocano l'allarme vicino alla squadra di operai, quando un veicolo invade l'area di cantiere e colpisce un cono con il dispositivo, il posizionamento dell'allarme presso il punto di impatto consente non solo agli operai di percepire l'allerta, grazie all'elevato livello sonoro, ma anche al conducente e ai passeggeri del veicolo di udire l'allarme con maggiore chiarezza. Questo facilita l'adozione di contromisure tempestive, riducendo il rischio di incidenti e dando al conducente il tempo necessario per correggere la traiettoria.

Relativamente alla durata del segnale sonoro, il fabbricante del SonoBlaster dichiara una durata di 15 secondi, ma in realtà l'analisi dei reports dimostra che tale affermazione non è totalmente corretta, perché, bensì dai risultati dei test si sia misurata una durata media di 14 secondi, la tabella 19 estratta dal report del 2017 evidenzia una significativa variabilità. Questa incostanza è attribuibile al sistema di attivazione meccanico, che utilizza cartucce di CO2. I ricercatori hanno constatato che la durata dell'allarme varia in base alla carica e alla condizione delle cartucce, con cartucce meno cariche o difettose che producono segnali più brevi rispetto a quelle completamente cariche.

Technology	Duration of Alarm (in seconds)			
	Median	Maximum	Minimum	Standard Dev.
Intellicone®	32	32	32	0
SonoBlaster®	14	41	7	10.89
WAS	6	6	6	0

Tabella 19_Durata media, massima e minima degli allarmi sonori dei dispositivi Intellicone, SonoBlaster e WAS

Ancora, tale aspetto influisce anche sull'intensità dell'allarme. Infatti, ritornando al grafico 49 è possibile presupporre che le significative variazioni nel livello del suono registrato durante i test siano imputabili al quantitativo di CO2 nelle cartucce e all'efficacia dell'attivazione meccanica. Per quest'ultima si intende il modo in cui il sistema effettivamente punzona la cartuccia di CO2: se la punzonatura è conforme, l'intensità del suono e la sua durata sono corretti, se la punzonatura non è conforme l'intensità e la durata ne sono influenzati e saranno tipicamente inferiori, così come evidenziato dai test.

Tra i vari aspetti oggetto delle analisi, quello più rilevante evidenziato dai ricercatori riguarda i falsi allarmi (FALSE POSITIVE e FALSE NEGATIVE) registrati durante i test del dispositivo, per i quali i reports esaminati presentano risultati discordanti. Nei reports del 2010 e del 2019 sono stati registrati sia FALSE POSITIVE sia FALSE NEGATIVE, mentre in quello del 2017 non sono stati segnalati falsi allarmi, ad eccezione di un caso particolare che sarà approfondito successivamente.

Nella tabella sottostante (tabella 20) si riportano sinteticamente le informazioni inerenti ai falsi allarmi registrati durante i test suddivisi per report:

REPORT	N° PROVE	FALSE POSITIVE	FALSE NEGATIVE	OSSERVAZIONI
2010	22	2	8	22 dispositivi testati. False positive registrati durante le operazioni di movimentazione del dispositivo
2017	20	-	- (6)	6 False negative registrati in condizioni particolari
2019	20	-	4	False negative registrati durante le prove. Il numero dei False positive non è stato conteggiato

Tabella 20_ FALSE POSITIVE e FALSE NEGATIVE registrati durante i test condotti sul dispositivo SonoBlaster

Nel report del 2010, sono stati registrati due FALSE POSITIVE, che sono stati attribuiti a malfunzionamenti del sistema di armamento del dispositivo. In questi casi, anche se gli operai credevano di aver disarmato il dispositivo, l'allarme si è attivato durante il movimento dello stesso. Inoltre, il report del 2010 evidenzia che, tra i 22 dispositivi testati, 8 hanno manifestato problemi con l'indicatore di innesto della cartuccia o con il meccanismo di attivazione del sistema. Questi malfunzionamenti impedivano la corretta perforazione della cartuccia, impedendo così l'attivazione dell'allarme e causando un FALSE NEGATIVE.

Come indicato nella tabella 19, nel report del 2019, su 20 prove condotte sui dispositivi SonoBlaster, sono stati registrati 4 FALSE NEGATIVE. Anche in questo caso, come nel report del 2010, la causa di tali errori è stata attribuita a una perforazione inadeguata della cartuccia di CO₂, dovuta a un'installazione non corretta della cartuccia stessa o a un malfunzionamento del meccanismo di innescamento. È importante notare che, in alcuni casi, il sistema di innescamento ha emesso un suono indicativo della corretta attivazione al momento dell'inserimento della cartuccia, ma successivi controlli hanno

rivelato che la cartuccia non presentava alcun foro di attivazione. In un altro caso, il meccanismo di innesco non si è nemmeno attivato, evidenziando ulteriori problemi di affidabilità.

Nel report del 2017, invece, non sono stati registrati né FALSE POSITIVE né FALSE NEGATIVE durante le operazioni di normale funzionamento del dispositivo. Tuttavia, sono stati rilevati sei FALSE NEGATIVE su dispositivi testati più di una volta in rapida successione. I ricercatori hanno attribuito tali problemi alla formazione di ghiaccio e umidità conseguenti all'attivazione del dispositivo, che avviene tramite la perforazione della cartuccia di CO2 (figura 82).



Figura 82_ Accumulo di ghiaccio e condensa in corrispondenza dell'alloggiamento della cartuccia di CO2 del dispositivo SonoBlaster

La presenza di ghiaccio nell'area di installazione della cartuccia può ostacolare sia la rimozione della cartuccia esaurita, sia l'inserimento corretto di una nuova. Inoltre, il ghiaccio può impedire al meccanismo di perforare adeguatamente la cartuccia, causando così un FALSE NEGATIVE e compromettendo l'attivazione dell'allarme sonoro e la funzionalità del dispositivo.

Ragionando su questo aspetto, si può affermare che, nonostante queste problematiche possano influenzare negativamente il funzionamento del dispositivo, i ricercatori hanno osservato che, se si attende lo scioglimento del ghiaccio e si elimina l'umidità dall'alloggiamento della cartuccia di CO2, il dispositivo può essere nuovamente utilizzato senza alcun problema. Pertanto, questa criticità può essere considerata temporanea e risolvibile con semplici precauzioni. Inoltre, è importante considerare che, in una situazione reale di intrusione di un veicolo errante, il SonoBlaster, per come è stato concepito, si attiva solamente se colpito. È quindi ragionevole ritenere che il dispositivo debba operare in modo efficace e svolgere correttamente il suo compito nel momento dell'impatto per poi essere sostituito con uno nuovo. In altre parole, il SonoBlaster ha una sola possibilità per funzionare correttamente, quindi un suo utilizzo ripetuto in rapida successione è da escludere.

Un'ultima considerazione emersa nei vari report riguarda le fasi di installazione e rimozione del dispositivo stesso. In base ai risultati delle indagini effettuate sui lavoratori è emerso che durante tali operazioni di predisposizione del sistema di sicurezza SonoBlaster, i lavoratori risulterebbero fortemente esposti al traffico, con conseguente rischio per la loro sicurezza. Infine, sempre dalle indagini effettuate nei test pilota gli operatori e ricercatori ritengono che il SonoBlaster non sia adatto all'uso su autostrade o superstrade, poiché temono che l'elevata velocità dei veicoli in transito possa causare il ribaltamento dei dispositivi, con conseguente attivazione di falsi allarmi.

INTELLICONE:

Per quanto riguarda questo dispositivo è stato possibile reperire delle informazioni sul suo funzionamento consultando i seguenti report:

- ODOT_WORK_ZONE_INTRUSION_ALERT_TECHNOLOGIES: ASSESSMENT AND PRACTICAL GUIDANCE (2017) (27);
- CDOT_EVALUATION OF WORK_ZONE_INTRUSION_ALARMS (2019) (31);
- TDOT_WORK_ZONE_ALERT_SYSTEMS (2021) (32);
- CDOT_PILOT_TESTING OF WORK_ZONE_INTRUSION_ALARMS_FINAL_REPORT (2023) (33);

Dall'analisi dei test condotti su questo dispositivo in condizioni controllate, per quanto riguarda la durata media di attivazione dell'allarme è emerso quanto segue:

REPORT	DURATA MEDIA DELL'ALLARME SONORO [secondi]
2017	32
2019	30 (+-2)
2021	20

Tabella 21_Durata media dell'allarme sonoro del sistema Intellicone

Analizzando i dati riportati nella tabella 21, emerge che i team di ricerca che hanno redatto i reports del 2017 e del 2019 hanno ottenuto risultati simili, mentre nel report del 2021 è stata registrata una durata dell'allarme sonoro inferiore.

Un'ulteriore, interessante considerazione riguarda il confronto con il dispositivo SonoBlaster, la cui durata dell'allarme sonoro varia a causa del suo meccanismo di funzionamento, mentre l'allarme dell'INTELLICONE è basato su un sistema elettronico e pertanto tale durata è costante. la sua

ripetitività si conferma al susseguirsi delle prove tanto da evidenziare una deviazione standard pari allo zero o molto vicina a esso, palesemente diversa da quella del SonoBlaster, che, come riportato nella tabella 18, era di 10,89.

In relazione all'intensità dell'allarme sonoro, i risultati ottenuti sono i seguenti:

REPORT	LIVELLO SONORO DELL'ALLARME (dB)	
	A 0m di distanza	A 91m (=300ft) di distanza
2017	95	50
2019	90	60
2021	100	55

Tabella 22_ Livello sonoro medio dell'allarme del sistema Intellicone valutato a due distanze dal dispositivo

Osservando la tabella 22 si notano delle differenze, ma di lieve entità. È da sottolineare come durante i test con il fonometro per registrare il livello sonoro del dispositivo, anche le condizioni ambientali/metereologiche possono giocare un ruolo importante e far variare di poco i risultati. Logicamente, l'aspetto comune tra i risultati dei 3 report è che l'andamento del livello sonoro è decrescente all'aumentare della distanza. Nel grafico 47 estrapolato dal report del 2021 (e riportato nella sezione dei pilot testing relativi al dispositivo WAS) è possibile osservare l'andamento registrato durante i test.

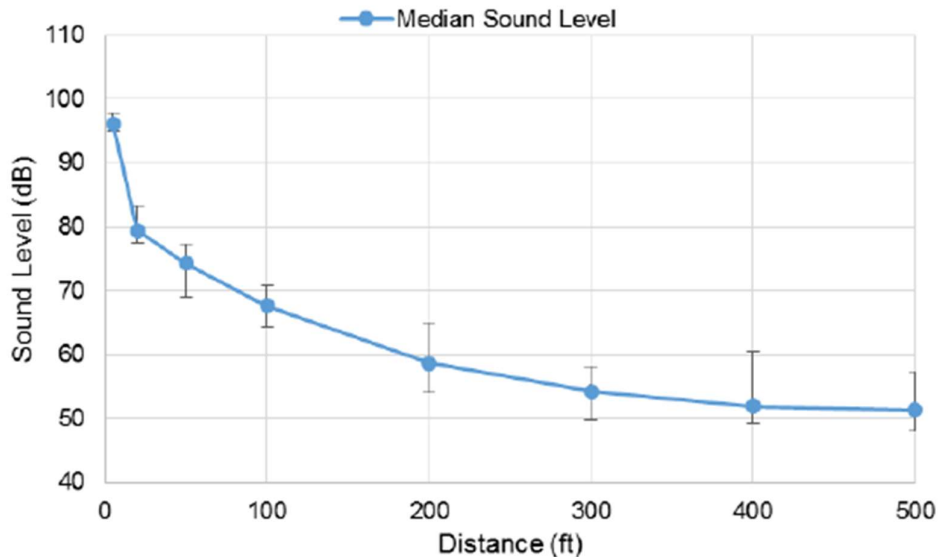


Grafico 51_ Livello sonoro medio del dispositivo Intellicone in funzione della distanza

Analogamente a quanto osservato per la durata dell'allarme, anche per il livello sonoro si nota, a partire dal grafico 51 estratto dal report del 2017, una variabilità dell'intensità significativamente

ridotta rispetto, per esempio, a quella valutata per il dispositivo SonoBlaster. Tale fenomeno è ancora una volta attribuibile all'uso di un dispositivo elettronico per l'allerta da parte dell'Intellicone che conferisce maggiore affidabilità al sistema, in contrasto con il meccanismo utilizzato dal SonoBlaster, il quale non è in grado di garantire una costanza delle prestazioni.

Anche per questo dispositivo, gli autori hanno indagato l'interazione tra il livello sonoro dell'allarme e il rumore ambientale, costituito dal flusso veicolare in transito o dalla presenza di mezzi d'opera e apparecchiature di cantiere. A tal fine, nei report del 2017 e del 2021 sono state eseguite prove specifiche, considerando due scenari distinti: il primo prevedeva la collocazione del dispositivo tra la fonte di rumore/disturbo e il fonometro (figura 83), mentre nel secondo il fonometro è posto tra la fonte di rumore e il dispositivo di allerta (figura 84).

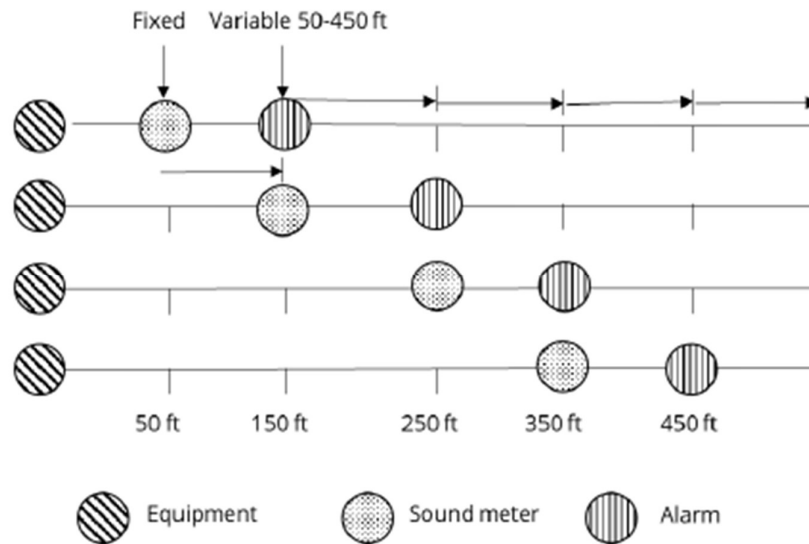


Figura 83_Valutazione dell'intensità sonora dell'allarme del dispositivo in presenza di fonti rumorose esterne_ Primo scenario di prova

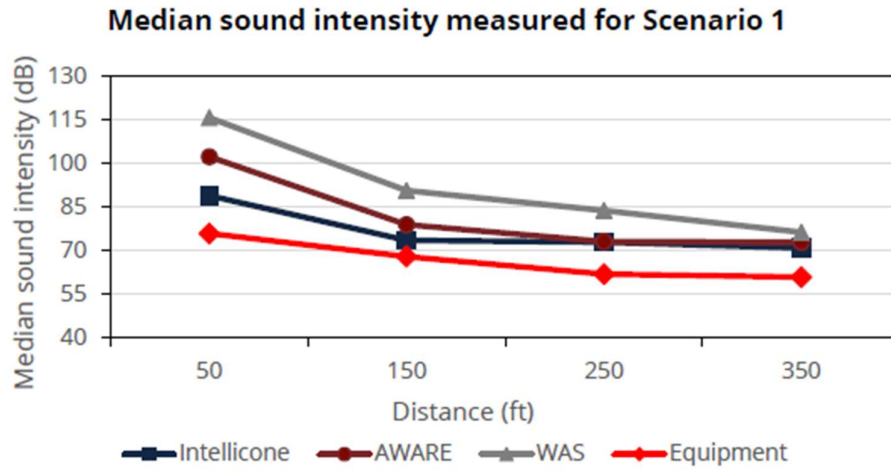


Grafico 52_ Intensità sonora media dell'allarme del dispositivo in presenza di fonti rumorose esterne _ Primo scenario di prova

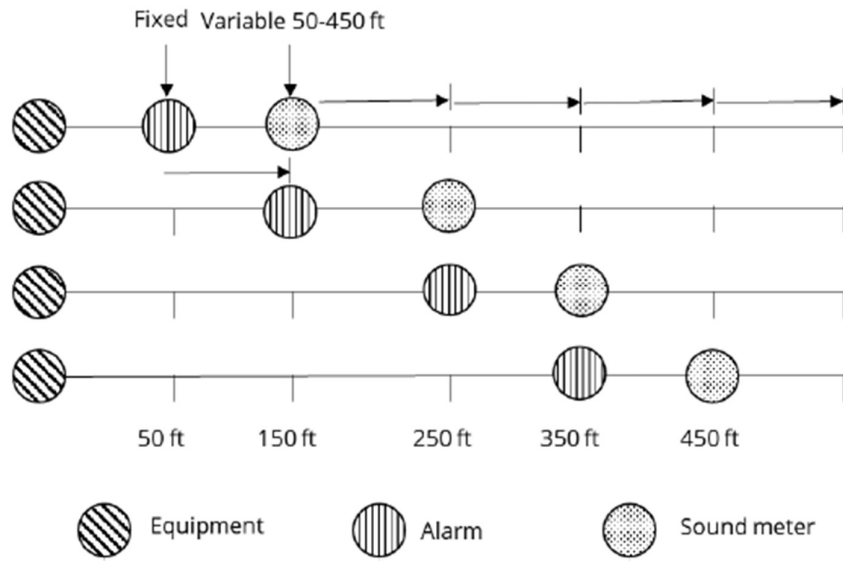


Figura 84_ Valutazione dell'intensità sonora dell'allarme del dispositivo in presenza di fonti rumorose esterne _ Secondo scenario di prova

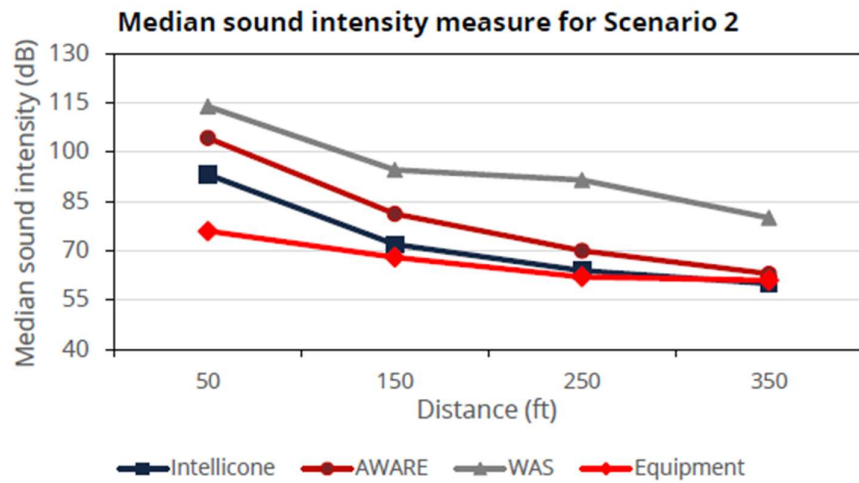


Grafico 53__ Intensità sonora media dell'allarme del dispositivo in presenza di fonti rumorose esterne _ Secondo scenario di prova

In entrambi gli scenari, il livello sonoro dell'INTELLICONE è sempre risultato superiore a quello della fonte di rumore (grafico 52 e 53), sebbene nel secondo la differenza sia meno pronunciata.

Un ulteriore aspetto, sempre legato alle caratteristiche del dispositivo e al segnale di allarme, riguarda la relazione tra l'orientamento del dispositivo e la percezione del segnale sonoro. A differenza degli altri dispositivi menzionati nel paragrafo precedente, il dispositivo di allarme del sistema Intellicone, ovvero il PSA, è dotato di tre altoparlanti posizionati come illustrato nella figura 80. Questo design garantisce che l'allarme dell'Intellicone non abbia una direzione preferenziale, ma che l'intensità sonora risulti mediamente uniforme in tutte le direzioni (grafico 54). Tale caratteristica rappresenta un vantaggio significativo, poiché facilita la percezione del segnale d'allarme.

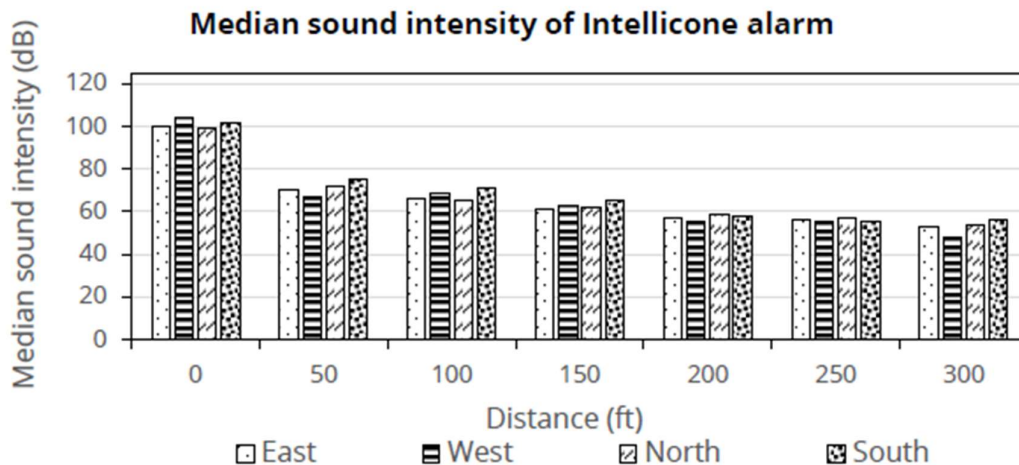


Grafico 54_ Valutazione dell'intensità sonora media dell'allarme del dispositivo Intellicone, in funzione della distanza e della direzione

Come per quanto accaduto per il WAS, anche per l'Intellicone sono stati condotti dei test specifici per analizzare la distanza di trasmissione del segnale di pericolo dal sensore al dispositivo di allarme

(il PSA). Di seguito si riportano le tabelle e i grafici che rappresentano i risultati ottenuti nei test per i report del 2017 e del 2021.

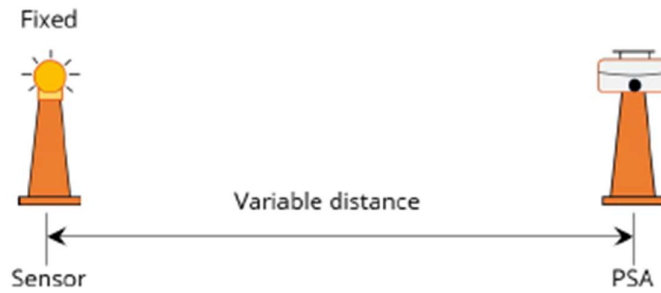


Figura 85_ Configurazione di prova per determinare la massima distanza di trasmissione del segnale di allarme del dispositivo Intellicone

Table 5.4: Transmission Range of Intellicone® and WAS*

Distance (ft)	Intellicone® (Audio/Visual)	WAS			
		(Audio/Visual)	PSD 1	PSD 2	PSD 3
5	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
10	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
20	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
50	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓✓✓
100	✓✓✓	✓✓✓			
150	✓✓✓	✓✓✓			
200	✓✓✓	✓✓✓			
250	✓✓✓	✓✓✓			
300	✓☑☑**	✓✓✓			
350	☑☑☑				
400	☑☑☑				
450	☑☑☑				
500	☑☑☑				
550	☑☑☑				
600	☑☑☑				
650	☑☑				
700					

* ✓ represents transmission covered by primary sensor
 ** ☑ represents transmission distance covered using an additional sensor
 ✓✓✓ indicates test was conducted 3 times
 PSD - personal safety device

Tabella 23_ Valutazione della massima distanza di trasmissione del segnale per i dispositivi Intellicone e WAS (report 2017 (27))

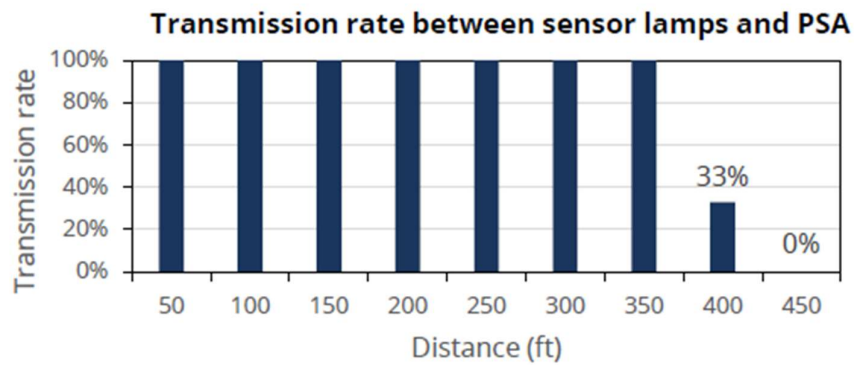


Grafico 55_Range di trasmissione del segnale di allarme del sistema Intellicone tra il "Sensor Lamp" e il PSA (report 2021 (32))

È importante considerare che, mentre nei report del 2017 e del 2021 è stata investigata la massima distanza di trasmissione del segnale, nel report del 2019 ci si è limitati a confermare le specifiche dichiarate dal produttore del dispositivo Intellicone, secondo cui a una distanza di 100 piedi (30,5m) il segnale tra il sensore e il PSA viene trasmesso con una affidabilità del 100%. Tuttavia, i risultati ottenuti nei report del 2017 e del 2021 mostrano un incremento significativo di tale distanza rispetto a quanto dichiarato dal produttore. Infatti, nel 2017, la massima distanza di trasmissione rilevata era di 250 piedi (76,2m) con un tasso di successo del 100%, mentre a 300 piedi (91,4m) il successo scendeva al 33%. Nel 2021, invece, la trasmissione ha mantenuto un successo del 100% fino a 350 piedi (106,7m). Inoltre, è fondamentale ricordare che la distanza di trasmissione del sistema Intellicone può essere ulteriormente incrementata, potenzialmente all'infinito, semplicemente aggiungendo in serie dei sensori distanziati al massimo di 100 piedi (30,5m) l'uno dall'altro, come già illustrato nel paragrafo precedente relativo alla descrizione del sistema.

Infine, nei report analizzati è stata esaminata l'affidabilità del sistema Intellicone attraverso il monitoraggio dei falsi allarmi registrati durante le prove condotte sul dispositivo. Mentre nei report del 2017 e del 2019 l'analisi si è concentrata esclusivamente sulla frequenza dei falsi allarmi, nel report del 2021 è stata adottata un'approfondita metodologia di studio, simile a quella utilizzata per il WAS. Oltre a valutare i falsi allarmi, nel 2021 sono state anche analizzate le implicazioni della velocità di avvicinamento del veicolo intruso sul funzionamento del dispositivo. Inoltre, è stato approfondito lo studio dei tempi di reazione degli operai coinvolti nelle prove, fornendo un quadro più completo dell'efficacia e dell'affidabilità del sistema.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI**Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento**

REPORT	N° PROVE	FALSE POSITIVE	FALSE NEGATIVE
2017	20	1	-
2019	10	-	-

Tabella 24_ Numero di falsi allarmi registrati durante le prove condotte sul sistema Intellicone

Esaminando la tabella 24 emerge che, nel report del 2017, su 20 attivazioni dell'Intellicone, non è stato rilevato alcun FALSE NEGATIVE, mentre un FALSE POSITIVE si è verificato durante le operazioni di montaggio del dispositivo. Tuttavia, questo falso allarme può essere facilmente evitato assicurandosi di accendere e inizializzare il sistema solo dopo l'installazione dei sensori.

Nel report del 2019, invece, su 10 prove eseguite in condizioni di normale operatività, non sono stati registrati né FALSE POSITIVE né FALSE NEGATIVE. È importante notare, però, che durante una fase preliminare dei test erano stati rilevati alcuni FALSE NEGATIVE quando il sistema Intellicone veniva attivato in rapida successione (con intervalli di 10 secondi tra ciascuna attivazione). Questi FALSE NEGATIVE sono stati attribuiti al fatto che il sistema richiedeva un tempo di reset di circa 35-45 secondi, durante il quale il dispositivo non rilevava ulteriori intrusioni. Questo comportamento era anomalo, poiché, secondo il produttore, non avrebbe dovuto verificarsi. Una volta compreso il problema, i ricercatori hanno aspettato il tempo di reset tra le attivazioni successive, eliminando così i FALSE NEGATIVE e garantendo il successo di tutte le prove. Questa problematica è stata riscontrata solo nel report del 2019; nei report successivi non vi è più alcuna menzione di essa, il che suggerisce che il produttore abbia risolto il problema o che il dispositivo utilizzato nei test del 2019 fosse difettoso.

Per quanto riguarda il report del 2021, è stato valutato il tasso di attivazione dell'allarme per il sistema Intellicone attraverso test di impatto, in cui un veicolo di prova simulava intrusioni nella zona di lavoro.

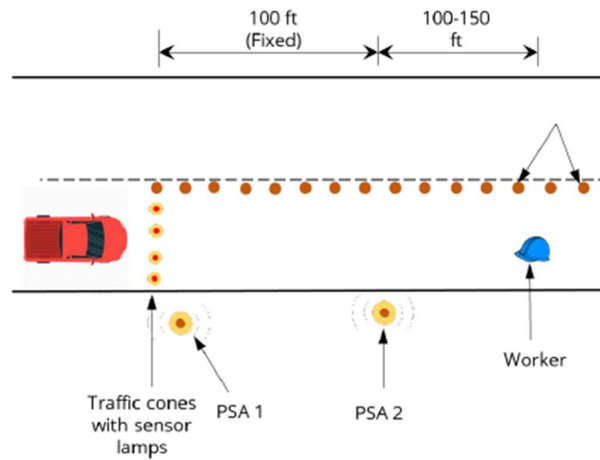


Figura 86_ Configurazione di prova per la determinazione del tasso di attivazione dell'allarme del sistema Intellicone

La figura sopra riportata (figura 86) illustra la configurazione della prova di intrusione, nella quale l'immagine rappresenta la simulazione di un cantiere con la chiusura di una corsia, e la prova consisteva in un'intrusione frontale di un veicolo errante. Durante la prova, sono stati installati due dispositivi di allarme PSA, e le intrusioni sono state simulate a velocità di 30 mph, 45 mph e 60 mph (circa 48, 72 e 96 km/h). In ogni prova sperimentale, è stata registrata l'attivazione degli allarmi e il tempo di reazione del lavoratore, ovvero l'intervallo tra l'ingresso del veicolo nel perimetro della zona di lavoro e la risposta del lavoratore all'allarme.

La tabella 25 estratta dal report documenta i risultati della prova. Analizzando i dati, si osserva che l'affidabilità del sistema diminuisce con l'aumentare della velocità di avvicinamento del veicolo errante. Ad esempio, a una velocità di 30 mph (circa 48 km/h), il sensore ha rilevato correttamente l'intrusione in due terzi dei casi, mentre a 60 mph (circa 96 km/h), gli allarmi non si sono attivati in nessuna occasione, suggerendo una ridotta affidabilità della tecnologia a velocità più elevate. Tali risultati indicano che l'INTELLICONE potrebbe non essere adatto per l'uso su strade ad alta velocità, come le autostrade.

Test speed (mph)	PSA 2 to worker distance (ft)	Success rate	Comments
30	100	66%	Only two of three attempts resulted in an alert
	150	66%	Only two of three attempts resulted in an alert
45	100	66%	Only two of three attempts resulted in an alert
	150	33%	Only one of three attempts resulted in an alert
60	100	0%	No alerts on all three attempts
	150	0%	No alerts on all three attempts

Tabella 25_ Percentuale di successo delle attivazioni del dispositivo

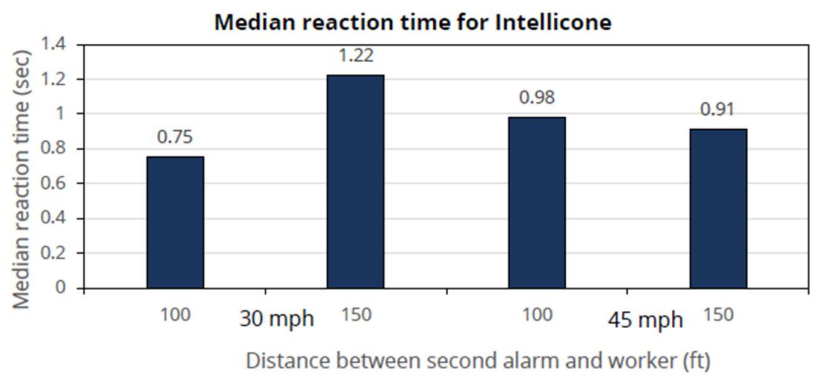


Grafico 56_ Tempi di reazione medi osservati per il dispositivo Intellicone_ Valutazione in funzione della velocità di marcia del veicolo di prova

Per quanto riguarda i tempi di reazione dell'operatore, il grafico 56 mostra che il tempo di risposta del lavoratore è stato generalmente inferiore a 1 secondo. Tuttavia, in alcune prove, gli allarmi sono stati attivati con un ritardo significativo. Ad esempio, a una velocità di 30 mph (circa 48 km/h), il tempo di reazione a una distanza di 150 piedi (circa 46 metri) è stato notevolmente più lungo rispetto ad altre prove. Questa attivazione tardiva dell'allarme suggerisce la presenza di una latenza incoerente tra il rilevamento dell'intrusione e l'attivazione dell'allarme, evidenziata dal team di ricerca.

SINGLE SENTRY BEAM (PORTABLE LASER):

Per tale dispositivo è stato possibile trovare le informazioni utili sul suo funzionamento solamente consultando il report CDOT_FINAL TESTING OF WORK ZONE INTRUSION ALARMS (2023) (33).

Per quanto riguarda questo dispositivo, i ricercatori si sono concentrati principalmente sulla valutazione del range di trasmissione del segnale di allarme dal Single Sentry Beam al dispositivo di

allarme PSA. In merito al livello sonoro dell'allarme e ad altri aspetti tecnici, si fa riferimento a quanto già riportato per l'Intellicone, poiché entrambi i dispositivi sono prodotti dallo stesso fabbricante e condividono lo stesso sistema di allarme PSA.

Dall'analisi dei ricercatori è emerso che il range massimo di trasmissione del segnale tra il dispositivo e il PSA non è di 246 piedi (75m) come indicato dal fornitore/produttore, bensì risulta essere di appena 175 piedi (53m). Questo aspetto è da tenere in considerazione per poter condurre una corretta analisi sulla copertura effettiva che questo dispositivo può fornire nell'area di cantiere.

Per quanto concerne l'affidabilità del Single Sentry Beam, i ricercatori hanno espresso apprezzamento per l'efficacia dimostrata dal dispositivo nell'individuazione delle intrusioni. Durante i test condotti, infatti, il dispositivo ha rilevato con successo il 100% delle intrusioni, evidenziando un elevato grado di affidabilità.

L'analisi che i ricercatori hanno condotto sul dispositivo e sul suo uso ha evidenziato degli ulteriori, interessanti, aspetti:

- gli operatori che lo hanno usato concordano sul fatto che sia necessario avere più unità a disposizione così da poter avere una copertura maggiore dell'area di cantiere;
- gli operatori ritengono che il metodo ottimale per il suo impiego consista nel posizionarlo con il fascio laser orientato parallelamente al flusso veicolare e configurato per la massima distanza, in modo da garantire la copertura più ampia possibile;
- il suo peso elevato desta delle preoccupazioni dal punto di vista della sicurezza dei veicoli in movimento, in quanto, se urtato, potrebbe causare grossi danni al veicolo e ai suoi occupanti;

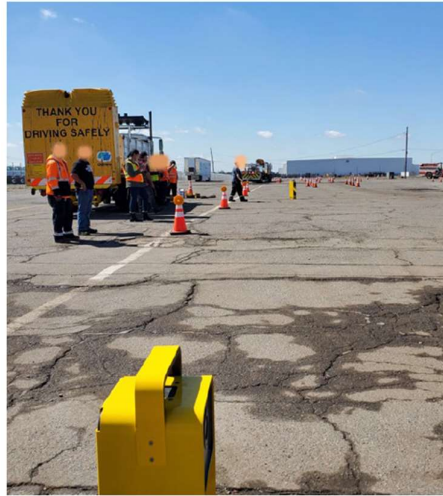


Figura 87_Immagine raffigurante i test per la determinazione del massimo range di individuazione dei veicoli erranti

AWARE

Al fine di valutare le caratteristiche funzionali e prestazionali del sistema AWARE, è stata consultata la seguente documentazione:

- Texas A&M Transportation Institute: CLOSED COURSE PERFORMANCE TESTING OF THE AWARE INTRUSION ALARM SYSTEM (report del 2017 dedicato al sistema AWARE) (35);
- TDOT: WORK ZONE ALERT SYSTEMS (2021) (32);
- CDOT: PILOT TESTING OF WORK ZONE INTRUSION ALARMS_FINAL REPORT (2023) (33);

Come per gli altri dispositivi analizzati in questo capitolo, nel prosieguo della trattazione verranno approfonditi i risultati ottenuti dalle campagne di prove condotte in condizioni controllate dai gruppi di ricerca che hanno redatto i report sopra citati.

La consultazione di questi tre documenti ha permesso di ottenere una visione complessiva ed esaustiva sulle capacità e potenzialità del sistema AWARE. In particolare, mentre nel primo report del 2017 gli autori si sono concentrati prevalentemente sulla valutazione dell'affidabilità del sistema, ossia sulla sua capacità di individuare veicoli target, nei report successivi l'analisi è stata estesa per investigare ulteriori caratteristiche del sistema AWARE, quali la distanza di trasmissione del segnale di pericolo, il livello sonoro e la durata dell'allarme.

Di seguito si intende presentare i risultati e le considerazioni emerse dall'analisi del report del 2017:

In questo documento è stato esaminato il funzionamento del sistema AWARE nelle sue due configurazioni operative:

- **AWARE (individuazione delle intrusioni di Corsia)**
- **AWARE SENTRY**

Il report documenta esperimenti condotti esclusivamente in condizioni controllate, simulando diversi scenari operativi che il sistema AWARE potrebbe incontrare durante il suo utilizzo. Tali scenari verranno successivamente esposti e approfonditi. Inoltre, al fine di realizzare un'analisi quanto più completa ed esaustiva possibile, i ricercatori hanno valutato anche l'efficacia del dispositivo di allarme personale Worktrax.

Per testare il dispositivo in configurazione AWARE in modalità di individuazione, sono stati simulati scenari tipici di cantieri stradali, che includevano:

- Chiusura di una corsia in un tratto rettilineo;
- Chiusura di una corsia in un tratto curvo a destra;
- Chiusura di una corsia in un tratto curvo a sinistra.

Questi scenari sono stati ulteriormente suddivisi in vari sotto-casi.

CHIUSURA DI UNA CORSIA IN UN TRATTO RETTILINEO:

Considerando il primo scenario analizzato dal team di ricerca, ovvero la "Chiusura di una corsia in un tratto rettilineo", i ricercatori hanno guidato i veicoli target lungo una serie di traiettorie predefinite, alcune delle quali progettate per attivare l'allarme e altre per verificare che l'allarme non si attivasse, al fine di condurre un'analisi completa ed esaustiva. Sono state quindi selezionate e valutate cinque traiettorie differenti, per ciascuna delle quali sono state effettuate molteplici misurazioni:

- **Traiettoria A:** Cambio di corsia nella corsia adiacente entro 200 piedi dal dispositivo AWARE;
- **Traiettoria B:** Passaggio del veicolo target in una corsia adiacente;
- **Traiettoria C:** Attraversamento della regione di rilevamento delle intrusioni da parte del veicolo target;
- **Traiettoria D:** Veicolo target in avvicinamento a una velocità inferiore alla soglia di allarme;
- **Traiettoria E:** Veicolo target in avvicinamento nella corsia chiusa e penetrazione della soglia definita dalla SSD.

Durante i test delle traiettorie sopra indicate, i ricercatori hanno anche aggiunto delle ulteriori variabili per un'analisi più approfondita del dispositivo e cioè sono stati impiegati due veicoli target di dimensioni differenti per verificare se il sistema AWARE fosse in grado di rilevare veicoli di diverse dimensioni e sono state considerate quattro configurazioni aggiuntive di prova:

- Il dispositivo AWARE allineato con l'asse della corsia da proteggere;
- Il dispositivo AWARE disassato di 10° a sinistra rispetto all'asse della corsia;
- Il dispositivo AWARE disassato di 10° a destra rispetto all'asse della corsia;
- Il dispositivo inclinato rispetto alla verticale.

Queste configurazioni aggiuntive possono essere osservate nell'immagine (figura 88) riportata di seguito.

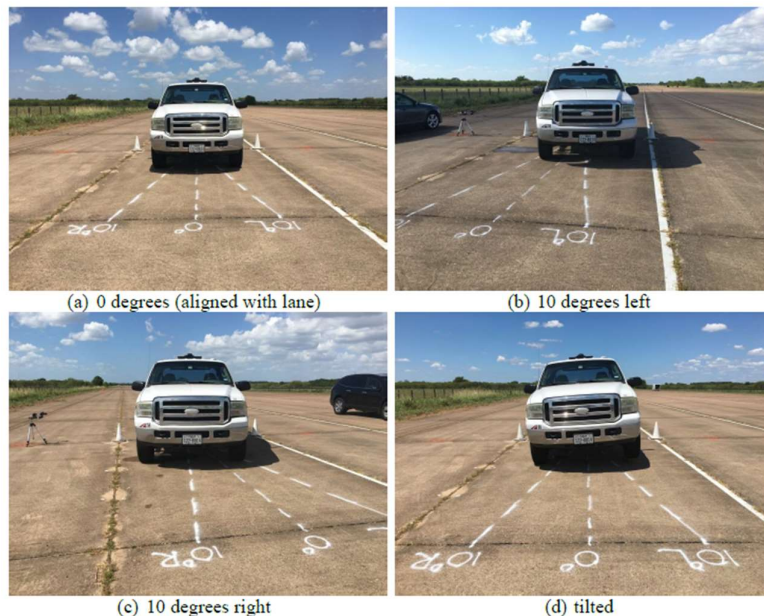


Figure 13. AWARE Vehicle Alignments Used in Tangent Alignment Testing.

Figura 88_ Configurazioni aggiuntive di prova:

a) dispositivo allineato con l'asse della corsia monitorata

b) dispositivo disassato di 10° a sinistra rispetto all'asse della corsia monitorata

c) dispositivo disassato di 10° a destra rispetto all'asse della corsia monitorata

d) dispositivo inclinato rispetto alla verticale

Nel contesto del primo scenario sono stati effettuati complessivamente 204 test e sono stati soddisfacenti in quanto il sistema AWARE ha sempre risposto in modo corretto, senza far registrare alcun falso allarme.

A titolo esemplificativo, si riportano di seguito gli schemi e le considerazioni relativi alle traiettorie C ed E, in quanto queste rappresentano i casi di maggiore interesse per valutare l'efficacia del sistema AWARE. Gli schemi relativi alle altre traiettorie sono disponibili nell'APPENDICE 1.

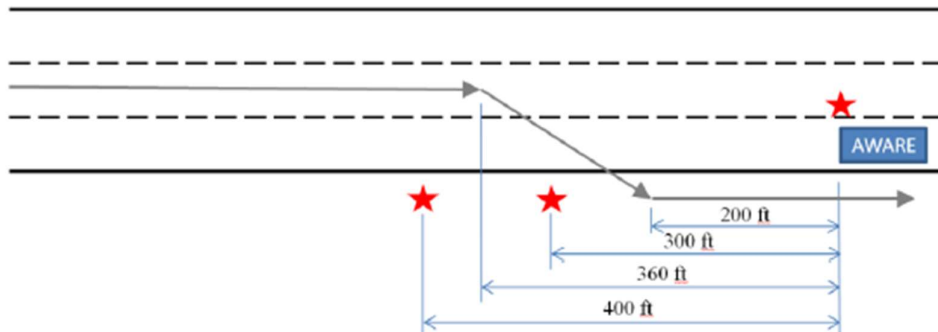


Figura 89_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettoria C

La figura 89 illustra la traiettoria C, durante la quale il veicolo target attraversa l'area monitorata dal dispositivo e, con le stelline rosse, è indicata la posizione dei dispositivi di allarme personale Worktrax. In base alla configurazione di prova, era previsto che l'allarme per l'intrusione si attivasse, e questo è effettivamente avvenuto come previsto. Inoltre, è stato osservato che solo i Worktrax situati più a valle rispetto alla zona di individuazione dell'intrusione — compresa tra 360 e 200 piedi (109,7 – 60,9m) dal dispositivo AWARE — si sono attivati, mentre quelli posizionati a 300 e 400 piedi (91,4 – 121,9m), cioè a monte dell'intrusione, non hanno emesso alcun segnale, conformemente alle attese. Questo risultato conferma l'affidabilità e l'efficacia del sistema di allarme AWARE e dimostra il corretto funzionamento dei Worktrax.

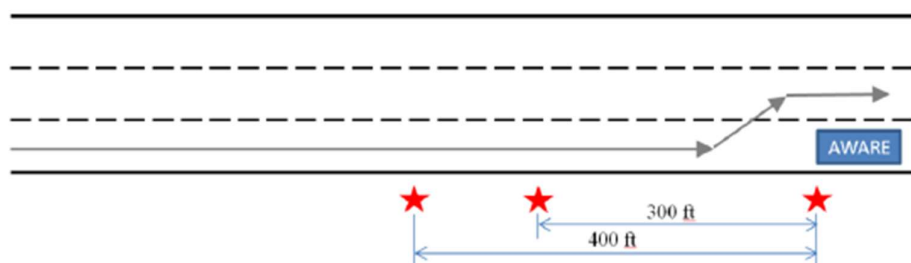


Figura 90_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettoria E

Per quanto riguarda la traiettoria E (figura 90), erano invece previsti più passaggi dei veicoli target con velocità rispettivamente di 45mph (72,4 km/h) e 60mph (96,6 km/h), per verificare i range di individuazione del sistema AWARE simulando delle intrusioni frontali, ovvero che avvengono nella corsia dove è collocato il dispositivo. Di seguito viene presentato un estratto della tabella 15, già introdotta nel paragrafo precedente nella sezione dedicata all'analisi del funzionamento del sistema

AWARE. In questo estratto sono riportate le distanze SSD (distanze di arresto) calcolate per un tempo di reazione pari a $t=2,5$ secondi (secondo l'approccio AASHTO) e $t=4,5$ secondi (secondo l'approccio conservativo), le quali sono state utilizzate durante i test per attivare l'allarme del sistema AWARE.

Come descritto nel paragrafo precedente, e secondo quanto dichiarato dal produttore, la distanza massima di rilevamento del sistema AWARE è di 500 piedi (152,4 metri). Pertanto, il team di ricerca si aspettava che, considerando l'approccio conservativo con un tempo di reazione di $t=4,5$ secondi, l'allarme luminoso del sistema si attivasse alla distanza massima di rilevamento per entrambe le velocità testate, mentre con l'approccio AASHTO ($t=2,5$ secondi), l'attivazione degli allarmi alla massima distanza di rilevamento era prevista solo per i passaggi effettuati a una velocità di 60 mph (96,6 km/h).

Velocità di avvicinamento del veicolo target		Distanza SSD (Stopping Sight Distance) valutata rispetto alla velocità di avvicinamento del veicolo target			
		SSD CONSERVATIVA ($t=4.5\text{sec}$)		AASHTO SSD ($t=2.5\text{sec}$)	
[mph]	[km/h]	[Feet]	[m]	[Feet]	[m]
45	72.4	492	150	360	110
60	96.6	742	226	556	173

Tabella 26_ Valutazione della distanza di arresto (SSD) in funzione della velocità di avvicinamento del veicolo target durante i test condotti sull'AWARE (estratto tabella 14)

Sperimentalmente, si è misurata una distanza media di individuazione di 478,8 piedi (145,9 m) alla velocità di 45 mph (72,4 km/h) e di 477,9 piedi (145,6 m) alla velocità di 60 mph (96,6 km/h). Questi valori confermano il raggio di rilevamento teorico del dispositivo AWARE e i risultati ottenuti sono risultati coerenti con le aspettative dei ricercatori.

Per quanto riguarda i dispositivi Worktrax relativi alla traiettoria E, i ricercatori si aspettavano che tutti i dispositivi si attivassero non appena il veicolo target entrava nella corsia protetta all'estremità a monte della regione di rilevamento delle minacce a lungo raggio. Nei punti situati a 0 piedi e 300 piedi (91,4 m), i dispositivi Worktrax si sono attivati regolarmente come previsto. Tuttavia, per il Worktrax posizionato a 400 piedi (121,9 m) di distanza, su 42 attivazioni attese, solo 31 sono state effettivamente registrate, evidenziando 11 FALSE NEGATIVE. Questo comportamento è stato attribuito, secondo il gruppo di ricerca, a una distanza tra il sistema AWARE e il Worktrax che eccedeva il raggio di comunicazione previsto tra i due dispositivi. Gli stessi ricercatori hanno inoltre affermato che tale inconveniente poteva essere risolto migliorando le prestazioni del sistema.

CHIUSURA DI UNA CORSIA IN UN TRATTO CURVILINEO:

Per quanto riguarda lo scenario delle prove condotte su un tratto curvilineo, i ricercatori hanno deciso di escludere il pickup come veicolo target, poiché il mezzo più piccolo è stato ritenuto più difficile da individuare, rappresentando quindi una sfida maggiore e più utile per il sistema. Allo stesso modo, sono state eliminate le prove con il dispositivo orientato a $+10^\circ$ e -10° , mantenendo solo quelle con il dispositivo allineato alla corsia e inclinato rispetto alla verticale.

Nelle configurazioni su tratti curvilinei, il veicolo di prova è stato guidato lungo un percorso progettato per essere affrontato a una velocità di 40 mph (64 km/h). In questo contesto, sono state considerate quattro traiettorie, corrispondenti alle traiettorie A, B, C ed E del caso rettilineo, applicate ora ai tratti curvilinei. Per tale scenario, sono state eseguite un totale di 48 prove, 24 con la curva a destra e altrettante con la curva a sinistra.

Anche in questi scenari, il dispositivo AWARE ha risposto correttamente e con precisione, senza che si registrassero falsi allarmi. Di seguito, viene descritta nel dettaglio la configurazione di prova relativa alla traiettoria E, poiché essa offre spunti di riflessione e indicazioni rilevanti, mentre nella sezione allegata sono riportati gli schemi di prova relativi alle altre configurazioni su tratti curvilinei.

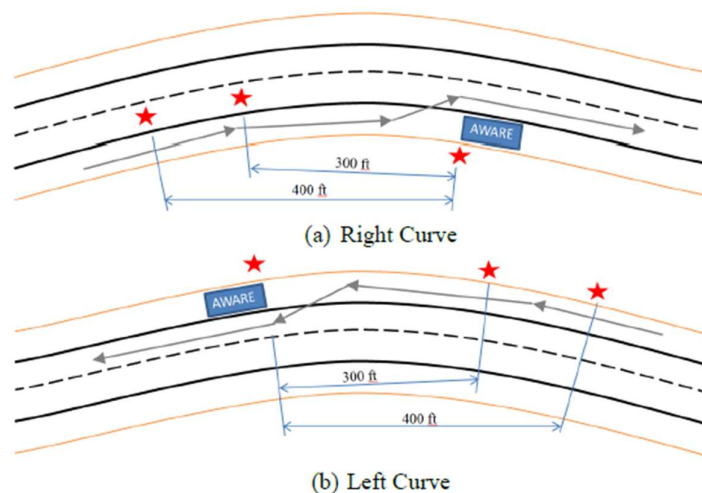


Figura 91_Configurazione di prova su un tratto curvilineo _ Traiettoria E
a) curva a destra
b) curva a sinistra

Osservando la figura 91, è possibile visualizzare la configurazione di prova adottata per la traiettoria E su un tratto curvilineo. Analogamente alla traiettoria corrispondente del tratto rettilineo, in questo caso i ricercatori hanno testato la capacità di individuazione del dispositivo quando il veicolo target entrava e attraversava l'area monitorata dal sistema.

Come indicato in precedenza, le curve erano progettate per essere affrontate a una velocità di 40 mph (64 km/h). Pertanto, sono state valutate le distanze SSD per l'approccio conservativo, corrispondente a un tempo di reazione di $t=4,5$ secondi, e per l'approccio AASHTO, corrispondente a un tempo di reazione di $t=2,5$ secondi. I valori relativi sono riportati nella tabella seguente.

Velocità di avvicinamento del veicolo target		Distanza SSD valutata rispetto alla velocità di avvicinamento del veicolo target			
		SSD CONSERVATIVA ($t=4.5\text{sec}$)		AASHTO SSD ($t=2.5\text{sec}$)	
[mph]	[km/h]	[Feet]	[m]	[Feet]	[m]
40	64.4	418	127	301	92

Tabella 27_ Valutazione della distanza di arresto (SSD) in funzione della velocità di avvicinamento del veicolo target durante i test condotti sull'AWARE in un tratto curvilineo (estratto da tabella 14)

I valori riportati nella tabella 27 sono quelli teorici calcolati mediante la formulazione descritta nel paragrafo precedente, nella sezione dedicata al funzionamento del sistema AWARE. Per valutare l'accuratezza della distanza di individuazione media del dispositivo, i ricercatori hanno misurato il punto in corrispondenza del quale il segnale luminoso si è attivato per segnalare l'intrusione del veicolo target. Tali distanze possono essere osservate nel grafico 57 riportato di seguito.

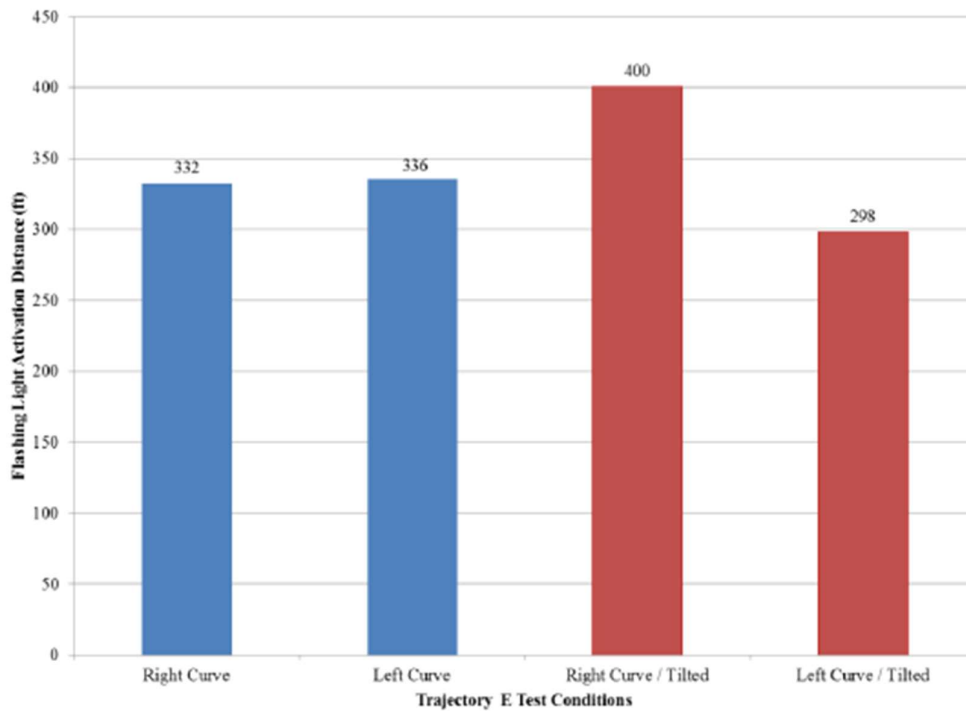


Grafico 57_ Distanza di individuazione media del dispositivo AWARE su tratto curvilineo_ Traiettorie E

Dall'osservazione del grafico 57 è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Le colonne blu rappresentano le distanze medie di individuazione del veicolo target e dimostrano che, per entrambe le curve a destra e a sinistra, le misurazioni sono simili. Queste distanze medie, se confrontate con i valori teorici delle SSD riportati nella tabella 26, ovvero le distanze previste per l'individuazione dell'intrusione del veicolo target in base all'approccio adottato ($t=2.5$ o $t=4.5$ sec), risultano maggiori rispetto al valore SSD AASHTO, ma inferiori al valore SSD CONSERVATIVO. Pertanto, durante lo svolgimento di questa prova, il sistema si è attivato mediamente nell'intervallo temporale tra la soglia SSD AASHTO e la soglia SSD CONSERVATIVO.
- Le colonne rosse rappresentano i risultati medi delle distanze di intrusione valutate con il dispositivo inclinato. È interessante notare una discreta differenza tra il valore medio registrato nella curva a destra e quello nella curva a sinistra, con quest'ultimo risultante significativamente più basso. I ricercatori hanno attribuito questa differenza al fatto che il veicolo si avvicinava al sistema AWARE da una zona sottostante la regione di rilevamento a ventaglio nella curva a sinistra, accorciando così la distanza percorsa prima di essere rilevato. Al contrario, nella curva a destra, l'area di rilevamento inclinata del sistema AWARE sembrava attivarsi a una distanza più vicina al valore SSD CONSERVATIVO rispetto che al valore SSD AASHTO. In ogni caso, anche in questa configurazione con il dispositivo inclinato, il sistema ha mediamente rilevato l'intrusione prima rispetto alla distanza SSD AASHTO.

Per quanto riguarda i dispositivi Worktrax utilizzati durante le prove condotte su tratti curvilinei, è importante sottolineare che quelli situati accanto all'AWARE si sono attivati correttamente in tutti e 12 i passaggi. Tuttavia, i dispositivi posti a una distanza di 300 piedi (91,4 m) e 400 piedi (121,9 m) dal sistema AWARE non sono stati testati in questa configurazione, a causa dei problemi già riscontrati durante i test effettuati su tratti rettilinei.

AWARE SENTRY:

Per quanto riguarda il sistema AWARE in configurazione Sentry, è stato testato in diverse condizioni al fine di valutare in modo completo l'efficacia del dispositivo. Su tale sistema sono state condotte delle analisi considerando le seguenti traiettorie di prova:

- **Traiettoria F:** Cambio di corsia durante l'uso del cartello "SLOW PADDLE⁵³".
- **Traiettoria G:** Cambio di corsia durante l'uso del cartello "STOP PADDLE⁵⁴".
- **Traiettoria H:** Decelerazione al di sotto della SSD durante l'uso del cartello "STOP PADDLE".
- **Traiettoria I:** Sorpasso del traffico in coda a sinistra durante l'uso del cartello "STOP PADDLE".
- **Traiettoria J:** Sorpasso del traffico in coda a destra durante l'uso del cartello "STOP PADDLE".
- **Traiettoria K:** Cambio di corsia sorpassando il traffico in coda a sinistra durante l'uso del cartello "STOP PADDLE".

Durante i test sono stati effettuati tre passaggi per ciascuna delle traiettorie F, G, I, J e K, e sei passaggi per la traiettoria H, per un totale di 21 passaggi. In tutte le prove, il dispositivo AWARE SENTRY ha dimostrato di rispondere adeguatamente, individuando correttamente tutte le intrusioni simulate dal team di ricerca.

Come per i casi precedenti, si riportano di seguito le considerazioni e i risultati dettagliati delle prove condotte sulle traiettorie H, I e J, mentre per le informazioni relative alle altre traiettorie si rimanda alla consultazione dell'APPENDICE 1.

La figura 92 rappresenta la schematizzazione della traiettoria H, utilizzata dai ricercatori per testare una situazione in cui il veicolo target si avvicinava alla zona di arresto, dove era posizionato il sistema AWARE SENTRY, decelerando in modo che la velocità rimanesse sempre inferiore a quella teorica prevista dalla distanza di arresto (SSD) secondo l'approccio conservativo ($t=4,5$ secondi). L'obiettivo era verificare che, in queste condizioni, l'allarme luminoso del dispositivo non si attivasse.

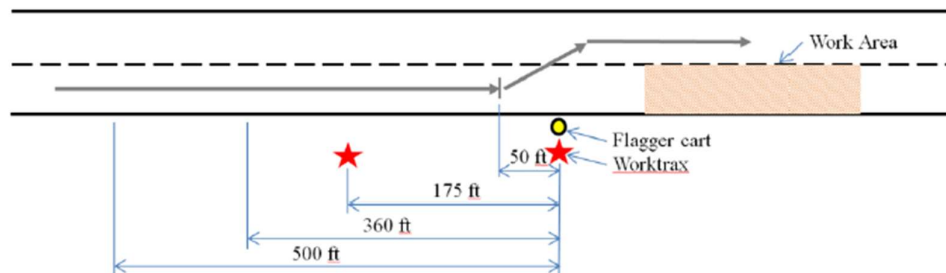


Figura 92_Configurazione di prova per il dispositivo AWARE in modalità Sentry_ Traiettoria H

⁵³ Cartello usato in ambito stradale dagli addetti alla segnalazione per dirigere i flussi veicolari. Quando l'operatore mostra ai conducenti questo segnale, indica che devono ridurre la velocità e procedere con cautela attraverso l'area interessata dalla presenza di un ostacolo, un restringimento della carreggiata o dei lavori in corso.

⁵⁴ Cartello usato in ambito stradale dagli addetti alla segnalazione per dirigere i flussi veicolari. Quando l'operatore mostra ai conducenti questo segnale, ordina l'arresto del veicolo. Viene usato per interrompere il flusso del traffico, ad esempio quando è necessario dare la precedenza ai veicoli che provengono dall'altra direzione in una strada a senso unico alternato.

Nel grafico 58, estratto dal report analizzato, è possibile osservare l'andamento della velocità in funzione della distanza, registrato durante i sei passaggi attraverso la traiettoria H.

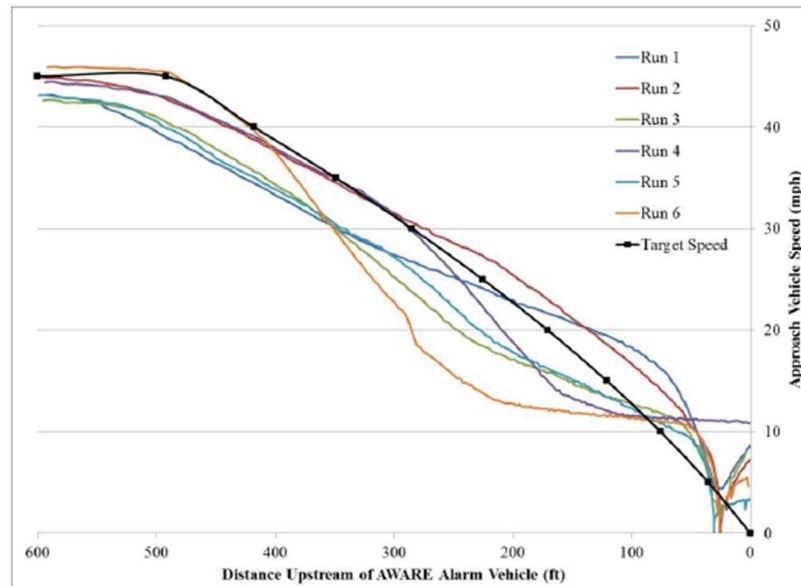


Figure 25. Test Runs versus Conservative SSD Threshold for Trajectory H.

Grafico 58_Risultati delle prove condotte nella configurazione di prova relativa alla Traiettoria H _ andamento delle velocità di marcia del veicolo di prova

Consultando il grafico, emerge chiaramente che non in tutti i sei passaggi il conducente è riuscito ad avvicinarsi all'AWARE Sentry mantenendo costantemente una velocità inferiore a quella target. Sebbene l'obiettivo principale della prova non sia stato pienamente raggiunto, il team di ricercatori si è dichiarato comunque soddisfatto della risposta del dispositivo, poiché in tutti i passaggi in cui la velocità del veicolo di prova ha superato quella prevista, l'AWARE SENTRY ha reagito correttamente attivando l'allarme del sistema.

Per quanto riguarda invece i test relativi alle traiettorie I e J, l'obiettivo era valutare la capacità del sistema di identificare le intrusioni di veicoli che non rispettavano la coda dei mezzi fermi al segnale di stop. In entrambi i casi, schematizzati in figura 93, il dispositivo ha rilevato correttamente ogni mezzo che ignorava il segnale di stop e superava la colonna, dimostrando la sua efficacia anche nel rilevamento di veicoli coperti da altri già fermi in coda.

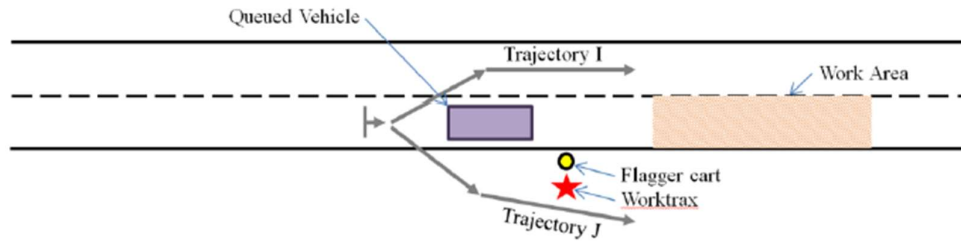


Figura 93_Configurazione di prova per il dispositivo AWARE in modalità Sentry_ Traiettorie I e J

Nelle tabelle sottostanti (tabella 28 e 29) sono sintetizzati i risultati di tutte le prove condotte sul sistema AWARE nelle due configurazioni proposte (Sentry e individuazione di intrusioni). Durante questi test, il dispositivo ha registrato un tasso di successo del 100% in tutti gli scenari e le traiettorie analizzate dal gruppo di ricerca. Per quanto riguarda il dispositivo di allarme personale, Worktrax, esso ha ottenuto un tasso di successo del 97%. I ricercatori hanno determinato che i casi in cui tale dispositivo non ha funzionato come previsto, ad esempio non attivando l'allarme, sono stati dovuti a carenze nell'efficacia della comunicazione tra il sistema AWARE e il Worktrax. In sostanza, il dispositivo si trovava a distanze superiori al range di trasmissione del segnale, quindi fuori dall'area di comunicazione prevista.

Trajectory	Number of Runs Performed	# of Runs with Correct AWARE Response	Percent Correct
<i>Tangent Lane Closures</i>			
A	2 vehicles x 2 speeds x 4 AWARE vehicle orientations x 3 runs = 48	48	100
B	"	48	100
C	"	48	100
D	1 vehicle x 1 speed x 4 AWARE vehicle orientations x 3 runs = 12	12	100
E	2 vehicles x 2 speeds x 4 AWARE vehicle orientations x 3 runs = 48	48	100
<i>Curved Lane Closures</i>			
A	1 vehicle x 1 speed x 2 curves x 2 AWARE vehicle orientations x 3 runs = 12	12	100
B	"	12	100
C	"	12	100
E	"	12	100
<i>Flagging Operations</i>			
F	1 vehicle x 1 speed x 1paddle condition x 3 runs = 3	3	100
G	"	3	100
H	1 vehicle x 1 speed x 1 paddle condition x 6 runs = 6	6	100
I	1 vehicle x 1 speed x 1paddle condition x 3 runs = 3	3	100
J	"	3	100
K	"	3	100
Totals	273	273	100

Tabella 28_Risultati di attivazione dei dispositivi di allarme durante i test condotti sul sistema AWARE

Trajectory	Number of Potential Worktrax Responses	# of Runs with Correct Worktrax Responses	Percent Correct
<i>Tangent Lane Closures</i>			
C	3 device locations x 48 runs – 15 data collection equipment malfunctions = 129	129	100
E	0 ft location x 48 runs = 48	48	100
	300 ft location x 48 runs – 3 data collection equipment malfunctions = 45	45	100
	400 ft location x 48 runs – 6 data collection equipment malfunctions = 42	31	74
<i>Curved Lane Closures</i>			
C	3 device locations x 12 runs = 36	36	100
E	0 ft location x 12 runs = 12	12	100
<i>Flagging Operations</i>			
F	1 location x 3 runs = 3	3	100
G	"	3	100
H	1 location x 6 runs = 6	6	100
Totals	324	313	97

Tabella 29_ Risultati di attivazione del dispositivo di allarme portatile WORKTRAX durante i test effettuati sul sistema AWARE

Nel report del 2021, a differenza di quello del 2017, i ricercatori hanno intrapreso una doppia fase di analisi. Inizialmente, come era stato fatto per il sistema WAS e l’Intellicone, hanno esaminato le caratteristiche funzionali del dispositivo, inclusi la durata dell’allarme, il livello sonoro e il range di trasmissione del segnale, mentre la seconda analisi si è concentrata solo sulle prestazioni del dispositivo nella configurazione AWARE Sentry. Questa differenza rispetto al report del 2017 è legata al fatto che nel 2017, il dispositivo AWARE era ancora in fase preliminare di sviluppo, e quindi l’attenzione è stata rivolta alla valutazione del sistema nell’individuare intrusioni. Con lo sviluppo tecnologico del sistema AWARE, nel report del 2021 è stato possibile estendere i test anche agli aspetti funzionali, come l’allarme e la trasmissione del segnale.

I ricercatori hanno inizialmente analizzato la durata e l’intensità dell’allarme sonoro del dispositivo AWARE ed è emerso che la durata media dell’allarme è di 5 secondi, con una modesta variabilità, come indicato nella tabella 30.

WZIA technology	Mean duration (seconds)	Std. Dev. (seconds)
Intellicone	20	0.59
AWARE	5	0.62
WAS	4.7	0.22

Note: Number of observations=84

Tabella 30_ Durata media e deviazione standard dell’allarme sonoro dei dispositivi Intellicone, AWARE e WAS

La modesta variabilità è attribuibile al fatto che, essendo il sistema AWARE, come il WAS e l'Intellicone, un dispositivo elettronico, la durata dell'allarme risulta più costante e meno soggetta a variazioni rispetto a dispositivi come per esempio il SonoBlaster.

Per quanto riguarda invece l'intensità dell'allarme dell'AWARE, analogamente a quanto visto per gli altri dispositivi, è stata valutata l'intensità media dell'allarme in funzione della distanza tra il fonometro, ovvero l'apparecchio usato per eseguire la prova, e il dispositivo stesso. Analizzando il grafico 47 è possibile osservare proprio l'andamento del livello sonoro medio dell'allarme del sistema AWARE in funzione della distanza. Il dispositivo presenta un'intensità media di circa 110 dB a una distanza di 0 piedi (0 m), che diminuisce fino a stabilizzarsi attorno ai 90 dB a una distanza di 300 piedi (91,4 m).

Un ulteriore aspetto esaminato dal team di ricerca ha riguardato l'effetto dell'orientazione del dispositivo sulla percezione dell'allarme. Come per il WAS, anche l'AWARE è dotato di un altoparlante posizionato su un solo lato del dispositivo (figura 80), il che determina una direzione privilegiata per la percezione dell'allarme (in questo caso, sud) e una direzione meno efficace (nord), come illustrato nel grafico 59 riportato di seguito, nel quale sono indicati i livelli medi dell'intensità sonora dell'allarme dell'AWARE in funzione delle distanze e valutati nelle quattro direzioni cardinali.

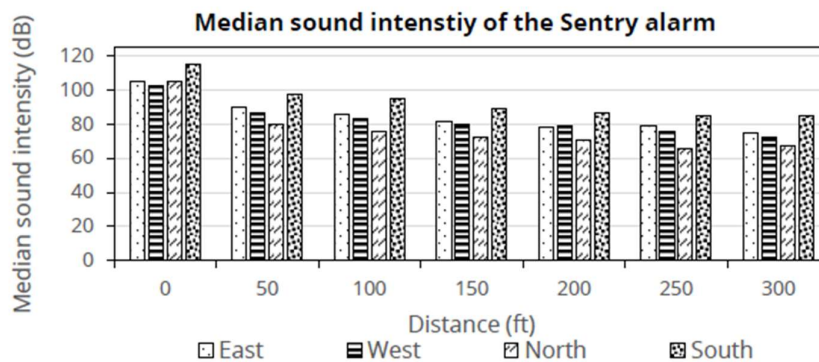


Grafico 59_Valutazione dell'intensità sonora media dell'allarme del dispositivo AWARE, in funzione della distanza e della direzione

È stata inoltre valutata per l'AWARE l'influenza di fonti di disturbo, come utensili o mezzi d'opera rumorosi, sulla percezione dell'allarme sonoro del dispositivo. Analogamente agli altri dispositivi, sono stati considerati due scenari: il primo con il lavoratore (il fonometro) posizionato tra l'allarme e la fonte di rumore (figura 83), e il secondo con l'allarme situato tra il lavoratore e la fonte di rumore (figura 84). Per entrambi gli scenari, il sistema AWARE ha mantenuto un livello sonoro dell'allarme superiore rispetto a quello della fonte di rumore, come rappresentato nei grafici 52 e 53, che illustrano i risultati delle prove condotte in ciascuno scenario.

Come ultimo aspetto, sono state valutate le prestazioni del dispositivo attraverso una serie di prove simulate di intrusioni in aree di cantiere fittizie, con l'obiettivo di valutare l'affidabilità e la frequenza di possibili falsi allarmi. A tal fine, sono stati analizzati tre scenari rappresentativi che il dispositivo in configurazione AWARE Sentry potrebbe incontrare in una situazione reale di cantiere. Di seguito si presentano gli schemi, le indicazioni e i risultati principali di tale analisi.

1): Il veicolo sorpassa i veicoli fermi in attesa.

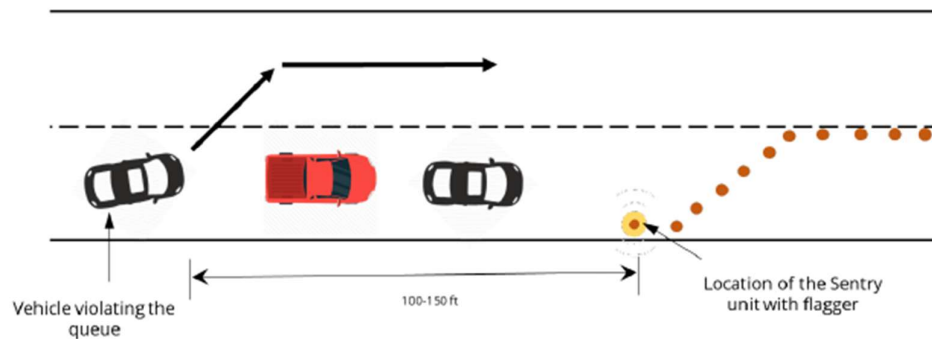


Figura 94_Prima configurazione di prova per la determinazione del tasso di attivazione dell'allarme del sistema AWARE

La figura 94 illustra la prima configurazione di cantiere testata durante l'analisi. In questo scenario, il veicolo target doveva sorpassare la fila di veicoli fermi, mentre il dispositivo AWARE Sentry, situato a sinistra del veicolo target, era in modalità di stop. I risultati delle prove condotte in questa configurazione sono riportati nella tabella seguente (tabella 31).

Sentry to vehicle distance (ft)	Speed limit on the Sentry (mph)	Speed of test vehicle (mph)	Sentry alarm	Worktrax alarm	Comments
100	15	10	0%	0%	No alarms on all three trials
		20	100%	100%	Alarms on all three trials
	20	15	0%	0%	No alarms on all three trials
		25	100%	100%	Alarms on all three trials
150	15	10	0%	0%	No alarms on all three trials
		20	100%	100%	Alarms on all three trials
	20	15	0%	0%	No alarms on all three trials
		25	100%	100%	Alarms on all three trials

Tabella 31_Risultati dell'attivazione dell'allarme dell'AWARE SENTRY e del dispositivo WORKTRAX durante i test condotti nello scenario 1

In questa configurazione, è significativo notare che il dispositivo e il Worktrax hanno ottenuto un tasso di successo del 100%. In particolare, il sistema ha rilevato correttamente il veicolo target quando questo sorpassava la colonna di autovetture in attesa a una velocità superiore alla soglia limite. Allo stesso modo, il rilevamento non è stato attivato quando il veicolo viaggiava a una velocità inferiore alla soglia impostata, confermando così il successo del sistema anche in tale circostanza.

2): veicolo che sopraggiunge a velocità elevata.

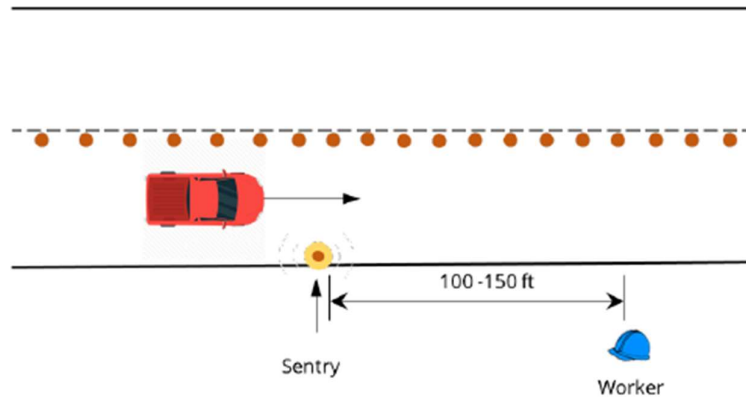


Figura 95_Seconda configurazione di prova per la determinazione del tasso di attivazione dell'allarme del sistema AWARE

Nella configurazione di prova illustrata in figura 95, è stata simulata un'intrusione frontale nell'area di cantiere. Durante questa prova, il veicolo è stato fatto passare più volte a diverse velocità di avvicinamento, tutte superiori alla soglia impostata di 10 mph (16 km/h). Come riportato nella tabella 32, il dispositivo ha nuovamente ottenuto un tasso di individuazione del 100% per tutte le velocità di marcia del veicolo target.

Sentry to worker distance (ft)	Speed (mph)	Alert on Sentry	Alert on Worktrax	Comments
100	30	100%	100%	Alarms on all three trials
	45	100%	100%	Alarms on all three trials
	60	100%	100%	Alarms on all three trials
150	30	100%	100%	Alarms on all three trials
	45	100%	100%	Alarms on all three trials
	60	100%	100%	Alarms on all three trials

Tabella 32_Risultati dell'attivazione dell'allarme dell'AWARE SENTRY e del dispositivo WORKTRAX durante i test condotti nello scenario 2

3): Veicolo che cambia corsia e si sposta sulla corsia di cantiere.

Lo scopo di questo scenario era verificare la capacità del dispositivo di rilevare intrusioni e cambi di corsia repentini.

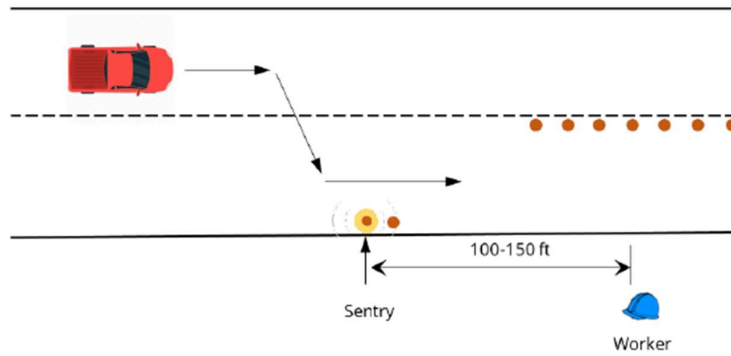


Figura 96_Terza configurazione di prova per la determinazione del tasso di attivazione dell'allarme del sistema AWARE

Analogamente alle due casistiche precedenti, anche in quest'ultima il sistema AWARE Sentry ha ottenuto un tasso di successo del 100%, identificando correttamente tutte le intrusioni del veicolo target, indipendentemente dalla velocità di marcia.

Sentry to worker distance (ft)	Speed (mph)	Alarm on Sentry	Alarm on Worktrax	Comments
100	30	100%	100%	Alert on all three trials
	45	100%	100%	Alert on all three trials
	60	100%	100%	Alert on all three trials
150	30	100%	100%	Alert on all three trials
	45	100%	100%	Alert on all three trials
	60	100%	100%	Alert on all three trials

Tabella 33_Risultati dell'attivazione dell'allarme dell'AWARE SENTRY e del dispositivo WORKTRAX durante i test condotti nello scenario 3

Come ultimo parametro analizzato, anziché esaminare il tempo di reazione, è stata considerata la distanza di individuazione dell'intrusione (Detection Range). Questa misura è stata utilizzata per valutare se la distanza a cui il dispositivo AWARE rileva le intrusioni fosse comparabile con la distanza teorica, come precedentemente discussa nella sezione dedicata alla tecnologia del dispositivo.

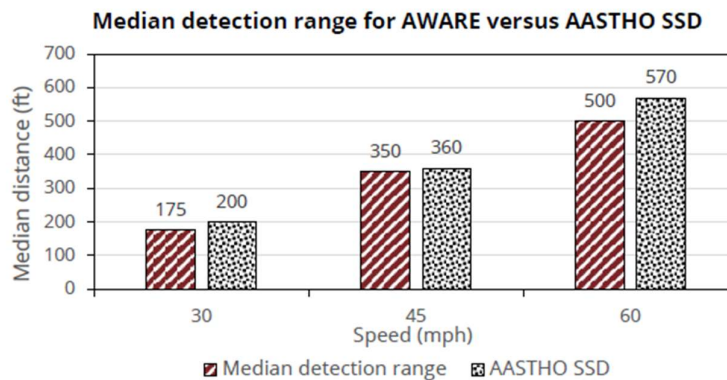


Grafico 60_Distanza media di individuazione del sistema AWARE in relazione alla distanza di arresto (teorica) AASTHO

La distanza di individuazione reale del sistema AWARE si è rivelata pienamente conforme alla distanza teorica SSD AASHTO, calcolata per un tempo di $t=2.5$ secondi, come riportato sul grafico 60, confermando così l'accurata implementazione del sistema.

GUARDIAN CONE:

Anche per questo dispositivo, l'unica fonte disponibile, oltre alle schede tecniche del produttore, è rappresentata dal report PILOT TESTING OF WORK ZONE INTRUSION ALARMS_FINAL REPORT (2023) (33), poiché esso è stato introdotto sul mercato solo di recente. Ciò implica che le informazioni fornite nel report non sono esaustive perché i ricercatori avevano già iniziato a redigere il report e avevano completato le prove di campo sugli altri dispositivi al momento del lancio di questo nuovo modello.

Per valutare le caratteristiche del dispositivo i ricercatori hanno quindi condotto un test dedicato su una strada poco trafficata con un limite di velocità fissato a 25 mph (40km/h) all'interno di un campus universitario per valutare le caratteristiche del dispositivo. Sono state eseguite tre serie di prove: una in condizioni normali e due in condizioni particolari. In ciascuna serie, il dispositivo, montato su un cono standard a bordo strada, è stato testato con soglie di rilevamento della velocità impostate a 15, 25, 30 e 35 mph (24; 40; 48 e 56 km/h). Per ogni soglia, è stata verificata l'efficacia del dispositivo a diverse distanze, ovvero 200, 330 e 380 piedi (60,96; 100,58; 115,82m) dal sensore. In totale, sono state quindi effettuate 36 prove (4 soglie \times 3 serie \times 3 distanze). In tutte le prove condotte in condizioni normali, il dispositivo ha correttamente rilevato la presenza del veicolo.

Per quanto riguarda invece le due condizioni "particolari", esse consistevano nella:

- Valutazione delle possibili interferenze del segnale tra il sensore e il ricevitore causate dalla presenza di oggetti metallici nelle vicinanze del dispositivo;
- Valutazione dell'efficacia della trasmissione del segnale in condizioni di visibilità non ottimale (traiettoria ostruita) tra il sensore e il ricevitore;

Nel primo caso il dispositivo è stato collocato accanto ad una ringhiera di acciaio, la quale non ha influito sulla qualità del segnale, mentre ha registrato delle perdite di segnale (tra sensore e dispositivo di allarme) e due FALSE POSITIVE quando la prova è stata condotta con il sensore senza una linea libera di individuazione causata dalla presenza di alberi sulla traiettoria.

In questi test preliminari il dispositivo ha mostrato una buona affidabilità, ma è importante ricordare che è stato concepito per essere collocato su strade con un passaggio sporadico di veicoli e per situazioni in cui l'operatore lavora da solo o in piccoli gruppi. Infatti, come riportato nel paragrafo precedente sulla parte descrittiva del Guardian Cone, ogni passaggio di veicolo attiva su questo dispositivo una vibrazione e, a seconda della velocità registrata rispetto alla soglia impostata gli fa emettere un segnale acustico con intensità variabile che è gestibile su strade poco trafficate, ma diventa potenzialmente pericoloso su strade con un traffico più intenso, poiché la continua ripetizione dell'allarme potrebbe portare l'operatore a ignorarlo.



Figura 97_Installazione del dispositivo Guardian Cone per le prove in condizioni controllate

ALPHA SAFENET PORTABLE OVERWATCH DEVICE:

È stato possibile reperire delle informazioni sul funzionamento dell'Alpha SafeNet Portable Overwatch Device soltanto dal report PILOT TESTING OF WORK ZONE INTRUSION ALARMS_FINAL REPORT (2023) (33), perché il dispositivo è stato appena lanciato sul mercato e non sono disponibili altre informazioni.

Per questo dispositivo il team di ricercatori ha eseguito due prove su una strada a due corsie per testare l'affidabilità del sistema per l'individuazione dei veicoli erranti. Il primo dei due test consisteva nell'orientare il dispositivo in maniera tale da individuare tutti i veicoli che transitavano sulla corsia opposta rispetto a dove esso era collocato, mentre nella seconda configurazione si

ruotava di 180 gradi il dispositivo per individuare i veicoli in transito sulla stessa corsia del dispositivo. Nella prima configurazione, la distanza di taratura dello strumento (fascio laser) era stata impostata a 312 piedi (95 m), mentre nel secondo caso a 321 piedi (97,8 m). In entrambi i casi il dispositivo è stato in grado di individuare tutti i veicoli di passaggio. Durante le prove è anche stato testato con successo il range di trasmissione del segnale dal dispositivo (laser) al sistema di allarme mobile (AHU), il quale, anche senza una “traiettoria” (linea) libera di comunicazione, ha sempre comunicato correttamente fino ad una distanza di 332 piedi (101,2 m).

Si evidenziano inoltre le seguenti caratteristiche:

- Durata dell’allarme: l’allarme del sistema funziona come un interruttore ON-OFF, ovvero l’allarme suona fino a che un veicolo è all’interno del fascio laser. Ciò implica che tale durata vari di volta in volta, in base al tempo che il veicolo errante impiega ad attraversare il fascio laser e quindi la sua velocità gioca un ruolo molto importante;
- Precisione nell’impostazione dell’allarme: quando si effettua il settaggio del fascio laser occorre considerare che anche piccoli spostamenti del dispositivo possono causare grandi deviazioni del laser rispetto al target di riferimento. Tuttavia, tale aspetto dovrebbe però essere superato nel momento in cui il dispositivo viene montato su veicoli di servizio, in quanto ciò dovrebbe incrementare la stabilità del sistema e di conseguenza l’affidabilità dell’individuazione dei veicoli.



Figura 98_Installazione del dispositivo Alpha SafeNet Portable Overwatch Device per le prove in condizioni controllate

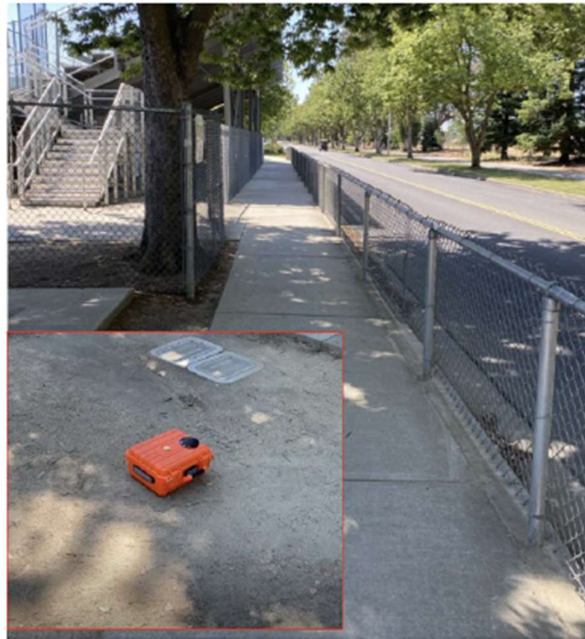


Figura 99_Installazione dell'accessorio Overwatch Auxiliary Horn Unit (AHU)

WIRELESS SENSOR NETWORK:

Per acquisire informazioni su questo dispositivo sono stati consultati documenti tecnici e report specifici. Trattandosi di una tecnologia in fase embrionale, le informazioni necessarie per comprenderne il funzionamento e valutarne l'efficacia sono state ricavate interamente dal report intitolato "A WSN-Based Intrusion Alarm System to Improve Safety in Road Work Zones" (36), redatto nel 2016 dagli stessi ideatori del prototipo presso l'Università Politecnica di Madrid.

Il team di ricercatori ha eseguito test su strade chiuse e in condizioni controllate, simulando scenari di cantiere fissi di breve durata utilizzando coni di delimitazione per delimitare un'area di modeste dimensioni. Il dispositivo è stato sottoposto a due serie di prove, di cui la prima si è concentrata su tre parametri, considerati come possibili fattori che possono influenzare il suo comportamento nell'individuazione delle intrusioni. Questi parametri, rappresentati in figura 100, sono:

- la distanza dal veicolo target;
- la velocità del veicolo target;
- l'angolo di inclinazione del segnale.

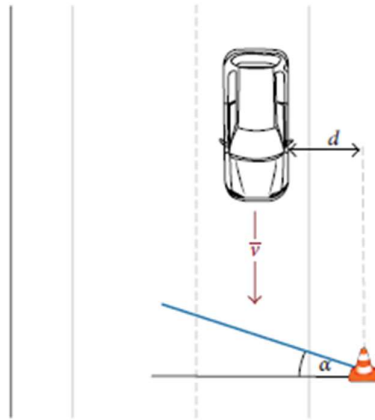


Figura 100_Parametri che influenzano l'individuazione dei veicoli

La seconda serie di prove, invece, si è concentrata su aspetti che potrebbero influenzare il corretto funzionamento del dispositivo, quali:

- la latenza di trasmissione del segnale;
- i falsi allarmi;
- la valutazione dell'individuazione delle intrusioni tramite gli accelerometri situati all'interno del dispositivo, conducendo quindi test di impatto di un veicolo contro il dispositivo.

Di seguito si riportano nel dettaglio i procedimenti e i risultati dei test condotti sul Wireless Sensor Network (WSN).

Nella prima prova, è stata valutata l'influenza della velocità sulla capacità del dispositivo di identificare il veicolo target. Come riportato nella tabella 34 estrapolata dal report di riferimento (36), il dispositivo è stato posizionato a una distanza fissa di 3 metri dalla traiettoria del veicolo, con il flusso del segnale orientato perpendicolarmente alla direzione di marcia. Il veicolo è stato fatto transitare a velocità variabili, dai 30 km/h (18,6 mph) fino ai 90 km/h (55,9 mph), e per ciascuna velocità sono state effettuate 10 ripetizioni del test.

Distance from vehicle (d)	3 m
Angle (α)	0°
Ambient temperature	18°C
Tested speeds (\bar{v})	30 km/h, 50 km/h, 70 km/h, 90 km/h
Repetitions (at each speed)	10
Results	Vehicle detected on all runs

Tabella 34_Condizioni di prova della prima serie di test _ prove condotte con velocità diverse

Il dispositivo ha rilevato correttamente tutti i passaggi del veicolo target, portando i ricercatori a concludere che la velocità di marcia del veicolo errante non influisce sulla capacità di individuazione del dispositivo.

Nella seconda prova è stata valutata l'influenza dell'inclinazione del fascio di onde e della traiettoria del veicolo. Questo test riveste particolare importanza poiché, in condizioni reali di cantiere, un veicolo errante può introdursi nell'area di lavoro non solo frontalmente, ma anche lateralmente. Pertanto, la valutazione dell'incidenza della traiettoria del veicolo rispetto al dispositivo costituisce un aspetto cruciale da considerare.

Consultando la tabella 35, è possibile osservare le condizioni di prova. Il dispositivo è stato mantenuto a una distanza costante di 3 metri rispetto al veicolo target che si muove ad una velocità costante di 60 km/h (37,3 mph). In questo test, il parametro variabile è stato l'inclinazione del fascio di microonde, considerata in cinque direzioni: perpendicolare alla direzione di marcia del veicolo e con angolazioni di $\pm 60^\circ$ e $\pm 30^\circ$. Per ciascuna inclinazione sono state poi eseguite 10 ripetizioni del test.

Vehicle speed (\bar{v})	60 km/h
Distance from vehicle (d)	3 m
Ambient temperature	18°C
Tested angles (α)	$-60^\circ, -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$
Repetitions (at each angle)	10
Results	Vehicle detected on all runs

Tabella 35_Condizioni di prova della seconda serie di test _ prove condotte con angoli di incidenza diverse

Anche in questo caso, come nella prima serie di prove, il dispositivo ha individuato correttamente tutti i passaggi del veicolo target. Si è quindi concluso che l'incidenza della traiettoria del veicolo errante rispetto al fascio di onde del dispositivo non compromette la capacità dello stesso di rilevare i veicoli target.

Nella terza prova è stata esaminata l'influenza della distanza tra il sensore e il veicolo target. In questa fase, il mezzo errante è stato fatto procedere a una velocità costante di 60 km/h (37,3 mph), con il fascio del segnale orientato perpendicolarmente alla sua traiettoria. A differenza delle prove precedenti, il dispositivo è stato posizionato a distanze variabili rispetto al mezzo (1 m, 3 m, 5 m, 7 m), e per ciascuna di queste configurazioni sono state eseguite 10 ripetizioni del test. La tabella 36 riporta sinteticamente le condizioni di prova.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

Vehicle speed (\bar{v})	60 km/h
Angle (α)	0°
Ambient temperature	18°C
Tested distances (d)	1 m, 3 m, 5 m, 7 m
Repetitions (at each distance)	10
Results	Vehicle detected on all runs except for 2 times on 7 m test

Tabella 36_Condizioni di prova della terza serie di test _ prove condotte con distanze diverse tra veicolo e sensore

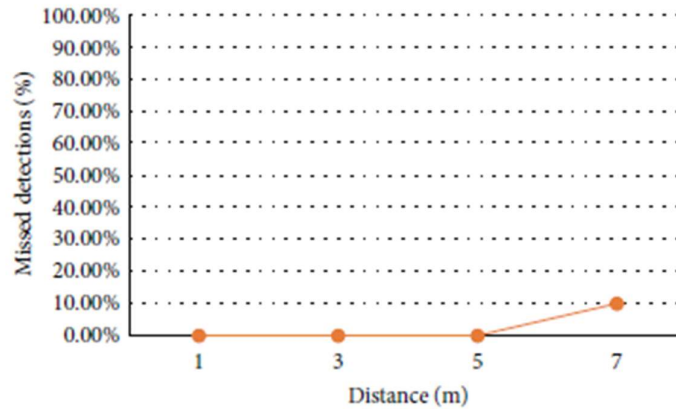


Grafico 61_Percentuale di intrusioni non rilevate in funzione della distanza laterale tra il sensore e il veicolo errante

A differenza dei risultati ottenuti nelle prime due prove, è emerso che la distanza tra il sensore e il veicolo target influisce significativamente sulla capacità di rilevamento del dispositivo. Analizzando il grafico 61 estrapolato dal report, si osserva che per distanze pari o inferiori a 5 metri tra il sistema di rilevamento (WSN) e il mezzo in movimento, il sensore ha ottenuto un tasso di rilevamento del 100%. Tuttavia, per distanze superiori, come nel caso di 7 metri, si è riscontrato un degrado delle prestazioni: su 10 passaggi, il sistema è stato in grado di rilevare correttamente il veicolo target solo 9 volte. Questo calo delle prestazioni è stato attribuito al breve tempo in cui il veicolo si trova di fronte alla zona di rilevamento del sensore, aggravato dalla maggiore distanza, che provoca un segnale di ritorno di intensità inferiore. Tale segnale di ritorno, essendo più debole, potrebbe non essere rilevato correttamente dal ricevitore, causando una mancata individuazione del veicolo.

Alla luce di questi risultati, si deduce che, per garantire una rilevazione ottimale al 100% dei veicoli erranti in un'area di cantiere, sarebbe necessario disporre un dispositivo ogni 5 metri lungo il perimetro del cantiere.

Per quanto riguarda la seconda serie di test condotti sul sistema di rilevamento Wireless Sensor Network (WSN), di seguito si espongono i risultati ottenuti.

In merito alla misurazione della latenza del segnale di pericolo, ossia il tempo che intercorre tra il momento in cui il veicolo attraversa la barriera virtuale e quello in cui l'allarme viene attivato sui

dispositivi di avviso, questo parametro è stato oggetto di una serie di esperimenti. In ciascuna prova, dopo ogni attivazione del sistema, la distanza tra il sensore e il nodo principale del sistema è stata progressivamente aumentata. Per ogni attivazione, sono stati calcolati la media e la deviazione standard della latenza, i cui risultati sono riportati nel grafico seguente (grafico 62).

Come già evidenziato, la comunicazione tra i sensori e il nodo principale del sistema avviene in modo discontinuo e non a intervalli fissi, poiché il nodo principale interroga i sensori a intervalli di tempo variabili regolati in base a determinati fattori, come la qualità della ricezione del segnale wireless, al fine di ottimizzare la comunicazione e l'efficienza energetica. Di conseguenza, come è illustrato nel grafico 62, il valore medio della latenza degli avvisi si aggira tra 800 e 1000 millisecondi, senza mostrare variazioni significative. Tuttavia, si osserva un incremento della deviazione standard con l'aumento della distanza, indicando una maggiore variabilità nei tempi di risposta.

Esaminando il grafico successivo (grafico 63), si osserva che fino a 26 metri di distanza tra il dispositivo di avviso e il nodo sensore, tutti gli avvisi di pericolo sono stati correttamente consegnati. Tuttavia, con l'aumentare della distanza, cresce la probabilità di non ricevere un allarme, comportando un incremento del tasso di falsi allarmi, che passa dallo 0% al 10%.

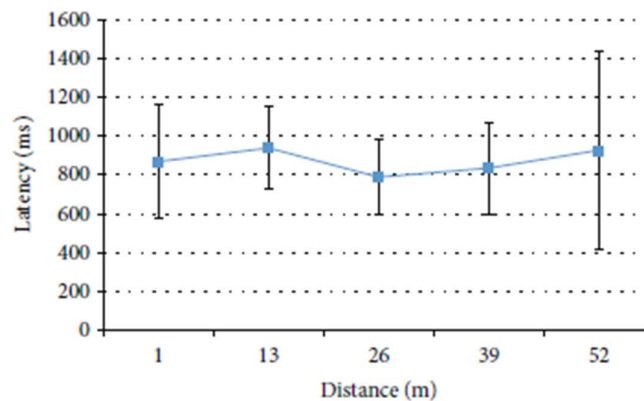


Grafico 62_ Latenza del segnale di allerta in funzione della distanza tra il nodo sensore e il nodo principale

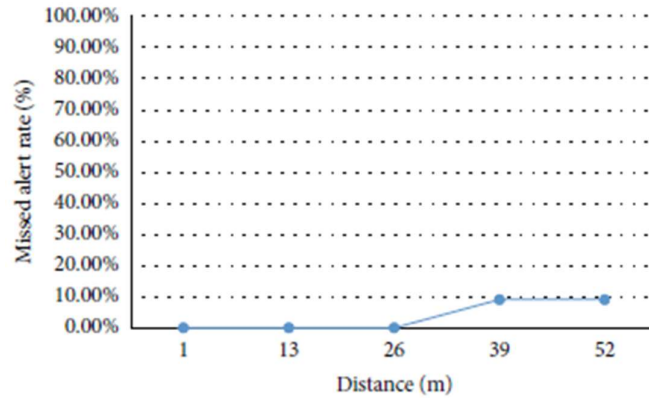


Grafico 63_Percentuale di intrusioni non rilevate in funzione della distanza tra il nodo sensore e il nodo principale

Per quanto concerne la valutazione dei falsi allarmi, il team di ricerca ha condotto dei test specifici per determinare il tasso di FALSE POSITIVE. Per tale scopo, è stata eseguita una prova in cui un nodo sensore è stato posizionato parallelamente al traffico, con il fascio di microonde orientato nella stessa direzione. Successivamente, un veicolo è stato fatto passare accanto al dispositivo per simulare il transito di un mezzo lungo il perimetro di un'area di cantiere.

La figura 101 e la tabella 37 mostrano la schematizzazione della prova e le relative condizioni sperimentali.

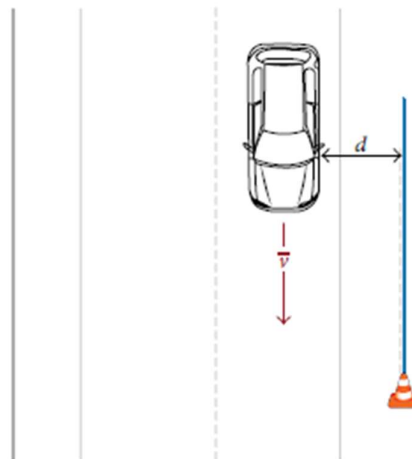


FIGURE 13: False alarm test setup.

Figura 101_Valutazione dei falsi allarmi dispositivo WSN_Schematizzazione della configurazione di prova

Test duration	15 minutes
Average vehicle speed (\bar{v})	50–60 km/h
Ambient temperature	17°C
Vehicle count	55 cars 2 buses
Distance from vehicles (d)	1–1.5 m
Results	1 false alarm triggered with an adjacent vehicle 1 false alarm triggered without an adjacent vehicle

Tabella 37_ Valutazione dei falsi allarmi dispositivo WSN_ Condizioni di prova

Nelle condizioni sperimentali stabilite, non ci si aspettava la registrazione di falsi allarmi. Tuttavia, i risultati del test hanno evidenziato due falsi allarmi su un campione di 57 veicoli, corrispondenti a un tasso di falsi positivi del 3,5%. I ricercatori hanno attribuito tali anomalie all'effetto del vento sui rilevatori ad ultrasuoni, poiché, avendo condotto il test in una giornata relativamente ventosa, è stato constatato che il vento può influenzare le letture dei sensori di distanza ad ultrasuoni generando disturbi nelle onde emesse e riflesse.

L'ultima serie di test è stata progettata per valutare l'effetto degli impatti sul nodo sensore, il quale è dotato di un accelerometro per rilevare eventuali collisioni tra il veicolo target e il dispositivo stesso, offrendo così un ulteriore mezzo di rilevamento delle intrusioni. Poiché l'esecuzione di prove in condizioni reali avrebbe comportato test distruttivi sui nodi sensori, non praticabili in questo contesto, i ricercatori hanno optato per simulazioni di laboratorio. Questi esperimenti miravano a valutare la capacità del nodo sensore di rilevare impatti moderati e ribaltamenti del cono. Durante tali prove tutti gli impatti sono stati correttamente identificati. Tuttavia, è emerso che, in alcuni casi, l'allarme è stato attivato sia dal sensore a ultrasuoni sia dall'accelerometro, fornendo una gradita ridondanza nella capacità di rilevamento degli impatti. Tale fenomeno è attribuibile al fatto che, durante la caduta, il sensore a ultrasuoni rileva il terreno più vicino rispetto alla distanza predefinita, trattando questa situazione come una normale intrusione.

In conclusione, dai risultati dei test condotti sul dispositivo emerge una soddisfazione del team di ricerca, poiché questi rappresentano un primo passo significativo verso la dimostrazione della bontà e dell'affidabilità del sistema sviluppato. Tuttavia, è fondamentale sottolineare che i risultati confermano l'efficacia e l'utilità del dispositivo in uno scenario che simula un cantiere fisso, di breve durata e di dimensioni limitate, che costituisce il contesto ideale per tale soluzione. Non sono, invece, disponibili dati relativi al comportamento del dispositivo in altre tipologie di cantieri o condizioni diverse.

CAMERA-BASED WORK ZONE INTRUSION DETECTION:

Analogamente al Wireless Sensor Network, essendo questo dispositivo un prototipo non ancora commercializzato, le informazioni disponibili sono state ottenute esclusivamente attraverso la consultazione del report specificamente dedicato, intitolato: NCDOT: WORK ZONE INTRUSION ALERT SYSTEM TECHNOLOGY TEST (report del 2022) (37).

Per valutare le reali capacità del dispositivo, i ricercatori hanno condotto una serie di test in condizioni controllate. Tali prove sono state eseguite su una strada isolata, priva di traffico, allestita appositamente per simulare un'area di cantiere. Questa area riproduceva un cantiere su una strada a due carreggiate con due corsie per senso di marcia e una corsia chiusa. Le simulazioni hanno previsto l'intrusione di un veicolo guidato da un ricercatore, al fine di valutare le prestazioni del dispositivo in diverse condizioni e con parametri variabili.



Figura 102_ Immagine tratta dai test pilota condotti sul dispositivo Camera-Based WZ

Le intrusioni sono state effettuate a diverse velocità, comprese tra 35 mph (56,3 km/h) e 75 mph (120 km/h), e a varie distanze rispetto alla posizione del dispositivo. Tali simulazioni hanno permesso di misurare il tempo di individuazione del veicolo intruso da parte del dispositivo. I dati ottenuti sono stati riportati nella tabella 38 e rappresentati nel grafico 64.

Osservando i dati riportati nella suddetta tabella, si può notare che per distanze inferiori a 60 metri tra il punto di intrusione e il dispositivo, il tempo di rilevamento è generalmente inferiore a un secondo. Tuttavia, per distanze superiori, si osserva una perdita di stabilità nei tempi di risposta, con un incremento dei ritardi.

Distance to Intrusion Point (m)	Detection Delay (msec)
30.43	390
41	320
44.4	460
58.33	320
58.33	580
63.63	660
68.18	1020
81.8	1040
100	1100
100	1040
150	1430
150	2680
150	3010

Tabella 38_ Dispositivo Camera-Based WZ_ Valutazione dei delay nell'individuazione dei veicoli erranti in funzione della distanza

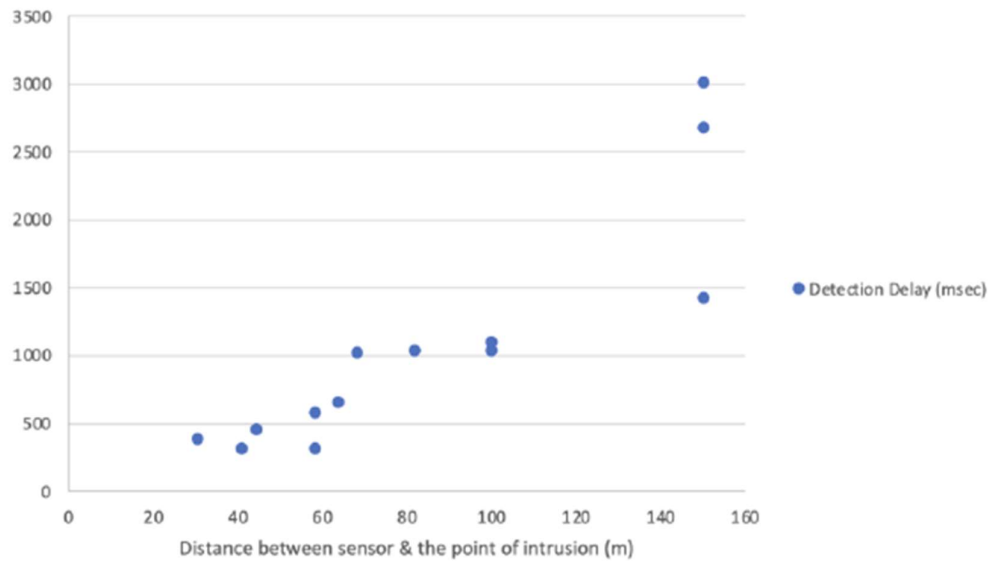


Grafico 64_ Dispositivo Camera-Based WZ_ Valutazione dei delay nell'individuazione dei veicoli erranti in funzione della distanza

L'analisi ha inoltre evidenziato che l'algoritmo di identificazione non è in grado di riconoscere i veicoli a meno che questi non occupino circa il 30% della lunghezza verticale dell'inquadratura. Per garantire una corretta individuazione, quindi, è necessario applicare uno zoom digitale e/o ottico per superare questa limitazione.

Un'altra problematica emersa durante le prove riguarda i significativi tempi di attesa nella ricezione degli avvisi sui dispositivi personali, che nel caso specifico erano i telefoni cellulari dei ricercatori. Questi intervalli variavano tra 1,5 e 2,6 secondi. L'analisi del software responsabile della gestione degli avvisi ha suggerito che tali ritardi potrebbero essere ridotti attraverso miglioramenti dell'algoritmo e ottimizzazioni del codice.

Queste problematiche, tra cui i ritardi di individuazione, la necessità di zoom e i ritardi di trasmissione degli allarmi, sono dovute al fatto che il dispositivo è ancora in fase prototipale. Come evidenziato nel paragrafo precedente, il dispositivo utilizza componenti relativamente semplici, come la telecamera di uno smartphone. L'adozione di apparecchiature più performanti, come telecamere professionali e ottiche avanzate, insieme al miglioramento dell'algoritmo, potrebbe significativamente ottimizzare le prestazioni del sistema. Questo prototipo mostra notevoli potenzialità e ampi margini di miglioramento.

Al termine della campagna di prove, è stato somministrato un questionario agli 8 operatori che hanno testato il dispositivo. Ogni lavoratore ha avuto la possibilità di esprimere una preferenza sulle categorie relative al luogo, alla tipologia di cantiere e alla durata ottimale di utilizzo del dispositivo. Tali valutazioni hanno consentito di elaborare la tabella 39, riportata di seguito, che riassume il numero di preferenze assegnate a ciascun aspetto considerato.

Nature of work:		Work Setting		Duration of Work	
Roadway Pavement	5	Urban	3	Long-Term Stationary	6
Utility repair/maintenance	6	Rural	6	Intermediate-Term Stationary	4
Roadway widening/construction	5	Low speed	6	Short-Term Stationary	5
Intersection signalization	5	Intermediate speed	4	Short Duration (work that occupies a location up to 1 hour)	4
		High Speed	3	Continuously Moving Mobile Operations	4
		Low traffic volume	6	Intermittent Mobile Operations	4
		Average traffic volume	4		
		High traffic volume	3		

Tabella 39_ Risultati del sondaggio somministrato agli operatori che hanno condotto le prove in condizioni controllate sul dispositivo

Per quanto riguarda la tipologia di lavorazioni, come riportato nella prima colonna della tabella, non è emersa una preferenza specifica, analogamente a quanto osservato per la durata del cantiere in cui impiegare il dispositivo. Infatti, ad eccezione dei cantieri fissi di lunga durata, le altre categorie, quali i cantieri fissi di breve durata e i cantieri mobili, hanno ricevuto valutazioni simili. Questo suggerisce che il dispositivo sia considerato sufficientemente versatile per adattarsi a diverse tipologie e condizioni di cantiere.

I pareri degli operatori sono risultati più differenziati in relazione alla tipologia di strada su cui utilizzare il dispositivo, infatti è emersa una differenza più marcata dei risultati, e dall'analisi della tabella risulta chiaro come si ritenga che il dispositivo possa offrire prestazioni superiori su strade a bassa velocità e con flussi veicolari modesti.

4.2.2 - TEST IN CANTIERI REALI (LIVE TESTING)

Si presentano ora le considerazioni e i risultati delle prove condotte in condizioni reali di cantiere sui dispositivi analizzati nei paragrafi precedenti. Questa fase di studio riveste un'importanza cruciale poiché consente di approfondire l'analisi in corso, offrendo elementi essenziali per una valutazione completa ed esaustiva dei sistemi di individuazione delle intrusioni.

L'analisi è stata condotta esaminando sezioni specifiche dei report già utilizzati per il paragrafo precedente, focalizzati sulle prove reali effettuate in cantiere. Da tali report emergono similitudini metodologiche significative: i dispositivi venivano testati in contesti operativi per valutarne le prestazioni e le caratteristiche funzionali, al fine di confermare quanto emerso durante i test pilota in condizioni controllate. L'analisi, tuttavia, non si limitava al solo riscontro tecnico, ma includeva anche questionari somministrati agli operai che avevano testato i dispositivi, con l'obiettivo di raccogliere informazioni relative alla loro praticità di installazione e utilizzo.

Pertanto, nelle sezioni di LIVE TESTING, oltre a esaminare il funzionamento intrinseco dei dispositivi, è stato approfondito come questi fossero percepiti dai lavoratori: l'utilità percepita, l'efficacia e la facilità d'uso.

Nel dettaglio, i live testing hanno indagato cinque criteri fondamentali che sono stati riportati nei questionari compilati dai lavoratori coinvolti:

- **Facilità d'uso:** riferita all'installazione, attivazione e rimozione del dispositivo;
- **Utilità percepita:** grado di utilità riconosciuto dai lavoratori e percezione del contributo alla sicurezza sul luogo di lavoro;
- **Efficacia dell'allarme:** intesa come percezione e accuratezza del segnale di allarme;
- **Efficacia del meccanismo di attivazione:** riferito non solo al funzionamento del sistema di innesco, ma anche alle procedure per l'attivazione dell'allarme;
- **Probabilità di utilizzo in base al costo:** rilevanza del costo nella scelta e adozione del dispositivo.

Risulta interessante osservare quali di questi aspetti gli operai considerino più o meno rilevanti nella scelta di un dispositivo per l'individuazione delle intrusioni. A tal proposito, nel report del 2017 (27) è presente un grafico (grafico 65) che rappresenta chiaramente questo aspetto, riportando la media dei voti assegnati dagli operatori che hanno testato i dispositivi, al momento della stesura del report, a ciascuno dei criteri elencati.

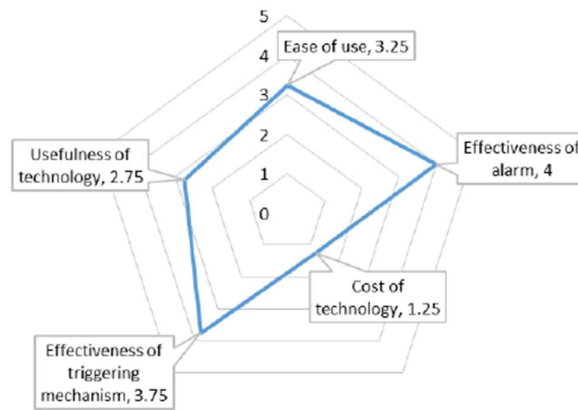


Grafico 65_Valore medio delle votazioni degli operai per ogni criterio indagato nei live testing

Osservando il grafico 65, emerge chiaramente che il criterio con la valutazione più bassa è quello relativo al costo della tecnologia. Tale risultato riflette la filosofia alla base della sicurezza, secondo cui la tutela della vita e la prevenzione degli incidenti costituiscono obiettivi imprescindibili, non riducibili a considerazioni di natura economica. Al contrario, il punteggio più alto è stato assegnato all'efficacia dell'allarme, indicata dagli operai come il fattore prioritario nella scelta del dispositivo da adottare. Questo è comprensibile, poiché l'efficacia dell'allarme è fondamentale nella concezione dei dispositivi di individuazione delle intrusioni in quanto la loro funzione principale è quella di avvertire i lavoratori del pericolo imminente, offrendo loro il tempo necessario per mettersi in salvo. Di conseguenza, la capacità del segnale di allarme di avvisare tempestivamente gli operatori è cruciale per garantire una risposta adeguata alle situazioni di emergenza e proteggere la vita dei lavoratori sul campo. Anche l'efficacia del meccanismo di attivazione ha ottenuto una valutazione elevata, poiché un'attivazione inefficace comprometterebbe l'intero sistema di sicurezza.

Un'ulteriore caratteristica comune a tutti i report analizzati è l'uso sistematico di telecamere durante le prove condotte in condizioni reali di cantiere. Questi dispositivi sono stati impiegati per riprendere ogni fase del lavoro, permettendo di ottenere documentazione video essenziale per valutare i tempi di reazione dei lavoratori quando il dispositivo veniva attivato. Questa procedura ha fornito un ulteriore strumento di analisi, integrando i dati raccolti e permettendo una valutazione più completa e rigorosa del funzionamento dei dispositivi in contesti operativi reali.

Si procede ora con l'esposizione delle informazioni più rilevanti tratte dall'analisi dei risultati delle prove sui dispositivi di individuazione in condizioni reali di cantiere. A tale scopo, si riporta nella tabella seguente una panoramica generale delle lavorazioni, delle condizioni di prova, dei dispositivi e dei risultati ottenuti durante le prove in cantiere.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

REPORT	TIPOLOGIA DI LAVORAZIONE	TIPOLOGIA DI STRADA	TIPOLOGIA DI CANTIERE	ORARIO DELLE LAVORAZIONI	DISPOSITIVI TESTATI	ATTIVAZIONE DEL DISPOSITIVO	PRESENZA DI MEZZI PESANTI (RUMOROSI)
ODOT_WORK ZONE INTRUSION ALERT TECHNOLOGIES: ASSESSMENT AND PRACTICAL GUIDANCE (2017) (27)	Rifacimento della superficie stradale; Sostituzione delle barriere permanenti; Riparazione dei giunti di dilatazione	strada a una carreggiata con una corsia per senso di marcia	Mobile, lento avanzamento; chiusura di una corsia di marcia	Notturmo	SonoBlaster, WAS e Intellicone	Nessun falso allarme registrato durante le prove; Attivazione intenzionale dell'allarme per condurre test aggiuntivi	Fresatrice stradale; Vibrofinitrice; Rullo compattatore
	Rifacimento della superficie stradale della banchina e delle corsie di marcia	Strada a due carreggiate con due corsie per senso di marcia (Superstrada)	Mobile, lento avanzamento; chiusura di una corsia di marcia				Fresatrice stradale; Vibrofinitrice; Rullo compattatore
	Rifacimento della superficie stradale	Strada a due carreggiate con due corsie per senso di marcia (Autostrada)	Mobile, lento avanzamento; chiusura di una corsia di marcia				Fresatrice stradale; Vibrofinitrice; Rullo compattatore
TDOT_WORK ZONE ALERT SYSTEMS (2021) (32)	Manutenzioni e riparazioni varie su un ponte	Strada ad una carreggiata con una corsia per senso di marcia	Fisso; Chiusura di una corsia	Giornaliero	AWARE Sentry	Attivazioni non volontarie, ma nessun falso allarme; Attivazione corretta	-
	Rifacimento del manto stradale	Strada a due carreggiate con due corsie per senso di marcia (Autostrada)	Mobile; Chiusura di una corsia alla volta		Intellicone	Attivazione accidentale dell'allarme (FALSE POSITIVE)	Pale caricatori; Camion; Rullo compattatore
	Riparazione delle rampe di accesso al marciapiede	Strada urbana	Fisso		Intellicone e WAS	Attivazione intenzionale dell'allarme;	Escavatore con martellone e pinza idraulica; Generatore di corrente
	Rifacimento del manto stradale	Strada ad una carreggiata con due corsie per senso di marcia	Mobile; Chiusura di una corsia		Intellicone	Attivazione accidentale dell'allarme (FALSE POSITIVE)	Vibrofinitrice; Rullo compattatore
	Riparazione del cordolo di calcestruzzo di un marciapiede	Strada urbana in corrispondenza di uno svincolo	Fisso; Chiusura della corsia di svolta a destra		Intellicone e WAS	Attivazione intenzionale dell'allarme	Camion betoniera
CDOT_FINAL TESTING OF WORK ZONE INTRUSION ALARMS (2023) (33)	Riparazione e sostituzione della recinzione a bordo strada	Strada a due carreggiate con cinque corsie per senso di marcia (Autostrada)	Fisso; Chiusura della corsia di emergenza	Giornaliero	WAS e Intellicone	Attivazione accidentale dell'allarme (FALSE POSITIVE)	Minipala cingolata
	Riparazione e sostituzione della recinzione a bordo strada	Strada a due carreggiate con tre corsie per senso di marcia (Autostrada)	Fisso; Chiusura della corsia di emergenza		SonoBlaster e Single Sentry Beam	Nessun falso allarme registrato; Attivazione intenzionale dei dispositivi per test	Camion Gru Mezzi di supporto alle lavorazioni
	Rifacimento del manto stradale	Strada a una carreggiata con due corsie per senso di marcia (Strada extraurbana)	Fisso; Chiusura di una corsia di marcia;		AWARE Sentry	Attivazioni non volontarie, ma nessun falso allarme; Attivazione corretta	Vibrofinitrice; Rullo compattatore

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

	Risanamento del manto stradale (sigillatura di fessure)	Strada a una carreggiata con due corsie per senso di marcia (Strada extraurbana principale)	Fisso; chiusura di una corsia di marcia;		Intellicone e AWARE Sentry	Intellicone: attivazione accidentale, FALSE POSITIVE; AWARE: attivazione corretta del dispositivo, nessun falso allarme; Intellicone e AWARE: attivazione volontaria per test	-
	Risanamento del manto stradale (sigillatura di fessure)	Strada urbana in corrispondenza di uno svincolo	Fisso; chiusura della rampa di ingresso all'intersezione		SonoBlaster e Single Sentry Beam	Single Sentry Beam: FALSE POSITIVE registrati; SonoBlaster: nessun falso allarme registrato	-
	Risanamento del manto stradale (sigillatura di fessure)	Strada a due carreggiate con due corsie per senso di marcia (Autostrada)	Fisso; chiusura della rampa di accesso all'infrastruttura;		WAS	Attivazioni accidentali dell'allarme (FALSE POSITIVE)	-
NCDOT_WORK ZONE INTRUSION ALERT SYSTEM TECHNOLOGY TEST (2022) (37)	Manutenzione dell'area della banchina; potatura della vegetazione a bordo strada	Strada a due carreggiate con due corsie per senso di marcia;	Fisso; Chiusura della corsia di marcia;	Giornaliero	Camera-Based Work Zone Intrusion Detection	Attivazione accidentale del dispositivo (FALSE POSITIVE)	Mezzi di supporto alle lavorazioni
	Manutenzione dell'area della banchina; potatura della vegetazione a bordo strada	Strada a due carreggiate con due corsie per senso di marcia	Mobile; Chiusura della corsia di marcia;				
	Manutenzione dell'area della banchina; potatura della vegetazione a bordo strada	Strada a due carreggiate con due corsie per senso di marcia	Mobile; Chiusura della corsia di marcia;				

Tabella 40_ Tabella riassuntiva delle prove condotte in condizioni reali di cantiere

Di seguito si presentano le informazioni e i risultati più significativi relativi alle prove dei dispositivi di individuazione delle intrusioni, condotte in cantieri reali, come riportato nella tabella soprastante.

ODOT WORK ZONE INTRUSION ALERT TECHNOLOGIES: ASSESSMENT AND PRACTICAL GUIDANCE (2017):

In merito all'analisi riportata nel report del 2017 (27), i ricercatori hanno condotto uno studio sui dispositivi SonoBlaster, Intellicone e WAS, testandoli in tre diversi cantieri mobili con attività svolte in orario notturno. Poiché durante le sessioni di prova non si sono verificate intrusioni reali, i dispositivi sono stati attivati manualmente per valutare la capacità degli operai di percepire l'allarme. In particolare, le prove miravano a verificare il tasso di risposta dei lavoratori, ovvero se fossero in grado di rilevare correttamente il segnale acustico, visivo o aptico durante l'esecuzione delle loro mansioni. I ricercatori hanno inoltre esaminato i tempi di reazione degli operatori in risposta agli allarmi.

La tabella seguente riporta i tassi di risposta dei lavoratori in relazione al dispositivo di individuazione delle intrusioni e alla distanza tra quest'ultimo e l'area di lavoro.

Technology	Response Rate based on Distance from Paving Operation	
	50 ft	100 ft
SonoBlaster®	92%	85%
Intellicone®	80%	78%
WAS	65%	57%

Tabella 41_ Tassi di risposta dei lavoratori in relazione al dispositivo di individuazione (SonoBlaster, Intellicone o WAS) in funzione delle due distanze di prova

Le conclusioni derivanti dall'analisi della tabella 41 appaiono piuttosto intuitive. Durante i test sui dispositivi, sono state condotte due serie di prove, distinguendo tra una distanza di 50 piedi (15,24 m) e una di 100 piedi (30,48 m) tra il dispositivo di allarme e la squadra di operai. I dati evidenziano chiaramente che all'aumentare della distanza, il tasso di percezione dell'allarme diminuisce, rendendo il segnale acustico meno udibile. Un ulteriore fattore che ha inciso negativamente sulla percezione è stato il rumore generato dai macchinari pesanti presenti sul cantiere. Un esempio significativo dell'interazione tra l'allarme e i macchinari è emerso durante i test sul sistema WAS. Ai lavoratori erano stati forniti dispositivi di allarme personali (PSD), progettati per emettere un feedback aptico al momento dell'attivazione. Tuttavia, alcuni operai hanno riferito di non aver percepito la vibrazione, a causa delle intense sollecitazioni prodotte dai macchinari con cui stavano operando, come rulli compattatori o vibrofinitrici. Questo spiega il tasso di risposta inferiore registrato per il sistema WAS rispetto agli altri dispositivi testati. L'analisi evidenzia quindi un aspetto

molto importante: l'efficacia di un allarme dipende non solo dalla distanza, ma anche dal tipo di attività svolta e dall'interferenza causata da macchinari pesanti che possono compromettere la percezione degli allarmi. Esaminando nuovamente la tabella, emerge che il dispositivo SonoBlaster ha ottenuto il tasso di percezione più elevato, grazie alla maggiore intensità sonora del suo allarme. È tuttavia importante considerare che il report risale al 2017 e che, negli anni successivi, i dispositivi sono stati migliorati. Di conseguenza, se i test fossero ripetuti oggi, i risultati potrebbero differire, poiché sia Intellicone che WAS hanno incrementato l'intensità sonora dei propri allarmi.

In merito alla valutazione dei tempi di risposta dei lavoratori, i ricercatori hanno eseguito un'analisi approfondita concentrandosi esclusivamente sulle operazioni condotte nella terza area di cantiere (tabella 39, quarta riga). La registrazione dei tempi di reazione è stata resa possibile grazie all'uso di contatori manuali, distribuiti a tutti gli operatori presenti, sia operai che ricercatori, per segnare il momento esatto in cui percepivano l'attivazione dell'allarme acustico, visivo o aptico. A supporto di questo metodo è stato inoltre installato un sistema di telecamere che ha documentato ogni fase della prova, fornendo una registrazione video utile per confrontare e validare i tempi di reazione rilevati manualmente. Sulla base di questi dati, sono state calcolate le medie per ottenere una stima accurata dei tempi di risposta. È importante sottolineare che l'analisi ha preso in considerazione anche i diversi ruoli presenti in cantiere, come macchinisti e capisquadra, poiché la percezione dell'allarme poteva variare in base alla mansione svolta e alla distanza o vicinanza da fonti di rumore. Di conseguenza, i tempi di reazione sono stati valutati specificamente per ciascuna figura professionale, tenendo conto delle condizioni operative specifiche di ciascun ruolo.

DISPOSITIVO	TEMPO DI REAZIONE IN FUNZIONE DELLA DISTANZA DEI LAVORATORI DAL DISPOSITIVO DI ALLARME			
	25ft (=7.6m)	50ft (=15.2m)	75ft (=22.9m)	100ft (=30.5m)
SonoBlaster	-	4	3	3
Intellicone	4	8	8	11
WAS	2	3	6	12

Tabella 42_ Tempi di reazione medi dei lavoratori in funzione del dispositivo e della distanza tra questo ultimo e la squadra di lavoro

Nella tabella 42 sono riportati i tempi di reazione medi, espressi in secondi, per ciascun dispositivo di allarme testato; essi rappresentano una media delle reazioni degli operatori e forniscono un'indicazione complessiva sul tempo di risposta durante le attività svolte nel cantiere. Un aspetto

importante da evidenziare è quello relativo alla distanza tra il dispositivo di allarme e la squadra di lavoro: per il SonoBlaster essa rappresenta la distanza effettiva tra il dispositivo e i lavoratori, poiché il SonoBlaster incorpora direttamente la sirena; per Intellicone e WAS, essa si riferisce invece a quella tra il dispositivo di allarme collettivo e le lavorazioni e nella prova non viene data evidenza della possibile distanza tra il luogo effettivo dell'intrusione e il dispositivo di allerta, che si può solo presumere essere coincidente. Questa distinzione diventa cruciale quando si analizzano i tempi di reazione e si valuta il margine di tempo a disposizione degli operai per reagire a un'intrusione: per il SonoBlaster, i tempi di reazione misurati riflettono la risposta effettiva degli operai alle intrusioni simulate rispettivamente alle distanze di 25, 50, 75 e 100 piedi (7,6; 15,2; 22,9; 30,5 metri); per Intellicone e WAS, l'intrusione non avviene invece dove è posizionato il dispositivo che emette l'allarme sonoro o visivo, ma dove si trovano i sensori che rilevano l'anomalia. Di conseguenza, se da un lato questa esperienza di prova offre spunti utili, da un altro essa non risulta completamente esaustiva, poiché non dà evidenza della posizione effettiva dell'intrusione dei veicoli erranti rispetto ai sensori e ai dispositivi di allarme. Questo aspetto è da tenere in conto quando si valuta l'efficacia di tali sistemi e il reale tempo a disposizione per garantire la sicurezza dei lavoratori.

Esaminando i risultati del sondaggio somministrato agli operatori che hanno utilizzato i tre dispositivi, il grafico sottostante presenta le valutazioni espresse in relazione ai cinque criteri analizzati, con l'obiettivo di determinare l'efficacia complessiva dei dispositivi oggetto di studio.

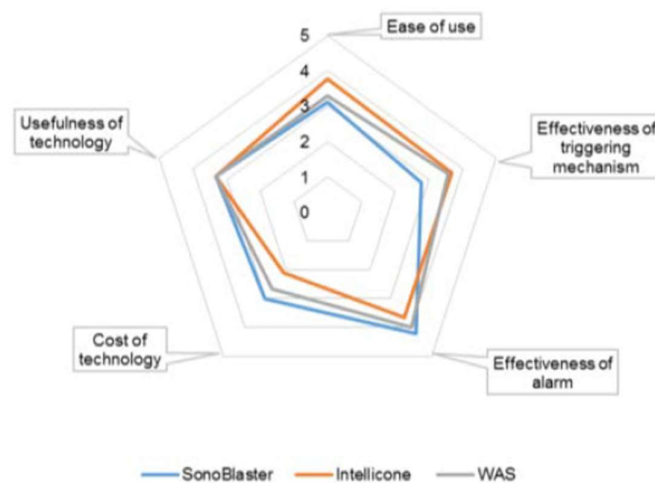


Grafico 66_Valutazioni medie dei lavoratori sui cinque criteri analizzati durante i live testing

Osservando il grafico 66, emerge che tutti e tre i dispositivi hanno ricevuto lo stesso punteggio per quanto riguarda il criterio dell'utilità, segnalando come gli operatori abbiano attribuito a ciascuno la medesima rilevanza. Tuttavia, analizzando i dispositivi Intellicone e SonoBlaster, si nota

un'interessante inversione di risultati per i criteri di facilità d'uso ed efficacia dell'allarme. In particolare, quando un dispositivo ha ottenuto il punteggio più alto per uno dei due criteri, l'altro ha ottenuto una valutazione inferiore, e viceversa. Per esempio, il SonoBlaster ha ricevuto la valutazione più elevata per l'efficacia dell'allarme, in quanto, come già evidenziato, durante i test pilota del 2017 aveva registrato il livello sonoro più alto tra i tre dispositivi. Per quanto riguarda invece l'efficacia del sistema di innesco, Intellicone e WAS hanno ottenuto la stessa valutazione, mentre il SonoBlaster ha registrato un punteggio nettamente inferiore. Questo risultato può essere ricondotto ai problemi già evidenziati nel paragrafo precedente, relativi a difficoltà nell'innesco della cartuccia di CO₂ o a malfunzionamenti del meccanismo di sicurezza del dispositivo stesso.

Infine, il sondaggio ha incluso due domande riguardanti la distintività dell'allarme e la sua intensità sonora, i cui risultati sono illustrati nei grafici sottostanti per ciascun dispositivo.

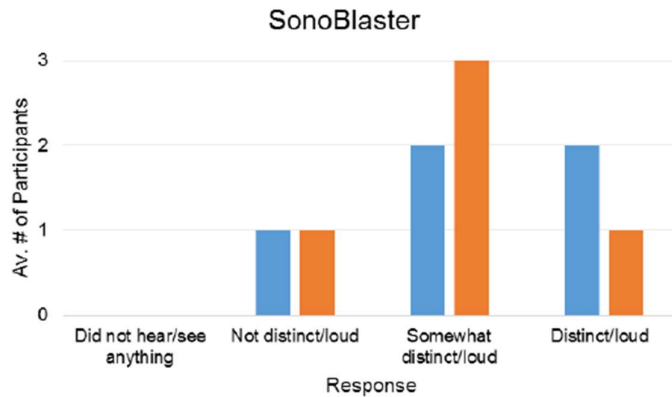


Grafico 67_Risultati del sondaggio _ Valutazione del dispositivo SonoBlaster

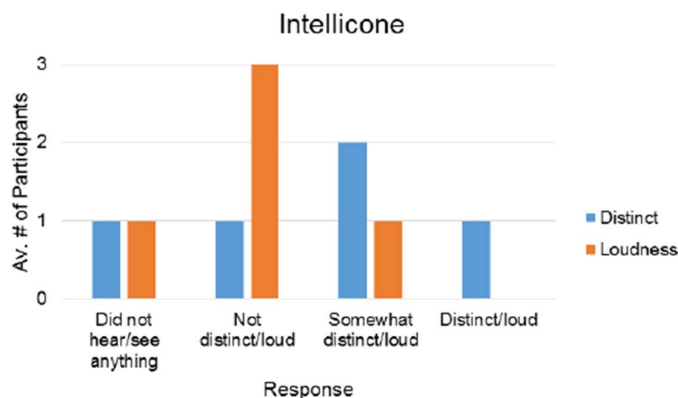


Grafico 68_Risultati del sondaggio _ Valutazione del dispositivo Intellicone

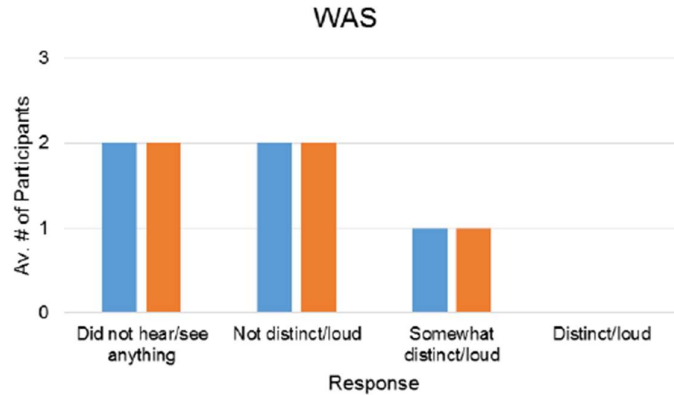


Grafico 69__ Risultati del sondaggio _ Valutazione del dispositivo WAS

I risultati hanno mostrato che i lavoratori percepiscono il SonoBlaster come dotato di un'elevata intensità sonora e di un allarme distintivo e chiaro (grafico 67). Al contrario, l'allerta prodotta dall'Intellicone è stata valutata dai partecipanti come relativamente distinta, ma non particolarmente forte (grafico 68). Per quanto riguarda il dispositivo WAS, infine, il grafico 69 indica che ha ottenuto valutazioni basse rispetto a entrambe le caratteristiche analizzate, risultando penalizzato sia in termini di intensità che di distintività dell'allarme.

È importante sottolineare che questi risultati si riferiscono al report del 2017 e alle prove effettuate in quell'anno. Come indicato nel paragrafo precedente, i dispositivi sono stati successivamente sviluppati e migliorati, con potenziamenti significativi per gli allarmi del WAS e dell'Intellicone. Pertanto, i risultati odierni potrebbero differire notevolmente da quelli riportati nel report.

TDOT WORK ZONE ALERT SYSTEMS (2021):

Relativamente ai risultati riportati nel report del 2021 (32), sono stati testati i dispositivi AWARE Sentry, Intellicone e WAS in cinque aree di cantiere caratterizzate da differenti configurazioni. Di seguito vengono sinteticamente riportate le informazioni più rilevanti relative ai test eseguiti nei cinque cantieri selezionati.

- PRIMA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:

Osservando la tabella 39, si nota che, in questo cantiere, è stato testato il sistema AWARE Sentry nell'ambito delle operazioni di segnalamento per un cantiere fisso, finalizzato alla riparazione di un tratto stradale su una carreggiata a una corsia per senso di marcia. La figura 103 presenta una schematizzazione dell'area di cantiere.

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento



Figura 103_ Installazione nell'area di cantiere del sistema AWARE Sentry_ Prima configurazione di cantiere

In questo caso, il limite di velocità per il rilevamento è stato impostato a 30 mph (48,3km/h), e durante le operazioni l'allarme del dispositivo si è attivato correttamente, rilevando tutti i veicoli che superavano tale soglia, senza registrare falsi allarmi. Il sistema è stato accolto positivamente dai lavoratori impegnati nel cantiere, poiché l'allarme risultava chiaro e ben udibile, anche in presenza di macchinari rumorosi. Tuttavia, alcuni operai hanno ritenuto la configurazione tramite l'applicazione per cellulare troppo complessa o superflua, preferendo un sistema che permetta di eseguire le impostazioni direttamente sul posto, data la scarsa praticità di alcuni nell'uso degli smartphone.

- SECONDA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:

In questo contesto è stato testato il sistema Intellicone in un cantiere mobile su una strada a due carreggiate, ciascuna con due corsie per senso di marcia, destinato alla ripavimentazione della superficie stradale. I "sensor lamp" dell'Intellicone sono stati installati su tutti i coni utilizzati per delimitare la corsia chiusa durante le lavorazioni (figura 104).

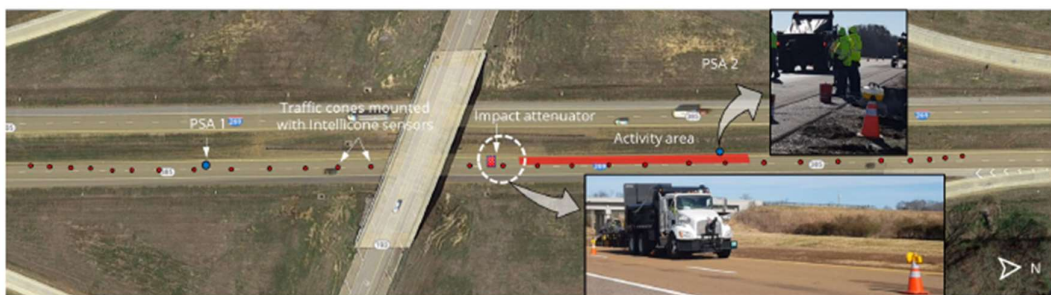


Figura 104_ Installazione nell'area di cantiere del sistema Intellicone_ Seconda configurazione di cantiere

Come indicato nella tabella 39, durante le operazioni in questa area di cantiere sono stati registrati frequenti falsi allarmi, provocati dall'abbattimento dei coni, sui quali erano montati i sensori, a causa del forte vento generato dal passaggio di mezzi pesanti a elevata velocità (figura 105).



Figura 105_Abbattimento dei coni con "sensor lamp" a causa delle turbolenze generate dal passaggio di mezzi pesanti

Questo suggerisce che il dispositivo Intellicone potrebbe non essere adatto per strade ad alta percorrenza e velocità. Tuttavia, per mitigare il problema di instabilità dei coni, si potrebbe considerare l'uso di coni più pesanti o la riduzione del loro baricentro per migliorare la stabilità e prevenire il ribaltamento causato dal passaggio dei mezzi pesanti, evitando così falsi allarmi.

Dal punto di vista dei lavoratori, il dispositivo è stato accolto positivamente. Essi hanno apprezzato la chiarezza dell'allarme del dispositivo PSA, ma hanno suggerito miglioramenti nelle operazioni di installazione e rimozione dei sensori. In particolare, essi hanno segnalato attivazioni accidentali durante queste operazioni e consigliato l'implementazione di una funzione per disattivare temporaneamente l'allarme durante la manipolazione dei dispositivi, al fine di evitare attivazioni fortuite.

- TERZA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:

Come indicato nella tabella 39, l'Intellicone e il WAS sono stati testati in un cantiere fisso collocato su una strada urbana e dedicato alla riparazione delle rampe di accesso ai marciapiedi.



Figura 106_Installazione nell'area di cantiere dei sistemi Intellicone e WAS _ Terza configurazione di cantiere

Come si può osservare nella figura 106, i sensori del sistema Intellicone sono stati montati sui coni di delimitazione della corsia chiusa, come di consueto, mentre il tubo pneumatico del sistema WAS è stato posizionato parallelamente al traffico.

Durante le lavorazioni non si sono verificate intrusioni reali nell'area di cantiere, pertanto i ricercatori hanno deliberatamente attivato entrambi i sistemi due volte. Per quanto riguarda l'Intellicone, solo una delle due attivazioni intenzionali è stata effettuata con successo, senza che siano state fornite spiegazioni per il fallimento della seconda attivazione (FALSE NEGATIVE). Al contrario, entrambe le attivazioni dell'allarme del sistema WAS sono risultate efficaci.

I lavoratori hanno espresso preoccupazioni riguardo all'efficacia dei sistemi Intellicone e WAS quando utilizzati in prossimità del traffico. Infatti, pur riconoscendo l'importanza dei dispositivi di prevenzione, gli operatori hanno ritenuto che tali sistemi non offrano un tempo di risposta sufficiente per mettersi in salvo in caso di intrusione di un veicolo, particolarmente in un cantiere urbano con traffico molto vicino all'area di lavoro.

- QUARTA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:

Nel contesto del rifacimento del manto stradale su una strada a una carreggiata con due corsie per senso di marcia, il sistema Intellicone è stato testato in un cantiere mobile a causa della notevole lunghezza della corsia chiusa. Durante le operazioni, sono stati registrati numerosi falsi allarmi (FALSE POSITIVE) a causa delle vibrazioni generate dal passaggio ravvicinato dei mezzi d'opera, come vibrofinitrice e rullo compattatore, vicino ai sensori. Per prevenire tali falsi allarmi, è stato necessario rimuovere i sensori situati entro 15 metri (50 piedi) dai mezzi d'opera, con una procedura che comportava continue rimozioni e reinstallazioni. Questa pratica si è rivelata particolarmente laboriosa e dispendiosa in termini di tempo, al punto che i lavoratori, ritenendo il processo lungo e complesso, hanno spesso scelto di non reinstallare il sistema dopo il termine delle operazioni.

Questo aspetto è particolarmente grave poiché evidenzia come la scelta errata di un dispositivo di individuazione possa compromettere l'intero obiettivo di prevenzione degli incidenti e sicurezza del cantiere. La continua rimozione e reinstallazione dei sensori ha causato frustrazione tra i lavoratori, che hanno percepito il sistema come inefficace e tedioso. Questo esempio sottolinea l'importanza di selezionare correttamente i dispositivi di sicurezza, poiché una scelta inadeguata non solo influisce

sull'efficacia della prevenzione degli incidenti, ma può anche compromettere l'accettazione e l'uso corretto del sistema da parte dei lavoratori.



Figura 107_Dispositivo di allarme collettivo (PSA) installato sulla vibrofinitrice



Figura 108_Dispositivi di allarme collettivo (PSA) installato sul rullo compattatore

Nelle Figure 107 e 108 si può osservare che, essendo un cantiere mobile, i dispositivi di allarme PSA sono stati montati sui mezzi d'opera per facilitarne il trasporto e garantirne la vicinanza alla squadra di lavoratori.

- QUINTA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:

In questo caso, è stato scelto un cantiere fisso situato su una strada urbana, dove erano in corso lavori di riparazione di un cordolo in calcestruzzo armato su una rampa curvilinea. Per i test sono stati selezionati i sistemi Intellicone e WAS.

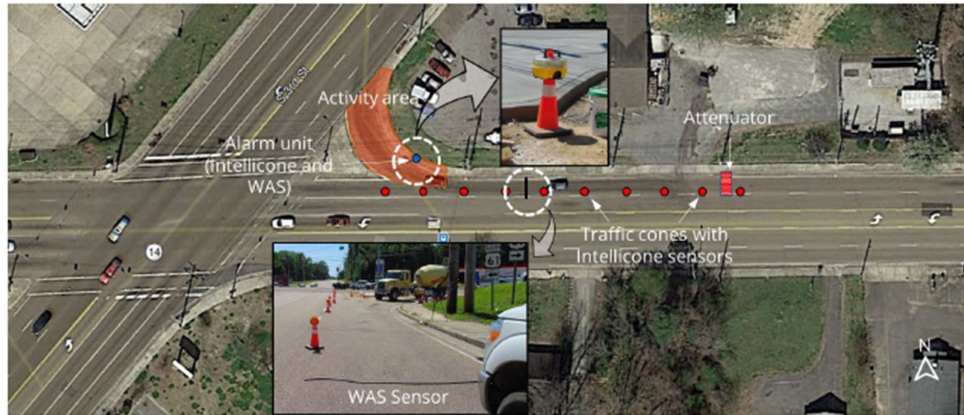


Figura 109_Installazione nell'area di cantiere dei sistemi Intellicone e WAS_ Quinta configurazione di cantiere

Come si può osservare dalla figura 109, il sistema WAS è stato posizionato perpendicolarmente al traffico per delimitare la testata della corsia di lavoro, invece che longitudinalmente come nel cantiere n° 3.

Poiché non sono state rilevate intrusioni reali, gli allarmi sono stati attivati deliberatamente sui dispositivi per raccogliere feedback dai lavoratori, con esito positivo per tutti i test. Tuttavia, anche in questo caso, come per il cantiere 3, gli operatori hanno manifestato scetticismo riguardo all'efficacia dei dispositivi. Le loro preoccupazioni non riguardano il funzionamento tecnico dei dispositivi, ma il loro impiego specifico in tali situazioni di cantiere. In particolare, sono state individuate due criticità principali:

1. **Prossimità al Traffico:** I lavoratori hanno osservato che la vicinanza dell'area di cantiere al flusso veicolare potrebbe limitare l'efficacia dei dispositivi nel fornire un preavviso sufficiente per mettersi in salvo, rendendoli, secondo loro, poco utili.
2. **Movimentazione dei Veicoli:** Poiché i camion betoniere dovevano entrare e uscire frequentemente dall'area per rifornire di calcestruzzo, gli operai erano costretti a spostare i coni con i sensori Intellicone. Questo ha causato attivazioni involontarie (FALSE POSITIVE) degli allarmi, che si sono verificate ripetutamente. La frequenza dei falsi allarmi durante la movimentazione dei coni ha portato i lavoratori a ignorare i segnali acustici e a lasciare il perimetro della zona di lavoro aperto per evitare ulteriori allarmi.

Questo esempio rappresenta un ulteriore caso che dimostra come la scelta dell'ideale dispositivo di sicurezza è fondamentale. In precedenza, si è già osservato una situazione simile in cui una sistemazione non ottimale del sistema di prevenzione aveva compromesso l'efficacia e l'accettazione

del dispositivo da parte dei lavoratori. Pertanto, la scelta del dispositivo alle specifiche condizioni del cantiere è importante per garantirne l'efficacia e l'accettazione da parte degli operatori.

In riferimento alla sezione relativa al sondaggio somministrato ai lavoratori che hanno testato i dispositivi di individuazione delle intrusioni, nello specifico l'Intellicone, l'AWARE Sentry e il WAS, si riportano di seguito i grafici che ne illustrano i risultati:

Efficacia della tecnologia nel migliorare la sicurezza nelle zone di lavoro:

Dai dati illustrati nel grafico 70 si evince che tutti i dispositivi hanno ottenuto votazioni molto buone, l'AWARE Sentry in particolare ha raggiunto il punteggio massimo del 100%.

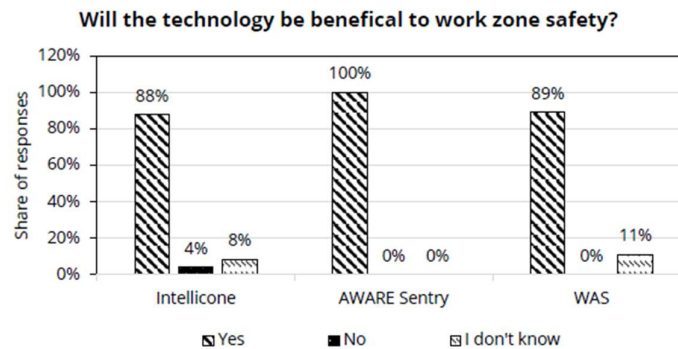


Grafico 70_Valutazione dei lavoratori_Efficacia della tecnologia nel migliorare la sicurezza nelle zone di lavoro

Facilità d'uso:

In merito alla facilità d'uso, il grafico 71 indica che la maggior parte dei partecipanti considera tutti e tre i sistemi facilmente utilizzabili. Tuttavia, per quanto riguarda l'AWARE Sentry, il fatto che il 50% dei lavoratori abbia assegnato un punteggio più basso ("straight forward") potrebbe essere attribuito alla necessità di utilizzare un'app per completare le impostazioni del dispositivo. Alcuni lavoratori, presumibilmente non abituati a utilizzare lo smartphone, potrebbero aver dato punteggi leggermente inferiori a causa di questa esigenza, penalizzando così l'uso obbligatorio dell'app per il settaggio.

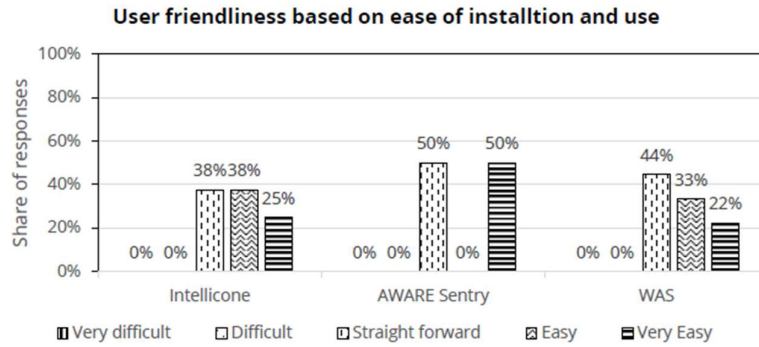


Grafico 71_Valutazione dei lavoratori _ Facilità d'uso dei dispositivi

Percezione complessiva dell'allarme:

Per quanto concerne la visibilità e udibilità degli allarmi, durante i test in cantiere non sono emerse lamentele significative riguardo al livello sonoro degli allarmi. Tuttavia, è stata segnalata una difficoltà nel percepire la vibrazione del dispositivo personale (probabilmente del WAS) in ambienti particolarmente rumorosi e vibranti, come durante l'uso di un martello demolitore.

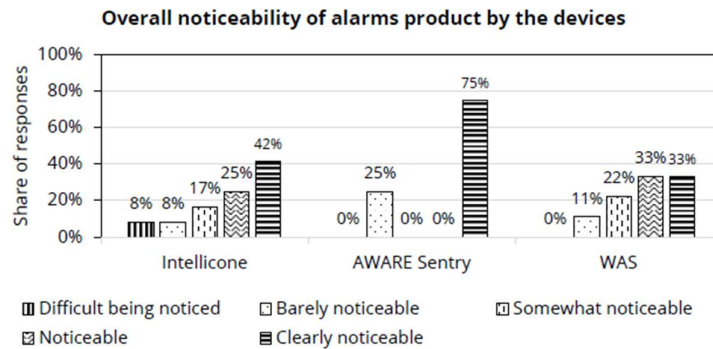


Grafico 72_Valutazione dei lavoratori _ Percezione complessiva del sistema di allarme dei dispositivi

Probabilità di falsi allarmi:

Un aspetto controverso è la percezione dei lavoratori riguardo alla propensione del WAS a generare falsi allarmi. Nonostante i test abbiano evidenziato che solo l'Intellicone ha prodotto falsi allarmi (sia FALSE NEGATIVE, dove l'allarme non è scattato quando avrebbe dovuto, sia FALSE POSITIVE, causati dal ribaltamento dei coni dovuto al passaggio di mezzi pesanti), il WAS è stato ritenuto potenzialmente più soggetto a falsi allarmi. I risultati dei test evidenziano chiaramente che l'AWARE Sentry non ha generato falsi allarmi.

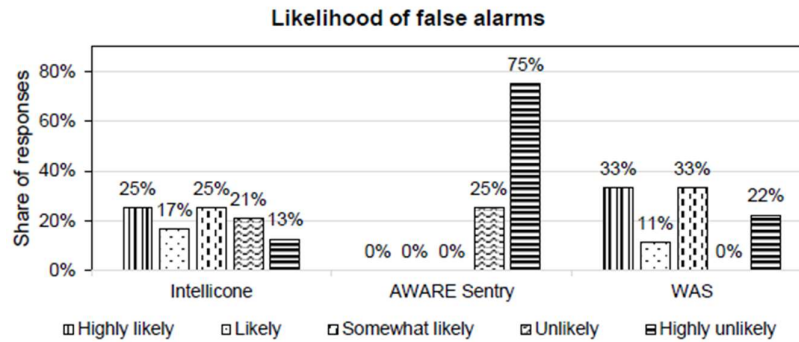


Grafico 73_Valutazione dei lavoratori_Probabilità di falsi allarmi

Durabilità dei componenti del sistema:

Infine, la durabilità dei componenti è stata considerata inferiore per Intellicone e WAS. Questo è attribuito al fatto che l’attivazione di questi dispositivi dipende da impatti diretti o dal passaggio di veicoli sopra i componenti, il che influisce negativamente sulla loro resistenza.

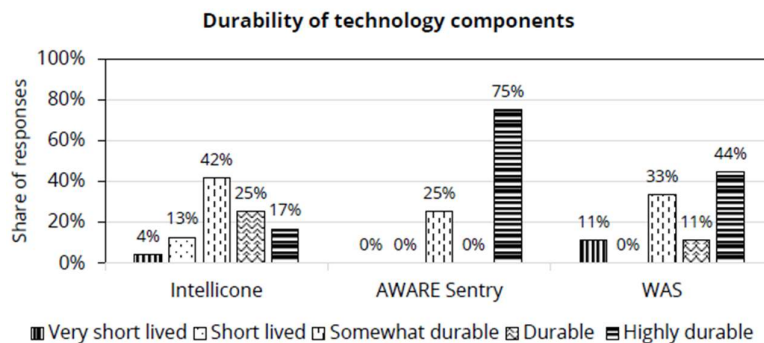


Grafico 74_Valutazione dei lavoratori_Durabilità dei componenti dei dispositivi

Come ultime considerazioni basate sui test condotti in condizioni reali di cantiere, la tabella 43 riporta le conclusioni relative ai risultati ottenuti. Per i cantieri di breve durata, si consiglia l'uso dell’AWARE Sentry, poiché la sua installazione è notevolmente più rapida rispetto agli altri due sistemi. Inoltre, l’AWARE Sentry è particolarmente adatto per i cantieri mobili, grazie alla possibilità di montarlo su un mezzo di servizio, consentendo al dispositivo di seguire le lavorazioni. Al contrario, gli altri due dispositivi richiedono uno spostamento manuale, aumentando il rischio di falsi allarmi e attivazioni involontarie durante la manipolazione. Per i cantieri di lunga durata, invece, è raccomandato il sistema Intellicone. La maggiore complessità nell'installazione è giustificata dalla sua capacità di coprire lunghe distanze grazie alla potenziale trasmissione illimitata del segnale di allarme, a condizione che siano disponibili sufficienti sensori e che il sistema sia collegato alla rete cellulare. Il WAS, infine, si è dimostrato adatto per operazioni fisse o mobili di breve durata e di

piccole dimensioni. La sua installazione veloce rappresenta un vantaggio, ma la limitata copertura del sistema ne limita l'uso per cantieri di lunga durata.

Work zone setup and duration	Short tapers or speed limit < 30 mph (less than 500 ft)	Medium tapers or speed limit < 40 mph (500-1000 ft)	Long tapers or speed limit > 30 mph (longer than 1000 ft)
Short duration (less than or equal to one day)	AWARE or WAS	AWARE	AWARE
Long duration (more than one day)	Intellicone or AWARE	Intellicone	Intellicone
Mobile operation	WAS	AWARE	AWARE

Tabella 43_Valutazione dei lavoratori_ Applicabilità dei dispositivi in funzione della tipologia e delle caratteristiche del cantiere

CDOT FINAL TESTING OF WORK ZONE INTRUSION ALARMS (2023):

Per quanto concerne il report del 2023 (33), i ricercatori hanno condotto delle prove su cinque dispositivi di individuazione delle intrusioni: WAS, SonoBlaster, Intellicone, Single Sentry Beam e AWARE Sentry, selezionando sei cantieri fissi come aree di lavoro. Come già avvenuto nei test del 2017 (27), anche in questo caso è stato utilizzato il supporto video per raccogliere ulteriori informazioni, permettendo di valutare i tempi di reazione degli operai in risposta all'attivazione degli allarmi.

- PRIMA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:

In questo caso è stato scelto un cantiere situato su una strada a due carreggiate, ciascuna con cinque corsie per senso di marcia, in un tratto stradale caratterizzato da alta velocità e capacità di traffico. Le operazioni in corso riguardavano la riparazione e la sostituzione della recinzione a bordo strada, configurando il cantiere come un'installazione fissa. I ricercatori hanno deciso di testare in questo contesto i sistemi Intellicone e WAS.

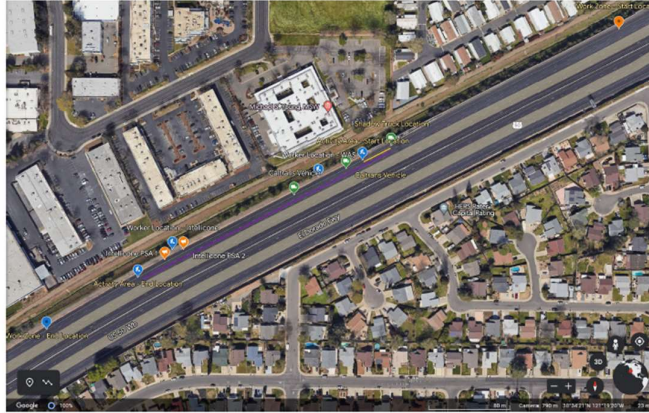


Figura 110_ Installazione nell'area di cantiere dei sistemi Intellicone e WAS_ Prima configurazione di cantiere

WAS:

In questo contesto, sono stati posizionati tre tubi pneumatici paralleli alla strada, anziché disposti in diagonale all'interno della zona di lavoro, scelta preferita dai lavoratori stessi. Durante le operazioni, sono stati registrati diversi falsi allarmi (FALSE POSITIVE), non attribuibili a malfunzionamenti del dispositivo, bensì a distrazioni da parte degli operatori. Per esempio, in un'occasione un lavoratore ha accidentalmente calpestato uno dei tubi pneumatici, mentre in più occasioni un altro ha attivato per errore il pulsante di allarme presente sul dispositivo di sicurezza personale (PSD), rendendosi conto solo dopo della causa e modificando di conseguenza il proprio comportamento. Le unità di allarme erano montate sui mezzi di servizio e, complessivamente, si sono verificati cinque falsi allarmi, tutti causati da disattenzioni dei lavoratori.



Figura 111_ Installazione parallela al flusso veicolare dei tubi pneumatici del sistema WAS_ Chiusura perimetro area di cantiere



Figura 112_installazione dei dispositivi di allerta collettivi (PAC) sui mezzi di servizio

Il team di ricerca ha rilevato che, ogni volta che un allarme veniva attivato, i lavoratori reagivano prontamente, rivolgendosi immediatamente verso il traffico in arrivo per identificare eventuali intrusioni. Al termine della prova, il team ha attivato manualmente l'allarme del sistema WAS per misurare il tempo di reazione degli operatori. Le registrazioni video effettuate durante l'evento hanno evidenziato che i lavoratori hanno diretto lo sguardo verso i tubi pneumatici con un tempo di reazione inferiore a un secondo, dimostrando una prontezza significativa nel rispondere agli allarmi.

INTELLICONE:

Durante la prova del sistema Intellicone, sono state installate sette lampade per coni e impiegati due allarmi portatili (PSA).



Figura 113_Installazione dei "sensor lamp" sui coni di delimitazione dell'area di cantiere

Uno dei PSA è stato posizionato sul cassone di un veicolo da lavoro, mentre il secondo è stato collocato su un cono vicino al margine della corsia di emergenza, adiacente all'area di attività (Figura 114). Entrambi i dispositivi si sono connessi alla rete cellulare entro due minuti dall'accensione, garantendo così una rapida operatività del sistema.



Figura 114_ Installazione dei dispositivi di allarme collettivi (PSA) del sistema Intellicone

Durante la prova del sistema Intellicone, il team di ricerca non ha osservato né registrato falsi allarmi o problematiche. Il tratto di strada adiacente alla zona di lavoro era soggetto a un limite di velocità di 55 mph (88,5 km/h), superiore ai limiti abituali in corrispondenza dei cantieri sulle autostrade italiane. Nonostante la vicinanza del traffico pesante non ha rovesciato alcun cono, un aspetto rilevante considerando che, in esperimenti precedenti (report del 2017 (27) o del 2021 (32)), i veicoli di passaggio avevano causato il ribaltamento dei dispositivi, generando numerosi falsi allarmi.

Al termine della prova, il team di ricerca ha attivato manualmente il sistema Intellicone rovesciando un cono dotato di sensore per misurare il tempo di reazione dei lavoratori: quattro operatori hanno reagito immediatamente, interrompendo i lavori di riparazione della recinzione e si sono guardati attorno per individuare la causa dell'allarme.

Una criticità rilevata dagli operai riguarda le procedure di installazione, ripristino post-attivazione e rimozione del dispositivo. Tali operazioni, se eseguite a piedi, espongono i lavoratori al traffico, incrementando il rischio per la loro sicurezza. Di conseguenza, hanno suggerito che queste attività siano sempre svolte dal retro di un veicolo di servizio, al fine di garantire la massima protezione possibile per i lavoratori durante tali fasi.



Figura 115_Procedure di installazione e rimozione dei "sensor lamp" _ esposizione del personale al flusso veicolare

- **SECONDA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:**

I sistemi SonoBlaster e Intellicone Single Sentry Beam sono stati testati in una zona di lavoro situata su una strada a due carreggiate, ciascuna con tre corsie per senso di marcia, durante un'operazione di chiusura di una corsia per la riparazione della recinzione stradale. La zona di lavoro si trovava su un tratto di strada ad alta velocità, caratterizzato da un elevato flusso di traffico su tutte e tre le corsie. I dispositivi sono stati testati in condizioni diurne, per garantire una valutazione delle loro prestazioni durante l'orario lavorativo tipico.

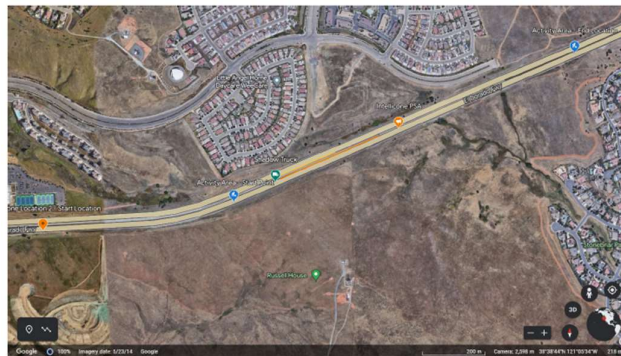


Figura 116_Installazione nell'area di cantiere dei sistemi SonoBlaster e Single Sentry Beam _ Seconda configurazione di cantiere

SONOBLASTER:

I coni dotati di SonoBlaster sono stati disposti a una distanza di circa 50 piedi (15 metri) l'uno dall'altro, una spaziatura leggermente maggiore rispetto a quella indicata nelle tavole tecniche del Decreto Ministeriale italiano, che prescrive una distanza tipica di 12 metri. L'unità di allarme è stata posizionata all'interno della chiusura, con la tromba/sirena rivolta parallelamente al flusso del traffico. Analogamente a quanto riscontrato nel cantiere precedente con l'Intellicone, anche in questo caso gli operatori hanno evidenziato criticità riguardanti l'installazione del dispositivo, ritenendo che il posizionamento dei coni potesse esporli a rischi dovuti alla vicinanza con il traffico. Tale preoccupazione è stata aggravata dal fatto che, per sbloccare il dispositivo SonoBlaster dopo aver posizionato il cono, il lavoratore doveva inginocchiarsi, aumentando così l'esposizione al traffico ad alta velocità.



Figura 117_Procedure di installazione e rimozione dei dispositivi SonoBlaster _ esposizione del personale al flusso veicolare

Dopo il posizionamento di soli tre coni, il sistema SonoBlaster ha funzionato senza richiedere interventi da parte del personale di manutenzione. Durante il test non sono stati registrati falsi allarmi o altri problemi. È stato osservato che i veicoli pesanti in transito ad alta velocità non hanno influenzato i coni né causato attivazioni accidentali dell'allarme SonoBlaster. Questo risulta in contrasto con le osservazioni del report del 2021 (32), dove si erano riscontrati problemi di attivazione accidentale per dispositivi montati su coni, come l'Intellicone, sebbene il SonoBlaster non fosse stato testato specificamente in quell'occasione.

SINGLE SENTRY BEAM:

Nel cantiere in oggetto, il dispositivo è stato installato utilizzando il laser puntato perpendicolarmente al traffico, adottando così una “configurazione di chiusura della corsia”.



Figura 118_Installazione del dispositivo Single Sentry Beam _ laser orientato in direzione perpendicolare al flusso veicolare

Il funzionamento del Single Sentry non ha richiesto alcun intervento da parte del personale di manutenzione. Durante il test, non sono stati osservati falsi allarmi, grazie al posizionamento del dispositivo laser dietro un veicolo che seguiva i lavoratori nell'area di lavoro. Al termine del test, il team di ricerca ha deliberatamente attivato l'allarme del Single Sentry per osservare le reazioni dei

lavoratori. Cinque lavoratori si sono voltati verso il dispositivo laser senza mostrare segni di fretta. La mancanza di urgenza nelle loro reazioni potrebbe essere stata influenzata dal fatto che il lavoro era terminato e la giornata lavorativa era conclusa. La rimozione del dispositivo è avvenuta senza intoppi e in modo rapido.

A seguito dei test effettuati, i lavoratori si sono dichiarati soddisfatti del funzionamento del dispositivo, sollevando però un'osservazione legata al suo peso eccessivo. A tal proposito, i lavoratori hanno evidenziato due criticità legate a questo aspetto. La prima riguarda la necessità di impiegare due operai per effettuare un'installazione rapida, il che può risultare difficoltoso in contesti che richiedono interventi immediati, mentre la seconda è legata alla sicurezza stradale: in caso di impatto da parte di un veicolo errante, il peso elevato del dispositivo potrebbe causare danni significativi al mezzo coinvolto, mettendo a rischio la sicurezza del conducente e dei passeggeri.

- TERZA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:

In questa configurazione di cantiere è stato testato il sistema AWARE Sentry su una strada extraurbana a una carreggiata (figura), con due corsie per senso di marcia. Il cantiere era dedicato a operazioni di riparazione e riabilitazione della pavimentazione stradale. La strada rurale, con un limite di velocità di 55 mph (88,5 km/h), presentava una delle estremità della zona di lavoro in prossimità di una curva orizzontale con una strada laterale divergente, aumentando la complessità della gestione del traffico. Per garantire una copertura adeguata della chiusura della corsia, sono stati posizionati due dispositivi AWARE Sentry, uno per ogni lato dell'area di lavoro.

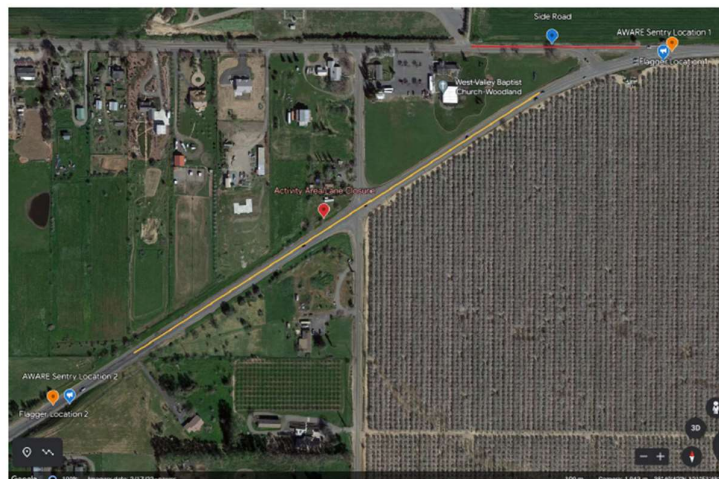


Figura 119_ Installazione nell'area di cantiere del sistema AWARE_ Terza configurazione di cantiere



Figura 120_Dettaglio dell'installazione del dispositivo AWARE in configurazione Sentry _ attività di "segnalamento"

Durante le operazioni sono stati impiegati un dispositivo AWARE Sentry, con una soglia di rilevamento impostata a 35 mph (56,3 km/h), e quattro dispositivi di allarme personale Worktrax. Dai test condotti è emerso che il sistema AWARE Sentry rispetta la distanza di rilevamento indicata dal produttore (500 piedi, 152m) ed è capace di funzionare efficacemente anche in presenza di ostacoli, come veicoli in movimento tra l'area di lavoro e il traffico in avvicinamento. Ad esempio, il dispositivo è riuscito a rilevare un veicolo che si avvicinava a 45,54 mph (73,3km/h) da una distanza di 519,49 piedi (158m), un valore in linea con quanto dichiarato dal produttore. Anche in situazioni in cui la visuale era parzialmente ostruita, come nel caso di veicoli fermi al segnale di stop, AWARE Sentry ha identificato correttamente un veicolo che viaggiava a 38,63 mph (62,2km/h) da 249,67 piedi (76m). Tuttavia, poiché i veicoli si avvicinavano frequentemente a velocità superiori ai 35 mph, per evitare l'attivazione continua dell'allarme, la soglia è stata alzata a 45 mph (72,4 km/h).

Un'altra criticità osservata riguarda la presenza di una strada laterale divergente vicino alla posizione del primo dispositivo (come mostrato dalla "linea" rossa in figura 121) che ha causato alcuni falsi allarmi. I veicoli che proseguivano lungo la strada divergente a velocità elevate o che uscivano dalla fila davanti al flagger attivavano erroneamente l'unità AWARE Sentry. In particolare, un veicolo che percorreva la strada laterale a 35,01 mph (56,34km/h) a 98,10 piedi (30m) di distanza ha innescato l'allarme, in quanto il sistema sembrava confondere quel veicolo con quelli che potevano introdursi nell'area di cantiere (figura 122). Il fatto che AWARE Sentry abbia individuato i veicoli sulla strada divergente potrebbe non essere un fallimento del sistema, bensì un'indicazione della sua sensibilità. In una configurazione stradale standard, il dispositivo non avrebbe rilevato nulla di anomalo, o se lo avesse fatto, sarebbe stato perché vi era effettivamente un'intrusione nell'area di lavoro. Pertanto, per quanto riguarda questo cantiere specifico, si può ipotizzare che l'errore risieda nella scelta del posizionamento del dispositivo. Come si osserva dalla figura 121, se AWARE Sentry fosse stato

collocato più a monte, prima della deviazione della strada divergente, non si sarebbero verificati questi falsi allarmi.

La funzionalità del sistema AWARE di individuare le brusche deviazioni la si era già osservata durante i test pilota precedentemente descritti, come evidenziato nelle configurazioni testate e riportate nelle figure 89, 92 e 94.



Figura 121_Condizioni particolari della terza configurazione di cantiere _ Strada divergente a monte del dispositivo AWARE Sentry



Figura 122_Individuazione di un veicolo nella strada divergente a monte del dispositivo AWARE Sentry _ Attivazione del dispositivo e falso allarme

Durante la fase di rimozione del dispositivo, non è stato riscontrato alcun problema significativo. L'operazione si è svolta senza intoppi o anomalie.

- **QUARTA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:**

Il sistema AWARE Sentry e il sistema Intellicone sono stati testati in una zona di chiusura di corsia su una strada a una carreggiata con due corsie per senso di marcia (figura...), durante lavori di sigillatura delle fessure della superficie stradale, dove il limite di velocità era fissato a 55 mph (88,5km/h).

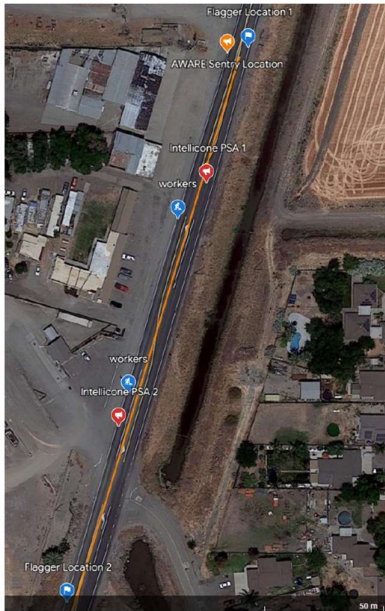


Figura 123_Installazione nell'area di cantiere dei sistemi AWARE Sentry e Intellicone _ Quarta configurazione di cantiere

INTELLICONE:

Durante le lavorazioni sono stati installati 10 dispositivi Intellicone sui coni di delimitazione del cantiere, distanziati di 25 piedi (circa 7 metri) l'uno dall'altro (figura 124), e sono stati utilizzati due dispositivi di allarme PSA. Uno dei due è riuscito a connettersi correttamente alla rete cellulare, mentre il secondo no. Tuttavia, questo non ha compromesso il funzionamento del sistema, poiché il PSA ha potuto comunicare con l'altro dispositivo e con i sensori sui coni tramite segnale radio, evidenziando l'importanza della ridondanza del sistema: la rete cellulare viene utilizzata per il tracciamento in tempo reale, mentre il segnale radio assicura la comunicazione e l'operatività.

Durante le operazioni, si sono verificati alcuni falsi allarmi causati dallo spostamento, seppur minimo, dei dispositivi da parte dei lavoratori per fare spazio all'avanzamento dei mezzi d'opera, tuttavia, dopo aver istruito gli operai a non muovere i dispositivi, i falsi allarmi sono cessati.

Verso la fine del test, un sensore del sistema è stato intenzionalmente abbattuto per attivare l'allarme e osservare le reazioni degli operatori, i quali hanno tempestivamente rivolto lo sguardo verso il PSA.



Figura 124_Installazione dei "sensor lamp" sui dispositivi di delimitazione dell'area di cantiere

AWARE SENTRY:

Durante i test condotti sul sistema AWARE Sentry, la velocità di soglia per il dispositivo AWARE Sentry è stata impostata a 35 mph (56,3 km/h) utilizzando il pannello di controllo dell'app.

Il sistema ha riconosciuto efficacemente tutti i veicoli senza registrare falsi allarmi, dimostrando una portata di rilevamento conforme alle specifiche del produttore. L'allarme si attivava ogni volta che un veicolo in avvicinamento superava la soglia impostata, e si è osservato che i conducenti riducevano la velocità quando l'allarme luminoso dell'AWARE si attivava.

Il sistema AWARE Sentry ha quindi dimostrato un comportamento conforme alle aspettative.



Figura 125_Dettaglio dell'installazione del dispositivo AWARE in configurazione Sentry_ attività di "segnalamento"

- **QUINTA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:**

I dispositivi Single Sentry Beam e SonoBlaster sono stati testati durante l'operazione di sigillatura delle crepe della pavimentazione stradale di una rampa di svincolo su una strada urbana. Per il test sono stati impiegati otto coni dotati di dispositivi SonoBlaster e due unità Single Sentry Beam. La figura 126 illustra la disposizione generale della zona di lavoro e il posizionamento dei due sistemi.

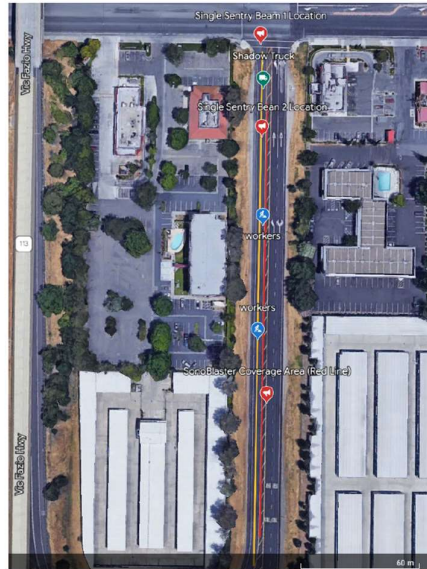


Figura 126_ Installazione nell'area di cantiere dei sistemi Single Sentry Beam e SonoBlaster _ Quinta configurazione di cantiere

SINGLE SENTRY BEAM:

Due unità del dispositivo Single Sentry Beam sono state installate all'interno dell'area di cantiere, con la portata di rilevamento del laser impostata per coprire esattamente la larghezza della corsia chiusa. I dispositivi sono stati posizionati alle due estremità dell'area di cantiere, fungendo da chiusura di testata e monitorando possibili intrusioni frontali nella zona di lavoro (figura 127). Inoltre, sono stati utilizzati due dispositivi di allarme PSA (Intellicone), collocati sul mezzo d'opera per la sigillatura delle crepe.



Figura 127_ Installazione delle due unità Single Sentry Beam _ Chiusura delle due testate della corsia di cantiere

Il personale di manutenzione aveva inizialmente espresso preoccupazioni riguardo al funzionamento dell'unità Single Sentry Beam posizionata dietro al mezzo di supporto, temendo che la mancanza di una linea visiva libera con il dispositivo PSA potesse comprometterne l'efficacia della trasmissione del segnale di pericolo. Tuttavia, il team di ricerca ha deliberatamente attivato l'unità Single Sentry

Beam per verificare lo stato della connessione, che è risultata positiva nonostante la mancanza di visibilità diretta verso le unità di allerta.

Durante la prova, sono stati registrati quattro falsi allarmi, tutti però causati da disattenzioni dei lavoratori che attraversavano, involontariamente, la linea di rilevamento del dispositivo Single Sentry Beam. Inoltre, verso la fine del test, il team di ricerca ha voluto attivare intenzionalmente l'allarme per osservare le reazioni dei lavoratori: tre di loro si sono immediatamente girati verso la direzione del laser, mentre un altro lavoratore, impegnato a pulire detriti paralleli alla corsia chiusa, ha reagito in meno di 2 secondi, a circa 160 piedi (circa 50m) dal Single Sentry Beam.

Prima del recupero delle unità, è stato eseguito un rapido test di portata di trasmissione del segnale tra il PSA e il Single Sentry Beam. Entrambi i dispositivi di allarme si sono attivati a una distanza di 200 piedi (60,96 m) con una linea visiva libera, ma non sono riusciti ad attivarsi a 225 piedi (68,58 m). Questa portata, sebbene superiore a quella osservata durante le sessioni di test pilota (175 piedi; 53,34 m), è risultata inferiore alla portata specificata dal produttore di 246 piedi (74,98 m).

SONOBLASTER:

Sei unità del dispositivo sono state posizionate a una distanza di 25 piedi l'una dall'altra, con l'allarme/il corno orientato verso le aree di lavorazione (figura 128). Il posizionamento è stato completato senza difficoltà in circa 10 minuti. Durante i test, non sono emerse attivazioni errate né altri problemi, e il ritiro dei dispositivi è avvenuto senza difficoltà. Complessivamente, non sono state riscontrate alcune anomalie o malfunzionamenti da parte degli operatori che hanno testato il SonoBlaster.



Figura 128_ Installazione dei dispositivi SonoBlaster sui coni di delimitazione della corsia di cantiere

- SESTA CONFIGURAZIONE DI CANTIERE ANALIZZATA:

Il sistema WAS è stato testato presso la chiusura della rampa di svincolo/interconnessione di una strada a due carreggiate, ciascuna con due corsie per senso di marcia, durante un'operazione di sigillatura delle crepe nella pavimentazione stradale (figura 129).

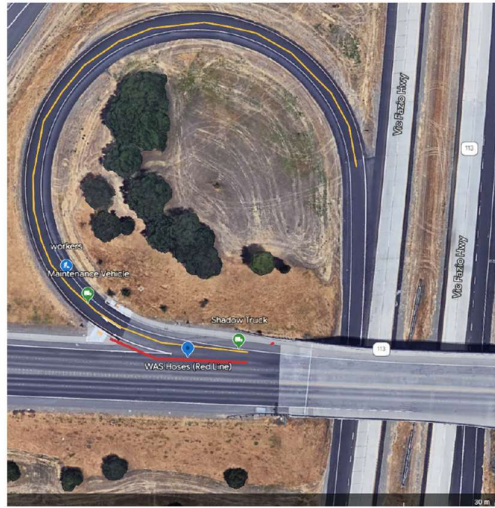


Figura 129__Installazione nell'area di cantiere del dispositivo WAS _ Sesta configurazione di cantiere

Durante le lavorazioni sono stati disposti due tubi pneumatici da 33 piedi ciascuno, collocati parallelamente al traffico in movimento per chiudere l'accesso alla rampa interessata dalle operazioni (figura 130). Sono stati inoltre installati sei dispositivi di allarme collettivi sui mezzi a supporto delle lavorazioni e sei dispositivi di allarme personale (PSD), assegnati ad altrettanti lavoratori.



Figura 130__Immagini di dettaglio _ Installazione lungo il perimetro del cantiere dei tubi pneumatici del sistema WAS

Durante i test condotti sul WAS, i tubi pneumatici sono rimasti all'ingresso della rampa mentre le unità di allarme si allontanavano progressivamente dai tubi man mano che il lavoro di riempimento delle crepe procedeva. Tuttavia, data la curvatura orizzontale della rampa, l'aumento progressivo

della distanza tra le unità di allarme e i tubi pneumatici è stato inferiore rispetto a una sezione rettilinea della strada, garantendo che le unità di allarme non fossero mai fuori portata dei sensori. Questo è stato confermato da un'attivazione deliberata dell'allarme a una distanza di 175 piedi (53,34m) dal tubo sensore, che ha avuto esito positivo. È stata poi effettuata anche una seconda attivazione a una distanza di 335 piedi (102m) tra i tubi e le unità WAS, anch'essa positiva. Va notato che questa portata era significativamente maggiore rispetto ai 225 piedi (68,6m) osservati durante i test condotti in condizioni controllate (riportati nei report del 2019 (31) e del 2023 (33)).

Un'ulteriore attivazione deliberata è stata eseguita successivamente per osservare le reazioni dei lavoratori. Nonostante il considerevole rumore dell'attrezzatura e del traffico nella zona di lavoro, due lavoratori hanno prontamente alzato lo sguardo e si sono accorti tempestivamente dell'attivazione dell'allarme del sistema.

Infine, durante le lavorazioni sono stati registrati cinque falsi allarmi (FALSE POSITIVE), tutti dovuti a distrazioni e errori dei lavoratori, che accidentalmente attivavano l'allarme premendo il pulsante sul dispositivo di allarme personale (PSD) o calpestando involontariamente i tubi pneumatici quando entravano o uscivano dall'area di cantiere.

Risultati del sondaggio:

In questo report, così come nei precedenti analizzati, una sezione è stata dedicata alle risposte fornite dai lavoratori a un sondaggio condotto dai ricercatori. Il sondaggio comprendeva due domande mirate a raccogliere le impressioni generali degli operai addetti alla manutenzione in merito all'efficacia dei sistemi "*Work Zone Intrusion Alarm*" (WZIA) selezionati. La prima domanda chiedeva di valutare l'efficacia complessiva dei vari sistemi WZIA nel ridurre gli incidenti nelle zone di lavoro, confrontandoli tra loro. La seconda domanda, invece, indagava se tali sistemi avessero contribuito a migliorare la sicurezza globale nelle aree di lavoro.

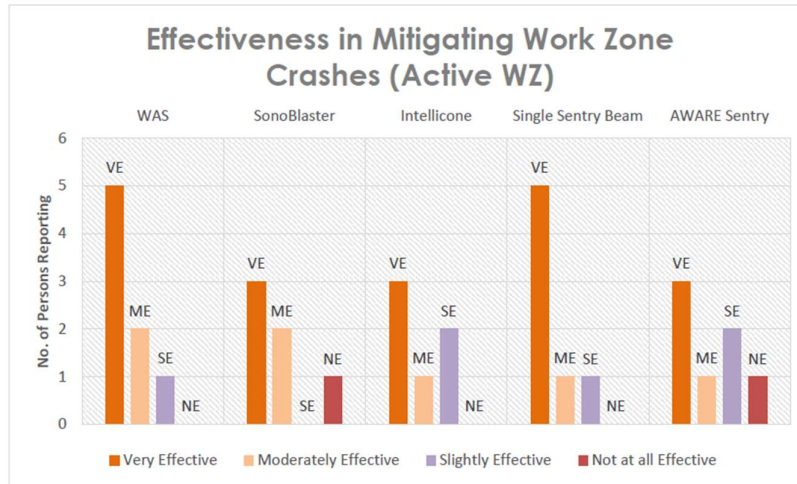


Grafico 75_Valutazione dei lavoratori_ Efficacia nella riduzione degli incidenti nei cantieri dei dispositivi analizzati

Il grafico sopra riportato illustra i risultati relativi alla domanda sulla riduzione degli incidenti nelle zone di lavoro. Si evidenzia che i sistemi WAS e Single Sentry Beam hanno ottenuto il maggior numero di risposte indicate come "Molto efficace", mentre i dispositivi Intellicone, SonoBlaster e AWARE Sentry hanno ricevuto risposte più variegate.

Per quanto riguarda il grafico relativo al contributo che i dispositivi possono offrire per incrementare la sicurezza nei cantieri, anche in questo caso il WAS e il Single Sentry Beam hanno ottenuto la percentuale più alta di voti favorevoli.

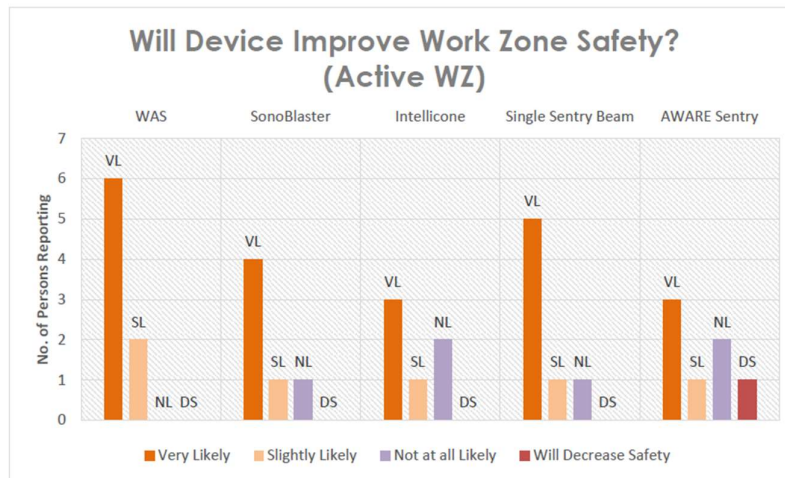


Grafico 76_Valutazione dei lavoratori_ Efficacia dei dispositivi analizzati nel contribuire all'incremento della sicurezza nei cantieri

Dall'osservazione dei due grafici presentati (grafico 75 e 76), è interessante notare come, a differenza di quanto accaduto nel report del 2021 (32), dove il sistema AWARE Sentry aveva ricevuto esclusivamente voti positivi, nel report del 2023 (33) l'AWARE Sentry risulta essere l'unico dispositivo

ad avere ottenuto voti negativi per entrambe le domande. In particolare, un operatore ha ritenuto che il dispositivo non solo non contribuisse alla mitigazione degli incidenti nelle aree di lavoro, ma addirittura riducesse la sicurezza complessiva nel cantiere.

NCDOT WORK ZONE INTRUSION ALERT SYSTEM TECHNOLOGY TEST (2022):

Per quanto riguarda l'ultimo dispositivo testato in condizioni reali di cantiere, ovvero il Camera-Based Work Zone Intrusion Alert System, è stato necessario analizzare il report dedicato a questo dispositivo (37), seguendo la stessa metodologia utilizzata per i test pilota, al fine di ottenere informazioni dettagliate sulle sue prestazioni e caratteristiche.

Per testare questo dispositivo, i ricercatori hanno selezionato tre diversi cantieri, uno fisso e due mobili, tutti situati su strade extraurbane composte da due carreggiate con due corsie per senso di marcia. Le lavorazioni che venivano svolte nelle aree di cantiere comportavano la chiusura della corsia di marcia e della banchina.

Durante le prove, sono state raccolte le opinioni degli operai che hanno utilizzato il dispositivo, e sono stati valutati tre aspetti funzionali, che saranno successivamente analizzati e approfonditi.

Il primo aspetto analizzato riguarda la scelta dell'area da monitorare per garantire il funzionamento ottimale del dispositivo. È emerso che, per operare al meglio, il dispositivo necessita di una linea di visuale libera per individuare con precisione i veicoli erranti. Durante le lavorazioni nelle aree di cantiere 2 e 3 (righe 17 e 18 della tabella 39), la presenza di fronde e veicoli di servizio che ostruivano la visuale della telecamera ha ridotto l'efficacia del rilevamento. Per risolvere il problema, i ricercatori hanno posizionato la telecamera in una posizione più avanzata, evitando gli ostacoli. Tuttavia, questo richiede una rete wireless affidabile per garantire la comunicazione tra la telecamera e i dispositivi di allerta.

Un ulteriore aspetto analizzato durante le lavorazioni ha riguardato la scelta del supporto più adeguato per il dispositivo. Sono stati testati tre tipi di supporti per la telecamera: un treppiede standard di circa 2 metri di altezza, un treppiede speciale con un'altezza fino a circa 6 metri e un supporto magnetico da installare sui mezzi di supporto alle lavorazioni.

Il treppiede standard, pur essendo semplice da installare e utilizzare, presentava inconvenienti significativi: era necessario spostarlo ogni volta che il cantiere cambiava posizione e risultava instabile in presenza di vento.

Il treppiede speciale, invece, con un'altezza maggiore, permetteva di posizionare la telecamera a una quota superiore e quindi consentiva di coprire distanze di rilevazione più ampie. Tuttavia, tale supporto richiedeva un montaggio più complesso e tempi di installazione più lunghi. Inoltre, poiché la telecamera poteva essere posizionata a altezze notevoli, per il corretto funzionamento e tracciamento della poligonale di individuazione delle intrusioni si è reso necessario l'utilizzo di un dispositivo wireless per il controllo a distanza. Anche se questo aspetto non costituiva necessariamente uno svantaggio, requisito fondamentale era avere una connessione wireless efficace tra i vari componenti del sistema.

A differenza dei precedenti sostegni, il supporto magnetico si è dimostrato il più pratico e stabile, offrendo una piattaforma robusta e una maggiore resistenza al vento rispetto agli altri modelli. Montato su un veicolo, come illustrato in figura 131, questo supporto presentava il vantaggio di non richiedere reinstallazioni ad ogni spostamento del cantiere. Tuttavia, analogamente a quanto accadeva per il treppiede speciale, essendo fissato sul veicolo e quindi non sempre facilmente accessibile per la regolazione, è stato necessario utilizzare un dispositivo secondario, come un tablet, per controllare la telecamera e impostare a distanza la poligonale per l'individuazione delle intrusioni.



Figura 131_ Installazione del dispositivo di cattura delle immagini (cellulare) sui mezzi di servizio

L'ultimo aspetto analizzato durante le lavorazioni riguarda i falsi allarmi (FALSE POSITIVE), i test sul campo si sono rivelati essenziali per identificare le condizioni di innesco. La figura 132 illustra una situazione ricorrente in cui si sono verificati falsi allarmi. Questo è accaduto perché l'algoritmo di rilevamento del prototipo definisce un riquadro rettangolare intorno al veicolo rilevato (indicato con un rettangolo rosso), mentre le linee blu delimitano l'area monitorata. Quando questi due perimetri si intersecano, l'algoritmo interpreta l'intersezione come una possibile intrusione nell'area monitorata, generando così un allarme. Tuttavia, è stato osservato che il dispositivo generava allarmi anche in assenza di reali intrusioni, soprattutto quando la telecamera era posizionata lateralmente rispetto all'area da monitorare e un veicolo transitava nelle immediate vicinanze del dispositivo. Questo errore era essenzialmente dovuto a una posizione subottimale del dispositivo. Per ridurre tali falsi allarmi, i ricercatori hanno concluso che è preferibile collocare la telecamera il più possibile centrata rispetto alla corsia di cantiere, evitando angolazioni troppo defilate come quella mostrata nella figura 132. Inoltre, è consigliabile impostare una poligonale di controllo leggermente più distante, a circa cinquanta metri, per migliorare la precisione del sistema di monitoraggio.



Figura 132_Condizione di innesco involontario _ Problematica legata al funzionamento dell'algoritmo e della cattura delle immagini

In merito ai risultati del sondaggio somministrato agli operai che hanno testato il dispositivo nelle tre aree di cantiere, gli aspetti che hanno suscitato un riscontro positivo e ottenuto valutazioni elevate riguardano principalmente la facilità di installazione, l'uso intuitivo e la semplicità di configurazione del dispositivo. Al contrario, quelli che hanno ricevuto valutazioni più basse sono legati ai livelli di allarme dello speaker centrale e dei dispositivi personali. Sebbene questo possa inizialmente sembrare un difetto significativo, è importante ricordare che il dispositivo testato era ancora un prototipo. In particolare, per i dispositivi personali di allarme sono stati utilizzati i telefoni cellulari dei lavoratori, anziché strumenti dedicati. L'adozione di dispositivi progettati appositamente

o l'uso di strumenti professionali, come quelli impiegati per altre soluzioni già presentate, potrebbe migliorare sensibilmente questo aspetto.

Anche in questa fase, analogamente a quanto emerso durante i pilot test condotti in condizioni controllate, i lavoratori hanno suggerito possibili scenari e situazioni in cui, a loro avviso, l'uso del dispositivo sarebbe particolarmente indicato.

Nature of work:		Work Setting		Duration of Work	
Roadway Pavement	3	Urban	2	Long-Term Stationary	6
Utility repair/maintenance	2	Rural	2	Intermediate-Term Stationary	3
Roadway widening/construction	2	Low speed	1	Short-Term Stationary	1
Intersection signalization	1	Intermediate speed	1	Short Duration (work that occupies a location up to 1 hour)	2
		High Speed	5	Continuously Moving Mobile Operations	
		Low traffic volume	3	Intermittent Mobile Operations	1
		Average traffic volume	3		
		High traffic volume	5		

Tabella 44_Risultati del sondaggio somministrato agli operatori che hanno condotto le prove sul dispositivo in condizioni reali di cantiere

In questo contesto emerge chiaramente come gli operai, in contrasto con le valutazioni degli autori, ritengano che il dispositivo possa essere più efficace se impiegato su strade ad alta velocità e con un elevato volume di traffico. Per quanto riguarda il tipo di cantiere, è stato indicato come maggiormente adatto quello fisso e di lunga durata, mentre per i cantieri mobili non è stata espressa alcuna preferenza né valutazione.

4.3 - CONCLUSIONI

Nel corso di questo capitolo, si sono inizialmente presentati nove dispositivi innovativi per l'individuazione delle intrusioni, noti come WZIA (Work Zone Intrusion Alarm). Nel primo paragrafo, è stato descritto il funzionamento di ciascun dispositivo, illustrandone la tecnologia alla base, gli elementi che lo compongono e fornendo informazioni di natura generale. In seguito, si è proceduto con un'analisi più approfondita delle loro caratteristiche funzionali e prestazionali, valutandone le reali capacità operative. Per raggiungere questo obiettivo, sono stati esaminati report specifici dedicati a tali dispositivi, generalmente suddivisi in due sezioni. La prima riguardava i test in condizioni controllate (PILOT TESTING), utili per valutare la precisione degli allarmi, l'intensità e la durata delle segnalazioni, nonché la copertura delle aree di lavoro in relazione alla portata di trasmissione. Nella seconda parte, i dispositivi venivano testati in situazioni di cantiere reali (LIVE TESTING) per verificarne il funzionamento in condizioni operative e raccogliere i feedback dei lavoratori tramite sondaggi.

L'analisi di questi report, redatti in anni differenti, ha permesso inoltre di tracciare l'evoluzione dei dispositivi, evidenziando come i produttori abbiano concentrato i loro sforzi su specifici aspetti per migliorare continuamente i prodotti. Questo capitolo ha quindi fornito una comprensione dettagliata delle funzionalità di ciascun dispositivo e ha posto le basi per l'analisi che verrà condotta nel capitolo successivo. Nel prossimo capitolo, infatti, verrà esaminata l'efficacia di questi dispositivi nel contesto del caso studio descritto nel capitolo 2, con l'obiettivo di valutare quali tecnologie avrebbero potuto migliorare la sicurezza dell'area di lavoro e, eventualmente, prevenire l'incidente.

La tabella seguente riassume sinteticamente le principali informazioni relative a ciascun dispositivo.

DISPOSITIVO	COMPONENTI E ACCESSORI DEL SISTEMA	TECNOLOGIA	FUNZIONAMENTO	TIPOLOGIA DI ALLARME	DURATA ALLARME SONORO in [sec.]	INTENSITA' DELL'ALLARME SONORO in [dB] VALUTATA AD UNA DISTANZA DAL DISPOSITIVO DI ALLERTA DI:		MASSIMA DISTANZA DI INDIVIDUAZIONE DELLE INTRUSIONI*	MASSIMA DISTANZA DI TRASMISSIONE DEL SEGNALE DI ALLARME**	APPLICABILITA'	OSSERVAZIONI DI CARATTERE GENERALE
						0ft (0m)	300ft (91,4m)				
WAS (Work Alert System)	Sensore di pressione e tubo pneumatico; Dispositivo di allarme collettivo (Portable Alarm Case PAC), Dispositivo di allerta personale (Personal Safety Device PSD)	Sistema PNEUMATICO	Sensore di pressione utilizzato per rilevare il passaggio di un veicolo su un tubo pneumatico, con trasmissione del segnale di allarme ai dispositivi di sicurezza collettivi e individuali;	Sonoro; Luminoso; Feedback Aptico;	≈ 5	100	60	Tra sensore di pressione e il PAC: ≈300ft (91,4m)	Tra PAC e PSD: 150ft (45,7m)	Cantieri fissi di breve durata, puntuali o di dimensioni ridotte	Facilità e rapidità di installazione; portata di trasmissione del segnale modesta; necessario l'impiego di più dispositivi per un efficace monitoraggio/sorveglianza del cantiere
SonoBlaster	Meccanismo di innesco meccanico alimentato da una cartuccia di CO ₂	Sistema CINEMATICO	Quando un veicolo colpisce il dispositivo provocandone il ribaltamento, il meccanismo di innesco aziona l'allarme sonoro/la sirena; Innesco ad azionamento meccanico;	Sonoro	Variabile, tra 7 e 41	100	80	-	-	Cantieri fissi di lunga durata	Dispositivo più semplice e meno costoso; La movimentazione richiede cura per evitare attivazioni accidentali; Riscontrati più volte problemi al dispositivo di innesco dell'allarme; Allarme sonoro molto efficace e chiaro; richiede l'uso di più dispositivi per una copertura efficace del cantiere
Intellicone	<i>Cone Lamp</i> (sensori accelerometri e inclinometri); Dispositivo di allarme collettivo (Portable Site Alarm PSA)	Sistema CINEMATICO + RADIO	Un sensore integrato nel dispositivo, come un accelerometro, rileva l'impatto di un veicolo che provoca il ribaltamento. Il segnale di pericolo viene quindi trasmesso tramite radiofrequenza al sistema di allarme;	Sonoro e Luminoso	≈ 30	100	60	Con segnale radio: tra sensore e dispositivo di allarme PSA: 350ft (106,7m); Potenzialmente illimitata se si installano più dispositivi in serie	con segnale radio: tra sensore e sensore: 100ft (30,5m); tra PSA e PSA: 100ft (30,5m); con rete cellulare: tra PSA e PSA: illimitata	Cantieri fissi di lunga durata	Semplice da installare e configurare; La movimentazione richiede cura per evitare attivazioni accidentali; Su strade ad elevata velocità sono da prendere precauzioni per la stabilità dei coni al fine di evitare falsi allarmi; richiede l'uso di più dispositivi per una copertura efficace del cantiere
Single Sentry Beam	Emettitore laser singolo; Dispositivo di allarme collettivo (Portable Site Alarm PSA)	LIDAR + RADIO	Un fascio laser viene utilizzato per rilevare il passaggio di un veicolo. Successivamente, il segnale di allarme viene trasmesso via radiofrequenza al sistema di allarme;	Sonoro e Luminoso	≈ 30	100	60	Range massimo del laser: 115ft (35m); Tra l'emettitore laser e PSA: 175ft (53m)	con segnale radio: tra PSA e PSA: 100ft (30,5m); con rete cellulare: tra PSA e PSA: illimitata	cantieri fissi, chiusura di testata della corsia	Offre una copertura efficace e continua; non può collegarsi a più unità per estendere la portata; Peso del dispositivo è importante e lo rende difficile da movimentare in solitaria
AWARE (Advanced Warning and Risk Evasion)	<i>Raven</i> (Radar e sensore di orientamento); Dispositivo di allarme collettivo; Dispositivo di allarme personale (Worktrax)	RADAR	Dispositivo dotato di sensori per individuare e tracciare la traiettoria dei veicoli in avvicinamento;	Sonoro e Luminoso;	≈ 5	110	90	Range massimo di individuazione del sistema: 500ft (=152,4m)	Tra <i>Raven</i> e WORKTRAX: 400ft (=121,92m)	AWARE Sentry: cantieri fissi su strade a una carreggiata e una corsia per senso di marcia;	Flessibilità di installazione, può essere posizionato a terra o montato su un veicolo di supporto; Ottima capacità di individuazione delle intrusioni;

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI

Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

										AWARE in configurazione di individuazione delle intrusioni: Cantieri fissi e mobili di breve e lunga durata	Consente di tracciare in tempo reale la posizione dei lavoratori
Guardian Cone	Sensore di rilevamento dei passaggi; Dispositivo di allarme personale	RADAR	Dispositivo che, attraverso l'uso di sensori, rileva il passaggio dei veicoli, ne misura la velocità e invia successivamente un allarme al dispositivo personale di allerta.	Sonoro e feedback aptico	-	-	-	Tra sensore di rilevamento e dispositivo di allarme personale: 500ft (152,4m)	Coincide con la massima distanza di individuazione	Cantieri di breve durata, operazioni di lavoro in solitaria	Dispositivo non adatto ad essere usato su strade ad alta velocità e capacità; Semplice installazione e utilizzo
Alpha SafeNet Portable Overwatch Device	Emettitore laser e sensori; Dispositivo di allerta aggiuntivo: Overwatch Auxiliary Horn Unit (AHU); Dispositivo di individuazione aggiuntivo: Tubo pneumatico	LIDAR	Utilizzo di un fascio laser per rilevare il passaggio dei veicoli	Sonoro e luminoso	proporzionale al tempo in cui il veicolo viene rilevato dal fascio laser;	135	-	Range massimo del fascio laser: Modalità Targeting: 300ft (90m); Modalità Infinity: 700ft (200m); Durante i test provata solo fino a: 320ft (97,5m)	Tra l'emettitore laser e gli accessori: varia tra i 200ft (60,96m) e i 1000ft (304,8m) in base al modello; Durante i test provata solo fino a: 332ft (101,2m)	Cantieri fissi o mobili	Ottima copertura del cantiere; Flessibilità di installazione, può essere posizionato a terra o montato su un veicolo di supporto; Possiede numerosi accessori che forniscono più opzioni per l'individuazione
Wireless Sensor Network	<i>Sensor Node</i> ; <i>Central Hub</i> (nodo di gestione delle informazioni); Dispositivo di allarme collettivo e personale	ULTRASUONI + CINEMATICO	Dispositivo che utilizza un fascio di microonde per rilevare il passaggio di veicoli e integra accelerometri per determinare se il sensore è stato ribaltato a causa di un impatto con un veicolo	Sonoro e feedback aptico;	-	-	-	Range massimo del <i>Sensor Node</i> : 26m; Potenzialmente illimitata se si installano più dispositivi in serie;	-	Cantieri fissi di lunga durata	richiede l'uso di più dispositivi per una copertura efficace del cantiere; Sistema che incorpora due sistemi per individuare le intrusioni
Camera-Based Work Zone Intrusion Detection	Dispositivo di acquisizione delle immagini (telecamera); Dispositivo di allarme collettivo e personale	IMMAGINI + AI + IoT	Dispositivo che utilizza un algoritmo per analizzare le immagini raccolte da una telecamera, rilevando intrusioni di veicoli all'interno di un perimetro predefinito	Sonoro	-	-	-	Dimensione massima della poligonale per l'individuazione delle intrusioni: test condotti fino ad una distanza massima di 500ft (150m)	-	Cantieri fissi di lunga durata su strade ad alta capacità e velocità	Dispositivo con grande potenzialità. Necessita ancora di sviluppo. Usando apparecchi professionali si possono incrementare le prestazioni del dispositivo; Flessibilità di installazione, può essere posizionato a terra o montato su un veicolo di supporto

Tabella 45_ Tabella riassuntiva dei dispositivi di individuazione delle intrusioni (WZIA) esposti nel capitolo 4;

*Massima distanza di individuazione delle intrusioni: In relazione al dispositivo analizzato ha un duplice significato e può rappresentare l'effettiva distanza di rilevamento del dispositivo, come nel caso del sistema AWARE, oppure rappresenta la distanza tra il sensore di individuazione e il componente principale del sistema, come ad esempio per l'INTELLICONE (distanza "Sensor Lamp"- PSA);

**Massima distanza di trasmissione del segnale di allarme: intesa come la massima distanza alla quale il componente principale del dispositivo può comunicare efficacemente con gli accessori del sistema. Esempio: Dispositivo WAS_ distanza di comunicazione tra il componente principale (PAC) e il dispositivo di allarme personale (PSD);

CAPITOLO 5 - VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEI DISPOSITIVI INNOVATIVI NEL CONTESTO DEL CASO STUDIO

In questo capitolo vengono esaminati i dispositivi di rilevamento delle intrusioni descritti precedentemente, con l'obiettivo di valutarne l'applicabilità al contesto specifico del caso studio trattato nel secondo capitolo. La valutazione di ciascun dispositivo, in relazione al contesto dell'incidente, è stata effettuata mediante l'impiego di schemi esplicativi in grado di motivare l'efficacia delle diverse soluzioni e di individuare la tecnologia più adatta. Nella parte conclusiva del capitolo, per i dispositivi ritenuti maggiormente idonei, è stata eseguita anche una sintetica analisi dei costi, al fine di fornire una visione completa ed esaustiva delle soluzioni proposte.

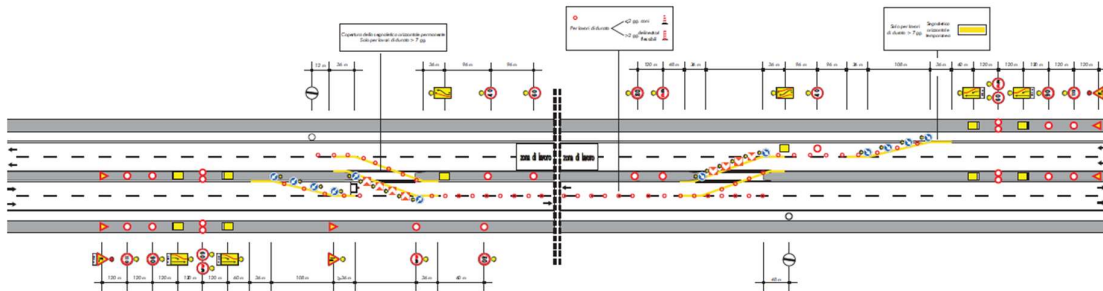


Figura 133_Schema normativo per l'installazione della segnaletica provvisoria di cantiere per una deviazione, con una sola corsia per senso di marcia

Si ricorda che il caso studio esaminato nel capitolo 2 riguarda un incidente stradale avvenuto su una tratta autostradale caratterizzata da due carreggiate, ciascuna con due corsie per senso di marcia. L'evento si è verificato in orario notturno, mentre una squadra di operai stava predisponendo la segnaletica per la delimitazione di un'area di cantiere destinata alla realizzazione di una deviazione, la quale avrebbe comportato la riduzione a una sola corsia per ciascun senso di marcia, in conformità con quanto illustrato nello schema (figura 133) riportato nel D.M. 2002 (7). Al momento dell'incidente, la squadra aveva completato l'installazione della segnaletica su oltre un chilometro, operando nella corsia di sorpasso, destinata alla chiusura per deviare il flusso veicolare dell'altra carreggiata.

Di seguito, i dispositivi di rilevamento delle intrusioni sono stati suddivisi in due categorie: la prima include quelli ritenuti “non adatti” alle condizioni specifiche del caso studio, mentre la seconda raccoglie quelli che avrebbero garantito un miglioramento della sicurezza nell'area di lavoro.

Dispositivi “non idonei”:

- **Work Alert System (WAS)**

- **SonoBlaster**
- **Intellicone**
- **Single Sentry Beam**
- **Guardian Cone**
- **Wireless Sensor Network (WSN)**

Dispositivi “idonei”:

- **Advanced Warning and Risk Evasion (AWARE)**
- **Alpha SafeNet Portable Overwatch Device**
- **Camera-Based Work Zone Intrusion Detection**

5.1 - ANALISI DEI DISPOSITIVI “NON IDONEI”

WAS:

Questo dispositivo è stato ritenuto non adatto al contesto del caso studio per ragioni di carattere operativo e logistico. Come evidenziato nel Capitolo 4, il WAS risulta più indicato per cantieri fissi e di piccole dimensioni, in quanto la sua configurazione, essendo di tipo discontinuo, non consente la creazione di una barriera di rilevamento continua. Pertanto, per ottenere una copertura completa e ottimale dell’area di cantiere, sarebbe necessaria l’installazione di un elevato numero di unità, rendendone complessa e poco pratica l’applicazione in un contesto operativo dinamico come quello del caso studio.

Di seguito, sono illustrate due possibili configurazioni per l’installazione del sistema WAS:

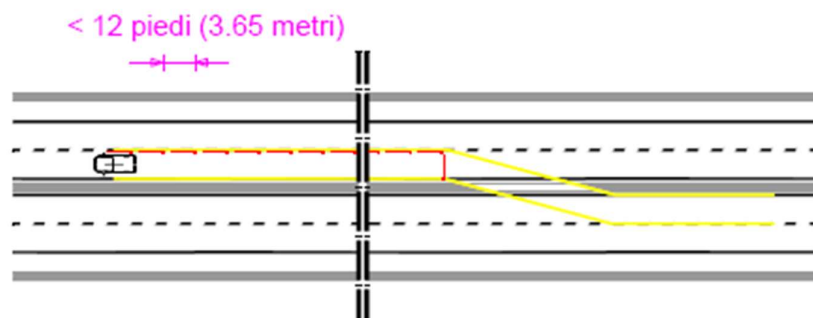


Figura 134_Prima configurazione _ Tubi pneumatici disposti parallelamente al flusso veicolare _ copertura del perimetro del cantiere

- Configurazione 1: tubi pneumatici disposti parallelamente al flusso veicolare, lungo l'intero perimetro dell'area da monitorare. In tale configurazione, l'operatore dovrebbe collocare progressivamente un nuovo tubo pneumatico a ogni avanzamento dei lavori, al fine di garantire una copertura completa della corsia da sorvegliare;

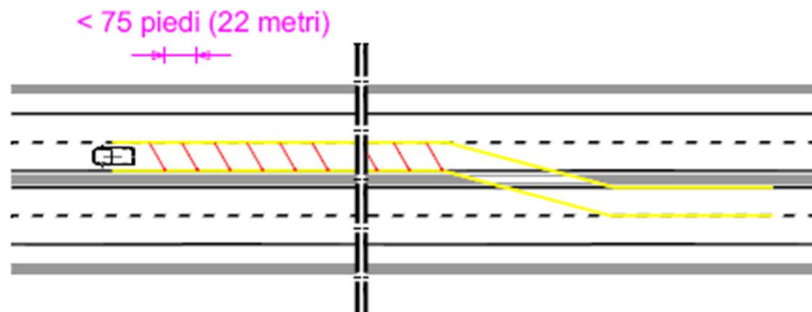


Figura 135_Seconda configurazione _ tubi pneumatici posti diagonalmente all'interno della corsia di cantiere

- Configurazione 2: tubi pneumatici installati in diagonale rispetto al senso di marcia. I sensori devono essere posizionati a una distanza che rispetti il raggio di trasmissione dei sensori di pressione, in modo da consentire la propagazione del segnale di allarme da un sensore all'altro fino al dispositivo di allarme collettivo (PAC). Secondo il report del 2019 (31), tale distanza è pari a 75 piedi (22,86 metri);

Nelle condizioni specifiche del caso studio, considerato che i lavoratori avevano già predisposto un tratto di cantiere lungo circa 1 km e che ogni tubo pneumatico del sistema WAS ha una lunghezza di 12 piedi (3,66 m), per garantire una copertura completa dell'area sarebbero stati necessari:

- Prima configurazione: circa 278 dispositivi per coprire il primo tratto di 1 km, a cui si aggiungerebbero ulteriori dispositivi per le successive estensioni del cantiere;
- Seconda configurazione: circa 46 dispositivi per coprire il primo tratto di 1 km, disponendoli alla massima distanza possibile (22 metri), con la necessità di installare ulteriori unità per le sezioni aggiuntive del cantiere.

In entrambi i casi, l'elevato numero di dispositivi necessari renderebbe l'installazione complessa e particolarmente dispendiosa in termini di tempo. Di conseguenza, si renderebbe necessaria un'operazione separata rispetto all'allestimento della segnaletica per la deviazione di carreggiata, determinando una duplicazione delle attività operative e, di fatto, la creazione di un secondo cantiere.

Inoltre, poiché la corsia monitorata sarebbe successivamente destinata a ospitare il flusso veicolare proveniente dal senso opposto per consentire il cambio di carreggiata, i dispositivi installati dovrebbero essere rimossi prima dell'apertura al traffico. Questo comporterebbe un'ulteriore esposizione degli operatori ai rischi stradali e un incremento del tempo complessivo richiesto per le operazioni, rendendo il sistema WAS inadatto in termini di efficienza e sicurezza.

SONOBLASTER, INTELLICONE E WIRELESS SENSOR NETWORK:

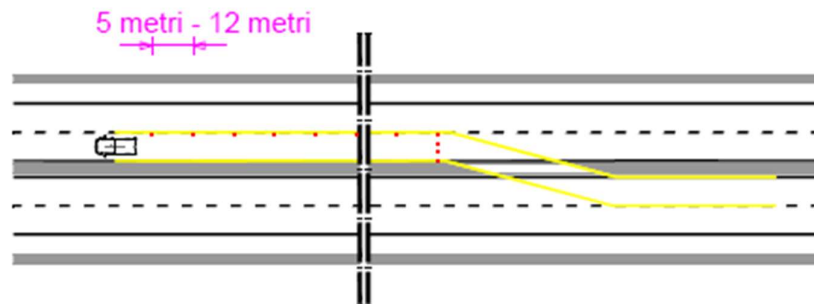


Figura 136_Installazione dei sistemi SonoBlaster, Intellicone e WSN sui dispositivi di delimitazione del cantiere _ copertura del perimetro del cantiere

Questi tre dispositivi sono stati raggruppati poiché condividono una configurazione di installazione simile: tutti sono concepiti per essere montati sui coni di delimitazione delle aree di cantiere. Questa caratteristica comune implica che, nel contesto del caso studio analizzato, hanno delle problematiche analoghe.

Criticità comuni:

Il montaggio dei sensori sui coni di delimitazione conferisce a questi sistemi un funzionamento discontinuo, poiché non costituiscono una barriera di rilevamento uniforme. Per ottenere una copertura completa dell'area di cantiere, è necessario installare numerosi dispositivi a intervalli regolari.

A differenza del SonoBlaster e dell'Intellicone, il Wireless Sensor Network (WSN) utilizza microonde per creare una barriera continua lungo tutto il perimetro. Tuttavia, anche questo dispositivo richiede di essere montato sui coni a una distanza massima di 5 metri tra un sensore e l'altro, poiché test condotti sul campo (discussi nel Capitolo 4) hanno dimostrato che distanze superiori compromettono l'affidabilità del sistema, riducendo la precisione delle rilevazioni. Pertanto, anche il WSN richiederebbe l'installazione di un grande numero di unità.

Un'ulteriore criticità riscontrata nel contesto specifico del caso studio riguarda l'incompatibilità tra questi dispositivi e il tipo di elementi di delimitazione utilizzati per il cantiere in oggetto. La relazione del Coordinatore per la Sicurezza in fase di Esecuzione (CSE), analizzata nel Capitolo 2, non specificava esplicitamente la durata del cantiere. Tuttavia, considerando la necessità di realizzare una deviazione, si può presumere che la durata dei lavori fosse superiore a due giorni. In tale contesto, come indicato nello schema relativo alla deviazione del D.M. 2002 (7), risulta necessario impiegare delineatori flessibili DE.FLE.CO. anziché coni standard. Di conseguenza, per installare i dispositivi sarebbe stato necessario aggiungere ulteriori coni, con il risultato di duplicare le attività lavorative e prolungare i tempi di installazione.

Per quanto riguarda le fasi di installazione e rimozione di tali dispositivi, è fondamentale considerare che essi sarebbero installati per proteggere gli operai durante le operazioni di allestimento della deviazione. Successivamente, si potrebbe optare per la loro rimozione al momento dell'apertura della deviazione al traffico oppure decidere di mantenerli installati per tutta la durata del cantiere. Entrambe queste opzioni, tuttavia, presenterebbero delle criticità.

Nel primo caso, analogamente a quanto già evidenziato per il WAS, se si decidesse di rimuovere i dispositivi prima dell'apertura della deviazione, si creerebbe una nuova esposizione al rischio per il personale. Inoltre, una volta rimossi i dispositivi, sarebbe necessario riposizionarli durante le operazioni di rimozione della deviazione per garantire la sicurezza dei lavoratori. In sostanza, questo comporterebbe due installazioni e due rimozioni dei dispositivi, esponendo i lavoratori al traffico quattro volte solo per le fasi di installazione e rimozione.

Nel secondo caso, qualora si decidesse di mantenere i dispositivi montati per l'intera durata del cantiere, il loro utilizzo non ostacolerebbe il traffico e garantirebbe una pronta attivazione per prevenire incidenti durante le operazioni di disinstallazione della deviazione. Tuttavia, lasciare i dispositivi installati per un periodo prolungato presenterebbe i seguenti svantaggi:

- **Danneggiamento e degrado:** I dispositivi, esposti al traffico per un lungo periodo, potrebbero subire danni da impatto o deteriorarsi, in particolare quelli alimentati a batteria;
- **Manutenzione continua:** La necessità di sostituire o ricaricare le batterie periodicamente comporterebbe interruzioni del traffico e richiederebbe ulteriori interventi di manutenzione, aumentando i rischi per la sicurezza dei lavoratori;

Focalizzandosi ora sulle condizioni note del caso studio analizzato, il distanziamento standard dei coni, indicato negli schemi segnaletici del D.M. 2002 (7), è di 12 metri. Per coprire quindi un tratto di 1 km già predisposto al momento dell'incidente, se si rispettassero le indicazioni riportate sugli schemi per la disposizione dei dispositivi delle aree di cantiere, sarebbero necessari circa 83 dispositivi, che avrebbero dovuto essere successivamente incrementati con l'avanzamento dei lavori. Questo distanziamento risulterebbe compatibile con quanto testato nel "Cantiere 2" del report del 2023, dove i dispositivi erano distanziati di 15 metri (50 piedi). Tuttavia, nel "Cantiere 4" dello stesso report, i dispositivi (in quel caso Intellicone) erano stati distanziati di 7,6 metri l'uno dall'altro (25 piedi). Se si considerasse quindi questo secondo distanziamento minore, 132 sarebbero i dispositivi da installare in una situazione di cantiere analoga a quella del caso studio analizzato. Concentrandosi invece sul WSN, come già richiamato in precedenza, il distanziamento massimo per un monitoraggio efficace risulta essere pari a 5m, il che richiederebbe circa 200 dispositivi per coprire lo stesso tratto di 1km di cantiere. Tutte queste considerazioni legate alla distanza di installazione tra i dispositivi implicano che, per garantire una copertura completa e uniforme dell'area, il numero di dispositivi necessari potrebbe variare tra le 83 e le 200 unità. Tuttavia, incrementare il numero di elementi per migliorare il monitoraggio perimetrale comporterebbe un'estensione significativa delle fasi di installazione e rimozione, complicando ulteriormente le operazioni e incrementando i rischi legati all'esposizione dei lavoratori al traffico.

Durante le prove in situazioni reali di cantiere riportate nel report del 2021 (32), inoltre, l'Intellicone ha evidenziato problemi di stabilità in contesti caratterizzati da elevati volumi di traffico e alte velocità. In particolare, le raffiche d'aria generate dai mezzi pesanti tendevano a ribaltare i coni su cui era montato, causando falsi allarmi. Sebbene questo comportamento non sia stato osservato per il SonoBlaster e il WSN, è ragionevole supporre che anche questi dispositivi potrebbero manifestare criticità analoghe nelle medesime condizioni operative.

Pertanto, per il contesto specifico del caso studio, si conclude che i dispositivi SonoBlaster, Intellicone e Wireless Sensor Network non siano adeguati, poiché l'elevato numero di elementi richiesti, unito alla complessità e ai rischi legati alle fasi di installazione e rimozione, renderebbe il loro impiego impraticabile e potenzialmente pericoloso.

SINGLE SENTRY BEAM:

Nel capitolo precedente, durante i test condotti sia in condizioni controllate che in situazioni reali di cantiere, il dispositivo Single Sentry Beam è stato sempre utilizzato per monitorare la testata della corsia chiusa al traffico, posizionandolo perpendicolarmente al flusso veicolare. Tuttavia, tale configurazione risulta inefficace nel contesto del caso studio, poiché non garantirebbe una copertura completa dell'area di cantiere.

Osservando la figura 137, che rappresenta la disposizione perpendicolare del Single Sentry Beam rispetto al flusso veicolare, emergono le seguenti criticità:

- Distanza di comunicazione limitata: Se si decidesse di utilizzare un solo dispositivo di allarme collettivo (PSA) posizionato sul mezzo di lavoro, si dovrebbe installare un Single Sentry Beam ogni 50 metri, ovvero la distanza massima di trasmissione del segnale di pericolo. Tuttavia, in questo modo solo il Single Sentry Beam più vicino al mezzo risulterebbe attivo, mentre gli altri, essendo troppo distanti, non potrebbero comunicare efficacemente con il PSA. Di conseguenza, la configurazione sarebbe inefficiente, in quanto prevedrebbe l'impiego di numerosi dispositivi, ma con la maggior parte inutilizzati.
- Per superare questo limite, sarebbe necessario disporre un PSA dedicato per ciascun Single Sentry Beam, collegandoli tutti alla rete cellulare più vicina. In tal modo si eliminerebbe il problema della distanza di comunicazione, ma si raddoppierebbe il numero di dispositivi da installare (Single Sentry Beam + PSA), complicando le operazioni di montaggio e gestione;
- Copertura delle intrusioni: Questa configurazione risulterebbe efficace solo per monitorare le intrusioni frontali nella corsia di cantiere, ma altamente inefficace nel caso di intrusioni laterali. Come illustrato in figura 137, la disposizione lascerebbe delle aree cieche non sorvegliate, attraverso le quali un veicolo errante potrebbe introdursi nell'area di lavoro;



Figura 137_ Installazione del dispositivo Single Sentry Beam _ Laser orientato in direzione perpendicolare rispetto al flusso veicolare

Una possibile alternativa di installazione consisterebbe nel posizionare il dispositivo direttamente sul mezzo di lavoro in movimento. In questo modo, nel caso di un'intrusione laterale, il sistema risulterebbe più efficace rispetto alla configurazione statica. Tuttavia, come evidenziato dai risultati delle prove condotte nel capitolo 4, bisogna considerare che la distanza di rilevamento del Single Sentry Beam è limitata a soli 35 metri (115 piedi), una portata modesta rispetto ad altri dispositivi, come ad esempio l'Alpha Safenet Portable Overwatch Device, che può individuare intrusioni fino a 200 metri.

Inoltre, esaminando la documentazione e i report disponibili, non risulta che il Single Sentry Beam sia stato mai impiegato in questa configurazione (ovvero montato su un veicolo di servizio), sollevando dubbi sulla reale efficacia e affidabilità di questa soluzione nel contesto operativo analizzato.

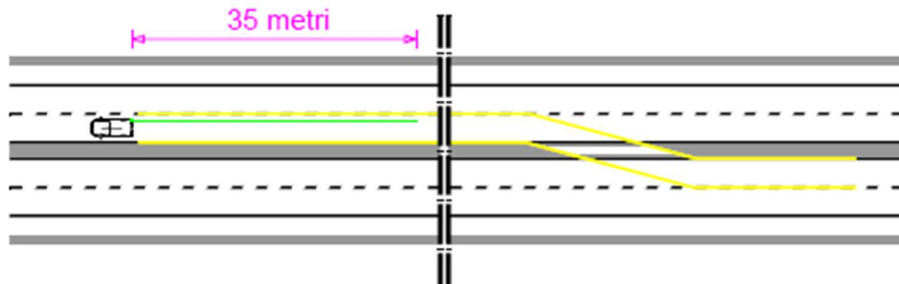


Figura 138_ Prima configurazione alternativa _ Dispositivo Single Sentry Beam installato sul mezzo d'opera

Un'ulteriore configurazione possibile prevederebbe l'integrazione tra il Single Sentry Beam e l'Intellicone (figura 139), sfruttando la compatibilità tra i due dispositivi, poiché entrambi sono prodotti dallo stesso fabbricante e utilizzano il medesimo sistema di allerta collettivo (PSA) per attivare l'allarme. In questo modo, si potrebbe ricorrere a un unico dispositivo di segnalazione per entrambi i sistemi, evitando sovrapposizioni che potrebbero generare confusione tra gli operai.

Tuttavia, anche questa soluzione presenterebbe le stesse criticità già evidenziate in precedenza: per garantire una copertura efficace di un'area di cantiere simile a quella analizzata nel caso studio, sarebbe necessario installare un numero elevato di unità sia di Intellicone sia di Single Sentry Beam. Di conseguenza, la problematica legata alla gestione e alla quantità di dispositivi necessari si riproporrebbe anche in questa configurazione mista, compromettendo l'efficienza e la praticità dell'implementazione.

Single Sentry Beam

Intellicone

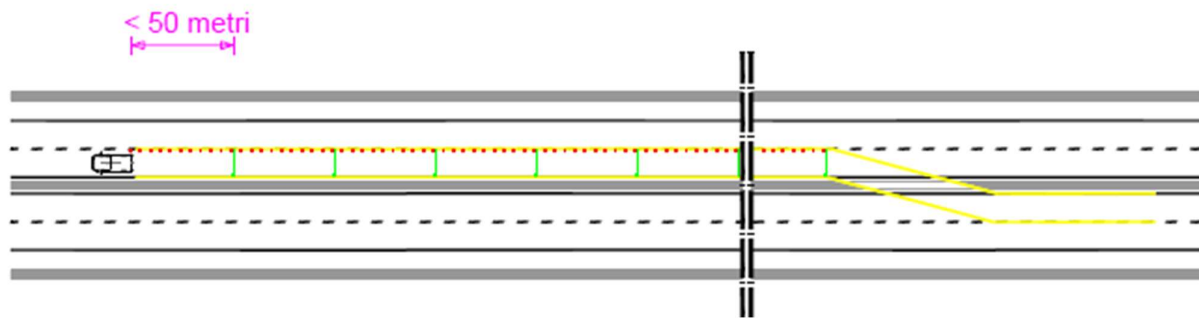


Figura 139_ Seconda configurazione alternativa _ Installazione integrata dei sistemi Intellicone e Single Sentry Beam

GUARDIAN CONE:

Come è stato descritto nel paragrafo 4.1, il Guardian Cone non è in grado di rilevare intrusioni, ma ha la funzione di registrare il passaggio di veicoli in corrispondenza del punto in cui viene installato. Il dispositivo, infatti, è stato progettato per avvisare un singolo lavoratore o una squadra ristretta del transito di un veicolo nei pressi del cono segnaletico su cui è montato, di conseguenza i produttori raccomandano l'uso di questo sistema su strade a basso traffico, considerando che l'efficacia diminuisce in contesti con volumi di traffico elevati. Considerando quindi il contesto del caso studio analizzato, l'incidente è avvenuto su un tratto autostradale, quindi in un ambito caratterizzato da velocità elevate e un'ampia capacità veicolare. Tuttavia, è importante notare che i lavori si stavano svolgendo di notte, quando il traffico risulta notevolmente ridotto e la visibilità è limitata. In tale contesto, un dispositivo come il Guardian Cone potrebbe comunque risultare utile per informare i lavoratori del passaggio dei veicoli, incrementando la loro consapevolezza e inducendoli a fermarsi temporaneamente per valutare il rischio prima di riprendere le operazioni. Ciò nonostante, è opportuno considerare le seguenti problematiche:

- Elevato numero di allarmi: se anche di notte si verificasse un numero significativo di transiti, il dispositivo invierebbe una quantità eccessiva di avvisi, con il rischio di generare un sovraccarico di informazioni. Questo potrebbe indurre i lavoratori a ignorare i segnali per adattamento, diminuendo la loro reattività in caso di reale pericolo;
- Limitazioni nel rilevamento delle intrusioni: il Guardian Cone, posizionato in corrispondenza del veicolo di supporto, non sarebbe in grado di identificare intrusioni di veicoli che

dovessero avvenire oltre tale posizione. Di conseguenza, in una situazione critica come quella del caso studio, l'incidente potrebbe verificarsi senza che il dispositivo fornisca alcuna segnalazione preventiva.

Per queste ragioni, l'utilizzo del Guardian Cone risulta inadatto per un cantiere su tratto autostradale, come quello esaminato nel caso studio, poiché non è in grado di garantire un livello di sicurezza sufficiente a prevenire le criticità rilevate.

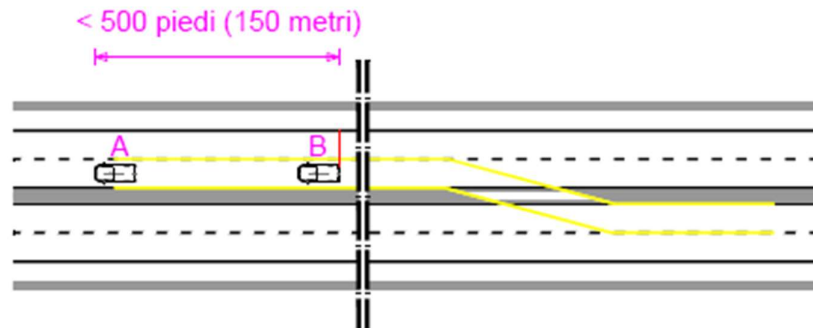


Figura 140_ Possibile configurazione di installazione del dispositivo Guardian Cone

In figura 140 sono indicati con la lettera A il mezzo delle lavorazioni, mentre con B è indicato il veicolo di servizio sul quale è montato il dispositivo Guardian Cone, con il sensore orientato perpendicolarmente al flusso veicolare. La distanza tra i veicoli A e B deve rispettare le indicazioni riportate nella figura, poiché esse rappresentano la massima distanza di trasmissione del segnale del dispositivo (vedasi capitolo 4).

5.2 - ANALISI DEI DISPOSITIVI “IDONEI”

I dispositivi AWARE, Alpha SafeNet Portable Overwatch Device e Camera-Based Work Zone Intrusion Detection sono stati ritenuti idonei per l'utilizzo nel contesto del caso studio poiché, se installati correttamente, avrebbero potuto incrementare il livello di sicurezza nel cantiere e potenzialmente contribuire a prevenire l'incidente mortale che ha coinvolto un operaio.

Questi tre dispositivi condividono due caratteristiche principali, che li distinguono dagli altri considerati non idonei:

- Monitoraggio continuo: ciascun dispositivo è in grado di sorvegliare ampie porzioni di cantiere con una singola unità, garantendo una copertura continua e omogenea, senza lasciare aree cieche o non monitorate;

- Installazione sui mezzi d'opera: tutti e tre possono essere montati direttamente sui veicoli di supporto alle lavorazioni. In questo modo, il sistema di monitoraggio segue automaticamente gli spostamenti delle operazioni nel cantiere, eliminando la necessità di continui interventi di installazione e rimozione durante le diverse fasi operative. L'installazione iniziale risulta quindi sufficiente per coprire l'intera durata dei lavori.

Di seguito, si riportano le caratteristiche specifiche di ciascun dispositivo e gli schemi di utilizzo ottimale nel contesto del caso studio.

AWARE:

Per quanto riguarda l'AWARE, considerando le condizioni del caso studio e i risultati ottenuti durante il pilot testing e il live testing, il dispositivo si dimostra potenzialmente efficace nell'incrementare la sicurezza dell'area di lavoro. Infatti, esso è capace di rilevare e tracciare i veicoli in transito nell'area monitorata, identificarne la traiettoria e determinarne la possibile intrusione di corsia frontale o laterale (vedasi schemi 89 e 90 del Capitolo 4).

Per tale dispositivo si possono considerare due possibili configurazioni per l'installazione. La prima (figura) prevede l'uso di un solo dispositivo, mentre nella seconda (figura) sono previste due unità al fine di ampliare l'area monitorata. Questa seconda configurazione può essere ulteriormente generalizzata: a seconda delle esigenze, è possibile installare un numero variabile di dispositivi (n), aumentando o riducendo la copertura dell'area in base alle necessità.

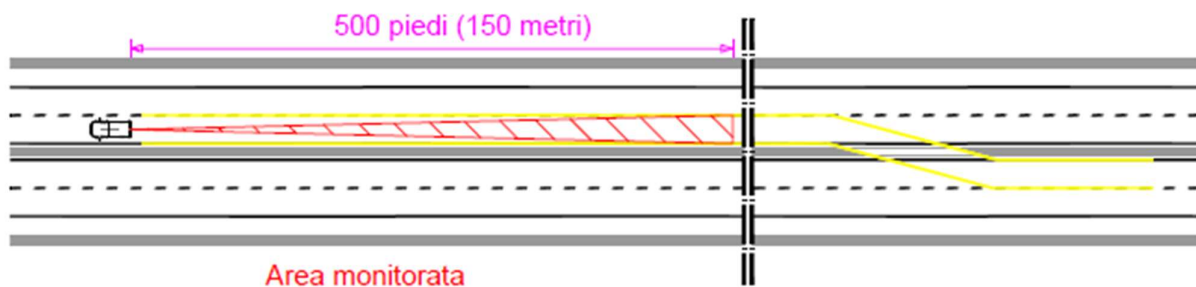


Figura 141_Prima configurazione di installazione _ Singolo dispositivo AWARE

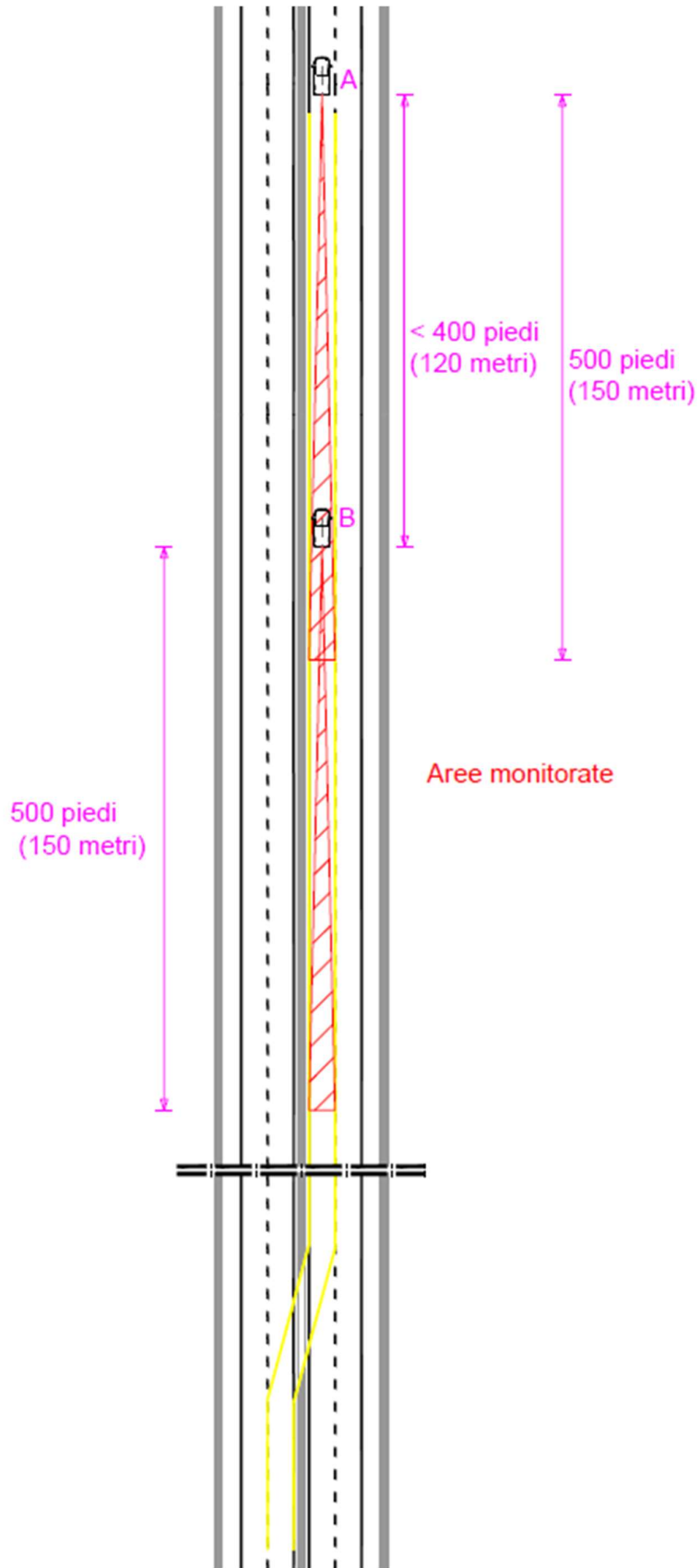


Figura 142_Secunda configurazione di installazione_ Doppio dispositivo AWARE

Relativamente alla configurazione con due dispositivi, è opportuno considerare i seguenti aspetti:

- La distanza tra i due mezzi deve essere mantenuta inferiore a 120 m (400 piedi). Questo valore, come evidenziato dai risultati dei test pilota e dalle indicazioni del fabbricante, rappresenta la distanza massima di trasmissione del segnale di pericolo dall'AWARE al Worktrax. Pertanto, se si mantiene questa distanza, il mezzo B sarà in grado di comunicare eventuali anomalie all'operaio che sta operando in corrispondenza del veicolo A. In questa configurazione, si presume implicitamente che le lavorazioni vengano eseguite vicino al mezzo A;
- La presenza del mezzo più a monte non comprometterebbe il corretto funzionamento del dispositivo, a condizione che questo avanzi a una velocità inferiore a 24 km/h (15 mph), come dimostrato dai test pilota (si veda lo schema... riportato in appendice);

ANALISI DEI COSTI:

Dal punto di vista dei costi, i report analizzati nel capitolo 4 forniscono indicazioni sui prezzi associati all'acquisto del dispositivo AWARE. In particolare, nel report del 2021 (32), il costo del sensore AWARE è indicato come pari a 15.000\$ (circa 13.383€) con il quale vengono forniti 4 Worktrax.

Per quanto concerne la manutenzione, si stima che il dispositivo/sensore principale, se trattato in modo appropriato, abbia una vita utile di almeno due anni. Per quanto riguarda i Worktrax, essendo dispositivi maneggiati frequentemente dai lavoratori e quindi più soggetti a usura e potenzialmente anche a danneggiarsi, non si dispone attualmente di una stima di durata, ma soltanto del loro costo di sostituzione, che si aggira sui 150\$ (circa 133,83€) per ogni unità.

ALPHA SAFENET PORTABLE OVERWATCH DEVICE:

Per tale dispositivo sono state considerate tre configurazioni in cui esso potrebbe risultare utile per salvaguardare la salute del lavoratore.

1° configurazione:

- Il dispositivo è posizionato parallelamente alla corsia, seguendo il flusso veicolare;
- Esso viene montato su un mezzo di cantiere in modalità INFINITY, il che consente un raggio d'azione del fascio laser di 200 m (700 piedi);

- In questa configurazione non è prevista la chiusura di testata della corsia né il suo monitoraggio perché è improbabile che un veicolo riesca a invadere la corsia di lavoro senza essere individuato per un tragitto di 200 metri, ma essendo l'evento comunque non impossibile sono state pensate due ulteriori configurazioni.

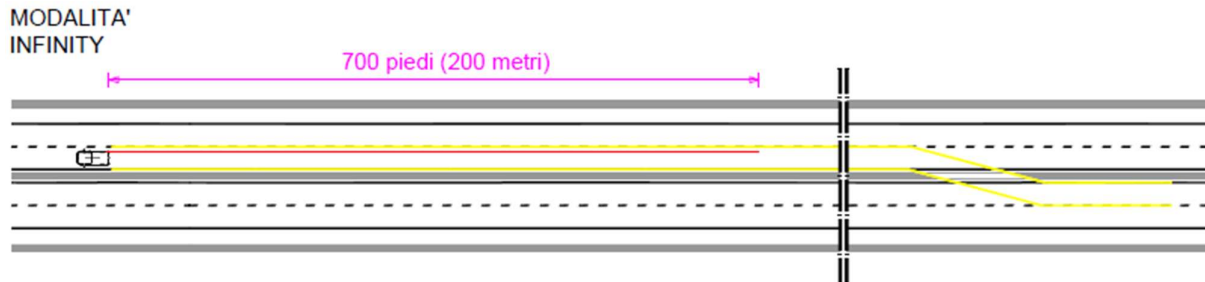


Figura 143_Prima configurazione di installazione _ Dispositivo singolo in modalità INFINITY

2° configurazione:

- Prevede l'utilizzo di due dispositivi: uno in modalità TARGETING e l'altro in modalità INFINITY;
- Osservando la figura 144 il mezzo contrassegnato con la lettera B funge da veicolo di supporto, mentre quello indicato con A è il veicolo principale delle lavorazioni;
- In modalità TARGETING, la massima distanza del fascio laser è inferiore a 90 m (200 piedi), mentre in modalità INFINITY si raggiungono i 200 m (700 piedi). La distanza tra i due mezzi deve rimanere costante, poiché il dispositivo non è dotato di un sistema come l'AWARE in grado di riconoscere e ignorare veicoli in movimento a bassa velocità. Se il mezzo di servizio entra nel fascio laser del veicolo A, potrebbe attivare l'allarme del sistema generando un FALSE POSITIVE;
- La distanza di 90m tra i due mezzi risulta ideale per permettere il collegamento del sistema posto in corrispondenza del mezzo B a un dispositivo di allarme aggiuntivo installato in sul veicolo A (luogo delle lavorazioni). Questo fa sì che, se il dispositivo in B dovesse rilevare un'anomalia, l'allerta è inviata anche al dispositivo di allarme aggiuntivo, informando così il lavoratore;



Figura 144_Secunda configurazione di installazione _ Doppio dispositivo

3° configurazione:

- Comprende un dispositivo principale e accessori compatibili del sistema, quali sensori di pressione e tubi pneumatici;
- In questa configurazione, viene utilizzato il dispositivo in modalità INFINITY (200 m di individuazione del fascio laser), insieme ai tubi pneumatici, disposti alla massima distanza di comunicazione, che varia tra i 60m (200ft) e i 300m (1000ft), per garantire una copertura continua della corsia monitorata;
- Per chiudere il primo chilometro, come nel caso studio, servirebbero in base al valore massimo e minimo del range di trasmissione:
 - Per 60m 17 dispositivi-tubi pneumatici;
 - Per 300m 3 dispositivi-tubi pneumatici;
- Rispetto ad altre configurazioni, questo sistema richiede meno accessori, consentendo un risparmio di tempo nelle operazioni di installazione e rimozione;

Alpha SafeNet Portable Overwatch Device
MODALITA' INFINITY

Accessori: Tubo Pneumatico

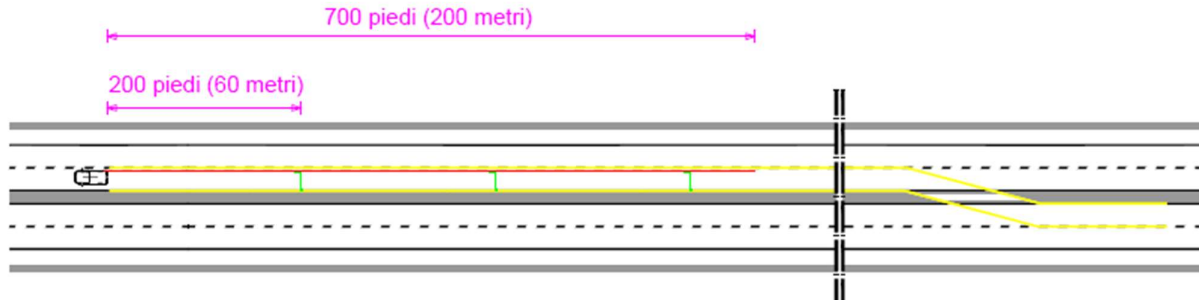


Figura 145_Terza configurazione di installazione _ Singolo dispositivo con l'aggiunta degli accessori di rilevazione (tubi pneumatici)

Per questo sistema, è fondamentale prestare attenzione alla posizione dell'operaio durante le lavorazioni. A differenza dell'AWARE, il dispositivo in questione attiva un allarme se l'operaio attraversa il fascio laser, generando quindi un falso allarme (FALSE POSITIVE). Pertanto, l'operaio dovrebbe essere collocato davanti al mezzo di lavoro per evitare attivazioni indesiderate del sistema.

ANALISI DEI COSTI:

Attualmente non sono disponibili informazioni specifiche sul costo del dispositivo, ma si può stimarne il prezzo considerando tutti gli elementi che lo compongono effettuando ricerche online sui costi di ciascuno di essi.

Dal sito del produttore, è emerso che il dispositivo utilizza un sensore LiDAR con spettro di luce a 905 nanometri e un raggio di rilevamento di circa 200 yard (183m). Il costo di questo sensore varia tra i 500\$ e i 2.000\$ (circa 448,3 € - 1.793,2 €) per unità.

Per gli altoparlanti, il produttore indica che emettono un allarme con un'intensità sonora di 135 dB. I costi per tali altoparlanti oscillano tra i 500\$ e i 1.500\$ (circa 448,3 € - 1.344,9 €), a seconda del modello e della qualità.

Inoltre, l'Alpha SafeNet Portable Overwatch Device è dotato di un dispositivo di segnalazione luminosa (LED ad alta intensità), il cui costo varia tra i 50\$ e i 200\$ (44,8€ - 179,3€), in base alla luminosità e alla configurazione scelta.

Altri costi legati alla parte hardware possono includere microcontrollori e cablaggi, con un costo stimato tra i 100\$ e i 300\$ (86,5€ - 268,6€), e involucri di protezione per contenere i componenti, con prezzi tra i 50\$ e i 200\$ (44,8€ - 179,1€).

Sommando tutte le voci, il range di prezzo delle forniture principali per il dispositivo è compreso tra:

- 1.200\$ e 4.200\$ (1.075€ – 3.761€);

È importante notare che questo range di prezzo rappresenta solo una parte del costo reale del dispositivo, poiché bisogna considerare anche i costi di assemblaggio, sviluppo, produzione e distribuzione.

Per quanto riguarda il costo degli accessori, come il dispositivo di allarme aggiuntivo e il sistema di individuazione delle intrusioni composto dal tubo pneumatico, si può effettuare una stima dei prezzi utilizzando come riferimento i costi di forniture simili. In particolare, si può considerare il costo del sensore di pressione con tubo pneumatico e il sistema di allarme collettivo del dispositivo WAS, entrambi valutati attorno ai 250\$ ciascuno. Pertanto, per ogni tubo pneumatico o dispositivo di allarme aggiuntivo utilizzato, si dovrebbero aggiungere circa 250\$ al range di costo già indicato per il dispositivo principale.

Questa stima permette di integrare i costi degli accessori nel costo totale del sistema, fornendo così un quadro più completo dei costi associati all'implementazione di questo dispositivo.

Di seguito i costi indicativi per le tre configurazioni proposte:

Schema 1:

- 1 solo dispositivo:
Costo: 1.200\$ - 4.200\$
Totale: 1.200\$ - 4.200\$ (1.075€ – 3.761€)

Schema 2:

- dispositivi:
Costo: 1.200\$ - 4.200\$ x 2 = 2.400\$ - 8.400\$
- Almeno un dispositivo di allarme aggiuntivo:
Costo: 250\$
Totale: 2.650\$ - 8.650\$ (2373€ - 7745€)

Schema 3:

- 1 solo dispositivo:
Costo: 1.200\$ - 4.200\$
- Tubi pneumatici (considerando un minimo distanziamento di 60 m):
Costo: 250\$ x 17 = 4.250\$ (solo per il primo km di cantiere)
Totale: 5.450\$ - 8.450\$ (4879,9€ - 7566€)

CAMERA-BASED WORK ZONE INTRUSION DETECTION:

I test effettuati sia in condizioni controllate che in situazioni reali di cantiere hanno dimostrato risultati promettenti e quindi si ritiene che il dispositivo abbia notevoli potenzialità per l'uso nel contesto del caso studio, ma ci sono alcune riserve da considerare riguardo al suo funzionamento.

Nel contesto specifico del caso studio, che si è svolto su un tratto autostradale rettilineo in un'area rurale, il dispositivo potrebbe funzionare in modo ottimale grazie all'assenza di interferenze e alla facilità di rilevazione dei veicoli in avvicinamento. Tuttavia, è fondamentale notare che durante i test non sono state eseguite prove in condizioni notturne, creando incertezze riguardo alla funzionalità del dispositivo in tali circostanze. È necessario quindi valutare se l'algoritmo implementato nel dispositivo sia in grado di individuare i veicoli anche di notte, in particolare considerando l'impatto dei fari sulla visibilità della telecamera. L'uso di telecamere notturne potrebbe risolvere gran parte del problema legato all'individuazione delle sagome, ma rimane il dubbio se i fari dei veicoli possano

causare un incremento delle dimensioni percepite, portando a falsi allarmi (FALSE POSITIVE) per mezzi che in realtà non invadono l'area monitorata.

Per quanto riguarda la disposizione del sistema di individuazione, in condizioni analoghe a quelle del caso studio è sufficiente utilizzare un solo dispositivo per una copertura adeguata. Tuttavia, se si desidera ampliare la zona di rilevazione, si potrebbe considerare l'installazione di un ulteriore dispositivo su un secondo mezzo di supporto. Tuttavia, è importante ricordare che, a differenza di quanto avviene con l'AWARE, il veicolo con il dispositivo aggiuntivo deve mantenere una distanza superiore rispetto alla dimensione dell'area monitorata dal primo dispositivo, per evitare che venga rilevato come un'intrusione e che, di conseguenza, si attivi l'allarme.

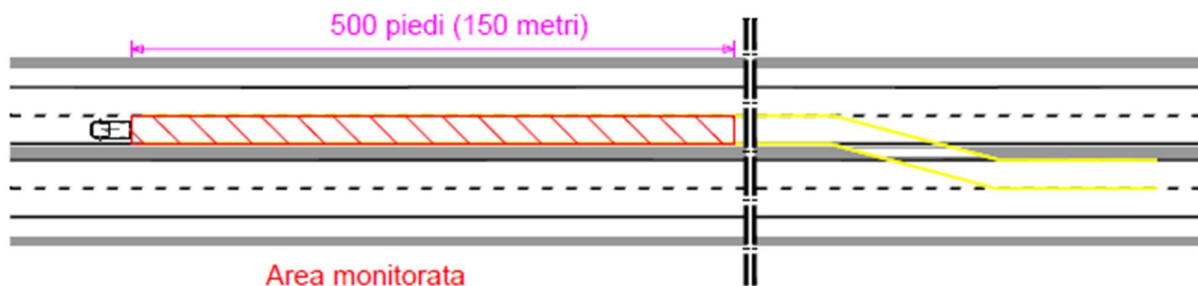


Figura 146_Configurazione di installazione con singolo dispositivo

ANALISI DEI COSTI:

Per tale dispositivo, si procede con un'analisi dei costi suddivisa in due parti distinte: la prima focalizzata sul costo del prototipo, considerando i dispositivi utilizzati dai ricercatori durante le prove; la seconda, invece, concentrata su forniture più raffinate e professionali, per valutare il costo potenziale del dispositivo in una versione ottimizzata e prodotta in scala.

Prima di procedere con l'analisi è necessario fare una premessa relativa al costo dell'implementazione dell'algoritmo e del conseguente software per l'analisi delle immagini e l'individuazione delle intrusioni. Tale costo è presumibilmente quello più rilevante, in quanto parte fondamentale per l'effettivo e efficace funzionamento del dispositivo, ma non avendo dati e competenze sufficienti per quantificarlo, la relativa voce di spesa verrà omessa. Ciò significa che il costo totale stimato sarà inferiore al costo reale del sistema. Inoltre, analogamente a quanto fatto per l'Alpha SafeNet Portable Overwatch Device, non verranno considerati i costi di produzione, assemblaggio e distribuzione del dispositivo.

Analisi 1: Costo del Prototipo

La versione prototipo utilizza componenti di basso costo facilmente reperibili sul mercato:

- Dispositivo di cattura immagini: I ricercatori hanno utilizzato la fotocamera di uno smartphone. Considerando un cellulare di fascia medio-alta, il costo si aggira tra i 300\$ e i 1.000\$ (267€ - 895€);
- Sistema di allarme sonoro: Il costo di una cassa audio bluetooth varia tra i 50€ e i 150\$ (50€ - 150€);
- Dispositivo di allarme personale: Durante le prove, sono stati utilizzati i cellulari dei lavoratori. Teoricamente, questo avrebbe un costo zero, ma se si desidera attribuire un costo, si potrebbe considerare quello di un telefono cellulare di, che varia tra i 300\$ e i 1.000\$ (267€ - 895€);
- Router WiFi: Il costo tipico per un router WiFi è tra i 20\$ e i 200\$ (17,9€ - 179€);
- Supporti: Treppiedi per montare cellulari e casse audio possono costare tra i 30\$ e i 100\$ ciascuno (26,86€ - 89,5€);

Costo totale stimato per la parte hardware: da 700\$ a 2.450\$ (626,8€ - 2.193,7€).

Analisi 2: Costo della Versione Professionale

In questa analisi si ricercano costi di elementi e forniture professionali:

- Telecamera professionale: il costo può variare tra 1.500\$ e 5.000\$ (1.343€ - 4.477€), a seconda della risoluzione e del campo visivo. Considerando che l'incidente oggetto del caso studio è avvenuto di notte, sarebbe necessario prevedere l'uso di telecamere a visione notturna, con un costo che si aggira tra i 3.000\$ e 7.000\$ (2.686€ - 6.267,8€);
- Computer o microcontrollore professionale: Per elaborare le immagini e processare l'algoritmo, il costo di tale fornitura può variare tra i 1.000\$ e 2.500\$ (895€ - 2.238,5€);
- Sistema di allarme professionale: Se si optasse per un sistema di allarme professionale, il costo sarebbe tra 500\$ e 1.500\$ (447,7€ - 1.343€);
- Dispositivo di allarme personale: Si considera il costo del dispositivo WAS, che è di 150\$ (134€) per ogni dispositivo utilizzato;
- Sistema di trasmissione delle informazioni: Si prevede l'uso di un collegamento Bluetooth o di una rete locale LPWAN (Low Power Wide Area Network), il cui costo varia tra 2.000\$ e 3.000\$ (1.790,8€ - 2.686€);

- Supporti e scatole per racchiudere i componenti: Il costo per queste forniture si stima tra 1.000\$ e 2.000\$ (895€ - 1.790,8€);

Costo totale stimato per la parte hardware della versione professionale: da 7.650\$ a 16.150\$ (6.849,8€ - 14.460,7€).

Queste analisi forniscono una visione chiara dei costi associati al dispositivo in entrambe le versioni, evidenziando le differenze significative tra il prototipo e la versione professionale.

5.2.1 - VALUTAZIONE DEL TEMPO DI REAZIONE PER GARANTIRE LA SICUREZZA DEL LAVORATORE

L'obiettivo principale dell'impiego di dispositivi per l'individuazione delle intrusioni nelle aree di cantiere è la prevenzione degli incidenti, garantendo così un adeguato intervallo di tempo affinché i lavoratori possano mettersi in salvo. In questa sezione si intende determinare il tempo di reazione necessario a garantire la sicurezza dei lavoratori, tenendo conto dei tre dispositivi identificati come "idonei" nel contesto del caso studio.

A tal fine, verranno analizzati due scenari:

- Il primo scenario simula un'intrusione frontale all'interno della corsia dedicata al cantiere (figura 147);
- Il secondo scenario esamina la distanza massima alla quale può verificarsi un'intrusione, al fine di concedere ai lavoratori un lasso di tempo sufficiente per mettersi in salvo (figura 148);

Di seguito sono presentate le schematizzazioni di questi due scenari, unitamente alle ipotesi preliminari necessarie per la conduzione dell'analisi.

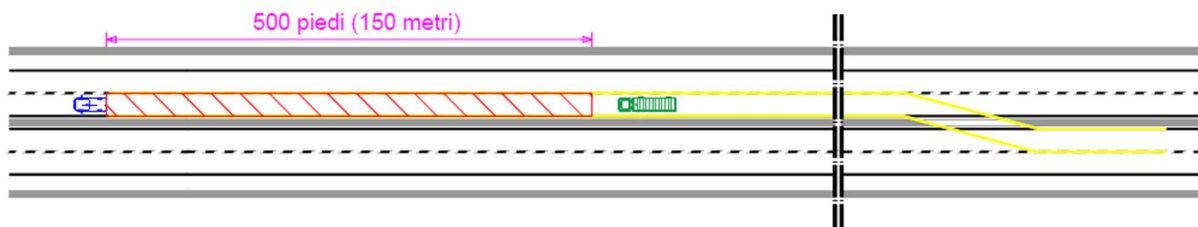


Figura 147_Prima configurazione di studio _ intrusione frontale nella corsia dedicata al cantiere

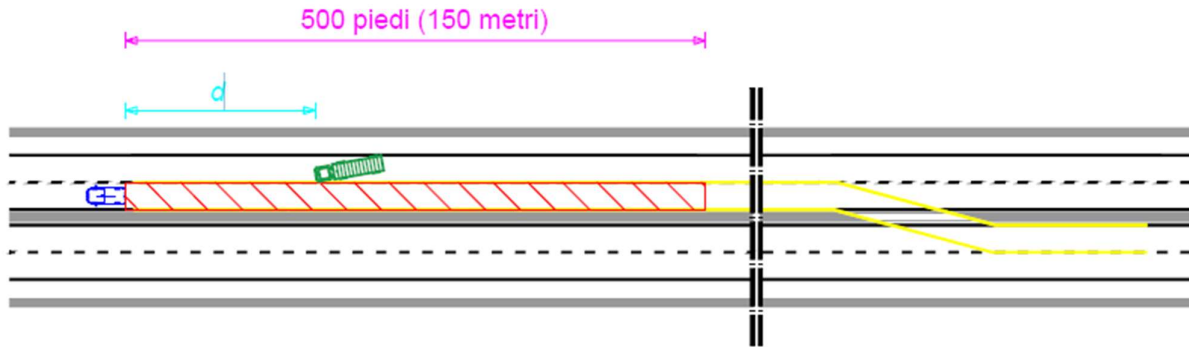


Figura 148_Secunda configurazione di studio _ intrusione laterale nella corsia dedicata al cantiere

Per una maggiore comprensione degli scenari riportati nelle figure soprastanti, si è deciso di rappresentare in rosso l'area monitorata dal dispositivo di individuazione delle intrusioni, in blu il mezzo d'opera, in verde il veicolo intruso e in celeste la distanza di intrusione.

Il tempo necessario per consentire all'operatore di mettersi in salvo è composto da due contributi distinti. Il primo riguarda il tempo di reazione del lavoratore, ossia l'intervallo che intercorre tra la ricezione di uno stimolo esterno, come un segnale acustico, visivo o aptico (vibrazione), e l'attuazione della risposta a tale stimolo. Il secondo, invece, corrisponde al tempo effettivo richiesto per allontanarsi fisicamente dal pericolo una volta percepito l'imminente rischio.

Primo contributo: Tempo di reazione

Per stimare questo primo contributo, si parte dall'adozione di un valore di riferimento, successivamente affinato in funzione delle specifiche condizioni del caso studio, così da ottenere un valore il più possibile aderente alla realtà. La scelta del valore base è motivata dai risultati sperimentali riportati nel report del 2023 (descritti nel paragrafo 4.2.2) (33), in cui i tempi di reazione dei lavoratori sono stati stimati attraverso l'analisi delle registrazioni video durante prove condotte in contesti reali. I tempi osservati risultano inferiori al secondo, anche se non è stato specificato il valore esatto. In questa sede, per semplicità, si considera un tempo "base" pari a 1 secondo.

Tuttavia, questo valore base deve essere ulteriormente specializzato, poiché il tempo di reazione di una persona è influenzato da diversi fattori, quali età, allenamento fisico, e stato di affaticamento. Nel contesto specifico del caso studio, le lavorazioni erano eseguite di notte e, in assenza di informazioni specifiche sull'operatore coinvolto, si assume che fosse un uomo con caratteristiche fisiche nella norma (non sportivo). La specializzazione del valore "base" di 1 secondo è stata effettuata attraverso l'analisi di due articoli scientifici.

Il primo articolo, intitolato “A Comparative Study of Visual and Auditory Reaction Times on the Basis of Gender and Physical Activity Levels of Medical First-Year Students” (38), esamina i tempi di reazione in risposta a stimoli visivi e acustici in base al genere e al livello di attività fisica (sportivo vs sedentario).

Dall’articolo si ricavano i seguenti dati:

Reaction time	Sedentary (n=100) mean±SD	Regularly exercising (n=20) mean±SD
VRT	250.12±18.50	235.00±13.02
ART	229.80±16.73	219.05±11.97

Tabella 46_ Tabella dei tempi di reazione in risposta a uno stimolo visivo (VRT) o acustico (ART) [millisecondi]

Considerando che i tre dispositivi selezionati come “idonei” hanno tutti un sistema di allarme sonoro, di seguito si valuterà un fattore di incremento per il tempo di reazione a stimoli sonori.

Fattore di incremento dovuto allo stato di allenamento:

$$f. i. = \frac{ART ("sedentario")}{ART ("allenato")} = \frac{229.80}{219.05} = 1.0491 \quad \text{Equazione 2}$$

La variazione percentuale è quindi:

$$v. p. = \frac{ART ("sedentario") - ART ("allenato")}{ART ("allenato")} * 100 = \frac{229.80 - 219.05}{219.05} * 100 = 4.91\% \quad \text{Equazione 3}$$

Per considerare invece le condizioni lavorative notturne del caso studio, è stato esaminato un secondo articolo, “Fatigue in Shift Work on Stamping Division Workers of PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia” (39), che riporta i tempi di reazione di una popolazione di operai in funzione dei turni di lavoro (giorno (Shift I), notte (Shift II)). I dati mostrano un incremento dei tempi di reazione durante il turno notturno rispetto al diurno.

Workers	Reaction Time Value (mili seconds)
Shift I	284.79 ± 27.98
Shift II	307.76 ± 44.14

Tabella 47_ Tempo di reazione in funzione dei turni lavorativi

Fattore di incremento dovuto ai turni notturni:

$$f. i. = \frac{RT ("turno notte")}{RT ("turno giorno")} = \frac{307.76}{284.79} = 1.0807 \quad \text{Equazione 4}$$

La variazione percentuale è:

$$v. p. = \frac{RT ("turno notte") - RT ("turno giorno")}{RT ("turno giorno")} * 100 = \frac{307.76 - 284.79}{284.79} * 100 = 8.07\% \quad \text{Equazione 5}$$

Combinando le due variazioni percentuali derivanti dall'analisi del livello di allenamento del lavoratore e dalle condizioni lavorative notturne, si ottiene un tempo di reazione (TR) corretto, specifico per il caso studio analizzato, pari a:

$$TR = 1 \text{ secondo} + 1 * 4.91\% + 1 * 8.07\% = 1,12 \text{ secondi}$$

Equazione 6

Secondo contributo: Tempo di fuga

Nel report del 2017 (27), già analizzato nel Capitolo 4, è riportato un grafico che illustra il tempo impiegato da una persona media per percorrere una determinata distanza. Tale riferimento è utilizzato per stimare il tempo necessario affinché un operaio possa attraversare una corsia stradale. Assumendo che l'operatore coinvolto fosse posizionato in prossimità della mezzeria della carreggiata e dovesse raggiungere lo spartitraffico per mettersi in salvo, coprendo una distanza di 3,75 metri (12,3 piedi) (vedasi figura 9), pari alla larghezza di una corsia autostradale, si stima un tempo di circa 1 secondo.

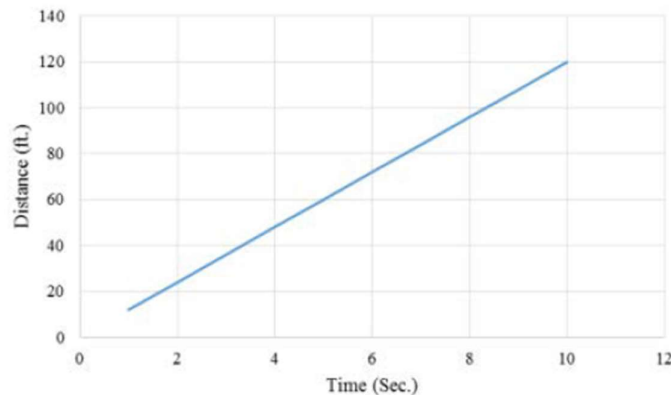


Grafico 77_ Tempo impiegato dal lavoratore per coprire una specifica distanza

Ipotesi aggiuntive:

Compatibilmente con le condizioni relative al caso studio, si riportano di seguito le seguenti ipotesi semplificative, necessarie per definire con maggiore accuratezza i tempi di reazione e il contesto operativo:

- La trasmissione del segnale di pericolo al momento dell'attivazione dell'allarme è considerata istantanea, senza ritardi.
- L'incidente è avvenuto in un contesto notturno, con livelli di rumore ambientale ridotti, garantendo la chiara udibilità dell'allarme.

- Gli allarmi dei dispositivi idonei erano collocati in prossimità delle attività, assicurando un'immediata percezione del segnale.
- Il lavoratore è ipotizzato in buona salute e con capacità uditive nella norma.
- Le condizioni atmosferiche al momento dell'incidente erano ottimali, poiché non sono riportate criticità nella relazione del Coordinatore per la Sicurezza in Esecuzione (CSE).

Considerando entrambi i contributi e le ipotesi aggiuntive, il tempo complessivo stimato per consentire al lavoratore di mettersi in salvo nel contesto del caso studio è pari a 2,12 secondi. Tuttavia, qualora le condizioni ipotizzate non fossero rispettate, il tempo di reazione risulterebbe inevitabilmente maggiore.

Determinato quindi il tempo minimo di 2,12 secondi per garantire al lavoratore di mettersi in salvo, si procede a valutare il tempo effettivamente a disposizione, considerando le due variabili chiave che influenzano la dinamica dell'incidente: la distanza del punto di intrusione del veicolo errante rispetto alla zona di lavoro e la velocità a cui il veicolo stesso procede. Nell'analisi si prenderanno in considerazione velocità a partire da 60 km/h, che rappresenta il limite minimo stabilito per i cantieri autostradali, con incrementi di 10 km/h fino a raggiungere 130 km/h, il limite massimo consentito sulle autostrade italiane in condizioni normali.

INTRUSIONE FRONTALE:

In questo contesto, è stata adottata una distanza di individuazione pari a 150 metri, corrispondente alla massima capacità di rilevamento dei dispositivi AWARE e Camera-Based Work Zone Intrusion Detection. Per quanto riguarda il dispositivo Alpha SafeNet Portable Overwatch Device, la configurazione INFINITY consente una distanza massima di rilevamento del fascio laser pari a 200 metri. Tuttavia, al fine di considerare le condizioni operative più critiche e stringenti, è stata adottata una distanza di 150 metri, la minore tra quelle disponibili, per garantire un'analisi che tenga conto degli scenari più sfavorevoli.

d	v		t
[m]	[km/h]	[m/s]	[sec]
150	60	16,7	9,0
	70	19,4	7,7
	80	22,2	6,8
	90	25,0	6,0
	100	27,8	5,4
	110	30,6	4,9
	120	33,3	4,5
	130	36,1	4,2

Tabella 48_tempi impiegati dai veicoli a giungere nella posizione del lavoratore

Nella tabella 48 sono riportati i due parametri considerati. In questo primo scenario, come indicato, il parametro relativo alla distanza d tra il punto di individuazione e la squadra di lavoro è stato mantenuto costante, ipotizzando che l'intrusione avvenisse all'interno della corsia occupata dal cantiere e che il rilevamento avvenisse alla massima distanza compatibile con le capacità operative dei dispositivi di individuazione (150 metri). I tempi t riportati rappresentano l'intervallo temporale che il veicolo impiegherebbe per raggiungere la zona di lavoro a partire dal momento dell'individuazione da parte del sistema di rilevamento delle intrusioni.

L'analisi dei dati in tabella evidenzia che, avendo fissato in 2,12 secondi il tempo necessario per consentire al lavoratore di mettersi in salvo, per ogni velocità considerata esso riuscirebbe a raggiungere una zona sicura, qualora l'intrusione avvenisse frontalmente nella corsia di lavoro. Tuttavia, come chiaramente illustrato nella tabella, all'aumentare della velocità del veicolo intruso, il tempo effettivamente a disposizione del lavoratore si riduce progressivamente. Tale osservazione conferma le conclusioni già emerse nei capitoli 1 e 2, secondo cui la velocità di marcia dei veicoli rappresenta un parametro di primaria importanza nella determinazione del rischio di incidenti in prossimità dei cantieri stradali.

Per quanto riguarda il dispositivo Camera-Based Work Zone Intrusion Detection, in conformità con le ipotesi aggiuntive riportate in precedenza, si è assunto che non vi fossero ritardi nella individuazione dei veicoli erranti, valutandolo dunque in una configurazione ideale, definita nel paragrafo precedente come configurazione "professionale". Tuttavia, è opportuno ricordare che tale dispositivo è ancora un prototipo e, come evidenziato nei test descritti nel capitolo precedente, è

stato osservato che all'aumentare della distanza tra il dispositivo e il veicolo da rilevare si registravano ritardi di individuazione, come riportato nella Tabella 38. In particolare, per una distanza di 150 metri, sono state effettuate tre misurazioni, evidenziando rispettivamente ritardi di 1430 millisecondi, 2680 millisecondi e 3010 millisecondi. Calcolando la media di questi valori e sottraendola ai tempi valutati e riportati in tabella 48, si ottengono i tempi effettivi da considerare per il lavoratore qualora si utilizzi il dispositivo Camera-Based Work Zone Intrusion Detection nella sua configurazione "prototipale" (ossia la configurazione attuale), ottenendo quindi:

d	v		t	t-ritardo individuazione	t-TOT
[m]	[km/h]	[m/s]	[sec]	[sec]	[sec]
150	60	16,7	9,0	2,4	6,6
	70	19,4	7,7		5,3
	80	22,2	6,8		4,4
	90	25,0	6,0		3,6
	100	27,8	5,4		3,0
	110	30,6	4,9		2,5
	120	33,3	4,5		2,1
	130	36,1	4,2		1,8

Tabella 49_ Caso particolare del sistema Camer-Based Work Zone Intrusion Detection in configurazione prototipale

Se si considerasse il dispositivo nella sua configurazione prototipale, qualora il veicolo intruso fosse rilevato alla massima distanza operativa del sistema e viaggiasse a una velocità di 120 km/h o superiore, i ritardi di individuazione impedirebbero di garantire il tempo minimo di 2,12 secondi per consentire al lavoratore di mettersi in salvo. Questa osservazione sottolinea quanto sia cruciale considerare l'impatto dei ritardi, che in questo caso specifico sono dovuti alle caratteristiche del dispositivo stesso, ma che potrebbero essere legati anche, per esempio, a ritardi di trasmissione del segnale di allarme dal sensore all'apparato di avviso. Qualsiasi ritardo quindi potrebbe influenzare significativamente l'esito dell'individuazione, riducendo drasticamente il tempo a disposizione per l'evacuazione dei lavoratori.

INTRUSIONE LATERALE:

In questo caso l'analisi risulta più complessa, poiché entrambi i parametri di velocità e distanza sono considerati variabili.

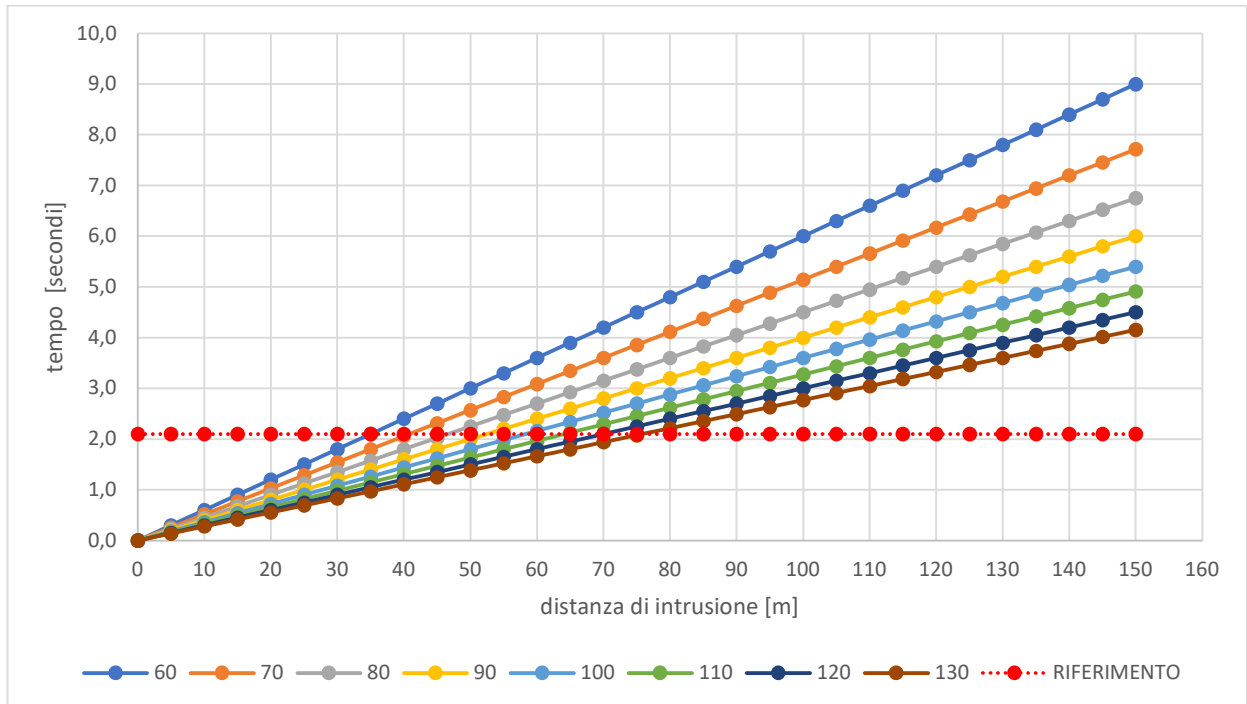


Grafico 78_ Relazione, in funzione della velocità di marcia dei mezzi, tra la distanza di intrusione del veicolo errante e il tempo a disposizione dei lavoratori per mettersi in salvo

Il grafico sopra illustrato rappresenta la relazione tra la distanza alla quale avviene l'intrusione e il tempo impiegato dal veicolo errante a percorrerla, in funzione della velocità di marcia del veicolo stesso. La linea tratteggiata rossa indica il tempo di riferimento $t=2.1$ secondi, considerato come il tempo minimo che il lavoratore deve avere a disposizione per mettersi in salvo. I valori riportati nella legenda corrispondono alle velocità del veicolo intruso, espresse in [km/h].

Come risulta evidente, all'aumentare della velocità di marcia, la distanza dell'intrusione deve necessariamente aumentare per garantire un tempo superiore a 2.1 secondi. A seguire, per maggiore chiarezza, sono riportati i valori soglia delle distanze minime che, per ciascuna velocità, permettono di ottenere un tempo t maggiore del tempo target di 2.1 secondi.

d	v		t
[m]	[km/h]	[m/s]	[sec]
40	60	16,7	2,4
45	70	19,4	2,3
50	80	22,2	2,3
55	90	25,0	2,2
60	100	27,8	2,2
70	110	30,6	2,3
75	120	33,3	2,3
80	130	36,1	2,2

Tabella 50_ Minime distanze di intrusione per le quali il tempo target da concedere al lavoratore per mettersi in salvo è rispettato

L'analisi del grafico 78 e dei dati riportati in tabella 50 evidenzia come, per ciascuna velocità presa in considerazione, esista una determinata distanza per la quale i dispositivi di rilevamento non sono in grado di garantire al lavoratore un tempo sufficiente per mettersi in sicurezza. Questa conclusione, tuttavia, è del tutto comprensibile: ad esempio, se si considerasse il caso limite di un'intrusione che avviene esattamente nel punto in cui si stanno svolgendo le lavorazioni – ipotesi improbabile ma non impossibile – l'unico modo per proteggere il lavoratore sarebbe attraverso l'installazione di barriere temporanee. Tuttavia, come evidenziato nel capitolo 2 durante l'analisi del caso studio, e nel capitolo 3 riguardo alle normative sulla segnaletica nei cantieri, l'adozione di barriere temporanee non è sempre la prassi. Nel caso studio specifico, per determinate lavorazioni le barriere non vengono predisposte a causa di limitazioni legate ai tempi operativi.

Queste osservazioni potrebbero quindi portare a pensare che i dispositivi di rilevamento delle intrusioni siano inefficaci, poiché, per distanze modeste tra il dispositivo e il punto di ingresso del veicolo nell'area di cantiere, non si riuscirebbe a garantire un tempo sufficiente per permettere al lavoratore di mettersi in salvo. Tuttavia, questa affermazione può essere confutata analizzando il caso studio in dettaglio. Come riportato nel sottoparagrafo 2.1.2, si è stimato che l'intrusione del veicolo pesante coinvolto nell'incidente descritto nel caso studio sia avvenuta a una distanza compresa tra 50 e 100 metri rispetto alla posizione della squadra di operai. Nel contesto reale del caso studio, in cui non erano presenti né barriere temporanee né dispositivi di rilevamento delle intrusioni, l'incidente ha avuto un esito fatale. Tuttavia, se uno dei tre dispositivi considerati "idonei" fosse stato installato, i dati riportati in tabella 51 mostrano chiaramente che questi strumenti avrebbero potuto garantire al lavoratore il tempo necessario per mettersi in salvo, evitando così l'evento mortale.

v	t ₅₀	t ₁₀₀
[km/h]	[sec]	[sec]
60	3,0	6,0
70	2,6	5,1
80	2,3	4,5
90	2,0	4,0
100	1,8	3,6
110	1,6	3,3
120	1,5	3,0
130	1,4	2,8

Tabella 51_ Tempi disponibili al lavoratore per mettersi in salvo

La Tabella 51 presenta i tempi a disposizione del lavoratore per mettersi in sicurezza in relazione alla velocità del veicolo pesante, considerando due scenari distinti: un'intrusione avvenuta a una distanza di 50 metri (t_{50}) e un'intrusione a 100 metri (t_{100}). Dall'analisi dei valori riportati, emerge chiaramente che, prendendo in esame il tempo t_{100} , indipendentemente dalla velocità del veicolo in questione, il lavoratore disporrebbe di un intervallo sufficiente per raggiungere una zona sicura. Al contrario, qualora si considerasse il tempo t_{50} , si evidenzia che, per velocità pari o superiori a 90 km/h, non sarebbe garantito il rispetto del tempo target di 2,1 secondi. Tuttavia, è opportuno sottolineare che il contesto di riferimento è un'area di cantiere, dove il limite di velocità è stabilito a 60 km/h. Di conseguenza, in condizioni di rispetto delle normative, il veicolo non dovrebbe superare tale velocità, assicurando pertanto un tempo sufficiente affinché il lavoratore possa mettersi al riparo.

Il punto centrale della questione, quindi, è che, sebbene tali dispositivi possano presentare limitazioni nel loro funzionamento, anche il solo fatto di poter salvare una vita rappresenta un traguardo significativo. Nel contesto del caso studio, in una situazione analoga, l'assenza di dispositivi di rilevamento delle intrusioni non permette di avvisare il lavoratore indipendentemente dalla distanza di intrusione – sia essa di 50 metri, 100 metri o 1 chilometro – esponendolo inevitabilmente a un rischio elevato e potenzialmente fatale. Al contrario, installando dispositivi di questo tipo, una buona parte delle intrusioni potrebbe essere gestita in modo efficace, migliorando sensibilmente la sicurezza dei lavoratori in cantiere. In questo modo, l'utilizzo di tali strumenti potrebbe realmente contribuire a innalzare in modo significativo il livello di sicurezza nei cantieri stradali.

5.3 - VALUTAZIONI FINALI

Dall'analisi condotta in questo capitolo è possibile trarre alcune considerazioni rilevanti:

- Come già evidenziato nel capitolo 4 e ulteriormente approfondito in questo capitolo, la scelta del dispositivo da adottare risulta di fondamentale importanza. Sebbene tutti i sistemi analizzati siano progettati per incrementare la sicurezza nei cantieri stradali tramite l'individuazione di eventuali intrusioni da parte di veicoli erranti, ciascun dispositivo presenta caratteristiche che lo rendono più o meno idoneo a seconda del contesto operativo specifico. Pertanto, l'efficacia complessiva dipenderà dalla corretta selezione in base alla configurazione del cantiere e al tipo di lavorazioni da proteggere;
- Nella presente analisi si è implicitamente presupposto che la responsabilità della sicurezza ricada esclusivamente sul lavoratore. Tuttavia, è necessario considerare anche il comportamento del conducente del veicolo intruso. In tal senso, dispositivi come il sistema AWARE e l'Alpha SafeNet Portable Overwatch Device potrebbero rivelarsi più efficaci, poiché dotati di allarmi sia sonori sia luminosi. Tali segnali, oltre ad avvisare il personale in cantiere, attirano l'attenzione del conducente, aumentando la probabilità di una correzione tempestiva della traiettoria. Ne consegue un duplice effetto protettivo che non si limita alla sola sicurezza del lavoratore;
- Nonostante i dispositivi di individuazione delle intrusioni possiedano delle limitazioni intrinseche, la loro adozione rappresenta un passo fondamentale per migliorare la sicurezza nei cantieri stradali e proteggere la vita dei lavoratori, dimostrando che ogni intervento volto a prevenire gli incidenti può avere un impatto cruciale sulla salvaguardia delle persone;
- È opportuno sottolineare che tali dispositivi devono essere integrati con adeguate procedure operative e con i dispositivi di protezione già esistenti, al fine di costituire un ulteriore livello di prevenzione e protezione per i lavoratori. In ogni caso, la formazione, l'informazione e l'addestramento del personale, nonché la sensibilizzazione degli utenti della strada, rimangono elementi imprescindibili, ai quali si deve aggiungere l'utilizzo congiunto dei dispositivi di prevenzione e dei sistemi di protezione al fine di contribuire in modo significativo a ridurre i rischi e migliorare la sicurezza nei cantieri stradali;

CONCLUSIONI

Le autostrade italiane sono caratterizzate da un'elevata incidenza di cantieri stradali in presenza di viabilità con una inevitabile interferenza tra le attività e i flussi veicolari. Pertanto, il rischio incidente in corrispondenza dei cantieri rappresenta una criticità che è stata oggetto di diverse discussioni sia a livello nazionale che internazionale. In particolare, nel presente lavoro di tesi si è posta l'attenzione sul pericolo di intrusione veicolare dall'esterno verso l'interno del cantiere con il rischio di investimento dei lavoratori.

Per identificare correttamente l'ambito di ricerca della tesi, si è proceduto preliminarmente ad una analisi approfondita del fenomeno dell'incidentalità stradale per individuarne le cause associate. A tale scopo, si è presentata una panoramica della situazione dei sinistri nel nostro paese elaborata utilizzando le informazioni tratte dalla banca dati dell'ISTAT. Successivamente, l'attenzione è stata rivolta nello specifico agli incidenti con il coinvolgimento degli operai presenti nei cantieri stradali, avvalendosi dell'ausilio di studi e dati raccolti dall'INAIL e dall'Osservatorio ASAPS (Associazione Sostenitori e Amici della Polizia Stradale). Sebbene il numero complessivo di vittime possa sembrare contenuto rispetto ad altre tipologie di sinistri, questa problematica non è da sottovalutare poiché ne va della sicurezza e della salute di lavoratori che sono intenti a svolgere il proprio lavoro. Oltre ad individuare le fonti di rischio si è cercato di individuare soluzioni efficaci per garantire condizioni di lavoro sicure e ridurre al minimo il rischio di intrusione e investimento.

Dopo questa valutazione di carattere generale, si è passati all'analisi di un caso specifico relativo ad un incidente con esito mortale avvenuto su una tratta autostradale interessata da lavori, sottoposto alla nostra attenzione dalla società Tecne S.p.A. (gruppo Aspi). Questo caso studio si è rivelato di rilevante importanza ai fini di questa trattazione, perché ha fornito lo spunto per addentrarci ancora di più nella problematica dell'incidentalità.

Attraverso la revisione della documentazione, si è cercato di comprendere se vi fossero state criticità nelle misure di sicurezza adottate (sistemi di avviso e/o schemi di segnalamento temporaneo), tuttavia l'analisi non ha rilevato anomalie evidenti nel contesto del caso studio facendo ricadere le motivazioni dell'incidente ad una velocità eccessiva, una distrazione e/o sonnolenza del guidatore e quindi ad un mancato rispetto delle regole da parte dei conducenti.

Un ulteriore passo avanti sui contenuti del lavoro di tesi è scaturito dalla ricerca di motivazioni in grado di spiegare la scelta di non impiegare nel cantiere oggetto di analisi l'uso dei dispositivi di

protezione temporanei più comunemente noti con il nome di barriere New Jersey, che avrebbero potuto salvaguardare l'incolumità dell'operaio intento all'allestimento del cantiere. Si sono, quindi, analizzate le normative per il segnalamento temporaneo di aree di cantiere sia in ambito nazionale sia nei principali paesi europei. Da tale analisi, si è riscontrata la totale assenza di prescrizioni specifiche ed è emerso che l'uso di tali barriere è affidato alla discrezione del coordinatore della sicurezza in fase di progetto (CSP). Pertanto, sarebbe opportuno sviluppare linee guida più precise a livello nazionale ed europeo, per uniformare le scelte progettuali e garantire una maggiore tutela.

Data questa carenza normativa, l'analisi si è, poi, orientata verso l'identificazione di alternative progettuali per incrementare la sicurezza nei cantieri in assenza di barriere temporanee e ci si è focalizzati sui Work Zone Intrusion Alarms (WZIA), dispositivi innovativi che permettono di individuare tempestivamente le intrusioni di veicoli erranti nelle aree di cantiere avvisando i lavoratori e offrendo loro il tempo necessario per mettersi in sicurezza. Sono stati, quindi, presi in considerazione nove dispositivi e ne sono state analizzate le caratteristiche tecniche, i principi di funzionamento e i risvolti applicativi in contesti reali di cantiere.

A valle di questa analisi conoscitiva si è cercato di applicare le conoscenze acquisite al contesto del caso studio preso in considerazione, arrivando alla conclusione che con almeno tre dispositivi (WZIA), se utilizzati correttamente, si sarebbe potuto prevenire il sinistro e, di conseguenza, salvare la vita del lavoratore.

Questo studio ha evidenziato, quindi, che l'adozione di dispositivi innovativi per il rilevamento delle intrusioni può contribuire a migliorare la sicurezza dei lavoratori nei contesti in cui non vengono utilizzate le barriere di protezione temporanee e rappresentarne una valida alternativa. Tuttavia, ulteriori sperimentazioni sul campo sarebbero necessarie per valutare l'efficacia di queste tecnologie in condizioni operative reali. Sarebbe, allora, necessario che a livello ministeriale e degli enti concessionari delle infrastrutture italiane vengano effettuati degli investimenti e ricerche su questi dispositivi al fine di poterli adottare dopo una serie di test sul campo e la verifica delle loro prestazioni in diversi contesti operativi.

In conclusione, va ribadito che questi dispositivi rappresentano un'opzione valida per la sicurezza nei cantieri stradali, ma non va dimenticato che il loro utilizzo dev'essere affiancato dalle buone pratiche di sicurezza, dalla formazione, informazione e addestramento del personale e dalla sensibilizzazione degli utenti della strada.

APPENDICE 1 - SISTEMA AWARE - CONFIGURAZIONI DI PROVA AGGIUNTIVE

In questa sezione sono presentati gli schemi e le considerazioni aggiuntive relative ai risultati dei test condotti sul dispositivo AWARE, così come riportati nel report CLOSED COURSE PERFORMANCE TESTING OF THE AWARE INTRUSION ALARM SYSTEM (35).

CHIUSURA DI UNA CORSIA IN UN TRATTO RETTILINEO:

Le traiettorie A e B, illustrate rispettivamente nelle figure 149 e 150, rappresentano situazioni che possono verificarsi durante il normale funzionamento del sistema AWARE. In questi casi, l'attivazione dell'allarme non era prevista, poiché tali scenari non costituiscono un'intrusione nell'area di lavoro. Coerentemente con quanto atteso, durante i test l'allarme del sistema AWARE non si è attivato.

In particolare, la traiettoria A rappresenta un veicolo che effettua un cambio di corsia, ma su corsie non monitorate dal sistema AWARE, mentre la traiettoria B descrive un veicolo che percorre la corsia adiacente a quella controllata dal sistema, senza entrare nell'area di sorveglianza.

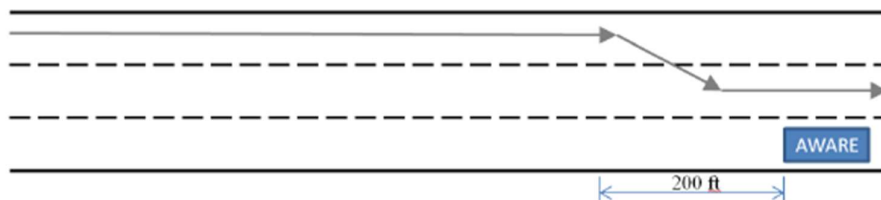


Figura 149_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettoria A

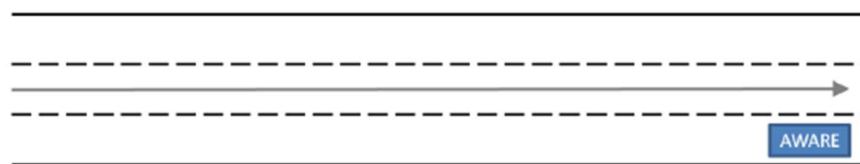


Figura 150_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettoria B

Per quanto riguarda la traiettoria D, figura 151, essa è stata utilizzata per simulare l'avvicinamento di un veicolo di servizio all'interno dell'area controllata dal sistema AWARE, viaggiando a una velocità pari o inferiore alla soglia impostata dal produttore di 15 mph (24,1 km/h). In base a queste condizioni, il sistema non dovrebbe generare alcun allarme, e durante i test, come previsto, non si sono verificati falsi allarmi.

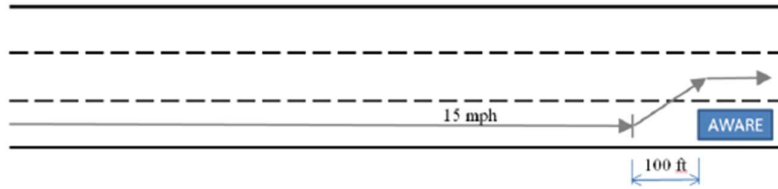


Figura 151_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettorie D

CHIUSURA DI UNA CORSIA IN UN TRATTO IN CURVA A DESTRA E A SINISTRA:

Nei test condotti su traiettorie curvilinee, il sistema di allarme non ha generato alcun segnale durante nessuna delle traiettorie A (figura 152) e B (figura 153), confermando così la risposta appropriata del sistema, in linea con quanto previsto e già osservato in condizioni analoghe su tratto rettilineo.

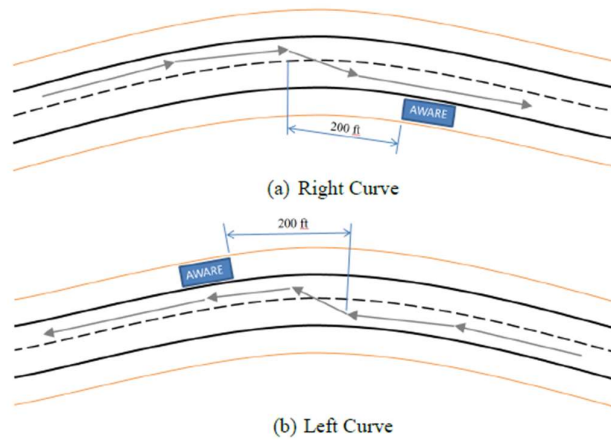


Figura 152_ Configurazione di prova su un tratto curvilineo _ Traiettorie A
a) curva a destra
b) curva a sinistra

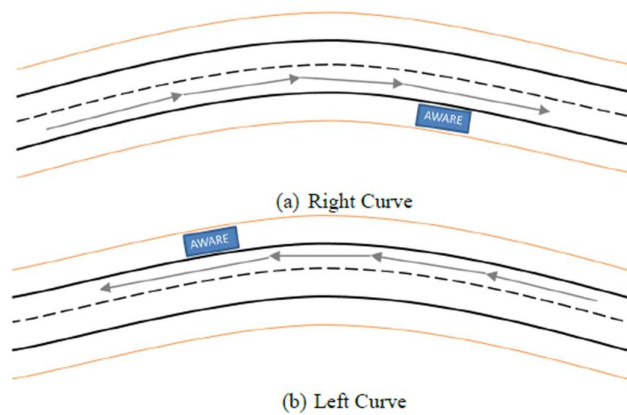


Figura 153_ Configurazione di prova su un tratto curvilineo _ Traiettorie B
a) curva a destra
b) curva a sinistra

Per quanto riguarda la traiettoria C rappresentata in figura 154, il veicolo target è stato sempre individuato correttamente in tutti e 12 i passaggi effettuati. Analogamente a quanto osservato sui test effettuati sul tratto rettilineo, era previsto che il WORKTRAX posizionato a 0 piedi dal dispositivo si attivasse, mentre quelli a 300 piedi (91,4 metri) e 400 piedi (121,9 metri) non si attivassero, poiché l'intrusione era programmata per verificarsi solo a partire da 300 piedi.

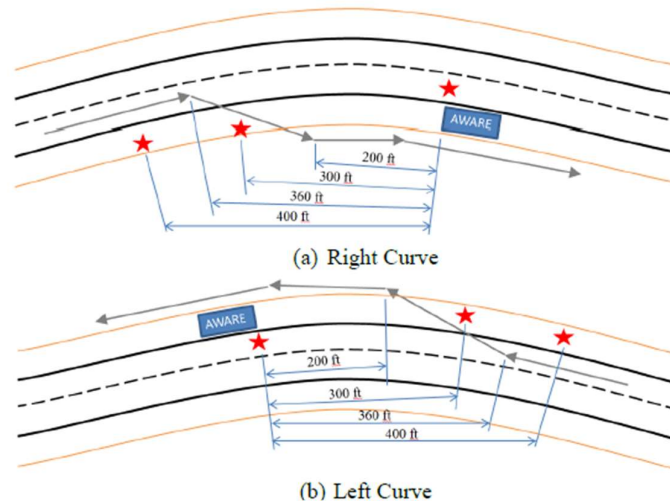


Figura 154_ Configurazione di prova su un tratto curvilineo_ traiettoria C
a) curva a destra
b) curva a sinistra

OPERAZIONE DI SEGNALAZIONE:

Entrando nel dettaglio dei risultati ottenuti dai test condotti sul dispositivo AWARE SENTRY, per quanto riguarda la traiettoria F, rappresentata in figura 155, il dispositivo non ha attivato come previsto alcun allarme, poiché questa traiettoria simulava una situazione in cui il passaggio dei veicoli era autorizzato. Al contrario, nella traiettoria G (figura 155), l'allarme si è attivato correttamente in quanto simulava il passaggio di un veicolo mentre il dispositivo AWARE SENTRY era in modalità STOP, periodo durante il quale nessun veicolo avrebbe dovuto transitare. Nella traiettoria G, il dispositivo ha attivato l'allarme a una distanza media di 452 piedi (137,7 metri), risultato che rientra nel range massimo di rilevamento delle minacce del dispositivo AWARE, dichiarato come 500 piedi (152,4 metri).

SICUREZZA NEI CANTIERI AUTOSTRADALI
Analisi critica sui sistemi innovativi per la riduzione del rischio di investimento

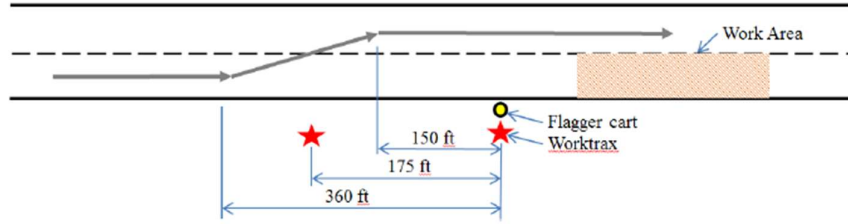


Figura 155_Configurazione di prova per il dispositivo AWARE in modalità Sentry_ Traiettorie F e G

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1_Segnaletica di avvicinamento_ In alto a sinistra Segnale di Pericolo; In alto a destra Segnale di prescrizione; In basso Segnali di Indicazione	43
Figura 2_Segnaletica di posizione _ Segnali Complementari.....	44
Figura 3_Segnaletica di Fine Prescrizione	44
Figura 4_Deviazione con una sola corsia per senso di marcia su carreggiata a due corsie _ Parte terminale dello scambio con rientro dei veicoli deviati sulla carreggiata di appartenenza	46
Figura 5_Deviazione con una sola corsia per senso di marcia su carreggiata a due corsie _ Parte iniziale dello scambio di carreggiata	47
Figura 6_parte iniziale dello scambio di carreggiata _ A: riduzione numero di corsie; B: stabilizzazione del flusso di circolazione; C: Scambio sulla carreggiata opposta di una corsia; D:separazione delle correnti di circolazione opposte.....	48
Figura 7_Cantiere mobile su carreggiata a due corsie _ chiusura della corsia di sorpasso _ La segnaletica di preavviso è posta su veicoli sulla corsia di emergenza	50
Figura 8_Segnali mobili di Preavviso e Protezione montati sui veicoli operativi	51
Figura 9_ Sezione strada di categoria A _ Autostrada.....	55
Figura 10_ Immagine da Google Maps_ Dettaglio di un tratto autostradale a due corsie per senso di marcia.....	56
Figura 11_ Schema segnaletico per la configurazione di scambio di carreggiata.....	57
Figura 12_ Chiusura della corsia di sorpasso: arrivo del mezzo d'opera e della squadra di lavoro...	58
Figura 13_ Chiusura della corsia di sorpasso: trasporto della segnaletica sul margine sinistro della corsia di sorpasso	58
Figura 14_ Chiusura della corsia di sorpasso: Inizio dell'installazione del raccordo obliquo per la chiusura della corsia di sorpasso.....	58
Figura 15_ Chiusura della corsia di sorpasso: Installazione del raccordo obliquo completata.....	59

Figura 16_ Chiusura della corsia di sorpasso: Inizio della posa dei segnali complementari (coni, delineatori flessibili, ecc...) per la delimitazione longitudinale dell'area di cantiere o per la separazione dei due flussi veicolari contrapposti	59
Figura 17_ Chiusura della corsia di sorpasso: Corretta procedura e comportamento da attuare per la posa dei segnali complementari	59
Figura 18_ Configurazioni di aree di cantiere analizzate nell'articolo per autostrada con due corsie per senso di marcia.....	62
Figura 19_ Configurazioni di aree di cantiere analizzate nell'articolo per autostrada con tre corsie per senso di marcia.....	63
Figura 20_ Frequenza percentuale degli incidenti mortali e con infortuni dovuti a errori dei conducenti.....	64
Figura 21_ Frequenza percentuale degli incidenti mortali e con infortuni suddivisi in fasce orarie giornaliere	65
Figura 22_ Layout della strada rappresentata nella simulazione di guida.....	73
Figura 23_ Layout di chiusura di una corsia in cantiere autostradale.....	75
Figura 24_ Dispositivo di protezione modulare _ Barriera "New Jersey"	79
Figura 25_ Disposizione delle barriere "New Jersey" sulla carreggiata	79
Figura 26_ Ricovero dei mezzi d'opera protetto da barriere temporanee _ nel dettaglio di sinistra effettuato sulla corsia di emergenza_ nel dettaglio di destra effettuato sulla corsia di sorpasso	81
Figura 27_ Ricovero dei mezzi d'opera su piazzola di sosta _ Tre possibili alternative	81
Figura 28_ Coni per la delimitazione dell'area di cantiere _ Immagine presa dalla normativa di riferimento	82
Figura 29_ Barriera normale, griglia di sbarramento e paletti di delimitazione _ Immagini tratte dalla normativa di riferimento	82
Figura 30_ Faro di avvertimento _ Immagine tratta dalla normativa di riferimento	83

Figura 31_da sinistra: Soglie direzionali con altezza compresa tra 2,5 cm e 12 cm; Guardrail con altezza tra 12 cm e 25 cm; Dispositivi di protezione temporanei (TSE) con un'altezza di almeno 50 cm	83
Figura 32_Schema segnaletico estratto dalla normativa tedesca di riferimento _ Disposizione della segnaletica provvisoria di cantiere per lavori su margine destro della carreggiata	85
Figura 33_Schema segnaletico estratto dalla normativa tedesca di riferimento _ Disposizione della segnaletica provvisoria di cantiere per lavori che interessano la corsia di sorpasso e lo spartitraffico tra le due carreggiate	86
Figura 34_Dispositivi per la delimitazione dell'area di cantiere _ K 5 a: Coni; K 5 b: Picchetti di segnalazione; K 5 c: paletti di delimitazione; K 5 d: Marcatori	87
Figura 35_ Barriere modulari temporanee	88
Figura 36_Dispositivi modulari di ritenuta; a destra in calcestruzzo prefabbricato; a sinistra in metallo	89
Figura 37_Dettaglio relativo a uno scambio di carreggiata (Basculement) nel quale sono indicati i dispositivi da usare per realizzare il raccordo obliquo (Biseau) e la separazione dei flussi di traffico (Balisage)	90
Figura 38_Dettagli sulla disposizione dei differenti tipi di dispositivi per la delimitazione della zona di lavoro a bordo strada	92
Figura 39_Dettagli sulla disposizione dei differenti tipi di dispositivi per la delimitazione della zona di lavoro sulla corsia di marcia	93
Figura 40_Schema segnaletico estratto dal manuale operativo francese _ Disposizione della segnaletica provvisoria di cantiere per lavori su margine destro della carreggiata	94
Figura 41_Schema segnaletico estratto dal manuale operativo francese _ Disposizione della segnaletica provvisoria di cantiere per lavori che interessano la corsia di sorpasso.....	95
Figura 42_Dispositivi discontinui per la delimitazione delle aree di cantiere. Partendo da in alto a sinistra: barriera normale; coni; fari per potenziare la segnaletica nelle ore notturne; marcatori cilindrici. I pittogrammi che costituiscono la figura sono tratti dal manuale "Know Your TRAFFIC SIGNS" (24).....	96

Figura 43_Schema segnaletico relativo a lavori che interessano la corsia destra (corsia di sorpasso)98

Figura 44_Schema segnaletico che rappresenta la chiusura della corsia di destra e la corsia centrale con due raccordi obliqui.....99

Figura 45_Tabella estratta dalla normativa di riferimento inglese _ Dettagli sulla segnaletica da disporre100

Figura 46_Tabella estratta dalla normativa di riferimento inglese _ Dettagli sulla segnaletica da disporre100

Figura 47_componenti del sistema WAS.....109

Figura 48_Scala in Db dei livelli sonori di rumori quotidiani110

Figura 49_componentistica del sistema SonoBlaster111

Figura 50_Portable Site Alarm (PSA)113

Figura 51_Intellicone System Cone Lamp_ Unità di rilevamento delle intrusioni113

Figura 52_Installazione dell'Unità di rilevamento delle intrusioni del sistema Intellicone su un dispositivo standard di delimitazione di cantiere114

Figura 53_Dettaglio della pulsantiera del dispositivo PSA114

Figura 54_Tipologie di PSA presenti in commercio.....115

Figura 55_Allarme luminoso del PSA_ immagine tratta dal report "Evaluation of Work Zone Intrusion Alarms" (31)116

Figura 56_Single Sentry Beam.....116

Figura 57_Range di rilevamento del sistema Single Sentry Beam117

Figura 58_Interconnessione del dispositivo Single Sentry beam con il sistema Intellicone118

Figura 59_Componenti del Sistema AWARE118

Figura 60_AWARE in configurazione di "Individuazione delle intrusioni di corsia"119

Figura 61_AWARE SENTRY Figura 62_componenti del sistema in configurazione AWARE Sentry

Figura 63_Regioni di individuazione delle intrusioni	120
Figura 64_GUARDIAN CONE_ a sinistra è raffigurato il dispositivo montato su un cono ordinario per il segnalamento di cantiere _a destra si osserva un dettaglio del dispositivo	124
Figura 65_Ricevitore personale indossato sul gilet da cantiere.....	125
Figura 66_Range massimo di trasmissione del segnale tra il sensore e il dispositivo di allarme personale.....	125
Figura 67_Funzionalità aggiuntive del dispositivo Guardian Cone	126
Figura 68_ ALPHA SAFENET PORTABLE OVERWATCH DEVICE.....	127
Figura 69_montaggio del dispositivo su veicolo di supporto alle lavorazioni	127
Figura 70_Accessori e dispositivi aggiuntivi del sistema ALPHA SAFENET PORTABEL OVERWATCH DEVICE_ a sinistra è raffigurato il sensore pneumatico (tubo giallo), mentre a destra è riportato il dispositivo di allarme portatile (scatolotto arancione).....	128
Figura 71_ Raffigurazione dell'uso dei dispositivi aggiuntivi del sistema	128
Figura 72_Raffigurazione della capacità del dispositivo di comunicare contemporaneamente con molteplici accessori	129
Figura 73_Sensor Node	130
Figura 74_Installazione del Sensor Node su un cono stradale standard	130
Figura 75_Architettura Hardware del Sensor Node	131
Figura 76_Orologio programmabile scelto come dispositivo di allarme personale	132
Figura 77_Comunicazione tra il CENTRAL HUB e i dispositivi di allarme personali e i Sensor Node	132
Figura 78_Elementi che compongono il dispositivo	134
Figura 79_Condizioni di prova _ In arancione è rappresentata la poligonale sorvegliata dal dispositivo durante il funzionamento	134
Figura 80_Disposizione dello speaker audio nell'unità di allarme dei dispositivi Intellicone, AWARE e WAS	140

Figura 81_ Schematizzazione della configurazione di prova per determinare il numero di falsi allarmi del dispositivo WAS	142
Figura 82_ Accumulo di ghiaccio e condensa in corrispondenza dell'alloggiamento della cartuccia di CO2 del dispositivo SonoBlaster	147
Figura 83_ Valutazione dell'intensità sonora dell'allarme del dispositivo in presenza di fonti rumorose esterne _ Primo scenario di prova	150
Figura 84_ Valutazione dell'intensità sonora dell'allarme del dispositivo in presenza di fonti rumorose esterne _ Secondo scenario di prova	151
Figura 85_ Configurazione di prova per determinare la massima distanza di trasmissione del segnale di allarme del dispositivo Intellicone	153
Figura 86_ Configurazione di prova per la determinazione del tasso di attivazione dell'allarme del sistema Intellicone	156
Figura 87_ Immagine raffigurante i test per la determinazione del massimo range di individuazione dei veicoli erranti.....	159
Figura 88_ Configurazioni aggiuntive di prova: a) dispositivo allineato con l'asse della corsia monitorata b) dispositivo disassato di 10° a sinistra rispetto all'asse della corsia monitorata c) dispositivo disassato di 10° a destra rispetto all'asse della corsia monitorata d) dispositivo inclinato rispetto alla verticale.....	161
Figura 89_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettoria C.....	162
Figura 90_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettoria E.....	162
Figura 91_ Configurazione di prova su un tratto curvilineo _ Traiettoria E a) curva a destra b) curva a sinistra	164
Figura 92_ Configurazione di prova per il dispositivo AWARE in modalità Sentry _ Traiettoria H....	167
Figura 93_ Configurazione di prova per il dispositivo AWARE in modalità Sentry _ Traiettorie I e J	169
Figura 94_ Prima configurazione di prova per la determinazione del tasso di attivazione dell'allarme del sistema AWARE	172
Figura 95_ Seconda configurazione di prova per la determinazione del tasso di attivazione dell'allarme del sistema AWARE	173

Figura 96_Terza configurazione di prova per la determinazione del tasso di attivazione dell'allarme del sistema AWARE	174
Figura 97_Installazione del dispositivo Guardian Cone per le prove in condizioni controllate	176
Figura 98_Installazione del dispositivo Alpha SafeNet Portable Overwatch Device per le prove in condizioni controllate.....	177
Figura 99_Installazione dell'accessorio Overwatch Auxiliary Horn Unit (AHU).....	178
Figura 100_Parametri che influenzano l'individuazione dei veicoli.....	179
Figura 101_Valutazione dei falsi allarmi dispositivo WSN _ Schematizzazione della configurazione di prova	183
Figura 102_Immagine tratta dai test pilota condotti sul dispositivo Camera-Based WZ.....	185
Figura 103_Installazione nell'area di cantiere del sistema AWARE Sentry _ Prima configurazione di cantiere	198
Figura 104_Installazione nell'area di cantiere del sistema Intellicone _ Seconda configurazione di cantiere	198
Figura 105_Abbattimento dei coni con "sensor lamp" a causa delle turbolenze generate dal passaggio di mezzi pesanti.....	199
Figura 106_Installazione nell'area di cantiere dei sistemi Intellicone e WAS _ Terza configurazione di cantiere	199
Figura 107_Dispositivo di allarme collettivo (PSA) installato sulla vibrofinitrice.....	201
Figura 108_Dispositivi di allarme collettivo (PSA) installato sul rullo compattatore	201
Figura 109_Installazione nell'area di cantiere dei sistemi Intellicone e WAS _ Quinta configurazione di cantiere.....	202
Figura 110_Installazione nell'area di cantiere dei sistemi Intellicone e WAS _ Prima configurazione di cantiere	207
Figura 111_Installazione parallela al flusso veicolare dei tubi pneumatici del sistema WAS _ Chiusura perimetro area di cantiere	207
Figura 112_installazione dei dispositivi di allerta collettivi (PAC) sui mezzi di servizio	208

Figura 113_ Installazione dei "sensor lamp" sui coni di delimitazione dell'area di cantiere.....	208
Figura 114_ Installazione dei dispositivi di allarme collettivi (PSA) del sistema Intellicone	209
Figura 115_ Procedure di installazione e rimozione dei "sensor lamp" _ esposizione del personale al flusso veicolare.....	209
Figura 116_ Installazione nell'area di cantiere dei sistemi SonoBlaster e Single Sentry Beam _ Seconda configurazione di cantiere.....	210
Figura 117_ Procedure di installazione e rimozione dei dispositivi SonoBlaster _ esposizione del personale al flusso veicolare	211
Figura 118_ Installazione del dispositivo Single Sentry Beam _ laser orientato in direzione perpendicolare al flusso veicolare	211
Figura 119_ Installazione nell'area di cantiere del sistema AWARE _ Terza configurazione di cantiere	212
Figura 120_ Dettaglio dell'installazione del dispositivo AWARE in configurazione Sentry _ attività di "segnalamento"	213
Figura 121_ Condizioni particolari della terza configurazione di cantiere _ Strada divergente a monte del dispositivo AWARE Sentry	214
Figura 122_ Individuazione di un veicolo nella strada divergente a monte del dispositivo AWARE Sentry _ Attivazione del dispositivo e falso allarme.....	214
Figura 123_ Installazione nell'area di cantiere dei sistemi AWARE Sentry e Intellicone _ Quarta configurazione di cantiere.....	215
Figura 124_ Installazione dei "sensor lamp" sui dispositivi di delimitazione dell'area di cantiere ..	216
Figura 125_ Dettaglio dell'installazione del dispositivo AWARE in configurazione Sentry _ attività di "segnalamento"	216
Figura 126_ Installazione nell'area di cantiere dei sistemi Single Sentry Beam e SonoBlaster _ Quinta configurazione di cantiere.....	217
Figura 127_ Installazione delle due unità Single Sentry Beam _ Chiusura delle due testate della corsia di cantiere.....	217

Figura 128_ Installazione dei dispositivi SonoBlaster sui coni di delimitazione della corsia di cantiere	218
Figura 129__ Installazione nell'area di cantiere del dispositivo WAS _ Sesta configurazione di cantiere	219
Figura 130_ Immagini di dettaglio _ Installazione lungo il perimetro del cantiere dei tubi pneumatici del sistema WAS	219
Figura 131_ Installazione del dispositivo di cattura delle immagini (cellulare) sui mezzi di servizio	223
Figura 132_ Condizione di innesco involontario _ Problematica legata al funzionamento dell'algoritmo e della cattura delle immagini	224
Figura 133_ Schema normativo per l'installazione della segnaletica provvisoria di cantiere per una deviazione, con una sola corsia per senso di marcia	229
Figura 134_ Prima configurazione _ Tubi pneumatici disposti parallelamente al flusso veicolare _ copertura del perimetro del cantiere	230
Figura 135_ Seconda configurazione _ tubi pneumatici posti diagonalmente all'interno della corsia di cantiere	231
Figura 136_ Installazione dei sistemi SonoBlaster, Intellicone e WSN sui dispositivi di delimitazione del cantiere _ copertura del perimetro del cantiere	232
Figura 137_ Installazione del dispositivo Single Sentry Beam _ Laser orientato in direzione perpendicolare rispetto al flusso veicolare	235
Figura 138_ Prima configurazione alternativa _ Dispositivo Single Sentry Beam installato sul mezzo d'opera	236
Figura 139_ Seconda configurazione alternativa _ Installazione integrata dei sistemi Intellicone e Single Sentry Beam	237
Figura 140_ Possibile configurazione di installazione del dispositivo Guardian Cone	238
Figura 141_ Prima configurazione di installazione _ Singolo dispositivo AWARE	239
Figura 142_ Seconda configurazione di installazione _ Doppio dispositivo AWARE	240

Figura 143_ Prima configurazione di installazione _ Dispositivo singolo in modalità INFINITY	242
Figura 144_ Seconda configurazione di installazione _ Doppio dispositivo	243
Figura 145_ Terza configurazione di installazione _ Singolo dispositivo con l'aggiunta degli accessori di rilevazione (tubi pneumatici)	244
Figura 146_ Configurazione di installazione con singolo dispositivo.....	247
Figura 147_ Prima configurazione di studio _ intrusione frontale nella corsia dedicata al cantiere	249
Figura 148_ Seconda configurazione di studio _ intrusione laterale nella corsia dedicata al cantiere	250
Figura 149_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettoria A	263
Figura 150_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettoria B	263
Figura 151_ Configurazione di prova su un tratto rettilineo _ Traiettoria D	264
Figura 152_ Configurazione di prova su un tratto curvilineo _ Traiettoria A a) curva a destra b) curva a sinistra	264
Figura 153_ Configurazione di prova su un tratto curvilineo_ Traiettoria B a) curva a destra b) curva a sinistra	264
Figura 154_ Configurazione di prova su un tratto curvilineo_ traiettoria C a) curva a destra b) curva a sinistra	265
Figura 155_ Configurazione di prova per il dispositivo AWARE in modalità Sentry _ Traiettorie F e G	266

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1_Estesa chilometrica infrastrutture italiane per tipologia di strada	12
Tabella 2_Indicatore del numero di incidenti per chilometro di infrastruttura nei due insieme di strade considerati.....	13
Tabella 3_Tasso di riduzione relativo alle annate 2019-2020	13
Tabella 4_Tasso di riduzione relativo alle annate 2019-2020	14
Tabella 5_Incidenti tra veicoli e pedoni VS Incidenti a veicolo isolato _ Valori nel periodo PRE e POST pandemia	18
Tabella 6_Tasso di mortalità.....	30
Tabella 7_Incidenti stradali totali vs incidenti stradali in corrispondenza dei cantieri	31
Tabella 8_Incidenti stradali tra veicoli e pedoni vs incidenti stradali in corrispondenza dei cantieri	31
Tabella 9_Decessi per incidenti stradali vs Decessi per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri	31
Tabella 10_Decessi per incidenti stradali vs Decessi di lavoratori per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri.....	31
Tabella 11_Decessi totali di lavoratori in Italia vs Decessi di lavoratori per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri.....	31
Tabella 12_Feriti per incidenti stradali vs Feriti per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri	31
Tabella 13_ Tabella di confronto: Fattori di rischio vs. CMFs	72
Tabella 14_ Stato di implementazione attuale dei dispositivi analizzati.....	107
Tabella 15_Distanza di arresto (SSD) in funzione della velocità di avvicinamento del veicolo errante e del tempo di percezione e reazione.....	123
Tabella 16_prove condotte in condizioni controllate e/o reali di cantiere in base al sistema innovativo	137
Tabella 17_Distanza massima di trasmissione del segnale tra gli elementi che compongono il sistema WAS _ PAC: dispositivo di allerta collettivo; PSD: dispositivo di allarme personale;	140

Tabella 18_Percentuale di successi dell'attivazione del PSD	142
Tabella 19_Durata media, massima e minima degli allarmi sonori dei dispositivi Intellicone, SonoBlaster e WAS	145
Tabella 20_ FALSE POSITIVE e FALSE NEGATIVE registrati durante i test condotti sul dispositivo SonoBlaster	146
Tabella 21_Durata media dell'allarme sonoro del sistema Intellicone	148
Tabella 22_Livello sonoro medio dell'allarme del sistema Intellicone valutato a due distanze dal dispositivo	149
Tabella 23_Valutazione della massima distanza di trasmissione del segnale per i dispositivi Intellicone e WAS (report 2017 (27))	153
Tabella 24_ Numero di falsi allarmi registrati durante le prove condotte sul sistema Intellicone...	155
Tabella 25_ Percentuale di successo delle attivazioni del dispositivo	157
Tabella 26_Valutazione della distanza di arresto (SSD) in funzione della velocità di avvicinamento del veicolo target durante i test condotti sull'AWARE (estratto tabella 14)	163
Tabella 27_Valutazione della distanza di arresto (SSD) in funzione della velocità di avvicinamento del veicolo target durante i test condotti sull'AWARE in un tratto curvilineo (estratto da tabella 14)..	165
Tabella 28_Risultati di attivazione dei dispositivi di allarme durante i test condotti sul sistema AWARE	169
Tabella 29_Risultati di attivazione del dispositivo di allarme portatile WORKTRAX durante i test effettuati sul sistema AWARE	170
Tabella 30_Durata media e deviazione standard dell'allarme sonoro dei dispositivi Intellicone, AWARE e WAS	170
Tabella 31_Risultati dell'attivazione dell'allarme dell'AWARE SENTRY e del dispositivo WORKTRAX durante i test condotti nello scenario 1	172
Tabella 32_Risultati dell'attivazione dell'allarme dell'AWARE SENTRY e del dispositivo WORKTRAX durante i test condotti nello scenario 2	173

Tabella 33_Risultati dell'attivazione dell'allarme dell'AWARE SENTRY e del dispositivo WORKTRAX durante i test condotti nello scenario 3	174
Tabella 34_Condizioni di prova della prima serie di test _ prove condotte con velocità diverse	179
Tabella 35_Condizioni di prova della seconda serie di test _ prove condotte con angoli di incidenza diverse	180
Tabella 36_Condizioni di prova della terza serie di test _ prove condotte con distanze diverse tra veicolo e sensore.....	181
Tabella 37_ Valutazione dei falsi allarmi dispositivo WSN _ Condizioni di prova	184
Tabella 38_ Dispositivo Camera-Based WZ _ Valutazione dei delay nell'individuazione dei veicoli erranti in funzione della distanza.....	186
Tabella 39_ Risultati del sondaggio somministrato agli operatori che hanno condotto le prove in condizioni controllate sul dispositivo.....	188
Tabella 40_Tabella riassuntiva delle prove condotte in condizioni reali di cantiere.....	192
Tabella 41_Tassi di risposta dei lavoratori in relazione al dispositivo di individuazione (SonoBlaster, Intellicone o WAS) in funzione delle due distanze di prova.....	193
Tabella 42_Tempi di reazione medi dei lavoratori in funzione del dispositivo e della distanza tra questo ultimo e la squadra di lavoro.....	194
Tabella 43_Valutazione dei lavoratori _ Applicabilità dei dispositivi in funzione della tipologia e delle caratteristiche del cantiere.....	206
Tabella 44_Risultati del sondaggio somministrato agli operatori che hanno condotto le prove sul dispositivo in condizioni reali di cantiere	225
Tabella 45_Tabella riassuntiva dei dispositivi di individuazione delle intrusioni (WZIA) esposti nel capitolo 4; *Massima distanza di individuazione delle intrusioni: In relazione al dispositivo analizzato ha un duplice significato e può rappresentare l'effettiva distanza di rilevamento del dispositivo, come nel caso del sistema AWARE, oppure rappresenta la distanza tra il sensore di individuazione e il componente principale del sistema, come ad esempio per l'INTELLICONE (distanza "Sensor Lamp"-PSA); **Massima distanza di trasmissione del segnale di allarme: intesa come la massima distanza alla quale il componente principale del dispositivo può comunicare efficacemente con gli accessori	

del sistema. Esempio: Dispositivo WAS _ distanza di comunicazione tra il componente principale (PAC) e il dispositivo di allarme personale (PSD);228

Tabella 46_ Tabella dei tempi di reazione in risposta a uno stimolo visivo (VRT) o acustico (ART) [millisecondi].....251

Tabella 47_ Tempo di reazione in funzione dei turni lavorativi251

Tabella 48_ tempi impiegati dai veicoli a giungere nella posizione del lavoratore254

Tabella 49_ Caso particolare del sistema Camer-Based Work Zone Intrusion Detection in configurazione prototipale.....255

Tabella 50_ Minime distanze di intrusione per le quali il tempo target da concedere al lavoratore per mettersi in salvo è rispettato.....257

Tabella 51_ Tempi disponibili al lavoratore per mettersi in salvo.....258

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 1_Incidenti stradali totali in Italia	11
Grafico 2_Incidenti stradali totali per tipologia di strada	12
Grafico 3_Incidenti stradali mortali.....	14
Grafico 4_Incidenti stradali mortali per tipologia di strada	14
Grafico 5_Incidenti stradali totali per tipologia di sinistro.....	15
Grafico 6_Incidenti stradali in Autostrada per tipologia di sinistro	16
Grafico 7_Incidenti stradali su Strada Urbana per tipologia di sinistro	16
Grafico 8_Incidenti stradali su Altra Strada per tipologia di sinistro	17
Grafico 9_Numero totale di persone coinvolte in incidenti stradali in Italia	19
Grafico 10_Feriti negli incidenti in Italia e successiva ripartizione	19
Grafico 11_Morti negli incidenti in Italia e successiva ripartizione	20
Grafico 12_Incidenti totali vs numero vittime	21
Grafico 13_Incidenti mortali totali vs numero morti	21
Grafico 14_Incidenti totali in autostrada vs numero vittime	21
Grafico 15_Incidenti mortali in autostrada vs numero morti	22
Grafico 16_Incidenti totali su strada urbana vs numero vittime	22
Grafico 17_Incidenti mortali su strada urbana vs numero morti	22
Grafico 18_Incidenti totali su altra strada vs numero vittime	23
Grafico 19_Incidenti mortali su altra strada vs numero morti.....	23
Grafico 20_Incidenti stradali con autovetture per tipologia di strada	24
Grafico 21_Incidenti stradali con autocarri e motrici per tipologia di strada	25
Grafico 22_Incidenti stradali con motocicli per tipologia di strada	25
Grafico 23_Incidenti stradali con pedone coinvolto che lavora sulla carreggiata, per tipo di strada. Italia. 2013-2020.	26

Grafico 24_Incidenti stradali con pedone coinvolto che lavorava sulla carreggiata, per tipo di veicolo coinvolto. Italia. 2013-2020.	27
Grafico 25_Incidenti stradali con lavoratore sulla carreggiata coinvolto e tipo di circostanza rilevata sul luogo dell'incidente. Italia. 2013-2020.	28
Grafico 26_Incidenti stradali con lavoratore sulla carreggiata coinvolto, per tipo di segnaletica permanente o temporanea, rilevata sul luogo dell'incidente. Italia. 2013-2020.	28
Grafico 27_Incidenti in corrispondenza di cantieri stradali	29
Grafico 28_Feriti e morti per incidenti stradali in corrispondenza di cantieri	30
Grafico 29_Suddivisione del numero di decessi	30
Grafico 30_Cause scatenanti gli incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2020	33
Grafico 31_Cause scatenanti gli incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2021	33
Grafico 32_Cause scatenanti gli incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2022	33
Grafico 33_ripartizione del numero degli incidenti in corrispondenza di cantieri stradali tra strade a carreggiata ordinaria e a carreggiata separata_2020	34
Grafico 34_ripartizione del numero degli incidenti in corrispondenza di cantieri stradali tra strade a carreggiata ordinaria e a carreggiata separata_2021	34
Grafico 35_ripartizione del numero degli incidenti in corrispondenza di cantieri stradali tra strade a carreggiata ordinaria e a carreggiata separata_2022	35
Grafico 36_Ripartizione tra gli automezzi coinvolti in incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2020	35
Grafico 37_Ripartizione tra gli automezzi coinvolti in incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2021	36
Grafico 38_Ripartizione tra gli automezzi coinvolti in incidenti stradali in corrispondenza di cantieri_2022	36
Grafico 39_Suddivisione del numero di incidenti in corrispondenza dei cantieri stradali per regione_2021	37

Grafico 40_ Suddivisione del numero di incidenti in corrispondenza dei cantieri stradali per regione_2022	37
Grafico 41_ Confronto tra la percezione del rischio in condizioni ordinarie e in corrispondenza del cantiere autostradale	70
Grafico 42_ Variazione della velocità adottata durante il passaggio attraverso un cantiere autostradale	70
Grafico 43_ Fattori medi di rischio percepiti dalla utenza stradale in corrispondenza di cantieri autostradali	70
Grafico 44_ Velocità adottata dichiarata dai conducenti di mezzi pesanti in corrispondenza di un cantiere stradale con limite di velocità fissato a 72km/h	75
Grafico 45_ Frequenza delle BDS e degli incidenti suddivisi per zone del cantiere autostradale	76
Grafico 46_ Valutazione della distanza di arresto in funzione della velocità del veicolo errante e del tempo di percezione e reazione.....	122
Grafico 47_ Variazione dell'intensità sonora media dei dispositivi Intellicone, AWARE e WAS in funzione della distanza.....	139
Grafico 48_ Tempi medi di reazione dei lavoratori osservati durante le prove condotte sul dispositivo WAS	143
Grafico 49_ Livello medio dell'intensità sonora dell'allarme del SonoBlaster valutato in funzione della distanza	144
Grafico 50_ Dispositivi a confronto. Livello sonoro medio degli allarmi in funzione della distanza	144
Grafico 51_ Livello sonoro medio del dispositivo Intellicone in funzione della distanza	149
Grafico 52_ Intensità sonora media dell'allarme del dispositivo in presenza di fonti rumorose esterne _ Primo scenario di prova	151
Grafico 53_ Intensità sonora media dell'allarme del dispositivo in presenza di fonti rumorose esterne _ Secondo scenario di prova	152
Grafico 54_ Valutazione dell'intensità sonora media dell'allarme del dispositivo Intellicone, in funzione della distanza e della direzione	152

Grafico 55_Range di trasmissione del segnale di allarme del sistema Intellicone tra il "Sensor Lamp" e il PSA (report 2021 (32)).....	154
Grafico 56_ Tempi di reazione medi osservati per il dispositivo Intellicone _ Valutazione in funzione della velocità di marcia del veicolo di prova	157
Grafico 57_Distanza di individuazione media del dispositivo AWARE su tratto curvilineo _ Traiettoria E.....	165
Grafico 58_Risultati delle prove condotte nella configurazione di prova relativa alla Traiettoria H _ andamento delle velocità di marcia del veicolo di prova	168
Grafico 59_Valutazione dell'intensità sonora media dell'allarme del dispositivo AWARE, in funzione della distanza e della direzione	171
Grafico 60_Distanza media di individuazione del sistema AWARE in relazione alla distanza di arresto (teorica) AASTHO	174
Grafico 61_Percentuale di intrusioni non rilevate in funzione della distanza laterale tra il sensore e il veicolo errante	181
Grafico 62_ Latenza del segnale di allerta in funzione della distanza tra il nodo sensore e il nodo principale.....	182
Grafico 63_Percentuale di intrusioni non rilevate in funzione della distanza tra il nodo sensore e il nodo principale	183
Grafico 64_Dispositivo Camera-Based WZ _ Valutazione dei delay nell'individuazione dei veicoli erranti in funzione della distanza.....	186
Grafico 65_Valore medio delle votazioni degli operai per ogni criterio indagato nei live testing...	190
Grafico 66_Valutazioni medie dei lavoratori sui cinque criteri analizzati durante i live testing	195
Grafico 67_Risultati del sondaggio _ Valutazione del dispositivo SonoBlaster	196
Grafico 68_Risultati del sondaggio _ Valutazione del dispositivo Intellicone.....	196
Grafico 69__Risultati del sondaggio _ Valutazione del dispositivo WAS	197
Grafico 70_Valutazione dei lavoratori _ Efficacia della tecnologia nel migliorare la sicurezza nelle zone di lavoro.....	203

Grafico 71_Valutazione dei lavoratori _ Facilità d'uso dei dispositivi	204
Grafico 72_Valutazione dei lavoratori _ Percezione complessiva del sistema di allarme dei dispositivi	204
Grafico 73_Valutazione dei lavoratori _ Probabilità di falsi allarmi	205
Grafico 74_Valutazione dei lavoratori _ Durabilità dei componenti dei dispositivi.....	205
Grafico 75_Valutazione dei lavoratori _ Efficacia nella riduzione degli incidenti nei cantieri dei dispositivi analizzati.....	221
Grafico 76_Valutazione dei lavoratori _ Efficacia dei dispositivi analizzati nel contribuire all'incremento della sicurezza nei cantiere	221
Grafico 77_ Tempo impiegato dal lavoratore per coprire una specifica distanza	252
Grafico 78_ Relazione, in funzione della velocità di marcia dei mezzi, tra la distanza di intrusione del veicolo errante e il tempo a disposizione dei lavoratori per mettersi in salvo	256

INDICE DELLE EQUAZIONI

Equazione 1_ Stopping Sight Distance (AASHTO).....	121
Equazione 2_ Fattore di incremento del tempo di reazione dovuto allo stato di allenamento.....	251
Equazione 3_ Variazione percentuale del tempo di reazione (stato di allenamento).....	251
Equazione 4_ Fattore di incremento del tempo di reazione dovuto ai turni notturni di lavoro.....	251
Equazione 5_ Variazione percentuale del tempo di reazione (turni notturni).....	251
Equazione 6_ Tempo di reazione stimato per il contesto del caso studio analizzato.....	252

FONTI BIBLIOGRAFICHE E SITOGRAFICHE

1. **Istituto Superiore di Sanità.** Incidenti Stradali. [Online] <https://www.epicentro.iss.it/stradale/>.
2. **Istituto Nazionale di Statistica.** Banca dati Istat. *I.Stat.* [Online] <http://dati.istat.it/#>.
3. **Automobile Club d'Italia.** *Dotazione di infrastrutture stradali sul territorio italiano.* 2011.
4. **LA SEGNALETICA TEMPORANEA PER CANTIERI STRADALI.** **INAIL.** s.l. : Dipartimento innovazione tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici , 2022.
5. **ASAPS.** Osservatorio ASAPS sugli incidenti nei cantieri stradali. *ASAPS.it.* [Online] https://www.asaps.it/45-Osservatori/278-Altri_osservatori.
6. **D.lgs. 9 aprile 2008, n.81_ TESTO UNICO SULLA SALUTE E SICUREZZA SUL LAVORO.**
7. **MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI.** **DECRETO 10 luglio 2002_ DISCIPLINARE TECNICO RELATIVO AGLI SCHEMI SEGNALETICI, DIFFERENZIATI PER CATEGORIA DI STRADA, DA ADOTTARE PER IL SEGNALAMENTO TEMPORANEO.**
8. **Autostrade per l'Italia S.p.A.** **DISCIPLINARE PER L'INSTALLAZIONE, CONDUZIONE E RIMOZIONE DEI CANTIERI DI LAVORO SULLA RETE DI AUTOSTRADE PER L'ITALIA.** 02 dicembre 2021.
9. —. **LINEE GUIDA PER LA SICUREZZA DELL'OPERATORE SU STRADA.** Rev. 06 15/01/2016.
10. **Effects of stationary work zones on motorway crashes.** Francesco La Torre, Lorenzo Domenichini, Alessandro Nocentini. Firenze : Elsevier Ltd., 2016, Vol. Safety Science.
11. **Fatal and Injury Crash Characteristics in Highway Work Zones.** Yingfeng li, Tong Bai. s.l. : Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Kansas, 2008.
12. **Fatal accidents in nighttime vs. daytime highway construction work zones.** David Arditì, Dong-Eun Lee, Gul Polat. s.l. : National Safety Council and Elsevier Ltd., 2007, Vol. Journal of Safety Research.
13. **Highway Accidents in Construction and Maintenance Work Zones.** Jerry G. Pigman, Kenneth R. Agent. s.l. : Kentucky Transportation Research Program, College of Engineering, University of Kentucky, Lexington, Transportation Research Record 1270.
14. **Detailed Study of Accident Experience in Construction and Maintenance Zones.** Tae-Jun Ha, Zoltan A. Nemeth. s.l. : Committee on Traffic Safety in Maintenance and Construction Operations, Ohio (USA).

15. *Managing Work Zone Safety during Road Maintenance and Construction Activities: Challenges and Opportunities*. Ahmed Jalil Al-Bayati, Mason Ali, Chukwkma Nnaji. s.l. : ASCE, 2023, Practice Period on Structural Design and Construction. ISSN 1084-0680.

16. *Drivers' perception of highway work zone risks*. Fadi Shahin, Wafa Elias, Tomer Toledo. s.l. : Elsevier Ltd., 2023, Transportation Engineering.

17. *Truck Drivers' Concerns in Work Zones: Travel Characteristics and Accident Experiences*. Rahim F. Benekohal, Eunjae Shim, Paulo T. Resende. Department of Civil Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, 205 North Mathews Avenue, Urbana : Committee on Traffic Safety in Maintenance and Construction Operations, Transportation Research record 1509.

18. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen_Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement. *Richtlinien für die verkehrsrechtliche Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen*. Köln : s.n., 2021. ISBN 9783864463112.

19. Bundesministerium für Verkehr. *TL-Transportable Schutzeinrichtungen_Technische Lieferbedingungen für transportable Schutzeinrichtungen*. s.l. : BMVBS, 1997.

20. MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE . *INSTRUCTION INTERMINISTÉRIELLE SUR LA SIGNALISATION ROUTIÈRE du 22 octobre 1963*. rev. 9 avril 2021.

21. Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement et de la Mer. *SIGNALISATION TEMPORAIRE*. Bagneux Cedex : Setra_Service d'études techniques des routes et autoroutes, 2002. ISBN 2-11-091796-2.

22. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer. *Procédures de qualification des équipements de la route*. s.l. : Sétra _ Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, Septembre 2003. 93.080.30.

23. Department for Transport/Highways Agency. *Traffic Signs Manual _ Chapter 8 _ Traffic Safety Measures and Signs for Road Works and Temporary Situations*. s.l. : Queen's Printer and Controller of HMSO 2009, First edition 2006. 978 0 11 553051 7.

24. Department for Transport. *Know Your TRAFFIC SIGNS _ Official Edition* . London : Crown copyright 2007, first published 1975. 978 0 11 552855 2.

25. THE HIGHWAYS AGENCY. *DESIGN MANUAL FOR ROADS AND BRIDGES _ Requirement for Road Restraint Systems*. 2006.

26. **WORK ZONE INTRUSION Technology to Reduce injuries & Fatalities.** Chukwuma Nnji, John Gambatese and Hyun Woo Lee. Whashington, Oregon : s.n., April 2018, ProfessionaleSafety.

27. **WORK ZONE INTRUSION ALERT TECHNOLOGIES: ASSESSMENT AND PRACTICAL GUIDANCE .** John A. Gambatese, Hyun Woo Lee & Chukwuma Aham Nnaji. FHWA-OR-RD-17-14, Corvallis, Oregon State University : s.n., June 2017.

28. **ACTIVE WORK ZONE SAFETY: PREVENTING ACCIDENTS USING INTRUSION SENSING TECHNOLOGIES.** Ibukun Awolusi & Eric D, Marks. 21, s.l. : Fidelis A. Emuze, central university of Technology, South Africa, 04 March 2019, frontiers in Built Environment, Vol. 5.

29. **IMPROVING WORK ZONE SAFETY WITH INTRUSION ALARMS.** Transportation, U.S. Department of.

30. **CONES SOUND A WARNING OF WORK ZONE INTRUSION.** Givechi, Mehrdad. Kansas City, Kansas, U.S. : s.n., 2015, Kansas LTAP Newsletter.

31. **Evaluation of Work Zone Intrusion Alarms.** Ghazan Khan, Shukurat Sanni, Steffen Berr, Kevan Shafizadeh. [a cura di] Department of Civil Engineering California State University Sacramento. CA19-3038, Sacramento : California Department of Transportation, Caltrans, 14 August 2019.

32. **Work Zone Alert Systems.** Sabysachee Mishra, Mihalis M. Goliias & Diwas Thapa. [a cura di] University of Memphis. Memphis : Tennessee Department of Transportation Long Range Planning Research Office & Federal Highway Administration, 1 April 2021.

33. **PILOT TESTING OF WORK ZONE INTRUSION ALARMS_FINAL REPORT.** Ghazan Khan, Raven Cochrane, Kevan Shafizadeh. [a cura di] Department of Civil Engineering California State University Sacramento. CA23-3875, Sacramento : California Department of Transportation, CALTRANS, 16 November 2023.

34. **Work Zone Intrusion Alarm Effectiveness.** Krupa, Cathy. [a cura di] Inc. Cambridge Systematics. NJ-2010-004, s.l. : New Jersey Department of Trasportation, Bureau of Research, September 2010.

35. **CLOSED COURSE PERFORMANCE TESTING OF THE AWARE INTRUSION ALARM SYSTEM.** LuAnn Theiss, Gerald L. Ullman & Tomas Lindheimer. [a cura di] Texas A&M Transportation Istitute. s.l. : Oldcastle materials, Inc., 12 April 2017.

36. **A WSN-Based Intrusion Alarm System to Improve Safety in Road Work Zones.** Jose Martin, Alba Rozas & Alvaro Araujo. [a cura di] ETSI Telecomunicacion, Universidad Politecnica de madrid

Departamento de ingenieria Electronica. Madrid : Jong-Jae Lee, 12 May 2016, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Sensors.

37. *Work Zone Intrusion Alert System Technology Tests.* Ozan, Erol. [a cura di] College of Engineering and Technology, Department of Technology Systems, Science and Technology Building East Carolina Inuversity. Greenville : North Carolina Deptment of Transportation, 15 June 2022, RESEARCH & DEVELOPMENT.

38. *A Comparative Study of Visual and Auditory Reaction Times on the Basis of Gender and Physical Activity Levels of Medical First-Year Students.* Aditya Jain, Ramta Bansal, Avnish Kumar, KD Singh. Patiala, Punjab, India : Department of Physiology, Government Medical College, Patiala, Punjab, May 2015, International Journal of Applied and Basic Medical Research, Vol. 5.

39. *Fatigue in Shift Work on Stamping Division Workers of PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia.* Taufiq Ihsan, Indah Rachmatiah Siti Salami. March 2020, Jurnal Kesehatan Masyarakat.