

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Civile**

Modellazione dei dispositivi di ritenuta stradali su rilevato  
Analisi della norma UNI/TR 11785

**TESI MAGISTRALE**



**Relatori**

Prof. Giuseppe Chiappinelli

Ing. Giorgia Rizzo

**Studente**

Francesco Lupese

A.A. 2024/2025



# INDICE

INDICE .....	i
INDICE DELLE FIGURE .....	iv
INDICE DELLE TABELLE.....	vii
INDICE DELLE EQUAZIONI.....	ix
ABSTRACT.....	11
INTRODUZIONE.....	13
<b>CAPITOLO 1 SISTEMI DI RITENUTA STRADALI - QUADRO NORMATIVO</b>	
<b>ITALIANO ED EUROPEO .....</b>	<b>16</b>
<b>CAPITOLO 2 Analisi della norma UNI EN 1317 sui sistemi di ritenuta</b>	
<b>stradali.....</b>	<b>23</b>
2.1 UNI EN 1317 - Parte 1 (Criteri per i metodi di prova) .....	24
2.2 UNI EN 1317 - Parte 2 (Metodi di prova per le barriere di sicurezza inclusi	
i parapetti veicolari).....	33
2.3 UNI EN 1317 - Parte 5 (Requisiti di prodotto e valutazione della	
conformità) .....	42
<b>CAPITOLO 3 Analisi della norma UNI/TR 11785 .....</b>	<b>48</b>
3.1 Installazione delle barriere di sicurezza.....	49
3.2 Proprietà meccaniche del terreno costituente il margine della	
carreggiata.....	52
3.3 Deformazioni del paletto in funzione della distanza del ciglio dalla	
carreggiata .....	53

---

<b>3.4</b>	<b>Presenza della scarpata sulla stabilità del veicolo.....</b>	<b>55</b>
<b>3.5</b>	<b>Procedure per la valutazione del comportamento paletto-terreno .....</b>	<b>56</b>
3.5.1	Tipologia di prova da effettuare .....	57
3.5.2	Tipologia di paletto su cui effettuare la prova .....	60
3.5.3	Profondità di infissione.....	60
3.5.4	Altezza di prova .....	60
3.5.5	Sistema di contatto dell'attrezzatura di prova con il palo.....	61
3.5.6	Carico-deformazione applicato alle prove di push.....	61
3.5.7	Grandezze da misurare.....	61
<b>3.6</b>	<b>Prove per la valutazione delle proprietà meccaniche del terreno al variare della profondità .....</b>	<b>63</b>
<b>3.7</b>	<b>Confronto della risposta all'interazione del terreno con il palo.....</b>	<b>64</b>
<b>3.8</b>	<b>Prove di crash condotte in presenza di scarpata.....</b>	<b>65</b>
<b>3.9</b>	<b>Possibili modifiche per ottenere in sito la corrispondenza con i crash ....</b>	<b>66</b>
<b>CAPITOLO 4</b>	<b>Prove quasi-statiche e dinamiche della UNI/TR 11785 .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Linea guida per la validazione delle prove quasi-statiche sulle barriere di sicurezza installate sul bordo dei rilevati stradali (UX114) .....</b>	<b>68</b>
<b>4.2</b>	<b>Linee guida per la verifica in sito dell'interazione palo/terreno tramite prove dinamiche su barriere di sicurezza stradali (PIARC ITALIA) .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3</b>	<b>Confronto tra Prove Quasi-statiche e Prove Dinamiche .....</b>	<b>75</b>
<b>CAPITOLO 5</b>	<b>Prova quasi-statica – Modellazione mediante Software numerico.....</b>	<b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>Modello FEM .....</b>	<b>78</b>
<b>5.2</b>	<b>Software RS3 (Rocscience) – Sviluppo della modellazione .....</b>	<b>79</b>
5.2.1	Realizzazione del Modello .....	81
5.2.2	Gestione dei parametri iniziali.....	83
5.2.3	Proprietà fisico-meccaniche del terreno e del paletto.....	84
5.2.4	Applicazione della forza da attribuire al paletto .....	90
5.2.5	Applicazione dei vincoli .....	92
5.2.6	Applicazione della mesh .....	93
5.2.7	Risultati ottenuti.....	95
<b>5.3</b>	<b>Validazione del modello FEM con una seconda prova di campo.....</b>	<b>97</b>

## Indice

---

5.3.1	Risultati ottenuti sulla seconda prova .....	100
<b>CONCLUSIONI</b>	.....	<b>104</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	.....	<b>106</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Incidente autostradale con coinvolgimento della scarpata laterale..	14
Figura 2: Classificazione delle barriere di sicurezza stradale .....	17
Figura 3: Schema riassuntivo per l'introduzione del rapporto tecnico UNI/TR 11785 .....	24
Figura 4: Specifiche del veicolo.....	27
Figura 5: Posizionamento dell'accelerometro: 1. Beccheggio, 2. Rollio, 3. Imbardata .....	29
Figura 6: Processo di elaborazione dei dati.....	30
Figura 7: Sistemi di riferimento veicolo e terreno .....	31
Figura 8: Posizione della deformazione dell'abitacolo.....	32
Figura 9: Dimensioni interne.....	33
Figura 10: Deflessione dinamica, Larghezza operativa e Intrusione del veicolo .....	37
Figura 11: Traiettorie del box di uscita .....	39
Figura 12: Disposizione delle telecamere per la registrazione delle prove.....	41
Figura 13: Esempio di informazioni sulla marcatura CE per le barriere di sicurezza (Versione di consultazione Norma UNI EN 1317-5 Politecnico di Torino) .....	47
Figura 14: Condizione di prova e condizione reale.....	51

## Indice delle figure

---

Figura 15: Ruota esterna non invade la scarpata.....	51
Figura 16: Influenza della portanza dei terreni sulla resistenza allo spostamento dei paletti. Asse X: Md300 [MPa]; Asse Y: Resistenza [kN] (Versione di consultazione Norma UNI/TR 11785 Politecnico di Torino).....	53
Figura 17: Differenti deformazioni dei paletti rispetto al ciglio .....	53
Figura 18: Confronto della resistenza per tre diverse distanze del paletto dal ciglio del rilevato. Asse X: Spostamento [m]; Asse Y: Forza [kN]. Partendo dalla linea più bassa le distanze sono 0,3 m, 0,6 m e 1,1 m. (Versione di consultazione Norma UNI/TR 11785 Politecnico di Torino).....	55
Figura 19: Esempi di quando le ruote del veicolo invadono la scarpata.....	55
Figura 20: Distanza d tra il fronte della barriera ed il ciglio della scarpata (fig. di sinistra) e massima posizione laterale delle ruote oltre la barriera e larghezza ruote gemellate (fig. di destra) .....	56
Figura 21: Schema di prova. a) campo prova; b) in strada .....	57
Figura 22: Attrezzatura THOR.....	59
Figura 23: Attrezzatura MARTE.....	59
Figura 24: Posizione della cerniera plastica.....	62
Figura 25: Diagramma Spostamento-Tempo. Asse X: Tempo [s]; Asse Y: Spostamento [mm].....	62
Figura 26: Fasi di costruzione per la realizzazione del caso reale in campo prova .....	66
Figura 27: Schema riassuntivo sulle metodologie di esecuzione delle prove.	68
Figura 28: Esempio di prova per la determinazione della resistenza del terreno (CAMPO PROVA).....	69
Figura 29: Esempio di prova per la determinazione della resistenza del terreno (IN SITO).....	70
Figura 30: Confronto tra Campo prova (sinistra) e Sito (destra) .....	71
Figura 31: Esempi di impattatori dinamici.....	71

Figura 32: Fase 1 – Prova dinamica .....	72
Figura 33: Fase 2 – Prova dinamica .....	72
Figura 34: Fase 3 – Prova dinamica .....	73
Figura 35: Fase 4 – Prova dinamica .....	73
Figura 36: Curva Spostamento-Tempo prova dinamica .....	74
Figura 37: Confronto tra Prova in Sito e Prova in Campo prova.....	74
Figura 38: Schema riassuntivo Prove Quasi-statica e Dinamica.....	76
Figura 39: Grafico riassuntivo Sviluppo Software.....	78
Figura 40: Modello 3D .....	82
Figura 41: Schema semplificato della posizione del paletto .....	83
Figura 42: Attrezzatura Pagani TG 63 - 200 .....	87
Figura 43: Applicazione del carico alla massima forza applicata .....	92
Figura 44: Applicazione dei vincoli .....	93
Figura 45: Mesh Uniform 4 nodi tetraedro .....	95
Figura 46: Evoluzione degli Spostamenti orizzontali dati dallo spostamento del paletto in funzione della forza applicata (Modello 1).....	96
Figura 47: Evoluzione degli Spostamenti del terreno nella direzione di applicazione della forza (Modello 1) .....	97
Figura 48: Modellazione 3D (Prova 2) .....	100
Figura 49: Evoluzione degli Spostamenti orizzontali dati dallo spostamento del paletto in funzione della forza applicata (Prova 2) .....	101
Figura 50: Evoluzione degli Spostamenti del terreno nella direzione di applicazione della forza (Prova 2) .....	102
Figura 51: Confronto tra prove in Sito e Software.....	103

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Classificazione delle barriere (D.M. 223/1992).....	18
Tabella 2: Tipi di traffico (D.M. 223/1992).....	18
Tabella 3: Classi minime di barriera (D.M. 223/1992).....	19
Tabella 4: Classificazione delle barriere (D.M. 253/1998).....	20
Tabella 5: Classificazione degli Attenuatori d'urto (D.M. 253/1998).....	20
Tabella 6: Tipi di traffico (D.M. 253/1998) (TGM: Traffico Giornaliero Medio annuo) .....	21
Tabella 7: Classi minime di barriera (D.M. 253/199).....	21
Tabella 8: Tipologie di prova .....	34
Tabella 9: Livelli di contenimento .....	35
Tabella 10: Livelli di severità dell'urto .....	35
Tabella 11: Criteri di accettazione .....	38
Tabella 12: Livelli di soglia minimi per i sistemi di trattenimento veicoli .....	43
Tabella 13: Resistenza alla rimozione della neve di barriere di sicurezza con correnti in metallo .....	44
Tabella 14: Energia minima in funzione dei livelli di contenimento (i = interasse dei pali) .....	72
Tabella 15: Dimensioni modello .....	82
Tabella 16: Distanze paletto-bordo scarpata laterale .....	83

---

Tabella 17: Applicazioni dei carichi .....	84
Tabella 18: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 1/A .....	85
Tabella 19: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 1/B .....	86
Tabella 20: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 1/C .....	86
Tabella 21: Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda.....	87
Tabella 22: $N_{SPT}$ per le tre prove .....	88
Tabella 23: Modulo elastico delle tre prove (Bowles, 1982).....	89
Tabella 24: Modulo elastico assunto per lo sviluppo del modello (Prova 1)..	89
Tabella 25: Carichi da attribuire al software .....	91
Tabella 26: Distanze paletto-bordo scarpata laterale (Prova 2) .....	98
Tabella 27: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 2/A .....	98
Tabella 28: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 2/B .....	99
Tabella 29: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 2/C .....	99
Tabella 30: Modulo elastico assunto per lo sviluppo del modello (Prova 2)	100

## INDICE DELLE EQUAZIONI

Equazione 1: Indice di severità .....	17
Equazione 2: Livello di contenimento .....	19
Equazione 3: Indice di severità dell'accelerazione.....	19
Equazione 4: Deflessione dinamica normalizzata.....	36
Equazione 5: Larghezza operativa normalizzata.....	36
Equazione 6: Intrusione del veicolo normalizzata .....	37
Equazione 7: Valutazione dell'altezza di spinta paletto-terreno .....	61
Equazione 8: Coefficiente $\beta t$ .....	87
Equazione 9: Formula per il calcolo $N_{SPT}$ .....	88
Equazione 10: Modulo di Young (Bowles, 1982).....	88



## **ABSTRACT**

L'elaborato di tesi indaga gli elementi fondamentali relativi allo studio delle barriere di sicurezza poste sul bordo del rilevato stradale. L'analisi si focalizza su una zona critica, nella quale la resistenza del terreno presenta caratteristiche inferiori rispetto alla zona centrale della pavimentazione stradale. La tesi si articola in due fasi principali. Nella prima parte dell'elaborato si sono riportati i riferimenti bibliografici principali per una corretta analisi delle norme riguardanti le barriere di sicurezza. In particolare, viene riportato l'evoluzione del quadro normativo italiano ed europeo con l'introduzione della normativa UNI EN 1317. La presente norma si articola secondo otto "parti" che comprendono le informazioni e le modalità di esecuzione delle prove e della validità delle barriere con l'ottenimento della Marcatura CE. I capitoli di maggiore interesse per il raggiungimento delle finalità del presente studio sono: Parte 1 "Terminologia e criteri generali per i metodi di prova", Parte 2 "Classi di prestazione, criteri di accettazione delle prove d'urto e metodi di prova per le barriere di sicurezza inclusi i parapetti veicolari" e Parte 5 "Requisiti di prodotto e valutazione della conformità". Successivamente, viene introdotto il Rapporto Tecnico UNI/TR 11785, "Manuale per l'utilizzo e l'installazione dei dispositivi di ritenuta", che fornisce linee guida relative alla tipologia di prova e al tipo di paletto impiegato, alla profondità di infissione, all'altezza di applicazione del carico e, infine, alle grandezze da misurare per l'esecuzione delle prove di caratterizzazione del terreno e dell'insieme paletto-terreno, svolte sia in campo prova che in sito. In relazione ai processi di prova da eseguirsi sul bordo dei rilevati stradali secondo il rapporto tecnico UNI/TR 11785, alcuni studiosi, tecnici del settore e produttori di barriere hanno proposto delle linee

guida per la certificazione della corretta posa della barriera su bordo rilevato. Verranno analizzati i criteri e gli aspetti principali delle due procedure attualmente utilizzate in fase di installazione quella di Unione Nazionale delle Industrie delle Costruzioni Metalliche dell'Involucro e dei serramenti (UNICMI) è quella proposta dall'Associazione mondiale della strada (PIARC).

Attualmente per la valutazione delle caratteristiche del terreno e la corretta posa del paletto su rilevato vengono confrontati i risultati ottenuti dalle prove di push in sito rispetto quelli ottenuti nel campo prove. Sulla base di queste indicazioni, nella seconda parte della tesi, si è cercato di valutare la possibilità di introdurre una nuova metodologia in grado di ridurre l'impegno di risorse per l'effettuazione delle prove in sito, in particolare la possibilità di sostituire la prova di push per la caratterizzazione del terreno con una modellazione 3D del sistema scarpata-paletto. Tale studio ha portato alla realizzazione di un modello FEM basato sulle prove standard eseguite in sito: prove 'push' e prove penetrometriche dinamiche. Con l'ausilio del software Rocscience (RS3) si è cercato di replicare la risposta in termini di carico-spostamento del paletto infisso nel terreno ottenuta in una prova di push. Per la validazione del modello FEM, (per la caratterizzazione del terreno in sito), si è utilizzato il modello generalizzato (ottenuto dalla prima prova di campo) con un altro test reale eseguito in condizioni e caratteristiche del terreno diversi.

# INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, la sicurezza stradale, descritta come l'insieme di misure, norme e pratiche finalizzate a prevenire incidenti e ridurre il rischio di lesioni o danni lungo le strade, è stata al centro di molti dibattiti sia a livello nazionale che internazionale. L'obiettivo della sicurezza stradale è ridurre al minimo i pericoli connessi alla circolazione, in modo da garantire una corretta incolumità a tutti gli utenti della strada. La sicurezza stradale comprende tre importanti macroaree: le strade sicure, i veicoli e gli utenti della strada. Le strade sicure se ben progettate, possono ridurre significativamente gli incidenti.

Gli elementi importanti includono la segnaletica stradale, l'illuminazione adeguata, rotonde o incroci con semafori per ridurre le collisioni, piste ciclabili e marciapiedi per pedoni, guard-rail e barriere di sicurezza su autostrade e strade pericolose. I veicoli, allo stesso tempo, se ben progettati a livello di tecnologie di sicurezza, possono contribuire alla riduzione del pericolo, poiché includono sistemi come l'Airbag, freni antibloccaggio (ABS), sistemi di assistenza alla guida come l'avviso di uscita dalla corsia, la frenata automatica di emergenza e cruise control adattivo. Come ultimo, anche se non meno importante dei precedenti è la formazione alla guida, sensibilizzata da campagne che cercano di informare gli utenti della strada con particolare attenzione a giovani e neopatentati. Le regole e i comportamenti su cui si pone particolare attenzione sono i limiti di velocità, evitare l'uso del telefono, rispettare i semafori e la segnaletica e non assumere alcool o sostanze che possono alterare le capacità di guida.

Adottare pratiche di guida sicura e rispettare le regole del codice della strada, non solo tutela la propria vita, ma anche quella degli altri.

Negli ultimi anni, si è osservato un calo costante nel numero di feriti e decessi dovuti agli incidenti stradali. Secondo una previsione dell'Istituto Nazionale di Statistica ISTAT e dell'Automobile Club d'Italia ACI [1], entro il 2030 il numero di morti sarà dimezzato rispetto ai 3.039 registrati nel 2023. Tuttavia, nel contesto extraurbano e autostradale si continua a registrare il maggior numero di feriti e vittime, a causa delle alte velocità e dell'efficacia limitata dei sistemi di ritenuta stradale, in particolare quelli lungo i viadotti e le scarpate laterali dei rilevati. Da quest'ultimo nel maggio del 2020 è stato realizzato un rapporto tecnico denominato come UNI/TR 11785 [2] nel quale, al suo interno, viene riportato un documento tecnico di supporto per la redazione del manuale per l'utilizzo e l'installazione dei dispositivi di ritenuta stradali su rilevato. Questo rapporto tecnico riguarda principalmente l'iterazione paletto – terreno soggetto all'applicazione di forze con delle macchine di prova in condizione quasi – statica e dinamica.



Figura 1: Incidente autostradale con coinvolgimento della scarpata laterale

Negli ultimi anni è emerso un crescente interesse per la corretta progettazione delle barriere laterali, a causa del fatto che, nella maggior parte delle installazioni presenti lungo i tratti stradali e autostradali, il processo per garantirne l'efficacia si basa principalmente sul concetto di infissione dei paletti nel terreno. Questo approccio, tuttavia, tende a trascurare alcune criticità legate alla funzionalità e alla sicurezza delle barriere stesse, lasciando in secondo piano problematiche importanti che devono essere affrontate per migliorare le prestazioni complessive.

Nella trattazione dello studio di tesi, prima di andare a definire il rapporto tecnico riguardante le prove di spinta di paletti infissi nel terreno, si è ripercorso tutto il processo evolutivo del quadro normativo italiano ed europeo, con un particolare focus sulla descrizione della norma UNI EN 1317 [3], che illustra in modo dettagliato nelle varie parti tutte le informazioni e le procedure di esecuzione in fase di crash test dei dispositivi di sicurezza stradale, fino all'ottenimento della marcatura CE. Le parti caratterizzanti lo sviluppo della norma hanno consentito l'emanazione del rapporto tecnico UNI/TR 11785 [2] avente come tema principale le prove "push" per il corretto funzionamento delle barriere di sicurezza posizionate sul bordo di un rilevato stradale. Questo ha portato ad un'analisi approfondita andando a definire una serie di obiettivi in senso critico riguardante le diverse metodologie e la verifica della conformità dell'installazione sulla base dei risultati ottenuti ed innovativo con l'introduzione di un modello svolto mediante un software agli elementi finiti, con l'intento di sostituire la prova "push" per la caratterizzazione del terreno.

# CAPITOLO 1

## **SISTEMI DI RITENUTA STRADALI - QUADRO NORMATIVO ITALIANO ED EUROPEO**

L'evoluzione del quadro normativo italiano in materia di sicurezza stradale ha conosciuto una tappa fondamentale il 21 aprile 1962 [4], con l'introduzione dell'Articolo 1, lettera f), che stabiliva: *“fissare le direttive ed esercitare la sorveglianza sull'applicazione delle disposizioni contenute nell'articolo 144, lettera b), del decreto del Presidente della Repubblica 15 giugno 1959, n. 393, nonché di tutte le altre norme concernenti il traffico e la segnaletica sulle autostrade, sulle strade statali e su tutte le altre strade di uso pubblico, adottando, nell'ambito delle leggi vigenti, i provvedimenti necessari ai fini della sicurezza del traffico sulle autostrade e strade medesime”*.

La prima vera regola tecnica per la progettazione, validazione ed installazione delle barriere di sicurezza risale al 18 febbraio 1992 [5] con l'emanazione del *“Regolamento recante le istruzioni tecniche per la progettazione, l'omologazione e l'impiego delle barriere stradali di sicurezza”*. Le barriere stradali di sicurezza vengono impiegati in zone di maggiore criticità in particolare nei bordi di tutte le opere d'arte all'aperto (quali ponti, viadotti, bordi dei rilevati, ecc..) al fine di garantire una sicurezza per gli utenti della strada e quindi in caso di urto l'obiettivo principale è quello di contenere il veicolo all'interno della carreggiata stradale. È possibile descrivere una prima differenza sulla classificazione delle barriere di

sicurezza, che a seconda della loro destinazione ed ubicazione si dividono in quattro tipologie: a) barriere centrali da spartitraffico; b) barriere per bordo stradale, in rilevato o scavo; c) barriere per opere d'arte, quali ponti; d) barriere per punti singolari (terminali) (Figura 2).

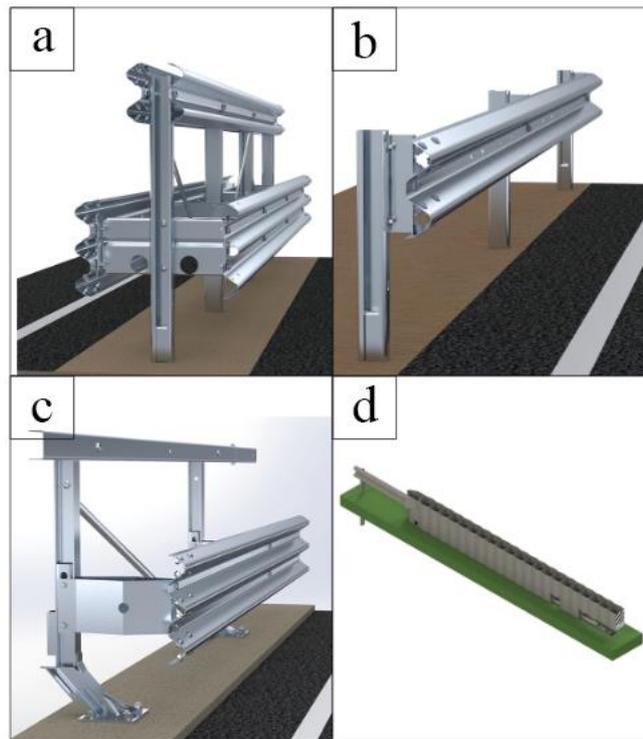


Figura 2: Classificazione delle barriere di sicurezza stradale

Successivamente, viene definito l'indice di severità  $I_s$  ovvero “l'energia cinetica posseduta dal mezzo all'atto dell'impatto calcolata con riferimento alla componente della velocità ortogonale alle barriere” espressa dalla seguente formulazione:

$$I_s = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{p}{g}\right) \cdot (v \cdot \sin \theta)^2 [KN \cdot m]$$

Equazione 1: Indice di severità

Dove:

- p: peso del veicolo [KN]
- g: accelerazione di gravità [ $m/s^2$ ]
- v: velocità d'impatto [m/s]

- $\theta$ : angolo di impatto

Sulla base dell'indice di severità, le barriere vengono classificate in relazione a come riportato in Tabella 1. I criteri di scelta delle barriere sono funzione della destinazione della strada e delle caratteristiche geometriche, nonché di quelle del traffico cui la stessa sarà interessata. Per le barriere di sicurezza installate su ponti, viadotti si adotta la classe B.

<i>CLASSE</i>	<i>INDICE DI SEVERITÀ [KNm]</i>
<i>A1</i>	<i>5 – 15</i>
<i>A2</i>	<i>15 – 50</i>
<i>A3</i>	<i>50 – 150</i>
<i>B1</i>	<i>150 – 300</i>
<i>B2</i>	<i>300 – 600</i>
<i>B3</i>	<i>600 - 1000</i>

Tabella 1: Classificazione delle barriere (D.M. 223/1992)

Inoltre, sono stati definiti i livelli di traffico determinati sulla base dei dati disponibili o rilevabili sulla strada interessata, di conseguenza il traffico è stato classificato in ragione della prevalenza dei mezzi che la compongono come riportato in Tabella 2.

<i>TRAFFICO</i>	<i>DESCRIZIONE</i>
<i>TIPO I</i>	<i>Veicoli &gt; 30 KN non superiore a 5% del totale</i>
<i>TIPO II</i>	<i>Veicoli &gt; 30 KN compreso tra 5% e 10% del totale</i>
<i>TIPO III</i>	<i>Veicoli &gt; 30 KN maggiore del 10% del totale</i>

Tabella 2: Tipi di traffico (D.M. 223/1992)

Con riferimento a quanto esposto fino ad ora, si riporta in Tabella 4, distinte per tipo di strada più comuni ed in ragione del tipo di traffico, le classi minime di barriere da impiegare nei vari casi.

<i>TIPO DI STRADA</i>	<i>TIPO DI TRAFFICO</i>	<i>CLASSE</i>
<i>STRADA EXTRAURBANA TIPO B, C...</i>	<i>I</i>	<i>A1</i>
	<i>II</i>	<i>A3</i>
	<i>III</i>	<i>B1</i>
<i>STRADA URBANA DI SCORRIMENTO E STRADA EXTRAURBANA TIPO V, VI, A...</i>	<i>I</i>	<i>A2</i>
	<i>II</i>	<i>B1</i>

	<i>III</i>	<i>B2</i>
<b>STRADA URBANA PRIMARIA</b>	<i>I</i>	<i>A2</i>
	<i>II</i>	<i>B2</i>
	<i>III</i>	<i>B3</i>
<b>STRADA EXTRAURBANA TIPO I, II, III, IV</b>	<i>I</i>	<i>A3</i>
	<i>II</i>	<i>B2</i>
	<i>III</i>	<i>B3</i>

Tabella 3: Classi minime di barriera (D.M. 223/1992)

Nel 1998 [6] con il D.M. del 3 giugno sono state introdotte ulteriori modifiche e integrazioni al D.M. 223/1992 [5] in particolare, è stato definito il “Livello di contenimento  $L_C$ ” ai fini della classificazione delle barriere e degli altri dispositivi, espresso da:

$$L_C = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (v \cdot \sin \varphi)^2 [kJ]$$

Equazione 2: Livello di contenimento

Dove:

- $M$ : massa del veicolo [ton]
- $v$ : velocità d’impatto [m/s]
- $\varphi$ : angolo d’impatto

Viene aggiunto, ai fini della classificazione della severità degli impatti, l’indice di “Severità dell’Accelerazione ASI” che “*misura la severità dell’urto sugli occupanti delle autovetture considerati seduti con cinture di sicurezza allacciate*” [5] espresso:

$$ASI(t) = \left[ \left( \frac{\bar{a}_x}{12g} \right)^2 + \left( \frac{\bar{a}_y}{9g} \right)^2 + \left( \frac{\bar{a}_z}{10g} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Equazione 3: Indice di severità dell’accelerazione

- $\bar{a}_x$ ,  $\bar{a}_y$  e  $\bar{a}_z$  sono le componenti dell’accelerazione da misurare in un punto P vicino al baricentro del veicolo mediante su di un intervallo mobile  $\delta$  di 50 ms;
- $g$ : accelerazione di gravità [ $m/s^2$ ]

In relazione all'indice ASI, tutte le barriere ed i dispositivi di ritenuta devono corrispondere ad un valore  $\leq 1$  ottenuto con una autovettura. È ammesso un indice ASI fino a 1,4 nei punti particolarmente pericolosi nei quali il contenimento di svio diviene un fattore essenziale ai fini della sicurezza.

Come riportato in Figura 2, le barriere in questo caso si classificano in funzione del Livello di contenimento; quindi, si riporta in Tabella 4 le relative classi associando un contenimento minimo.

<b>CLASSE</b>	<b>LIVELLO DI CONTENIMENTO (MINIMO) [kJ]</b>
<i>N1</i>	44
<i>N2</i>	82
<i>H1</i>	127
<i>H2</i>	288
<i>H3</i>	463
<i>H4</i>	572

Tabella 4: Classificazione delle barriere (D.M. 253/1998)

L'integrazione fondamentale ricade nell'introduzione dei terminali e gli attenuatori d'urto. I terminali sono definiti *“come gli elementi finali di una barriera di sicurezza corrente. La loro origine, per quanto possibile, non deve essere esposta al traffico, e la loro costruzione deve rappresentare una transizione con contenimento graduale dei veicoli, da zero, all'origine, fino alle prestazioni completa, nel punto in cui si uniscono alla barriera”* mentre gli attenuatori d'urto hanno *“lo scopo di ridurre, quando necessario, la severità dell'urto di un'autovettura contro gli ostacoli, compreso anche l'inizio delle barriere”*. Sono attribuiti come per le barriere delle classi che sono riportate in Tabella 5.

<b>CLASSE</b>	<b>LIVELLO DI CONTENIMENTO [kJ]</b>
<i>TC1</i>	320
<i>TC2</i>	500

Tabella 5: Classificazione degli Attenuatori d'urto (D.M. 253/1998)

I livelli di traffico invece sono classificati in funzione al volume di traffico e dalla prevalenza dei mezzi che lo compongono, distinti in tre livelli come riportato in Tabella 6.

<b>TRAFFICO</b>	<b>DESCRIZIONE</b>
<b>TIPO I</b>	<i>TGM ≤ 1000 o TGM &gt; 1000 con presenza di veicoli di massa superiore a 3000 kg ≤ 5% del totale</i>
<b>TIPO II</b>	<i>TGM &gt; 1000 con veicoli di massa superiore a 3000 kg sia &gt; 5% o ≤ 15% sul totale</i>
<b>TIPO III</b>	<i>TGM &gt; 1000 con veicoli di massa superiore a 3000 kg sia &gt; 15% sul totale</i>

Tabella 6: Tipi di traffico (D.M. 253/1998) (TGM: Traffico Giornaliero Medio annuo)

L'illustrazione delle classificazioni delle barriere e degli attenuatori e i tipi di traffico definiscono la scelta da indicare in relazione ai tipi di strada come riportato in Tabella.

<b>TIPO DI STRADE</b>	<b>TRAFFICO</b>	<b>DESTINAZIONE BARRIERE</b>			<b>Attenuatori</b>
		<b>Barriere spartitraffico</b>	<b>Barriere bordo laterale</b>	<b>Barriere bordo bonte</b>	
<b>AUTOSTRADE E STRADE EXTRAURBANE PRINCIPALI</b>	<i>I</i>	<i>H2</i>	<i>H1</i>	<i>H2</i>	<i>TC1 o TC2</i>
	<i>II</i>	<i>H3</i>	<i>H2</i>	<i>H3</i>	
	<i>III</i>	<i>H3 – H4</i>	<i>H2 – H3</i>	<i>H4</i>	
<b>STRADA EXTRAURBANE SECONDARIE E STRADE URBANE DI SCORRIMENTO</b>	<i>I</i>	<i>H1</i>	<i>N2</i>	<i>H2</i>	
	<i>II</i>	<i>H2</i>	<i>H1</i>	<i>H2</i>	
	<i>III</i>	<i>H2</i>	<i>H2</i>	<i>H3</i>	
<b>STRADE URBANE DI QUARTIERE E STRADE LOCALI</b>	<i>I</i>	<i>N2</i>	<i>N1</i>	<i>H2</i>	
	<i>II</i>	<i>H1</i>	<i>N2</i>	<i>H2</i>	
	<i>III</i>	<i>H1</i>	<i>H1</i>	<i>H2</i>	

Tabella 7: Classi minime di barriera (D.M. 253/199)

sono state introdotte nel 1998 [6] con il D.M. del 3 giugno riguardanti l'introduzione degli attenuatori d'urto, i terminali speciali e inoltre vengono definiti nuovi indici e parametri come il livello di contenimento e l'indice di severità dell'accelerazione.

Nel 2004 [7] con il Decreto del 21 giugno, venne introdotta una nuova integrazione della norma che portò ad un aggiornamento delle precedenti istruzioni tecniche e il recepimento ufficiale delle norme UNI EN 1317 [3] articolate in quattro parti: "classificazione prestazionale dei dispositivi di sicurezza nelle

*costruzioni stradali, le modalità di esecuzione delle prove d'urto e i relativi criteri di accettazione*". Nello specifico, è stato modificato l'art. 4 (D.M. 21/06/2004) [7], prescrivendo il calcolo di alcuni parametri quali: l'indice di severità dell'accelerazione (ASI), l'indice di velocità teorica della testa (THIV) e l'indice di decelerazione della testa dopo l'impatto (PHD). La norma UNI EN 1317 [3] è riportata in maniera schematica nel Capitolo 2, descrivendo nel Paragrafo 2.2 aggiornamenti sull'evoluzione dei livelli di contenimento e le classificazioni delle barriere di sicurezza.

Il Regolamento (UE) 305/2011 stabilisce che, in conformità alla norma europea armonizzata EN 1317 [3], a partire dal 1° gennaio 2011, tutti i dispositivi di ritenuta stradale utilizzati e installati devono essere provvisti di marcatura CE. Questa marcatura deve essere rilasciata da un organismo notificato, e accompagnata dalla dichiarazione CE di conformità emessa dal produttore o dal suo rappresentante autorizzato.

Inoltre, è stato introdotto un aggiornamento riguardante le Istruzioni tecniche per l'uso e l'installazione dei dispositivi di ritenuta stradale. Questo aggiornamento include indicazioni sui controlli da effettuare sia in fase di accettazione che durante l'installazione dei dispositivi stessi. Fino all'entrata in vigore definitiva delle nuove disposizioni, rimangono valide le istruzioni previste dal Decreto Ministeriale [7] del 21 giugno 2004. Tali requisiti sono formalizzati nella norma UNI EN 1317 [3], Parte 5, denominata: *“Requisiti di prodotto e valutazione di conformità per sistemi di trattenimento veicoli”*.

## CAPITOLO 2

### **Analisi della norma UNI EN 1317 sui sistemi di ritenuta stradali**

Nel presente capitolo, viene riportato con maggior dettaglio la norma UNI EN 1317 [3] con l'obiettivo di fornire una base di conoscenze relative alla realizzazione di strade più sicure con l'installazione, dove necessario, di sistemi di ritenuta stradali. Essi, se ben progettati servono a contenere e rinviare il veicolo all'interno della carreggiata andando a rimuovere il rischio di fuoriuscita e fornendo una maggior sicurezza ai pedoni o altri utenti della strada. Come definito nel Capitolo 1 la norma UNI EN 1317 [3] è articolata dalle seguenti parti:

- Parte 1: Terminologia e criteri generali per i metodi di prova;
- Parte 2: Classi di prestazione, criteri di accettazione delle prove d'urto e metodi di prova per le barriere di sicurezza inclusi i parapetti veicolari;
- Parte 3: Classi di prestazione, criteri di accettabilità basati sulla prova di impatto e metodi di prova per attenuatori d'urto;
- Parte 4: Classi di prestazione, criteri di accettazione per la prova d'urto e metodi di prova per terminali e transizioni delle barriere di sicurezza;
- Parte 5 "Requisiti di prodotto e valutazione della conformità. Test iniziali di tipo, classificazione, certificazione, conformità di produzione e

valutazione della qualità, accettabilità delle modifiche di prodotto, durabilità”;

- Parte 6: Sistemi di ritenuta dei pedoni - Parapetti pedonali;
- Parte 7: Classi di prestazione, criteri di accettazione per le prove d'impatto e metodi di prova per i terminali delle barriere di sicurezza;
- Parte 8: Sistemi di ritenuta stradali per motociclisti in grado di ridurre la severità dell'urto del motociclista in caso di collisione con le barriere di sicurezza.

Dallo sviluppo di tre sezioni della norma, in particolare Parte 1, Parte 2 e Parte 5, è stato redatto il rapporto tecnico UNI/TR 11785:2020 [2] con indicazioni sulla procedura di esecuzione delle prove di spinta sui paletti posizionati sul bordo del rilevato e le definizioni necessarie allo svolgimento.

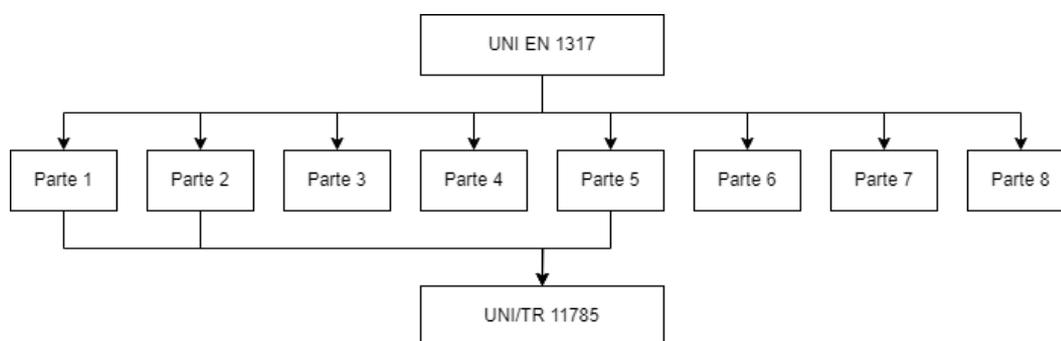


Figura 3: Schema riassuntivo per l'introduzione del rapporto tecnico UNI/TR 11785

## 2.1 UNI EN 1317 - Parte 1 (Criteri per i metodi di prova)

La presente norma europea elaborata dal Comitato Tecnico CEN/TC 226 “Attrezzature stradali” [8] descrive tutte le informazioni necessarie per la misurazione della prestazione di prodotti per sistemi di ritenuta stradali sottoposti a prova d'urto e i relativi livelli di severità. Inoltre, sono illustrati i dati relativi al sito di prova, unitamente alle definizioni dei sistemi di ritenuta stradali, con particolare attenzione alla descrizione della barriera di sicurezza, intesa come sistema di ritenuta veicolare continuo installato lungo i bordi stradali o sullo spartitraffico centrale. Vengono altresì fornite le specifiche dei veicoli impiegati

nelle prove d'urto, la strumentazione utilizzata per il loro monitoraggio, nonché i procedimenti di calcolo e i metodi di registrazione dei dati d'urto da collisione, con riferimento ai livelli di severità dell'urto e all'indice di deformazione dell'abitacolo del veicolo (VCDI). Nel presente studio di tesi sono presi in esame l'indice di severità dell'accelerazione e la velocità teorica d'urto della testa, indicati rispettivamente con gli acronimi ASI e THIV.

L'esecuzione dei crash test prevede che l'area debba essere generalmente piana con una pendenza non maggiore del 2,5%, la pavimentazione stradale deve essere esente da detriti, polveri o da eventuale presenza di acqua stagnante, ghiaccio o neve. Un ulteriore parametro fondamentale riguarda la velocità con cui il veicolo durante l'esecuzione della prova impatta la barriera e per questo è richiesto una giusta distanza in modo tale da poter portare il veicolo alla velocità stabilita. L'area sottoposta a prova deve contenere un numero adeguato di telecamere in modo da visualizzare con grande chiarezza l'urto che avviene tra il veicolo e la barriera. Detto ciò, all'interno del rapporto di prova viene riportato quanto segue:

- l'area di prova e il prodotto di ritenuta stradale sottoposto a prova
- la posizione di tutte le telecamere
- la traiettoria del veicolo
- il punto dell'urto e le ubicazioni dimensionate di tutte le parti dell'oggetto di prova di peso maggiore di 2,0 kg che si sono staccate durante la prova

I mezzi impiegati durante i test devono essere modelli di produzione e, per quelli con un peso fino a 1500 kg, devono rispecchiare l'attuale condizione di traffico in Europa. Tutti i veicoli utilizzati per le prove devono avere caratteristiche e dimensioni come riportato in Figura 4. Gli pneumatici devono essere gonfiati alle pressioni stabilite dal fabbricante del veicolo, inoltre, devono soddisfare i requisiti per il rilascio di un certificato di idoneità a circolare su strada sia per quanto riguarda gli pneumatici stessi, ma anche per le sospensioni, la carrozzeria e l'allineamento delle ruote. Non devono essere effettuate riparazioni o modifiche, perché possono portare ad una alterazione delle caratteristiche generali del veicolo, e se in tal caso si ricorrono ad esse devono essere conformi alla specifica del veicolo originale.

Come precedentemente evidenziato, è fondamentale che il luogo di prova sia privo di polvere e di qualsiasi altra forma di detriti. Allo stesso modo, il veicolo utilizzato durante il test deve essere accuratamente pulito, poiché la presenza di polvere sollevata al momento dell'urto potrebbe influire negativamente sui risultati, compromettendone l'affidabilità.

I sistemi di sicurezza elettronici del veicolo devono essere spenti o rimossi.

Durante le prove, è fondamentale garantire che tutti i liquidi necessari al corretto funzionamento del veicolo, inclusi carburante, olio motore, liquido di raffreddamento e qualsiasi altro fluido operativo, siano inclusi nella massa inerziale di prova. Questo assicura che le condizioni di test siano il più possibile realistiche e rappresentative dell'utilizzo effettivo del veicolo su strada.

Inoltre, tutti i pesi di zavorra impiegati per raggiungere la massa desiderata devono essere fissati in modo stabile e sicuro al veicolo. È essenziale che tale fissaggio avvenga rispettando scrupolosamente le specifiche del costruttore, sia per quanto riguarda la distribuzione del peso sul piano orizzontale sia per quella sul piano verticale. Un posizionamento errato dei pesi potrebbe alterare il comportamento del veicolo e compromettere l'affidabilità dei risultati ottenuti durante i test.

Un aspetto particolarmente importante è che i pesi di zavorra non devono essere collocati in punti che possano influenzare negativamente la sicurezza strutturale del veicolo. In particolare, è necessario evitare che questi elementi possano interferire con la deformazione programmata della carrozzeria o con l'integrità dell'abitacolo in caso di urto, per non alterare il comportamento del veicolo in situazioni critiche.

## Capitolo 2

<b>MASSA</b> kg ±								
Massa totale	900 ± 40	1 300 ± 65	1 500 ± 75	10 000 ± 300	13 000 ± 400	16 000 ± 500	30 000 ± 900	38 000 ± 1 100
Massa inerziale di prova <sup>a)</sup>	825 ± 40	1 300 ± 65	1 500 ± 75	10 000 ± 300	13 000 ± 400	16 000 ± 500	30 000 ± 900	38 000 ± 1 100
Compresa zavorra massima <sup>b)</sup>	100	160	180	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile
ATD installato	78 ± 4	Non richiesto	Non richiesto	Non richiesto	Non richiesto	Non richiesto	Non richiesto	Non richiesto
<b>DIMENSIONI</b> m (Scostamento massimo ± 15%)								
Carreggiata ruote (anteriori e posteriori)	1,35	1,40	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Raggio delle ruote (senza carico)	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile	0,46	0,52	0,52	0,55	0,55
Interasse (fra gli assi estremi)	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile	4,60	6,50	5,90	6,70	11,25
<b>POSIZIONE DEL CENTRO DI MASSA <sup>c),d)</sup></b> m								
Distanza longitudinale dall'asse anteriore (CGX) ± 10%	0,90	1,10	1,24	2,70	3,80	3,10	4,14	6,20
Distanza laterale dalla linea centrale del veicolo (CGY)	±0,07	±0,07	±0,08	±0,10	±0,10	±0,10	±0,10	±0,10
Altezza dal suolo (CGZ):								
- Massa del veicolo (± 10%)	0,49	0,53	0,53	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile
- Carico (+ 15%, - 5%)	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile	1,50	1,40	1,60	1,90	1,90
<b>TIPO DI VEICOLO</b>	Automobile	Automobile	Automobile	Autocarro rigido	Autobus	Autocarro rigido	Autocarro rigido	Autocarro articolato
Numero di assi <sup>e)</sup>	1S + 1	1S + 1	1S + 1	1S + 1	1S + 1	1S + 1/2	2S + 2	1S + 3/4
a)	Compreso il carico per veicoli pesanti (autocarni) (HGV)							
b)	Compresa l'attrezzatura di misurazione e registrazione							
c)	Il centro di massa del veicolo deve essere calcolato quando ATD non è nell'automobile							
d)	Il centro di massa di veicoli a due assi deve essere determinato in conformità alla ISO 10392							
e)	S: asse sterzante							

Figura 4: Specifiche del veicolo

Passando ora alla strumentazione richiesta per il calcolo di ASI e THIV il veicolo viene equipaggiato con un accelerometro per la misurazione della direzione longitudinale (in avanti), uno per la direzione laterale (sui lati), uno per la direzione verticale (verso il basso) ed eventualmente con un trasduttore di velocità angolare. La posizione degli accelerometri (Figura 5) sono montati in un singolo punto (P) sul tunnel vicino alla proiezione verticale del centro di massa del veicolo non deformato e per causa di vincoli fisici, il posizionamento del gruppo di accelerometri può risultare spostato di oltre 70 mm dal centro di massa e in questo caso si possono verificare differenze tra le accelerazioni misurate e quelle al centro di massa, a causa di momenti angolari; questo porta ad aggiungere un secondo gruppo di accelerometri lungo l'asse longitudinale.

La corretta acquisizione e gestione dei dati relativi alle prove sperimentali è fondamentale per garantire l'affidabilità e la validità delle analisi. In questo contesto, i trasduttori, i filtri e i canali di registrazione devono soddisfare specifici requisiti tecnici, in particolare per quanto riguarda la frequenza di campionamento, il filtraggio e l'ampiezza del segnale acquisito. Questa sezione analizza i requisiti fondamentali per tali strumenti, ponendo particolare efficacia sulla conformità agli standard tecnici e sulle pratiche ottimali per la raccolta dei dati.

I trasduttori e i canali di registrazione devono essere conformi alla classe di frequenza specificata dalla normativa di riferimento. Per i canali di accelerazione e velocità angolare, è richiesto il rispetto della classe di frequenza CFC\_180, mentre i dati filtrati a CFC\_60 possono essere utilizzati per la generazione di grafici rappresentativi dell'accelerazione. Inoltre, tutti i dispositivi coinvolti devono rispettare le specifiche tecniche definite dalla norma ISO 6487, che garantisce un allineamento a standard riconosciuti a livello internazionale.

Un aspetto cruciale nella raccolta dei dati è la frequenza di campionamento, che deve essere di almeno 2 kHz. Tale requisito è indispensabile per garantire che il segnale acquisito sia sufficientemente dettagliato da preservare tutte le informazioni rilevanti durante le fasi successive di analisi e filtraggio.

I dati acquisiti sono sottoposti a un processo di filtraggio mediante filtri ricorsivi, come il filtro di Butterworth. Tuttavia, questi filtri producono inevitabilmente "transitori iniziali" che si verificano all'inizio e alla fine dei dati acquisiti. Per ridurre l'impatto di tali transitori e garantire la stabilizzazione del segnale, è necessario includere una quantità aggiuntiva di dati, pari a 500 millisecondi, sia prima che dopo l'intervallo di interesse. Questi dati aggiuntivi, pur essendo scartati dopo il filtraggio, sono essenziali per mantenere l'integrità del segnale analizzato.

Oltre alla frequenza di campionamento e al filtraggio, è indispensabile specificare la classe di ampiezza del canale (CAC) per ogni trasduttore utilizzato, inclusi quelli destinati alla misurazione della velocità angolare. La scelta di un CAC adeguato è fondamentale per evitare che i segnali acquisiti risultino "tagliati" (clipping) e per garantire che i valori massimi registrati rappresentino una frazione ragionevole del fondo scala dello strumento. Questo approccio consente inoltre di

limitare l'effetto della "quantizzazione" durante il processo di digitalizzazione. I valori di CAC selezionati devono essere documentati accuratamente nel rapporto di prova, a seguito dell'ispezione preliminare dei dati raccolti.

Per migliorare la tracciabilità degli eventi chiave durante la prova, è necessario utilizzare un indicatore di eventi. Questo dispositivo deve segnalare in modo chiaro il momento esatto del primo contatto tra il veicolo e il sistema di ritenuta, facilitando l'interpretazione e l'allineamento dei dati raccolti.

L'acquisizione delle accelerazioni del veicolo è impiegata per la valutazione degli indici ASI e THIV e il modello di spazio libero (flail space). Il gruppo di accelerometri deve essere posizionato il più vicino possibile al centro di massa del veicolo, ma non oltre 70 mm longitudinalmente e 40 mm lateralmente dal centro di massa; generalmente a causa di vincoli fisici non è sempre possibile posizionarli nel modo corretto e di conseguenza, la posizione effettiva del gruppo di accelerometri può risultare distante oltre 70 mm dal centro di massa, questo implica che a seconda della distanza, possono verificarsi differenze significative fra le accelerazioni misurate e quelle al centro di massa, a causa dei movimenti angolari.

Queste differenze possono essere ridotte andando a posizionare un secondo gruppo triassiale lungo l'asse x (longitudinale) come viene riportato in Figura 5.

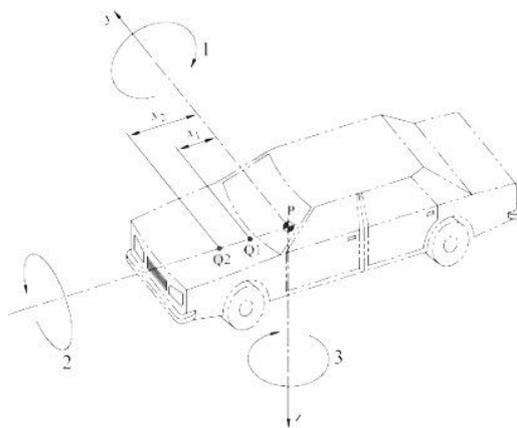


Figura 5: Posizionamento dell'accelerometro: 1. Beccheggio, 2. Rollio, 3. Imbardata

I dati poi vengono registrati dalla strumentazione descritta sopra ed elaborati utilizzando i procedimenti riportati in Figura 6.

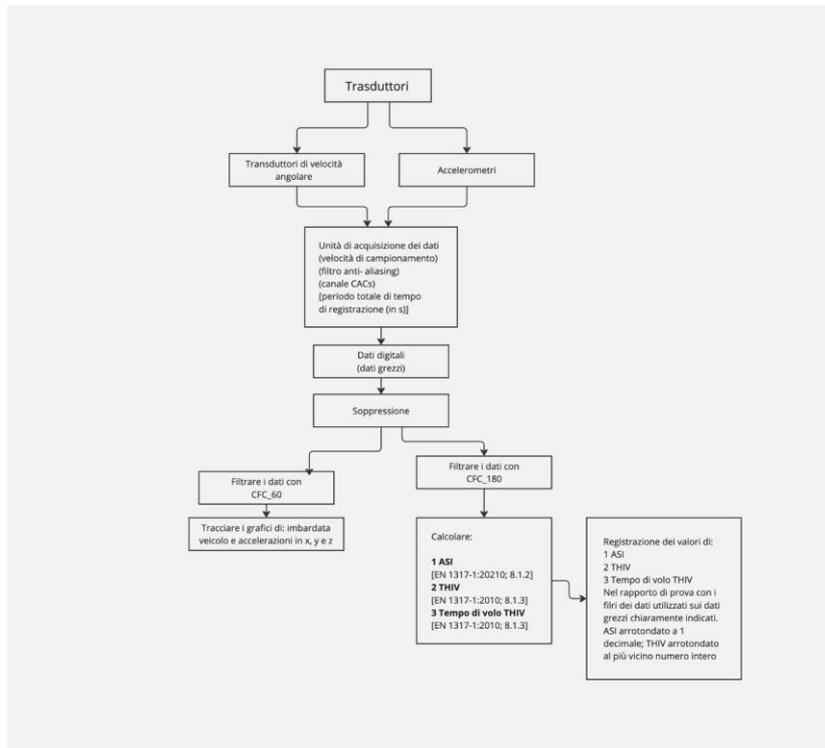


Figura 6: Processo di elaborazione dei dati

Vengono riportati in sequenza le procedure di calcolo dell'ASI e del THIV.

La procedura di calcolo dell'ASI è articolata come segue:

- a) registrazione delle misure delle tre componenti dell'accelerazione veicolo;
- b) filtraggio dei dati con il filtro di Butterworth quadripolare a fase nulla;
- c) calcolo dell'ASI come una funzione del tempo;
- d) determinazione dell'ASI come il massimo della serie ASI(k);
- e) calcolo dell'ASI ad almeno due cifre decimali.

Prima di descrivere con particolare dettaglio la procedura di calcolo del THIV, si introduce qual è il concetto di velocità teorica d'urto della testa. È stato sviluppato per valutare la severità d'urto dell'occupante per veicoli coinvolti in collisioni con sistemi di ritenuta veicolare stradale. L'occupante del veicolo risulta un oggetto che si muove liberamente (testa) che, quando il veicolo cambia velocità dovuto al contatto con il sistema di ritenuta, continua il suo moto finché non colpisce una superficie all'interno del veicolo.

La misura della velocità dell'urto teorico della testa è considerata una misura della severità dell'urto del veicolo con il sistema di ritenuta veicolare.

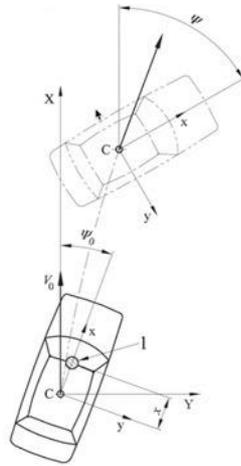


Figura 7: Sistemi di riferimento veicolo e terreno

La procedura di calcolo del THIV è articolata come segue:

- a) registrare le accelerazioni del veicolo e la velocità di imbardata, e salvarle in forma digitale alla frequenza di campionamento  $S$ . La registrazione dei dati deve iniziare almeno 500 ms prima del contatto con il sistema di ritenuta veicolare;
- b) interpolazione lineare tra i valori misurati dell'angolo di imbardata per ottenere dati dell'angolo di imbardata alla stessa velocità di campionamento degli altri dati registrati;
- c) calcolo dell'accelerazione del veicolo nelle coordinate "terreno" (che non ruota);
- d) integrare l'accelerazione del veicolo nelle coordinate "terreno" (che non ruota);
- e) calcolo della posizione e la velocità della testa teorica rispetto alle coordinate (che ruota) basate sul veicolo;
- f) trovare il valore minimo di  $t$ ;
- g) calcolo del THIV;

h) calcolo del THIV ad almeno due cifre decimali.

Un ulteriore indice che la norma riporta ma di non fondamentale importanza per l'oggetto di studio riguarda l'indice di deformazione dell'abitacolo del veicolo (VCDI), questo indice da una descrizione della deformazione interna del veicolo e deve essere determinato esclusivamente per le automobili.

Tale indice designa sia la posizione che l'estensione della deformazione dell'abitacolo e deve essere formato da due caratteri alfabetici più sette numerici.

I primi due caratteri riguardanti la posizione della deformazione dell'abitacolo assume la seguente nomenclatura ed è riportato in Figura 8:

- AS = tutti i sedili;
- FS = sedili anteriori e BS = sedili posteriori;
- RS = sedili di destra e LS = sedili di sinistra;
- RF = anteriore destro, RB = posteriore destro, LF = anteriore sinistro e LB = posteriore sinistro.

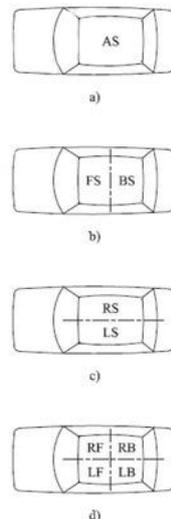


Figura 8: Posizione della deformazione dell'abitacolo

I sette sub indici indicano la percentuale di riduzione delle dimensioni interne, lo schema è riportato in Figura 9:

- a) distanza minima fra il cruscotto e la parte più alta del sedile posteriore;

- b) distanza minima fra il tetto e il pannello del pavimento;
- c) distanza minima fra il sedile posteriore e il pannello motore;
- d) distanza minima fra la parte inferiore del cruscotto e il pannello del pavimento;
- e) larghezza interna minima fra i bordi inferiori destro e sinistro dei finestrini;
- f) distanza minima fra il bordo inferiore del finestrino destro e il bordo superiore del finestrino sinistro;
- g) distanza minima fra il bordo inferiore del finestrino sinistro e il bordo superiore del finestrino destro;

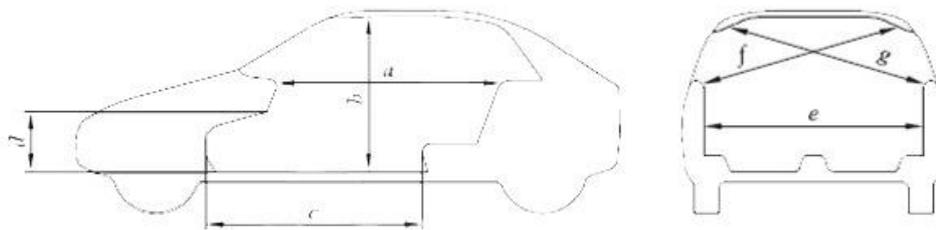


Figura 9: Dimensioni interne

## 2.2 UNI EN 1317 - Parte 2 (Metodi di prova per le barriere di sicurezza inclusi i parapetti veicolari)

La presente norma europea [9] include procedure ottimizzate per le prove d'urto, e introduce le barriere di sicurezza e un formato dettagliato del rapporto di prova. Per migliorare la sicurezza, in alcuni tratti di strada è prevista l'installazione di barriere di sicurezza in modo da contenere e rimettere i veicoli che escono fuori strada in carreggiata. In termini di prestazione vengono descritti i livelli per i tre principali criteri di contenimento di un veicolo stradale, quali: il livello di contenimento, i livelli di severità dell'urto e la deformazione espressa dalla larghezza operativa e l'intrusione del veicolo. Come detto, i diversi livelli di prestazione definiscono la classe del sistema da installare. Per questo, assicurare

una corretta progettazione è di fondamentale importanza tenere conto delle norme EN 1317-1 [8] ed EN 1317-5 [10] per la valutazione di conformità e di durabilità.

Al suo interno vengono specificate le classi di contenimento, la larghezza operativa, l'intrusione del veicolo e i livelli di severità dell'urto.

Le barriere, inclusi i parapetti veicolari sottoposti a condizioni di prova, devono essere conformi ai requisiti illustrati in Tabella 8. Tali requisiti sono definiti in funzione dei parametri della prova stabilita, che comprendono la velocità d'urto, l'angolo d'urto, la massa totale del veicolo e la sua tipologia. Essi, devono essere conformi ai requisiti di livello di contenimento e severità dell'urto.

<i>PROVA</i>	<i>VELOCITÀ D'URTO KM/H</i>	<i>ANGOLO D'URTO GRADI</i>	<i>MASSA TOTALE KG</i>	<i>TIPO DI VEICOLO</i>
<i>TB 11</i>	<i>100</i>	<i>20</i>	<i>900</i>	<i>Automobile</i>
<i>TB 21</i>	<i>80</i>	<i>8</i>	<i>1300</i>	<i>Automobile</i>
<i>TB 22</i>	<i>80</i>	<i>15</i>	<i>1300</i>	<i>Automobile</i>
<i>TB 31</i>	<i>80</i>	<i>20</i>	<i>1500</i>	<i>Automobile</i>
<i>TB 32</i>	<i>110</i>	<i>20</i>	<i>1500</i>	<i>Automobile</i>
<i>TB 41</i>	<i>70</i>	<i>8</i>	<i>10000</i>	<i>Autocarro rigido</i>
<i>TB 42</i>	<i>70</i>	<i>15</i>	<i>10000</i>	<i>Autocarro rigido</i>
<i>TB 51</i>	<i>70</i>	<i>20</i>	<i>13000</i>	<i>Autobus</i>
<i>TB 61</i>	<i>80</i>	<i>20</i>	<i>16000</i>	<i>Autocarro rigido</i>
<i>TB 71</i>	<i>65</i>	<i>20</i>	<i>30000</i>	<i>Autocarro rigido</i>
<i>TB 81</i>	<i>65</i>	<i>20</i>	<i>38000</i>	<i>Autocarro articolato</i>

Tabella 8: Tipologie di prova

Andando ora a descrivere i relativi livelli di contenimento delle barriere di sicurezza compresi i parapetti veicolari, quando sono sottoposte a prove d'urto, si dividono in quattro livelli: contenimento con angolo basso cui ricadono T1, T2 e T3; contenimento normale N1 e N2; contenimento più elevato H1, H2, H3, L1, L2, L3; contenimento molto elevato H4a, H4b, L4a e L4b; e per ciascun livello di contenimento viene associato il tipo di prova di accettazione (il tipo di veicolo da impiegare, la velocità d'urto, angolo d'urto e massa) come riportato in Tabella 9.

Si adottano valutazioni differenti quando un sistema di ritenuta veicolare rientra nei livelli di contenimento L3, N2, H1, H2, H3 H4a, H4b, L1, L2, L3, L4a e L4b dove, vengono richieste prove diverse: una prova secondo il massimo livello di contenimento per quel particolare sistema; uno o più prove utilizzando automobili

allo scopo di verificare che il raggiungimento soddisfacente del livello massimo sia compatibile anche con la sicurezza per una gamma di automobili.

<b>LIVELLI DI CONTENIMENTO E PROVA DI ACCETTAZIONE</b>		
	<b>Livelli di contenimento</b>	<b>Prova di accettazione</b>
<b>CONTENIMENTO CON ANGOLO D'URTO BASSO</b>	<i>T1</i>	<i>TB21</i>
	<i>T2</i>	<i>TB22</i>
	<i>T3</i>	<i>TB41 e TB21</i>
<b>CONTENIMENTO NORMALE</b>	<i>N1</i>	<i>TB31</i>
	<i>N2</i>	<i>TB32 e TB11</i>
<b>CONTENIMENTO PIÙ ELEVATO</b>	<i>H1</i>	<i>TB42 e TB11</i>
	<i>H2</i>	<i>TB51 e TB11</i>
	<i>H3</i>	<i>TB61 e TB11</i>
<b>CONTENIMENTO MOLTO ELEVATO</b>	<i>H4a</i>	<i>TB71 e TB11</i>
	<i>H4b</i>	<i>TB81 e TB11</i>

Tabella 9: Livelli di contenimento

Gli indici della severità dell'urto per l'occupante del veicolo ASI e THIV definiti nella EN 1317-1 [3] devono rispondere ai requisiti riportati in Tabella 10 la quale definisce tre classi di severità dell'urto A, B e C. Il livello di severità dell'urto A garantisce un grado di sicurezza più elevato per l'occupante di un veicolo fuoriuscito dalla carreggiata rispetto al livello B, mentre il livello B offre una sicurezza superiore rispetto al livello C. La posizione del manichino antropomorfo (ATD) deve essere posizionato nel sedile anteriore dell'automobile sul lato dell'urto e fissato con la cintura di sicurezza del veicolo quando richiesto dalla EN 1317-1 [8].

<b>Livello di severità dell'urto</b>	<b>Valori degli indici</b>	
<b>A</b>	<i>ASI ≤ 1,0</i>	
<b>B</b>	<i>ASI ≤ 1,4</i>	<i>e THIV ≤ 33 km/h</i>
<b>C</b>	<i>ASI ≤ 1,9</i>	

Tabella 10: Livelli di severità dell'urto

Durante le prove d'urto, l'impatto del veicolo contro la barriera genera una deformazione del sistema, che è descritta e caratterizzata da:

- deflessione dinamica ( $D_m$ ): lo spostamento laterale massimo del sistema di ritenuta sul lato rivolto verso il traffico (Figura 10)

- larghezza operativa ( $W_m$ ): la distanza massima tra il lato rivolto verso il traffico e la posizione più esterna raggiunta dinamicamente dalla barriera o dal veicolo durante l'impatto. Nel caso di deformazione del veicolo, si considera la posizione laterale massima di una qualunque parte del veicolo (Figura 10)
- intrusione del veicolo ( $VI_m$ ): il posizionamento laterale massimo del carico teorico del veicolo (come autocarri o autobus) sul lato rivolto verso il traffico. Questa viene valutata tramite registrazioni fotografiche o video, considerando la posizione e l'angolo del carico durante l'impatto (Figura 10)

L'accuratezza della deflessione dinamica e per la larghezza operativa deve essere del 10% ma non minore di 0,1 m, mentre per l'intrusione del veicolo deve essere di  $\pm 0,2$  m.

Questi parametri sono rilevati mediante tecniche avanzate come riprese ad alta velocità per garantire misurazioni accurate.

In seguito, vengono definiti i valori effettivi e normalizzati di deflessione dinamica, larghezza operativa e intrusione del veicolo che successivamente devono essere misurati e riportati nel rapporto di prova.

- Deflessione dinamica normalizzata ( $D_N$ ), espressa in (m):

$$D_N = D_m \times \sqrt{\frac{M_t \times (V_t \times \sin \alpha_t)^2}{M_m \times (V_m \times \sin \alpha_m)^2}}$$

Equazione 4: Deflessione dinamica normalizzata

- Larghezza operativa normalizzata ( $W_N$ ), espressa in (m):

$$W_N = W_U + \left[ (W_m - W_U) \times \sqrt{\frac{M_t \times (V_t \times \sin \alpha_t)^2}{M_m \times (V_m \times \sin \alpha_m)^2}} \right]$$

Equazione 5: Larghezza operativa normalizzata

- Intrusione del veicolo normalizzata ( $VI_N$ ), espressa in (m):

$$VI_N = VI_m \times \sqrt{\frac{M_t \times (V_t \times \sin \alpha_t)^2}{M_m \times (V_m \times \sin \alpha_m)^2}}$$

Equazione 6: Intrusione del veicolo normalizzata

Dove:

- $D_m$  (m): deflessione dinamica massima misurata;
- $W_m$  (m): larghezza operativa misurata;
- $W_U$ : larghezza non deformata del sistema;
- $VI_m$  (m): intrusione del veicolo misurata;
- $M_t$  (kg): massa totale nominale;
- $V_t$  (m/s): velocità nominale;
- $\alpha_t$  (°): angolo nominale;
- $M_m$  (kg): massa totale misurata;
- $V_m$  (m/s): velocità misurata;
- $\alpha_m$  (°): angolo misurato.

La deflessione dinamica normalizzata e la larghezza operativa normalizzata devono essere calcolate dai dati misurati mentre, l'intrusione del veicolo deve essere valutata tramite registrazioni fotografiche ad alta velocità o riprese video e normalizzata con i dati misurati.

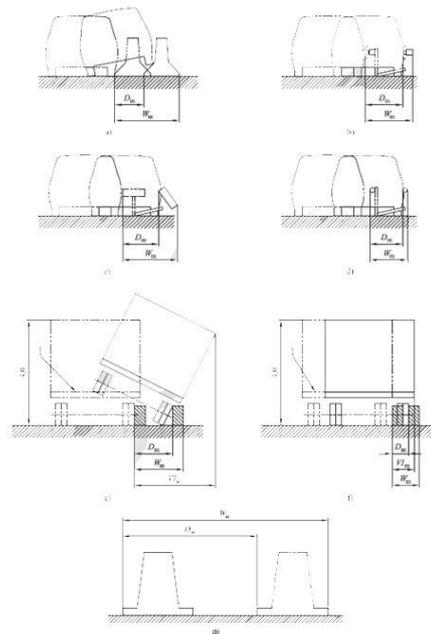


Figura 10: Deflessione dinamica, Larghezza operativa e Intrusione del veicolo

Per quanto riguarda i criteri di accettazione, le barriere di sicurezza compresi i parapetti veicolari devono essere conformi a quanto descritto in precedenza e inoltre, deve rispettare il comportamento della barriera di sicurezza incluso il parapetto veicolare, mentre il veicolo di prova deve essere conforme ai requisiti dell'indice di severità, della deformazione del veicolo e la deformazione della barriera.

I parametri di prova su cui devono essere valutati i criteri di accettazione sono elencati in Tabella 11 in funzione del livello di contenimento.

<i>Livello di Contenimento</i>	<i>PARAMETRI</i>			
	<i>Comportamento della barriera di sicurezza incluso il parapetto veicolare e del veicolo</i>	<i>Livello di severità dell'urto ASI - THIV</i>	<i>Deformazione del veicolo (VCDI)</i>	<i>Deformazione della barriera di sicurezza incluso il parapetto veicolare</i>
<i>T1</i>	<i>TB21</i>	<i>TB21</i>	<i>TB21</i>	<i>TB21</i>
<i>T2</i>	<i>TB22</i>	<i>TB22</i>	<i>TB22</i>	<i>TB22</i>
<i>T3</i>	<i>TB41 + TB21</i>	<i>TB21</i>	<i>TB21</i>	<i>TB41 + TB21</i>
<i>N1</i>	<i>TB31</i>	<i>TB31</i>	<i>TB31</i>	<i>TB31</i>
<i>N2</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>
<i>H1</i>	<i>TB42 + TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB42 + TB11</i>
<i>H2</i>	<i>TB51 + TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB51 + TB11</i>
<i>H3</i>	<i>TB61 + TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB61 + TB11</i>
<i>H4a</i>	<i>TB71 + TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB71 + TB11</i>
<i>H4b</i>	<i>TB81 + TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB11</i>	<i>TB81 + TB11</i>
<i>L1</i>	<i>TB42 + TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB42 + TB32 + TB11</i>
<i>L2</i>	<i>TB51 + TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB51 + TB32 + TB11</i>
<i>L3</i>	<i>TB61 + TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB61 + TB32 + TB11</i>
<i>L4a</i>	<i>TB71 + TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB71 + TB32 + TB11</i>
<i>L4b</i>	<i>TB81 + TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB32 + TB11</i>	<i>TB81 + TB32 + TB11</i>

Tabella 11: Criteri di accettazione

Tutti i parametri sopra elencati devono essere riportati nel rapporto di prova e il caso peggiore deve essere utilizzato per definire le classi.

Il comportamento della barriera di sicurezza incluso il parapetto veicolare deve contenere il veicolo senza indurlo alla fuoriuscita ed inoltre, gli elementi non devono in alcun modo entrare all'interno del veicolo causando lesioni gravi ai passeggeri.

Per quanto riguarda invece il comportamento del veicolo di prova, durante e dopo l'urto non più di una ruota deve passare completamente sopra o sotto la barriera di sicurezza, il veicolo non deve ribaltarsi e per le prove di autocarri o autobus, non più del 5% della massa di zavorra deve staccarsi o sporgersi durante la prova fino al momento in cui tracce del veicolo abbandonano il box di uscita.

Dopo l'urto, il veicolo deve lasciare la barriera di sicurezza, compreso il parapetto veicolare, senza che le tracce delle ruote attraversino una linea parallela al lato del sistema originariamente rivolto verso il traffico. Tale linea deve essere posizionata a una distanza A, aumentata del 16% della lunghezza del veicolo, e a una distanza B dal punto finale della barriera. Questo punto P rappresenta il momento in cui le ultime tracce delle ruote del veicolo incrociano nuovamente la linea originaria. Per automobili e altri veicoli specificati, le distanze A e B devono rispettare i criteri indicati nella Figura 11.

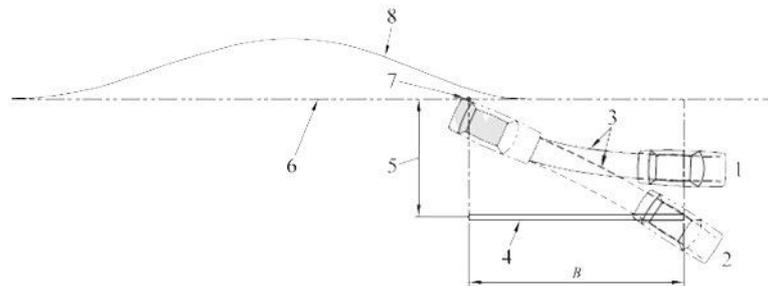


Figura 11: Traiettorie del box di uscita

Dalla norma EN 1317-1 [8] l'indice di severità ASI e THIV devono essere calcolati utilizzando la strumentazione del veicolo (Paragrafo 2.1), e i relativi valori devono essere inseriti nel rapporto di prova. Inoltre, è necessario riportare tutti gli indici di severità delle prove svolte con automobili, includendo anche l'indice VCDI (indice di deformazione dell'abitacolo del veicolo).

I valori normalizzati e misurati della deflessione dinamica e larghezza operativa devono essere indicati nel rapporto di prova. Per quanto riguarda l'intrusione del veicolo, essa deve essere riportata esclusivamente per le prove eseguite con autocarri e autobus.

Il metodo di prova si basa su alcuni punti fondamentali, in particolare il sito di prova e il veicolo che viene impiegato sono stati descritti nel Paragrafo 2.1, mentre

nel suddetto paragrafo viene spiegato con maggior dettaglio le barriere di sicurezza e il rapporto di prova deve includere la descrizione dettagliata e la specifica di progetto dell'oggetto di prova per permettere la verifica della conformità del sistema installato da sottoporre a prova. La specifica di progetto deve includere il riferimento ai requisiti prestazionali della fondazione.

La lunghezza della barriera di sicurezza o del parapetto veicolare sottoposto a test deve essere adeguata a dimostrare le prestazioni complessive dell'intero sistema installato. Al termine della prova, è fondamentale verificare l'idoneità della lunghezza utilizzando procedure specifiche. Le lunghezze da testare devono essere definite dal produttore e garantire che il sistema sia in grado di gestire l'urto più severo, confermando le proprietà di deflessione dinamica.

Gli elementi terminali, come gli ancoraggi, devono rispettare le specifiche del produttore ed essere descritti con precisione nel rapporto di prova, evitando qualsiasi interferenza con la deflessione laterale. Le fondazioni devono soddisfare i requisiti progettuali previsti.

Per i sistemi pre-tesi, il livello di tensionamento deve essere regolato in funzione della temperatura: le prove con veicoli di dimensioni ridotte devono essere eseguite a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mentre quelle con veicoli di grandi dimensioni a  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In caso di test unico per un livello di contenimento, il tensionamento deve corrispondere a una temperatura di  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . I valori di tensionamento e temperatura devono essere forniti dal produttore.

Infine, eventuali modifiche al parapetto, come il riempimento o l'utilizzo come parapetto pedonale, devono essere considerate nell'installazione e non devono compromettere le prestazioni complessive del sistema.

La posizione del punto dell'urto viene scelto dal laboratorio di prova e deve essere lo scenario più gravoso di prova delle barriere di sicurezza compreso il parapetto veicolare e deve comprendere eventuali punti deboli del progetto. Inoltre, se il laboratorio sceglie un punto diverso da quello posto a circa un terzo della lunghezza di installazione al fine di avere la condizione peggiore, tale scelta deve essere giustificata all'interno del rapporto di prova.

La velocità dell'urto del veicolo deve essere misurata lungo la traiettoria di avvicinamento del veicolo non oltre 6 metri prima dell'urto. L'accuratezza della

## Capitolo 2

---

velocità deve essere entro  $\pm 1,0\%$  invece lo scostamento dell'angolo d'urto deve essere  $0\%$  e  $+7\%$ .

L'angolo di avvicinamento del veicolo deve essere misurato in modo uguale alla velocità d'urto. L'accuratezza dell'angolo deve essere entro  $\pm 0,5^\circ$  invece lo scostamento dell'angolo d'urto deve essere  $-1,0^\circ$  e  $+1,5^\circ$ .

Per evitare grandi differenze di energia d'urto, lo scostamento limite massimo per la velocità e l'angolo non deve essere combinato. Alla tolleranza di angolo d'urto maggiore di  $+1,5^\circ$  lo scostamento massimo di velocità superiore è ridotto a  $+5\%$ , e allo scostamento massimo di  $-1,0^\circ$  lo scostamento massimo di velocità inferiore è aumentato di  $+2\%$ .

La strumentazione del veicolo è stata riportata nel capitolo precedente e deve seguire quegli standard.

L'impianto fotografico deve descrivere con chiarezza la dinamica che avviene durante e dopo l'impatto del veicolo contro la barriera. Una scala nota deve essere visibile nella telecamera zenitale per facilitare le misure della copertura fotografica in seguito alla prova. Le telecamere ad alta velocità devono acquisire almeno 200 fotogrammi al secondo, mentre le telecamere a velocità normale devono acquisire almeno 24 fotogrammi al secondo.

Si riporta in Figura 12 un esempio di come devono essere posizionate le telecamere per una corretta acquisizione di immagini.

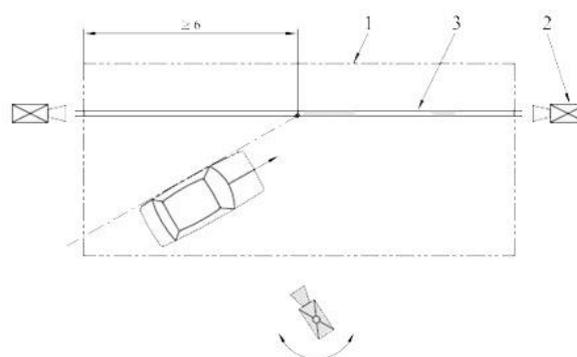


Figura 12: Disposizione delle telecamere per la registrazione delle prove

Le telecamere vengono suddivise in:

- telecamera brandeggiata a velocità normale per la copertura della traiettoria del veicolo;

- telecamere zenitali ad alta velocità (una o due), posizionate in modo da coprire il movimento del veicolo ad almeno 6 metri prima del punto dell'urto fino a una distanza adeguata per registrare le prestazioni della barriera di sicurezza incluso il parapetto veicolare;
- telecamera ad alta velocità che guarda la barriera di sicurezza compreso il parapetto veicolare da una posizione dietro il punto dell'urto per registrare il rollio, il sollevamento verticale del veicolo, la penetrazione e a sequenza delle azioni nel momento in cui è colpito il sistema;
- telecamera ad alta velocità puntata lungo il sistema dell'estremità opposta rispetto al punto precedente.

### **2.3 UNI EN 1317 - Parte 5 (Requisiti di prodotto e valutazione della conformità)**

La presente norma europea [10] specifica i requisiti per la valutazione della conformità dei sistemi di trattenimento veicoli, quali: barriere di sicurezza, attenuatori d'urto, terminali, transizioni e parapetti per veicoli/pedoni.

Ai fini della presente norma, si applicano i termini e le definizioni seguenti:

- laboratorio di prova: È un ente qualificato incaricato di misurare, esaminare e verificare le caratteristiche e le prestazioni di materiali o prodotti, rientranti nell'ambito di applicazione del documento di riferimento. Un laboratorio può essere considerato idoneo se accreditato da un firmatario dell'EA (cooperazione europea per l'accreditamento) o tramite l'utilizzo di strumenti legali adeguati nel contesto territoriale in cui viene eseguita la prova.
- vita utile: È il periodo durante il quale un prodotto mantiene le proprie prestazioni ad un livello sufficiente per soddisfare i requisiti specificati. Questo include il raggiungimento o il superamento di valori minimi senza necessità di riparazioni o sostituzioni onerose. La vita utile di un prodotto è influenzata dalla sua durabilità e da una corretta manutenzione ordinaria. È importante distinguere tra la vita utile stimata economicamente sostenibile,

che deriva dalla valutazione tecnica della durabilità, e la vita utile reale in condizioni operative, influenzata da fattori non controllabili come il luogo di utilizzo, le condizioni ambientali, l'installazione e la manutenzione. La stima della vita utile non rappresenta una garanzia da parte del produttore.

- durabilità: Si riferisce alla capacità di un prodotto di mantenere le prestazioni richieste nel tempo, sotto l'influenza di condizioni prevedibili. Un prodotto progettato e realizzato correttamente dovrebbe garantire la funzionalità richiesta per un periodo economicamente accettabile, a condizione che venga sottoposto a una manutenzione ordinaria adeguata.
- fabbricante: È l'organizzazione responsabile di apporre il marchio CE su un prodotto, garantendone la conformità alle normative vigenti.

I sistemi di trattenimento veicoli devono essere conformi ai livelli di soglia minimi definiti in Tabella 12.

<i>Barriere di sicurezza</i>	<i>EN 1317-2</i>	<i>NI</i>
<i>Attenuatori d'urto</i>	<i>EN 1317-3</i>	<i>Classe 50</i>
<i>Terminali</i>	<i>ENV 1317-4</i>	<i>PI</i>
<i>Transizioni</i>	<i>ENV 1317-4</i>	<i>NI</i>
<i>Parapetti combinati per veicoli/pedoni</i>	<i>EN 1317-2 e prEN 1317-6</i>	<i>NI</i>

Tabella 12: Livelli di soglia minimi per i sistemi di trattenimento veicoli

Un ulteriore requisito è quello relativo alla rimozione della neve in quanto può danneggiare una barriera di sicurezza, in particolare per barriere con correnti in metallo devono essere classificati in classi come riportato in Tabella 13.

<i>Classe di resistenza alla spalatura della neve</i>	<i>Spessore del materiale modificato di una lama di acciaio</i>		<i>Modulo di resistenza a carichi orizzontali modificato</i>		<i>Resistenza a carichi verticali del collegamento tra un palo e una lama</i>
	<i>Profilo aperto (mm)</i>	<i>Tubo (mm)</i>	<i>Lama (cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Palo (cm<sup>3</sup>)</i>	
<i>4</i>	$\geq 4$	$\geq 2,9$	$\geq 10$	$\geq 12$	$\geq$ <i>Resistenza al taglio di bulloni M10 4,6</i>
<i>3</i>	$\geq 4$	$\geq 2,2$	$\geq 5$	$\geq 9$	
<i>2</i>	<i>Recinzione di corda</i>				
<i>1</i>	<i>Altro</i>				

Tabella 13: Resistenza alla rimozione della neve di barriere di sicurezza con correnti in metallo

Nelle classi 3 e 4 il bordo anteriore della lama deve sporgere almeno di 40 mm rispetto al palo, in modo da garantire una protezione ai pali. Non devono essere presenti bulloni o ruvidità sulla lama che potrebbero impedire allo spazzaneve di scivolare lungo la barriera.

Le barriere di calcestruzzo monolitiche gettate in opera o gettate a fasi successive devono essere dichiarate appartenenti alla classe 4, quando la classe di calcestruzzo è C25/30 secondo la EN 206-1

Nella classe 2 gli elementi longitudinali della barriera devono essere progettati in modo tale da non essere danneggiati dall'urto dello spazzaneve, ma il palo può essere interamente danneggiato.

I sistemi di ritenuta per veicoli devono garantire una durata adeguata a un periodo di vita utile ragionevole dal punto di vista economico. Tale requisito deve essere dimostrato attraverso descrizioni basate sull'esperienza pratica o mediante misurazioni dirette della durabilità.

Per i sistemi di ritenuta stradali, la durata della fondazione, legata alla struttura di supporto, deve essere considerata separatamente rispetto alla barriera di sicurezza stradale, a meno che il fornitore sia lo stesso fabbricante del VRS. Le principali responsabilità del produttore comprendono:

- a) la dichiarazione dei materiali e dei rivestimenti protettivi utilizzati nella costruzione delle barriere stradali;

- b) la valutazione della durabilità, con la specifica delle caratteristiche tecniche e dei metodi di verifica, come la determinazione della massa dei rivestimenti e le prove di adesione.

Fattori che influenzano la durabilità includono:

- la conformità del rivestimento protettivo agli standard EN ISO 1461 e EN 10326, oltre al trattamento dei materiali;
- la composizione e lo spessore dei materiali per il calcestruzzo, rispettando le norme EN 206-1 e EN 13369;
- il trattamento o la durabilità naturale del legno utilizzato, secondo le classi d'impiego definite nelle norme EN 335-1 ed EN 335-2;
- raccomandazioni relative alle condizioni di installazione, specialmente in contesti operativi gravosi;
- la manutenzione necessaria per mantenere il sistema efficiente, specialmente in ambienti critici.

Il fabbricante deve fornire le seguenti informazioni sulla produzione del sistema di trattenimento veicoli (VRS) esso comprende una descrizione del prodotto, i dettagli delle modifiche del sistema e i requisiti di installazione.

La conformità della barriera di sicurezza stradale deve essere dimostrata mediante:

- prove iniziali di tipo (ITT);
- controllo di produzione in fabbrica (FPC) da parte del fabbricante, compresa la valutazione del prodotto.

Una volta ottenuta la conformità, l'organismo di certificazione deve redigere un certificato di conformità (Certificato CE di conformità), che autorizza il fabbricante ad applicare la marcatura CE. Tale certificato deve includere:

- 1) nome, indirizzo e numero di identificazione dell'organismo di certificazione;

- 2) nome e indirizzo del fabbricante, o del suo rappresentante autorizzato con sede nella EEA, e luogo di produzione;
- 3) descrizione del prodotto;
- 4) disposizioni alle quali il prodotto è conforme;
- 5) condizioni particolari applicabili all'impiego del prodotto;
- 6) condizioni e periodo di validità del certificato, quando applicabile;
- 7) nome e qualifica della persona autorizzata a firmare il certificato;

in aggiunta, il fabbricante deve redigere una dichiarazione di conformità contenente quanto segue:

- 8) nome e indirizzo del fabbricante, o del suo rappresentante autorizzato con sede nella EEA;
- 9) nome e indirizzo dell'organismo di certificazione;
- 10) descrizione del prodotto e una copia delle informazioni di accompagnamento della marcatura CE;
- 11) disposizioni alle quali il prodotto è conforme;
- 12) condizioni particolari applicabili all'impiego del prodotto;
- 13) numero del Certificato CE di conformità di accompagnamento;
- 14) nome e qualifica della persona incaricata di firmare la dichiarazione per conto del fabbricante o del suo rappresentante autorizzato.

Il fabbricante, o un suo rappresentante autorizzato con sede nello (EEA), è responsabile dell'apposizione della marcatura CE sul prodotto. Tale marcatura deve rispettare i requisiti stabiliti dalla Direttiva 93/68/CE e deve essere visibilmente applicata sulla barriera di sicurezza stradale. Inoltre, il simbolo della marcatura CE deve essere accompagnato dalle seguenti informazioni: il numero di identificazione dell'organismo di certificazione, nome o marchio di identificazione e sede legale

## Capitolo 2

del produttore, le ultime due cifre dell'anno in cui la marcatura è apposta, il numero del Certificato CE di conformità o del certificato di controllo di produzione in fabbrica e la descrizione del prodotto: nome generico, materiale, dimensioni e impiego previsto.

La marcatura CE non è soggetta a limiti temporali, a meno che non intervengano modifiche della progettazione, dei materiali, delle costruzioni o dei criteri di prova. Si riporta un esempio di marcatura CE in Figura 13.

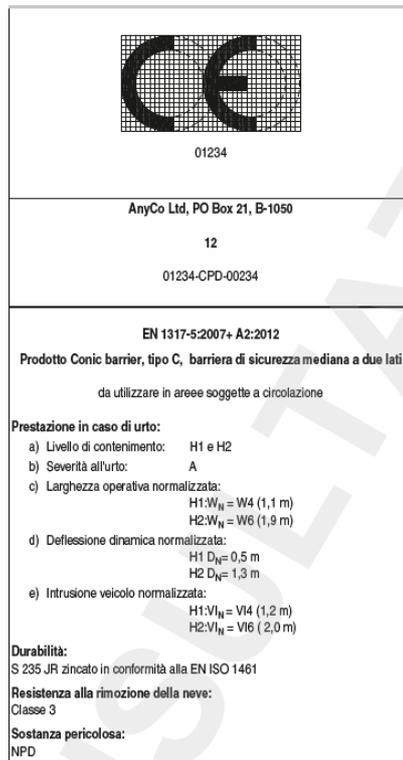


Figura 13: Esempio di informazioni sulla marcatura CE per le barriere di sicurezza (Versione di consultazione Norma UNI EN 1317-5 Politecnico di Torino)

## CAPITOLO 3

### **Analisi della norma UNI/TR 11785**

Dopo aver analizzato con maggiore dettaglio l'evoluzione del quadro normativo riferito ai sistemi di ritenuta stradali, con particolare attenzione verso la normativa UNI EN 1317 [3], si procede ad un approfondimento sui sistemi di prove effettuate sulle barriere laterali poste sul bordo del rilevato e con l'obiettivo di fornire una base di conoscenze comuni ed utili per la redazione del Manuale UNI/TR 11785 [2]. Il campo di applicazione riguarda l'installazione di barriere di sicurezza in acciaio con paletti infissi nel terreno. Per ottenere la marcatura CE, queste barriere devono superare le prove di crash in campi prova certificati (UNI CEI EN ISO/IEC 17025), dimostrando l'idoneità della loro configurazione in relazione alle proprietà meccaniche del terreno e della strada. Ad oggi anche se il quadro normativo appare ben strutturato, non si ha un'analisi ben definita per quanto riguarda il funzionamento dei dispositivi installati su strada in condizioni diverse da cui si eseguono le prove di Crash. Le disposizioni attuali riguardo al Manuale [2], richiedono che esso descriva compiutamente le modalità di installazione del dispositivo di ritenuta, al fine di consentire al progettista il corretto inserimento nel progetto dell'impiego su strada dei dispositivi medesimi ed all'installatore la corretta installazione del prodotto su strada. Infatti, le prestazioni del terreno nel sito di impianto su strada non sempre corrispondono a quelle del terreno usato nei campi prova. Il risultato finale di tale documento è quello di rendere disponibili tutte quelle conoscenze che, se applicate correttamente consentono di ottenere su strada prestazioni prossime a quelle avute nelle prove di

Crash. Si sottolinea pertanto che, qualora ci siano modifiche sulle prove di Crash serve comunque una valutazione sul mantenimento della marcatura CE del prodotto che si andrà a modificare ai sensi della UNI EN 1317-5 [10] (Requisiti di prodotto e valutazione di conformità per sistemi di trattenimento veicoli).

Il presente rapporto tecnico rimanda ad alcuni riferimenti normativi ovvero:

- UNI EN 1317-1 [8] Sistemi di ritenuta stradali – Parte 1: Terminologia e criteri generali per i metodi di prova
- UNI EN 1317-2 [9] Sistemi di ritenuta stradali – Parte 2: Classi di prestazione, criteri di accettazione delle prove d'urto e metodi di prova per le barriere di sicurezza inclusi i parapetti veicolari
- UNI EN 1317-5 [10] Sistemi di ritenuta stradali – Parte 5: Requisiti di prodotto e valutazione di conformità per sistemi di trattenimento veicoli
- ASTM D6951/D6951m-18 [11] Standard Test method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications

### **3.1 Installazione delle barriere di sicurezza**

Le barriere di sicurezza installati sui margini esterni della strada spesso si trovano in condizioni diverse rispetto alla situazione di prova. Gli elementi che caratterizzano la diversa condizione di installazione sono:

- le caratteristiche dei terreni che sono funzione del tipo di terra impiegata per la realizzazione del rilevato e dal loro addensamento, questo parametro è funzione della compattazione data dai rulli;
- l'uniformità dei terreni costituenti il supporto;
- la distanza del fronte della barriera dal ciglio del rilevato, maggiore è la distanza maggiore è la resistenza offerta dal terreno. In condizione di prova in genere la scarpata è completamente assente, pertanto la distanza è infinita, nelle strade di nuova costruzione la distanza risulta tra 100 cm e 125 cm, mentre nelle strade esistenti la dimensione si riduce fino a 50 cm.

Il terreno situato lungo i margini esterni della scarpata presenta un grado di costipamento inferiore rispetto alla parte centrale della pavimentazione. Questa differenza è dovuta alla sua posizione lungo il bordo, che rende più difficoltose le operazioni di compattazione mediante rullaggio. Inoltre, è presente uno strato superficiale di terreno vegetale che serve a proteggere la scarpata e al drenaggio dell'acqua. Tale strato di ricoprimento superficiale riduce la lunghezza resistente dei paletti. Entrambe questi aspetti condizionano la resistenza complessiva del supporto. Inoltre, nelle condizioni di campo, il livello di addensamento del terreno non è costante lungo l'impianto e varia sia nello spazio che nel tempo a seconda delle condizioni climatiche, di temperatura e umidità.

La scarpata gioca un ruolo fondamentale nella resistenza del sistema, in quanto lo spostamento laterale della barriera in seguito ad una spinta (urto), rispetto ad una situazione in piano, sarà maggiore causando un aumento sensibile dell'instabilità del veicolo con possibile ribaltamento. Tale rischio è tanto maggiore quanto più la barriera è infissa in prossimità del ciglio della carreggiata non potendo evitare la probabile circolazione delle ruote sul piano inclinato della scarpata. Questo effetto viene meno quando si sottopongono le barriere a prove di crash test in campo prove.

Appare dunque evidente che le condizioni di installazione possono risultare difformi rispetto a quelle di prova, sia in termini di resistenze fornibili al complesso dispositivo/terreno, sia per quanto riguarda gli spazi disponibili al movimento del veicolo in svio. Quindi, nelle condizioni di posa in opera reale su strada, il comportamento effettivo del dispositivo a seguito di un urto, sarà, con elevata probabilità, diverso da quello ottenuto nel campo prove.

Nella progettazione delle prove da eseguire con Crash Test in Campo Prove, il progettista dovrà quindi valutare bene le possibili condizioni reali e scegliere condizioni di prova (in termini, ad esempio, di livelli di compattazione del terreno) che garantiscano adeguati livelli di sicurezza.

In merito alla Figura 14, si può osservare come, durante i crash test in campo prova il terreno risulti pianeggiante e di conseguenza la capacità di contenimento della barriera potrebbe risultare superiore rispetto alla situazione reale con scarpata.

Risulta necessario che il terreno in cui sono infissi i paletti abbia proprietà meccaniche affini a quelle del sito di prova in scala reale e che la distanza "s" tra

### Capitolo 3

---

il fronte della barriera ed il ciglio del rilevato. È importante che si verificano le condizioni che seguono:

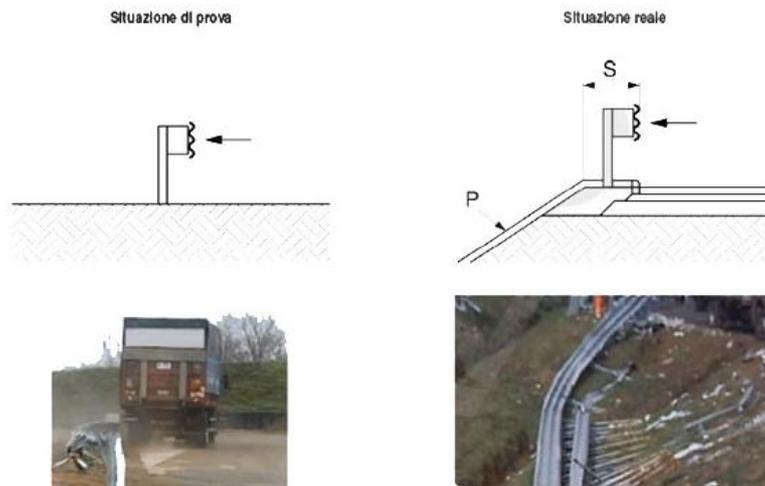


Figura 14: Condizione di prova e condizione reale

- l'interazione terreno-paletti riesca nel complesso a riprodurre il funzionamento resistente avuto sul campo prova;
- la circolazione delle ruote durante la collisione avvenga pressoché in piano, questo significa che la ruota più esterna non supera il tratto subpiano di collegamento tra l'arginello e la scarpata come riportato in Figura 15.

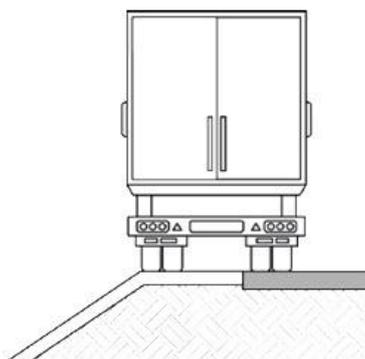


Figura 15: Ruota esterna non invade la scarpata

Rispetto a quanto descritto precedentemente, si può verificare una condizione diversa; ossia una differente capacità di contenimento anche se la barriera è stata sottoposta a prova con una scarpata alle spalle.

Per ovviare al problema della minore resistenza, dovuto alle diverse proprietà meccaniche dei terreni costituenti il supporto ed alla vicinanza della scarpata, possono essere messi a punto opportuni provvedimenti riguardanti paletti e/o il supporto.

Il risultato finale del rapporto tecnico è quello di:

- individuare le prove per la caratterizzazione dei supporti di prova, replicabili su strada in fase di controllo;
- individuare le informazioni, in termini di caratteristiche del “supporto di prova” e di comportamento atteso dei pali nell’interazione con il “supporto su strada” che sono dichiarate all’interno del Manuale;
- in generale, mettere a disposizione una metodologia che, se applicata correttamente, consenta di ottenere su strada prestazioni prossime a quelle riscontrate nelle prove di crash.

Nei paragrafi che seguono vengono illustrati gli effetti dovuti sia al ridotto addensamento ed alla natura del terreno presente in sito, sia alla ridotta distanza fra le barriere di sicurezza ed il ciglio dei rilevati.

### **3.2 Proprietà meccaniche del terreno costituente il margine della carreggiata**

Le proprietà meccaniche che costituiscono il bordo dei rilevati sono molto inferiori rispetto alla parte centrale dove giace la pavimentazione. Queste opere in terra sono normalmente costruite e controllate per garantire una buona portanza nelle parti direttamente interessate alla pavimentazione stradale, di contro i bordi risultano meno portanti in quanto non si raggiunge quasi mai il grado di costipazione che si ha nella parte centrale dovuto al passaggio dei rulli.

In Figura 16 si riportano i risultati delle prove di push su paletto valutando la resistenza degli stessi (espressa in kN) in funzione della portanza (valutata mediante il modulo di deformazione  $M_d$  con piastra da 300 mm) dei terreni in cui sono infissi. La barriera è posta a qualche decina di centimetri dal ciglio della carreggiata e le

prove sono relative a due diverse sezioni a “C” del paletto. Si tenga conto che il modulo di deformazione Md300 richiesto nei capitolati varia da un minimo di 30 MPa a 60 Mpa per gli strati di rilevato in terra.

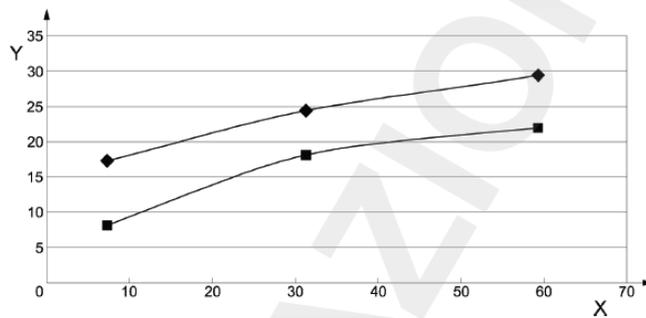


Figura 16: Influenza della portanza dei terreni sulla resistenza allo spostamento dei paletti. Asse X: Md300 [MPa]; Asse Y: Resistenza [kN] (Versione di consultazione Norma UNI/TR 11785 Politecnico di Torino)

Si può osservare che per entrambe le prove la resistenza offerta da un terreno scarsamente costipato risulta il 40% in meno di un terreno fortemente costipato.

### 3.3 Deformazioni del paletto in funzione della distanza del ciglio dalla carreggiata

Quando si parla di sistemi di sicurezza stradali quali barriere nei rilevati, il problema ricade nella zona dove si ha la scarpata, questo perché si ha minor volume di terreno alle spalle del paletto (direzione trasversale), producendo una minor resistenza allo spostamento rispetto alla condizione di terreno indefinito come riportato in Figura 17.

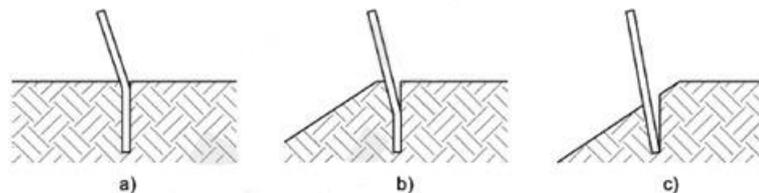


Figura 17: Differenti deformazioni dei paletti rispetto al ciglio

Osservando la Figura, sono riportati tre esempi di deformazione dei paletti a diverse distanze dal ciglio:

- a) nella prima condizione con terreno indefinito si osserva che la resistenza offerta dal terreno è tale da creare un ottimo vincolo per il paletto e la cerniera plastica si forma quasi alla fuoriuscita del paletto dal terreno;
- b) in questa condizione si osserva come la resistenza offerta dal terreno è minore rispetto al caso a, il paletto rimane vincolato alla base e la cerniera plastica si forma più in basso;
- c) l'ultimo caso riporta la condizione peggiore di posizione del paletto in quanto il terreno non offre la giusta resistenza ed il paletto esegue una rotazione rigida, e non si viene a formare la cerniera plastica.

Come detto, fin ora il grado diverso di vincolo che si ha non dipende soltanto dalla distanza dal ciglio, ma anche dalla resistenza intrinseca del terreno, dalla resistenza e lunghezza del paletto.

Come possiamo osservare in Figura 19 il grafico riporta l'andamento in funzione di forza e spostamento di tre paletti a tre differenti distanze dal ciglio della scarpata. Il paletto con una distanza 1,1 m possiamo equipararlo con il caso a (Figura 17), quello con una distanza da 0,6 m al caso b ed infine, quello con una distanza 0,3 m al caso c. È bene ricordare che le prove sono state effettuate senza lo strato di terreno vegetale ed il terreno era mediamente compattato.

Il paletto posto ad una distanza di 0,3 m offre una resistenza che è circa  $\frac{1}{4}$  di quella offerta ad una distanza di 1,1 m. Quindi in conclusione si può affermare che ad una maggiore distanza dal ciglio della scarpata si ha una maggiore resistenza offerta dal terreno ed il paletto si deforma formando la cerniera plastica.

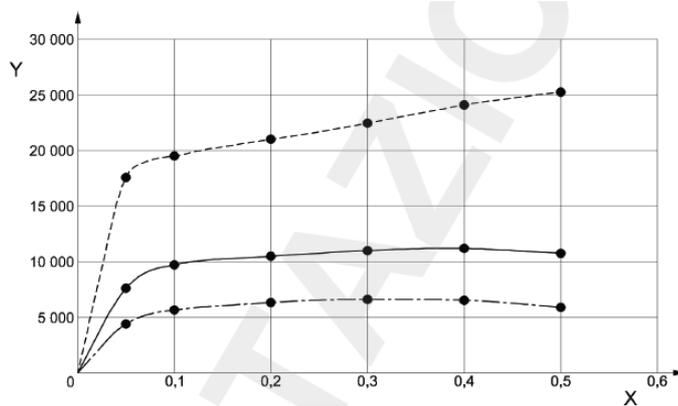


Figura 18: Confronto della resistenza per tre diverse distanze del paletto dal ciglio del rilevato. Asse X: Spostamento [m]; Asse Y: Forza [kN]. Partendo dalla linea più bassa le distanze sono 0,3 m, 0,6 m e 1,1 m. (Versione di consultazione Norma UNI/TR 11785 Politecnico di Torino)

### 3.4 Presenza della scarpata sulla stabilità del veicolo

La presenza di una scarpata nelle vicinanze di una barriera può influenzare negativamente la stabilità al rollio dei veicoli durante un impatto. In particolare, le ruote possono finire sulla scarpata Figura 19, generando una rotazione “geometrica” dovuta sia alla mancanza di un adeguato punto di appoggio, sia alla vicinanza del baricentro al punto di contatto verticale. Questo effetto è ulteriormente amplificato quando il baricentro supera la congiungente tra i punti di appoggio delle ruote esterne, riducendo l'effetto stabilizzante e favorendo il ribaltamento del veicolo.

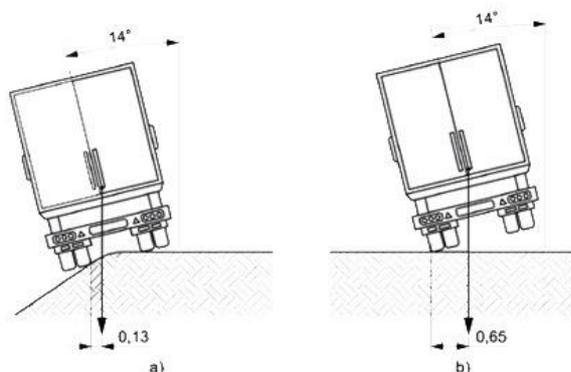


Figura 19: Esempi di quando le ruote del veicolo invadono la scarpata

Se le prove di crash vengono condotte su una superficie piana, la configurazione ottimale per garantire la stabilità del veicolo è rappresentata dalla

configurazione in cui le ruote non invadono in alcun modo la scarpata, come illustrato nella Figura 15. Questo si ottiene facendo in modo che la distanza tra il fronte della barriera ed il ciglio (distanza  $d$ , in Figura 21 di sinistra) sia maggiore della massima posizione laterale delle ruote (Figura 21, destra, distanza  $l$ ), rispetto al fronte della barriera indeformata. Se l'invasione della scarpata è limitata, tuttavia, non si ha necessariamente il ribaltamento del veicolo.

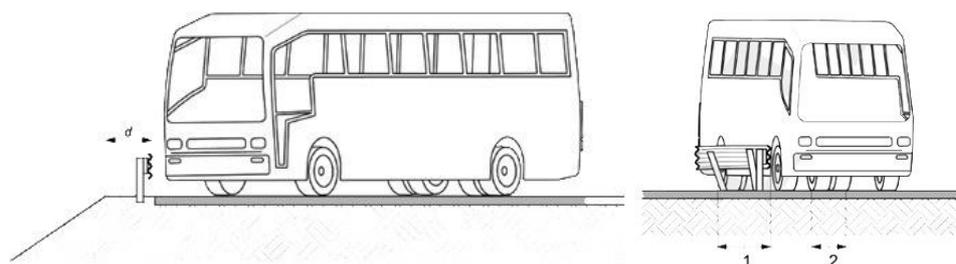


Figura 20: Distanza  $d$  tra il fronte della barriera ed il ciglio della scarpata (fig. di sinistra) e massima posizione laterale delle ruote oltre la barriera e larghezza ruote gemellate (fig. di destra)

### 3.5 Procedure per la valutazione del comportamento paletto-terreno

È stato evidenziato come la resistenza alla spinta dei paletti sia influenzata dalla compattazione e dalla qualità dei materiali superficiali vicino al ciglio del rilevato, nonché dalla distanza tra il retro del paletto e il ciglio. Per questo motivo, è necessario effettuare prove mirate a valutare complessivamente tale resistenza sia in laboratorio che sul campo. Durante i crash test in campo prova, è fondamentale caratterizzare l'interazione tra terreno e palo, sia considerando un palo "standard" (HEB 120) sia analizzando i componenti reali del dispositivo.

Le prove di push sul palo "standard" permettono di caratterizzare il terreno, mentre quello sul paletto della barriera consentono di verificare il comportamento reale in situ e confrontarlo con quello atteso. Queste analisi, supportate da protocolli e attrezzature consolidate, forniscono dati standardizzati utili per la progettazione, la futura installazione e la verifica delle opere. I risultati delle prove, documentati nei manuali di utilizzo e manutenzione, diventano risorse essenziali per progettisti, direttori dei lavori e collaudatori.

La procedura ottimale per misurare la resistenza complessiva consiste nel monitorare lo spostamento di un punto specifico sul palo come indicato in Figura 21 e rilevare grandezze utili a garantire l'efficacia delle misurazioni.



Figura 21: Schema di prova. a) campo prova; b) in strada

Detto ciò, gli elementi da definire per determinare le caratteristiche essenziali della prova sono:

- la tipologia di prova da effettuare e la velocità di spinta;
- la tipologia di paletto su cui effettuare la prova;
- la profondità di infissione;
- l'altezza di spinta;
- il sistema di contatto con il palo;
- lo spostamento a cui terminare la prova;
- le grandezze da misurare.

### 3.5.1 Tipologia di prova da effettuare

La resistenza del sistema paletto-terreno che si manifesta durante l'urto si sviluppa in un contesto dinamico, tenendo conto delle inerzie e degli effetti correlati alla velocità di deformazione. Pertanto, il metodo più adeguato a valutare tali condizioni è rappresentato dalle prove dinamiche. Tuttavia, un problema significativo risiede nella limitata disponibilità delle attrezzature necessarie per condurre queste prove, che in Italia si riducono essenzialmente ai sistemi MARTE

e THOR. Si riportano più nello specifico le due attrezzature utilizzate e le differenti procedure di esecuzione delle prove.

- THOR (Testing Head Over Road): è un'attrezzatura semovente progettata per rientrare nelle specifiche tecniche di ingombro richieste per la circolazione su strada, senza ostacolare il traffico. Questo dispositivo consente, mediante prove dinamiche, di verificare l'affidabilità dei terreni di supporto per le barriere di sicurezza, tenendo conto di parametri quali la natura, il grado di addensamento e le dimensioni geometriche. Grazie al suo design, gli stabilizzatori possono assumere configurazioni differenti in funzione della geometria del sito di misurazione, garantendo così una maggiore flessibilità operativa. L'energia dell'urto generata è strettamente correlata all'altezza di caduta e alla massa del martello impiegato per colpire il paletto. Questo approccio permette di valutare in modo realistico la risposta del paletto del dispositivo di sicurezza stradale installato sul campo. I risultati ottenuti vengono confrontati, in termini di spostamento nel tempo, con quelli derivati dallo stesso dispositivo installato su terreni stabilizzati nei campi prova. Tale confronto consente di validare l'affidabilità del dispositivo nelle reali condizioni operative, con interferenze minime sul traffico stradale. La struttura del sistema è costituita da una massa battente variabile, compresa tra 220 kg e 350 kg, montata su un braccio di lunghezza pari a 3,4 m, incernierato alla sommità di un traliccio tubolare mobile. La massa cade da un'altezza di 5,4 m, sviluppando un'energia compresa tra 10 kJ e 16 kJ, con una velocità di impatto di 11 m/s. È possibile calibrare l'altezza dell'urto rispetto al suolo, garantendo così una regolazione precisa delle condizioni di prova. Una versione avanzata dell'attrezzatura, denominata THOR2, opera basandosi sugli stessi principi del modello originale, ma introduce un innovativo sistema di azionamento tramite una batteria di molle in acciaio. Questo sistema consente di spostare una massa di 400 kg, con la possibilità di calibrare l'energia in modo continuo grazie a un sistema di regolazione millimetrico per la compressione delle molle. L'energia sviluppata varia da zero fino a un massimo di 28 kJ in regime elastico, corrispondente a una

velocità di impatto di 12 m/s. THOR2 garantisce una maggiore versatilità, poiché può essere utilizzato sia in una stazione fissa di laboratorio sia trasportato e posizionato su un veicolo semovente per prove sul campo. Questa configurazione offre una notevole flessibilità operativa, rendendo l'attrezzatura adatta a una vasta gamma di applicazioni dinamiche.



Figura 22: Attrezzatura THOR

- MARTE esegue prove quasi-statiche e dinamiche su pali infissi nel terreno o ancorati a manufatti. Si applicano spinte orizzontali e si misurano forze, spostamenti e accelerazioni. In campo quasi statico l'azione può raggiungere i 150 kN ed in campo dinamico l'energia di impatto può arrivare a 26 kJ. Il carico può essere applicato da terra da 0,6 m a 1,0 m. L'attrezzatura, comprende un battipalo, può essere trasportata in località diverse e spostarsi autonomamente in posizioni diverse.



Figura 23: Attrezzatura MARTE

### 3.5.2 Tipologia di paletto su cui effettuare la prova

Il tipo di paletto da impiegare per l'esecuzione della prova dipende dalla prova che si vuole effettuare, se per la caratterizzazione del solo terreno o per la caratterizzazione dell'interazione paletto-terreno. Nel caso di caratterizzazione del solo terreno viene impiegato un paletto molto robusto con sezione HE 120B in acciaio S355, in maniera che la resistenza massima è determinata dal solo terreno, questo argomento verrà affrontato successivamente con la realizzazione di un modello FEM (RS3, Rocscience) [11].

Per la caratterizzazione dell'insieme paletto-terreno, in questo caso la prova è finalizzata a determinare quanto accade con la barriera reale, il paletto da impiegare è il paletto reale o la sua versione post-modifica.

### 3.5.3 Profondità di infissione

Stessa procedura riguarda la profondità di infissione, dipende sempre dal tipo di prova che si deve effettuare, nel caso di caratterizzazione del solo terreno la profondità è pari a 1m, mentre nel caso di caratterizzazione dell'insieme paletto-terreno, la profondità da impiegare è quella del paletto reale o della sua versione post-modifica.

### 3.5.4 Altezza di prova

Anche nell'altezza di prova, così come per la tipologia di paletto e della profondità di infissione dobbiamo distinguere le due differenti valutazioni. Nel caso di caratterizzazione del comportamento del solo terreno l'altezza di spinta può essere pari a 1,0 m, mentre nella caratterizzazione dell'insieme paletto-terreno l'altezza è conveniente sia uguale ad un valore  $h$  di riferimento pari a 0,6 m, ciò per considerare anche le barriere di classe di contenimento N con paletti di altezza ridotta.

L'altezza deve essere identica sia nelle prove su campo che nelle prove in strada. Nel caso si discostino meno di 20 cm il confronto fra il campo prova ed il sito reale può essere effettuato modificando la forza misurata su strada con un'espressione:

$$F_{strada_{mod}} = F_{strada_{mis}} \times \left( \frac{h_{strada}}{h_{campo\ prova}} \right)$$

Equazione 7: Valutazione dell'altezza di spinta paletto-terreno

### 3.5.5 Sistema di contatto dell'attrezzatura di prova con il palo

Un fenomeno che può influenzare significativamente i risultati delle prove è rappresentato dalla torsione e/o dall'instabilità flessio-torsionale del palo. Quest'ultima è strettamente legata a eventuali variazioni locali della forma della sezione del palo. Per limitare l'influenza di tali effetti, è importante che il sistema di contatto con il palo sia progettato in modo da costituire anche un vincolo per la rotazione torsionale del palo stesso.

Nel caso in cui vengano utilizzati sistemi che non garantiscano tale vincolo, è fondamentale che questi siano identici sia nelle prove eseguite in campo prova sia nel sito di installazione reale. Ciò garantisce coerenza nei risultati e una valutazione accurata delle prestazioni del palo in condizioni operative reali.

### 3.5.6 Carico-deformazione applicato alle prove di push

Le prove terminano quando lo spostamento del punto di contatto raggiunge un valore tale che la resistenza del terreno sia interamente. Tale valore consente anche il verificarsi di eventuali situazioni di instabilità di forma della sezione del palo. Il rapporto tecnico riporta dei valori di riferimento nel caso di prova quasi-statica e di conseguenza la prova termina quando lo spostamento del punto di applicazione della forza diviene pari a 0,4 m oppure quando si eccedono i 45 kN. Nella caratterizzazione dell'insieme paletto-terreno lo spostamento pari a 0,4 m è di utile riferimento, nel caso venga adottato un valore di spostamento differente, è opportuno che sia raggiunto sia nelle prove su campo prova che in quelle in sito.

### 3.5.7 Grandezze da misurare

Le informazioni essenziali sono date dal massimo valore della forza registrato e dalla profondità della cerniera plastica come riportato in Figura 24 dove è possibile determinare la posizione P di questa rispetto alla base del palo, in corrispondenza della massima distanza a.

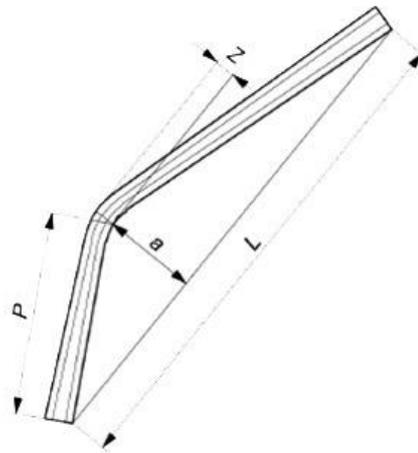


Figura 24: Posizione della cerniera plastica

Ci sono casi in cui è possibile semplificare la prova andando a verificare solo la formazione della cerniera plastica, questo viene svolto nelle strade minori o strade con ridotto traffico di veicoli commerciali.

Inoltre, le informazioni più accurate comprendono:

- l'andamento della forza-spostamento e di conseguenza consente di calcolare il lavoro compiuto e quindi la dissipazione di energia permessa dal complesso paletto-terreno;
- l'andamento dello spostamento in funzione del tempo, da cui si ricava un utile valore da impiegare nel confronto tra sito di prove e sito reale. Questo è limitato alle prove dinamiche come riportato in Figura 25;

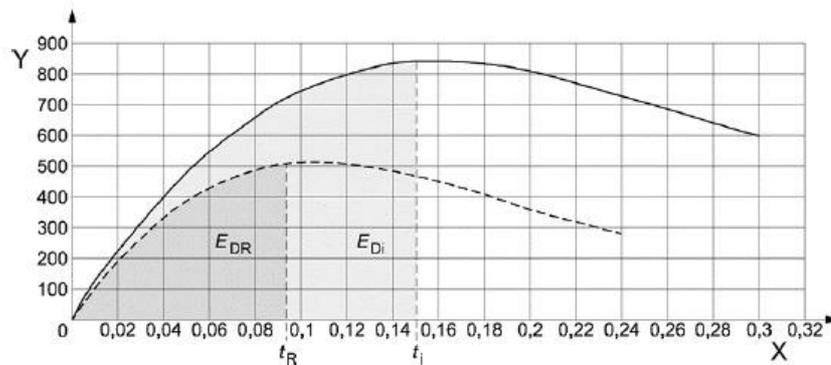


Figura 25: Diagramma Spostamento-Tempo. Asse X: Tempo [s]; Asse Y: Spostamento [mm]

- l'andamento dell'abbassamento della testa del palo YA in funzione di XA e l'andamento dello spostamento XB in funzione di XA. In ogni caso rilevare queste grandezze risulta laborioso e di conseguenza è facoltativo;

Le misure geometriche P, Z, a ed L sui paletti estratti dopo la prova.

### **3.6 Prove per la valutazione delle proprietà meccaniche del terreno al variare della profondità**

Lungo il margine della strada l'unico fattore che varia è dato dalle proprietà resistenti del terreno e dal modo in cui esse cambiano lungo la profondità di infissione, per questo si eseguono delle prove per la determinazione del profilo stratigrafico. In particolare, quella più opportuna è la prova penetrometrica a cono (dinamica D.P. o statica C.P.T.), nella quale si può misurare anche soltanto la resistenza alla punta. Si ottiene un profilo verticale nel quale vengono riportati il numero di colpi oppure la pressione, necessari per far avanzare in profondità la punta del penetrometro di una certa quantità. La prerogativa di questa prova è quella di separare la resistenza laterale da quella di punta. Nel caso in cui queste ultime non sono separate, in particolare se la superficie laterale è di gran lunga maggiore di quella di punta, non si ha una corretta valutazione di come varia la resistenza con la profondità.

Le prove dette precedentemente sono impiegate per profondità di molti metri, mentre per profondità fino a 2 metri un tipo di prova spesso adoperata è quella penetrometrica dinamica (sviluppata da TRL-UK Transport Research Laboratory e specificata nella ASTM D6951/D6951M-18 [11]). Questa prova risulta in termini di esecuzione molto semplice e con un basso costo, la procedura consiste nel far cadere manualmente una massa battente da una determinata altezza. La prova è adatta per materiali sciolti a grana fine o grossa, in quest'ultimo caso però con moderata percentuale di elementi aventi dimensione massima di 50 mm. Allo stesso modo può essere impiegata anche per materiali debolmente stabilizzati.

Un altro tipo di prova, a volte suggerito, è quella che impiega il Light Falling Weight Deflectometer (LFWF). Ha come vantaggio la semplicità di esecuzione ed il ridotto costo di prova. Di contro, lo svantaggio è che la profondità di 'analisi'

(circa 30 cm) è fortemente ridotta rispetto a quella necessaria, corrispondente all'incirca alla profondità di infissione del palo.

Si considera inoltre che in entrambe le prove la resistenza del terreno non è mobilitata perché esso non è portato a rottura e che i modelli interpretativi sono basati su analisi elastico lineari.

### **3.7 Confronto della risposta all'interazione del terreno con il palo**

La risposta all'interazione del terreno con il palo è valutata con una delle seguenti grandezze:

- 1) l'interazione massima,
- 2) il lavoro compiuto fino allo spostamento massimo,
- 3) l'integrale dello spostamento in funzione del tempo, fino al massimo valore dello spostamento – grandezza da impiegarsi soltanto nel caso delle prove dinamiche.

Le grandezze di cui ai punti 2 e 3 sono preferibili rispetto a quella di cui al punto 1. Nel caso l'installazione riguardi una strada locale, ci si può riferire alla sola posizione della cerniera plastica. La scelta della grandezza da impiegare per il confronto tra il sito di prova e quello reale di installazione si rimanda a progettisti, enti gestori e collaudatori.

Come soglie di accettazione si consigliano:

- per la resistenza massima ed il lavoro compiuto in sito, un valore non minore del 90% e non maggiore del 130% di quello rilevato su campo prova;
- per l'integrale dello spostamento nel tempo in sito, un valore non minore del 75% e maggiore del 110% di quello ottenuto su campo prova;
- per la cerniera plastica in sito, una profondità compresa nell'intervallo (-10 cm, + 10 cm) rispetto a quanto rilevato sul paletto di prova.

### **3.8 Prove di crash condotte in presenza di scarpata**

La condizione di prova che rappresenta al meglio la realtà del rilevato è quella che riproduce la presenza di un ciglio con scarpata laterale. Tuttavia, è importante considerare che configurazioni e costituzioni del ciglio possono differire tra campo prova e sito reale, influenzando il livello di contenimento della barriera. È necessario valutare, tra l'altro, l'interazione palo-terreno e la posizione delle ruote rispetto alla barriera indenne. Se le ruote superano il ciglio della scarpata, i risultati delle prove non possono essere utilizzati in via generale.

La prova su un ciglio reale, soprattutto se in condizioni di minore resistenza, è cruciale per valutare l'impiego del dispositivo in contesti operativi senza necessità di ulteriori verifiche. Ciò è particolarmente rilevante per amministrazioni con risorse limitate.

La metodologia per la ricostruzione del rilevato nei campi prova prevede uno scavo che consenta l'integrazione completa del dispositivo, con strati successivi di materiale non legato che simulano la realtà. La larghezza del rilevato è adattata per garantire spazi residui sufficienti per l'installazione del dispositivo.

In alternativa, è possibile ottenere la pendenza del rilevato scavando lateralmente, con il vantaggio di ridurre il volume dello scavo, ma è necessario verificare i comportamenti dinamici o quasi-statici per garantire un'adeguata rappresentazione dell'interazione palo-terreno.

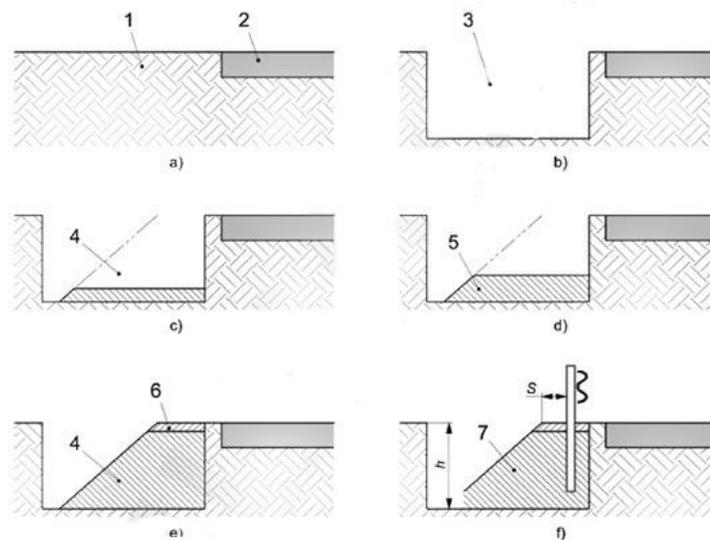


Figura 26: Fasi di costruzione per la realizzazione del caso reale in campo prova

### 3.9 Possibili modifiche per ottenere in sito la corrispondenza con i crash

I risultati ottenuti in sito possono essere differenti da quelli ottenuti nelle prove di crash, dovuti principalmente a differente tipologia di terreno, dalla composizione dal tipo di addensamento e anche per la sua morfologia. Al fine di condurre la resistenza complessiva dell'insieme paletto-terreno a quella esibita in campo prova è possibile mettere a punto alcune modifiche:

- modifiche sul dispositivo che possono essere: allungamento del paletto, rinforzo del paletto, ampliamento della superficie di contatto tra paletto e terreno, collegamento aggiuntivo di più paletti e collegamento ai paletti di sistemi di ancoraggio. Queste modifiche possono richiedere il rilascio della Marcatura CE del dispositivo come dispositivo modificato.
- modifiche sul terreno: utilizzo di terreno diverso e cordoli che vanno dal conglomerato bituminoso al cemento armato;

# CAPITOLO 4

## **Prove quasi-statiche e dinamiche della UNI/TR 11785**

Da molti anni ci si pone il problema della corretta installazione delle barriere laterali poste sul bordo di un rilevato stradale, in quanto trattandosi di una zona di maggiore criticità, l'obiettivo fondamentale è quello di garantire il contenimento dei veicoli in carreggiata, offrendo così una maggiore sicurezza per gli occupanti del veicolo stesso. Come riportato nel Capitolo 3, il rapporto tecnico UNI/TR 11785 [2], descrive nel dettaglio le metodologie di prove più efficaci per caratterizzare in una prima battuta il terreno e poi, successivamente, l'interazione paletto-terreno andando a definire due diverse tipologie di prove: la prova quasi-statica in cui i parametri fondamentali sono lo spostamento e la forza applicata al paletto e la prova dinamica focalizzata sulla capacità di dissipazione dell'energia. Di conseguenza gli Enti gestori e Aziende produttrici di barriere in particolare UNICMI [13] (Unione Nazionale delle Industrie delle Costruzioni Metalliche dell'Involucro e dei serramenti) e PIARC [14] (Associazione mondiale della strada) hanno redatto con riferimento al rapporto tecnico UNI/TR 11785 [2], le linee guida per la corretta installazione delle barriere stradali.

In Figura 27 si riporta uno schema che descrive in modo più semplice le due differenze di prova.

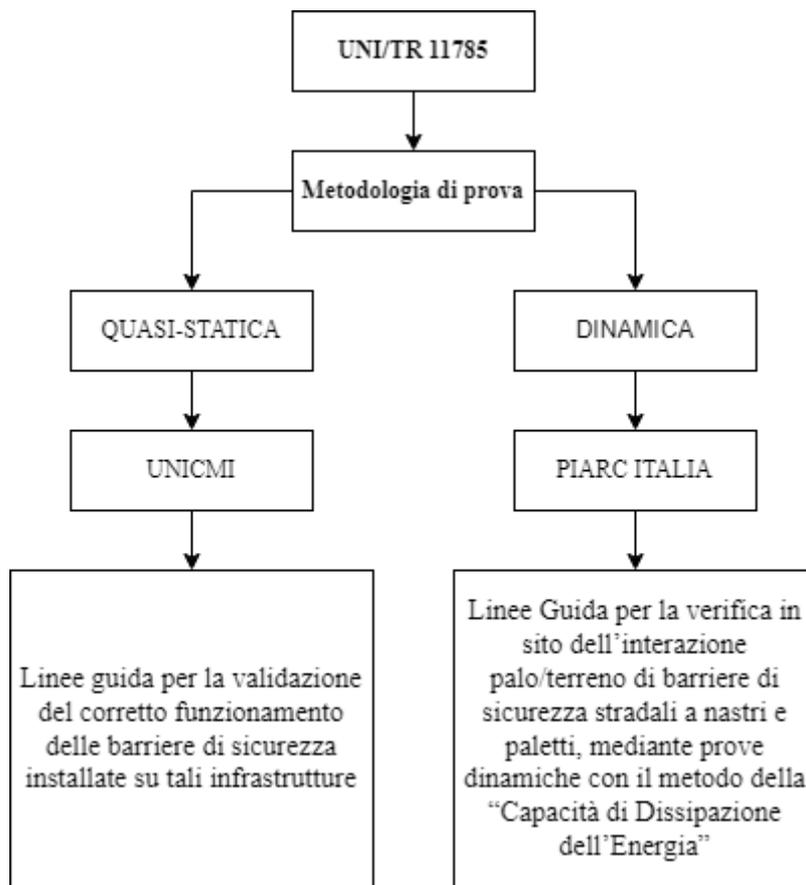


Figura 27: Schema riassuntivo sulle metodologie di esecuzione delle prove

#### 4.1 Linea guida per la validazione delle prove quasi-statiche sulle barriere di sicurezza installate sul bordo dei rilevati stradali (UX114)

Nel 2021, l'UNICMI [13] ha redatto un documento contenente le *“Linee guida per la validazione del corretto funzionamento delle barriere di sicurezza installate su tali infrastrutture”*. Le attività di prova si articolano in due fasi distinte:

1. Test in Campo prova;
2. Test in Sito.

I test in Campo prova si suddividono a loro volta, in due fasi principali:

- caratterizzazione della Resistenza del Terreno: la prova "push" viene eseguita in condizioni quasi-statiche, con controllo dello spostamento. La forza viene applicata ad un'altezza di 1 m dal suolo utilizzando un paletto di tipo HEB 120, infisso nel terreno fino a una profondità di 1 m. L'obiettivo è raggiungere uno spostamento orizzontale di 40 cm, registrando la forza esercitata, gli spostamenti e la formazione della cerniera plastica. Per una caratterizzazione più dettagliata del terreno, è possibile effettuare ulteriori prove variando la profondità di infissione, a discrezione del produttore.
- caratterizzazione dell'insieme Paletto-Terreno: questa fase segue procedure analoghe a quelle della caratterizzazione del terreno, con la differenza che la forza viene applicata ad un'altezza di 0,6 m dal suolo. È richiesta l'esecuzione di almeno tre prove "push", di cui il valore medio rappresenta un riferimento per i successivi test in sito.



Figura 28: Esempio di prova per la determinazione della resistenza del terreno (CAMPO PROVA)

I test in Sito si articolano anch'essi in due fasi:

- caratterizzazione della Resistenza del Terreno: si utilizza la stessa modalità di prova impiegata in campo prova, al fine di garantire la comparabilità dei risultati.

- caratterizzazione dell'insieme Paletto-Terreno: anche in questo caso si applicano le medesime procedure del test in campo prova. La prova si considera conforme se il valore medio della forza risulta maggiore o uguale a quello certificato durante i test in campo. È ammesso uno scostamento negativo fino al 10% rispetto al valore certificato.



Figura 29: Esempio di prova per la determinazione della resistenza del terreno (IN SITO)

## **4.2 Linee guida per la verifica in sito dell'interazione palo/terreno tramite prove dinamiche su barriere di sicurezza stradali (PIARC ITALIA)**

A differenza delle prove quasi-statiche, le prove dinamiche sono state studiate in modo diverso, andando a focalizzare l'obiettivo sulla verifica in sito dell'interazione paletto-terreno.

Questo processo è redatto dal Comitato Nazionale Italiano PIARC [14] sulle: *“Linee Guida per la verifica in sito dell'interazione palo/terreno di barriere di sicurezza stradali a nastri e paletti, mediante prove dinamiche con il metodo della “Capacità di Dissipazione dell'Energia”*. La metodologia consiste in un primo test in campo prova, in modo da verificare e validare la barriera mediante un test dinamico, e successivamente, effettuarli in sito (nella reale configurazione della barriera). Durante le prove si misurano diversi parametri, in particolare il tempo e lo spostamento del paletto necessari a dissipare l'energia d'urto, che devono essere riportati in termini di “Capacità di Dissipazione dell'Energia  $C_E$ ”. Si considera validato il sistema andando a confrontare i risultati ottenuti tra i due siti ed è

necessario che le due configurazioni di prova risultino tra loro congruenti, cioè stessa altezza fuori terra ( $h$ ), profondità di infissione ( $z$ ) dei paletti e stesse condizioni di impatto [velocità di impatto, massa ed energia di impatto, altezza di applicazione della forza d’impatto ( $x$ )] Figura 30.

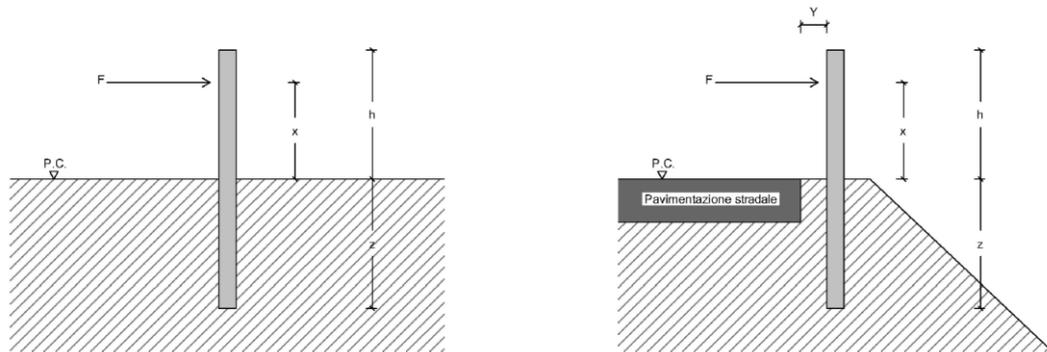


Figura 30: Confronto tra Campo prova (sinistra) e Sito (destra)

Le prove dinamiche, sia in Campo prova che in sito, sono eseguite con l’impiego di un’attrezzatura chiamata impattatore, che può essere un carrello, un pendolo o qualunque altro sistema in grado di applicare al montante testato una forza dinamica. Inoltre, l’impattatore non deve essere vincolato “a terra” e una volta colpito il paletto deve rimbalzare liberamente su di esso in modo da dissipare tutta l’energia d’urto. Si riportano in Figura 31 alcuni esempi di impattatori dinamici.



Figura 31: Esempi di impattatori dinamici

Dopo l’esecuzione del test di prova, la strumentazione che serve per l’acquisizione dei dati, deve essere capace di registrare i seguenti parametri: il carico di impatto applicato al montante [kN], la velocità di impatto della testa impattante [m/s], lo spostamento dinamico del palo all’altezza dell’impatto [mm] e la durata dell’impatto [ms]. Come detto in precedenza, il primo punto riguarda il

campo prova dove viene eseguito il test e stipulato un rapporto di prova contenete tutte le informazioni necessarie da utilizzare in sito (Figura 30 - Campo prova): la descrizione del palo testato, materiale della testa impattante dell'attrezzatura di prova (il materiale della testa di impatto deve risultare non deformabile), l'altezza del palo sopra il piano campagna (h), l'altezza di applicazione della forza (X) deve essere pari ai 2/3 dell'altezza del palo (h) la profondità di infissione (z), la velocità d'impatto, la massa impattante e l'energia di impatto dove quest'ultima è funzione del livello di contenimento della barriera testata e dall'interasse dei pali Tabella 14.

<b>LIVELLO DI CONTENIMENTO</b>	<b>ENERGIA MINIMA [kJ]</b>
<i>N2 (i &lt; 2m)</i>	7
<i>N2 (i &gt; 2m)</i>	8
<i>H1</i>	8
<i>H2</i>	9
<i>H3</i>	11
<i>H4</i>	12

Tabella 14: Energia minima in funzione dei livelli di contenimento (i = interasse dei pali)

L'elaborazione dei risultati delle prove dinamiche si sviluppano seguendo una procedura divisa in quattro fasi:

- Fase 1: Posizionamento della macchina di prova sul paletto da sottoporre a prova (configurazione indeformata);

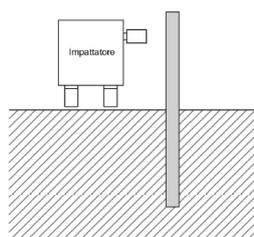


Figura 32: Fase 1 – Prova dinamica

- Fase 2: Inizio della prova (applicazione della forza d'impatto);

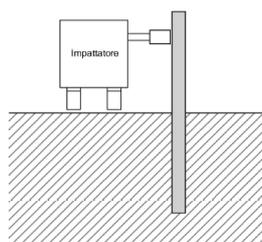


Figura 33: Fase 2 – Prova dinamica

- Fase 3: Massima deflessione del paletto;

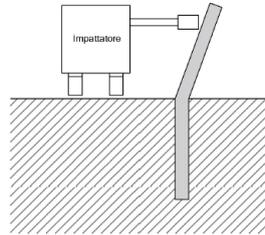


Figura 34: Fase 3 – Prova dinamica

- Fase 4: Termine della prova (Deflessione statica).

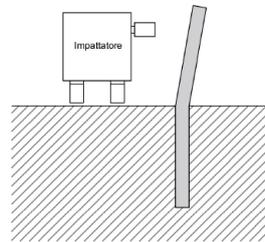


Figura 35: Fase 4 – Prova dinamica

In funzione delle quattro fasi si costruisce il grafico della curva Spostamento-Tempo di Figura 36. Il grafico parte da P0 (0;0) che corrisponde all'inizio della prova, successivamente si applica la forza data dalla macchina (impattatore) e si raggiunge il punto P1 (tM;dM) dove si ha la massima deflessione dinamica del palo per poi arrivare al punto P2 (tF;dF) che corrisponde alla fine della prova. Al di sotto della curva tra il punto P0 e il punto P1 (raggiungimento della massima deflessione dinamica) si rappresenta l'area sottesa alla curva Spostamento-Tempo. Quindi è possibile determinare la Capacità di Dissipazione dell'Energia ( $C_E$ ) calcolata dalla seguente espressione:  $C_E = \frac{100}{Area}$

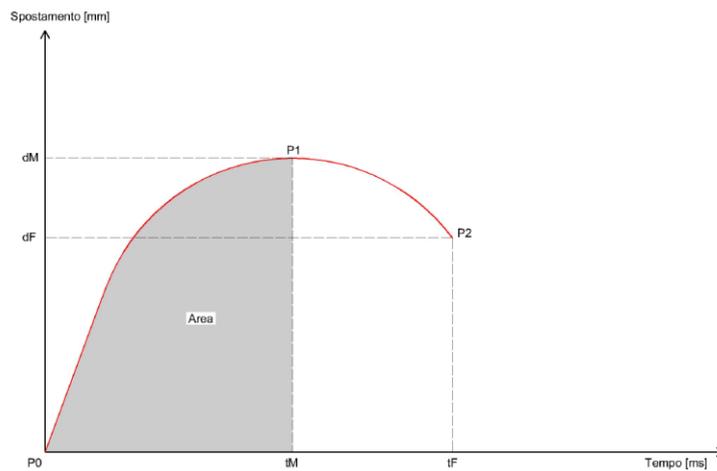


Figura 36: Curva Spostamento-Tempo prova dinamica

Sulla base del grafico sopra riportato, possiamo descrivere le due prove, in Sito e in Campo Prova e confrontarle tra di loro. In Figura 37, la curva blu è quella ottenuta in Campo prova mentre la curva rossa è quelle ottenuta in Sito. I punti PS e PCa rappresentano il massimo spostamento raggiunto dalle due prove.

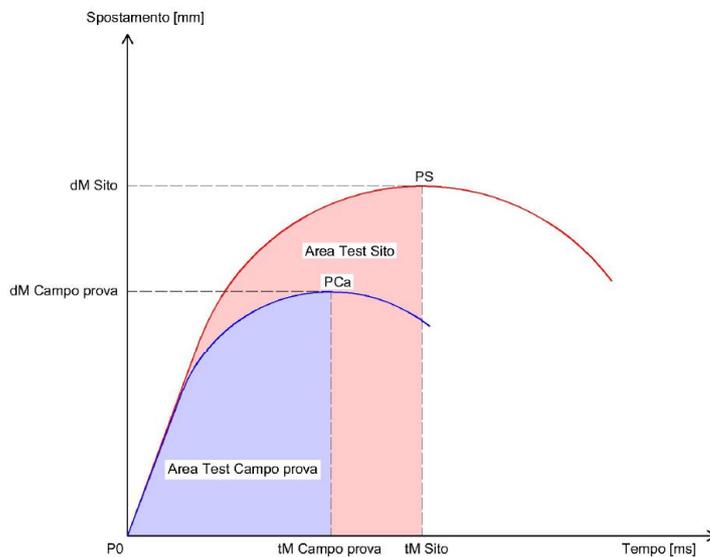


Figura 37: Confronto tra Prova in Sito e Prova in Campo prova

*“La prova dinamica si può considerare superata se i valori di  $C_E$  ottenuti in Sito ( $C_{E\ Sito}$ ) si mantengono sufficientemente prossimi a quelli ottenuti in Campo Prova ( $C_{E\ Campo\ Prova}$ ) ed in particolare non risultano inferiori al 75% di ( $C_{E\ Campo}$*

*Prova*) e non maggiori al 110% di ( $C_{E \text{ Campo Prova}}$ )” [14] come indicati nel Paragrafo 3.7 (limiti indicati nel rapporto tecnico UNI/TR 11785:2020 [2]).

$$0,75 \cdot (C_{E \text{ Campo Prova}}) \leq (C_{E \text{ Sito}}) \leq 1,1 \cdot (C_{E \text{ Campo Prova}})$$

La posizione della cerniera plastica in sito risulta a volte complesso da valutare, quando è possibile determinarla è necessario che tale valore venga riportato nel Rapporto di Prova.

### **4.3 Confronto tra Prove Quasi-statiche e Prove Dinamiche**

Per riassumere, in Figura 38, si riporta uno schema che rappresenta le principali differenze e la conformità tra le due tipologie di prove, in particolare nella prova quasi statica le prove vengono effettuate mediante una caratterizzazione del terreno e successivamente una caratterizzazione dell’insieme paletto terreno sia in campo prova che in sito, mentre nella prova dinamica si effettua direttamente la caratterizzazione dell’insieme paletto-terreno mediante i livelli di contenimento scelti per quel tipo di strada. I risultati che si ottengono sono per la prova quasi statica si valuta la condizione carico-spostamento, mentre per la dinamica ci si riferisce alla capacità di dissipazione dell’energia, andando a valutare il  $C_{E \text{ Campo Prova}}$  e il  $C_{E \text{ Sito}}$  e si considera superata la prova se il  $C_{E \text{ Sito}}$  rientra nell’intervallo tra il 75% e il 110% del  $C_{E \text{ Campo Prova}}$ .

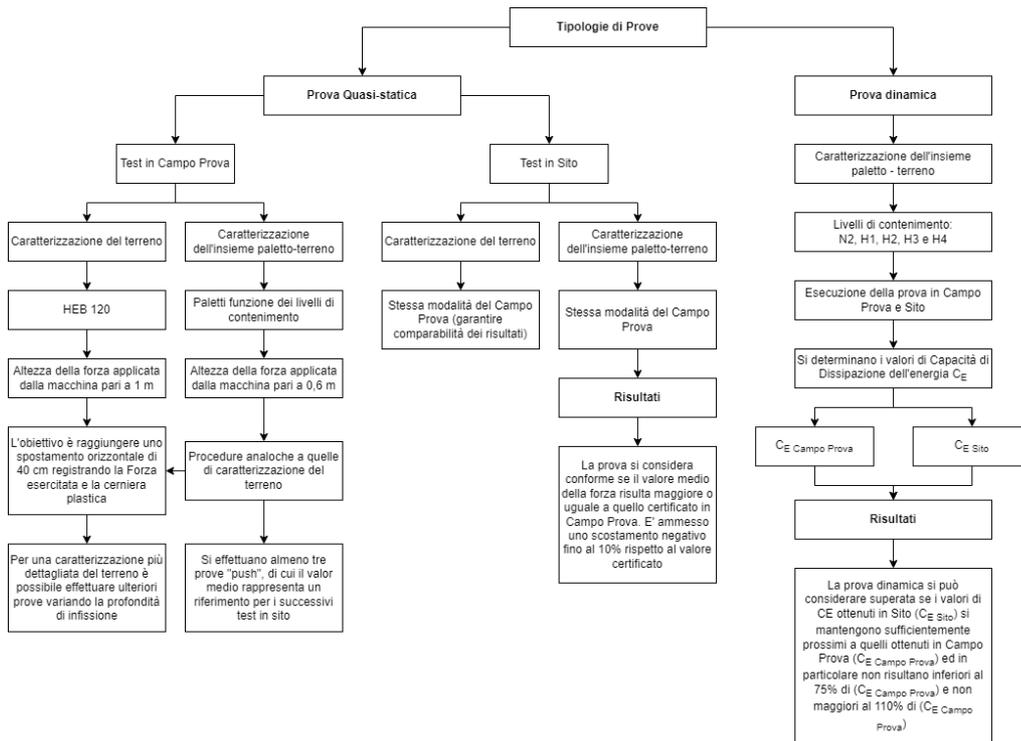


Figura 38: Schema riassuntivo Prove Quasi-statica e Dinamica

## CAPITOLO 5

### **Prova quasi-statica – Modellazione mediante Software numerico**

Il lavoro di tesi si sviluppa dall'idea di adottare una soluzione innovativa, nel processo di verifica della corretta posa del paletto, un modello numerico in grado di ridurre in termini di tempo e costi le prove di push in sito in regime quasi-statico. L'iter procedurale attualmente in uso prevede l'esecuzione di prove di push in campo prove come riportato nel Paragrafo 4.1 (Test Campo Prova – Caratterizzazione della Resistenza del terreno). Dopodichè, una volta stabilito il limite di forza massima ottenuto in Campo prova, si esegue con la medesima procedura la prova in Sito in modo da caratterizzare ed individuare il terreno su cui verrà installata la barriera di sicurezza. I risultati devono essere prossimi a quelli ottenuti in campo prova; in caso contrario, se la forza risulta minore è necessario verificare la necessità o meno di adottare infissioni maggiorate del paletto nel terreno o in casi più gravosi l'impiego di cordoli in calcestruzzo. Sulla base di quanto appena descritto, l'obiettivo perseguito nel presente capitolo, è la possibilità di sostituire le prove in sito con una modellazione mediante Software agli elementi finiti. Tale simulazione, effettuate nelle medesime condizioni reali di prova per la caratterizzazione del terreno bordo rilevato, dovrà essere in grado di restituire, in termini di forza applicata e spostamento del paletto, gli stessi valori deformativi che si avrebbero in sito con l'esecuzione delle prove di Push.

Si riporta in Figura 39 un grafico semplificato per descriverne meglio il processo.

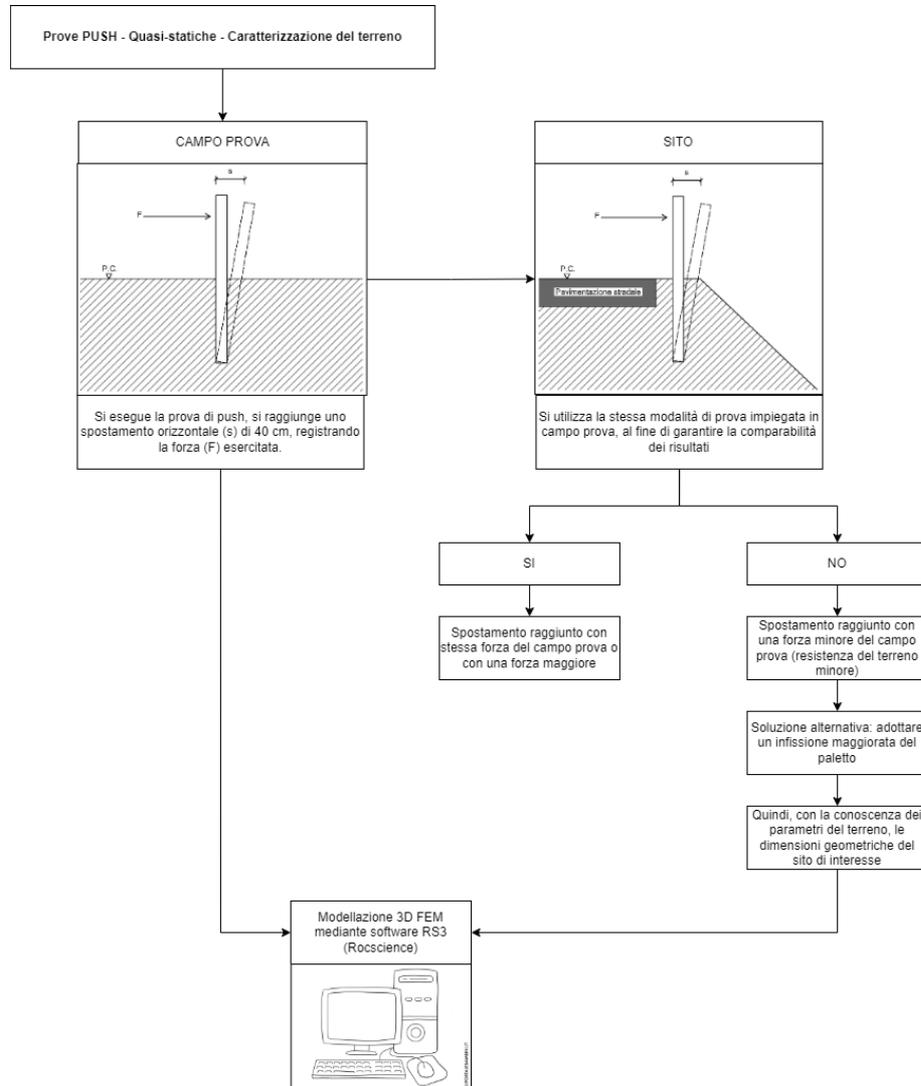


Figura 39: Grafico riassuntivo Sviluppo Software

## 5.1 Modello FEM

Il Metodo degli elementi finiti nasce negli anni '60, è un approccio numerico-ingegneristico utilizzato per la risoluzione di problemi fisici, e permette di calcolare il comportamento di un sistema scomponendo un oggetto complesso in un numero elevato di elementi che possono essere risolti in maniera più semplici [15].

Utilizzare questa analisi permette di ottenere grandi vantaggi in quanto è un processo che viene effettuato prima della produzione di un determinato oggetto.

I vantaggi dell'analisi FEM sono:

- precisione nella realizzazione;
- progettazione di prototipi virtuali;
- riduzione dei tempi.

Il processo di analisi agli elementi finiti segue i seguenti step:

1. discretizzazione del modello: consiste nella modellazione della geometria del problema mediante l'assemblaggio di elementi finiti.
2. approssimazione della variabile primaria: si intende il modo in cui essa deve variare all'interno di un elemento finito. Nell'ingegneria geotecnica si adottano gli spostamenti.
3. equazione degli elementi: applicazione di un principio variazionale adeguato a ottenere le equazioni dell'elemento.
4. equazioni globali: combinazione delle equazioni degli elementi per formulare le equazioni globali.
5. condizioni al contorno: formulazione delle condizioni al contorno e modifica delle equazioni globali.
6. risoluzione delle equazioni globali: consiste nell'ottenere gli spostamenti in tutti i nodi, dai quali vengono valutate grandezze secondarie come tensioni e deformazioni.

## **5.2 Software RS3 (Rocscience) – Sviluppo della modellazione**

RS3 [12] è un software di analisi tridimensionale agli elementi finiti (FEM) sviluppato da Rocscience. È stato introdotto per rispondere alle necessità di modellazione numerica in ambito geotecnico, fornendo un'alternativa tridimensionale ai software bidimensionali come RS2.

È progettato per analizzare e risolvere problemi geotecnici complessi, permettendo di simulare il comportamento del suolo, delle rocce e delle strutture in condizioni statiche e dinamiche.

Rispetto ai modelli bidimensionali, il software RS3 consente di progettare nelle tre direzioni (X, Y e Z), permettendo di visualizzarlo in modo più realistico.

Dopo un'analisi delle sue caratteristiche tecniche e pratiche, nonostante il lavoro di tesi sia sviluppato per lo più in ambito stradale, si è scelto di analizzarlo tramite l'utilizzo di un software a carattere geotecnico. Questa scelta è motivata dalla possibilità di modellare il terreno attraverso parametri geotecnici, offrendo così una maggiore accuratezza nella rappresentazione del comportamento del suolo.

Il modello numerico è articolato in diversi step, dalla fase di impostazione iniziale fino all'elaborazione e al recepimento dei risultati finali, seguendo un preciso ordine logico:

1. realizzazione della geometria: il software, permette di importare file provenienti da altri programmi, in particolare in questo caso per avere un migliore dettaglio nella costruzione del modello si è ricorsi al programma AutoCad.
2. gestione dei parametri iniziali: definizione del numero di incrementi di carico, il numero di iterazioni e la tolleranza.
3. impostazioni dei materiali: attribuire ai vari strati del terreno e al paletto i giusti parametri in particolare per il terreno si è ricorsi a prove DPSH.
4. applicazione della forza da attribuire al paletto.
5. applicazione dei vincoli al modello.
6. applicazione della mesh.
7. risultati ottenuti.

Seguendo questo ordine si specifica nel dettaglio tutte le fasi svolte.

### **5.2.1 Realizzazione del Modello**

La modellazione 3D è stata sviluppata sulla base di dati rilevati dalle prove in Sito, consentendone la ricostruzione della geometria con un livello di approssimazione coerente con le condizioni reali. Le informazioni acquisite hanno permesso di definire le principali caratteristiche geometriche del modello, garantendo una rappresentazione adeguata ai fini delle successive analisi.

Per assicurare una maggiore precisione geometrica, il modello è stato inizialmente sviluppato in CAD e successivamente importato nel software RS3. Questa scelta ha permesso di ottenere una rappresentazione più dettagliata e accurata, smussando le difficoltà legate alla modellazione diretta all'interno del software.

Lo sviluppo finale del modello è il risultato di un'evoluzione progressiva delle dimensioni del contorno. Le fasi iniziali dell'analisi hanno previsto l'adozione di un modello con dimensioni significativamente maggiori, che però non forniva una risposta soddisfacente in termini di risultati attesi riscontrando problemi di convergenza. Le successive ottimizzazioni hanno portato alla definizione di un modello con dimensioni più contenute, come rappresentato in Figura 40, in grado di restituire valori di risposta più coerenti con il comportamento atteso.

Il terreno d'infissione del paletto è stato suddiviso in tre strati distinti, ciascuno con uno spessore di 0,6 m. Tale scelta deriva dall'elaborazione dei risultati delle prove DPSH. Tali prove sono state eseguite fino a una profondità complessiva di 2,6 m e divise per strati di 0,2 m. Al fine di semplificare l'analisi senza compromettere la rappresentatività del modello, si è optato per l'assunzione di valori medi di riferimento per ciascun livello stratigrafico (si rimanda al Paragrafo 5.2.3).

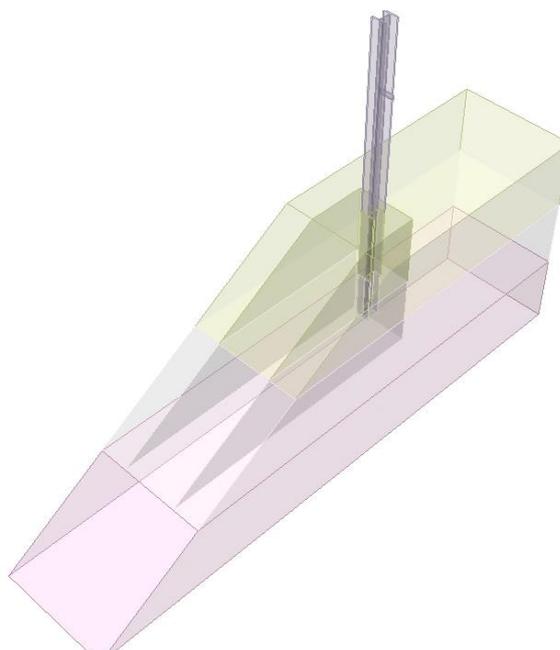


Figura 40: Modello 3D

Le dimensioni del modello adottate sono:

<i>Modello</i>	<i>Dimensioni [m]</i>
<i>Rapporto di pendenza</i>	<i>2/3</i>
<i>Larghezza</i>	<i>1</i>
<i>Profondità</i>	<i>2</i>
<i>Altezza</i>	<i>1,8</i>

Tabella 15: Dimensioni modello

Si riporta (Figura 41) uno schema riguardante la posizione del paletto dal bordo della scarpata del rilevato e una (Tabella 16) con le relative distanze.

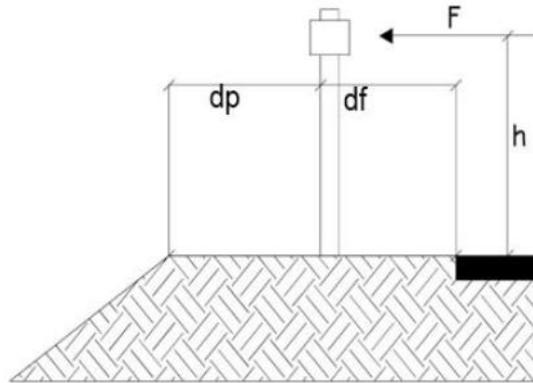


Figura 41: Schema semplificato della posizione del paletto

	<i>Dimensioni [m]</i>
<i>Lunghezza paletto</i>	2,6
<i>Infissione</i>	1
<i>Altezza di applicazione della forza (h)</i>	1
<i>Distanza frontale (df)</i>	0,12
<i>Distanza posteriore (dp)</i>	0,30
<i>Inflessione massima (xa)</i>	0,40

Tabella 16: Distanze paletto-bordo scarpata laterale

### 5.2.2 Gestione dei parametri iniziali

Il procedimento seguito in questa fase è stato quello di definire un numero di step progressivi fino al raggiungimento della forza massima misurata in sito, corrispondente a uno spostamento di 0,4 m. Le fasi di carico sono state impostate secondo uno schema ben preciso, in cui l'incremento parte da un valore iniziale pari a zero e aumenta gradualmente fino al massimo della forza, permettendo di osservare l'evoluzione degli spostamenti durante il processo.

Lo schema di carico adottato è riportato in Tabella 17, dove sono specificati i valori della forza applicata.

<i>Fasi</i>	<i>Carico (kN)</i>
1	0
2	4,8
3	6
4	7,2
5	8,4
6	9,6
7	10,8
8	12
9	13,2
10	14,4
11	15,6
12	16,21

Tabella 17: Applicazioni dei carichi

### 5.2.3 Proprietà fisico-meccaniche del terreno e del paletto

L'assegnazione delle proprietà dei materiali all'interno del modello è stata effettuata sulla base di prove penetrometriche dinamiche, eseguite utilizzando l'attrezzatura DPSH TG 63-200 della Pagani.

La prova penetrometrica dinamica DPSH (Dynamic Probing Super Heavy) è un test geotecnico in sito che consente di determinare la resistenza del terreno misurando il numero di colpi necessari per far penetrare in profondità una punta conica nel suolo. Questo metodo di indagine è particolarmente utile per ottenere informazioni sulla compattezza e sulle proprietà meccaniche dei terreni, risultando ampiamente impiegato nella progettazione di fondazioni, nella valutazione della capacità portante del suolo e nello studio della stabilità dei pendii.

Il principio di funzionamento della prova si basa sulla battitura di un'asta metallica dotata di punta conica nel terreno, utilizzando un maglio di peso noto che viene lasciato cadere da un'altezza prefissata. L'energia trasmessa alla punta genera la penetrazione nel suolo, e il numero di colpi necessari alla penetrazione.

I dati raccolti durante la prova vengono successivamente analizzati per determinare le caratteristiche meccaniche del terreno.

Uno dei principali vantaggi della prova DPSH è la sua rapidità di esecuzione e il costo contenuto rispetto ad altre indagini in sito, come la prova penetrometrica

statica CPT. Inoltre, consente di raggiungere profondità relativamente elevate senza la necessità di perforazioni, risultando quindi adatta per terreni granulari e coesivi di media consistenza. Tuttavia, presenta anche alcune limitazioni, tra cui una minore precisione nella determinazione della stratigrafia rispetto al CPT e la necessità di utilizzare correlazioni empiriche per la stima dei parametri meccanici. Inoltre, in presenza di terreni estremamente teneri o molto compatti, la prova può risultare poco efficace o difficoltosa nell'esecuzione.

Il test (denominata Prova 1) è stato condotto per strati di 0,2 m fino a una profondità complessiva di 2,6 m, registrando il numero di colpi necessari alla penetrazione e successivamente elaborando i dati mediante un programma di calcolo automatico Dynamic Probing della GeoStru Software.

Vengono riportati i dati analizzati della prova DPSH svolta in sito, si riferiscono a tre posizioni di prova lungo l'asse in cui vengono effettuate successivamente le prove di "push".

<i>Profondità [m]</i>	<i>Nr. Colpi</i>	<i>Calcolo coeff. riduzione sonda Chi</i>	<i>Res. dinamica ridotta [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Res. dinamica [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile con riduzione Herminier- Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile Herminier-Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>
<b>0,20</b>	3	0,855	26,95	31,52	1,35	1,58
<b>0,40</b>	25	0,751	197,27	262,68	9,86	13,13
<b>0,60</b>	8	0,847	65,35	77,15	3,27	3,86
<b>0,80</b>	7	0,843	56,90	67,50	2,85	3,38
<b>1,00</b>	3	0,840	24,30	28,93	1,22	1,45
<b>1,20</b>	2	0,836	16,13	19,29	0,80	0,96
<b>1,40</b>	2	0,833	16,07	19,29	0,80	0,96
<b>1,60</b>	1	0,830	7,40	8,91	0,37	0,45
<b>1,80</b>	2	0,826	14,72	17,82	0,74	0,89
<b>2,00</b>	1	0,823	7,33	8,91	0,37	0,45
<b>2,20</b>	8	0,820	58,46	71,29	2,92	3,56
<b>2,40</b>	8	0,817	58,24	71,29	2,91	3,56
<b>2,60</b>	7	0,814	47,19	57,97	2,36	2,90

Tabella 18: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 1/A

<i>Profondità [m]</i>	<i>Nr. Colpi</i>	<i>Calcolo coeff. riduzione sonda Chi</i>	<i>Res. dinamica ridotta [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Res. dinamica [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile con riduzione Herminier- Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile Herminier-Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>
<b>0,20</b>	1	0,855	8,99	10,51	0,45	0,53
<b>0,40</b>	1	0,851	8,94	10,51	0,45	0,53
<b>0,60</b>	1	0,847	8,17	9,64	0,41	0,48
<b>0,80</b>	3	0,843	24,39	28,93	1,22	1,45
<b>1,00</b>	3	0,840	24,30	28,93	1,22	1,45
<b>1,20</b>	5	0,836	40,31	48,22	2,01	2,41
<b>1,40</b>	2	0,833	16,07	19,29	0,80	0,96
<b>1,60</b>	2	0,830	14,79	17,82	0,74	0,89
<b>1,80</b>	2	0,826	14,72	17,82	0,74	0,89
<b>2,00</b>	3	0,823	22,00	26,73	1,10	1,34
<b>2,20</b>	7	0,820	51,15	62,38	2,56	3,12
<b>2,40</b>	8	0,817	58,24	71,29	2,91	3,56
<b>2,60</b>	7	0,814	47,19	57,97	2,36	2,90

Tabella 19: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 1/B

<i>Profondità [m]</i>	<i>Nr. Colpi</i>	<i>Calcolo coeff. riduzione sonda Chi</i>	<i>Res. dinamica ridotta [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Res. dinamica [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile con riduzione Herminier- Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile Herminier-Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>
<b>0,20</b>	1	0,855	8,99	10,51	0,45	0,53
<b>0,40</b>	4	0,851	35,77	42,03	1,79	2,10
<b>0,60</b>	9	0,847	73,51	86,79	3,68	4,34
<b>0,80</b>	3	0,843	24,39	28,93	1,22	1,45
<b>1,00</b>	4	0,840	32,40	38,57	1,62	1,93
<b>1,20</b>	3	0,836	24,19	28,93	1,21	1,45
<b>1,40</b>	2	0,833	16,07	19,29	0,80	0,96
<b>1,60</b>	2	0,830	14,79	17,82	0,74	0,89
<b>1,80</b>	1	0,826	7,36	8,91	0,37	0,45
<b>2,00</b>	2	0,823	14,67	17,82	0,73	0,89
<b>2,20</b>	2	0,820	14,61	17,82	0,73	0,89
<b>2,40</b>	2	0,817	14,56	17,82	0,73	0,89
<b>2,60</b>	3	0,814	20,23	24,85	1,01	1,24

Tabella 20: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 1/C

Dai risultati ottenuti nelle tre tabelle, determinati mediante l'attrezzatura Pagani TG 63-200, è stato possibile calcolare il valore di  $N_{SPT}$ .



Figura 42: Attrezzatura Pagani TG 63 - 200

**DSSH TG 63-200 PAGANI**

<i>Rif. Norme</i>	<i>DIN 4094</i>
<i>Pesa Massa Battente (Kg)</i>	63,5
<i>Altezza Di Caduta Libera (m)</i>	0,75
<i>Peso Sistema Di Battura (Kg)</i>	0,63
<i>Diametro Punta Conica (mm)</i>	51
<i>Area Di Base Punta (cm<sup>2</sup>)</i>	20,43
<i>Lunghezza Delle Aste (m)</i>	1
<i>Peso Aste A Metro (Kg/m)</i>	6,31
<i>Profondità Giunzione Prima Asta (m)</i>	0,4
<i>Avanzamento Punta (m)</i>	0,2
<i>Numero Colpi Per Punta</i>	N(20)
<i>Rivestimento/Fanghi</i>	No
<i>Angolo Di Apertura Punta</i>	90°

Tabella 21: Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda

Prima di calcolare la correlazione che lega il Nr. di colpi al valore di  $N_{SPT}$ , è stato determinato il coefficiente  $\beta_t$  che è dato dal rapporto dell'energia specifica per colpo  $Q$  e l'energia riferita alla prova SPT  $Q_{SPT}$ .

$$\beta_t = \frac{Q}{Q_{SPT}} = 1,49$$

Equazione 8: Coefficiente  $\beta_t$

Dove:

- $Q = 11,66 \text{ Kg/cm}^2$
- $Q_{SPT} = 7,83 \text{ Kg/cm}^2$

Quindi, il valore di  $N_{SPT}$  è stato calcolato come segue:

$$N_{SPT} = \beta_t \cdot N_{colpi}$$

Equazione 9: Formula per il calcolo  $N_{SPT}$

Profondità [m]	I/A		I/B		I/C	
	Nr. Colpi	$N_{SPT}$	Nr. Colpi	$N_{SPT}$	Nr. Colpi	$N_{SPT}$
0,20	1	4,47	1	1,49	1	1,49
0,40	4	37,23	4	1,49	4	5,96
0,60	9	11,91	9	1,49	9	13,40
0,80	3	10,42	3	4,47	3	4,47
1,00	4	4,47	4	4,47	4	5,96
1,20	3	2,98	3	7,45	3	4,47
1,40	2	2,98	2	2,98	2	2,98
1,60	2	1,49	2	2,98	2	2,98
1,80	1	2,98	1	2,98	1	1,49
2,00	2	1,49	2	4,47	2	2,98
2,20	2	11,91	2	10,42	2	2,98
2,40	2	11,91	2	11,91	2	2,98
2,60	3	10,42	3	10,42	3	4,47

Tabella 22:  $N_{SPT}$  per le tre prove

Attraverso formulazioni empiriche si è potuto stimare, in modo approssimato, i valori da assegnare al terreno all'interno del modello numerico, in particolare per la valutazione del modulo elastico si è preso come riferimento la formulazione di Bowles (1982) caratteristica per la sabbia e ghiaia.

$$E_Y = 12,0 \cdot (N_{SPT} + 6)$$

Equazione 10: Modulo di Young (Bowles, 1982)

	<i>1/A</i>	<i>1/B</i>	<i>1/C</i>
<i>Profondità [m]</i>	<i>E<sub>y</sub> [MPa]</i>	<i>E<sub>y</sub> [MPa]</i>	<i>E<sub>y</sub> [MPa]</i>
<i>0,20</i>	<i>125,61</i>	<i>89,87</i>	<i>89,87</i>
<i>0,40</i>	<i>518,74</i>	<i>89,87</i>	<i>143,48</i>
<i>0,60</i>	<i>214,96</i>	<i>89,87</i>	<i>232,83</i>
<i>0,80</i>	<i>197,09</i>	<i>125,61</i>	<i>125,61</i>
<i>1,00</i>	<i>125,61</i>	<i>125,61</i>	<i>143,48</i>
<i>1,20</i>	<i>107,74</i>	<i>161,35</i>	<i>125,61</i>
<i>1,40</i>	<i>107,74</i>	<i>107,74</i>	<i>107,74</i>
<i>1,60</i>	<i>89,87</i>	<i>107,74</i>	<i>107,74</i>
<i>1,80</i>	<i>107,74</i>	<i>107,74</i>	<i>89,87</i>
<i>2,00</i>	<i>89,87</i>	<i>125,61</i>	<i>107,74</i>
<i>2,20</i>	<i>214,96</i>	<i>197,09</i>	<i>107,74</i>
<i>2,40</i>	<i>214,96</i>	<i>214,96</i>	<i>107,74</i>
<i>2,60</i>	<i>197,09</i>	<i>197,09</i>	<i>125,61</i>

Tabella 23: Modulo elastico delle tre prove (Bowles, 1982)

Per la discretizzazione del modello, si è optato per una suddivisione in tre strati di terreno con caratteristiche geotecniche differenti. Nello specifico, gli strati sono di 0,6 m ciascuno (Figura 40). Da questa suddivisione in funzione dei risultati ottenuti di modulo elastico si è scelta la prova 1/B (risultati più affidabili), e sulla base di essa si è attribuito un valor medio rappresentativo di modulo elastico (Primo strato che va dal piano campagna fino alla profondità di 0,6 m, il secondo strato da 0,6 m – 1,2 m mentre per il terzo strato 1,2 m – 1,8 m con l’assegnazione di modulo elastico basato sulla media della profondità 1,2 m fino a 2,6 m).

<i>STRATO</i>	<i>E<sub>y</sub> [MPa]</i>
<i>1 (0 m – 0,6 m)</i>	<i>90</i>
<i>2 (0,6 m – 1,2 m)</i>	<i>140</i>
<i>3 (1,2 m – 1,8 m)</i>	<i>150</i>

Tabella 24: Modulo elastico assunto per lo sviluppo del modello (Prova 1)

Il criterio di rottura assunto nel modello da attribuire al terreno è il criterio di Mohr-Coulomb, che rappresenta una delle formulazioni più utilizzate nel campo geotecnico per descrivere il comportamento meccanico dei terreni in condizioni di sollecitazione adottando un angolo di resistenza al taglio pari a  $35^\circ$  e una coesione pari a 10 kPa. Per quanto riguarda il paletto, la sua modellazione è avvenuta in condizioni elastiche, attribuendo un modulo elastico pari a 210 GPa e un peso per unità di volume pari a  $78,5 \text{ kN/m}^3$ . Questa scelta deriva dal fatto che, nell'analisi condotta, il paletto presenta una rigidità significativamente superiore a quella del terreno circostante, comportandosi quindi essenzialmente come un corpo rigido in rotazione.

L'obiettivo principale dell'analisi è quello di studiare il comportamento del terreno in risposta alle sollecitazioni indotte dal paletto.

#### **5.2.4 Applicazione della forza da attribuire al paletto**

L'impostazione della forza all'interno del software richiede particolare attenzione nella conversione dell'unità di misura, poiché il carico è espresso in  $\text{kN/m}^2$ . Per garantire una corretta assegnazione, è stata definita una piccola porzione di superficie su cui applicarlo. In particolare, la geometria dell'area di contatto della forza è stata modellata con dimensioni pari a  $0,12 \text{ m} \times 0,04 \text{ m}$ .

Per ogni fase di carico, il valore espresso in kN è stato convertito nel formato richiesto dal software, ossia come pressione distribuita sull'area di applicazione. Questa conversione è essenziale per garantire la coerenza tra i dati delle prove in sito e quelli numerici, evitando errori nella rappresentazione delle sollecitazioni agenti sul modello.

L'approccio adottato permette di riprodurre fedelmente le condizioni di carico osservate in sito, assicurando una corretta valutazione del comportamento del sistema in risposta alle sollecitazioni applicate.

<i>Step</i>	<i>Carico (kN)</i>	<i>Area (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Carico software (kN/m<sup>2</sup>)</i>
1	0	0,0048	0
2	4,8	0,0048	1000
3	6	0,0048	1250
4	7,2	0,0048	1500
5	8,4	0,0048	1750
6	9,6	0,0048	2000
7	10,8	0,0048	2250
8	12	0,0048	2500
9	13,2	0,0048	2750
10	14,4	0,0048	3000
11	15,6	0,0048	3250
12	16,21	0,0048	3378

Tabella 25: Carichi da attribuire al software

Inoltre, è possibile osservare la posizione e la modalità di applicazione del carico all'interno del modello (Figura 43). Nel software, l'applicazione della forza è stata gestita assegnando una Magnitude pari a un valore unitario espresso al  $\text{kN/m}^2$ , mentre i carichi effettivi sono stati organizzati tramite lo Stage Factor, che permette di definire l'incremento progressivo del carico in ciascuna fase di analisi.

I valori dei carichi applicati sono stati convertiti nel formato richiesto dal software (Tabella 25). Questo approccio consente di controllare con precisione l'evoluzione del carico nel tempo e di simulare in modo più o meno realistico le condizioni osservate in sito.

La scelta dello Stage Factor permette di gestire in maniera flessibile la progressione del carico, evitando incrementi troppo bruschi che potrebbero generare instabilità numeriche nella simulazione. Inoltre, questa metodologia consente di analizzare il comportamento del sistema in diverse condizioni di sollecitazione, fornendo una visione più dettagliata della risposta del terreno e del paletto.

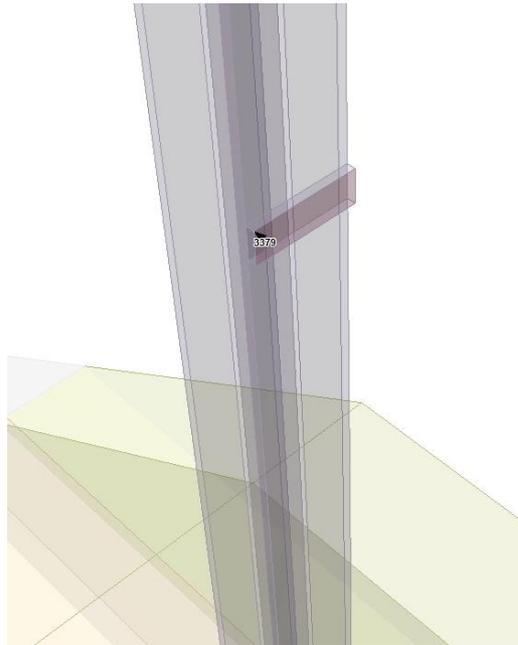


Figura 43: Applicazione del carico alla massima forza applicata

### 5.2.5 Applicazione dei vincoli

Nel software RS3, il termine “Restraints” si riferisce ai vincoli applicati ai nodi o agli elementi del modello al fine di controllarne i movimenti. L'imposizione dei vincoli è un aspetto fondamentale nella modellazione numerica, in quanto permette di definire correttamente le condizioni al contorno e di garantire che il comportamento del sistema rappresenti in maniera realistica la realtà fisica del problema analizzato.

I vincoli possono essere assegnati a diverse parti del modello, come facce, bordi o vertici, e si distinguono principalmente in due categorie:

- vincoli "free": consentono il libero movimento in tutte le direzioni, senza restrizioni sugli spostamenti.
- vincoli "fixed": permettono di bloccare gli spostamenti in una o più direzioni cartesiane (X, Y e Z), a seconda delle esigenze di modellazione.

Nel caso specifico del presente studio, si è adottata una configurazione dei vincoli che garantisca una rappresentazione coerente delle condizioni reali. Nello specifico:

- il paletto e la superficie del rilevato sono stati lasciati liberi di muoversi, permettendo di osservare le interazioni tra la struttura e il terreno.
- sulle facce laterali del modello, gli spostamenti sono stati impediti lungo le direzioni X, Y e Z.
- nella parte inferiore del modello, tutti gli spostamenti sono stati completamente impediti lungo le tre direzioni X, Y e Z, rappresentando una base rigida.

L'impostazione dei vincoli adottata risulta essenziale per garantire stabilità numerica al modello e per riprodurre in maniera accurata il comportamento del sistema sotto l'azione del carico applicato. La distribuzione dei vincoli e la loro configurazione sono illustrate in Figura 44.

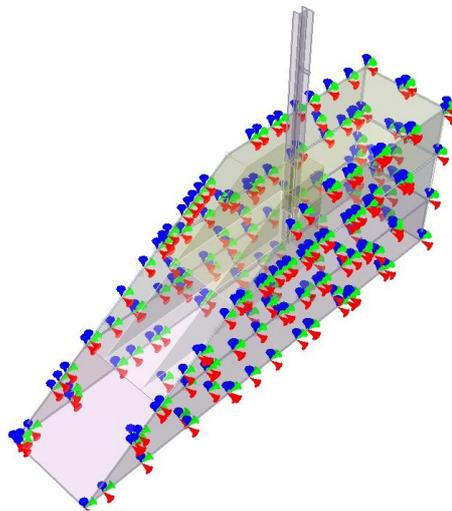


Figura 44: Applicazione dei vincoli

### 5.2.6 Applicazione della mesh

La modellazione della mesh è un aspetto cruciale per garantire un'analisi numerica accurata. La mesh rappresenta la discretizzazione del modello continuo in elementi finiti consentendo al software di risolvere il problema attraverso il metodo degli elementi finiti (FEM).

Il software consente di generare diverse tipologie di mesh, adattabili alle specifiche esigenze della modellazione e si distinguono in:

- mesh 4 nodi tetraedrico: è composta da 4 nodi corrispondenti ai vertici del tetraedro, dal punto di vista computazionale è un elemento semplice e meno oneroso, ma meno preciso nel rappresentare le deformazioni complesse, si adatta bene per la modellazione in cui non sono richiesti particolari livelli di precisione.
- mesh 10 nodi tetraedrica: è composto da 10 nodi, i nodi sono presenti non solo nei vertici del tetraedro ma anche su ciascun lato dell'elemento, costituisce una maggiore precisione nella modellazione delle deformazioni con tempi computazionali più lunghi rispetto ai 4 nodi. Al contrario dei 4 nodi si utilizza per modelli di alta complessità geometrica.
- mesh ibrida: all'interno del software è possibile combinare elementi a 4 e 10 nodi tetraedrici. La guida riporta il modo in cui è possibile gestire la combinazione ma nell'effettivo il software riscontra un bug di impostazione.

Facendo questa differenza tra i 4 e i 10 nodi si può scegliere se optare per una mesh "Uniform" o "Graded", la prima genera una maglia uniforme su tutto il modello mentre, nella seconda la generazione della mesh si sviluppa in modo progressivo con una concentrazione maggiore di elementi nella zona di interesse e nei bordi elementi più grossolani. Inoltre, è anche possibile attribuire in modo automatico la generazione della mesh basato su un algoritmo di discretizzazione.

La mesh assume un parametro fondamentale per la simulazione, essa influisce direttamente sulla stabilità e sulla convergenza dell'analisi numerica. Gli aspetti da considerare sono funzione della dimensione, quindi una maglia troppo grossolana può portare a risultati inaccurati, mentre una troppo fine aumenta il tempo di calcolo senza necessariamente migliorare la precisione, se non accompagnata da un'adeguata calibrazione del modello.

Nel presente studio, il modello è stato discretizzato utilizzando una mesh a 4 nodi tetraedrica uniforme su tutta la geometria, con un infittimento molto alto e di conseguenza tempi di calcolo molto lunghi. In Figura 45 viene riportata la modellazione della mesh.

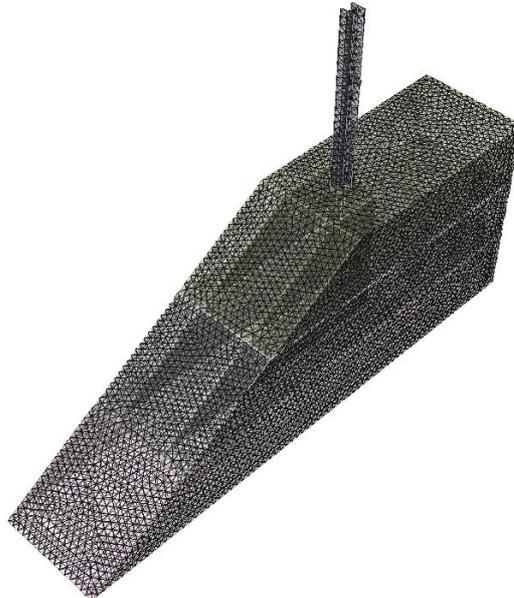


Figura 45: Mesh Uniform 4 nodi tetraedro

### 5.2.7 Risultati ottenuti

Il processo di sviluppo si è concluso con la simulazione numerica, i cui risultati vengono presentati e analizzati in questa sezione per valutare il comportamento del modello e la coerenza delle risposte rispetto alle prove in sito. L'obiettivo principale di questa prima analisi, come già accennato, è stato quello di ricostruire l'intero processo deformativo in termini di spostamento del paletto e del terreno.

Attraverso il software utilizzato, è stato possibile esportare tutti i grafici di interesse. Il primo grafico mostra l'andamento della relazione forza-spostamento del paletto: nei primi incrementi di carico, gli spostamenti risultano molto contenuti, poiché il terreno offre ancora una resistenza ottimale. Tuttavia, con l'aumento della forza applicata, gli spostamenti diventano significativamente maggiori, evidenziando una riduzione della resistenza del terreno.

Per garantire una corretta similitudine del modello con le prove in sito, l'analisi numerica ha restituito un valore molto vicino allo spostamento finale (40 cm), con

uno spostamento di circa 43 cm sotto l'applicazione di una forza pari a 16,21 kN (forza massima raggiunta in Sito), confermando così in una prima battuta la "coerenza" del modello (Figura 46).

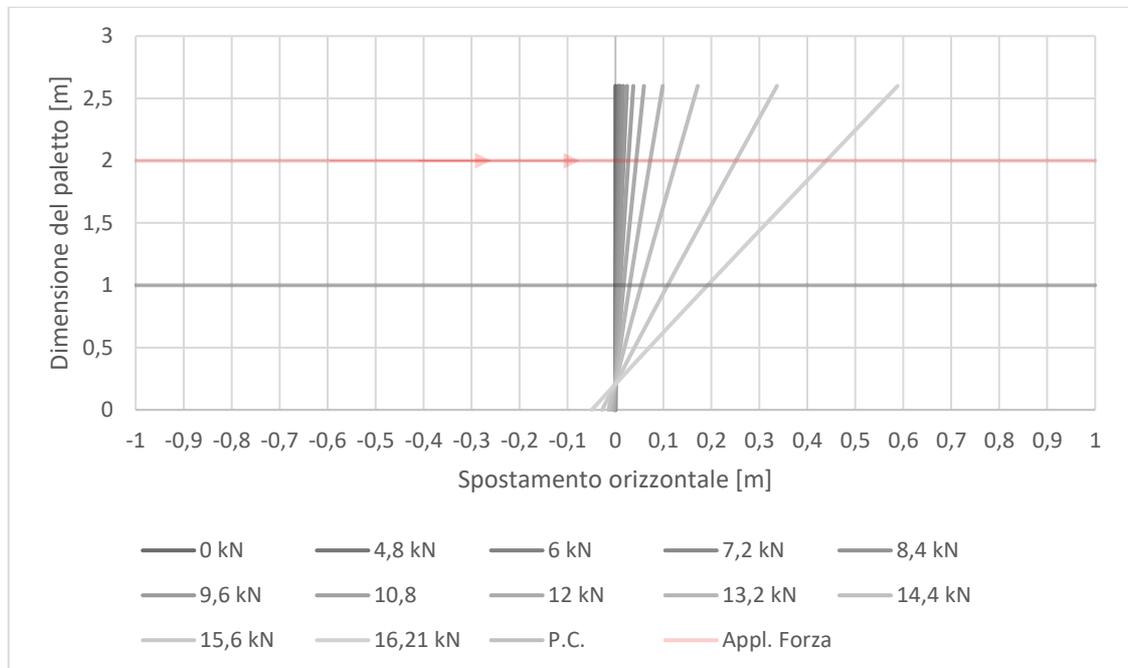


Figura 46: Evoluzione degli Spostamenti orizzontali dati dallo spostamento del paletto in funzione della forza applicata (Modello 1)

Il successivo grafico è una rappresentazione vista in "pianta" dell'evoluzione dello spostamento del terreno nella direzione di applicazione della forza. Anche in questo caso l'andamento dello spostamento risulterebbe plausibile dal punto di vista teorico, con il raggiungimento di uno spostamento di circa 12 cm corrispondente alla massima forza (Figura 47).

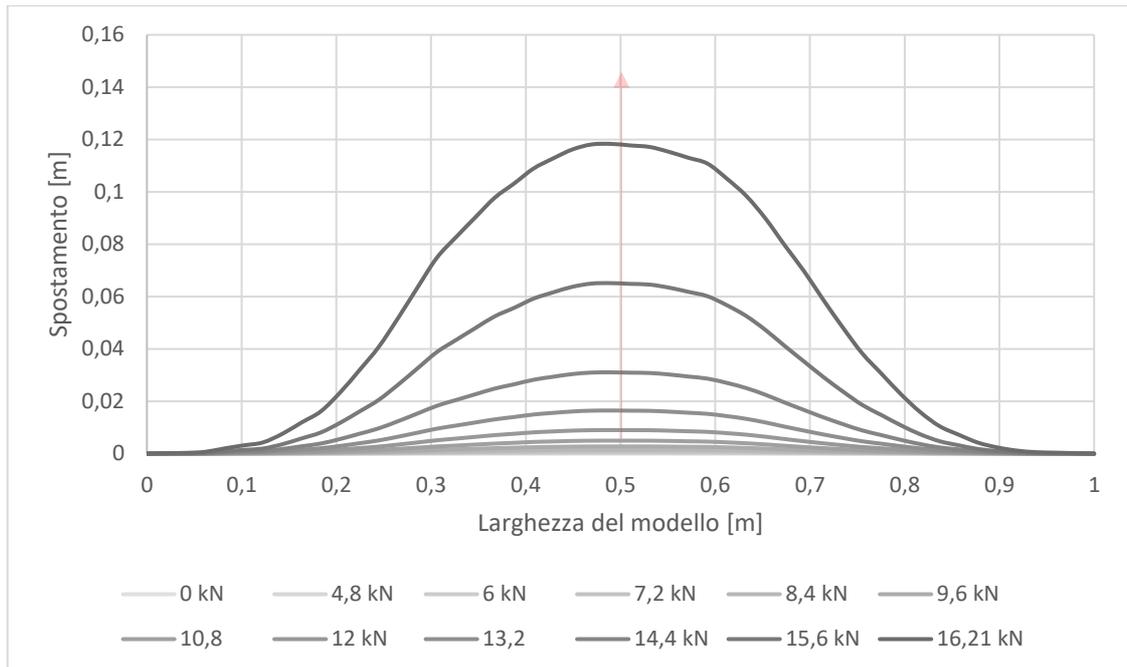


Figura 47: Evoluzione degli Spostamenti del terreno nella direzione di applicazione della forza (Modello 1)

### 5.3 Validazione del modello FEM con una seconda prova di campo

Al fine di garantire una corretta verifica preliminare del sistema e considerando i risultati ottenuti dal primo modello numerico, la procedura descritta in questo paragrafo prevede la realizzazione di un ulteriore test di verifica avente la stessa geometria della prima simulazione, ma utilizzando diversi parametri forniti mediante una seconda prova “push” in sito. Dai risultati di prova l’obiettivo di questa fase è stato quello di ricreare il modello con una distanza del paletto dal bordo della scarpata diverso dalla prima prova (Tabella 26) e avente caratteristiche del terreno funzione delle prove DPSH effettuate nel tratto di svolgimento della prova denominata Prova 2.

<b>Dimensioni [m]</b>	
<i>Lunghezza paletto</i>	2,6
<i>Infissione</i>	1
<i>Altezza di applicazione della forza (h)</i>	1
<i>Distanza frontale (df)</i>	0,50
<i>Distanza posteriore (dp)</i>	0,50
<i>Inflessione massima (xa)</i>	0,40

Tabella 26: Distanze paletto-bordo scarpata laterale (Prova 2)

Anche in questo caso si è proceduto con la stessa metodologia per la valutazione del modulo elastico da adottare per la soluzione numerica, di seguito si riportano le tre prove DPSH effettuate con l'attrezzatura Pagani TG 63 - 200.

<b>Profondità [m]</b>	<b>Nr. Colpi</b>	<b>Calcolo coeff. riduzione sonda Chi</b>	<b>Res. dinamica ridotta [Kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Res. dinamica [Kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pres. Ammissibile con riduzione Herminier- Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pres. Ammissibile Herminier-Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</b>
<b>0,20</b>	1	0,854	8,98	10,51	0,45	0,53
<b>0,40</b>	2	0,851	17,88	21,01	0,89	1,05
<b>0,60</b>	4	0,847	32,67	38,57	1,63	1,93
<b>0,80</b>	3	0,843	24,40	28,93	1,22	1,45
<b>1,00</b>	2	0,840	16,20	19,29	0,81	0,96
<b>1,20</b>	2	0,836	16,13	19,29	0,81	0,96
<b>1,40</b>	3	0,833	24,10	28,93	1,20	1,45
<b>1,60</b>	2	0,829	14,78	17,82	0,74	0,89
<b>1,80</b>	1	0,826	7,36	8,91	0,37	0,45
<b>2,00</b>	2	0,823	14,67	17,82	0,73	0,89
<b>2,20</b>	3	0,820	21,92	26,73	1,10	1,34
<b>2,40</b>	2	0,817	14,56	17,82	0,73	0,89
<b>2,60</b>	3	0,814	20,23	24,85	1,01	1,24

Tabella 27: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 2/A

Capitolo 5

<i>Profondità [m]</i>	<i>Nr. Colpi</i>	<i>Calcolo coeff. riduzione sonda Chi</i>	<i>Res. dinamica ridotta [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Res. dinamica [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile con riduzione Herminier-Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile Herminier-Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>
<b>0,20</b>	3	0,855	26,94	31,52	1,35	1,58
<b>0,40</b>	12	0,851	107,27	126,09	5,36	6,30
<b>0,60</b>	8	0,847	65,34	77,15	3,27	3,86
<b>0,80</b>	4	0,843	32,53	38,57	1,63	1,93
<b>1,00</b>	2	0,840	16,20	19,29	0,81	0,96
<b>1,20</b>	2	0,836	16,13	19,29	0,81	0,96
<b>1,40</b>	2	0,833	16,06	19,29	0,80	0,96
<b>1,60</b>	1	0,830	7,39	8,91	0,37	0,45
<b>1,80</b>	1	0,826	7,36	8,91	0,37	0,45
<b>2,00</b>	2	0,823	14,67	17,82	0,73	0,89
<b>2,20</b>	2	0,820	14,62	17,82	0,73	0,89
<b>2,40</b>	3	0,817	21,84	26,73	1,09	1,34
<b>2,60</b>	3	0,814	20,23	24,85	1,01	1,24

Tabella 28: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 2/B

<i>Profondità [m]</i>	<i>Nr. Colpi</i>	<i>Calcolo coeff. riduzione sonda Chi</i>	<i>Res. dinamica ridotta [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Res. dinamica [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile con riduzione Herminier-Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Pres. Ammissibile Herminier-Olandesi [Kg/cm<sup>2</sup>]</i>
<b>0,20</b>	1	0,855	8,98	10,51	0,45	0,53
<b>0,40</b>	2	0,851	17,88	21,01	0,89	1,05
<b>0,60</b>	3	0,847	24,50	28,93	1,23	1,45
<b>0,80</b>	4	0,843	32,53	38,57	1,63	1,93
<b>1,00</b>	2	0,840	16,20	19,29	0,81	0,96
<b>1,20</b>	2	0,836	16,13	19,29	0,81	0,96
<b>1,40</b>	1	0,833	8,03	9,64	0,40	0,48
<b>1,60</b>	1	0,830	7,39	8,91	0,37	0,45
<b>1,80</b>	2	0,826	14,73	17,82	0,74	0,89
<b>2,00</b>	2	0,823	14,67	17,82	0,73	0,89
<b>2,20</b>	1	0,820	7,31	8,91	0,37	0,45
<b>2,40</b>	2	0,817	14,56	17,82	0,73	0,89
<b>2,60</b>	2	0,814	13,49	16,56	0,67	0,83

Tabella 29: Risultati prova penetrometrica dinamica DPSH 2/C

L'analisi effettuata mediante la formulazione empirica (Paragrafo 5.2.3) ha consentito anche in questo caso di valutare il modulo elastico per questa tipologia

di prova (Tabella 30), e lo stesso riguarda per il criterio di rottura che si è adottato la stessa configurazione della Prova 1.

<i>STRATO</i>	$E_Y$ [MPa]
1 (0 m – 0,6 m)	115
2 (0,6 m – 1,2 m)	120
3 (1,2 m – 1,8 m)	150

Tabella 30: Modulo elastico assunto per lo sviluppo del modello (Prova 2)

Quindi, sulla base di queste informazioni è stato definito tutto il modello (Figura 48) in termini di geometria, di caratteristiche dei materiali, mesh e di vincoli. Il risultato che si è voluto ottenere ha riguardato in particolare l'incremento di carico necessario per raggiungere uno spostamento orizzontale del paletto pari a 40 cm e valutarne la forza finale.

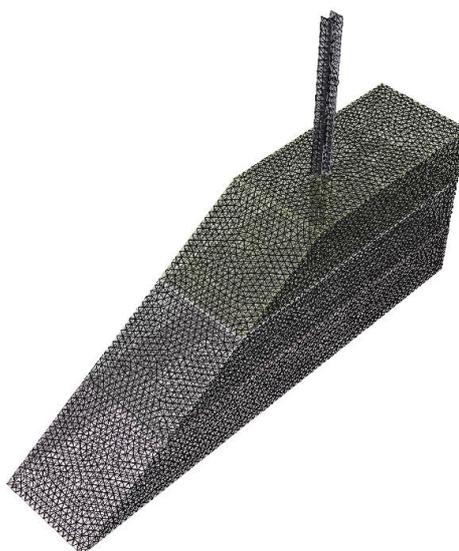


Figura 48: Modellazione 3D (Prova 2)

Qualora i risultati ottenuti dal modello risultassero coerenti con quelli della prova in sito, il sistema in questo caso risulterebbe corretto in termini di geometria e mesh, permettendo così di definire una prima “soluzione” del modello.

### 5.3.1 Risultati ottenuti sulla seconda prova

Dall'analisi dei risultati ottenuti, il software ha restituito le seguenti informazioni. L'aumento progressivo del carico risulta del tutto simile alla prima analisi di prova. Di conseguenza l'osservazione principale è ricaduta sull'ultimo

## Capitolo 5

step di carico ovvero la forza pari a 19,2 kN offre uno spostamento del paletto di circa 58 cm sul punto di applicazione della macchina di spinta. Quello che si può dire è che il paletto per raggiungere i 40 cm di spostamento necessita di una forza minore, il che non è corretto in quanto dalle prove svolte in sito il raggiungimento di tale spostamento si ottiene con una forza pari a 22 kN. Quindi si può affermare che la comparabilità tra il risultato reale e quello ottenuto mediante lo sviluppo del software non sono del tutto equivalenti, definendo così in prima battuta un problema legato alla modellazione. Di seguito si riportano in Figura 49 e 50 i grafici che rappresentano al meglio quanto detto sopra.

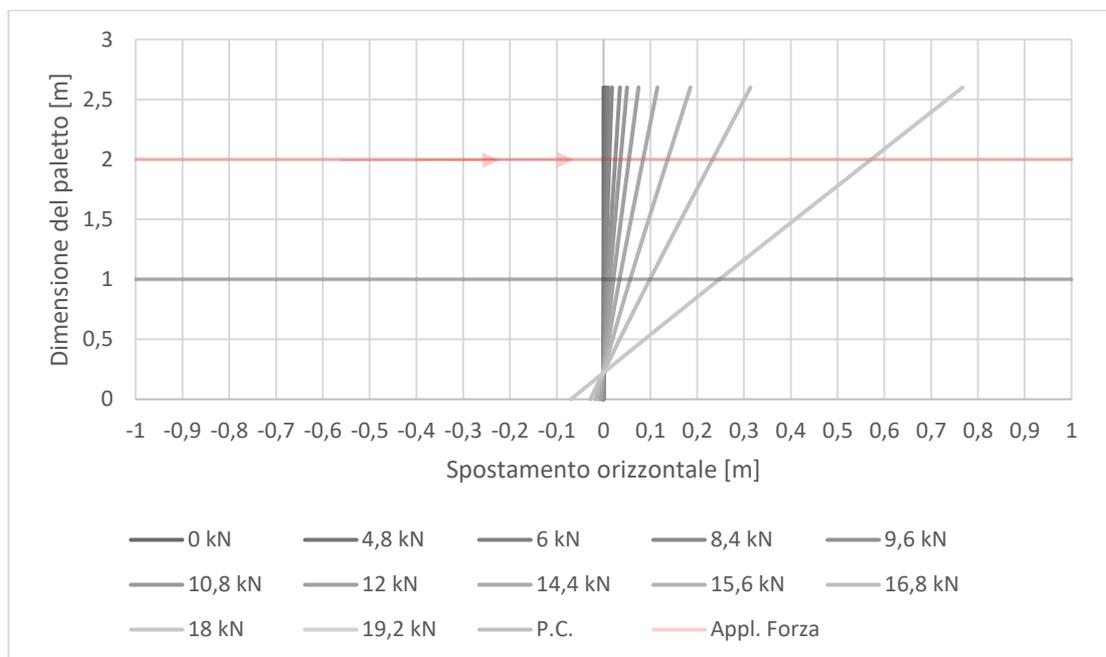


Figura 49: Evoluzione degli Spostamenti orizzontali dati dallo spostamento del paletto in funzione della forza applicata (Prova 2)

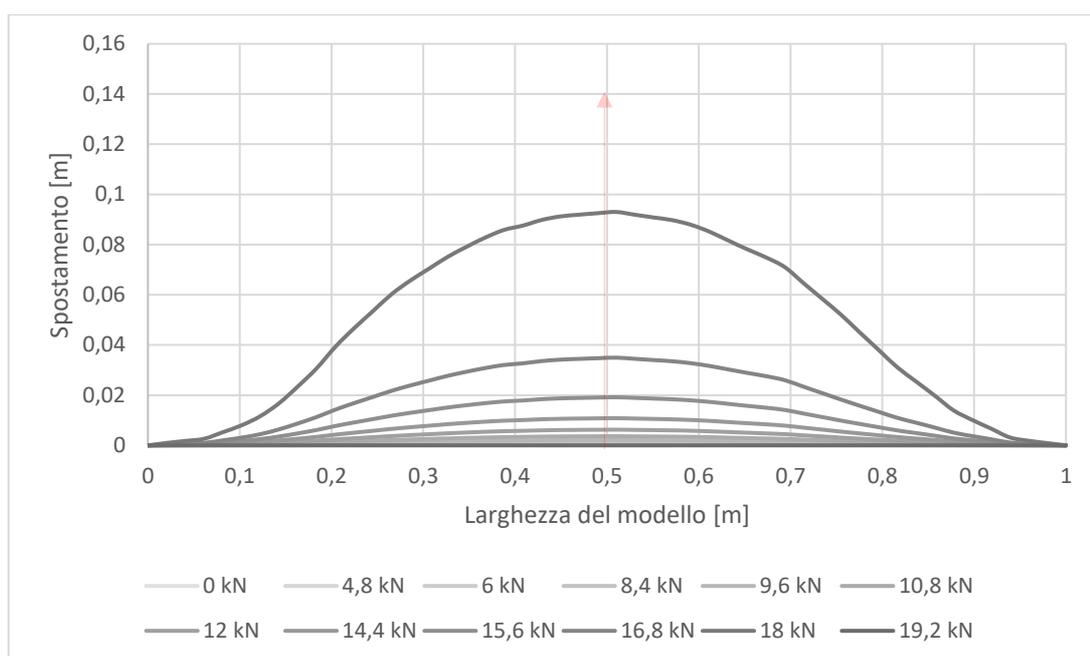


Figura 50: Evoluzione degli Spostamenti del terreno nella direzione di applicazione della forza (Prova 2)

Si osserva dal grafico (Figura 51), un confronto tra le due prove svolte in Sito rappresentate da due pallini (rosso per la Prova 1 e verde per la Prova 2) e le medesime replicate mediante il modello FEM (RS3) dove grazie all'incremento di forza si è potuto ricostruire il grafico. La Prova 1 tra il reale e il modello in termini di forza-spostamento ultimo si può considerare corretto in quanto il modello è stato realizzato proprio per raggiungere il risultato finale (pallino rosso), viceversa per la Prova 2 l'incremento di carico porta ad ottenere uno spostamento del paletto del tutto diverso dalla configurazione finale di prova in sito (pallino verde). I fattori caratterizzanti questo parziale insuccesso in termini di risposta finale sono legati principalmente alla modellazione della mesh, in quanto cambiandola i risultati che si ottengono raggiungono valori differenti senza però ottenere una giusta congruenza con il modello 1.

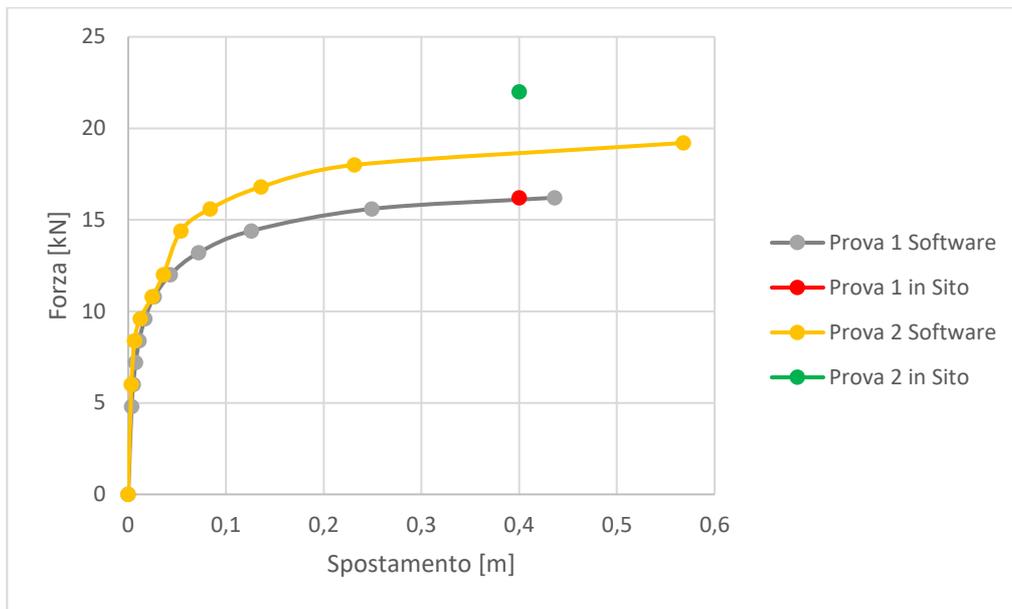


Figura 51: Confronto tra prove in Sito e Software

## CONCLUSIONI

Giunti alla fine di questo lavoro di tesi possiamo trarre delle conclusioni riguardanti i temi affrontati nei vari capitoli.

Il primo macrotema affrontato all'interno della tesi è stato quello di descrivere ed analizzare approfonditamente tutto ciò che riguarda il rapporto tecnico UNI/TR 11785 utile allo sviluppo del progetto riguardante le barriere laterali poste sul bordo del rilevato stradale. Dallo studio effettuato su tale rapporto tecnico si è dedotto che esso costituisce una base di partenza in termini di sicurezza stradale, in particolare per la protezione degli occupanti dei veicoli. Tuttavia, presenta alcune peculiarità riguardo all'esecuzione delle prove e ai risultati necessari per garantire la corretta conformità della barriera. Per questo motivo, gli Enti produttori di barriere, facendo riferimento al rapporto tecnico, hanno sviluppato delle linee guida (quasi-statica e dinamica) che oggi vengono impiegate per stabilire la corretta installazione del paletto. La prova quasi-statica prevede una prima fase di test in campo prova e, sulla base dei risultati ottenuti, vengono successivamente effettuate le prove in sito (caratterizzazione del terreno e caratterizzazione dell'insieme paletto-terreno). La prova dinamica, invece, viene eseguita direttamente sul paletto da installare, prima in campo prova e poi in sito. I vantaggi di queste prove riguardano la semplicità di esecuzione, poiché si tratta di prove speditive. Di contro, la prova quasi-statica comporta costi elevati, in quanto richiede l'esecuzione di numerose prove prima di definire la soluzione ottimale per l'installazione della barriera corretta.

Il secondo macrotema ha riguardato lo sviluppo di un modello agli elementi finiti con il fine di ridurre al minimo la necessità di eseguire test in sito in modo da ottimizzarne i costi di esecuzione delle prove, valutando in particolare se

## Conclusioni

---

l'infissione standard sia adeguata a sostenere l'applicazione di una forza o se sia necessario aumentarne la profondità o di prevedere la realizzazione di cordoli in cemento.

Sulla base di quanto detto, sono stati realizzati due modelli tenendo conto dei risultati finali ottenuti in Sito mediante le prove push. Il primo è stato sviluppato riproducendo in modo dettagliato la geometria e i parametri del terreno, al fine di ottenere risultati che corrispondessero a quelli ottenuti dalle prove in Sito. Il secondo test è stato progettato con l'intento di effettuare una prima verifica di comparabilità con riferimento al primo, con l'obiettivo di stabilire una base di partenza per l'esecuzione delle prove mediante lo sviluppo del Software, così da poterne eseguire un numero maggiore per validare il sistema.

Tuttavia, i risultati ottenuti dal secondo test non sono stati del tutto affidabili, in quanto gli esiti numerici non sono risultati simili a quelli ottenuti in Sito.

Tale discrepanza è dovuta al fatto che i modelli sono stati sviluppati con un software ad uso geotecnico, il che ha comportato difficoltà nell'attribuzione dei corretti parametri al terreno, di fatto i valori adottati per il criterio di rottura sono stati assunti secondo riferimenti bibliografici. Ulteriori problemi riscontrati sono stati in termini di definizione del modello e le impostazioni della mesh, portando così in molteplici combinazioni la non-convergenza dei risultati.

Nonostante le difficoltà riscontrate, il lavoro svolto rappresenta un primo passo verso la modifica delle prove in sito, aprendo la strada a futuri studi che possano migliorarne l'affidabilità della simulazione numerica nella progettazione delle barriere di sicurezza.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *Incidenti stradali*, ISTAT Istituto Nazionale di Statistica, 2024.
- [2] *UNI/TR 11785, Documento tecnico di supporto per la redazione del manuale per l'utilizzo e l'installazione dei dispositivi di ritenuta stradali su rilevato*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2020.
- [3] *UNI EN 1317, Barriere di sicurezza stradali*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione UNI, Milano.
- [4] *Legge n.181 del 21/04/1962*, La Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- [5] *D.M. n. 223 del 18/2/1992, Regolamento recante istruzioni tecniche per la progettazione*, Ministero dei Lavori Pubblici.
- [6] *D.M. del 3/6/1998, Ulteriore aggiornamento delle istruzioni tecniche per la progettazione*, Ministero dei Lavori Pubblici.
- [7] *D.M. n. 2367 del 21/6/2004, Aggiornamento delle istruzioni tecniche per la progettazione*, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.
- [8] *UNI EN 1317-1, Terminologia e criteri generali per i metodi di prova*, Ente Italiano di Normazione UNI, 2010.
- [9] *UNI EN 1317-2, Classi di prestazione, criteri di accettazione delle prove d'urto e metodi di prova per le barriere di sicurezza inclusi i parapetti veicolari*, Ente Italiano di Normazione UNI, 2010.

## Bibliografia

---

- [10] *UNI EN 1317-5, Requisiti di prodotto e valutazione di conformità per sistemi di trattenimento veicoli*, Ente Italiano di Normazione UNI, 2012.
- [11] *ASTM D6951/D6951M-18, Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*.
- [12] *RS3, 3D Finite Element Software For Advanced Analysis*, Rocscience.
- [13] *UX114, Linea guida per la validazione del corretto funzionamento delle barriere di sicurezza installate sul bordo dei rilevati stradali*, Unione Nazionale delle Industrie delle Costruzioni Metalliche dell'Involucro e dei serramenti UNICMI.
- [14] *COMITATO TECNICO 1.6 - Laboratori di Prova, Linee Guida per la verifica in sito dell'interazione palo/terreno di barriere di sicurezza stradali a nastri e paletti, mediante prove dinamiche con il metodo della "Capacità di Dissipazione dell'Energia"*, Comitato Nazionale Italiano PIARC ITALIA, 2020 - 2023.
- [15] *BibLus*, <https://biblus.acca.it/analisi-fem/>.

## **RINGRAZIAMENTI**

Ringrazio il Professore Giuseppe Chiappinelli per avermi guidato alla fine di questo percorso aiutandomi grazie ai suoi insegnamenti alla realizzazione dell'elaborato. Ringrazio l'Ing. Giorgia Rizzo, per il supporto costante e le continue dritte sulla stesura della tesi.