

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile

Modellazione numerica per la valutazione dell'idoneità del bordo
rilevato per l'installazione di dispositivi di ritenuta

TESI MAGISTRALE



Relatore

Prof. Giuseppe Chiappinelli

Studente

Federica Brizio

A.A. 2025/2026

Sommario

Sommario	4
1. Introduzione	9
1.1. Evoluzione storica e programmi internazionali	9
1.2. I tre pilastri della sicurezza stradale	10
1.3. Andamento della sinistrosità in Italia.....	11
1.4. Quadro normativo europeo e nazionale	11
1.5. Obiettivi del presente lavoro di tesi	12
2. Quadro normativo	14
2.1. Tipologie di barriere.....	16
2.2. Classificazione tecnica	17
3. Analisi della norma UNI EN 1317	24
3.1. UNI EN 1317 - Parte 1.....	25
3.1.1. Metodi di prova	25
3.1.2. Strumentazione del veicolo	28
3.1.3. Elaborazione e analisi dei dati	31
3.1.4. Risultati della prova e calcoli	32
3.2. UNI EN 1317 - Parte 2.....	36
3.2.1. Scopo e campo di applicazione	36
3.2.2. Criteri di accettazione delle prove d'urto	41
3.2.3. Metodi di prova	44
3.3. UNI EN 1317 - Parte 3.....	48
3.3.1. Classi di prestazione	48
3.3.2. Metodi di prova	52
3.4. UNI EN 1317 - Parte 4.....	53
3.5. UNI EN 1317 - Parte 5.....	57
3.5.1. Valutazione di conformità	58
3.5.2. Casi di non conformità alle specifiche tecniche.....	60
3.5.3. Installazione dei sistemi di ritenuta stradali	60
3.5.4. Certificazione CE	61
4. Analisi della norma UNI TR 11785	63
4.1. Scopo e campo di applicazione	63
4.2. Installazione delle barriere di sicurezza sul bordo dei rilevati stradali	64
4.3. Effetto della diversità delle proprietà meccaniche del terreno costituenti il supporto	67

4.4.	Effetti della distanza dei paletti dal ciglio della scarpata.....	68
4.4.1.	Effetto sulla resistenza allo spostamento del paletto.....	69
4.4.2.	Effetto sulla stabilità del veicolo	71
4.5.	Prove globali per la valutazione del comportamento paletto-terreno	72
4.5.1.	Tipo di prova da effettuare.....	74
4.5.2.	Velocità di spinta	76
4.5.3.	Tipologie di paletto su cui effettuare la prova	77
4.5.4.	Profondità di infissione	77
4.5.5.	Altezza di prova	78
4.5.6.	Sistema di contatto dell'attrezzatura di prova con il palo	78
4.5.7.	Spostamento a cui terminare la prova	79
4.5.8.	Grandezze da misurare.....	79
4.6.	Prove per la valutazione delle proprietà meccaniche del terreno al variare della profondità	81
4.7.	Confronto tra sito di prove e sito di installazione	83
4.7.1.	Confronto della risposta all'interazione con il palo	83
4.8.	Prove di crash condotte in presenza di scarpata.....	84
4.9.	Possibili modifiche per ottenere in sito la corrispondenza con i crash	86
4.9.1.	Operazioni sul dispositivo.....	86
4.9.2.	Opzioni sul terreno.....	87
4.9.3.	Operazioni miste.....	87
4.10.	Prove quasi statiche e dinamiche	87
4.11.	Linee guida per la validazione delle prove quasi- statiche sulle barriere di sicurezza installate sul bordo dei rilevati stradali (UX114)	89
4.12.	Linee guida per la verifica in sito dell'interazione palo/terreno tramite prove dinamiche su barriere di sicurezza stradali (PIARC ITALIA)	90
4.13.	Confronto tra prove quasi statiche e prove dinamiche.....	99
4.14.	Prova quasi statica – modellazione tramite software numerico	100
5.	Modellazione numerica.....	101
5.1.	Modellazione in RS3.....	102
5.2.	Realizzazione del modello	104
5.3.	Definizione dei parametri iniziali.....	106
5.4.	Proprietà fisico-meccaniche del sistema paletto-terreno.....	106
5.5.	Definizione della forza da assegnare al paletto.....	112
5.6.	Impostazione dei vincoli	114
5.7.	Definizione della mesh di calcolo	116
6.	Analisi delle prove di simulazione.....	120

7.	Analisi dei risultati ottenuti dalla modellazione	125
8.	Conclusioni	135
9.	Bibliografia	138
10.	Appendice A.....	141
11.	Appendice B.....	155
12.	Appendice C.....	166

Abstract

Il lavoro di ricerca sviluppato affronta il tema delle barriere di sicurezza installate sul bordo dei rilevati stradali, nei quali la resistenza del terreno risulta significativamente inferiore rispetto alla zona centrale della carreggiata. L'obiettivo è comprendere e valutare il comportamento del sistema barriera–terreno in un contesto in cui le prestazioni geotecniche possono influenzare in modo determinante l'efficacia del dispositivo di ritenuta.

La tesi si articola in due parti principali. La prima è dedicata al quadro normativo di riferimento, ricostruito attraverso un'analisi dei principali documenti tecnici e delle norme vigenti. In questo percorso viene illustrata l'evoluzione della normativa italiana ed europea fino all'introduzione della UNI EN 1317 e del Rapporto Tecnico UNI/TR 11785, che rappresenta un riferimento operativo fondamentale per l'installazione e la verifica dei dispositivi di ritenuta.

La seconda parte della tesi si concentra invece su un possibile approccio alternativo alle prove sperimentali attualmente richieste. Oggi la verifica della corretta posa del paletto si basa sul confronto tra i risultati delle prove di Push eseguite in sito e quelli ottenuti nel campo prova. Partendo da questa prassi consolidata, il lavoro esplora la possibilità di introdurre una metodologia innovativa che riduca l'impegno di risorse necessario per le prove in sito, valutando se una modellazione tridimensionale del sistema paletto–terreno possa sostituire la prova di Push per la caratterizzazione del terreno.

A tal fine è stato sviluppato un modello numerico agli elementi finiti, per la sua costruzione si è fatto riferimento ai dati geometrici derivanti dalle prove geotecniche disponibili, che hanno consentito di definire con precisione la configurazione del sistema. Utilizzando il software RS3 di Rocscience è stata simulata la risposta forza–spostamento del paletto infisso nel terreno

(profilato HEB120) mediante l'applicazione di incrementi progressivi di carico orizzontale, ricostruendo la curva forza–spostamento e individuando il valore della forza corrispondente al raggiungimento dello spostamento massimo di 40 cm, misurato a 1 m dal piano stradale, corrispondente al livello di infissione del paletto sul rilevato, come previsto dalla normativa per le prove di Push. Dai risultati ottenuti dalle prove di simulazione di carico si è potuto valutare l'affidabilità del modello numerico utilizzato ed effettuare successivamente correlazioni tra la forza di spinta con la posizione e la profondità d'infissione del paletto e le caratteristiche geotecniche degli strati costituenti il terreno bordo rilevato.

1. Introduzione

La sicurezza stradale rappresenta oggi uno degli ambiti più studiati e dibattuti sia a livello tecnico che politico, in quanto strettamente connessa alla tutela della vita umana ed alla riduzione delle conseguenze economiche e sociali derivanti dagli incidenti stradali. Essa può essere definita come il complesso di misure, strategie, norme e strumenti progettati per prevenire sinistri e ridurre la gravità delle conseguenze in caso di urto, con l'obiettivo ultimo di garantire un livello di protezione adeguato a tutti gli utenti della strada, dai conducenti, ai pedoni, fino ai ciclisti.

1.1. Evoluzione storica e programmi internazionali

L'attenzione verso questo tema si è consolidata soprattutto a partire dalla seconda metà del Novecento, quando l'aumento del traffico veicolare e l'espansione delle infrastrutture autostradali hanno comportato un incremento significativo della sinistrosità. Negli anni Ottanta e Novanta, l'Unione Europea e le Nazioni Unite hanno avviato i primi programmi di armonizzazione normativa e di ricerca sulla sicurezza, fissando obiettivi di riduzione progressiva dei decessi.

A livello europeo, un punto di svolta si è avuto con la definizione delle "European Road Safety Action Programmes", piani decennali che hanno stabilito target ambiziosi, come il dimezzamento del numero delle vittime entro il 2010 e, successivamente, ulteriori riduzioni entro il 2020 e il 2030. Questi programmi hanno favorito una stretta collaborazione tra Stati membri, promuovendo campagne di sensibilizzazione e soprattutto l'introduzione di norme tecniche armonizzate che regolassero i requisiti minimi di sicurezza delle infrastrutture e dei dispositivi di ritenuta.

1.2. I tre pilastri della sicurezza stradale

Tradizionalmente, la sicurezza stradale viene analizzata considerando tre macroaree:

1. Le infrastrutture viarie, la cui progettazione e manutenzione influiscono direttamente sulla probabilità di incidenti. Segnaletica ben visibile, illuminazione adeguata, rotatorie agli incroci più pericolosi, marciapiedi e piste ciclabili costituiscono elementi essenziali per garantire una fruizione sicura della rete. In particolare, lungo le strade extraurbane e le autostrade, i dispositivi di ritenuta laterali (barriere e guard-rail) rappresentano una protezione fondamentale contro fuoriuscite di carreggiata, ribaltamenti e cadute da scarpate e viadotti.

2. I veicoli, che negli ultimi decenni hanno beneficiato di una trasformazione radicale grazie ai progressi tecnologici. Oltre agli airbag ed ai sistemi ABS, oggi i veicoli integrano ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) quali la frenata automatica di emergenza, il cruise control adattivo, l'avviso di superamento della corsia e il riconoscimento dei pedoni. Questi strumenti riducono drasticamente i margini di errore umano e aumentano i livelli di sicurezza attiva e passiva.

3. Gli utenti della strada, fattore ancora predominante nell'analisi delle cause di incidente. La formazione dei conducenti, soprattutto giovani e neopatentati, rappresenta un punto chiave. Le principali campagne di sensibilizzazione insistono sull'importanza di rispettare i limiti di velocità, evitare distrazioni (come l'uso del cellulare), rispettare la segnaletica e astenersi dal consumo di alcol o sostanze stupefacenti.

1.3. Andamento della sinistrosità in Italia

In Italia i dati statistici mostrano una tendenza incoraggiante: negli ultimi vent'anni il numero di incidenti, feriti e decessi è diminuito costantemente, anche grazie alle normative introdotte. Tuttavia, le tratte extraurbane e autostradali restano quelle più critiche, a causa delle alte velocità di percorrenza e della ridotta efficacia dei dispositivi di ritenuta in particolari condizioni, come nei tratti in rilevato o lungo i viadotti.

1.4. Quadro normativo europeo e nazionale

Il percorso normativo ha avuto come riferimento principale la norma UNI EN 1317, che costituisce lo standard europeo per la classificazione e la certificazione dei dispositivi di sicurezza stradale. La norma, articolata in più parti, definisce:

- le procedure di esecuzione dei crash test;
- i criteri di accettazione delle prestazioni delle barriere;
- i requisiti necessari per il rilascio della marcatura CE, condizione indispensabile per la loro immissione sul mercato europeo.

L'evoluzione della UNI EN 1317 ha reso possibile, nel 2020, la pubblicazione del rapporto tecnico UNI/TR 11785, dedicato in particolare alla verifica dei dispositivi di ritenuta installati sui rilevati. Questo documento affronta la tematica della prova di spinta ("push test"), cioè l'analisi dell'interazione tra paletto e terreno, aspetto determinante per valutare il corretto funzionamento delle barriere in condizioni reali.

1.5. Obiettivi del presente lavoro di tesi

La prassi costruttiva corrente, basata principalmente sull'infissione dei paletti nel terreno, presenta limiti significativi. Essa tende infatti a trascurare variabili essenziali quali la natura geotecnica del suolo, la variabilità delle condizioni ambientali e le sollecitazioni dinamiche derivanti dagli urti. Questo approccio, seppur diffuso, può compromettere l'efficacia complessiva del sistema di ritenuta.

Dopo un'analisi dell'evoluzione normativa riguardante la sicurezza stradale e quindi i sistemi di ritenuta, verrà utilizzata la modellazione numerica agli elementi finiti (Finite Element Method, FEM) che si presenta come una soluzione innovativa.

La verifica della corretta posa dei paletti delle barriere di sicurezza stradale si basa tradizionalmente sull'esecuzione di prove di Push in situ, una procedura sperimentale che, pur garantendo un controllo diretto del comportamento terreno-struttura, richiede un notevole impiego di risorse e presenta una significativa variabilità legata alle condizioni locali. In questo contesto, il presente lavoro si propone di esplorare la possibilità di affiancare a tali prove una modellazione numerica tridimensionale avanzata, valutando se un approccio agli elementi finiti possa riprodurre in modo affidabile la risposta del sistema paletto-terreno e, in prospettiva, ridurre la dipendenza dalle prove sperimentali. A tal fine sono state analizzate nove prove di DPSH eseguite lungo l'autostrada Asti-Cuneo A33, caratterizzate da una stratigrafia di spessore pari a 1,80 m, suddivisa in strati di 20 cm ciascuno; per ogni strato, le prove DPSH hanno permesso di determinare i valori di rigidezza e resistenza al taglio, fornendo un quadro dettagliato delle proprietà meccaniche del terreno. Sulla base di tali dati è stato sviluppato un modello numerico agli elementi finiti, costruito a partire dai parametri geotecnici e geometrici ricavati dalle indagini disponibili, che hanno consentito di definire con precisione la configurazione del sistema. Utilizzando il software RS3 di

Rocscience è stata simulata la risposta forza–spostamento del paletto infisso nel terreno mediante l'applicazione di incrementi progressivi di carico orizzontale, ricostruendo la curva forza–spostamento e individuando la forza necessaria a raggiungere lo spostamento massimo di 40 cm misurato a 1 m dal piano stradale, come previsto dalla normativa vigente per le prove di Push. Per ciascuna delle nove configurazioni analizzate è stata adottata una geometria specifica, variando in particolare la distanza del paletto dal bordo del rilevato e assumendo una profondità di infissione pari a 1 m, successivamente incrementata a 1,20 m per ulteriori analisi comparative. Le simulazioni hanno permesso di studiare non solo la relazione forza–spostamento, ma anche la deformazione del terreno e l'inclinazione del paletto, riproducendo gli stessi indicatori utilizzati nelle prove sperimentali. Tutte le analisi condotte e le ipotesi formulate trovano conferma nei risultati numerici ottenuti, che costituiscono la base per la valutazione critica del comportamento del sistema e per la validazione del modello. L'obiettivo complessivo della tesi è dunque quello di verificare se una modellazione tridimensionale, opportunamente calibrata sui dati geotecnici reali, possa rappresentare un'alternativa affidabile alle prove di Push, contribuendo a modernizzare le procedure di controllo e a rendere più efficiente la progettazione delle barriere di sicurezza.

2. Quadro normativo

Negli anni '50 e '60, l'Italia vide un rapido incremento della circolazione automobilistica ed al contempo di incidenti stradali. Il crescente numero di questi ultimi evidenzia l'urgenza di adottare una normativa dedicata alla sicurezza stradale, nasce così la legge del 21 aprile 1962, una delle prime normative organiche italiane dedicate espressamente alla sicurezza stradale.

La legge istituiva presso il Ministero dei Lavori Pubblici (oggi Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti) il Comitato Nazionale per la Sicurezza Stradale (CNSS), il cui scopo era coordinare e promuovere tutte le iniziative dirette alla prevenzione degli incidenti stradali.

Il Comitato ha funzioni di:

- studio e analisi delle cause degli incidenti stradali;
- raccolta e classificazione statistica dei dati sugli incidenti;
- proposta di misure legislative o regolamentari per ridurre la sinistrosità;
- promozione di iniziative educative e informative, come campagne di educazione stradale;
- coordinamento tra i vari organi pubblici e privati che si occupano di sicurezza stradale;
- collaborazione con organizzazioni internazionali che trattano la materia.

Il Nuovo Codice della Strada (NCS) del 1992 sostituì il precedente Codice del 1959, aggiornandolo alle nuove esigenze di mobilità, sicurezza e tutela ambientale, ma soprattutto rappresentando la prima legge per la progettazione, validazione ed installazione delle barriere di sicurezza stradali. L'obiettivo principale era ridurre l'incidentalità, armonizzare le norme con quelle europee e modernizzare la segnaletica, i comportamenti e le responsabilità degli utenti della strada.

Esso ha infatti rappresentato la prima revisione organica delle norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade, introducendo criteri chiari per la classificazione delle strade in categorie funzionali, come autostrade, strade extraurbane principali e secondarie, e strade urbane. Questo decreto ha definito parametri geometrici di progetto fondamentali, quali larghezza delle corsie, pendenze, raggi minimi di curvatura e banchine, e ha previsto l'installazione di barriere di sicurezza e dispositivi di ritenuta nei punti critici delle infrastrutture, come curve pericolose, scarpate e ponti, con l'obiettivo generale di contenere i veicoli e ridurre i rischi per gli utenti. Tuttavia, il decreto del 1992 non forniva criteri tecnici dettagliati per la valutazione della severità dell'urto sugli occupanti, limitandosi a prescrizioni di carattere funzionale e geometrico.

Le barriere stradali di sicurezza (spesso chiamate guardrail o dispositivi di ritenuta) sono regolate principalmente da:

- Art. 14 del Codice della Strada (D.Lgs. 285/1992) – *Poteri e compiti degli enti proprietari delle strade*; ogni strada deve avere barriere di sicurezza adeguate, funzionanti e correttamente installate, e l'ente che gestisce la strada deve controllarle e ripararle;
- Art. 30 del Regolamento di esecuzione e attuazione (D.P.R. 495/1992); le barriere di sicurezza devono essere installate nei tratti di strada dove c'è pericolo di uscita di carreggiata o caduta (come ponti, viadotti, scarpate, curve pericolose, spartitraffico centrali), e devono essere omologate, cioè, approvate dal Ministero delle Infrastrutture, dopo aver superato prove d'urto (crash test) che ne certificano l'efficacia;
- Norme tecniche UNI EN 1317 e decreti ministeriali successivi (DM 223/1992, DM 2367/2004, DM 28 giugno 2011).

Le barriere stradali hanno lo scopo di ridurre la gravità delle conseguenze di un'uscita di strada o di una collisione; pertanto, non servono ad impedire del tutto l'incidente, ma a contenere il veicolo, assorbire l'urto e indirizzarlo in modo controllato, evitando cadute da scarpate, attraversamenti di carreggiata

o impatti contro ostacoli pericolosi.

Funzioni principali:

- trattenere il veicolo e impedirne la fuoriuscita dalla sede stradale;
- assorbire l'energia d'urto limitando i danni a persone e cose;
- evitare collisioni frontali o attraversamenti del traffico opposto;
- proteggere i pedoni, ciclisti e infrastrutture (ponti, pali, edifici).

2.1. Tipologie di barriere

Le barriere vengono classificate in base:

- al materiale:

1. Barriere metalliche

- o Le più diffuse (in acciaio zincato o corten).
- o Spesso del tipo a tripla onda o a nastro continuo.
- o Offrono una buona capacità di deformazione controllata.

2. Barriere in calcestruzzo

- o Molto usate in autostrada (tipo New Jersey).
- o Resistenti, poco deformabili, adatte a corsie centrali o zone di forte traffico.

3. Barriere miste o integrate

- o Combinano acciaio e calcestruzzo per ottimizzare resistenza e flessibilità.

4. Barriere "salvamotociclisti"

- o Integrano pannelli o protezioni inferiori per evitare che il motociclista urti i pali o venga intrappolato sotto il guardrail.
- o Introdotte per ridurre la mortalità dei motociclisti.

- alla funzione:

1. barriere centrali da spartitraffico;

2. barriere per bordo stradale, in rilevato o scavo;

3. barriere per opere d'arte (ponti);

4. barriere per punti singolari (terminali).

2.2. Classificazione tecnica

Le barriere sono certificate dalla norma europea UNI EN 1317 che stabilisce:

- livello di contenimento (H1, H2, H3, H4, ecc.): misura la capacità della barriera di trattenere veicoli di diversa massa e velocità;
- larghezza di lavoro (W): spazio necessario alla deformazione della barriera durante l'urto;
- severità d'urto (A, B, C): livello di decelerazione percepita dagli occupanti del veicolo (A = più sicuro);
- ogni barriera deve superare prove d'urto reali (crash test) per ottenere l'omologazione.

Successivamente, il D.M. 19 aprile 1998 ha aggiornato e integrato le disposizioni del Codice della Strada del 1992, fornendo indicazioni più precise per la progettazione geometrica delle strade e delle opere di sicurezza. In particolare, il decreto del 1998 ha definito in modo più dettagliato i parametri geometrici delle infrastrutture, ponendo maggiore attenzione alla sicurezza dei veicoli e dei pedoni nelle intersezioni, nei raccordi e nei tratti critici della rete viaria. Sono state inoltre specificate modalità operative per la progettazione e il posizionamento delle barriere e dei parapetti, in relazione al tipo di traffico e alla categoria funzionale della strada.

Il successivo D.M. 21 giugno 2004 ha aggiornato e sostituito le indicazioni dei decreti del 1992 e del 1998, introducendo riferimenti espliciti alle norme europee UNI EN 1317, con l'obiettivo di armonizzare la normativa nazionale agli standard europei di sicurezza stradale. Il decreto ha reso obbligatoria l'applicazione della UNI EN 1317 per l'omologazione e l'installazione dei dispositivi di ritenuta, recependo così anche i criteri di valutazione della sicurezza degli occupanti già definiti nella norma del 1998, basati sugli indici ASI (Acceleration Severity Index), THIV (Theoretical Head Impact Velocity) e PHD (Post-impact Head Deceleration). Questi parametri, già previsti dalle norme tecniche europee, sono divenuti con il D.M. 2004 requisiti obbligatori

per la classificazione delle barriere in funzione della severità dell'impatto e della protezione degli occupanti.

Vengono quindi definiti:

- 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:

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

In cui:

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

In funzione dell'indice di severità (I_s), le barriere stradali vengono classificate come indicato nella tabella sottostante. La scelta della tipologia di barriera dipende da diversi fattori:

- destinazione della strada (autostrada, strada extraurbana principale, strada urbana, ecc.);
- caratteristiche geometriche della strada (curvatura, pendenze, larghezza delle corsie);
- tipo e volume di traffico previsto.

CLASSE	INDICE DI SEVERITA'
A1	5 - 15 kN·m
A2	15 - 50 kN·m
A3	50 - 150 kN·m
B1	150 - 300 kN·m
B2	300 - 600kN·m
B3	600 - 1000 kN·m

Tabella 1 Valori dell'indice di severità per le diverse classi

Per quanto sopra esposto vengono in seguito riportate le tabelle relative alla destinazione della strada e al volume di traffico previsto:

TIPO DI STRADA	TIPO DI TRAFFICO	CLASSE
STRADA EXTRAURBANA TIPO B,C...	I	A1
	II	A3
	III	B1
STRADA URBANA DI SCORRIMENTO ED EXTRAURBANA A TIPO V, VI, A...	I	A2
	II	B1
	III	B2
STRADA URBANA PRIMARIA	I	A2
	II	B2
	III	B3
STRADA EXTRAURBANA TIPO I, II, III, IV	I	A3
	II	B2
	III	B3

Tabella 2 Classi minime di barriera (D.M. 223/1992)

TRAFFICO	DESCRIZIONE
TIPO I	veicoli > 30 KN: < 5% del totale
TIPO II	veicoli > 30 KN: 5-10% del totale
TIPO III	veicoli > 30 KN: >10% del totale

Tabella 3 Tipi di traffico (D.M. 223/1992)

1. indice di “Severità dell’Accelerazione ASI”, è un indice che misura la severità dell’impatto percepita dagli occupanti del veicolo durante la collisione contro una barriera di sicurezza. È un parametro adimensionale derivato dall’accelerazione del centro di gravità del veicolo in tre direzioni ortogonali (longitudinale, trasversale e verticale). L’indice di “Severità dell’Accelerazione ASI” viene espresso dalla seguente formulazione:

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

- g: accelerazione di gravità [m/s²]

- $\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z$ sono le componenti dell'accelerazione misurate in un punto P vicino al baricentro del veicolo con un intervallo mobile di 50ms.

In riferimento all'indice ASI (Acceleration Severity Index), tutte le barriere di sicurezza e i dispositivi di ritenuta devono garantire un valore non superiore a 1, determinato in condizioni di impatto con veicolo di categoria autovettura.

2. livello di contenimento: rappresenta la misura della resistenza e della capacità di contenimento di una barriera durante un impatto. Il livello di contenimento grazie al quale vengono classificate le barriere in funzione della resistenza viene espresso dalla seguente formulazione:

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

In cui:

- M: massa del veicolo [ton]
- v: velocità d'impatto [m/s]
- φ : angolo d'impatto

Classe	Massa [t]	Velocità [km/h]	ϕ [°]	Livello di contenimento [kJ]
N1	1,5	80	20	44
N2	1,5	110	20	82
H1	10	70	15	127
H2	13	70	20	288
H3	16	80	20	463
H4	30	65	20	572

Tabella 4 Classificazione delle barriere (D.M. 223/1992)

3. Indice di velocità teorica della testa (THIV – Theoretical Head Impact Velocity), che rappresenta la velocità teorica con cui la testa di un occupante colpisce l'interno dell'abitacolo durante un urto contro una barriera stradale. Esso non misura direttamente il danno, ma fornisce un parametro predittivo della gravità dell'impatto sugli occupanti, espresso in km/h e viene calcolato sulla base della decelerazione del veicolo e del movimento relativo della testa

durante l'urto. Il THIV deve essere ≤ 33 km/h per essere considerato sicuro per occupanti di autovettura, altrimenti la barriera può contenere il veicolo, ma l'impatto interno può risultare pericoloso per gli occupanti.

4. Indice di decelerazione della testa dopo l'impatto (PHD), misura la decelerazione massima subita dalla testa di un occupante dopo l'impatto interno con l'abitacolo durante una collisione contro una barriera di sicurezza. Valuta il rischio di lesioni alla testa e permette di confrontare diverse barriere o dispositivi di ritenuta in termini di protezione degli occupanti, è espresso in g (accelerazioni gravitazionali). Funziona in combinazione con ASI e THIV, ma si concentra specificamente sulla decelerazione della testa, non sul veicolo nel suo insieme. Il PHD deve essere ≤ 20 g per essere considerato sicuro per gli occupanti di un'autovettura, altrimenti può essere considerato eccessivamente severo per la testa, anche se la barriera trattiene il veicolo.

Viene inoltre definito in modo preciso l'uso delle barriere di sicurezza, dei terminali e degli attenuatori d'urto, prevedendo che la loro scelta sia coerente con la tipologia di traffico, la categoria della strada e i valori di prestazione definiti dalle norme EN 1317. Essi vengono definiti come:

- terminali: *“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”*;
- attenuatori d'urto: possiedono *“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 nella tabella sottostante:

CLASSE	LIVELLO DI CONTENIMENTO [KJ]
TC1	320
TC2	500

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

I livelli di traffico sono classificati in relazione a:

- volume di traffico;
- mezzi che lo compongono.

TRAFFICO	DESCRIZIONE
TIPO I	TGM $\leq$ 1000 o TGM $>$ 1000 con presenza di veicoli di massa superiore a 3000 kg $\leq$ 5% del totale
TIPO II	TGM $>$ 1000 con presenza del 5-15% di veicoli di massa superiore a 3000 kg
TIPO III	TGM $>$ 1000 con presenza maggiore del 15% di veicoli di massa superiore a 3000 kg

Tabella 6 Tipi di traffico (D.M. 253/1998)

L'analisi delle classificazioni delle barriere di sicurezza e degli attenuatori d'urto, in relazione alle diverse tipologie di traffico, consente di individuare la soluzione più idonea per ciascuna categoria stradale, come indicato nella tabella sottostante.

TIPO DI STRADE	TRAFFICO	DESTINAZIONE BARRIERE			
		Barriere spartitraffico	Barriere laterale	bordo bordo	Attenuatori
AUTOSTRADE E STRADE EXTRAURBANE PRINCIPALI	I	H2	H1	H2	TC1- TC2
	II	H3	H2	H3	
	III	H3 - H4	H2 - H3	H4	
STRADE EXTRAURBANE SECONDARIE E STRADE URBANE DI SCORRIMENTO	I	H1	N2	H2	
	II	H2	H1	H2	
	III	H2	H2	H3	
STRADE URBANE DI QUARTIERE E STRADE LOCALI	I	N2	N1	H2	
	II	H1	N2	H2	
	III	H1	H1	H2	

Tabella 7 Classi minime di barriera

Il Regolamento (UE) 305/2011 ha introdotto requisiti vincolanti per tutti i dispositivi di ritenuta stradale installati sulle infrastrutture viarie dell'Unione Europea, stabilendo che, a partire dal 1° gennaio 2011, tali sistemi devono

essere dotati di marcatura CE conforme alla norma europea armonizzata EN 1317. La marcatura CE certifica che il dispositivo soddisfa le prestazioni dichiarate dal produttore, e deve essere rilasciata da un organismo notificato, accompagnata dalla dichiarazione di conformità fornita dal produttore o dal suo rappresentante autorizzato. Tale sistema di certificazione garantisce che i prodotti siano conformi a standard uniformi, consentendo una valutazione oggettiva della loro efficacia e sicurezza.

Le istruzioni tecniche per l'uso e l'installazione dei dispositivi di ritenuta sono state aggiornate, prevedendo l'esecuzione di controlli specifici sia in fase di accettazione dei prodotti sia durante la loro installazione. Tali verifiche comprendono, tra l'altro, l'accertamento della corretta posa in opera, la conformità alle caratteristiche geometriche e strutturali della sede stradale e la capacità del dispositivo di mantenere le prestazioni dichiarate in caso di urto. Fino all'entrata in vigore completa di queste nuove disposizioni, continuano a essere applicabili le linee guida contenute nel D.M. 21 giugno 2004, che già recepiva le norme europee EN 1317 e forniva criteri definiti per la classificazione, la prova e la verifica dei dispositivi di ritenuta, garantendo un quadro normativo coerente per la progettazione e l'installazione sicura delle barriere stradali.

Viene infine emanata nel 2019 dall'Ente Italiano di Normazione (UNI) la UNI/TR 11785, un rapporto tecnico il cui obiettivo è fornire linee guida operative per l'applicazione corretta della norma UNI EN 1317, che disciplina le prove e le prestazioni dei dispositivi di ritenuta stradali. In particolare, la UNI/TR 11785 aiuta i progettisti e i gestori delle infrastrutture a scegliere, installare e mantenere le barriere di sicurezza in funzione del tipo di strada, del traffico e del livello di rischio, garantendo così una maggiore uniformità e coerenza nell'attuazione degli standard europei di sicurezza stradale.

3. Analisi della norma UNI EN 1317

La norma UNI EN 1317 rappresenta il principale riferimento tecnico europeo per la progettazione, la classificazione e la valutazione delle prestazioni dei sistemi di ritenuta stradali. Essa nasce dall'esigenza di garantire un livello uniforme di sicurezza sulle infrastrutture viarie, fornendo criteri oggettivi per la verifica dell'efficacia di dispositivi quali barriere di sicurezza, attenuatori d'urto, terminali e transizioni.

Il documento si articola in diverse parti, ciascuna dedicata ad una tipologia di sistema, e stabilisce parametri di prova basati su crash test standardizzati. In tal modo, la norma consente di valutare non solo la capacità di contenimento dei veicoli in caso di impatto, ma anche gli effetti sull'occupante e sulla stabilità del mezzo; perciò, da un lato si tutela l'integrità delle infrastrutture e degli utenti terzi, dall'altro si riduce il rischio di conseguenze gravi per gli occupanti del veicolo coinvolto.

La UNI EN 1317 si colloca all'interno del quadro normativo europeo armonizzato, costituendo la base per la marcatura CE dei sistemi di ritenuta. La sua applicazione è di fondamentale importanza per ingegneri, progettisti e gestori delle infrastrutture, poiché garantisce che i dispositivi installati rispondano a requisiti di sicurezza verificabili e comparabili a livello internazionale.

Le parti che compongono la norma sono:

- UNI EN 1317-1 (2010) *Terminologia e criteri generali per i metodi di prova*. Definisce i concetti base e i criteri generali per la valutazione delle prestazioni dei sistemi di ritenuta stradali.
- UNI EN 1317-2 (2010) *Classi di prestazione, criteri di accettazione delle prove d'urto e metodi di prova per le barriere di sicurezza, inclusi i parapetti veicolari*. È la parte più utilizzata per classificare le barriere in base al livello di contenimento (es. H1, H2, H3).

- UNI EN 1317-3 (2010) *Classi di prestazione, criteri di accettazione e metodi di prova per attenuatori d'urto*. Regola i dispositivi che riducono l'energia dell'impatto, come i crash cushion.
- UNI ENV 1317-4 (2003) *Classi di prestazione, criteri di accettazione e metodi di prova per terminali e transizioni*. Si occupa delle estremità delle barriere e delle transizioni tra diversi sistemi di ritenuta.
- UNI EN 1317-5 (2012) *Requisiti di prodotto e valutazione di conformità per i sistemi di ritenuta stradali*. È la parte armonizzata che consente la marcatura CE dei dispositivi.

3.1. UNI EN 1317 - Parte 1.

3.1.1. Metodi di prova

Sito di prova

La norma stabilisce i criteri per valutare le prestazioni dei sistemi di ritenuta stradali sottoposti a urto e i relativi livelli di severità. Comprende le informazioni necessarie sul luogo di prova, le definizioni dei diversi sistemi di ritenuta, le caratteristiche dei veicoli impiegati (compresi i requisiti di carico), la strumentazione da utilizzare, le procedure di calcolo e i metodi di registrazione dei dati. Tra i parametri considerati rientrano anche i livelli di severità dell'urto e l'indice di deformazione dell'abitacolo (VCDI).

L'area di avvicinamento e il box di uscita devono essere sostanzialmente piani, con una pendenza non superiore al 2,5%, e presentare una superficie regolare, pulita e priva di elementi che possano interferire con la prova, come polvere, detriti, acqua stagnante, ghiaccio o neve. Devono inoltre avere dimensioni adeguate a consentire al veicolo di raggiungere la velocità richiesta e mantenere una traiettoria stabile sia in avvicinamento sia in uscita dal sistema di ritenuta.

Nel rapporto di prova devono essere documentati l'area di prova, il dispositivo testato, la posizione delle telecamere, la traiettoria del veicolo, il punto d'impatto e la localizzazione di eventuali parti dell'oggetto di prova, di peso superiore a due chilogrammi, che si siano staccate durante l'urto. È inoltre necessario adottare misure per limitare la formazione di polvere, così da evitare che le riprese fotografiche o video risultino compromesse.

Le prove devono essere condotte nel pieno rispetto delle specifiche previste, con l'obiettivo di dimostrare che il dispositivo di contenimento sia effettivamente in grado di arrestare e reindirizzare il veicolo, prevenendo il superamento della barriera e riducendo al minimo i rischi per gli occupanti.

Veicoli di prova

I veicoli utilizzati nei test devono essere modelli di serie e, per quelli con massa fino a 1500 kg, devono riflettere le reali condizioni del traffico europeo. Tutti i mezzi impiegati nelle prove d'urto devono rispettare le caratteristiche dimensionali e prestazionali indicate nella tabella di riferimento, così da garantire la rappresentatività del campione.

Gli pneumatici devono essere gonfiati alle pressioni prescritte dal costruttore e, insieme a sospensioni, carrozzeria e allineamento delle ruote, devono soddisfare i requisiti necessari per l'idoneità alla circolazione. Riparazioni o modifiche non sono ammesse, poiché potrebbero alterare il comportamento del veicolo; qualora risultino indispensabili, devono essere eseguite nel pieno rispetto delle specifiche originali.

Il veicolo deve essere accuratamente pulito, perché la presenza di polvere o particelle sollevate al momento dell'urto può compromettere la qualità delle registrazioni e, di conseguenza, l'affidabilità dei risultati. Durante le prove, tutti i sistemi di sicurezza elettronici devono essere disattivati o rimossi.

Tutti i liquidi funzionali quali carburante, olio motore, liquido di raffreddamento e altri fluidi operativi, devono essere presenti e contribuire alla massa inerziale di prova, così da riprodurre condizioni di utilizzo realistiche.

Eventuali zavorre necessarie per raggiungere la massa richiesta devono essere fissate in modo stabile e sicuro, seguendo scrupolosamente le indicazioni del costruttore. È fondamentale garantire una distribuzione corretta del peso, sia in senso orizzontale sia verticale, perché un bilanciamento non adeguato può modificare il comportamento dinamico del veicolo e influenzare l'esito della prova.

I pesi di zavorra non devono essere collocati in punti che possano interferire con la sicurezza strutturale del veicolo, in particolare, è necessario evitare che influenzino la deformazione programmata della carrozzeria o l'integrità dell'abitacolo in caso di impatto, così da non alterare il comportamento del mezzo in condizioni critiche.

MASSA 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 ^{a)}	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 ^{b)}	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
DIMENSIONI 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
POSIZIONE DEL CENTRO DI MASSA ^{c,d)} 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
TIPO DI VEICOLO	Automobile	Automobile	Automobile	Autocarro rigido	Autobus	Autocarro rigido	Autocarro rigido	Autocarro articolato
Numero di assi ^{e)}	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								

Specifiche del veicolo

3.1.2. Strumentazione del veicolo

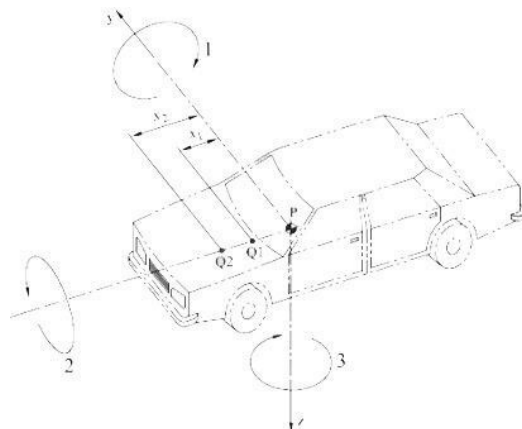
Strumentazione del veicolo richiesta per il calcolo di ASI e THIV

Il veicolo utilizzato nei test viene equipaggiato di accelerometri al fine di poter calcolare gli indici ASI (Acceleration Severity Index) e THIV (Theoretical Head Impact Velocity). In particolare, ne vengono installati tre, uno per ogni direzione:

- longitudinale (in avanti);
- laterale (verso i lati);
- verticale (verso il basso).

Un trasduttore per la misura della velocità angolare può essere aggiunto, se necessario. Gli accelerometri vengono installati in un unico punto, indicato come punto P, posizionato sul tunnel centrale del veicolo, in corrispondenza della proiezione verticale del centro di massa del veicolo non deformato.

In pratica, però, la struttura del mezzo può impedire un allineamento perfetto, infatti il gruppo sensori può trovarsi anche oltre 70 mm distante dal centro di massa. Questo scostamento introduce differenze tra le accelerazioni registrate e quelle effettivamente presenti nel centro di massa, a causa dei momenti angolari che si generano. Per correggere questo effetto, viene montato un secondo gruppo di accelerometri lungo l'asse longitudinale del veicolo.



Posizionamento dell'accelerometro

La corretta acquisizione e gestione dei dati sperimentali è essenziale per garantire l'affidabilità e la validità delle analisi, perciò, tutti gli strumenti coinvolti, inclusi trasduttori, filtri e canali di registrazione, devono rispettare precisi requisiti tecnici. In particolare, il rispetto della frequenza di campionamento, della qualità del filtraggio e dell'ampiezza del segnale acquisito assicura che la raccolta dei dati avvenga secondo gli standard tecnici previsti e consente di ottenere risultati coerenti e riproducibili.

Requisiti di frequenza

La strumentazione impiegata nelle prove di impatto deve rispettare con precisione le classi di frequenza previste dalla normativa. In particolare, i canali dedicati alla misura dell'accelerazione e della velocità angolare devono operare in classe CFC_180, mentre i dati filtrati a CFC_60 possono essere utilizzati per rappresentare graficamente l'andamento delle accelerazioni. Tutti gli strumenti devono inoltre essere conformi alla norma ISO 6487, che garantisce uniformità e confrontabilità dei risultati a livello internazionale.

La raccolta dei dati deve avvenire con una frequenza di campionamento non inferiore a 2 kHz, così da ottenere un segnale sufficientemente dettagliato e preservare tutte le informazioni utili nelle successive fasi di analisi e filtraggio.

Il trattamento dei segnali prevede l'uso di filtri ricorsivi di tipo Butterworth, che permettono di pulire il segnale in modo efficace. Questi filtri, però, introducono transitori all'inizio e alla fine della registrazione: per questo motivo è necessario acquisire circa 500 millisecondi aggiuntivi all'inizio e alla fine dei dati, che verranno poi eliminati dopo il filtraggio per garantire la stabilità del segnale analizzato.

Oltre alla frequenza di campionamento e alla classe del filtro, è fondamentale definire la classe di ampiezza del canale (CAC) per ogni accelerometro e per il trasduttore di velocità angolare. Una scelta corretta del CAC evita fenomeni di clipping e assicura che i valori massimi registrati rimangano entro il fondo scala dello strumento, riducendo anche gli effetti della quantizzazione durante

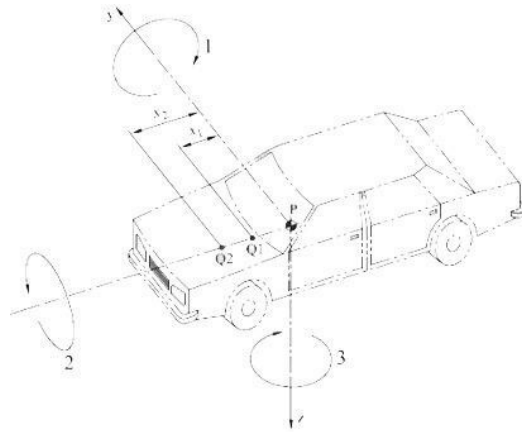
la digitalizzazione. I valori di CAC adottati devono essere riportati con precisione nel rapporto di prova, sulla base di una verifica preliminare dei dati raccolti.

Durante le prove di impatto è inoltre essenziale identificare con precisione gli istanti chiave. Per questo si utilizza un indicatore di eventi, che permette di segnare in modo inequivocabile il momento in cui il veicolo entra in contatto con il sistema di ritenuta. Questo riferimento temporale facilita l'interpretazione dei dati e garantisce un corretto allineamento tra tutte le misurazioni.

Compensazione dello spostamento della strumentazione al centro di massa del veicolo

Le accelerazioni del veicolo rappresentano la base per il calcolo di parametri come ASI, THIV e il modello di spazio libero (flail space). Per ottenere misure affidabili, il gruppo di accelerometri deve essere installato il più vicino possibile al centro di massa del veicolo. La normativa indica limiti ben precisi: lo scostamento non deve superare 70 mm lungo l'asse longitudinale e 40 mm lungo quello laterale. In pratica, però, la struttura del veicolo può impedire di rispettare queste distanze, costringendo a posizionare i sensori più lontano. In tali condizioni, le accelerazioni misurate possono differire da quelle effettive nel centro di massa, a causa dei momenti angolari che si generano.

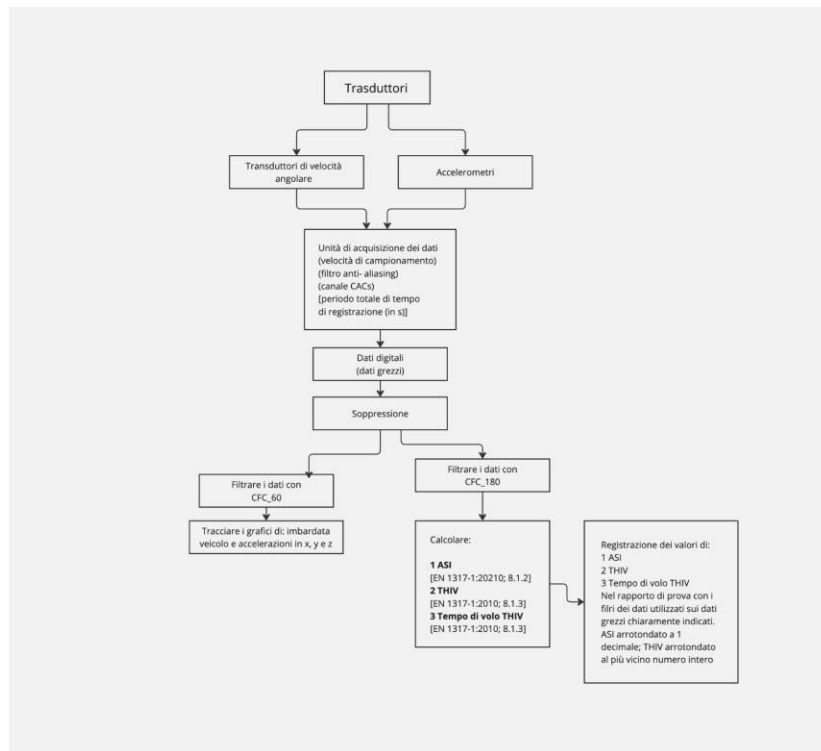
Per ridurre queste discrepanze, si ricorre spesso all'installazione di un secondo gruppo di accelerometri triassiali lungo l'asse longitudinale del veicolo. Questa configurazione, rappresentata nella figura sottostante, consente di compensare gli effetti di un posizionamento non ideale e di migliorare la qualità complessiva dei dati raccolti.



Posizionamento dell'accelerometro

3.1.3. Elaborazione e analisi dei dati

I dati della prova registrati utilizzando la strumentazione prescritta precedentemente devono essere elaborati utilizzando i procedimenti riportati nella figura sottostante.



Processo di elaborazione dei dati

3.1.4. Risultati della prova e calcoli

Riepilogo della procedura di calcolo dell'ASI

Il calcolo dell'ASI si sviluppa attraverso le seguenti fasi operative:

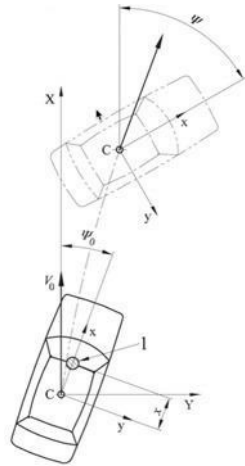
- registrazione delle misure delle tre componenti di accelerazione del veicolo utilizzando la strumentazione prescritta;
- filtraggio dei dati con il filtro digitale Butterworth quadripolare a fase nulla;
- calcolo dell'ASI come una funzione del tempo;
- determinazione dell'ASI come il massimo della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

Procedimento per il calcolo della THIV

La velocità teorica d'urto della testa è un parametro utilizzato per stimare la severità dell'impatto che può interessare l'occupante di un veicolo durante una collisione con un sistema di ritenuta stradale. In questo modello, l'occupante viene trattato come un corpo libero: quando il veicolo subisce una brusca variazione di velocità a causa dell'urto con la barriera, la testa continua il proprio moto fino a colpire una superficie interna dell'abitacolo. La velocità teorica con cui avviene questo impatto viene assunta come indicatore della gravità dell'evento e, di conseguenza, della severità delle possibili lesioni.

All'inizio del contatto tra veicolo e sistema di ritenuta si considera che il veicolo e la testa dell'occupante abbiano la stessa velocità orizzontale V_0 , poiché il moto del veicolo è trattato come una traslazione pura.

Durante l'impatto si assume inoltre che il veicolo si muova su un piano orizzontale: per questo motivo, effetti come beccheggio, rollio o movimenti verticali non vengono presi in considerazione, a meno che non si verifichi un ribaltamento. In tale circostanza la prova non può essere considerata valida. Non è necessario includere questa eventualità nei calcoli, poiché l'esperienza mostra che un ribaltamento è sempre riconoscibile tramite evidenze visive o documentazione fotografica.



Sistema di riferimento del veicolo e del terreno

La procedura di calcolo del THIV è articolata come segue:

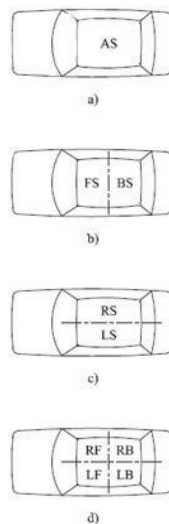
- registrazione delle accelerazioni del veicolo e della velocità di imbardata, e salvataggio in forma digitale alla frequenza di campionamento S . La registrazione dei dati deve iniziare almeno 500 ms prima del contatto con il sistema di ritenuta veicolare;
- interpolazione lineare tra i valori misurati dell'angolo di imbardata per ottenere dati dell'angolo di imbardata alla stessa velocità di campionamento degli altri dati registrati;
- calcolo dell'accelerazione del veicolo nelle coordinate "terreno" (che non ruota);
- integrazione dell'accelerazione del veicolo nelle coordinate "terreno" (che non ruota);
- calcolo della posizione e della velocità della testa teorica rispetto alle coordinate del veicolo (che ruota);
- determinazione del valore minimo di t ;
- calcolo del THIV;
- calcolo del THIV ad almeno due cifre decimali.

Indice di deformazione dell'abitacolo del veicolo (VCDI)

Un indice aggiuntivo riportato dalla norma, ma non essenziale per il presente oggetto di studio, è il VCDI, ovvero l'indice di deformazione dell'abitacolo del veicolo che descrive la deformazione interna subita dal veicolo e deve essere calcolato esclusivamente per le autovetture.

Il VCDI identifica sia la posizione sia l'entità della deformazione dell'abitacolo e viene espresso attraverso una stringa composta da due lettere seguite da sette cifre.

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



Posizione della deformazione dell'abitacolo

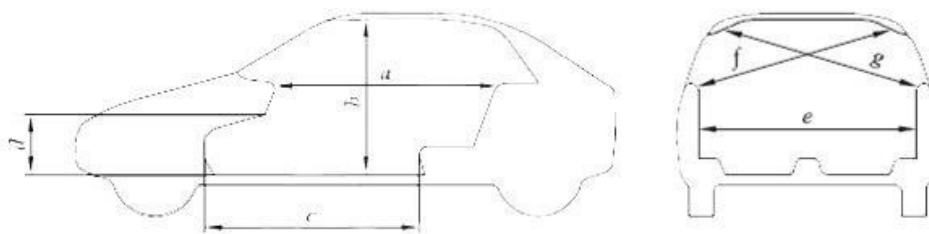
I primi due caratteri riguardanti la posizione della deformazione dell'abitacolo sono espressi come segue:

- 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.

Se non è possibile identificare alcuna deformazione dell'abitacolo i primi due caratteri saranno ND (nessuna deformazione).

I sette caratteri numerici indicano la percentuale di riduzione delle dimensioni interne:

- distanza minima fra il cruscotto e la parte più alta del sedile posteriore;
- distanza minima fra il tetto e il pannello del pavimento;
- distanza minima fra il sedile posteriore e il pannello motore;
- distanza minima fra la parte inferiore del cruscotto e il pannello del pavimento;
- larghezza interna minima fra i bordi inferiori destro e sinistro dei finestrini;
- distanza minima fra il bordo inferiore del finestrino destro e il bordo superiore del finestrino sinistro;
- distanza minima fra il bordo inferiore del finestrino sinistro e il bordo superiore del finestrino destro;



Dimensioni interne

Ognuno dei sette sub indici numerici deve essere determinato in base alla scala seguente:

- 0 se la riduzione è minore o uguale al 3%;
- 1 se la riduzione è maggiore del 3% e minore o uguale al 10%;
- 2 se la riduzione è maggiore del 10% e minore o uguale al 20%;
- 3 se la riduzione è maggiore del 20% o se non è possibile misurarla a causa della deformazione.

Quando le riduzioni eccedono il 10% il rapporto di prova deve includere la descrizione fotografica delle parti deformate.

3.2. UNI EN 1317 - Parte 2.

Questa sezione della norma aggiorna le procedure per l'esecuzione delle prove d'urto e introduce sia la classificazione dei prodotti in famiglie sia un formato più dettagliato per la redazione dei rapporti di prova. Per migliorare la sicurezza stradale, soprattutto in tratti sensibili o in punti critici, le autorità possono richiedere l'installazione di barriere di sicurezza, come i parapetti veicolari, con lo scopo di evitare che un veicolo fuori controllo abbandoni la carreggiata. Questi sistemi hanno la funzione di trattenere e reindirizzare il veicolo, contribuendo a ridurre i rischi per gli occupanti e per gli altri utenti della strada. La norma stabilisce diversi livelli di prestazione, che si basano su tre aspetti fondamentali:

- il livello di contenimento;
- i livelli di severità d'urto;
- la deformazione espressa dalla larghezza operativa e l'intrusione del veicolo.

Grazie a questa classificazione, le autorità possono individuare la classe più adatta per il luogo in cui la barriera va installata. Nella descrizione di un sistema di ritenuta conforme devono essere indicati chiaramente le classi e i livelli di prestazione.

Per una progettazione efficace è raccomandato seguire i requisiti della norma e i riferimenti presenti nella EN 1317-1. Anche la valutazione della conformità e della durabilità deve rispettare quanto previsto dalla EN 1317-5.

3.2.1. Scopo e campo di applicazione

La presente norma europea specifica i requisiti riguardanti la prestazione all'urto delle barriere di sicurezza compresi i parapetti veicolari, le classi di contenimento, larghezza operativa, l'intrusione del veicolo e i livelli di severità dell'urto.

Le barriere di sicurezza, inclusi i parapetti veicolari, devono soddisfare i requisiti indicati nella tabella seguente. Tali requisiti cambiano in base ai parametri della prova, come la velocità e l'angolo d'impatto, la massa del veicolo e la sua tipologia, così da garantire il livello di contenimento richiesto e una severità d'urto compatibile con gli standard di sicurezza.

Prova	Velocità d'urto [km/h]	Angolo d'urto [°]	Massa ideale [kg]	Tipo di veicolo
TB11	100	20	900	automobile
TB21	80	8	1300	automobile
TB22	80	15	1300	automobile
TB31	80	20	1500	automobile
TB32	110	20	1500	automobile
TB41	70	8	10000	autocarro rigido
TB42	70	15	10000	autocarro rigido
TB51	70	20	13000	autobus
TB61	80	20	16000	autocarro rigido
TB71	65	20	30000	autocarro rigido
TB81	65	20	38000	autocarro rigido

Tabella 8 Tipologie di prova

Livelli di contenimento

I livelli di contenimento delle barriere di sicurezza devono essere conformi ai requisiti riportati nella tabella sottostante dopo essere stati sottoposti alle prove d'urto riportate nella tabella sovrastante.

	Livelli di contenimento	Prova di accettazione
contenimento con angolo d'urto basso	T1	TB21
	T2	TB22
	T3	TB41 e TB21
contenimento normale	N1	TB31
	N2	TB32 e TB11
contenimento più elevato	H1	TB42 e TB11
	H2	TB51 e TB11
	H3	TB61 e TB11
contenimento molto elevato	H4a	TB71 e TB11
	H4b	TB81 e TB11

Tabella 9 Livelli di contenimento

La valutazione di un sistema di ritenuta veicolare entro la gamma di livelli di contenimento T3, N2, H2, H3, H4a, H4b, L1, L2, L3, L4a ed L4b deve richiedere l'esecuzione di diverse prove:

- una prova secondo il massimo livello di contenimento per quel particolare sistema;
- una 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.

Severità dell'urto

Gli indici di valutazione della severità dell'urto per l'occupante del veicolo ASI e THIV devono essere determinati e conformi ai requisiti della tabella sottostante, definiti dalla EN 1317-1. In funzione del valore degli indici ASI e THIV la tabella definisce le tre classi di severità dell'urto il livello A, B e C. Il livello di severità dell'urto A permette un maggiore livello di sicurezza per l'occupante di un veicolo che esce di strada rispetto al livello B ed il livello B maggiore rispetto al livello C.

Livello di severità dell'urto	Valori degli indici		
A	ASI $\leq 1,0$	e	THIV ≤ 33 km/h
B	ASI $\leq 1,4$		
C	ASI $\leq 1,9$		

Tabella 10 Livelli di severità dell'urto

Deformazione del sistema di ritenuta

La deformazione delle barriere di sicurezza durante le prove d'urto è caratterizzata da:

- deflessione dinamica (Dm): spostamento dinamico laterale massimo di un punto qualsiasi del lato rivolto verso il traffico del sistema di ritenuta;

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

- larghezza operativa (W_m): distanza laterale massima tra il lato rivolto verso il traffico prima dell'urto della barriera di sicurezza e la massima posizione laterale dinamica di una qualunque parte della barriera;

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

- intrusione del veicolo (VI_m): posizione laterale dinamica massima del lato rivolto verso il traffico virgola non deformato, della barriera

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

In cui:

- 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;
- α_t (°): angolo nominale;
- M_m (kg): massa totale misurata;
- V_m (m/s): velocità misurata;
- α_m (°): angolo misurato.

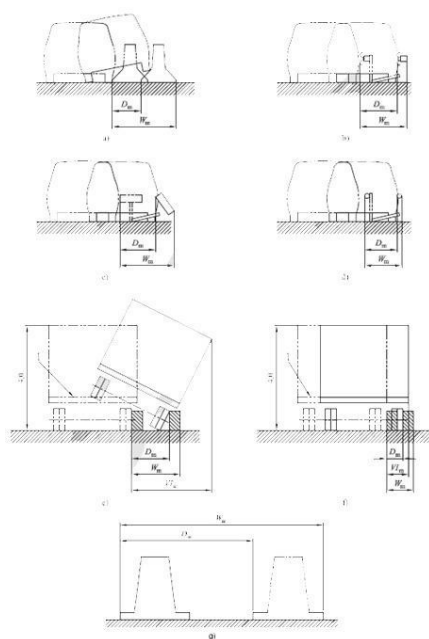
I valori effettivi e quelli normalizzati di deflessione dinamica, larghezza operativa e intrusione del veicolo devono essere misurati con precisione e riportati nel rapporto di prova.

La deflessione dinamica normalizzata e la larghezza operativa normalizzata possono essere ricavate sia dai dati misurati durante la prova sia da risultati ottenuti in test precedenti alla pubblicazione della norma, a condizione che i metodi di acquisizione utilizzati siano conformi ai requisiti attuali.

L'intrusione del veicolo deve essere determinata analizzando registrazioni fotografiche ad alta velocità o riprese video, tenendo conto della posizione e dell'angolo del carico al momento dell'impatto.

Per quanto riguarda l'accuratezza delle misurazioni, la deflessione dinamica e la larghezza operativa devono essere rilevate con un margine di errore pari al 10%, ma comunque non inferiore a 0,1 m. Per l'intrusione del veicolo è richiesta un'accuratezza di $\pm 0,2$ m.

Deflessione dinamica, larghezza operativa e intrusione del veicolo:



3.2.2. Criteri di accettazione delle prove d'urto

Generalità

Le barriere di sicurezza, inclusi i parapetti veicolari, devono rispettare i requisiti indicati in precedenza, mentre il veicolo di prova deve risultare conforme ai criteri relativi all'indice di severità, alle deformazioni del veicolo e a quelle della barriera. I parametri sui quali si basano i criteri di accettazione sono riportati nella tabella seguente e variano in funzione del livello di contenimento richiesto.

Se, al termine dell'urto principale, il veicolo dovesse entrare nuovamente in contatto con la barriera, tali collisioni successive non devono essere considerate né per la valutazione delle prestazioni né ai fini dell'accettazione della prova.

Livello di contenimento	Comportamento barriera di sicurezza	Livello di severità dell'urto ASI - THIV	Deformazione del veicolo	Deformazione della barriera di sicurezza
T1	TB21	TB21	TB21	TB21
T2	TB22	TB22	TB22	TB22
T3	TB41+TB21	TB21	TB21	TB41+TB21
N1	TB31	TB31	TB31	TB31
N2	TB32+TB11	TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB32+TB11
H1	TB42 + TB11	TB11	TB11	TB42 + TB11
H2	TB51 + TB11	TB11	TB11	TB51 + TB11
H3	TB61 + TB11	TB11	TB11	TB61 + TB11
H4a	TB71 + TB11	TB11	TB11	TB71 + TB11
H4b	TB81 + TB11	TB11	TB11	TB81 + TB11
L1	TB42 + TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB42 + TB32 + TB11
L2	TB51 + TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB51 + TB32 + TB11
L3	TB61 + TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB61 + TB32 + TB11
L4a	TB71 + TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB71 + TB32 + TB11
L4b	TB81 + TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB32 + TB11	TB81 + TB32 + TB11

Tabella 11 Criteri di accettazione

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

Comportamento della barriera di sicurezza incluso il parapetto veicolare

La barriera di sicurezza, compreso il parapetto veicolare, deve essere in grado di trattenere il veicolo senza che i suoi elementi longitudinali principali si rompano completamente. Eventuali parti che si staccano dalla barriera e che hanno una massa superiore a 2 kg devono essere individuate, localizzate e descritte nel rapporto di prova, riportandone anche le dimensioni. Inoltre, nessun componente della barriera deve penetrare nell'abitacolo del veicolo, poiché ciò potrebbe provocare lesioni gravi agli occupanti.

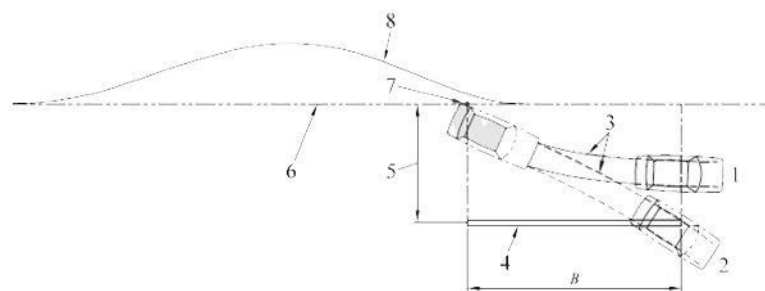
Comportamento del veicolo di prova

Durante e dopo l'urto, non più di una ruota del veicolo può superare completamente, verso l'alto o verso il basso, la barriera di sicurezza, e il veicolo non deve ribaltarsi. Nelle prove che coinvolgono autocarri o autobus, non più del 5% della massa di zavorra può staccarsi o disperdersi durante l'impatto, fino al momento in cui le tracce delle ruote escono dal box di uscita. Al termine dell'urto, il veicolo deve allontanarsi dalla barriera, incluso il parapetto veicolare, in modo tale che le tracce delle ruote non oltrepassino una linea parallela al lato del sistema rivolto verso il traffico. Questa linea deve essere posta a una distanza pari al valore A, aumentato della larghezza del veicolo e del 16% della sua lunghezza, entro una distanza B dall'ultimo punto P in cui le tracce delle ruote intersecano nuovamente la linea originale del lato della barriera rivolto verso il traffico.

Le distanze A e B devono essere specificate come nella tabella sottostante:

Tipo di veicolo	A [m]	B [m]
Automobile	2,2	10
Altri veicoli	4,4	20

Tabella 12 Distanza per il criterio del box di uscita



Traiettoria del box di uscita

Indice di severità

L'indice di severità ASI e THIV devono essere calcolati utilizzando la strumentazione del veicolo come specificato nella EN 1317-1 e riportati per tutte le prove con automobili.

Prove per barriere di sicurezza sottoposte alla prova di tipo (famiglie di barriere)

Una famiglia di barriere può essere sviluppata a partire da una singola barriera di base. Questa deve soddisfare i requisiti del livello di contenimento previsto ed essere l'elemento con la larghezza operativa più ridotta, poiché da essa vengono definiti sia il livello di contenimento superiore sia il livello di severità più elevato dell'intera famiglia. La famiglia può includere barriere con diversi livelli di contenimento e/o differenti larghezze operative, con l'obiettivo di evitare ulteriori prove TB32, TB11 o TB21 per ciascuna variante.

Ogni barriera appartenente alla famiglia deve comunque essere sottoposta ad almeno una prova utilizzando il veicolo più pesante previsto per quella classe di contenimento, così da determinarne il livello di contenimento e la larghezza operativa. Il livello di severità di ciascun modello viene invece attribuito sulla base della prova eseguita sulla barriera di base.

La famiglia di barriere deve essere pertinente esclusivamente ai tre casi seguenti:

- per le barriere con elementi a sezione longitudinale trasversale singola o multipla, con diversa distanza dei pali o dei dispositivi intermedi di fissaggio al suolo;

- per il caso di barriere appoggiate a terra, che si differenziano solo nella lunghezza degli elementi;
- barriere con altezza supplementare e parti supplementari, nelle quali le parti che entrano in contatto con il veicolo durante la prova TB11 non differiscono.

Le famiglie di barriere:

- sono assemblate con gli stessi componenti, escluse le parti extra;
- hanno lo stesso nome di famiglia;
- hanno lo stesso meccanismo di funzionamento sia del sistema sia delle componenti.

Tutti gli altri casi devono essere trattati come prodotti modificati.

3.2.3. Metodi di prova

Generalità

Il rapporto di prova deve contenere una descrizione dettagliata dell'oggetto testato e la relativa specifica di progetto, così da consentire la verifica della conformità del sistema installato. La specifica di progetto deve riportare anche i requisiti prestazionali della fondazione e, nel caso di un parapetto veicolare, deve includere le informazioni relative al sistema di ancoraggio al terreno.

Installazione

La lunghezza della barriera di sicurezza, o del parapetto veicolare sottoposto a prova, deve essere sufficiente a rappresentare in modo completo il comportamento prestazionale di tutte le installazioni di lunghezza maggiore. Al termine della prova, l'adeguatezza della lunghezza utilizzata deve essere verificata attraverso un procedimento specifico.

Le lunghezze di prova devono essere definite dal fabbricante prima dell'esecuzione, in modo che le prove con autovetture riproducano le condizioni di massima severità d'urto, mentre la prova con il veicolo pesante

metta in evidenza la massima deflessione dinamica del sistema.

Le condizioni alle estremità (ancoraggi terminali) devono essere conformi alla specifica della barriera di sicurezza, inclusi i parapetti veicolari, come previsto dal fabbricante. Se per la prova viene utilizzato un ancoraggio terminale dedicato, non facente parte del progetto del sistema, esso deve essere descritto in modo dettagliato nel rapporto di prova. In ogni caso, l'ancoraggio terminale non deve limitare la deflessione laterale massima della barriera. Le fondazioni devono essere realizzate in conformità alla specifica di progetto.

Per i sistemi pretensionati, nei quali è possibile regolare il livello di tensionamento (come nel caso delle barriere a cavi), la prova con il veicolo leggero deve essere eseguita con un tensionamento corrispondente a una temperatura di 10 °C, mentre la prova con il veicolo pesante deve essere condotta con un tensionamento equivalente a 30 °C. Per i livelli di contenimento che prevedono una sola prova, il tensionamento deve corrispondere a una temperatura di 0 °C. I valori tensionamento/temperatura devono essere forniti dal fabbricante.

Se il parapetto veicolare deve essere dotato di riempimenti o altre modifiche per svolgere anche la funzione di parapetto pedonale, tali elementi devono essere inclusi nell'installazione di prova qualora possano influenzarne le prestazioni.

Posizione del punto dell'urto

Il punto d'urto deve essere individuato dal laboratorio di prova e deve rappresentare le condizioni più gravose per la barriera di sicurezza, includendo anche eventuali punti deboli del progetto. Se, per ottenere le condizioni peggiori, il laboratorio decide di scegliere un punto d'impatto diverso da quello situato a circa un terzo della lunghezza dell'installazione, questa scelta deve essere motivata e spiegata nel rapporto di prova.

Accuratezza e scostamenti massimi della velocità d'urto e dell'angolo di avvicinamento

La velocità d'urto del veicolo deve essere misurata lungo la sua traiettoria di avvicinamento, a una distanza non superiore a 6 m dal punto d'impatto. L'accuratezza complessiva della misura deve rientrare in $\pm 1\%$, mentre lo scostamento massimo ammesso per la velocità d'urto è compreso tra 0 e $+7\%$. Anche l'angolo di avvicinamento deve essere rilevato entro gli stessi 6 m dal punto d'urto, con un'accuratezza globale di $\pm 0,5^\circ$. Lo scostamento massimo consentito per l'angolo d'impatto varia da -1° a $+1,5^\circ$.

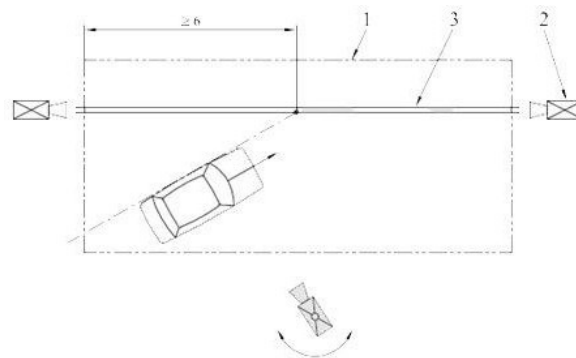
Per evitare variazioni eccessive dell'energia d'urto, gli scostamenti massimi di velocità e angolo non devono essere combinati. Se l'angolo supera la tolleranza superiore di $+1,5^\circ$, il limite massimo dello scostamento positivo della velocità si riduce a $+5\%$. Viceversa, se l'angolo raggiunge il limite inferiore di -1° , il margine massimo di scostamento negativo della velocità aumenta di $+2\%$.

Questi scostamenti sono previsti esclusivamente per tenere conto delle differenze tra installazioni o procedure di prova e non devono essere interpretati come un intervallo entro cui scegliere l'energia d'urto.

Copertura fotografica

La documentazione fotografica deve essere sufficientemente chiara da mostrare in modo completo il comportamento della barriera, incluso il parapetto veicolare, e il movimento del veicolo durante e dopo l'impatto. Nelle riprese della telecamera principale deve essere presente una scala di riferimento, così da permettere misurazioni accurate durante l'analisi successiva.

Le telecamere ad alta velocità devono registrare con una frequenza minima di 200 fotogrammi al secondo, mentre le telecamere a velocità standard devono garantire almeno 24 fotogrammi al secondo.



Disposizione delle telecamere per la registrazione della prova

Per le prove delle barriere di sicurezza, compresi i parapetti veicolari, la disposizione delle telecamere dovrebbe corrispondere alla situazione illustrata nella figura sovrastante:

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

3.3. UNI EN 1317 - Parte 3.

La progettazione stradale può richiedere l'installazione di attenuatori d'urto in punti particolarmente critici, per migliorare la sicurezza. Questi dispositivi servono a ridurre la gravità dell'impatto quando un veicolo collide con ostacoli rigidi. La norma definisce i requisiti prestazionali degli attenuatori d'urto, le diverse classi di prestazione e i criteri di accettazione da utilizzare nelle prove.

La severità dell'impatto viene valutata attraverso due indicatori: la velocità teorica d'urto della testa (THIV) e l'indice di severità dell'accelerazione (ASI). I vari livelli prestazionali consentono alle autorità nazionali e locali di scegliere la classe più adatta alle esigenze di sicurezza del tratto stradale.

3.3.1. Classi di prestazione

Tipi di attenuatori d'urto

I tipi di attenuatori d'urto devono essere:

- ridirettivi (R): attenuatori d'urto che contengono e ridirigono i veicoli;
- non ridirettivi: attenuatori d'urto che contengono ma non ridirigono veicoli.

Prove d'urto dei veicoli

Le descrizioni della prova d'urto dei veicoli devono essere fatte come descritte nella tabella seguente:

Prova	Avvicinamento	Massa veicolo [kg]	Velocità [km/h]	Nr. Prova
TC 1.1.50	Frontale centrato	900	50	1
TC 1.1.80		900	80	
TC 1.1.100		900	100	
TC 1.2.80		1300	80	1
TC 1.2.100			100	
TC 1.3.110		1500	110	1
TC 2.1.80	Frontale disassato di 1/4 della larghezza del veicolo	900	80	2
TC 2.1.100			100	
TC 3.2.80	Sulla testa, a 15°	1300	80	3
TC 3.2.100		1300	100	
TC 3.3.110		1500	110	
TC 4.2.50	Urto laterale, a 15°	1300	50	4
TC 4.2.80		1300	80	
TC 4.2.100		1300	100	
TC 4.3.110		1500	110	
TC 5.2.80	Urto laterale, a 65°	1300	80	5
TC 5.2.100		1300	100	
TC 5.3.110		1500	110	

Tabella 13 Descrizioni delle prove d'urto dei veicoli per attenuatori d'urto

Livelli di prestazione

L'ordine di classificazione delle prove d'urto si basa su una crescente capacità di assorbimento di energia. Un attenuatore d'urto che abbia superato la prova con esito positivo ad un dato livello di prestazione deve essere considerato conforme alle condizioni di prova dei livelli inferiori.

Livello	Prova di accettazione					
50	TC 1.1.50	-	-	-	TC 4.2.50	-
80/1	-	TC 1.2.80	TC 2.1.80	-	TC 4.2.80	-
80	TC 1.1.80	TC 1.2.80	TC 2.1.80	TC 3.2.80	TC 4.2.81	TC 5.2.80
100	TC 1.1.100	TC 1.2.100	TC 2.1.100	TC 3.2.100	TC 4.2.100	TC 5.2.100
110	TC 1.1.110	TC 1.3.110	TC 2.1.101	TC 3.3.110	TC 4.3.110	TC 5.3.110

Tabella 14 Livelli di prestazione per attenuatori d'urto

Severità dell'urto

La severità dell'urto per gli occupanti di un veicolo e quindi i livelli di severità devono essere valutati in base agli indici ASI e THIV. Il livello di severità dell'urto A offre un maggior livello di sicurezza agli occupanti di un veicolo entrante rispetto al livello B ed è quindi preferito. Il livello di severità dell'urto maggiore ottenuto da una serie di prove deve denotare il livello di severità della famiglia di attenuatori d'urto.

Livello di severità dell'urto	Valori degli indici		
	ASI $\leq 1,0$	e	THIV ≤ 44 km/h nelle prove 1,2,3
A			THIV ≤ 33 km/h nelle prove 4,5
B	$1,0 \leq \text{ASI} \leq 1,4$	e	THIV ≤ 44 km/h nelle prove 1,2,3
			THIV ≤ 33 km/h nelle prove 4,5

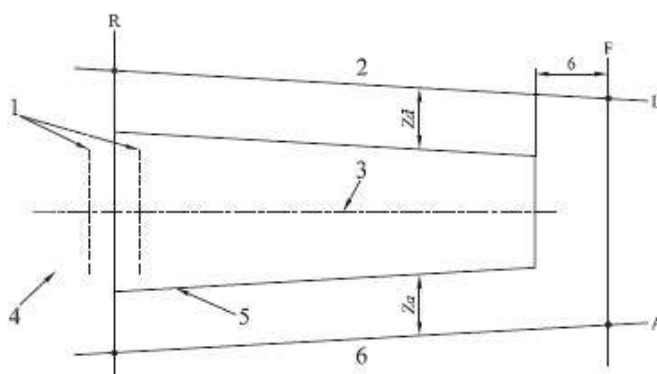
Tabella 15 Valori di severità dell'urto del veicolo

Famiglie di attenuatori d'urto

Una famiglia di attenuatori d'urto deve derivare da un singolo attenuatore d'urto di base che è stato sottoposto con successo a tutte le prove indicate nella norma.

Criteri di accettazione delle prove d'urto

Il profilo in pianta di un attenuatore d'urto da sottoporre a prova deve rientrare all'interno di un involucro trapezoidale con un'area minima pari a quella mostrata nella figura seguente. Tutti gli elementi strutturali essenziali del dispositivo devono trovarsi all'interno di questo involucro.



Pianta dei riferimenti al suolo

Comportamento dell'attenuatore d'urto

Gli elementi dell'attenuatore d'urto non devono in alcun modo penetrare nell'abitacolo del veicolo, poiché non sono ammesse deformazioni o intrusioni che possano provocare lesioni gravi agli occupanti. Eventuali parti dell'attenuatore che si staccano completamente e hanno una massa superiore a 2 kg devono essere considerate nella valutazione della classificazione dello spostamento.

La fondazione, gli ancoraggi e i dispositivi di fissaggio al suolo devono comportarsi in linea con quanto previsto dal progetto dell'attenuatore d'urto.

Comportamento del veicolo di prova

Il veicolo non deve ribaltarsi durante o dopo l'urto. La traiettoria post-urto del veicolo di prova deve essere valutata per mezzo del box di uscita che è delimitato da:

- la linea del rimbalzo F perpendicolare all'asse dell'attenuatore d'urto, a 6 m a monte della testa dell'attenuatore d'urto;
- le due linee laterali, A e D, parallele ai due lati dell'involuppo trapezoidale sono perpendicolari alle distanze Z_a sul lato di avvicinamento e Z_d sul lato di allontanamento;
- la linea R, perpendicolare all'asse all'estremità dell'attenuatore d'urto;
- una linea tratteggiata che rappresenta il lato frontale dell'ostacolo da proteggere può essere leggermente all'interno o all'esterno dell'involuppo dell'attenuatore d'urto;

Per diverse prove la traiettoria post urto del veicolo deve essere limitata dai criteri seguenti:

- in tutte le prove del veicolo non deve attraversare la linea tratteggiata presente il lato frontale dell'ostacolo;
- nelle prove da 1 a 5 le ruote del veicolo non devono attraversare le linee che rappresentano il box d'uscita a meno che la velocità del centro di massa del veicolo al momento dell'ingresso sia minore o uguale a 11 km/h, in questo caso per la determinazione della zona di ridirezione si considera

che il veicolo non abbia superato la linea di controllo del box di uscita pertinente.

Le classi degli attenuatori d'urto devono essere definite secondo le distanze Z_a e Z_d .

Spostamento laterale dell'attenuatore d'urto

Lo spostamento laterale permanente dell'attenuatore d'urto, o di tutte le parti staccate maggiori o uguali a 2 kg, deve essere misurato e registrato nel rapporto di prove e deve essere considerato nella determinazione della zona di spostamento laterale permanente.

Deformazione del veicolo di prova

La deformazione dell'interno del veicolo deve essere valutata e registrata sotto forma di VCDI (indice di deformazione dell'abitacolo del veicolo) in tutte le prove con veicoli per passeggeri.

3.3.2. Metodi di prova

Installazione

L'installazione dell'attenuatore d'urto per la prova, incluse le fondazioni, deve essere conforme ai dettagli del progetto strutturale e ai dettagli del sistema su strada riportati nella specifica di progetto.

Accuratezza e scostamenti di velocità e angoli d'urto

La velocità d'urto del veicolo deve essere rilevata lungo la sua traiettoria di avvicinamento, a non più di 6 m dal punto d'impatto. La misura deve avere un'accuratezza complessiva di $\pm 1\%$, e lo scostamento ammesso della velocità d'urto deve rientrare tra 0% e +7%. La velocità di uscita del veicolo deve invece essere misurata con un'accuratezza pari a ± 5 km/h.

Anche l'angolo di avvicinamento deve essere misurato entro gli stessi 6 m dal punto d'urto, utilizzando un metodo appropriato. L'accuratezza richiesta è di

$\pm 0,5^\circ$, mentre lo scostamento massimo consentito dell'angolo d'impatto è $\pm 1^\circ$.

Lo spostamento laterale della traiettoria di avvicinamento deve essere misurato con un'accuratezza di $\pm 0,05$ m. Al momento del contatto, lo scostamento ammesso rispetto alla traiettoria prescritta non deve superare $\pm 0,10$ m.

Per evitare variazioni significative dell'energia d'urto, gli scostamenti massimi di velocità e angolo non devono essere combinati. Se l'angolo raggiunge il limite superiore di $+1^\circ$, il margine massimo di incremento della velocità si riduce a $+5\%$. Se invece l'angolo raggiunge il limite inferiore di -1° , il margine massimo di riduzione della velocità aumenta a $+2\%$.

Copertura fotografica

Devono essere utilizzate delle telecamere o videocamere ad alta velocità con una registrazione minima di 200 immagini al secondo.

3.4. UNI EN 1317 - Parte 4.

La norma EN 1317 definisce le prestazioni dei sistemi di ritenuta stradale in base alla loro capacità di contenimento, alla geometria degli elementi e alla severità dell'urto. Include inoltre l'impiego della meccanica computazionale nel processo di approvazione per il marchio CE dei prodotti sottoposti a prova. Per questo motivo è essenziale disporre di software di simulazione in grado di riprodurre in modo realistico il comportamento del veicolo e le interazioni con le barriere.

Le simulazioni numeriche basate sul metodo degli elementi finiti (FE) vengono utilizzate per valutare le prestazioni dei sistemi e per progettare i componenti più critici. Le norme CEN/TS 16303 e 16304 forniscono le linee guida e i criteri di accettazione per l'impiego della meccanica computazionale, includendo anche il metodo multi-body (MB).

Per ottenere modelli affidabili è necessario curare con attenzione ogni dettaglio: proprietà dei materiali, gestione dell'energia, stabilità numerica e tutte le altre caratteristiche che influenzano il comportamento del modello. Una fase di verifica e convalida rigorosa è indispensabile per poter considerare attendibili i risultati delle simulazioni.

Il processo che garantisce l'affidabilità della simulazione comprende tre fasi: modellazione, convalida e verifica del risultato. La modellazione riguarda la costruzione di un modello adeguato alla prova e al veicolo, come descritto nelle norme CEN/TR 16303-2 e CEN/TR 16303-3. La convalida serve a stabilire quanto il modello computazionale rappresenti fedelmente il comportamento reale e a verificare che i risultati siano numericamente stabili. Il gruppo CME ha analizzato diversi approcci per definire una metodologia di validazione applicabile a differenti tecniche di modellazione, a vari modelli di prova e a molteplici contesti applicativi. Questa metodologia permette all'utente di esaminare l'evento di crash passo dopo passo, individuare eventuali incongruenze e, se necessario, motivare le differenze riscontrate rispetto al comportamento reale.

Processo di validazione

La validazione si basa sul confronto tra il test fisico e la simulazione numerica eseguita sulla configurazione originale. La validazione può essere considerata positiva quando il comportamento osservato nella prova reale coincide con quello riprodotto dal modello numerico.

La deflessione dinamica del test fisico deve essere confrontata con quella calcolata dalla simulazione numerica, la differenza tra le due deflessioni dinamiche deve essere inferiore al valore calcolato con la seguente espressione:

$$Diff < \pm(0,05 m + 0,1)$$

Quando la deflessione dinamica raggiunge il massimo, la differenza di tempo in secondi, tra il valore registrato nel test fisico ed il valore calcolato durante la simulazione numerica deve essere inferiore a 0,05 s.

L'intrusione del veicolo del test fisico, come definito nella norma EN 1317, deve essere confrontata con quella calcolata dalla simulazione numerica. la differenza tra le due intrusioni del veicolo deve essere inferiore al valore calcolato con la seguente espressione:

$$Diff < \pm(0,05 m + 0,1)$$

Lo spostamento laterale per attenuatori d'urto e terminali del test fisico, come definito nella norma EN 1317 deve essere confrontato con quello calcolato dalla simulazione numerica. La differenza tra i due spostamenti laterali deve essere inferiore al valore calcolato con l'espressione seguente:

$$Diff < \pm(0,05 m + 0,1)$$

Perché una simulazione possa essere considerata valida, il sistema di ritenuta stradale simulato deve presentare, dopo l'impatto, la stessa deformazione finale osservata nella prova reale: il tipo di guasto deve quindi coincidere.

Quando la simulazione e il test fisico vengono eseguiti con un'autovettura, è possibile confrontare ulteriori parametri per valutare la qualità della simulazione. Per questo, il processo di validazione richiede anche l'analisi di indicatori come ASI, THIV e l'andamento temporale dell'urto. La norma EN 1317 stabilisce come calcolare gli indici di gravità nei crash test con autovetture, rendendo possibile il confronto diretto tra i valori ottenuti nella prova reale e quelli derivati dalla simulazione numerica.

La tolleranza ammessa per l'ASI è $\pm 0,1$, mentre per il THIV è $\pm 0,1$. Anche la storia della velocità del veicolo, che descrive l'evoluzione dell'impatto istante per istante, rappresenta un elemento fondamentale da considerare nel confronto tra test fisici e simulazioni.

Il confronto si basa sulle componenti longitudinale trasversale e verticale (relativa all'oggetto di prova) della velocità del veicolo nel moto del veicolo e sul tasso di imbardata.

La simulazione numerica è considerata valida quando vengono soddisfatti i seguenti requisiti:

- le componenti numeriche della velocità del veicolo rimangono all'interno di una finestra costruita attorno alle componenti di velocità fisica fino al raggiungimento del valore più lontano tra il tempo ASI massimo e il tempo di volo.
- fino a quando la velocità di imbardata numerica del veicolo rimane all'interno di una finestra costruita attorno al tasso di imbardata fisico, fino al raggiungimento del tempo più distante tra il tempo ASI massimo e il tempo di volo.

I risultati della simulazione e il relativo confronto con la prova reale devono essere descritti nel rapporto di convalida e valutati da un esperto indipendente. Questo documento permette a un soggetto terzo di verificare l'affidabilità della simulazione e la qualità dei risultati, così da confermare che il modello sia idoneo a supportare applicazioni reali.

Il rapporto può essere utilizzato per convalidare una simulazione basandosi su un test in scala reale, su un precedente processo di convalida o su una simulazione già validata, anche nell'ambito di un'analisi di variazione.

Se il confronto tra test e simulazione non rientra nei limiti previsti, l'autore può fornire una spiegazione delle discrepanze. Se tale motivazione viene accettata dall'esperto indipendente incaricato della verifica, la simulazione può comunque essere considerata convalidata.

3.5. UNI EN 1317 - Parte 5.

La presente norma europea specifica i requisiti per la valutazione di conformità dei seguenti sistemi di trattenimento dei veicoli:

- barriere di sicurezza;
- attenuatori d'urto;
- terminali;
- transizioni;
- parapetti per veicoli e/o pedoni.

Questo documento definisce i requisiti per valutare la durabilità dei sistemi quando sono esposti agli agenti atmosferici, inclusi gli effetti della rimozione della neve. Non vengono invece considerati altri tipi di condizioni ambientali, come l'esposizione in ambiente marino o l'abrasione causata dalla sabbia.

Livelli di soglia

I sistemi di trattenimento veicoli devono essere conformi ai livelli di soglia minimi definiti nella tabella seguente:

Barriera di sicurezza	EN 1317-2	N1
Attenuatori d'urto	EN 1317-3	Classe 50
Terminali	EN 1317-4	P1
Transizioni	EN 1317-4	N1
Parapetti combinati per veicoli/pedoni	EN 1317-2	N1

Tabella 16 Livelli di soglia minimi per i sistemi di trattenimento dei veicoli

Durabilità

Tutti i sistemi di ritenuta devono garantire una durata di servizio adeguata e sostenibile dal punto di vista economico. Questa durabilità deve essere dimostrata attraverso l'esperienza d'uso e/o tramite misurazioni specifiche. In alcuni casi, i sistemi di ritenuta possono includere fondazioni la cui vita utile economicamente ragionevole riguarda la sola struttura di supporto, in tal

caso, la durata della fondazione deve essere indicata separatamente rispetto a quella della barriera di sicurezza, quando entrambe sono fornite dallo stesso produttore del VRS. Il fabbricante deve dichiarare:

- i materiali e rivestimenti di protezione utilizzati nella barriera di sicurezza stradale;
- una valutazione di durabilità specificando le caratteristiche tecniche dei materiali che influiscono sulla durabilità ed i metodi di valutazione (ad esempio la determinazione della massa del rivestimento o prove di adesione).

Gli aspetti che influiscono sulla durabilità possono essere:

- la specificazione del rivestimento protettivo e/o il livello di trattamento dei materiali;
- la composizione e lo spessore del materiale in conformità alle norme EN 206-1 e EN 13369 rispettivamente per il calcestruzzo e per il calcestruzzo prefabbricato;
- specifiche di trattamento del legno e/o durabilità naturale del legno da utilizzare in classi di impiego specificate nella EN 335-1 e EN 335-2;
- raccomandazioni sulle condizioni di installazione in opera, in presenza di condizioni gravose sul posto;
- i requisiti di manutenzione specificati.

3.5.1. Valutazione di conformità

Generalità

La conformità delle barriere di sicurezza stradale ai requisiti del presente documento o ai valori dichiarati (classi incluse) deve essere dimostrata mediante:

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

Ai fini delle prove, i sistemi di ritenuta possono essere raggruppati in famiglie definite nella EN 1317-2 e EN 1317-3 o EN 1317-4 quando si considera che

la proprietà selezionata sia comune a tutti i sistemi di ritenuta stradale appartenenti a una certa famiglia.

Prove iniziali di tipo ITT

Una prova iniziale di tipo è la serie completa di prove in conformità alla EN 1317-1 e alla EN 1317-2, EN 1317-3 o EN 1317-4. Per dimostrare la conformità deve essere eseguita una ITT su ogni VRS.

Campionamento: le prove iniziali di tipo devono essere eseguite su campioni rappresentativi della barriera di sicurezza stradale da immettere sul mercato.

Controllo di produzione in fabbrica (FPC)

Il fabbricante deve definire, documentare e mantenere un sistema di Controllo della Produzione in Fabbrica (FPC) che garantisca che i prodotti immessi sul mercato rispettino le prestazioni dichiarate. Questo sistema comprende procedure scritte, operative e gestionali, oltre a ispezioni, prove e valutazioni periodiche. I risultati ottenuti devono essere utilizzati per controllare le materie prime, i componenti in ingresso, le attrezzature, il processo produttivo ed il prodotto finito. Tutta la documentazione deve essere chiara, facilmente identificabile e sempre reperibile.

Le ispezioni, le prove e le valutazioni che richiedono un intervento devono essere registrate, così come le azioni correttive adottate. Questa documentazione deve essere conservata per il periodo previsto dalle procedure FPC del fabbricante.

Il fabbricante può delegare un rappresentante della direzione la responsabilità e l'autorità per:

- un'individuazione efficace della non conformità e l'attenuazione della loro rettifica;
- la revisione del sistema di controllo di produzione in fabbrica per correggere le cause di non conformità individuate quando necessario;
- un'attuazione efficace di un metodo di rintracciabilità.

Prototipi

Prima di avviare la produzione in serie, è necessario valutare i prototipi e i seguenti aspetti:

- documentazione dell’FPC;
- stabilimento.

La valutazione iniziale dello stabilimento e dell’FPC deve comprendere:

- la verifica della disponibilità di tutte le cose necessarie per l'ottenimento delle caratteristiche del prodotto richieste dal presente documento;
- la verifica dell’attuabilità dei procedimenti FPC in conformità alla documentazione FPC.

3.5.2. Casi di non conformità alle specifiche tecniche

Se vengono riscontrate non conformità nelle specifiche della barriera di sicurezza o dei suoi componenti, oppure difetti nel processo produttivo o nel controllo in fabbrica, il fabbricante deve dimostrare di essere in grado di individuare e correggere tutte queste anomalie in tempo utile, così da evitare che prodotti difettosi vengano immessi sul mercato.

3.5.3. Installazione dei sistemi di ritenuta stradali

Il fabbricante deve fornire un manuale di installazione che consenta di montare il prodotto in modo da garantire le prestazioni dichiarate nella ITT. Il manuale deve includere anche le istruzioni per la manutenzione e per i controlli periodici. Inoltre, il fabbricante deve indicare le condizioni di utilizzo del sistema sul terreno e le modalità corrette di installazione.

Il sistema può essere considerato conforme alla ITT solo se installato secondo tutti i dettagli riportati nel manuale di installazione fornito dal fabbricante:

- montaggio;
- manutenzione;
- ispezione;
- suoli.

3.5.4. Certificazione CE

Una volta ottenuta la conformità alle condizioni dell'appendice ZA della presente norma, 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:

- nome, indirizzo e numero di identificazione dell'organismo di certificazione;
- nome e indirizzo del fabbricante, o del suo rappresentante autorizzato con sede nella EEA e il luogo di produzione;
- descrizione del prodotto (tipo, identificazione, impiego, ecc.);
- disposizioni alle quali il prodotto è conforme (ovvero appendice ZA della presente EN);
- condizioni particolari applicabili all'impiego del prodotto (per esempio disposizioni per l'impiego in determinate condizioni);
- numero del certificato;
- condizioni e periodo di validità del certificato, quando applicabile;
- nome e qualifica della persona autorizzata a firmare il certificato.

Il fabbricante, inoltre, deve redigere una dichiarazione di conformità (Dichiarazione CE di conformità) contenente:

- nome e indirizzo del fabbricante e del suo rappresentante autorizzato con sede nella EEA;
- nome e indirizzo dell'organismo di certificazione;
- descrizione del prodotto (tipo, identificazione, impiego ecc.) e una copia delle informazioni di accompagnamento della marcatura CE;
- disposizioni alle quali il prodotto è conforme (ovvero appendice ZA della presente EN);
- condizioni particolari applicabili all'impiego del prodotto;
- numero del certificato CE di conformità di accompagnamento;
- nome e qualifica della persona incaricata di firmare la dichiarazione per conto del fabbricante e del suo rappresentante autorizzato.

La dichiarazione ed il certificato di cui sopra devono essere presentati nella lingua ufficiale accertata degli stati membri.

Il fabbricante e/o il suo rappresentante autorizzato con sede nella EEA sono responsabili dell'apposizione della marcatura CE. Il simbolo della marcatura CE da applicare deve essere conforme alla direttiva 93/68/CE e deve figurare sulla barriera di sicurezza stradale (oppure, quando questo non è possibile, sull'etichetta, sulla confezione o sui documenti commerciali di accompagnamento, per esempio sulla bolla di consegna). Le informazioni seguenti devono accompagnare il simbolo di marcatura CE:

- numero di identificazione dell'organismo di certificazione, nome o marchio di identificazione e sede legale del produttore;
- le ultime due cifre dell'anno in cui la marcatura è apposta;
- numero del certificato CE di conformità o del certificato di controllo di produzione in fabbrica;
- 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. Viene sotto riportato un esempio di informazioni sulla marcatura CE per le barriere di sicurezza.

 01234
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 12 01234-CPD-00234
EN 1317-5:2007+ A2:2012 Prodotto Conic barrier, tipo C, barriera di sicurezza mediana a due lati da utilizzare in aree soggette a circolazione Prestazione in caso di urto: a) Livello di contenimento: H1 e H2 b) Severità all'urto: A c) Larghezza operativa normalizzata: H1: $W_N = W4$ (1,1 m) H2: $W_N = W6$ (1,9 m) d) Deflessione dinamica normalizzata: H1 $D_{N1} = 0,5$ m H2 $D_{N1} = 1,3$ m e) Intrusione veicolo normalizzata: H1: $V_N = V14$ (1,2 m) H2: $V_N = V16$ (2,0 m) Durabilità: S 235 JR zincato in conformità alla EN ISO 1461 Resistenza alla rimozione della neve: Classe 3 Sostanza pericolosa: NPD

4. Analisi della norma UNI TR 11785

4.1. Scopo e campo di applicazione

Il rapporto tecnico della norma UNI TR 11785 è stato elaborato sotto la competenza della commissione tecnica UNI, la quale ha dato la sua approvazione il 22 aprile 2020, e il 7 maggio 2020 la norma è entrata a far parte del corpo normativo nazionale.

Il documento ha lo scopo di formare una base di conoscenze comune per la redazione del Manuale per l'Utilizzo e l'Installazione dei dispositivi di ritenuta, e di definire le informazioni utili alla sua standardizzazione, con particolare attenzione agli aspetti legati all'installazione su strade esistenti e di nuova costruzione. Il campo di applicazione riguarda le installazioni di barriere di sicurezza in acciaio con paletti infissi nel terreno, sottoposte a prove di crash per l'ottenimento della marcatura CE in condizioni di configurazione e proprietà meccaniche del terreno diverse da quelle presenti su strada. Infatti, l'attuale quadro normativo nazionale e comunitario relativo ai sistemi di protezione passiva non fornisce un'indicazione per la verifica del funzionamento dei dispositivi installati su strade in condizioni che possano risultare diverse da quelle in cui si eseguono le prove di crash.

Il presente documento descrive quindi le problematiche di installazione da affrontare ed i metodi tecnici e strumentazioni per risolverle, il risultato finale è quello di rendere disponibili le conoscenze che, se applicate correttamente, consentono di ottenere su strada prestazioni prossime a quelle avute nelle prove di crash. Il presente rapporto tecnico rimanda ad alcuni riferimenti normativi ovvero:

- UNI EN 1317-1. Sistemi di ritenuta stradali – Parte 1: Terminologia e criteri generali per i metodi di prova
- UNI EN 1317-2. 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. Sistemi di ritenuta stradali – Parte 5: Requisiti di prodotto e valutazione di conformità per sistemi di trattenimento veicoli
- ASTM D6951/D6951m-18. Standard Test method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications

4.2. Installazione delle barriere di sicurezza sul bordo dei rilevati stradali

Le barriere di sicurezza installate lungo i margini esterni della strada operano, nella pratica, in condizioni spesso differenti rispetto a quelle riprodotte durante le prove di crash. Le principali variabili che determinano tale divergenza riguardano:

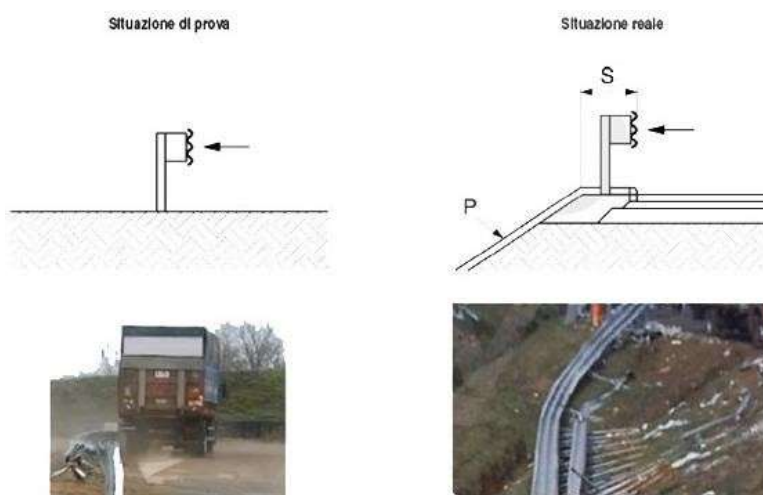
- le caratteristiche geotecniche dei terreni e il loro livello di addensamento;
- l'omogeneità dei materiali che costituiscono il supporto;
- la distanza tra il fronte della barriera e il ciglio del rilevato. Nelle condizioni di prova, infatti, la scarpata è generalmente assente e tale distanza può considerarsi teoricamente infinita. Al contrario, nelle nuove realizzazioni lo spazio pianeggiante disponibile per l'installazione del dispositivo varia tipicamente tra 100 e 125 cm, includendo l'ingombro della barriera stessa; nelle infrastrutture esistenti tale valore può ridursi fino a circa 50 cm.

Il terreno che costituisce i margini esterni della carreggiata presenta, di norma, un grado di compattazione inferiore rispetto a quello sottostante la pavimentazione, inoltre, è spesso presente uno strato superficiale di terreno vegetale di spessore non trascurabile. Entrambi questi aspetti possono influenzare la capacità portante complessiva del supporto. Il livello di addensamento e la qualità dei materiali possono inoltre variare nello spazio e nel tempo, determinando una resistenza globale non costante.

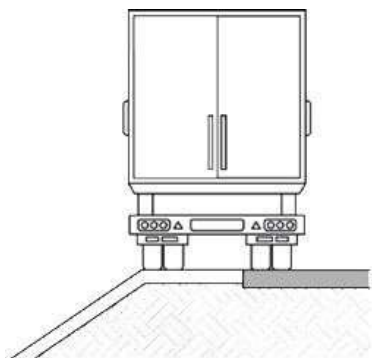
La presenza di una scarpata prossima ai paletti produce un duplice effetto: da un lato tende ad aumentare la deformabilità del sistema barriera, dall'altro

può compromettere la stabilità del veicolo in termini di rollio. La vicinanza del declivio riduce infatti la resistenza laterale offerta ai paletti durante lo spostamento trasversale e consente alle ruote del veicolo di impegnare la scarpata nelle diverse fasi dell'urto, favorendo così un incremento del rollio. Nel complesso, tali condizioni di installazione possono determinare prestazioni in opera significativamente diverse da quelle osservate in sede di prova. In assenza di specifici accorgimenti progettuali o costruttivi, e qualora la barriera non sia stata testata con una scarpata retrostante, per garantire che la capacità di contenimento non risulti inferiore a quella certificata è necessario che il terreno in cui vengono infissi i paletti presenti caratteristiche meccaniche comparabili a quelle del sito di prova in scala reale e che la distanza "s" tra il fronte della barriera e il ciglio del rilevato, come indicato nella figura sottostante, sia tale da soddisfare entrambe le condizioni previste:

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



Confronto condizioni di prova e condizione reale con effetti estremi



Situazione di massima garanzia per il ribaltamento, in cui la ruota esterna dell'asse gemellato non invade la scarpata

Il problema della diversa capacità di contenimento nelle reali condizioni di installazione può presentarsi anche quando si utilizza una barriera che, in fase di prova, è stata testata con una scarpata alle spalle. Questo può accadere se, in sito, le proprietà meccaniche del terreno risultano significativamente inferiori rispetto a quelle della configurazione di prova, oppure se la distanza dal ciglio è molto più ridotta.

Per compensare la minore resistenza dovuta sia alle caratteristiche meccaniche del terreno di supporto sia alla vicinanza della scarpata, è possibile adottare specifici accorgimenti riguardanti i paletti e/o il sistema di fondazione. Resta comunque responsabilità del produttore, in accordo con l'ente certificatore, valutare se tali modifiche siano di entità tale da richiedere la marcatura CE del prodotto come “prodotto modificato”, secondo quanto previsto dalla UNI EN 1317-5.

Il risultato finale del presente rapporto tecnico, riguardo la problematica sopra esposta, è quello di:

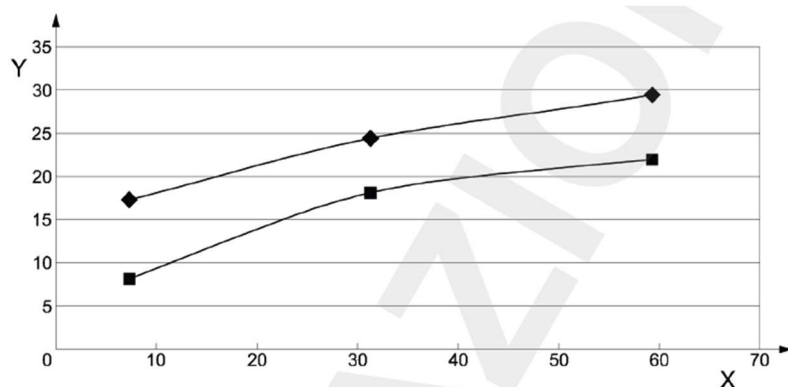
- individuare le prove per la caratterizzazione dei supporti di prova, replicabili su strada in fase di controllo;
- individuare le informazioni, in terreni di caratteristiche del supporto di prova e di comportamento atteso dei pali nell'interazione con il supporto su strada che sono dichiarate all'interno del Manuale;

- mettere a disposizione una metodologia che, se applicata correttamente, consenta di ottenere su strada prestazioni prossime a quelle riscontrate nella prova di crash.

4.3. Effetto della diversità delle proprietà meccaniche del terreno costituenti il supporto

Le proprietà meccaniche del bordo dei rilevati stradali sono in genere inferiori a quelle della parte centrale. Queste opere in terra sono normalmente costruite e controllate per garantire una buona portanza nelle parti direttamente sottoposte alla pavimentazione stradale, mentre i bordi, definiti tecnicamente margini esterni, sono meno portanti in quanto il terreno non raggiunge il grado di costipamento che si ha nel corpo centrale del rilevato a causa della posizione estrema che occupa, non rullabile con contrasto laterale. La presenza dello strato superficiale di terreno vegetale, indispensabile per la protezione della scarpata in terra poiché di fatto riduce la profondità di infissione attiva dei paletti del dispositivo.

La variazione di resistenza dei paletti in funzione della portanza dei terreni in cui sono infissi è mostrata nel grafico sottostante, dove sono rappresentati i risultati di più prove svolte su terreni dotati di un diverso Modulo di deformazione e Md300. Le prove di tipo quasi statico sono state eseguite assumendo una distanza dal ciglio pari ad alcune decine di centimetri e le curve sono relative a due sezioni a “C” diverse. Il modulo di deformazione Md300 pari a 60 MPa è un valore prossimo a quello minimo che i capitolati richiedono sulla superficie di appoggio dello strato di fondazione delle pavimentazioni stradali.



Influenza della portanza dei terreni sulla resistenza allo spostamento dei paletti. Asse X: Md300 [Mpa]; Asse Y: resistenza [kN]

In un'altra esperienza relativa sempre a prove effettuate nei pressi del ciglio di un rilevato è stato evidenziato che la resistenza ottenuta con un terreno scarsamente costipato, per quasi tutta la profondità di infissione dei paletti, è stata circa il 40% di quella ottenuta con un terreno fortemente costipato. La minor resistenza del terreno, nel reale rispetto alle condizioni di prova, ha come effetto complessivo una maggiore deformabilità della barriera, la quale può indurre ad una minore capacità di costipamento.

4.4. Effetti della distanza dei paletti dal ciglio della scarpata

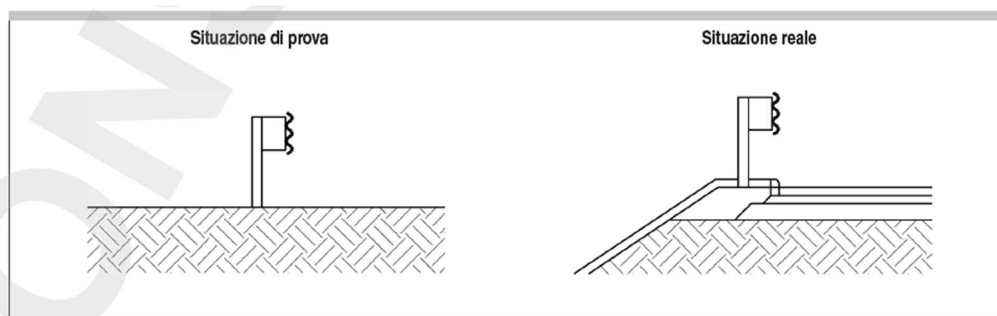
Le prove di crash condotte sulle barriere di sicurezza per bordo laterale vengono normalmente eseguite su un terreno non caratterizzato, oltre che perfettamente pianeggiante, posto alle spalle del dispositivo. Nelle installazioni reali, però, questa condizione è rara: il paletto della barriera si trova spesso collocato molto vicino al margine della scarpata, in una configurazione ben diversa da quella riprodotta in fase di prova. Questa distanza tra le condizioni di prova e quelle in sito ha essenzialmente due effetti:

- quando l'estensione del terreno alle spalle del paletto è limitata, si può riscontrare una resistenza allo spostamento trasversale dei paletti minore,

anche di molto, rispetto a quella avuta sul campo prova; questo accade anche nel caso di terreno avente proprietà meccaniche simili, di conseguenza la capacità di contenimento della barriera può risultare considerevolmente inferiore a quella di prova;

- quando lo spazio trasversale tra il fronte della barriera e di ciglio del rilevato è inferiore a quello necessario per la circolazione delle ruote del veicolo, queste ultime possono finire nella scarpata, favorendo in tal modo un elevato rollio, o persino il ribaltamento, del veicolo stesso.

I due effetti descritti possono determinare una capacità di contenimento della barriera inferiore rispetto a quella ottenuta in fase di prova. Di conseguenza, in condizioni reali di incidente, aumenta la probabilità che il veicolo possa ribaltarsi e/o oltrepassare la barriera.



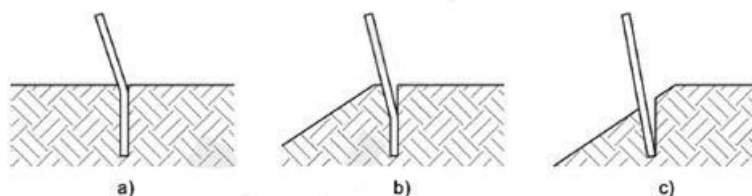
Confronto situazione di prova - situazione reale

4.4.1. Effetto sulla resistenza allo spostamento del paletto

Il ridotto volume di terreno disponibile dietro i paletti, quando questi sono installati in prossimità del ciglio, comporta una minore resistenza allo spostamento rispetto alla configurazione con terreno indefinito. Al fine di comprendere meglio il fenomeno vengono confrontati diversi scenari illustrati nella figura sottostante:

- la resistenza complessiva del terreno è tale da garantire un vincolo molto efficace al paletto; in questo caso, la cerniera plastica generata dall'urto tende a formarsi quasi in corrispondenza del punto in cui il paletto emerge dal terreno (condizione simile a quella delle prove in campo);

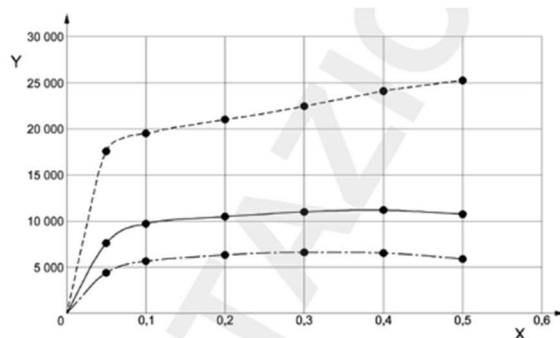
- la base del paletto mantiene comunque un certo grado di vincolo, ma la resistenza complessiva del terreno è inferiore e la cerniera plastica si sviluppa più in profondità.
- la resistenza complessiva del terreno non è in grado di vincolare efficacemente il paletto e la cerniera plastica non si forma.



Deformata dei paletti per diversa posizione rispetto al ciglio

Il livello di vincolo che si instaura non è determinato unicamente dalla distanza dal ciglio, ma dipende anche dalla capacità portante del terreno, dalla rigidità del paletto e dalla sua lunghezza. In presenza di un terreno molto resistente e di un paletto relativamente debole, si manifesta sistematicamente la condizione descritta al punto a). In questo scenario, la distanza dal ciglio necessaria per garantire la massima resistenza del paletto risulta piuttosto contenuta. La situazione opposta si verifica quando il terreno offre una scarsa resistenza mentre il paletto è particolarmente robusto.

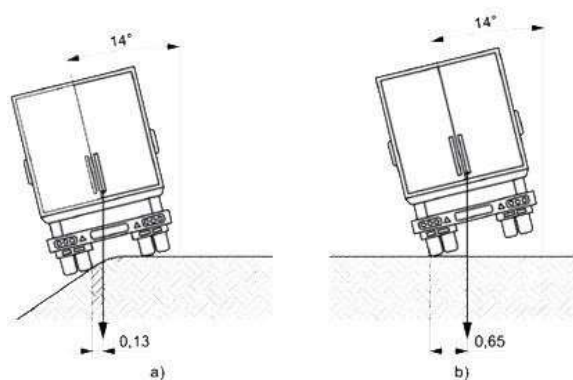
Per comprendere come la resistenza vari al modificarsi della distanza dal ciglio, è utile osservare le curve riportate nella tabella seguente, ottenute da una prova quasi statica in cui il retro del paletto è stato posizionato a diverse distanze dal margine. Le prove sono state condotte in assenza dello strato di terreno vegetale e su un terreno con compattazione media. Dai risultati emerge che, nel terzo caso, la resistenza massima raggiunge circa un quarto di quella del primo caso; tale valore ha comunque solo carattere indicativo. Differenze ancora più marcate sono prevedibili rispetto alle condizioni tipiche dei campi prova, dove il terreno è pianeggiante e il grado di costipamento può essere più elevato.



Confronto della resistenza per tre distanze del paletto dal ciglio del rilevato. Asse X: spostamento [m]; Asse Y: forza [kN]. Partendo dalla linea più bassa le distanze sono: 0,3m; 0,6m; 1,1m.

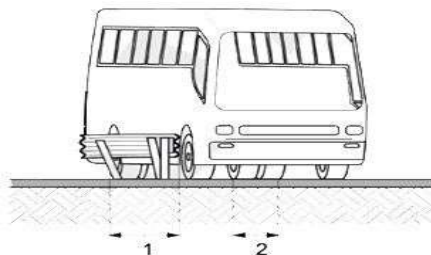
4.4.2. Effetto sulla stabilità del veicolo

La presenza della scarpata in prossimità della barriera può comportare che, durante l'urto, le ruote del veicolo vi salgano sopra. Questa situazione può ridurre la stabilità al rollio per due ragioni: da un lato il veicolo tende a ruotare geometricamente a causa della perdita di appoggio, dall'altro la verticale del punto di contatto con il terreno risulta molto più vicina al baricentro. Occorre ricordare che, quando il baricentro oltrepassa la linea che unisce i punti di appoggio delle ruote esterne, il peso del veicolo non svolge più un ruolo stabilizzante rispetto al rollio, ma contribuisce invece al ribaltamento.



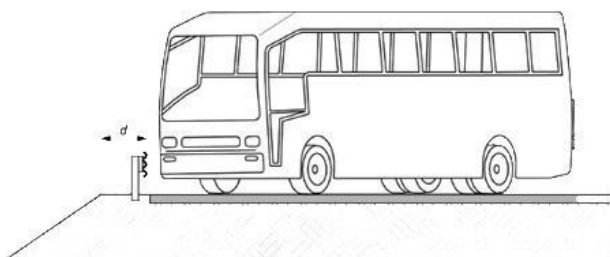
Diverso appoggio del veicolo quando le ruote invadono la scarpata

Quando le prove di crash vengono eseguite su terreno pianeggiante, la configurazione più sicura per evitare effetti negativi sulla stabilità del veicolo è quella in cui le ruote non raggiungono in alcun modo la scarpata. Questo risultato si ottiene garantendo che la distanza tra il fronte della barriera e il ciglio sia superiore allo spostamento laterale massimo delle ruote rispetto alla posizione della barriera non deformata. Se l'ingresso delle ruote sulla scarpata è contenuto, ciò non comporta automaticamente il ribaltamento del veicolo.



1. Massima posizione laterale della ruota posteriore nella prova in piano.

2. Larghezza ruote gemellate.



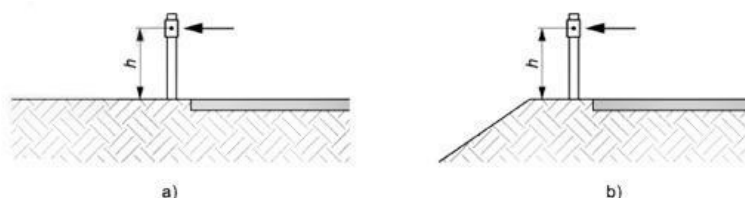
Distanza "d" tra il fronte della barriera ed il ciglio della scarpata

4.5. Prove globali per la valutazione del comportamento paletto-terreno

Durante i crash test è fondamentale, come prima attività, caratterizzare in modo quanto più completo possibile il terreno e l'interazione palo-terreno, sia utilizzando un palo standard sia analizzando i pali effettivamente impiegati nel dispositivo. Le prove condotte sul palo standard permettono di classificare il terreno, mentre quelle eseguite sui pali reali consentono di valutare il comportamento del sistema in sito e confrontarlo con quello previsto in fase di progetto.

Una volta definiti e stabilizzati i protocolli di prova e le relative attrezzature,

tali verifiche diventano uno strumento utile per la caratterizzazione preliminare dei siti di futura installazione. Esse forniscono infatti dati omogenei e confrontabili ai diversi soggetti coinvolti nella progettazione e nell'esecuzione delle opere, oltre a costituire un supporto per le verifiche in corso d'opera. I risultati delle prove, svolte in parallelo ai crash test, vengono riportati dai produttori nei manuali di uso e manutenzione dei dispositivi, così da renderli disponibili ai progettisti, agli enti gestori, ai Direttori dei lavori e ai collaudatori. La metodologia più efficace per ottenere una misura complessiva della resistenza del sistema consiste nell'eseguire una prova a controllo di spostamento, applicata a un punto del paletto posto alla quota h , registrando le grandezze più significative ai fini dell'analisi:



Schema di prova su campo prova e su strada.

Gli elementi da definire per determinare le caratteristiche essenziali della prova sono molteplici ed includono:

- il tipo di prova da effettuare, se quasi statica o dinamica;
- 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.

4.5.1. Tipo di prova da effettuare

La resistenza del sistema paletto-terreno che si mobilita durante l'urto si sviluppa in regime dinamico, e quindi risente anche delle inerzie e degli effetti legati all'elevata velocità di deformazione. Tenendo conto di ciò, l'approccio più appropriato per valutarne il comportamento è rappresentato dalle prove di natura dinamica. Al momento, tuttavia, le attrezzature specifiche per questo tipo di test sono ancora poco diffuse: tra queste si possono citare MARTE e THOR.

THOR: Testing Head Over Road

Thor è un'attrezzatura semovente che, quando è in configurazione di trasporto, rispetta masse e ingombri compatibili con la circolazione stradale, senza creare ostacoli al traffico. L'assetto di prova è progettato per valutare in modo rapido, attraverso test dinamici, l'affidabilità dei terreni di fondazione delle barriere di sicurezza installate lungo la stessa infrastruttura, riducendo al minimo le interferenze con la viabilità.

Gli stabilizzatori possono essere regolati in diverse posizioni in funzione della geometria del sito da analizzare; gli ingombri massimi e minimi consentono di garantire un appoggio sicuro, pur con la presenza di leggere vibrazioni che tuttavia non compromettono la misura dello spostamento, rilevata direttamente sulla testa d'impatto.

L'energia dell'urto dipende dall'altezza di caduta e dalla massa del martello che colpisce il paletto, permettendo di valutare la risposta reale all'impatto di un paletto installato su strada e di confrontarla, in termini di spostamento nel tempo, con quella ottenuta sullo stesso dispositivo montato su terreni stabilizzati nei campi prova.

La macchina è costituita da una massa battente variabile tra 220 e 350 kg, montata su un braccio lungo 3,4 m incernierato alla sommità di un traliccio tubolare mobile. La caduta da 5,4 m genera un'energia compresa tra 10 e 16 kJ, con una velocità d'impatto pari a 11 m/s. L'altezza dell'urto rispetto al terreno può essere regolata.

È disponibile anche una versione evoluta, denominata Thor 2, che opera

secondo gli stessi principi ma utilizza una batteria di molle in acciaio per accelerare una massa di 400 kg. Il sistema di regolazione micrometrica della compressione delle molle consente di modulare l'energia in modo continuo, da zero fino a un massimo di 28 kJ in regime elastico, corrispondenti a una velocità d'impatto di 12 m/s.

Thor 2 consente di effettuare impatti dinamici sia in una postazione fissa di laboratorio sia montata su un veicolo semovente. Offre inoltre la possibilità di orientare la macchina sia in senso angolare sia azimutale e di eseguire urti anche molto vicini al piano di campagna, così da valutare non solo la resistenza dinamica del complesso paletto-terreno, ma anche l'effetto frenante del terreno per paletti con ridotta profondità di infissione.



Attrezzatura THOR

MARTE: Macchina per l'Analisi della Resistenza del Terreno

L'attrezzatura Marte consente di effettuare sia prove quasi statiche sia prove dinamiche su pali infissi nel terreno o collegati a strutture esistenti. Il sistema applica spinte prevalentemente orizzontali e permette di registrare forze, spostamenti e accelerazioni. In modalità quasi statica può raggiungere azioni fino a 150 kN, mentre in regime dinamico l'energia d'impatto può arrivare a 26 kJ. Il punto di applicazione del carico può essere posizionato a un'altezza compresa tra 0,6 m e 1 m dal piano di campagna. L'attrezzatura, dotata anche di un battipalo, è trasportabile in diversi siti e può muoversi autonomamente per raggiungere differenti posizioni di prova.



Attrezzatura MARTE

Considerata l'esigenza di poter verificare ovunque — anche lungo le strade secondarie — il comportamento del terreno di installazione confrontandolo con quello dei siti di prova, e tenuto conto della disponibilità limitata delle attrezzature per test dinamici, una soluzione praticabile è rappresentata dall'impiego di prove quasi statiche. In questo caso le apparecchiature necessarie risultano molto più semplici e possono essere utilizzate presso qualunque laboratorio certificato per le prove sui materiali. I risultati ottenuti vengono poi messi a confronto con quelli ricavati nei campi prova dei crash test, adottando la medesima procedura e le stesse attrezzature.

4.5.2. Velocità di spinta

La velocità con cui viene applicata la spinta al paletto nel punto di contatto con l'attrezzatura di prova determina la natura del test, distinguendo tra prova quasi statica e prova dinamica. Nel caso quasi statico, la velocità è mantenuta molto bassa, così da rendere trascurabili i contributi alla resistenza dovuti all'inerzia, alla viscosità del terreno e agli effetti di strain-rate dell'acciaio, isolando di fatto la sola risposta del terreno. Nelle prove dinamiche, invece, la velocità di applicazione è simile a quella che i paletti raggiungono durante gli impatti reali.

Per le prove quasi statiche si suggerisce di non superare una velocità di spinta pari a 20 mm/s, mentre nelle prove dinamiche la velocità deve avvicinarsi a quella effettivamente riscontrata nei crash test. Le attrezzature attualmente

disponibili consentono di raggiungere senza difficoltà la massima velocità d'impatto trasversale prevista dalla UNI EN 1317-2 per la prova TB32, pari a circa 10,5 m/s. Il valore della velocità utilizzata deve essere riportato in modo esplicito nella relazione di prova relativa ai paletti.

4.5.3. Tipologie di paletto su cui effettuare la prova

Il tipo di paletto da impiegare nella prova dipende dal fine di quest'ultima, che può essere:

- caratterizzazione del solo terreno, utilizzo di un paletto molto robusto con sezione HEB 120B in acciaio S355, in maniera che la resistenza massima sia determinata solo dal terreno e non dalla resistenza del paletto stesso;
- caratterizzazione dell'insieme paletto-terreno, finalizzata a determinare quanto accade con la barriera reale, il paletto da impiegare è il paletto reale o la sua versione post modifica.

Le caratteristiche geometriche del palo e le proprietà meccaniche del materiale sono esplicitamente riportate nella relazione di prova sui paletti.

4.5.4. Profondità di infissione

La profondità di infissione è funzione del fine della prova:

- caratterizzazione del solo terreno, valore suggerito pari 1 m, ma occorre in ogni caso fare attenzione alle situazioni dove si hanno stratificazioni di terreno fortemente diverse tra loro;
- caratterizzazione dell'insieme paletto-terreno, la profondità da impiegare è quella del paletto reale o della sua versione post modifica.

La profondità di infissione è esplicitamente riportata nella relazione di prova sui paletti.

4.5.5. Altezza di prova

Nelle prove di caratterizzazione del solo terreno il valore può essere pari a 1m, mentre nella prova per la caratterizzazione dell'insieme paletto-terreno, l'altezza è uguale ad un valore h di riferimento pari a 0,6 m, al fine di considerare anche le barriere di classe di contenimento N con paletti di altezza ridotta. L'altezza, in linea di principio, deve essere identica sia nelle prove su campo prova sia nelle prove su campo prova sa su quelle su strada. Nel caso i valori 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 mediante l'espressione:

$$F_{strada_mod} = F_{strada_mis} * \left(\frac{h_{strada}}{h_{campo\ prova}} \right)$$

L'altezza di prova è esplicitamente riportata nella relazione di prova su paletti.

4.5.6. Sistema di contatto dell'attrezzatura di prova con il palo

Un aspetto che può influenzare l'esito delle prove è la torsione del palo o la sua instabilità flesso-torsionale, fenomeno che può essere accentuato anche da eventuali deformazioni locali della sezione. Per ridurre l'effetto di tali comportamenti è opportuno che il sistema di contatto con il palo garantisca anche un adeguato vincolo alla rotazione torsionale. Qualora si utilizzino dispositivi che non assicurano questo tipo di vincolo, è indispensabile che essi vengano impiegati in modo identico sia nelle prove in campo che nelle verifiche sul sito reale di installazione. Tutte queste condizioni devono essere descritte con precisione nella relazione di prova e accompagnate da documentazione fotografica che illustri quanto osservato.

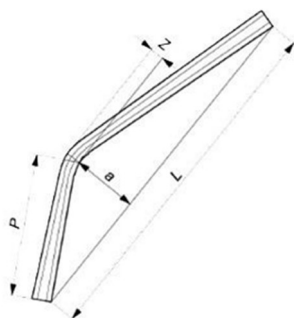
4.5.7. Spostamento a cui terminare la prova

Le prove si concludono quando lo spostamento del punto di applicazione del carico raggiunge un livello tale da mobilitare completamente la resistenza del terreno e da evitare ulteriori cedimenti significativi del paletto. A tale entità di spostamento possono inoltre manifestarsi eventuali fenomeni di instabilità locale della sezione del palo.

Nel caso della prova prevista, questa termina quando lo spostamento del punto di applicazione della forza diviene pari a 0,4 m oppure quando si eccedono i 45 kN. Si considera che tale entità di spostamento rappresenti un riferimento utile anche nelle prove finalizzate alla caratterizzazione del sistema paletto-terreno. Qualora si scelga di adottare un valore differente, è importante che esso venga comunque raggiunto sia nelle prove eseguite in campo prova sia in quelle condotte in sito. Se la discrepanza tra i due valori è limitata a pochi centimetri, è possibile assumere come riferimento quello minore ai fini del confronto.

4.5.8. Grandezze da misurare

Le prove forniscono un insieme ampio di informazioni: alcune sono fondamentali, mentre altre, pur non essendo indispensabili, permettono agli specialisti di svolgere analisi e approfondimenti aggiuntivi. Queste ultime non sostituiscono le prime, ma le integrano. I dati realmente imprescindibili sono il valore massimo della forza misurata durante la prova e la profondità alla quale si forma la cerniera plastica. Nella figura seguente è illustrato un metodo per individuare la posizione P della cerniera rispetto alla base del palo, in corrispondenza della massima distanza distanza “a”.

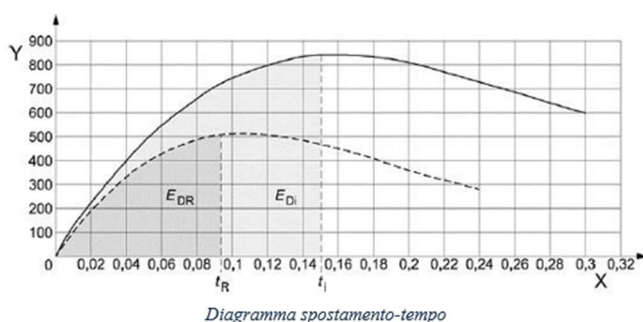


Determinazione della posizione della cerniera plastica

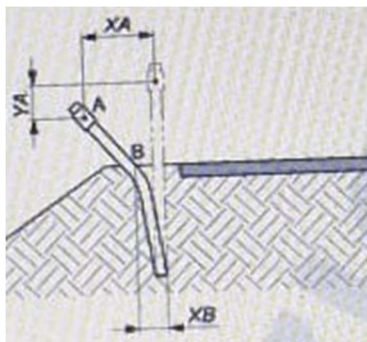
In contesti in cui si valuta che una forte semplificazione della procedura non comprometta in modo apprezzabile il livello di sicurezza complessivo, è possibile eseguire un'unica prova di spinta senza misurare la forza applicata, limitandosi a individuare la posizione della cerniera plastica. Una scelta di questo tipo è considerata ammissibile solo sulle strade di categoria minore e caratterizzate da un traffico commerciale molto contenuto.

Le informazioni più accurate comprendono:

- l'andamento della forza di contatto in funzione dello spostamento del punto di contatto, esso consente di calcolare il lavoro compiuto e quindi la dissipazione di energia permessa dal complesso palo-terreno;
- l'andamento dello spostamento in funzione del tempo, da cui si ricava un utile valore da impiegare nel confronto tra sito di prova e sito reale. Questa grandezza è limitata alle sole prove dinamiche;



- l'andamento dell'abbassamento della testa del palo YA in funzione di XA. Il rilievo di queste grandezze durante la prova può essere difficile da realizzare ed è in ogni caso facoltativo. Esse possono essere utili per il tecnico specialista, si ritiene importante effettuare il rilievo all'inizio e alla fine della prova;



- l'andamento dello spostamento XB in funzione di XA. Il rilievo di questa grandezza nel corso della prova può essere laborioso, per tale motivo essere facoltativo. Si ritiene in ogni caso importante effettuare il rilievo alla fine della prova.

4.6. Prove per la valutazione delle proprietà meccaniche del terreno al variare della profondità

La resistenza globale del sistema paletto-terreno dipende principalmente dalle caratteristiche meccaniche del terreno, dalla distanza dal ciglio e dalle proprietà geometriche e strutturali del paletto. Lungo le infrastrutture stradali, tuttavia, il parametro che tende a variare maggiormente è la resistenza del terreno e la sua distribuzione lungo la profondità di infissione. L'utilizzo delle prove descritte in precedenza, soprattutto per individuare tratti omogenei o verificare l'assenza di variazioni significative durante la posa in opera, può risultare eccessivamente oneroso. Va inoltre ricordato che tali prove sono di tipo distruttivo e che il tratto interessato, esteso da uno a più metri, offrirebbe una resistenza ridotta ai paletti installati successivamente.

Per evitare questo inconveniente è possibile ricorrere a metodi alternativi. Tra questi, la soluzione generalmente più indicata è la prova penetrometrica a cono, che consente anche la sola misura della resistenza di punta. Il risultato è un profilo verticale del numero di colpi o della pressione necessari per far avanzare la punta del penetrometro di un determinato passo. Il vantaggio principale di questa prova è la possibilità di distinguere la resistenza laterale da quella di punta. Quando tale separazione non è garantita, in particolare nei casi in cui la superficie laterale del penetrometro è molto più estesa rispetto a quella di punta, la valutazione della variazione della resistenza con la profondità risulta meno accurata.

Le prove descritte in precedenza sono generalmente utilizzate per indagini a profondità elevate. Per profondità più contenute, fino a circa 2 m, risulta invece molto utile la prova penetrometrica dinamica sviluppata originariamente dal TRL (UK Transport Research Laboratory) e normata nella ASTM D6951/D6951M-18. Si tratta di una prova semplice ed economica, eseguita manualmente lasciando cadere una massa battente da un'altezza prefissata. La norma ASTM fornisce anche una correlazione con il valore CBR, parametro ampiamente utilizzato nell'ingegneria stradale.

La prova è indicata per terreni sciolti, sia a grana fine sia a grana grossa, purché la percentuale di elementi con dimensione massima pari a 50 mm non sia troppo elevata. Può essere impiegata anche su materiali leggermente stabilizzati.

Un'ulteriore tipologia di prova talvolta proposta è quella che utilizza il Light Falling Weight Deflectometer (LFWD). Questo strumento presenta il vantaggio di essere semplice da impiegare e di avere costi di esecuzione contenuti. Il limite principale, però, è la ridotta profondità investigabile, circa 30 cm, decisamente inferiore a quella richiesta, che dovrebbe essere paragonabile alla profondità di infissione del palo. Per superare tale limite si può ricorrere al Falling Weight Deflectometer, che consente un'analisi più profonda, ma comporta costi sensibilmente maggiori.

In entrambe le prove, la resistenza del terreno non viene completamente mobilitata, poiché il terreno non è portato a rottura, e i modelli interpretativi adottati si basano su schemi elastici lineari. Lo stesso accade per altre tecniche di indagine geofisica, come il georadar, estremamente utili quando l'obiettivo è individuare discontinuità marcate, ad esempio canalizzazioni, blocchi di calcestruzzo interrati o altre anomalie.

4.7. Confronto tra sito di prove e sito di installazione

Il principio a cui queste indicazioni operative sono ispirate è quello del confronto, secondo la logica che segue:

- il riferimento del buon funzionamento è quello individuato dai crash;
- il deposito che li supera è definito in ogni dettaglio;
- la differenza nell'uso reale è costituita dalla natura e dalla forma dei terreni di supporto;
- se su questi ultimi si misura la risposta del terreno all'interazione con il palo corrispondente al comportamento riscontrato nella prova al vero e allo stesso tempo la dimensione geometrica è compatibile con lo spazio richiesto dalle ruote del veicolo (durante la prova al vero), il comportamento del dispositivo su strade è analogo a quello che lo ha convalidato e reso utilizzabile;
- se non si riscontra tale corrispondenza è buona regola individuare dei correttivi, i quali possono essere suggeriti già dal progettista del dispositivo all'interno del manuale, o valutare il ricorso ad un dispositivo diverso sottoposto a crash test in condizioni più prossime a quelle di effettivo utilizzo (in termini di geometria e caratteristiche resistenti del terreno di prova).

4.7.1. Confronto della risposta all'interazione con il palo

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

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

Le ultime due grandezze sopra riportate sono preferibili rispetto alla prima. Nel caso l'installazione riguardi una strada locale, in cui il traffico commerciale sia davvero ridotto, ci si può riferire alla sola posizione della cerniera plastica. Si rimanda comunque ai progettisti della sistemazione su strada, enti gestori e collaudatori la scelta della grandezza da impiegare per il confronto tra il sito di prova e quello reale di installazione.

Come soglie di accettazioni 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 quello rilevato sul paletto di prova.

Considerata la peculiarità di ciascun dispositivo e le modalità con cui è stato effettivamente sottoposto ai crash test, è opportuno che i manuali riportino i valori raccomandati da assumere come soglie di accettazione. Tali indicazioni dovrebbero poi essere confermate, o motivate nella loro eventuale revisione, all'interno dei progetti di installazione, tenendo conto delle caratteristiche specifiche del sito. Dal punto di vista operativo, la necessità di confrontare le condizioni del sito di prova con quelle del sito di installazione può emergere sia nella fase precedente alla fornitura sia in quella di collaudo.

4.8. Prove di crash condotte in presenza di scarpata

La configurazione di prova che riproduce in modo più fedele le condizioni reali di un rilevato è quella che include la presenza del ciglio e della relativa scarpata laterale. È tuttavia necessario considerare che, se la geometria o la struttura del ciglio differiscono in modo significativo da quelle del sito reale, anche il livello di contenimento garantito dalla barriera può discostarsi da

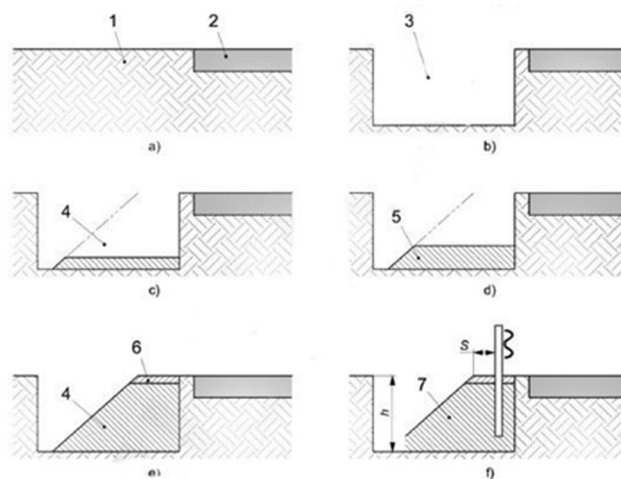
quello osservato in campo prova, rendendo necessarie ulteriori valutazioni. Tra queste rientra l'analisi dell'interazione palo-terreno, oltre alla verifica della massima posizione laterale raggiungibile dalle ruote rispetto alla barriera non deformata.

Una prova condotta con un ciglio ricostruito in modo realistico, soprattutto se realizzato nel campo prove nelle condizioni di resistenza più sfavorevoli, e superata con esito positivo consente di utilizzare il dispositivo senza richiedere ulteriori approfondimenti nei siti di installazione. Questo approccio risulta particolarmente utile per le strade esistenti, in particolare per quelle gestite da enti con risorse economiche e tecniche limitate, che non possono sostenere campagne di qualificazione preliminare più complesse.

Per realizzare un rilevato rappresentativo si procede con uno scavo fino a una profondità tale da contenere completamente i paletti e per una lunghezza adeguata al dispositivo da testare. All'interno dello scavo vengono stesi strati successivi di materiale da rilevato non legato, di spessore compreso tra 30 e 40 cm, con sezione trapezia e compattazione volutamente imperfetta, in modo da simulare le condizioni reali. La costruzione si conclude con uno strato superficiale di terreno vegetale di circa 15 cm.

La larghezza della sommità del rilevato deve consentire l'installazione del dispositivo da provare, lasciando posteriormente uno spazio residuo analogo a quello tipico delle strade in cui il dispositivo sarà impiegato, indicativamente 10–30 cm per le strade esistenti e 50–70 cm per quelle di nuova costruzione, oltre alla larghezza massima del dispositivo stesso. Tale larghezza può essere anche maggiore, purché l'installazione avvenga mantenendo lo spazio residuo previsto.

È possibile adottare anche un metodo alternativo, ricavando la pendenza del rilevato mediante scavo laterale; in questo caso, però, il terreno rimosso non deve essere ricompattato eccessivamente. In entrambe le configurazioni, per documentazione e per eventuali verifiche, è necessario eseguire prove dinamiche o quasi statiche per caratterizzare la risposta del sistema paletto-terreno.



Successione di fasi per realizzare il supporto di prova

4.9. Possibili modifiche per ottenere in sito la corrispondenza con i crash

I risultati delle prove eseguite in sito possono non riprodurre pienamente il comportamento osservato nei crash test, poiché il terreno può differire non solo per composizione e grado di addensamento, ma anche per conformazione morfologica. Per riportare la resistenza globale del sistema paletto-terreno a quella riscontrata nel campo prova, è possibile intervenire introducendo alcune modifiche al dispositivo, al terreno, oppure a entrambi.

4.9.1. Operazioni sul dispositivo

Le modifiche sotto riportate possono dar luogo a miglioramenti di diversa entità:

- allungamento del paletto e/o miglioramento della sua resistenza;
- rinforzo del paletto più o meno localizzato lungo la sua estensione;
- ampliamento della superficie di contatto tra paletto e terreno;
- collegamento aggiuntivo di più paletti in modo da coinvolgere porzioni maggiori del supporto;
- collegamento ai paletti di sistemi di ancoraggio nel terreno sottostante l'arginello e/o la pavimentazione.

I cambiamenti sul dispositivo possono richiedere il rilascio della marcatura CE del dispositivo come dispositivo modificato.

4.9.2. Opzioni sul terreno

Sostituzione generalizzata del terreno:

- con terreno diverso per la profondità necessaria;
- con cordoli di diversa natura, dal conglomerato bituminoso al cemento armato;

Sostituzione localizzata:

- con terreno diverso attorno ai paletti;
- con cordoli o altri accorgimenti in localizzati.

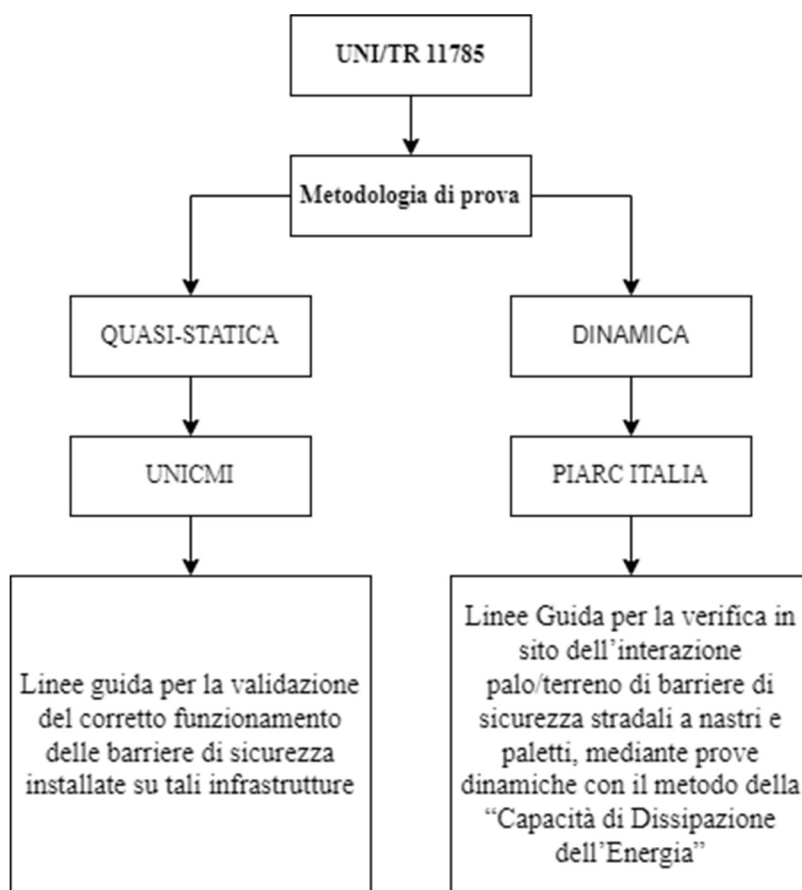
4.9.3. Operazioni miste

- combinazione delle azioni precedenti.

4.10. Prove quasi statiche e dinamiche

Il rapporto tecnico UNI TR 11785 approfondisce le procedure di prova più efficaci per valutare la corretta installazione delle barriere di sicurezza lungo il bordo dei rilevati stradali, analizzando sia le caratteristiche del terreno sia il comportamento dell'insieme paletto-terreno. Il documento distingue due approcci sperimentali: la prova quasi-statica, che analizza la relazione tra forza applicata e spostamento del paletto, e la prova dinamica, focalizzata invece sulla capacità del sistema di dissipare l'energia d'urto.

Sulla base di queste indicazioni, gli enti gestori e i produttori di barriere, tra cui troviamo UNICMI e PIARC Italia, hanno sviluppato linee guida specifiche per assicurare un'installazione corretta e coerente con quanto previsto dalla UNI TR 11785. La figura sottostante offre una rappresentazione sintetica che mette a confronto in modo immediato le due tipologie di prova.



Schema riassuntivo sulle metodologie di esecuzione delle prove

4.11. Linee guida per la validazione delle prove quasi- statiche sulle barriere di sicurezza installate sul bordo dei rilevati stradali (UX114)

Nel 2021, l'UNICMI 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:

- Test in Campo prova;
- Test in Sito.

I test eseguiti in Campo Prova si articolano in due fasi principali.

- Caratterizzazione della resistenza del terreno. La prova “push” viene condotta in condizioni quasi statiche, con controllo dello spostamento. La forza è applicata a 1 m dal piano campagna mediante un paletto HEB 120 infisso nel terreno fino a 1 m di profondità. L'obiettivo è raggiungere uno spostamento orizzontale pari a 40 cm, registrando la forza applicata, gli spostamenti prodotti e l'eventuale formazione della cerniera plastica. Qualora si renda necessaria una caratterizzazione più approfondita del terreno, possono essere eseguite ulteriori prove variando la profondità di infissione, secondo le scelte del produttore.
- Caratterizzazione dell'insieme paletto–terreno. Questa fase adotta una procedura analoga alla precedente, con la differenza che la forza viene applicata a 0,6 m dal suolo. È previsto lo svolgimento di almeno tre prove “push”; il valore medio ottenuto costituisce il riferimento per le successive verifiche in sito.

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 adottano le stesse procedure previste per il test in Campo Prova. La verifica è considerata conforme quando il valore medio della forza misurata risulta pari o superiore al valore certificato in Campo Prova. È tollerato un margine di scostamento negativo fino al 10% rispetto al valore di riferimento.

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

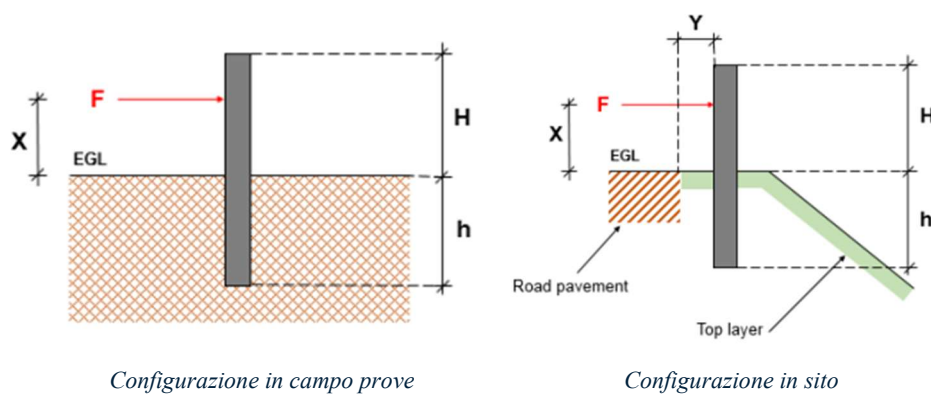
Le Linee Guida PIARC rispondono all'esigenza di verificare in sito il comportamento reale delle barriere, superando la dipendenza esclusiva dai crash test, proponendo una metodologia dinamica che misura la Capacità di Dissipazione dell'Energia (CE), parametro in grado di rappresentare in modo sintetico ma efficace la risposta del palo durante un impatto.

La metodologia di prova prevede di eseguire un test dinamico in Campo Prove, per verificare e validare la barriera, e successivi test dinamici in sito (analoghi a quelli eseguiti in Campo Prove). La validazione di un'installazione si effettua quindi confrontando i risultati ottenuti in Campo Prove con quelli ottenuti in sito, nella reale configurazione della barriera. Durante ciascuna prova vanno misurati e registrati una serie di parametri, in particolare il tempo e lo spostamento del montante necessari per dissipare l'energia d'urto.

I risultati delle prove ed il confronto tra i risultati ottenuti in Campo Prove ed in sito vengono forniti in termini di Capacità di Dissipazione dell'Energia (CE) e di profondità della cerniera plastica rispetto al piano campagna.

Al fine di poter confrontare i risultati ottenuti in Campo Prove ed in sito, è necessario che le configurazioni della prova dinamica siano tra loro congruenti:

- stessa altezza fuori terra (H) e profondità di infissione (h) dei paletti;
- stesse condizioni di impatto (velocità di impatto, massa ed energia di impatto, altezza di applicazione della forza di impatto).



In cui:

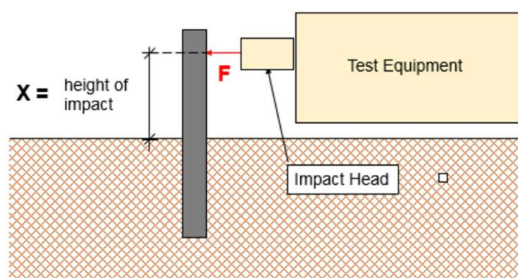
- H: altezza del montante indeformato;
- h: profondità di infissione del montante;
- Y: distanza tra il palo ed il margine stradale;
- F: forza di impatto;
- X: altezza di impatto
- EGL: piano campagna

Le prove dinamiche in sito vanno effettuate prima dell'installazione del sistema, con una frequenza da valutare in relazione alla variabilità delle caratteristiche delle aree interessate dalla barriera.

L'attrezzatura impiegata per l'esecuzione delle prove dinamiche, sia in Campo Prove sia in sito, è l'impattatore. Questo può essere costituito da un carrello, da un pendolo oppure da qualsiasi dispositivo capace di applicare al

montante in esame una sollecitazione dinamica.

La caratteristica essenziale della testa impattante è l'assenza di vincoli: dopo aver colpito il palo, deve poter rimbalzare liberamente, dissipare completamente l'energia d'urto e arretrare senza interferenze, questa deve essere costituita da materiale non deformabile e non deve provocare risonanze o vibrazioni.



Configurazione di prova

Il carico di impatto applicato durante la prova dinamica dipende dal livello di contenimento della barriera di sicurezza.

La strumentazione di prova deve registrare i seguenti parametri:

- Carico di impatto applicato al montante [kN];
- Velocità di impatto della testa impattante [m/s];
- Spostamento dinamico del palo all'altezza dell'impatto [mm];
- Durata dell'impatto [ms].

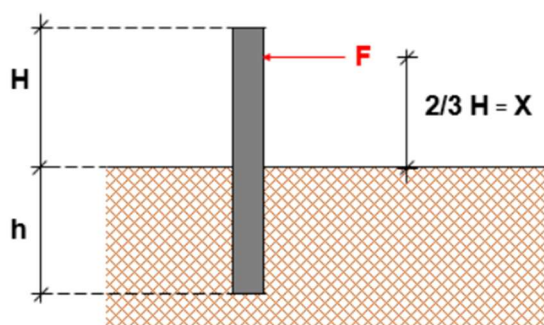
La strumentazione deve essere dotata di un sistema di acquisizione capace di registrare, durante l'impatto, i parametri sopra indicati, con una risoluzione di misura non inferiore a 24 bit ed una frequenza di campionamento dati non inferiore a 5.000 Hz.

La valutazione dell'accettabilità dell'interazione palo-terreno si basa sul principio secondo cui, se in sito si ottiene un valore confrontabile con quello di riferimento misurato in Campo Prove, la prestazione del montante può considerarsi soddisfacente. Per garantire la confrontabilità dei risultati è però essenziale che le condizioni di prova rimangano identiche nei due test.

Prima di effettuare la prova in sito è necessario disporre del Rapporto della prova di riferimento, effettuata presso il Campo Prove, contenente:

- descrizione del palo testato (materiale, sezione, spessore, etc.);
- materiale della testa impattante dell'attrezzatura di prova;
- altezza del palo sopra al piano campagna (H);
- profondità di infissione (h);
- velocità d'impatto, massa impattante ed energia di impatto.

L'altezza di applicazione della forza deve essere pari a $2/3$ dell'altezza del palo sopra il piano campagna, come mostrato nella figura sottostante:



Configurazione di prova

L'energia d'impatto minima da utilizzare nelle prove dinamiche è funzione del livello di contenimento della barriera testata e dall'interasse dei pali, come mostrato nella tabella sottostante:

		Energia minima [kJ]
Livello di contenimento	N2 d<2m	7 kJ
	N2 d>2m	8 kJ
	H1	8 kJ
	H2	9 kJ
	H3	11 kJ
	H4	12 kJ

Energia di impatto per ogni livello di contenimento

I risultati delle prove dinamiche vengono espressi attraverso la Capacità di Dissipazione dell'Energia (CE). Questo indicatore è direttamente legato allo spostamento dinamico che il palo subisce durante l'impatto e alla durata necessaria affinché il sistema dissipi l'energia trasmessa dal colpo.

I parametri fondamentali da analizzare sono:

- l'entità dello spostamento del montante nel punto di applicazione dell'urto [mm];
- l'intervallo di tempo richiesto per raggiungere il massimo spostamento dinamico [ms].

Queste misure devono essere riportate graficamente in un diagramma spostamento-tempo all'interno del Rapporto di Prova:

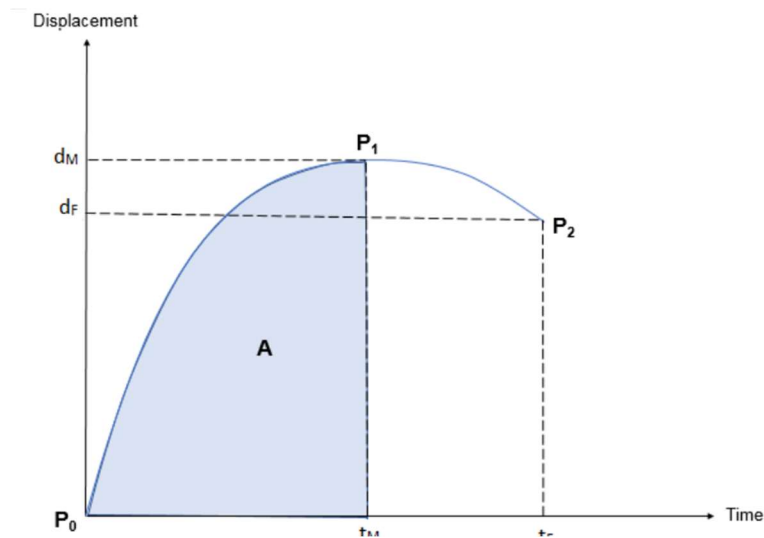


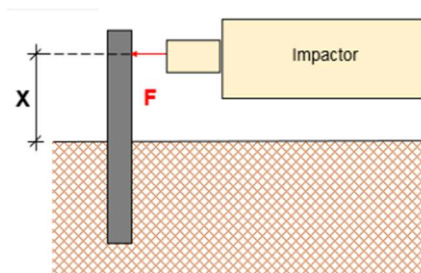
Grafico spostamento-tempo di una prova dinamica

In cui:

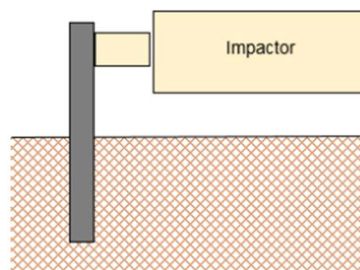
- P0 (0;0) inizio della prova;
- P1 (t_M ; d_M) massima deflessione dinamica del palo;
- P2 (t_F ; d_F) fine della prova (momento in cui palo ed impattatore si distaccano);
- t_M = tempo che impiega il palo per dissipare tutta l'energia proveniente dall'urto e raggiungere la sua massima deflessione dinamica;
- d_M = massima deflessione dinamica del palo calcolata all'altezza dell'impatto;
- t_F = tempo che impiega il palo per arrivare alla sua configurazione di equilibrio statico;
- d_F = deflessione statica all'altezza dell'impatto.
- A = area sottesa alla curva Spostamento-Tempo fino al punto di massima deflessione dinamica

Il procedimento per costruire il grafico Spostamento –Tempo è diviso in quattro fasi:

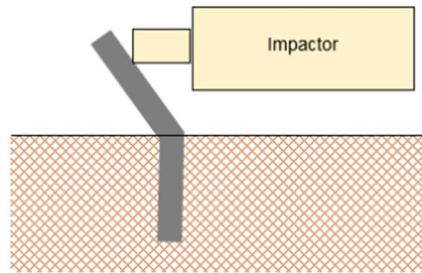
- Fase 1: Posizionamento della macchina di prova sul paletto da sottoporre a prova (configurazione indeformata);



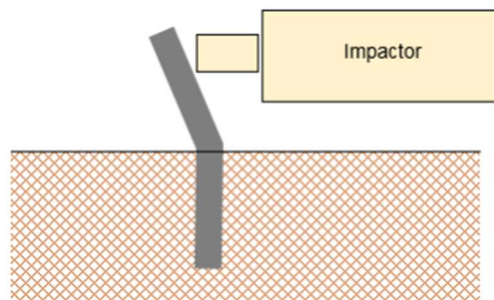
- Fase 2: Inizio della prova (applicazione della forza d'impatto);



- Fase 3: Massima deflessione del paletto;



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



La Capacità di Dissipazione dell'Energia (CE) è un parametro che dipende dall'inverso dell'area sottesa alla curva sottesa allo Spostamento [mm] – Tempo [ms] calcolata fino al punto di massima deflessione dinamica (P1), ossia il momento in cui l'energia d'impatto è stata completamente dissipata e l'impattatore inverte il suo moto fino al raggiungimento, da parte del palo, della configurazione di equilibrio statico.

La Capacità di Dissipazione dell'Energia (CE) si calcola come segue:

$$CE = \text{Capacità di dissipazione dell' energia} = 100 / \text{Area}$$

Un esempio di confronto tra due prove, effettuate in sito e in Campo Prove, è riportata nella figura sottostante dove la curva blu è quella ottenuta con la prova dinamica eseguita in Campo Prove, mentre la curva arancione è quella ottenuta con la prova dinamica eseguita in sito.

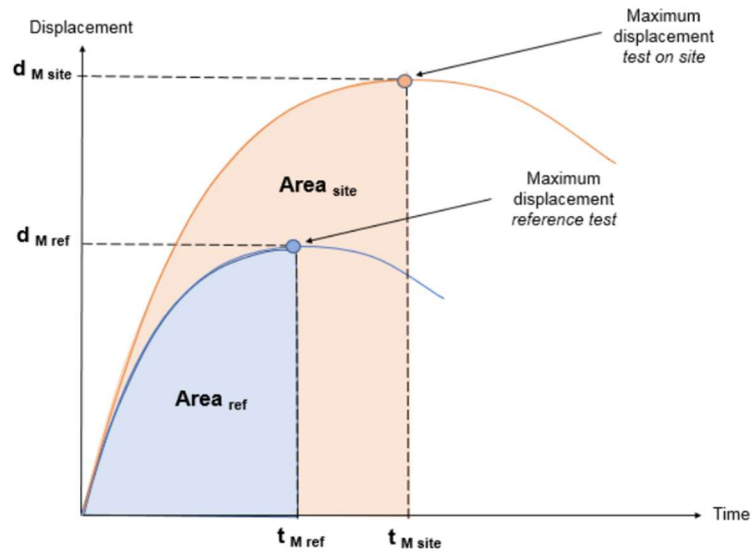


Grafico spostamento-tempo di confronto tra condizione reale (in sito) e di riferimento (in Campo Prove)

In cui:

- $d_{M \text{ ref}}$ = deflessione dinamica massima del palo misurata durante la prova “di riferimento” in Campo Prove;
- $t_{M \text{ ref}}$ = tempo impiegato dal palo per dissipare tutta l’energia proveniente dall’impatto durante la prova “di riferimento” in Campo Prove;
- $d_{M \text{ site}}$ = deflessione dinamica massima del palo misurata durante la prova in sito;
- $t_{M \text{ site}}$ = tempo impiegato dal palo per dissipare tutta l’energia proveniente dall’impatto durante la prova in sito.

$$C_{E \text{ ref}} = \text{capacità di dissipazione dell'energia ref} = \frac{100}{Area_{\text{ref}}}$$

$$C_{E \text{ site}} = \text{capacità di dissipazione dell'energia site} = \frac{100}{Area_{\text{site}}}$$

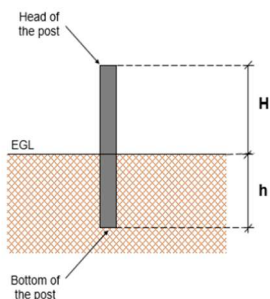
In cui:

- CE ref = Capacità di Dissipazione dell'Energia “di riferimento” ottenuta con la prova nel Campo Prove;
- CE site = Capacità di Dissipazione dell'Energia ottenuta con la prova in sito:
- Area ref = Area sottesa alla curva spostamento – tempo calcolata fino al punto di massima deflessione dinamica “di riferimento” ottenuta con la prova nel Campo Prove;
- Area site = Area sottesa alla curva spostamento – tempo calcolata fino al punto di massima deflessione dinamica ottenuta con la prova in sito.

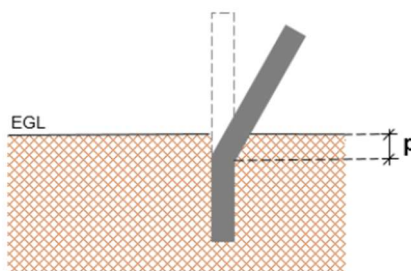
La prova dinamica si può considerare superata se i valori di CE ottenuti in Sito (CE Sito) si mantengono sufficientemente prossimi a quelli ottenuti in Campo Prova (CE Campo Prova) ed in particolare non risultano inferiori al 75% di (CE Campo Prova) e non maggiori al 110% di (CE Campo Prova), (limiti indicati nel rapporto tecnico UNI/TR 11785:2020).

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

In alcuni casi può risultare difficile individuare con precisione, direttamente in sito, la posizione della cerniera plastica; tuttavia, quando possibile, tale informazione deve essere riportata nel Rapporto di Prova. La profondità della cerniera plastica è definita come la distanza tra il piano campagna e il punto p in cui il palo manifesta la deformazione dovuta al comportamento flessione-torsionale, come illustrato in modo schematico nella figura sottostante.



Configurazione pre urto

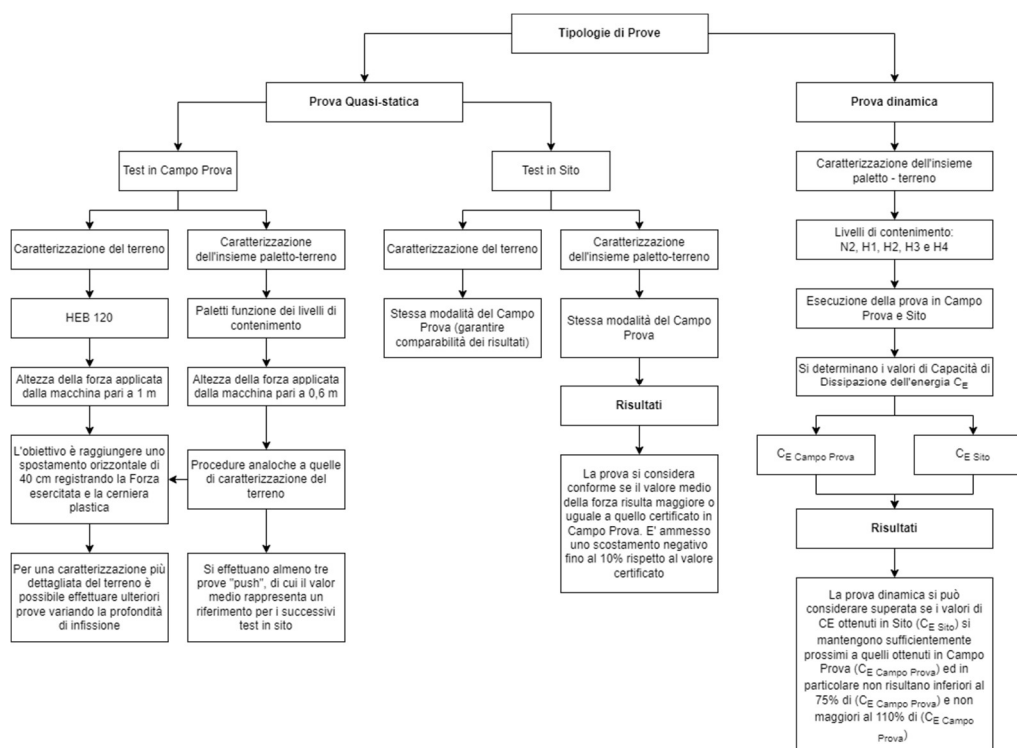


Configurazione post urto

4.13. Confronto tra prove quasi statiche e prove dinamiche

Per completezza, la figura sottostante propone uno schema che sintetizza le principali differenze e le condizioni di equivalenza tra le due tipologie di prova. Nella prova quasi statica, il processo valutativo prevede dapprima la caratterizzazione del terreno e, successivamente, la caratterizzazione dell'interazione palo-terreno, svolta sia in Campo Prove sia in sito. La prova dinamica, al contrario, consente di caratterizzare direttamente il sistema palo-terreno sulla base dei livelli di contenimento previsti per la specifica categoria stradale.

Anche i risultati assumono forme diverse: nella prova quasi statica l'attenzione è rivolta alla relazione carico-spostamento, mentre nella prova dinamica il parametro di riferimento è la Capacità di Dissipazione dell'Energia (CE). La verifica si considera soddisfatta quando il valore di CE misurato in sito rientra nell'intervallo compreso tra il 75% e il 110% del corrispondente valore ottenuto in Campo Prove.



Schema riassuntivo prova quasi statica e prova dinamica

4.14. Prova quasi statica – modellazione tramite software numerico

Il presente lavoro di tesi nasce dall'intento di introdurre un approccio innovativo nel processo di verifica della corretta posa del paletto, proponendo l'impiego di un modello numerico capace di ridurre tempi e costi associati alle prove di push eseguite in sito in regime quasi statico.

L'iter attualmente adottato prevede la realizzazione preliminare di prove di push in un apposito campo prova; sulla base dei risultati ottenuti in questa fase, e in particolare del valore limite della forza massima registrata, si procede successivamente all'esecuzione della prova in sito, replicando la medesima procedura al fine di caratterizzare il terreno specifico su cui verrà installata la barriera di sicurezza.

I valori misurati in sito devono risultare coerenti con quelli ottenuti in campo prova; qualora la forza mobilitata risulti inferiore, si rende necessario valutare l'adozione di soluzioni correttive, quali l'aumento della profondità di infissione del paletto.

Tenendo conto di quanto sopra esposto, l'obiettivo del presente capitolo è verificare la possibilità di sostituire le prove in sito con una modellazione numerica agli elementi finiti. La simulazione viene condotta riproducendo fedelmente le condizioni reali di prova e le caratteristiche geotecniche del terreno di bordo rilevato.

L'ambizione è dunque quella di verificare se un modello numerico opportunamente calibrato possa costituire un valido strumento predittivo, riducendo la necessità di prove sperimentali ripetute e contribuendo a una gestione più efficiente e consapevole del processo di installazione delle barriere di sicurezza.

Viene riportato nella figura sottostante un grafico semplificato per descriverne meglio il processo

5. Modellazione numerica

Il Metodo degli Elementi Finiti (FEM), sviluppato a partire dagli anni '60, rappresenta un approccio numerico-ingegneristico che consente di affrontare e risolvere problemi fisici complessi attraverso un metodo semplice ma efficace. Questo metodo consiste nel suddividere un sistema reale, spesso caratterizzato da geometrie irregolari, materiali non lineari o condizioni di carico difficilmente trattabili analiticamente, in un insieme di elementi più piccoli e gestibili. Ciascun elemento è descritto da equazioni relativamente semplici, ma l'assemblaggio di tutti gli elementi permette di ricostruire il comportamento dell'intero sistema con un elevato grado di accuratezza.

L'utilizzo del FEM offre la possibilità di analizzare il comportamento di un oggetto o di una struttura prima della sua realizzazione fisica. Questo consente di prevedere criticità, ottimizzare geometrie e materiali, e valutare scenari alternativi senza dover ricorrere a prototipi fisici o prove sperimentali ripetute. In ambito ingegneristico, e in particolare nelle applicazioni geotecniche, il FEM permette inoltre di simulare l'interazione terreno-struttura, un fenomeno intrinsecamente complesso e non lineare, restituendo informazioni su spostamenti, deformazioni e forze mobilitate.

I principali vantaggi dell'analisi FEM sono:

- elevata precisione nella rappresentazione del comportamento reale, grazie alla possibilità di modellare geometrie complesse e materiali con leggi costitutive avanzate;
- progettazione di prototipi virtuali, che consente di testare soluzioni alternative senza ricorrere a costose prove fisiche;
- riduzione dei tempi e dei costi di progettazione, poiché molte verifiche possono essere condotte numericamente prima della produzione o dell'installazione.

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

1. discretizzazione del modello: modellazione della geometria del problema mediante l'assemblaggio di elementi finiti;
2. approssimazione della variabile primaria: definisce la modalità con cui tale variabile viene fatta variare all'interno di ciascun elemento finito. Nel campo dell'ingegneria geotecnica, la variabile primaria adottata è rappresentata dagli spostamenti, che costituiscono la base per descrivere la risposta meccanica del sistema terreno-struttura.
3. equazione degli elementi: applicazione di un principio variazionale adeguato ad 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.

5.1. Modellazione in RS3

RS3 è un software tridimensionale avanzato per l'analisi di strutture geotecniche, sviluppato per applicazioni sia in ambito civile sia minerario. Progettato per operare su materiali sia rocciosi sia sciolti (da cui il nome *Rock and Soil 3-dimensional analysis program*), RS3 si configura come un programma agli elementi finiti di tipo general purpose, capace di affrontare una vasta gamma di problemi ingegneristici complessi.

Il software consente di modellare e analizzare scavi in sotterraneo, progettare gallerie e sistemi di sostegno, studiare scavi superficiali, fondazioni, rilevati, processi di consolidazione e fenomeni di filtrazione delle acque nel sottosuolo. Grazie alla sua capacità di rappresentare geometrie articolate, condizioni al contorno realistiche e leggi costitutive avanzate, RS3 permette

di simulare in modo accurato l'interazione terreno–struttura e di prevedere il comportamento meccanico del sistema in condizioni operative diverse.

Dopo aver analizzato le caratteristiche tecniche e operative del problema, si è deciso di sviluppare la modellazione mediante questo software di tipo geotecnico, nonostante il lavoro di tesi sia collocato nell'ambito stradale. Questa scelta nasce dall'esigenza di rappresentare il terreno in modo più realistico, sfruttando parametri geotecnici che consentono di descriverne con maggiore accuratezza il comportamento meccanico e l'interazione con il paletto.

Il modello numerico è stato quindi strutturato attraverso una sequenza ordinata di fasi, che parte dall'impostazione preliminare della geometria e delle proprietà dei materiali, prosegue con la definizione delle condizioni al contorno e dei carichi applicati, e si conclude con l'elaborazione e l'interpretazione dei risultati ottenuti.

L'intero processo segue un percorso logico ben definito che garantisce coerenza, riproducibilità e affidabilità della simulazione:

1. realizzazione della geometria: il software, permette di importare file provenienti da altri programmi, in questo caso la costruzione del modello è stata elaborata tramite il 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: attribuzione ai vari strati del terreno e al paletto dei corretti parametri;
4. applicazione della forza da attribuire al paletto;
5. applicazione dei vincoli al modello;
6. applicazione della mesh;
7. ottenimento dei risultati.

Vengono in seguito approfondite nel dettaglio le fasi sopra esposte.

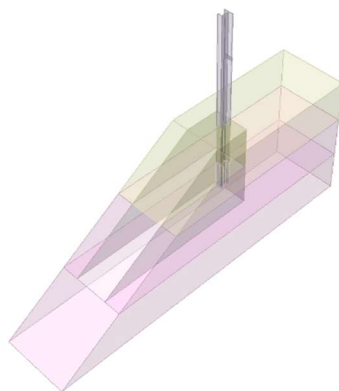
5.2. Realizzazione del modello

La modellazione tridimensionale è stata sviluppata a partire dai dati acquisiti durante le prove in sito, che hanno consentito di ricostruire la geometria del sistema con un livello di approssimazione coerente con le condizioni reali. Le informazioni raccolte hanno permesso di definire con precisione le principali caratteristiche geometriche del modello, garantendo una rappresentazione adeguata alle successive fasi di analisi numerica.

Per migliorare ulteriormente l'accuratezza geometrica, il modello è stato inizialmente elaborato in ambiente CAD e solo in un secondo momento importato nel software RS3 permettendo di ottenere una definizione più dettagliata e controllata della geometria. La configurazione finale del modello rappresenta un elemento capace di restituire risultati stabili e coerenti con il comportamento atteso del sistema.

Per quanto riguarda il terreno di infissione del paletto, esso è stato suddiviso in tre strati distinti, ciascuno dello spessore di 0,6 m, al fine di semplificare la modellazione senza compromettere la rappresentatività del profilo geotecnico, per ciascun livello è stato adottato un valore medio dei parametri, ottenuto dall'elaborazione dei dati sperimentali.

Viene riportato nella figura sottostante il modello tridimensionale adottato e nella tabella seguente le relative dimensioni.

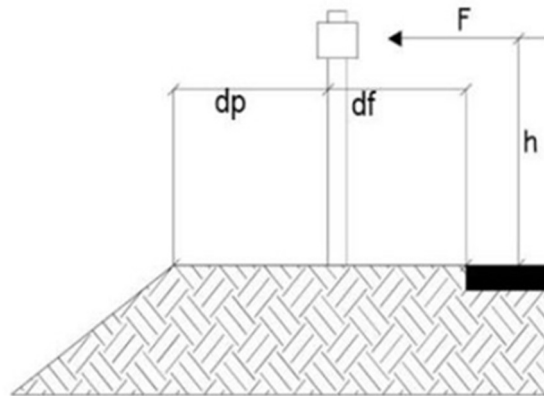


Modello tridimensionale

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

Tabella 17 Dimensioni modello

Viene riportato nella figura sottostante uno schema riguardante la posizione del paletto dal bordo della scarpata del rilevato e nella tabella seguente le relative dimensioni.



Schema semplificato della posizione del paletto

Modello	Dimensioni [m]
Lunghezza paletto	2,6
Infissione	1
Altezza di applicazione della forza	1
Distanza frontale (df)	0,12
Distanza posteriore (dp)	0,3
Inflessione massima	0,4

Tabella 18 Dimensioni modello

5.3. Definizione dei parametri iniziali

In seguito alla definizione delle unità di misura dei dati utilizzati all'interno del modello, vengono definiti gli stages che rappresentano fasi successive di applicazione del carico, utilizzate per incrementare in modo controllato la sollecitazione orizzontale agente sul paletto. Ogni stage corrisponde a un livello di carico più elevato rispetto al precedente, consentendo di seguire passo dopo passo l'evoluzione dello spostamento e di ricostruire l'intera curva forza–spostamento.

L'incremento di carico parte da una fase iniziale in cui il carico è nullo e si procede con incrementi successivi fino a raggiungere la forza massima registrata in corrispondenza dello spostamento di 0,4 m. La progressione è stata articolata mediante incrementi regolari, calibrati di volta in volta in funzione della specifica prova considerata.

Questa modalità operativa consente di osservare in modo continuo come il sistema terreno–paletto reagisce all'aumento della sollecitazione, permettendo di cogliere non solo il comportamento al raggiungimento del valore massimo, ma anche la risposta nelle fasi intermedie. In questo modo è possibile ottenere una rappresentazione più completa e affidabile del processo di deformazione.

5.4. Proprietà fisico-meccaniche del sistema paletto-terreno

Le proprietà dei materiali sono state attribuite al modello a partire dai dati ottenuti dalle prove penetrometriche dinamiche, condotte mediante l'attrezzatura DPSH TG 63-200 della Pagani, che hanno fornito i parametri necessari alla caratterizzazione geotecnica del terreno.

La DPSH è una prova penetrometrica dinamica utilizzata per valutare la resistenza del terreno in profondità. È una prova in sito, rapida e relativamente economica, molto diffusa in ambito geotecnico per caratterizzare terreni sciolti o debolmente coesivi.

Viene eseguita facendo penetrare nel terreno una punta conica standardizzata tramite la caduta ripetuta di un maglio di massa nota da un'altezza costante:

- massa del maglio: 63,5 kg
- altezza di caduta: 75 cm

La misura fondamentale è il numero di colpi necessari per far avanzare la punta di 10 cm che rappresenta un indice della resistenza del terreno.

Descrizione prova

Prima dell'inizio della prova viene predisposto il sistema di infissione, composto dalla punta conica, dalle aste di prolunga e dal dispositivo di battuta. L'attrezzatura viene posizionata verticalmente sul punto da indagare, si può quindi procedere con la caduta del maglio lungo la guida. Ogni colpo imprime un'energia costante alla punta, che avanza nel terreno per effetto dell'impatto. L'operatore registra il numero di colpi necessari per far penetrare la punta di un tratto standardizzato.

Durante la prova viene annotato il numero di colpi necessari per ottenere un avanzamento di 10 cm. Questa registrazione viene ripetuta per tutta la profondità investigata, ottenendo un profilo continuo della resistenza del terreno.

La prova prosegue con la stessa modalità fino al raggiungimento della profondità stabilita. Al termine, i valori registrati vengono elaborati per ricavare parametri geotecnici rappresentativi, spesso mediati per strati, da utilizzare nella modellazione numerica o nella caratterizzazione del terreno, come attuato in questa tesi.



Attrezzatura Pagani TG 63-200

Determinazione parametri geotecnici

La correlazione che lega il Nr. di colpi al valore di N_{SPT} è determinata tramite il coefficiente β_t che è dato dal rapporto tra l'energia specifica per colpo Q e l'energia riferita alla prova SPT Q_{SPT} .

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

In cui:

- $Q = 11,66 \text{ Kg/cm}^2$, E specifica teorica DPSH;
- $Q_{SPT} = 7,83 \text{ Kg/cm}^2$, E della SPT.

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

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

L'utilizzo di questo coefficiente per la conversione tra numero di colpi riferiti alla prova DPSH e N_{SPT} potrebbe risultare improprio poiché il coefficiente β_t nasce per rendere confrontabili valori di resistenza/capacità (Q), non per convertire direttamente il numero di colpi, esso infatti non deriva dalla meccanica della prova (come energia, massa, penetrazione per colpo).

Questa correlazione, però, sviluppata da Giulio Riga, viene utilizzata poiché permette di confrontare i risultati delle prove DPSH con le correlazioni empiriche elaborate per lo SPT e non con i suoi risultati; infatti, il valore N_{SPT} così ottenuto non è il numero di colpi “fisico” che si misurerebbe con un campionatore SPT, ma un valore equivalente da usare nelle formule empiriche (ad esempio per stimare E_s , capacità portante, ecc.).

Riga sottolinea che si tratta di una conversione empirica, valida solo se si conoscono bene le energie in gioco e se il terreno è compatibile con le correlazioni SPT, non sostituisce una prova SPT reale.

Inoltre, eseguendo test paralleli SPT e DPSH sugli stessi terreni, si evince che l'energia teorica dei due sistemi è simile ($\approx 475 \text{ J}$), ma l'energia effettiva

trasmessa varia molto in funzione dell'attrezzatura e delle condizioni. Nelle prove DPSH si tende a trasmettere più energia rispetto alle SPT standardizzate; ne consegue che per lo stesso terreno, il DPSH penetra più facilmente, e quindi il suo numero di colpi è più basso, come si evince utilizzando la formulazione di Riga. [14]

In questo lavoro di tesi è stata assunta tale formulazione poiché rappresenta una buona approssimazione, motivo per cui, pur con le dovute cautele interpretative, scegliamo di adottare questo metodo come riferimento operativo.

Al fine di poter determinare i parametri geotecnici vengono definite le grandezze ricavate in una SPT attraverso l'utilizzo del N_{SPT} :

- N_{60} , valore di SPT normalizzato all'energia standard del 60%, così da poter confrontare prove eseguite con attrezzature e condizioni diverse.

$$N_{60} = N_{SPT} * C_S * C_d * C_r$$

In cui:

- C_S : parametro funzione della controcamicia (1,2 se assente, 1 se standard);
- C_d : parametro funzione del diametro del foro;

Diametro del Foro	65 ÷ 115 mm	Cd	1,00
	115 ÷ 150 mm	Cd	1,05
	150 ÷ 200 mm	Cd	1,15

- C_r : parametro funzione della lunghezza delle aste.

Lunghezza delle Aste	3÷4 mt	Cr	0,75
	4÷6 mt	Cr	0,85
	6÷10 mt	Cr	0,95
	10 mt	Cr	1,00

- $N_1(60)$ è il valore di SPT normalizzato sia all'energia standard del 60% sia alla tensione verticale efficace unitaria. Rappresenta quindi il numero di colpi SPT corretto per l'energia realmente trasmessa e per l'effetto della profondità e delle tensioni geostatiche (tramite il fattore di correzione C_N). Viene calcolato come segue:

$$(N1)_{60} = C_N * N_{SPT}$$

In cui il valore di C_N è dato dalla seguente formula:

- Per sabbie fini

$$C_N = \frac{2}{1 + \frac{\sigma'_{v0}}{100}}$$

- Per sabbie grossolane

$$C_N = \frac{3}{2 + \frac{\sigma'_{v0}}{100}}$$

La modellazione numerica è stata impostata rappresentando il profilo di sottosuolo mediante tre macro-strati di 60 cm, ciascuno caratterizzato da proprietà geotecniche omogenee. Per attribuire in modo coerente i parametri a ciascuno di essi, il terreno è stato inizialmente discretizzato in intervalli di 20 cm, ognuno dotato del proprio angolo di attrito e del relativo modulo elastico. Successivamente, i valori ottenuti per i primi tre intervalli sono stati mediati, così da definire i parametri geotecnici rappresentativi del primo strato, la stessa procedura è stata poi applicata al secondo e infine all'ultimo strato.

La definizione dei parametri geotecnici per il primo intervallo di 20 cm è stata condotta con un criterio differente rispetto agli strati sottostanti, poiché in questa porzione il terreno risulta localmente disturbato e presenta

caratteristiche meccaniche più scadenti a seguito dell'infissione del paletto.

Angolo di attrito

La determinazione dell'angolo di attrito del terreno è stata calcolata come segue:

- Primo strato, Navfac (1982):

$$\varphi_{NAVFAC} = 27^\circ + 0,25 N_{60}$$

- Successivi strati, Hatanaka and Uchida (1996):

$$\phi = (20N_{(60)})^{0.5} + 20$$

Modulo elastico

La determinazione del modulo elastico del terreno è stata calcolata come segue:

- Primo strato, Bowles [16] (1982):

$$E_Y = 3,2 \cdot (N_{SPT} + 15)$$

- Successivi strati, media per ogni strato tra le seguenti equazioni di Bowles (1982), che sono riferite rispettivamente a sabbie limose e sabbie medie:

$$E_Y = 3,0 \cdot (N_{SPT} + 6)$$

$$E_Y = 5,0 \cdot (N_{SPT} + 15)$$

Coesione

Nel modello è stata assunta una coesione pari a 5 kPa, uniforme per tutti gli strati, ritenuto coerente sia con le caratteristiche del terreno sia con il criterio di rottura adottato, infatti non è un valore così elevato da sovrastimare la resistenza, ma neppure nullo, così da rappresentare in modo realistico il lieve contributo coesivo.

Nel modello numerico il comportamento del terreno è stato rappresentato attraverso il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, un approccio semplice ma molto efficace per descrivere la risposta dei terreni quando sono soggetti a stati di sforzo crescenti. Questo criterio assume che la resistenza al taglio dipenda da due grandezze fondamentali, coesione e angolo di attrito, e che il materiale raggiunga la rottura quando la combinazione delle tensioni principali supera un involucro lineare. Anche non rappresentando in modo completo gli aspetti più complessi del comportamento non lineare dei terreni, il modello offre una descrizione affidabile dei meccanismi di rottura e risulta adatto all'analisi ingegneristica effettuata.

La modellazione del paletto è stata impostata assumendo un comportamento elastico lineare, attribuendo un modulo di Young pari a 210 GPa ed un peso per unità di volume di 78,5 kN/m³. Questa scelta riflette il fatto che nell'analisi, l'elemento risulta molto più rigido rispetto al terreno circostante e, di conseguenza, si comporta di fatto come un corpo quasi indeformabile che ruota e trasferisce carichi senza subire apprezzabili deformazioni.

5.5. Definizione della forza da assegnare al paletto

Nel modello numerico, l'introduzione del carico richiede l'inserimento di una pressione distribuita su una superficie definita e non l'applicazione diretta di una forza concentrata; per questo motivo è stata modellata una piccola area di contatto ad 1 m di altezza sul paletto, pari a 0,12 m × 0,04 m, sulla quale vengono applicati gli incrementi di carico.

In questo lavoro l'obiettivo è individuare il livello di carico che determina uno spostamento orizzontale di 40 cm, di conseguenza, l'analisi è stata strutturata attraverso una serie di fasi incrementali, in particolare ad ogni stage viene applicato un incremento di 2 kN, così da ricostruire progressivamente

la curva forza-spostamento fino al raggiungimento della soglia prefissata.

Il software richiede che il carico venga espresso come pressione, ogni incremento di forza F è quindi stato trasformato nella corrispondente pressione p tramite la relazione:

$$p = \frac{F}{A}$$

In cui:

- F è l'incremento di carico applicato in ciascuna fase,
- A è l'area di applicazione, pari a:

$$A = 0,12 \text{ m} \times 0,04 \text{ m} = 0,0048 \text{ m}^2$$

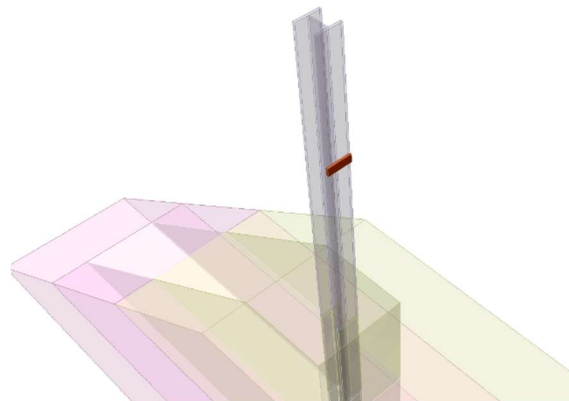
La pressione associata a ciascun incremento risulta quindi:

$$p = \frac{2 \text{ kN}}{0,0048 \text{ m}^2}$$

e viene aggiornata progressivamente ad ogni fase di carico.

Questa procedura incrementale consente di monitorare con precisione la risposta del sistema e di individuare il valore di forza registrata in corrispondenza di uno spostamento orizzontale di 40 cm. Inoltre, garantisce una corretta rappresentazione del carico all'interno del modello numerico, assicurando coerenza tra l'input assegnato e il comportamento simulato.

La configurazione del modello permette anche di visualizzare con precisione il punto di applicazione del carico come si evince dalla figura sottostante:



Punto di applicazione della forza

All'interno del software, la pressione viene assegnata impostando sulla superficie di contatto una Magnitude unitaria espressa in kN/m²; l'intensità reale del carico applicato in ciascuna fase non viene quindi definita direttamente, ma è controllata attraverso lo Stage Factor:

$$p_{\text{eff}} = \text{Magnitude} \times \text{Stage Factor}$$

Questo parametro consente di scalare la pressione in funzione degli incrementi di forza previsti nell'analisi, rendendo possibile la costruzione della sequenza di carico necessaria per raggiungere lo spostamento orizzontale di 40 cm.

L'adozione dello *Stage Factor* permette di:

- gestire incrementi progressivi di carico senza modificare ogni volta la definizione del carico;
- evitare instabilità numeriche, introducendo variazioni graduali;
- controllare con precisione la sequenza di carico nelle analisi in cui si cerca un valore limite (40cm);
- mantenere la definizione del carico pulita e costante, modificando solo il fattore moltiplicativo.

5.6. Impostazione dei vincoli

In RS3 i restraints, rappresentano le condizioni al contorno applicate al modello, ovvero i vincoli che impediscono o limitano gli spostamenti dei nodi. Sono fondamentali per garantire che il modello sia staticamente ben definito e che la simulazione rappresenti correttamente le condizioni reali del problema. I restraints stabiliscono quindi quali gradi di libertà sono bloccati e quali sono liberi di muoversi.

L'imposizione corretta di questi vincoli è fondamentale per assicurare che la risposta del modello sia coerente con il comportamento reale del sistema.

RS3 permette di applicare diversi tipi di vincolo, ciascuno con una funzione specifica, a diverse parti del modello, come facce, bordi o vertici, definiti come:

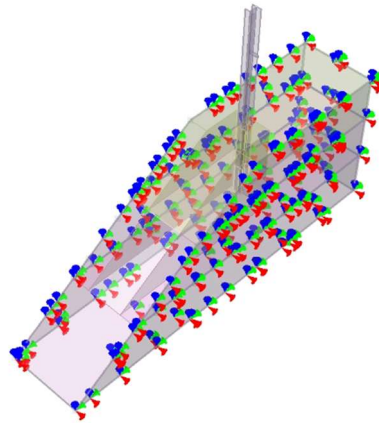
- Fixed Restraint (vincolo totale), blocca completamente i gradi di libertà del nodo in modo da non permettere nessuno spostamento in una o più direzioni (X, Y, Z);
- Free Restraint (vincolo parziale), permette lo spostamento in tutte le direzioni senza alcuna restrizione.

Nel modello sviluppato per questo studio è stata adottata una configurazione dei vincoli pensata per riprodurre in modo credibile le condizioni al contorno del problema. In particolare, il paletto e la superficie del rilevato non sono stati soggetti ad alcuna restrizione, così da consentire la libera evoluzione degli spostamenti e analizzare l'interazione tra terreno e struttura.

Le superfici laterali del dominio sono state invece vincolate lungo tutte le direzioni, impedendo qualsiasi movimento dei nodi e garantendo che il modello non presenti spostamenti rigidi indesiderati. Nella parte inferiore, il blocco totale degli spostamenti lungo gli assi X, Y e Z ha permesso di rappresentare una base completamente rigida, condizione necessaria per stabilizzare l'intero sistema.

Questa configurazione dei vincoli costituisce un elemento fondamentale per assicurare la stabilità numerica dell'analisi e per ottenere una risposta del modello coerente con il comportamento atteso sotto l'azione del carico applicato.

La disposizione dei vincoli e la loro estensione sono riportate nella figura sottostante.



Configurazione dei vincoli

5.7. Definizione della mesh di calcolo

In RS3 la mesh rappresenta la discretizzazione del modello tridimensionale in un insieme di elementi finiti, ovvero il dominio continuo viene suddiviso in tanti piccoli elementi tridimensionali che permettono al software di:

- calcolare spostamenti, tensioni e deformazioni;
- risolvere le equazioni dell'analisi FEM;
- rappresentare in modo più accurato la risposta del sistema.

La qualità della mesh influisce direttamente su:

- accuratezza dei risultati,
- stabilità numerica,
- tempi di calcolo,
- capacità di catturare gradienti di deformazione o zone critiche.

Nella discretizzazione del modello, RS3 utilizza elementi tetraedrici che possono essere sia a 4 nodi sia a 10 nodi. I primi rappresentano la forma più

semplice dell'elemento finito tridimensionale, ovvero ogni tetraedro è definito esclusivamente dai suoi quattro vertici e descrive le deformazioni interne attraverso una funzione di forma lineare. Questo li rende particolarmente leggeri dal punto di vista computazionale e molto robusti nella generazione della mesh, soprattutto quando la geometria del dominio è complessa o presenta irregolarità. Tuttavia, la loro semplicità comporta una minore capacità di catturare variazioni locali di tensione e deformazione, motivo per cui possono richiedere una discretizzazione più fitta per raggiungere livelli elevati di accuratezza.

Gli elementi a 10 nodi, invece, introducono sei nodi aggiuntivi posizionati lungo gli spigoli del tetraedro. Questa configurazione permette di utilizzare funzioni di forma quadratiche, in grado di rappresentare in modo più raffinato la distribuzione delle deformazioni all'interno dell'elemento. Di conseguenza, questi elementi risultano molto più accurati, soprattutto nelle zone in cui si concentrano gradienti elevati di sforzo o dove il comportamento del materiale è particolarmente non lineare. L'aspetto negativo è che richiedono un maggiore impegno computazionale, sia in termini di memoria sia di tempo di calcolo.

L'utilizzo combinato di entrambe le tipologie, la cosiddetta mesh ibrida, consente di sfruttare i punti di forza di ciascun elemento, quelli a 4 nodi garantiscono efficienza e stabilità nelle aree meno critiche, mentre quelli a 10 nodi assicurano una descrizione più accurata nelle zone dove è necessario cogliere con precisione la risposta meccanica del sistema. Questa flessibilità rende la mesh di RS3 particolarmente adatta a modelli geotecnici complessi.

Nel processo di discretizzazione del modello, RS3 permette di scegliere tra diverse modalità di generazione della mesh, che si differenziano per distribuzione e densità degli elementi. Una prima opzione è la mesh Uniform, che produce una suddivisione omogenea dell'intero dominio, gli elementi mantengono dimensioni simili in tutte le regioni del modello garantendo una discretizzazione regolare e facilmente controllabile. Questa configurazione è

utile quando non si prevedono zone con forti gradienti di deformazione o quando si desidera mantenere una struttura della mesh semplice e bilanciata.

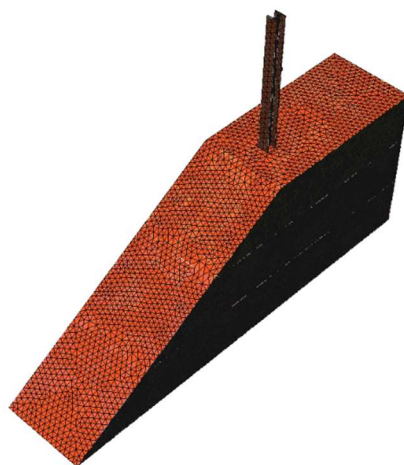
In alternativa, è possibile adottare una mesh Graded, caratterizzata da una variazione progressiva della dimensione degli elementi. In questo caso, il software concentra elementi più piccoli e fitti nelle aree considerate critiche, ad esempio in prossimità del paletto o della zona di applicazione del carico, mentre utilizza elementi più grandi nelle regioni periferiche, dove la risposta meccanica è meno sensibile. Questo approccio consente di aumentare la precisione nelle zone di interesse senza appesantire eccessivamente il modello, ottimizzando il rapporto tra accuratezza e tempi di calcolo.

Oltre a queste modalità, RS3 offre anche la possibilità di generare la mesh tramite un algoritmo automatico di discretizzazione, che valuta la geometria del dominio e produce una suddivisione coerente con la complessità del modello, adattando la dimensione degli elementi in modo intelligente.

La scelta della mesh riveste un ruolo cruciale nella simulazione numerica poichè una discretizzazione troppo grossolana può portare a risultati poco affidabili, incapaci di cogliere correttamente la distribuzione delle deformazioni, mentre una mesh eccessivamente fine aumenta i tempi di calcolo e può risultare inefficiente se non supportata da una calibrazione adeguata del modello. L'obiettivo è quindi trovare un equilibrio tra dettaglio locale e costo computazionale, così da garantire stabilità, convergenza e una rappresentazione accurata del comportamento del sistema.

Nel modello sviluppato per questo studio si è adottata una discretizzazione basata su una mesh tetraedrica a 4 nodi, mantenuta uniforme su tutta la geometria. Questa scelta ha portato a una suddivisione molto fitta del dominio, necessaria per descrivere con precisione le deformazioni nelle zone di interesse, ma che ha comportato tempi di calcolo particolarmente elevati a causa dell'elevato numero di elementi generati.

La configurazione finale della mesh utilizzata nell'analisi è mostrata nella figura sottostante.



Configurazione mesh uniforme

6. Analisi delle prove di simulazione

Il presente lavoro di tesi nasce dall'intento di introdurre un approccio innovativo al processo di verifica della corretta posa dei paletti delle barriere di sicurezza, sostituendo le tradizionali prove di push in situ con un modello numerico capace di ridurre tempi e costi delle attività di controllo.

Attualmente, la procedura operativa prevede l'esecuzione di prove di push in Campo Prova, dalle quali viene ricavato il valore limite della forza massima. Successivamente, la stessa prova viene ripetuta in Sito, seguendo un protocollo analogo, per caratterizzare il terreno effettivo su cui la barriera verrà installata. I risultati ottenuti in Sito devono essere confrontabili con quelli del Campo Prova; qualora la forza risulti inferiore, è necessario valutare l'adozione di una maggiore infissione del paletto o, nei casi più critici, l'impiego di cordoli in calcestruzzo.

Partendo da questa prassi consolidata, il lavoro esplora la possibilità di introdurre una metodologia innovativa che riduca l'impegno di risorse necessario per le prove in sito, valutando se una modellazione tridimensionale del sistema paletto–terreno possa sostituire la prova di push per la caratterizzazione del terreno.

Per sviluppare l'analisi descritta, sono state esaminate nove prove DPSH eseguite e documentate da ITINERA S.p.A. lungo il tracciato dell'autostrada A33 Asti–Cuneo.

Utilizzando il software RS3 di Rocscience è stata simulata la risposta forza–spostamento del paletto infisso nel terreno (profilato HEB120, di lunghezza pari a 2,6 m), mediante l'applicazione di incrementi progressivi di carico orizzontale, ricostruendo la curva forza–spostamento e individuando il valore della forza corrispondente al raggiungimento dello spostamento massimo di 40 cm, misurato a 1 m dal piano stradale, corrispondente al livello di infissione del paletto sul rilevato, come previsto dalla normativa vigente per le prove di push.

Poiché le nove prove DPSH presentano caratteristiche geometriche e geotecniche differenti (solo la coesione rimane uniforme e costante in tutte le prove ed è pari a 5 kPa), per validare i risultati ottenuti con il modello numerico RS3 è stata analizzata in modo più approfondito la prova push 3. In una prima fase, la prova è stata ricalcolata mantenendo costanti i parametri geotecnici e variando esclusivamente la distanza del paletto dal bordo del rilevato, allo scopo di valutarne l'effetto sulla forza resistente offerta dal paletto-terreno.

Successivamente, la stessa prova push 3 è stata riesaminata incrementando l'infissione del paletto nel terreno di 0,2 m rispetto al caso base (1,0 m). Anche in questo caso la distanza paletto-bordo rilevato è stata variata mantenendo invariati i parametri geotecnici, con l'obiettivo di verificare che una maggiore infissione determinasse un aumento della forza rispetto alla configurazione iniziale.

Di seguito è riportata la tabella riassuntiva delle caratteristiche geometriche e geotecniche adottate nelle diverse prove analizzate.

Nr. prova		Infissione [mm]	Distanza bordo rilevato (dp) [mm]	Rigidezza/ Resist al taglio 1° strato [MPa/°]	Rigidezza/ Resist al taglio 2° strato [MPa/°]	Rigidezza/ Resist al taglio 3° strato [MPa/°]
1		1000	300	75	120	99
				27	32	29
2			850	75	125	150
				27	33	35
3	A1	1000	300	84	201	163
	A2		400			
	A3		500	28	40	36
	A4		700			
	A5		850			
	B1	1200	300	84	201	163
	B2		400			
	B3		500	28	40	36
	B4		700			
	B5		850			
4		1000	300	98	210	116
				31	40	31
5			500	122	137	125
				33	34	32
6			400	129	142	103
				34	35	29
7			400	135	185	231
				35	31	42
8			700	135	235	103
				34	33	29
9			300	84	218	456
				27	30	36

Tabella 19 Caratteristiche geometriche e geotecniche delle prove Push

Nell'appendice B vengono riportate per tutte le prove push analizzate in questa tesi i dati geometrici e geotecnici di ciascuna, in particolare per ogni prova vengono riportate rispettivamente le tabelle contenenti:

- dati geometrici, costituiti da:
 - lunghezza paletto;
 - infissione paletto;
 - h di applicazione della forza;
 - distanza posteriore;
 - inflessione massima.

- dati geotecnici, costituiti da:
 - profondità dello strato analizzato;
 - numero di colpi necessari per raggiungere lo strato analizzato tramite prova DPSH;
 - numero di colpi necessari per raggiungere lo strato analizzato tramite SPT;
 - N_{60} , valore di SPT normalizzato all'energia standard del 60%;
 - Tensione verticale;
 - Fattore di correzione C_N ;
 - $(N1)_{60}$, numero di colpi SPT corretto per l'energia realmente trasmessa e per l'effetto della profondità e delle tensioni geostatiche;
 - Angolo di attrito dello strato analizzato;
 - Modulo elastico dello strato analizzato;
 - Media dell'angolo di attrito per uno strato di 60 cm;
 - Media del modulo elastico per uno strato di 60 cm.

La tabella degli stage utilizzata per le prove Push è costituita da:

- numero di stage;
- area di applicazione della forza;
- forza applicata;
- pressione applicata.

La tabella degli stage utilizzata nelle prove Push di simulazione (n.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9) è la medesima riportata di seguito.

Nr. stage	Area [m ²]	Forza [kN]	Pressione [kN/m ²]
1	0.0048	0	0
2		2	417
3		4	833
4		6	1250
5		8	1667
6		10	2083
7		12	2500
8		14	2917
9		16	3333
10		18	3750
11		20	4167

Tabella 20 Prove Push-Descrizione stage (1^a fase)

L'analisi delle prove Push A5, B1, B2, B3, B4 ha richiesto l'utilizzo di una forza maggiore, correlata ad un numero di stage maggiore, al fine di raggiungere lo spostamento orizzontale di 40cm:

Nr. stage	Area [m ²]	Forza [kN]	Pressione [kN/m ²]
1	0.0048	0	0
2		2	417
3		4	833
4		6	1250
5		8	1667
6		10	2083
7		12	2500
8		14	2917
9		16	3333
10		18	3750
11		20	4167
12		22	4583
13		24	5000
14		26	5417

Tabella 21 Prove Push-Descrizione stage (2° fase)

L'analisi della prova Push B5 ha richiesto un ulteriore incremento della forza applicata, viene perciò in seguito riportata la tabella degli stage utilizzati:

Nr. stage	Area [m ²]	Forza [kN]	Pressione [kN/m ²]
1	0.0048	0	0
2		2	417
3		4	833
4		6	1250
5		8	1667
6		10	2083
7		12	2500
8		14	2917
9		16	3333
10		18	3750
11		20	4167
12		25	5208
13		30	6250
14		40	8333
15		50	10417

Tabella 22 Prove Push-Descrizione stage (3° fase)

7. Analisi dei risultati ottenuti dalla modellazione

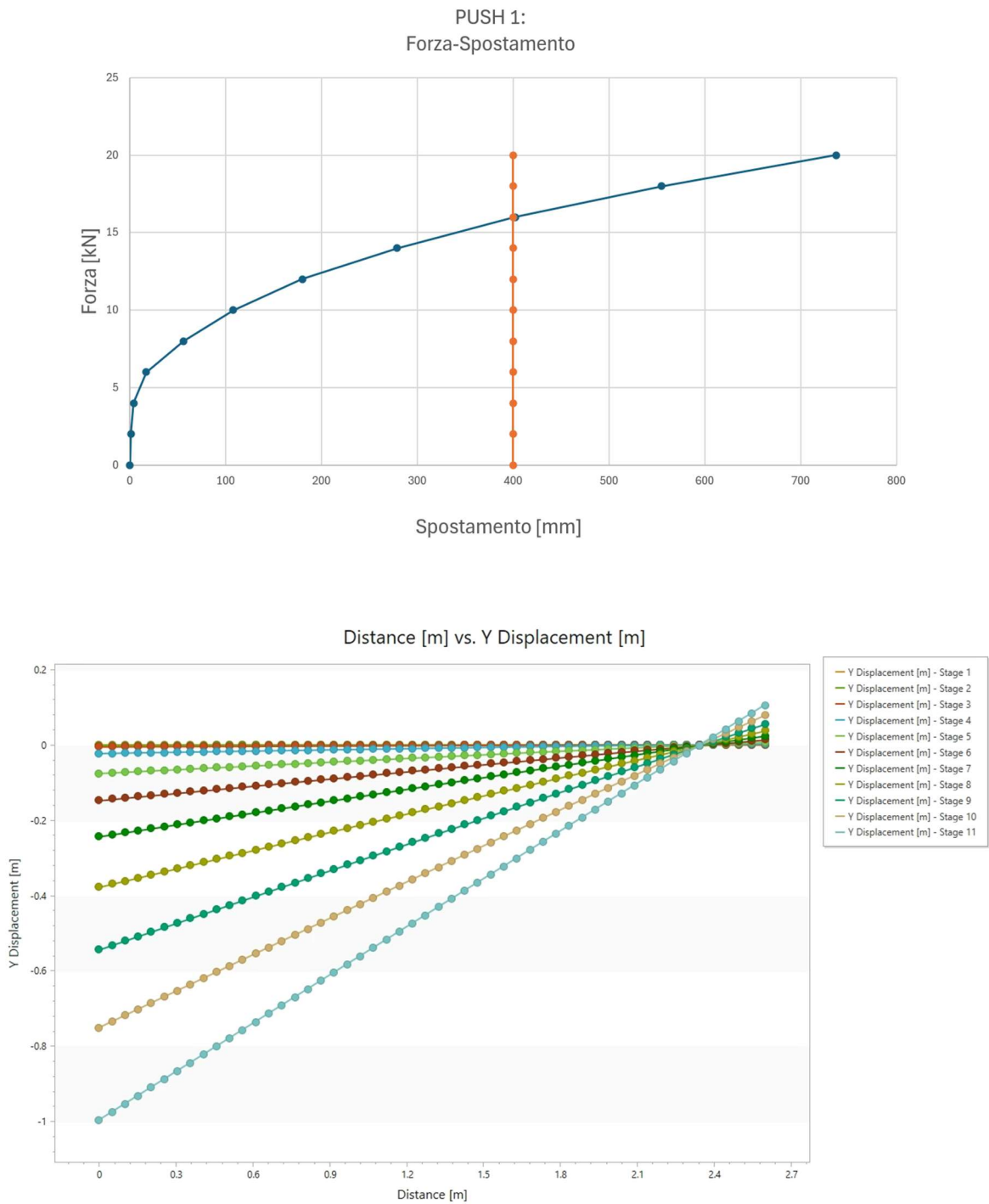
In seguito vengono riportati i risultati delle prove di Push ottenuti attraverso la modellazione numerica effettuata con il software RS3, in particolare, per ogni prova vengono riportati rispettivamente i grafici rappresentanti:

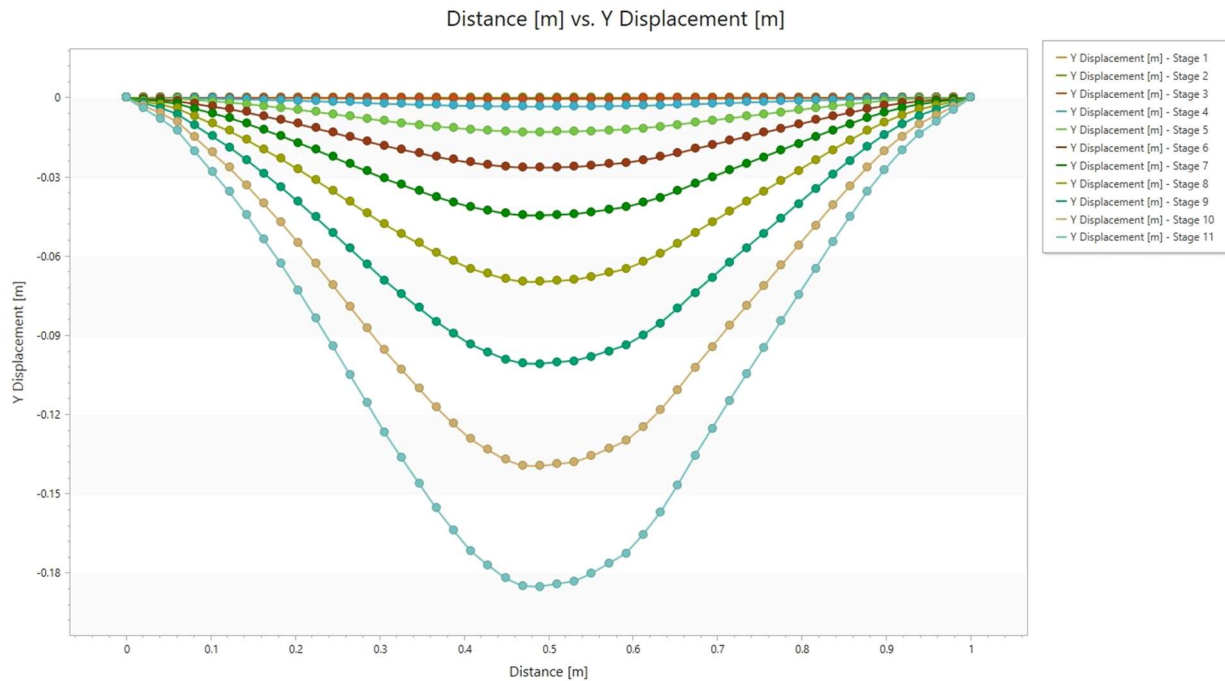
- il primo grafico (curva forza–spostamento), che descrive la risposta del paletto all’incremento del carico orizzontale applicato. Nella fase iniziale la risposta è quasi rigida, infatti, anche a fronte di un aumento significativo della forza, lo spostamento rimane contenuto. Ciò è dovuto al fatto che il terreno, ancora indisturbato, mobilita una resistenza elevata grazie alla struttura intatta e all’azione combinata di attrito e coesione lungo il fusto del paletto. Con l’aumento della forza la curva perde progressivamente linearità e gli spostamenti crescono in modo più marcato. Il terreno si avvicina alla propria capacità resistente, si sviluppano deformazioni plastiche e la rigidità del sistema terreno–paletto si riduce, determinando un comportamento non lineare. In questa fase la pendenza della curva diminuisce, indicando che incrementi di forza producono spostamenti sempre più significativi.
- il grafico centrale descrive lo spostamento del paletto lungo la sua lunghezza, per diversi livelli di carico applicato (stage di carico). Ogni linea rappresenta uno step della simulazione e consente di osservare l’evoluzione della deformazione al crescere della forza. Nelle prime fasi i profili risultano quasi sovrapposti, evidenziando uno spostamento limitato e relativamente uniforme, coerente con la rigidità iniziale del sistema. Con l’incremento del carico, i profili si distanziano progressivamente e mostrando spostamenti più elevati, in particolare nelle zone in cui il terreno inizia a deformarsi maggiormente. La riduzione di rigidità e la concentrazione della deformazione in tratti specifici indicano la transizione verso un comportamento più deformabile, coerente con la progressiva mobilitazione della resistenza del terreno. A causa di vincoli imposti dal software, l’immagine esportata risulta ruotata

di 90° rispetto alla configurazione naturale. Tuttavia, la lettura dei risultati rimane chiara e il grafico consente di apprezzare l'evoluzione degli spostamenti lungo l'estensione del paletto.

- l'ultimo grafico restituisce la distribuzione dello spostamento del terreno nella direzione del carico, visualizzata in pianta lungo l'intera area analizzata. Ogni linea colorata corrisponde a uno step di carico e permette di osservare la progressiva evoluzione del campo deformativo. Nelle fasi iniziali i profili sono simili e quasi sovrapposti, con spostamenti modesti e distribuiti in modo relativamente uniforme, tipici di un terreno ancora rigido. Con l'aumento della forza, i profili si discostano in modo più evidente e la deformazione assume una configurazione più marcata, con valori massimi concentrati nella zona maggiormente sollecitata. L'andamento complessivo tende a una forma a conca, coerente con la risposta di un mezzo deformabile soggetto a spinta orizzontale. La progressione dei profili evidenzia quindi il passaggio da una fase iniziale quasi rigida a una fase non lineare e più deformabile, in accordo con il comportamento teorico atteso per un sistema terreno-struttura sottoposto a carichi orizzontali crescenti.

Push 1





Nell'appendice C vengono riportati per tutte le prove push analizzate i grafici ottenuti da ciascuna analisi, in particolare per ogni prova vengono riportate rispettivamente i grafici contenenti:

- relazione forza-spostamento;
- lo spostamento del paletto lungo la sua lunghezza, per diversi livelli di carico applicato;
- la distribuzione dello spostamento del terreno nella direzione del carico, visualizzata in pianta lungo l'intera area analizzata.

Nella tabella sottostante vengono riassunti i valori di forza necessari ad ottenere uno spostamento orizzontale pari a 40 cm, $F_{40\text{cm}}$, (come previsto nella norma UNI TR 11785) per le 9 push analizzate:

Nr. Push	Forze [kN]
1	15,97
2	15,43
3	16,39
4	18,85
5	16,77
6	16,03
7	15,76
8	19,79
9	16,37

Tabella 23 Prove Push—forza massima di carico (F_{40})

I risultati ottenuti dall'analisi delle nove prove push esaminate mostrano una certa variabilità, legata alle differenti condizioni geometriche e geotecniche dei siti analizzati. Per questo motivo, al fine di verificare la coerenza del comportamento del modello numerico sviluppato in RS3, è stata analizzata in modo più approfondito la prova push 3, scelta come caso di riferimento.

In una prima fase, la prova è stata ricalcolata mantenendo costanti i parametri geotecnici e variando esclusivamente la distanza del paletto dal bordo del rilevato, così da verificare che l'aumento della distanza comportasse un incremento della forza resistente.

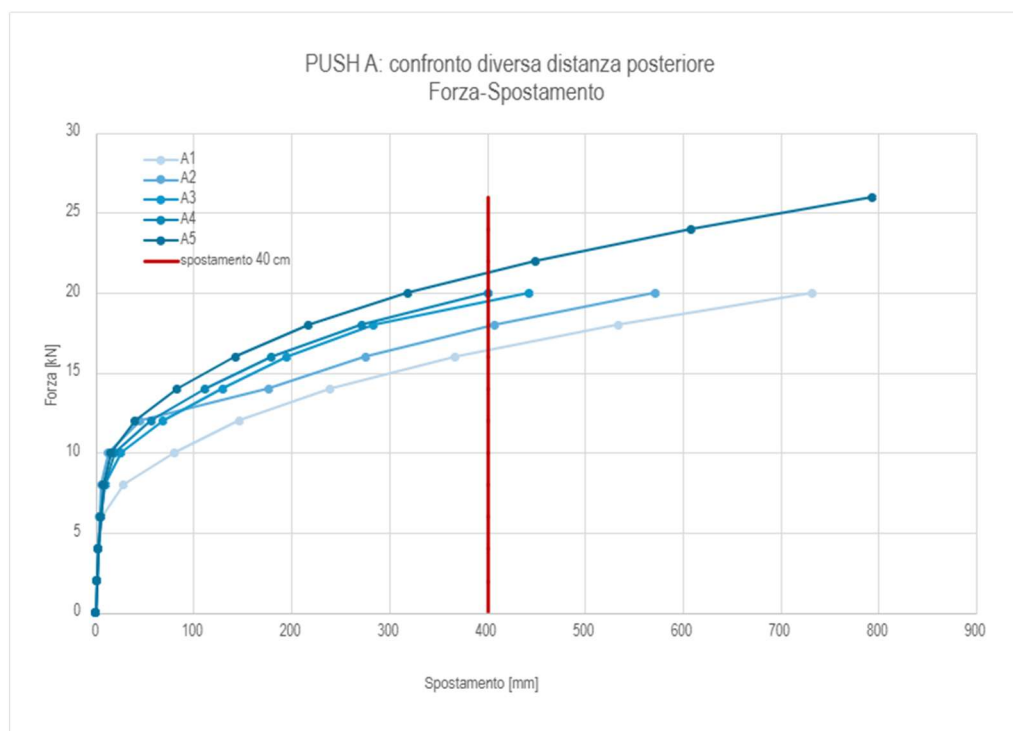
Successivamente, la stessa prova push 3 è stata riesaminata incrementando l'infissione del paletto nel terreno di 0,2 m rispetto al caso base (1,0 m). Anche in questo caso la distanza paletto–bordo rilevato è stata variata mantenendo i parametri geotecnici del terreno costanti, con l'obiettivo di valutare la dipendenza della forza massima di carico con la profondità d'infissione.

Risultati prova PUSH 3 (approfondimento di analisi)

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dal modello di simulazione numerica in condizioni di test modificate rispetto alla situazione base prevista per la Push n.3. L'analisi è stata effettuata allo scopo di valutare e validare l'utilizzo del software per la valutazione delle condizioni del terreno per l'infissione del paletto.

- Risultati con infissione 1m:

I grafici forza-spostamento relativi alle prove A1-A5 sono stati sintetizzati nel grafico seguente:

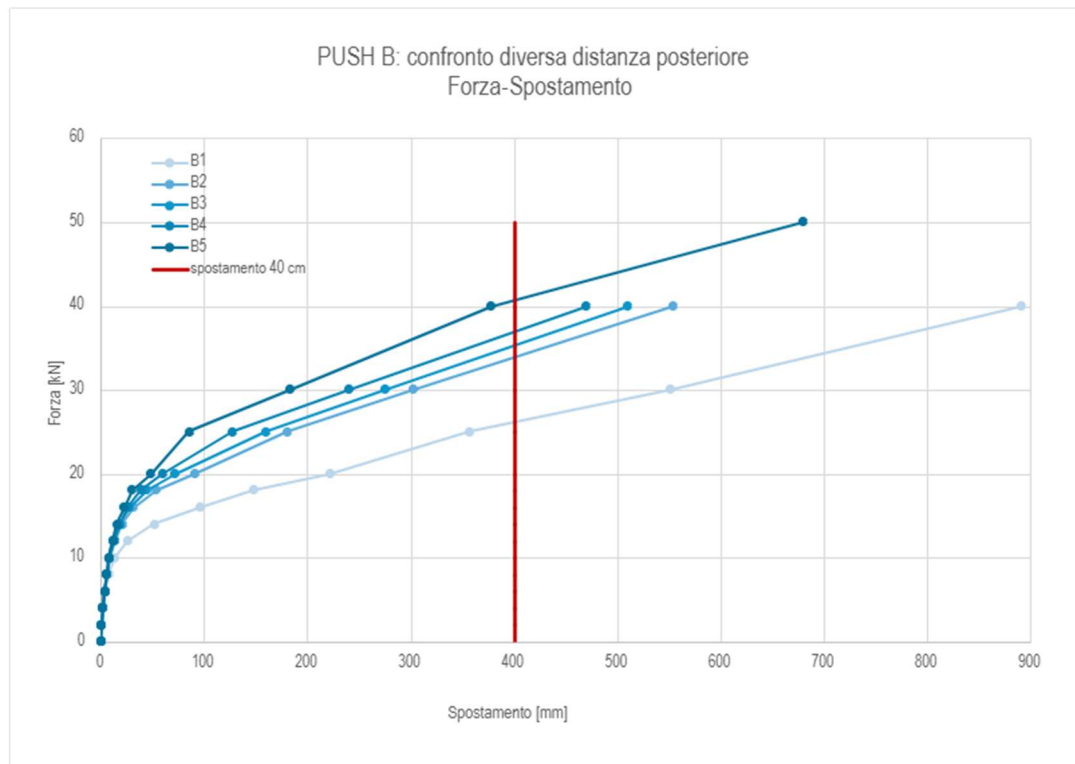


Grafici forza-spostamento delle Prove Push a confronto per differenti distanze posteriori

Si evince che, all'aumentare della distanza del paletto dal bordo del rilevato, è necessario applicare una forza maggiore per raggiungere uno spostamento orizzontale di 40 cm. Tale comportamento conferma la coerenza dei risultati ottenuti e contribuisce alla validazione del modello numerico utilizzato.

- Risultati con infissione 1,2m:

I grafici forza-spostamento relativi alle prove B1-B5 sono stati sintetizzati nel grafico seguente:



Grafici forza-spostamento delle Prove Push a confronto per differenti distanze posteriori

Si conferma quanto ottenuto in precedenza con infissione di 1 m. Viene in seguito riportata una tabella riassuntiva nella quale vengono sintetizzati i valori di F_{40cm} per le diverse geometrie utilizzate (posizione relativa del paletto- scarpata, DP) nelle due condizioni di infissione (1 e 1,2 m):

Distanza Posteriore (mm)	300	400	500	700	850
F max a s=40cm					
infissione 1 m	16.39	17.88	19.45	19.98	21.24
infissione 1.2 m	26.10	33.86	35.30	36.94	40.73

Tabella 24 Risultati prova Push n.3 (approfondimento) – valutazione della F_{40cm}

Dalla tabella si osserva non solo che, all'aumentare della distanza del paletto dal bordo del rilevato, cresce la forza necessaria per raggiungere uno spostamento orizzontale di 40 cm, ma anche che un incremento dell'infissione del paletto nel terreno comporta un ulteriore aumento della forza richiesta per ottenere lo stesso spostamento. Entrambi gli andamenti confermano la coerenza del comportamento modellato e rafforzano la validazione del software.

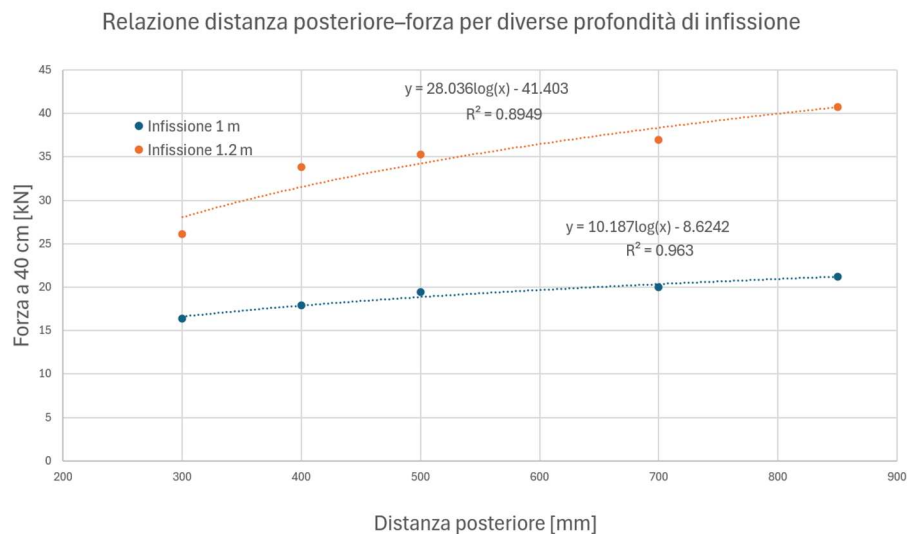


Grafico distanza posteriore-forza per diverse profondità di infissione

Il grafico soprastante evidenzia la relazione tra la distanza dal bordo del rilevato e la forza necessaria a generare uno spostamento di 40 cm per due differenti profondità di infissione, pari a 1 m e 1.2 m. In entrambi i casi si osserva un incremento della forza all'aumentare della distanza, con un andamento non perfettamente lineare.

L'analisi di regressione mostra che la curva logaritmica fornisce un'ottima approssimazione dei dati sperimentali. Per l'infissione di 1 m si ottiene un coefficiente di determinazione $R^2 = 0.963$, mentre per l'infissione di 1.2 m si ha $R^2 = 0.8949$. Tali valori, prossimi all'unità, indicano che il modello logaritmico descrive in modo efficace il comportamento osservato. La forma $y = a\log(x) + b$ risulta coerente con l'andamento dei punti sperimentali,

caratterizzato da un incremento inizialmente più marcato della forza e da una successiva attenuazione della crescita al crescere della distanza dal bordo.

Dal punto di vista meccanico, tale comportamento risulta coerente con il fenomeno analizzato. La forza necessaria a raggiungere uno spostamento di 40 cm dipende infatti da due fattori principali. Da un lato, essa è influenzata dalla distanza posteriore rispetto al bordo del rilevato, che modifica le condizioni di confinamento e la distribuzione delle tensioni nel terreno. All'aumentare della distanza dal bordo, il volume di terreno mobilitato cresce e si riduce l'”effetto di indebolimento” legato alla presenza del fronte libero, rendendo necessaria una forza maggiore per ottenere lo stesso spostamento.

Dall'altro lato, la forza dipende dalla profondità di infissione nel terreno. Il confronto tra i due gruppi evidenzia infatti che, a parità di distanza dal bordo, l'infissione di 1.2 m richiede forze sistematicamente superiori rispetto al caso di 1 m. Ciò è coerente con l'aumento della superficie di interazione terreno–paletto e con la maggiore lunghezza di ancoraggio mobilitata nel terreno, che comportano una maggiore resistenza globale del sistema.

Nel complesso, i risultati confermano che la forza necessaria a produrre uno spostamento prefissato è funzione sia della distanza dal bordo del rilevato sia della profondità di infissione, e che tale dipendenza è adeguatamente rappresentata da un modello di tipo logaritmico.

8. Conclusioni

Il lavoro svolto ha consentito di analizzare in modo sistematico il comportamento del sistema paletto–terreno e di valutare la possibilità di introdurre un approccio alternativo alle tradizionali prove di Push, attualmente utilizzate per verificare la corretta posa dei paletti delle barriere di sicurezza. Attraverso la costruzione di un modello tridimensionale agli elementi finiti, sviluppato mediante il software RS3 e calibrato sui dati geotecnici disponibili, è stato possibile simulare la risposta forza–spostamento del paletto in condizioni controllate, analizzando l’influenza di alcuni parametri geometrici significativi.

L’analisi delle nove prove di Push ha evidenziato una certa variabilità dei risultati sperimentali, legata alle differenti condizioni geometriche e geotecniche dei siti analizzati. Per approfondire il comportamento del modello numerico è stata quindi analizzata in modo più dettagliato la prova push 3, utilizzata come caso di riferimento per verificare la coerenza dei risultati ottenuti. In particolare, sono state condotte simulazioni mantenendo costanti i parametri geotecnici e variando la distanza del paletto dal bordo del rilevato, così da valutare l’influenza della posizione del paletto sulla forza resistente. Successivamente è stato analizzato anche l’effetto della profondità di infissione, incrementando l’infissione del paletto rispetto al caso base e osservando le variazioni nella risposta del sistema.

Le simulazioni numeriche hanno mostrato un comportamento coerente con le attese meccaniche del sistema paletto–terreno. In particolare, all’aumentare della distanza dal bordo del rilevato si osserva un incremento della forza necessaria a raggiungere lo spostamento normativo di 40 cm, valore previsto dalla normativa per le prove di Push. Analogamente, un aumento della profondità di infissione comporta un incremento della resistenza complessiva del sistema, dovuto alla maggiore porzione di terreno mobilitata e alla più ampia superficie di interazione tra terreno e paletto.

L’analisi dei risultati ha inoltre evidenziato che la relazione tra forza resistente e distanza dal bordo del rilevato può essere descritta in modo

efficace mediante una regressione di tipo logaritmico del tipo $y = a \log(x) + b$, con coefficienti di determinazione molto elevati. Questo risultato suggerisce che il modello numerico è in grado di riprodurre in modo soddisfacente l'andamento generale osservato nelle prove.

Nel complesso, le simulazioni svolte hanno permesso di verificare la coerenza del modello numerico e di comprendere meglio i principali meccanismi che governano la risposta del sistema paletto–terreno. Pur considerando le inevitabili semplificazioni della modellazione e la complessità del comportamento del terreno, il lavoro rappresenta un primo passo verso l'integrazione di strumenti numerici nei processi di verifica delle barriere di sicurezza.

I risultati ottenuti suggeriscono che una modellazione tridimensionale opportunamente calibrata sui dati geotecnici disponibili possa costituire un utile supporto alle tradizionali prove sperimentali e, con ulteriori approfondimenti, contribuire allo sviluppo di metodologie alternative o complementari alle prove di Push. Ulteriori sviluppi potranno riguardare l'applicazione del modello a un numero più ampio di casi e il confronto con ulteriori risultati sperimentali.

9. Bibliografia

[1] 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.

[2] UNI EN 1317, Barriere di sicurezza stradali, Ente Nazionale Italiano di Unificazione UNI, Milano.

[3] UNI EN 1317-1, Terminologia e criteri generali per i metodi di prova, Ente Italiano di Normazione UNI, 2010.

[4] 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.

[5] UNI EN 1317-3 (2010) Classi di prestazione, criteri di accettazione e metodi di prova per attenuatori d'urto, Ente Italiano di Normazione UNI, 2010.

[6] UNI ENV 1317-4 (2003) Classi di prestazione, criteri di accettazione e metodi di prova per terminali e transizioni, Ente Italiano di Normazione UNI, 2010.

[7] UNI EN 1317-5, Requisiti di prodotto e valutazione di conformità per sistemi di trattenimento veicoli, Ente Italiano di Normazione UNI, 2012.

[8] RS3, 3D Finite Element Software For Advanced Analysis, Rocscience.

[9] Cruz et al. (2024), "Correlations between SPT and DPSH results based in energy measurements".

[10] Prove penetrometriche statiche e dinamiche: come interpretare i risultati (prove SPT, CPT, DP), Pisapia Marco.

[11] Sito GeoStru.

[12] Correlating standard penetration test and dynamic probe super heavy penetration resistance values in sandy soils, MacRobert, C., Kalumba, D., & Beales, P. (2011).

[13] Evaluation of relative density and friction angle based on SPT-N values (2018, KSCE Journal).

[14] Metodi per stimare le proprietà geotecniche dei terreni, Giulio Riga.

[15] 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", PIARC ITALIA (2021).

[16] Foundation Analysis and Design, sezione sulle prove penetrometriche dinamiche – Bowles.

[17] In situ testing in geotechnical engineering – Marchetti.

[18] Cone penetration testing in geotechnical practice – Lunne, Robertson e Powell.

[19] Manuale Pagani Geotechnical Equipment

APPENDICE

10. Appendice A

Procedura di modellazione e analisi tridimensionale in RS3

In questa sezione si descrive il procedimento adottato per la costruzione, la discretizzazione, l'analisi e la post-elaborazione di un modello tridimensionale mediante il software RS3.

L'interfaccia di RS3 viene avviata e si crea un nuovo progetto, verificando la corretta visualizzazione delle finestre di lavoro e della barra delle fasi (stages) (Figura 1).

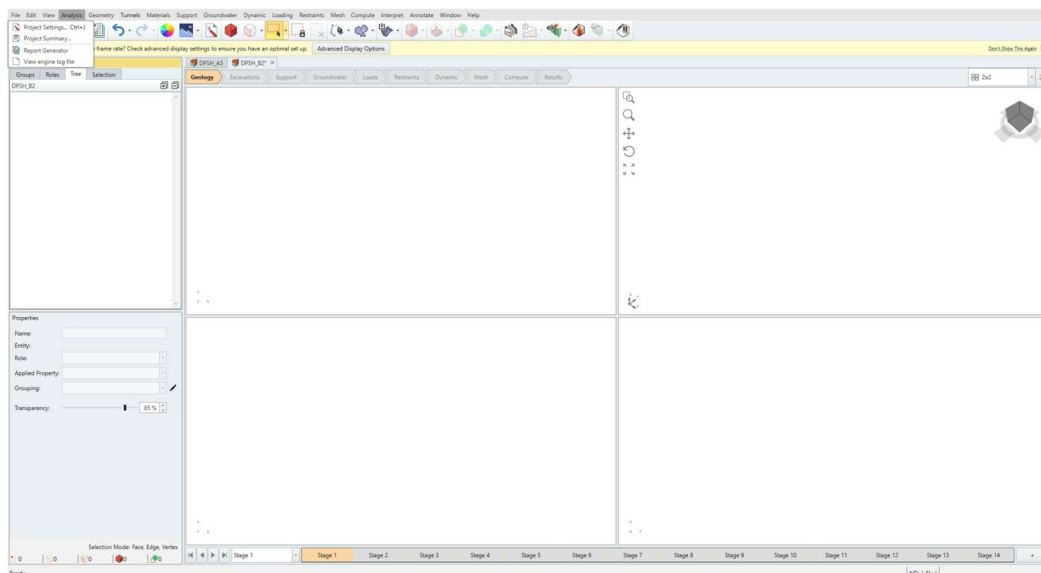


Figura 1. Interfaccia principale di RS3 all'avvio di un nuovo progetto.

All'interno di Project Settings viene definito il sistema di unità, adottando un sistema metrico con tensioni espresse in kPa, e si impostano le unità temporali (Figura 2).

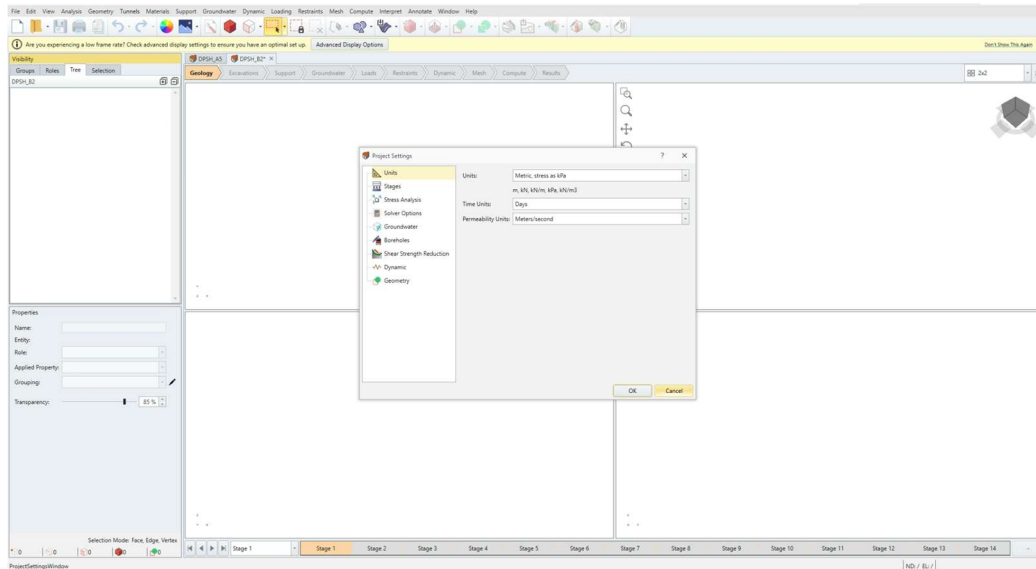


Figura 2. Definizione del sistema di unità in Project Settings.

Nel pannello Stages si imposta il numero complessivo di fasi di calcolo, nel caso in esame pari a 14, in modo da gestire l'attivazione progressiva di carichi, vincoli e condizioni (Figura 3).

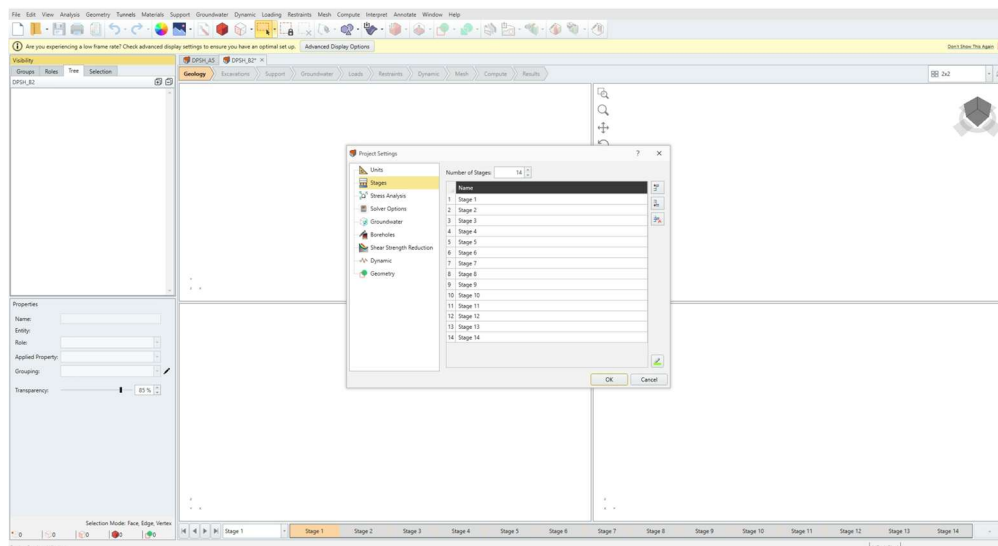


Figura 3. Impostazione del numero di fasi di calcolo (stages).

Nella sezione Stress Analysis vengono verificati e, se necessario, aggiornati i parametri di analisi, includendo numero massimo di iterazioni, tolleranza e criterio di convergenza, al fine di garantire robustezza numerica (Figura 4).

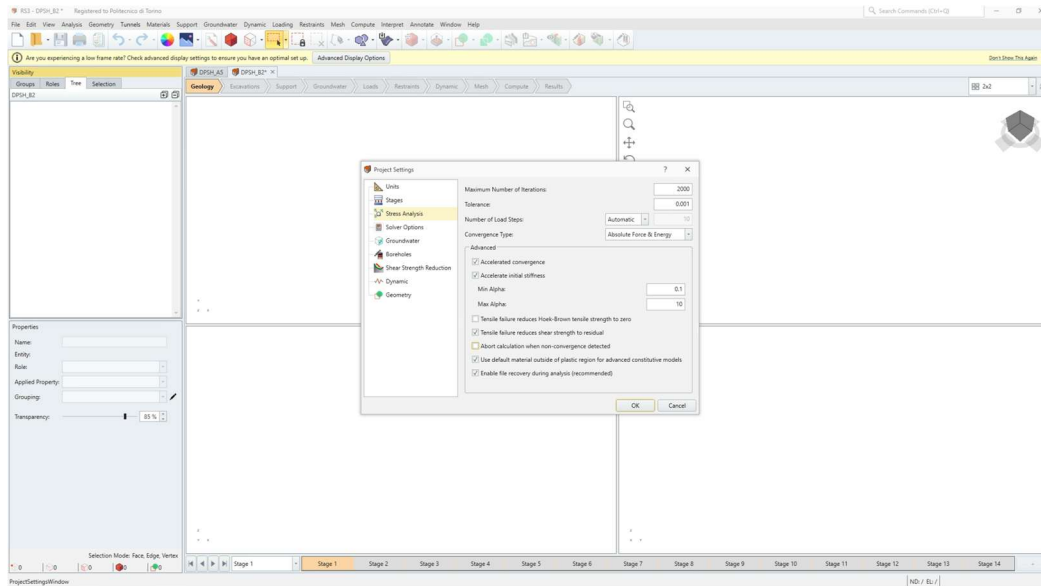


Figura 4. Parametri di Stress Analysis e opzioni avanzate di convergenza.

Dal menu Geometry si accede agli strumenti di Import/Export per importare la geometria tridimensionale da file CAD (Figura 5).

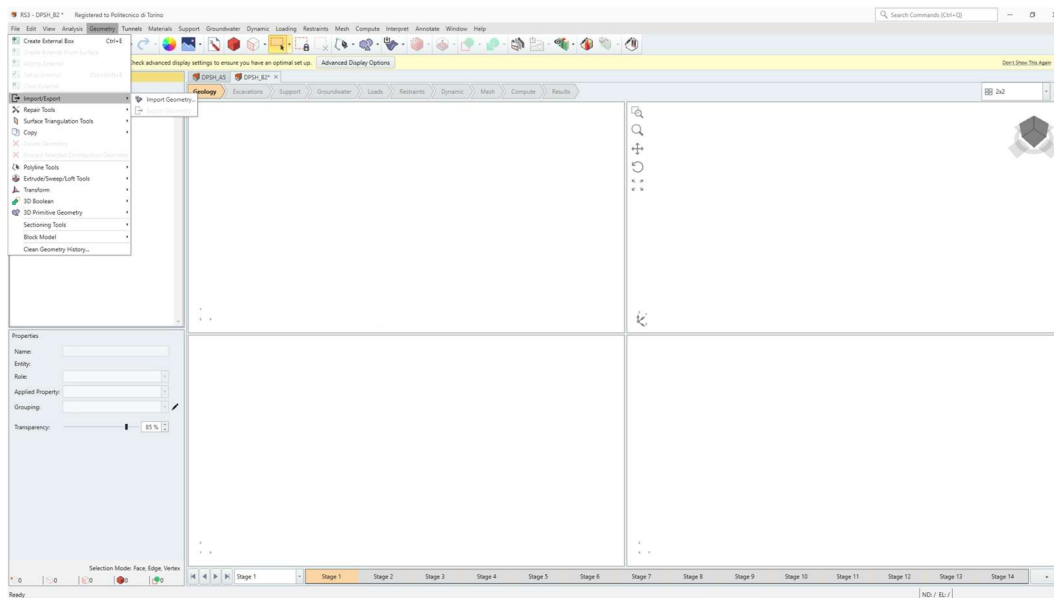


Figura 5. Menu Geometry con accesso alla funzione Import/Export.

La geometria viene importata selezionando il file e mantenendo il ruolo di Geology. Vengono selezionate le entità da includere nel modello e controllata la corretta gerarchia degli oggetti (Figura 6).

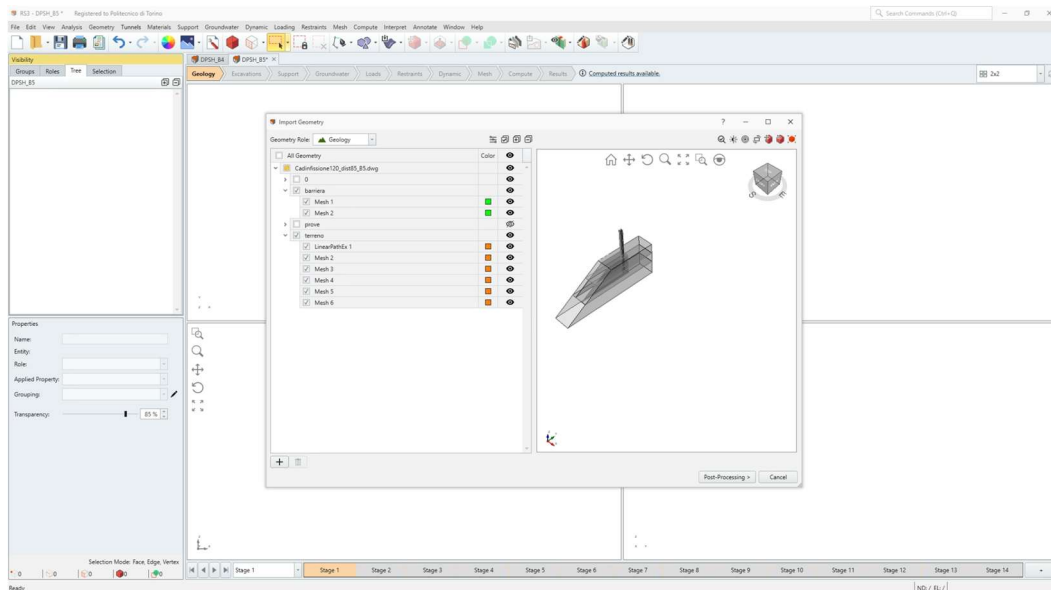


Figura 6. Finestra Import Geometry con selezione delle entità importate.

Al termine dell'importazione viene eseguita la semplificazione della triangolazione e la ricerca di difetti geometrici. Questa operazione riduce problemi di impostazione della mesh e migliora la qualità delle superfici (Figura 7).

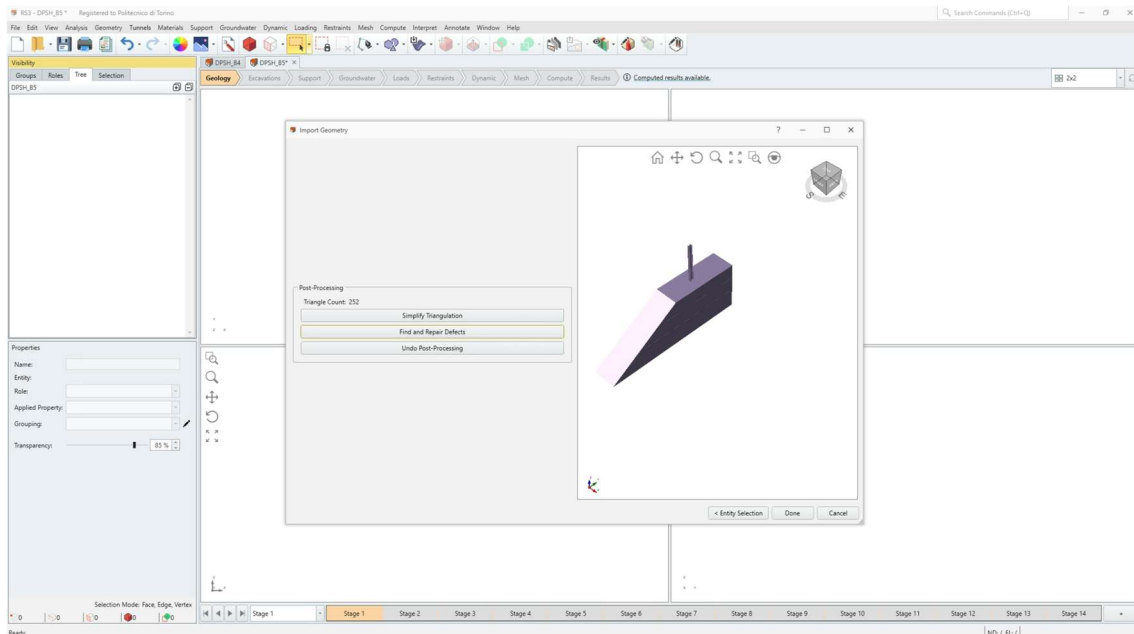


Figura 7. Strumenti di post-processing: semplificazione triangolazione e riparazione difetti.

Dalla sezione Materials si definiscono e si assegnano i materiali alle parti del modello, distinguendo gli strati di terreno e gli elementi strutturali, in questo caso la barriera (Figura 8).

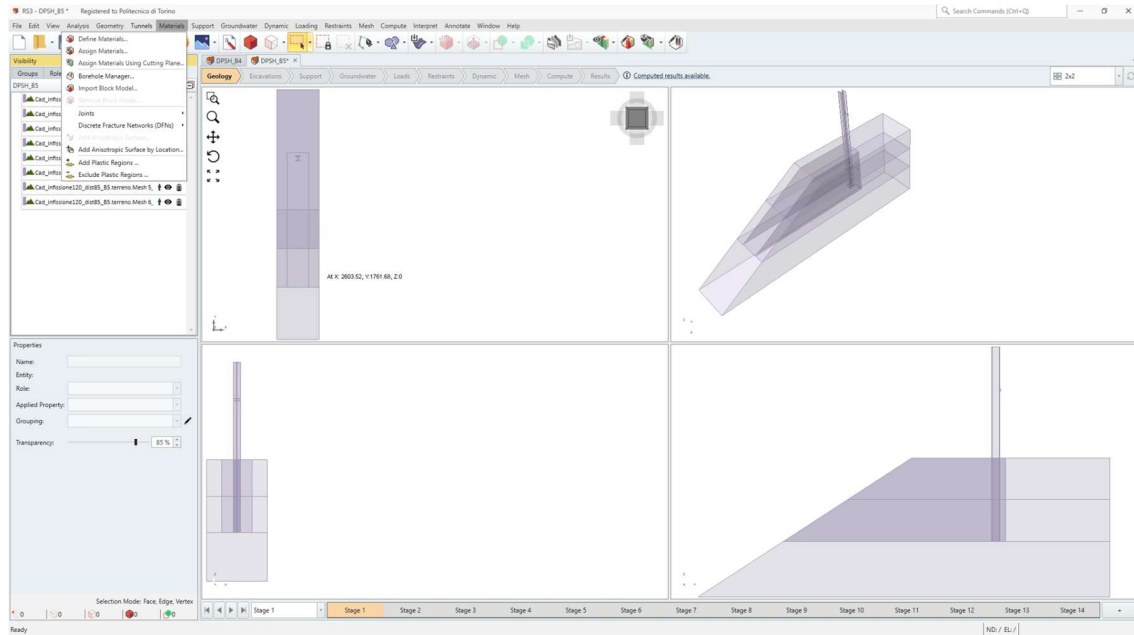


Figura 8. Accesso alle funzioni di definizione e assegnazione dei materiali.

Per ciascun materiale vengono impostate le condizioni iniziali, includendo il peso di volume (Figura 9).

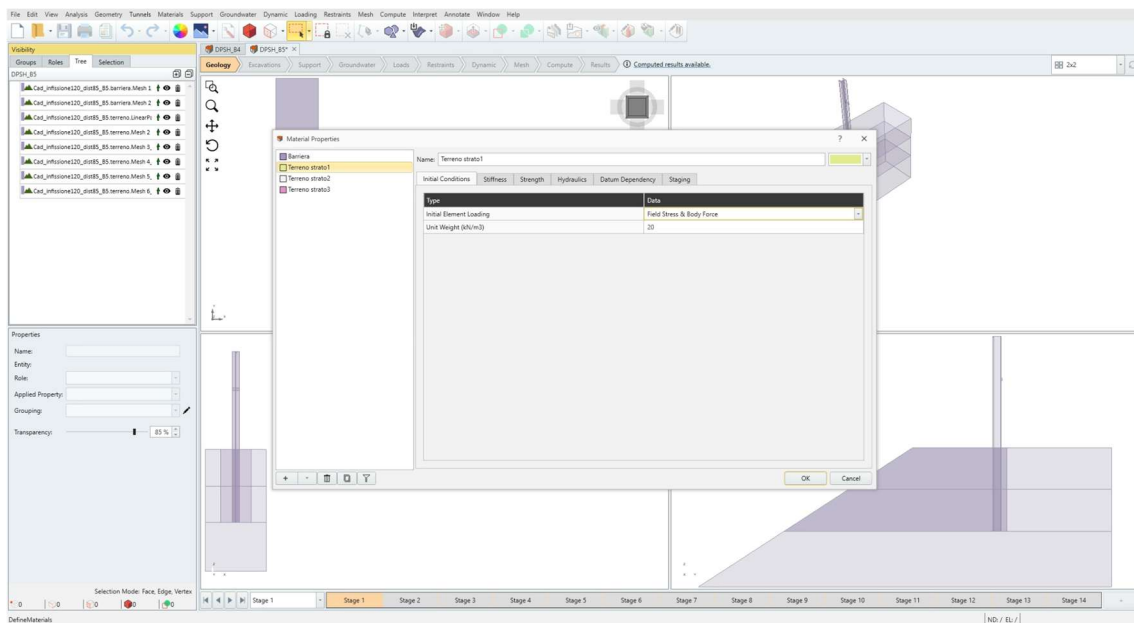


Figura 9. Scheda Initial Conditions nelle proprietà del materiale.

Vengono definiti i parametri elastici del materiale, in particolare modulo di Young e coefficiente di Poisson, coerenti con l'ipotesi di comportamento isotropo lineare (Figura 10).

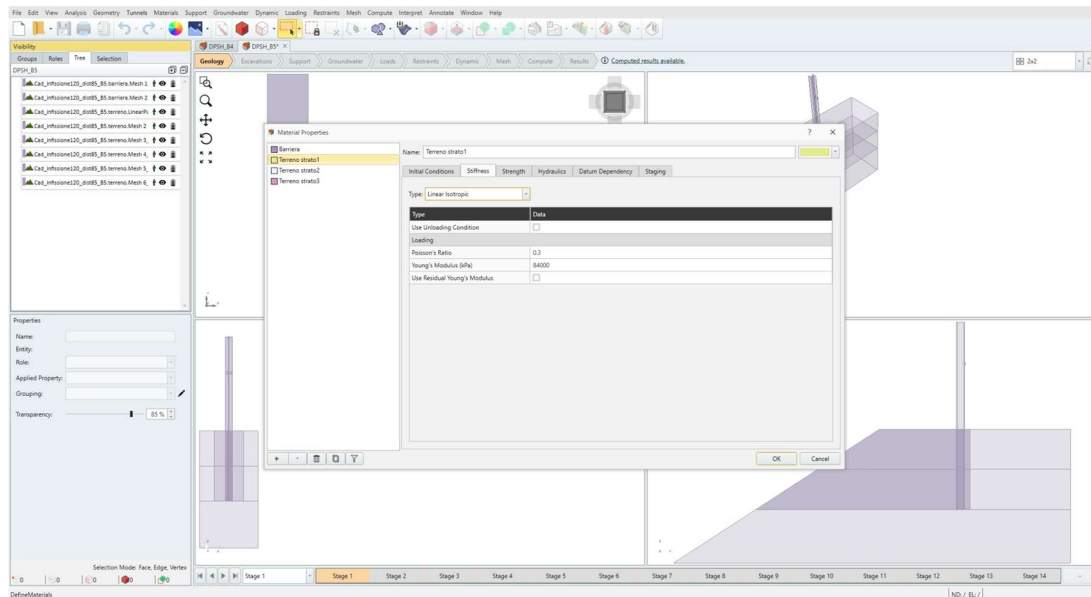


Figura 10. Scheda Stiffness con parametri elastici del materiale.

Si imposta il criterio di resistenza Mohr–Coulomb specificando coesione, angolo di attrito, dilatanza e resistenze residue, secondo i dati disponibili (Figura 11).

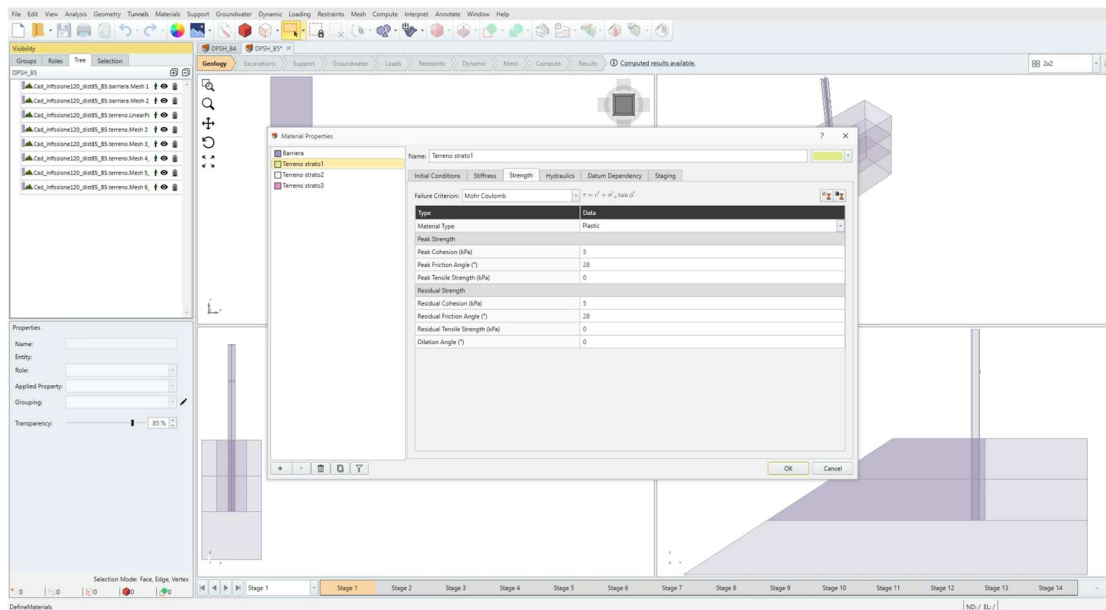


Figura 11. Scheda Strength con criterio di rottura Mohr–Coulomb.

Dopo l'assegnazione, la corretta distribuzione dei materiali viene verificata tramite la visualizzazione a colori dei volumi del dominio e degli strati (Figura 12).

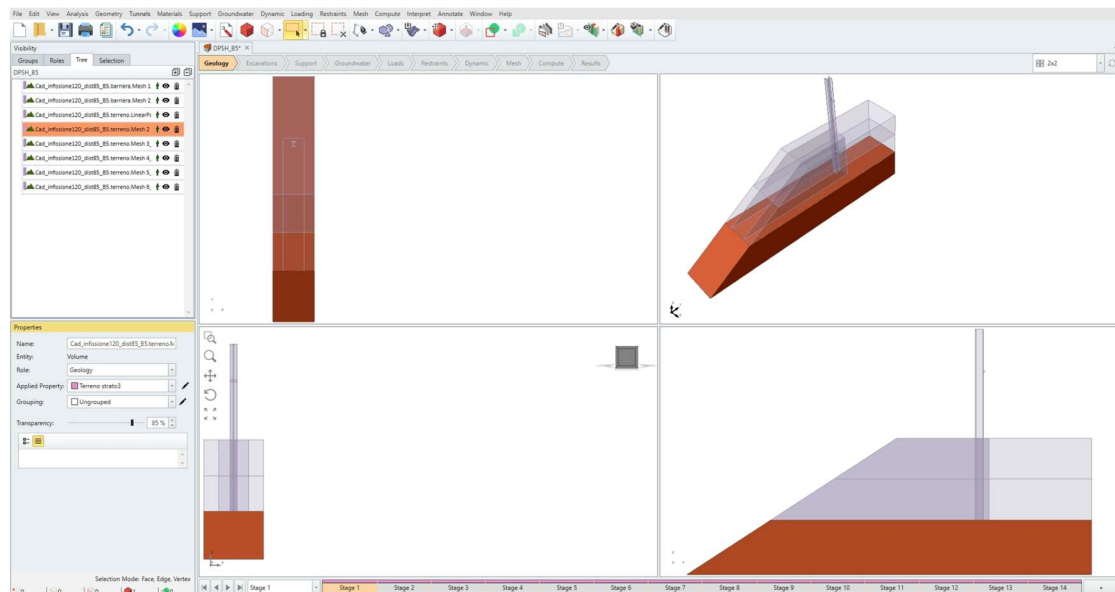


Figura 12. Visualizzazione del modello con materiali assegnati ai volumi.

Si verifica il dominio esterno e, se necessario, si definiscono o modificano i limiti esterni del modello per garantire un volume di calcolo adeguato e coerente. Si assegna la proprietà di external a tutti gli elementi che dovranno essere inclusi nel calcolo(, aggiungendo uno ad uno le singole parti del modello (Figura 13).

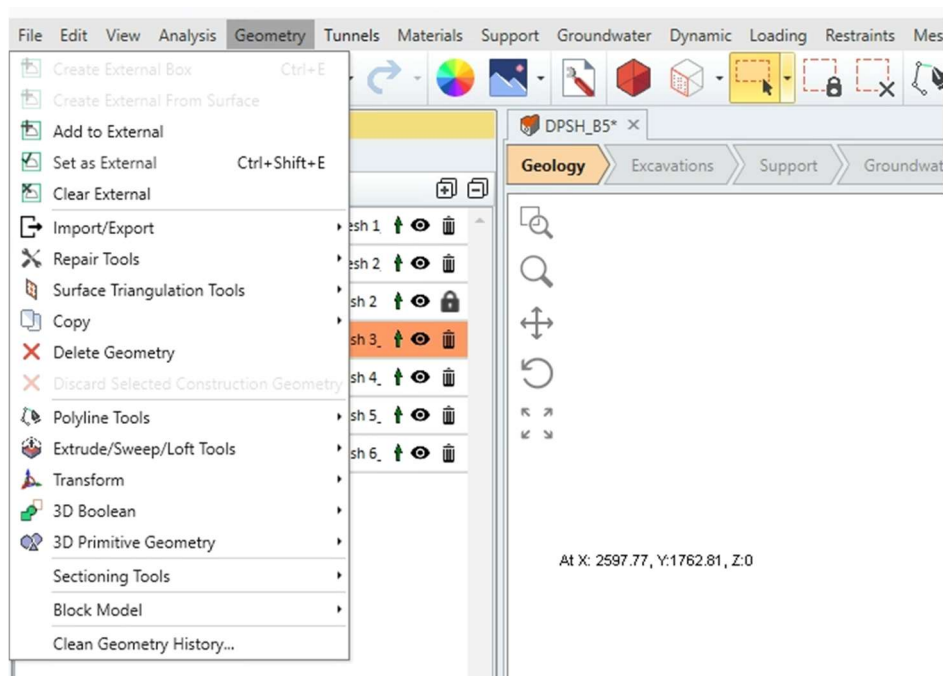


Figura 13. Gestione delle operazioni geometriche sul dominio.

Quando richiesto, viene eseguito il trimming della geometria rispetto al

dominio esterno. L'opzione consente di scartare o mantenere la porzione interna, a seconda dell'obiettivo di modellazione. In questo caso, si seleziona Yes (Figura 14).

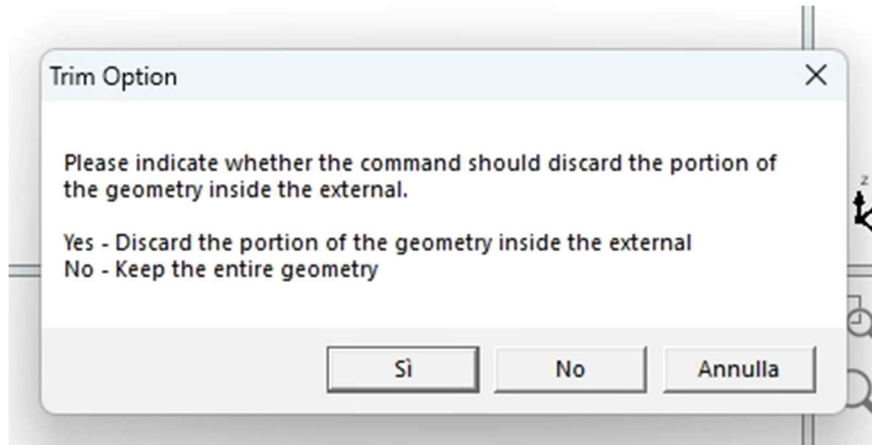


Figura 14. Finestra di scelta per il trimming della geometria rispetto all'external boundary.

Nella sezione Loads si selezionano le superfici di interesse e si aggiunge un carico superficiale, tipicamente uniforme e orientato secondo la normale alla superficie (Figura 15).

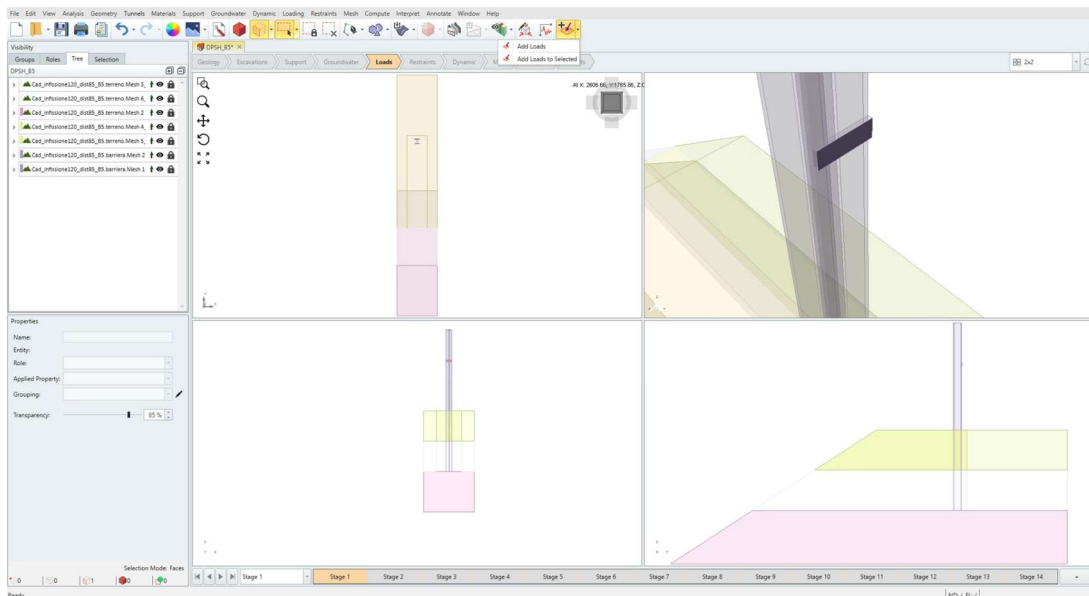


Figura 15. Sezione Loads con comando di aggiunta dei carichi.

Si definiscono intensità e orientazione del carico, oltre alle fasi di attivazione mediante Stage Factors, così da applicare il carico progressivamente nelle fasi selezionate (Figura 16).

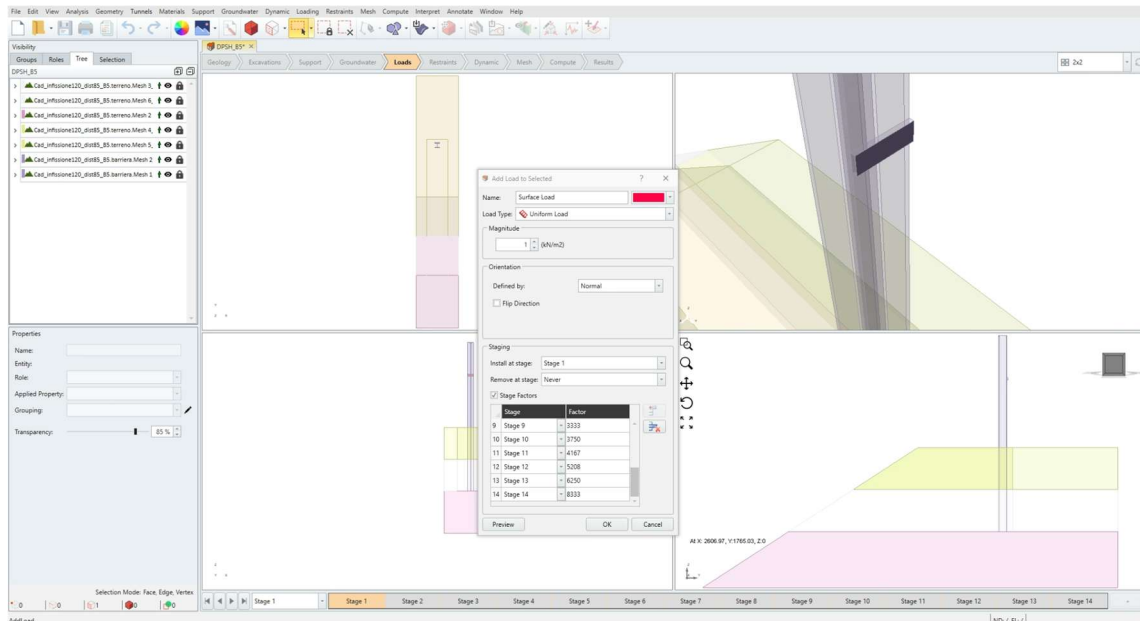


Figura 16. Finestra Add Load to Selected con parametri del carico e fattori di stage.

Dopo l'inserimento, il carico viene verificato nella lista degli oggetti e nella vista grafica, controllando la corretta posizione e la direzione dei simboli, come mostrato in Figura 17.

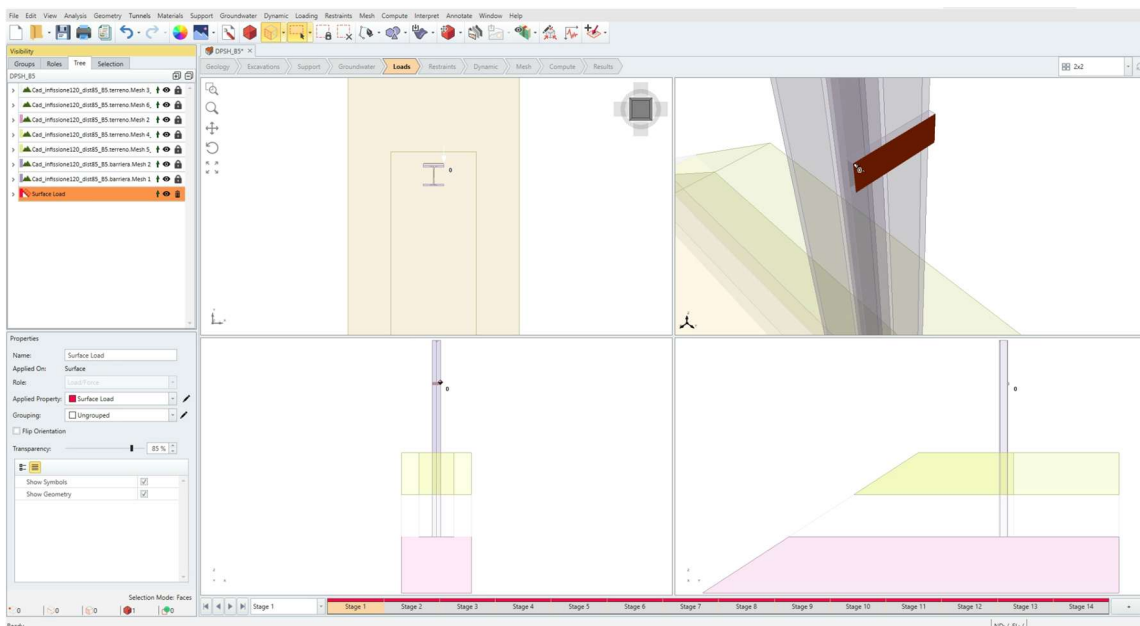


Figura 17. Carico superficiale creato e visualizzato nel modello.

Nella sezione Restraints vengono impostate le condizioni al contorno, ovvero i vincoli. Tipicamente la base viene bloccata nelle tre direzioni e le superfici laterali e inferiori vengono vincolate nelle direzioni ortogonali (Figura 18).

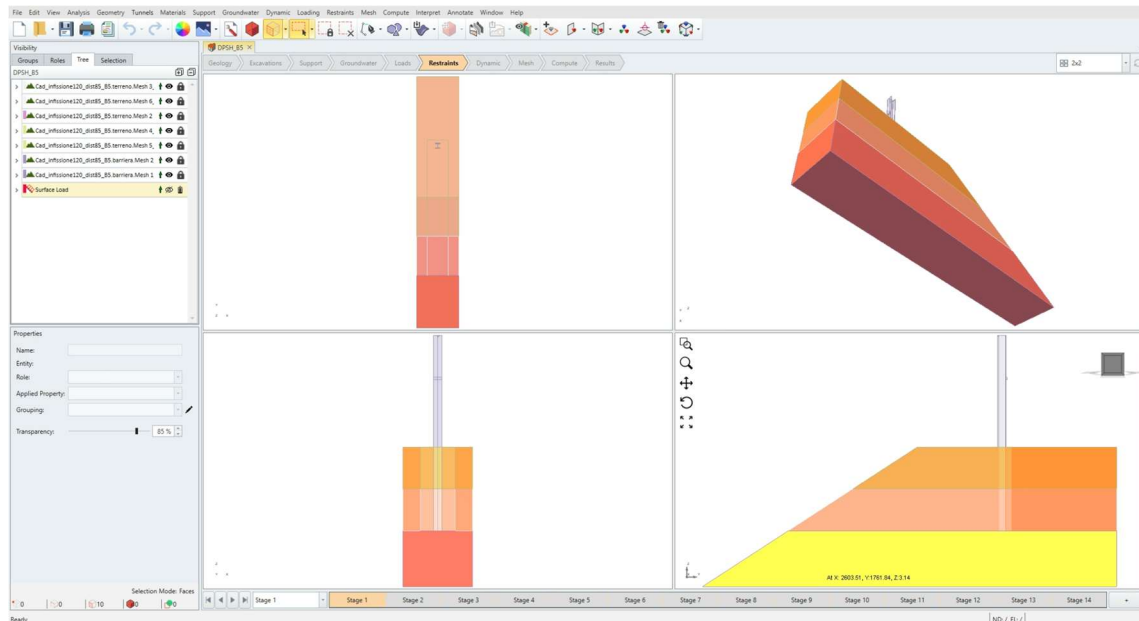


Figura 18. Sezione Restraints con modello e vincoli pronti per la definizione.

Si aggiunge un vincolo di tipo Restrain XYZ, assegnando un nome e applicandolo alle entità selezionate, in accordo con le condizioni al contorno previste (Figura 19).

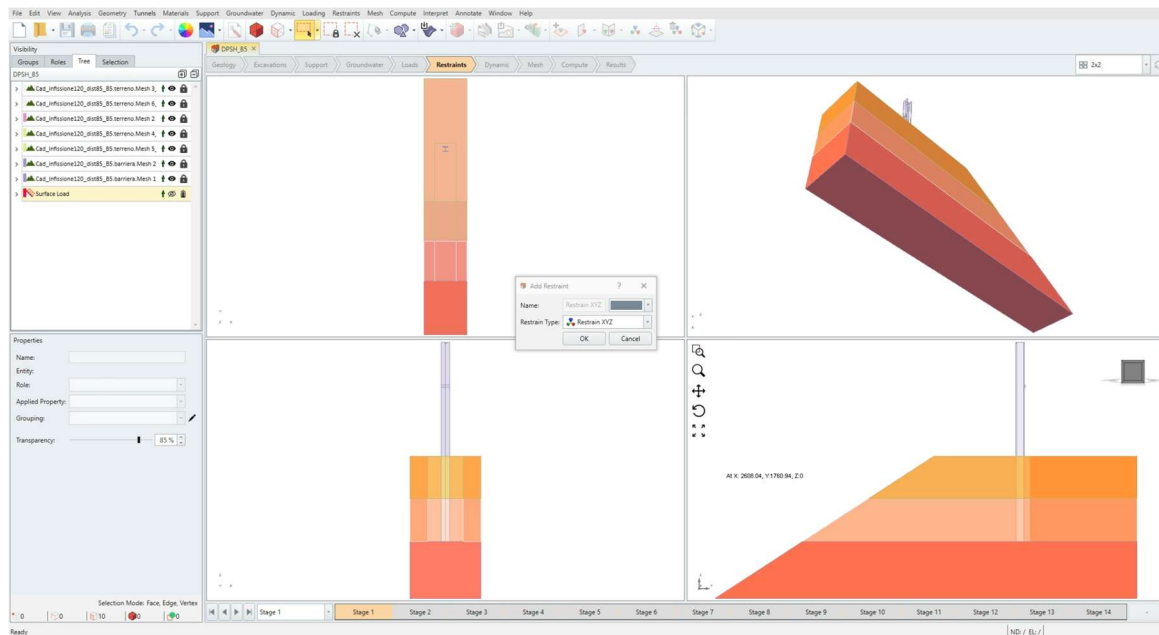


Figura 19. Finestra Add Restraint con selezione del tipo di vincolo.

Nella sezione Mesh vengono impostati tipo di elemento (tetraedro a 4 nodi), distribuzione e dimensione caratteristica (Figura 20).

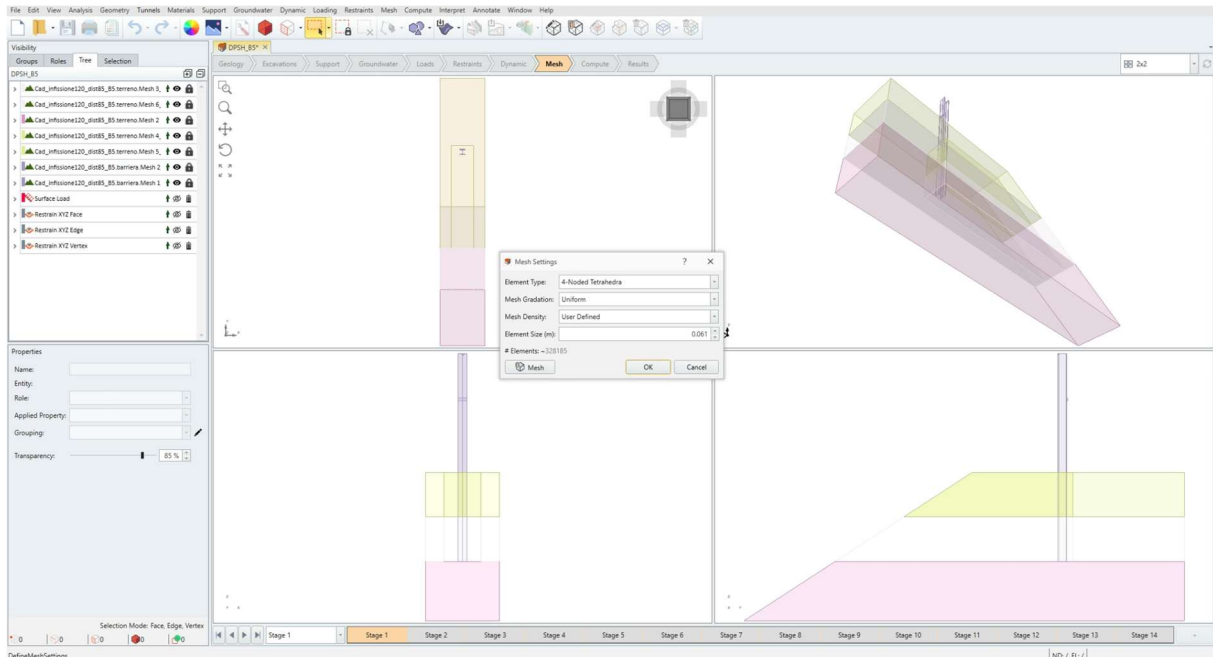


Figura 20. Finestra Mesh Settings con tipo di elemento e dimensione caratteristica.

Il software prepara i confini interni e le condizioni di contatto, quindi genera la discretizzazione del dominio (Figura 21).

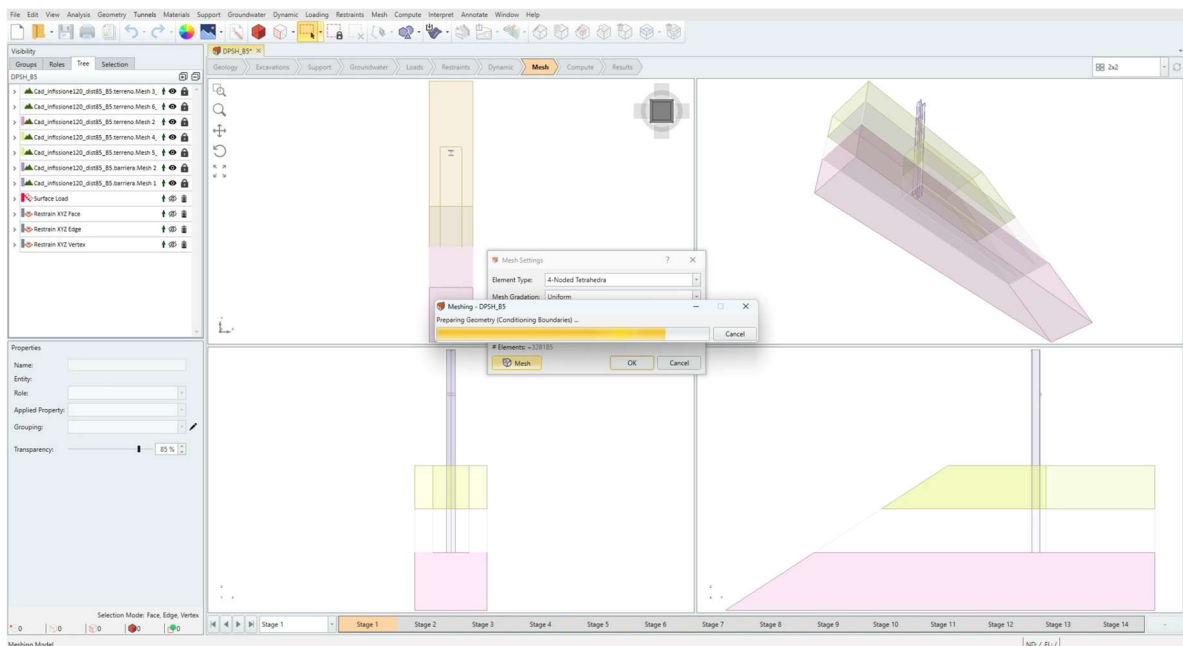


Figura 21. Fase di meshing in corso durante la preparazione della geometria.

Al termine del processo si verifica visivamente la mesh, controllando densità, continuità e adeguatezza della discretizzazione nelle zone di interesse (Figura 22).

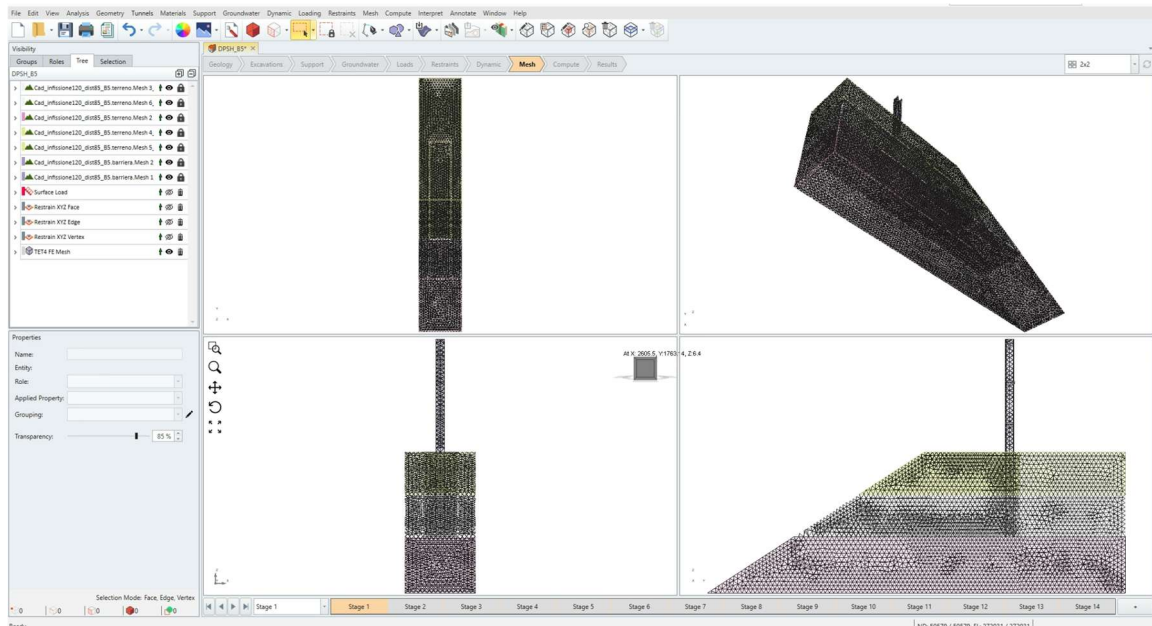


Figura 22. Mesh tetraedrica generata e visualizzata nel dominio.

Dalla sezione Compute si avvia l'analisi, scegliendo se calcolare dall'inizio o riprendere dall'ultimo stage completato (Figura 23).

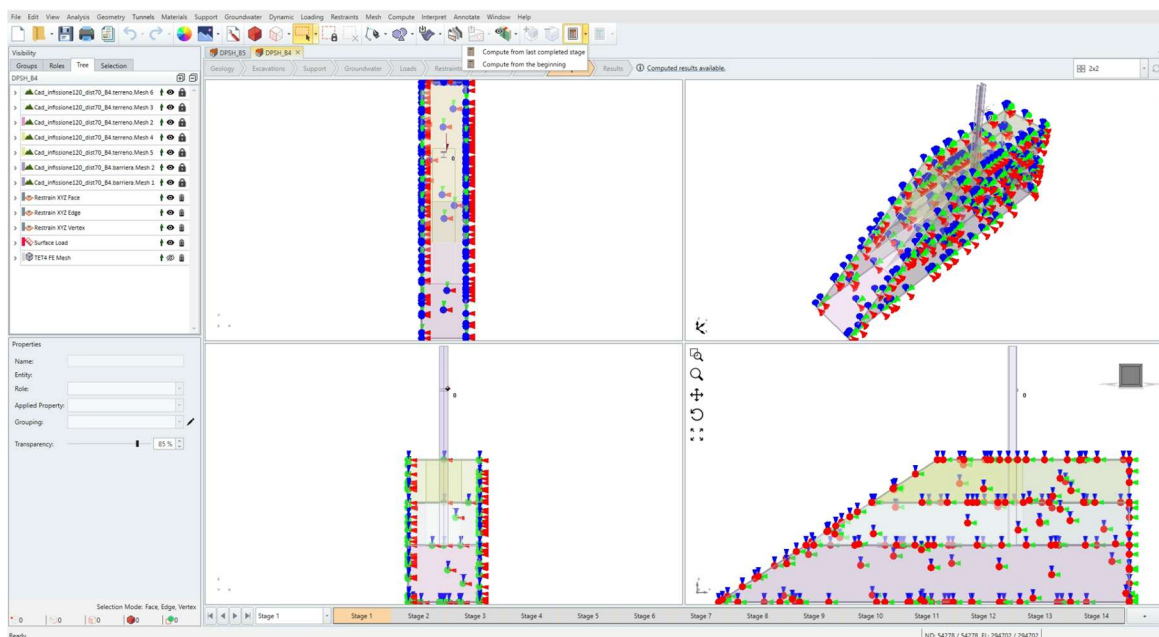


Figura 23. Comando Compute per l'avvio del calcolo dall'inizio.

Nella sezione Results si possono visualizzare i risultati sulla query selezionata con scala cromatica. L'analisi può essere eseguita selezionando lo stage di interesse (Figura 24).

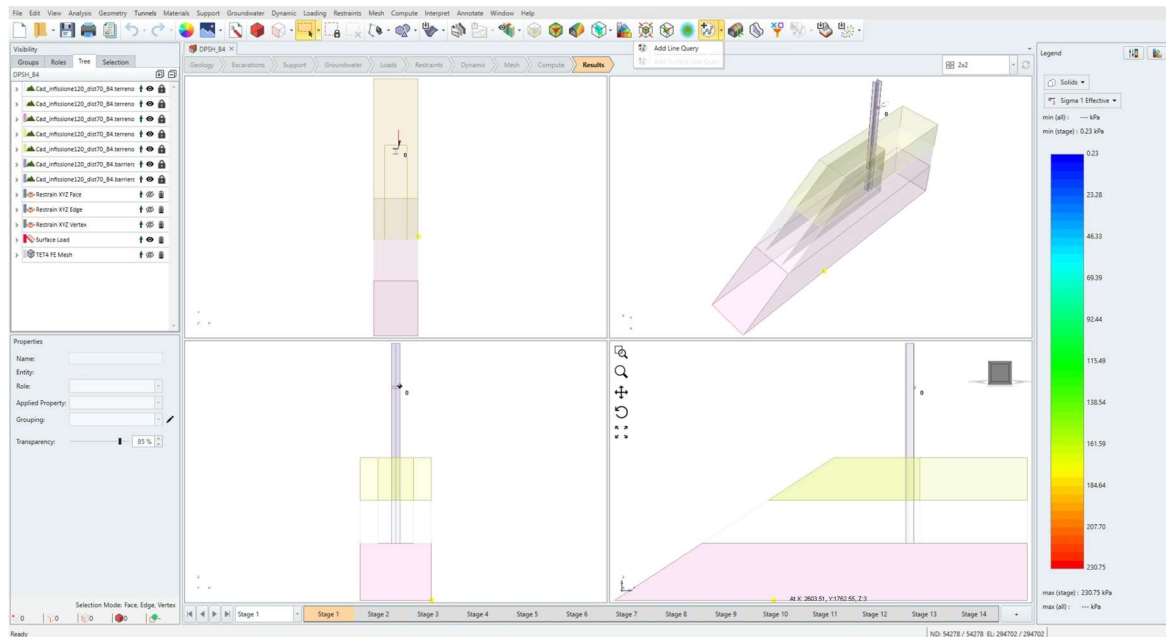


Figura 24. Risultati con visualizzazione dei risultati e legenda.

Per l'estrazione quantitativa si definisce una polilinea e si imposta il campionamento dei punti lungo l'intera linea mediante Query Options (Figura 25).

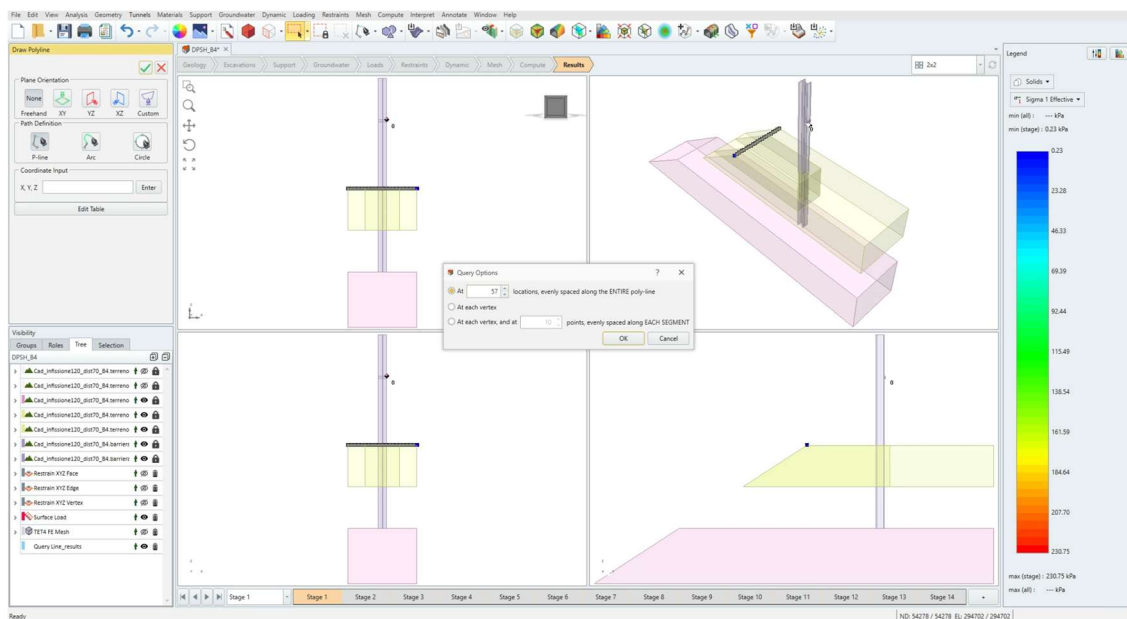


Figura 25. Impostazioni della line query e numero di punti di campionamento.

Attraverso il comando Graph Data si genera il grafico della grandezza selezionata in funzione della distanza lungo la linea richiesta (Figura 26).

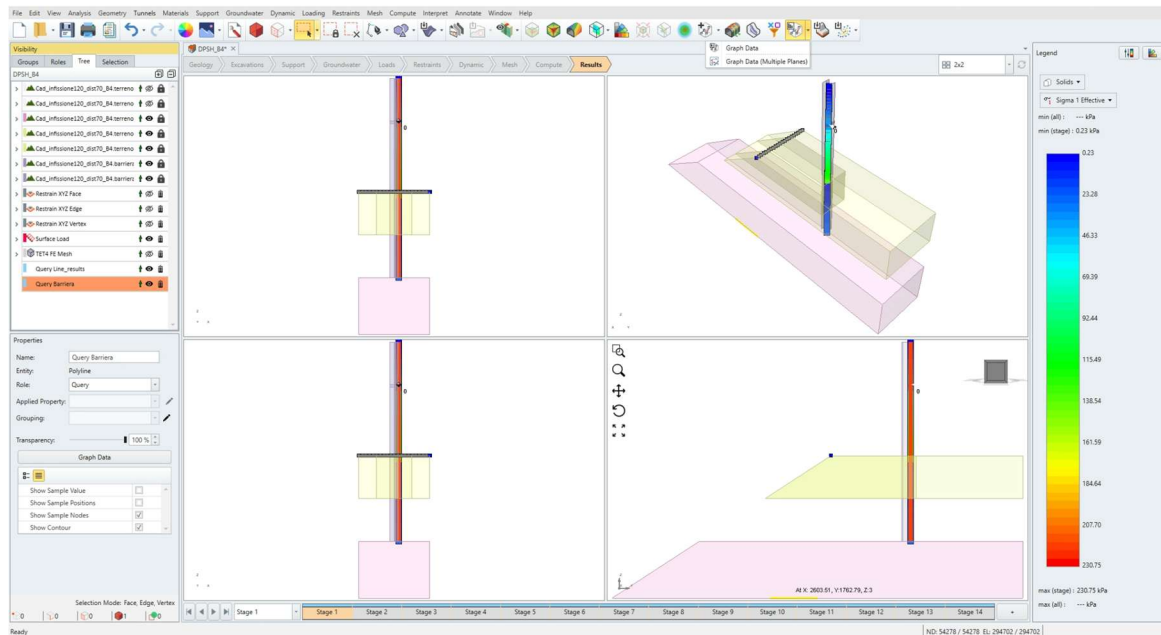


Figura 26. Comando Graph Data per la generazione dei grafici dai risultati.

Nel pannello Chart Options si selezionano variabili sugli assi e gli stages da rappresentare, ottenendo i grafici finali di interesse, secondo vari parametri (Figura 27).

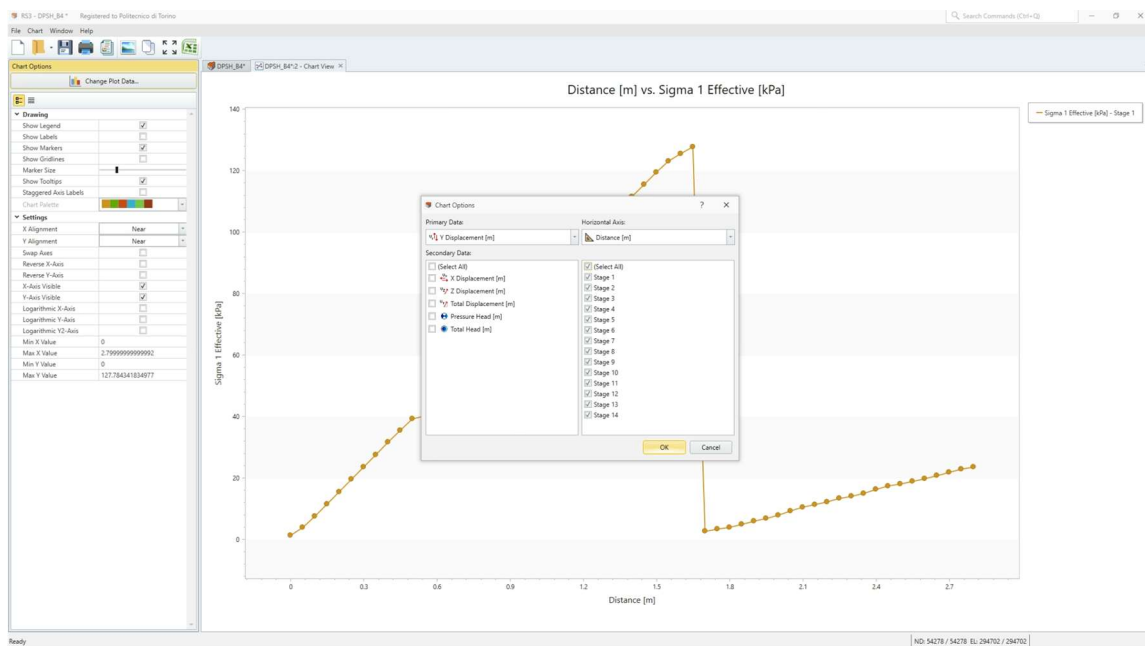


Figura 27. Finestra Chart Options e grafici dei risultati

11. Appendice B

Prova PUSH 1

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	300
Inflessione massima	400

Profondità [m]	Nr. colpi	NSPT	N(60)	Tensione verticale	Cn
0.20	1	1.5	1.01	3.6	1.47
0.40	1	1.5	1.01	7.2	1.45
0.60	1	1.5	1.01	10.8	1.42
0.80	3	4.5	3.04	14.4	1.40
1.00	3	4.5	3.04	18	1.38
1.20	5	7.5	5.06	21.6	1.35
1.40	2	3	2.03	25.2	1.33
1.60	2	3	2.03	28.8	1.31
1.80	2	3	2.03	32.4	1.29
Profondità [m]	N1(60)	Phi [°]	E [MPa]	Phi medio [°]	E medio [MPa]
0.20	2.21	27.25	52.8	26.79	75.1
0.40	2.17	26.59	86.25		
0.60	2.13	26.53	86.25		
0.80	6.30	31.22	111.75	32.20	120.25
1.00	6.19	31.13	111.75		
1.20	10.15	34.25	137.25		
1.40	4.00	28.94	99	28.87	99
1.60	3.93	28.87	99		
1.80	3.87	28.80	99		

Prova PUSH 2

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	850
Inflessione massima	400

Profondità [m]	Nr. colpi	NSPT	N(60)	Tensione verticale	Cn
0.2	1	1.5	1.01	3.60	1.47
0.4	1	1.5	1.01	7.20	1.45
0.6	1	1.5	1.01	10.80	1.42
0.8	3	4.5	3.04	14.40	1.40
1	5	7.5	5.06	18.00	1.38
1.2	4	6	4.05	21.60	1.35
1.4	6	9	6.08	25.20	1.33
1.6	5	7.5	5.06	28.80	1.31
1.8	7	10.5	7.09	32.40	1.29
Profondità [m]	N1(60)	Phi [°]	E [MPa]	Phi medio [°]	E medio [MPa]
0.2	2.21	27.25	52.8	26.79	75.1
0.4	2.17	26.59	86.25		
0.6	2.13	26.53	86.25		
0.8	6.30	31.22	111.75	32.77	124.5
1	10.32	34.37	137.25		
1.2	8.12	32.75	124.5		
1.4	11.99	35.49	150	35.32	150
1.6	9.83	34.02	137.25		
1.8	13.55	36.46	162.75		

Prova PUSH 3

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	300
Inflessione massima	400

Profondità [m]	Nr. colpi	NSPT	N(60)	Tensione verticale	Cn
0.2	1	1.5	1.01	3.60	1.47
0.4	1	1.5	1.01	7.20	1.45
0.6	3	4.5	3.04	10.80	1.42
0.8	7	10.5	7.09	14.40	1.40
1	14	21	14.18	18.00	1.38
1.2	9	13.5	9.11	21.60	1.35
1.4	5	7.5	5.06	25.20	1.33
1.6	7	10.5	7.09	28.80	1.31
1.8	9	13.5	9.11	32.40	1.29
Profondità [m]	N1(60)	Phi [°]	E [MPa]	Phi medio [°]	E medio [MPa]
0.2	2.21	27.25	52.80	28.38	83.6
0.4	2.17	26.59	86.25		
0.6	6.40	31.32	111.75		
0.8	14.69	37.14	162.75	40.1	201
1	28.90	44.04	252.00		
1.2	18.28	39.12	188.25		
1.4	9.99	34.14	137.25	36.46	162.75
1.6	13.77	36.59	162.75		
1.8	17.43	38.67	188.25		

*Approfondimento analisi prova PUSH 3**Prova Push A2:*

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	400
Inflessione massima	400

Prova Push A3:

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	500
Inflessione massima	400

Prova Push A4:

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	700
Inflessione massima	400

Prova Push A5:

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	850
Inflessione massima	400

Prova push B1:

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2800
Infissione	1200
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	400
Inflessione massima	400

Prova push B2:

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2800
Infissione	1200
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	400
Inflessione massima	400

Prova push B3:

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2800
Infissione	1200
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	500
Inflessione massima	400

Prova push B4:

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2800
Infissione	1200
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	700
Inflessione massima	400

Prova push B5:

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2800
Infissione	1200
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	850
Inflessione massima	400

Prova PUSH 4

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	300
Inflessione massima	400

Profondità [m]	Nr. colpi	NSPT	N(60)	Tensione verticale	Cn
0.2	2	3	2.03	3.60	1.47
0.4	4	6	4.05	7.20	1.45
0.6	3	4.5	3.04	10.80	1.42
0.8	4	6	4.05	14.40	1.40
1	15	22.5	15.19	18.00	1.38
1.2	13	19.5	13.16	21.60	1.35
1.4	4	6	4.05	25.20	1.33
1.6	1	1.5	1.01	28.80	1.31
1.8	5	7.5	5.06	32.40	1.29
Profondità [m]	N1(60)	Phi [°]	E [MPa]	Phi medio [°]	E medio [MPa]
0.2	4.42	27.51	57.60	30.66	97.95
0.4	8.69	33.18	124.50		
0.6	6.40	31.32	111.75		
0.8	8.40	32.96	124.50	40.27	209.5
1	30.96	44.89	264.75		
1.2	26.40	42.98	239.25		
1.4	7.99	32.64	124.50	30.94	116
1.6	1.97	26.27	86.25		
1.8	9.68	33.92	137.25		

Prova PUSH 5

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	500
Inflessione massima	400

Profondità [m]	Nr. colpi	NSPT	N(60)	Tensione verticale	Cn
0.2	1	1.5	1.01	3.60	1.47
0.4	5	7.5	5.06	7.20	1.45
0.6	8	12	8.10	10.80	1.42
0.8	5	7.5	5.06	14.40	1.40
1	6	9	6.08	18.00	1.38
1.2	4	6	4.05	21.60	1.35
1.4	4	6	4.05	25.20	1.33
1.6	3	4.5	3.04	28.80	1.31
1.8	5	7.5	5.06	32.40	1.29
Profondità [m]	N1(60)	Phi [°]	E [MPa]	Phi medio [°]	E medio [MPa]
0.2	2.21	27.25	52.80	33.49	121.85
0.4	10.86	34.74	137.25		
0.6	17.08	38.48	175.50		
0.8	10.49	34.49	137.25	34.32	137.25
1	12.39	35.74	150.00		
1.2	8.12	32.75	124.50		
1.4	7.99	32.64	124.50	32.47	124.5
1.6	5.90	30.86	111.75		
1.8	9.68	33.92	137.25		

Prova PUSH 6

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	400
Inflessione massima	400

Profondità [m]	Nr. colpi	NSPT	N(60)	Tensione verticale	Cn
0.2	3	4.5	3.04	3.6	1.47
0.4	6	9	6.08	7.2	1.45
0.6	8	12	8.10	10.8	1.42
0.8	8	12	8.10	14.4	1.40
1	5	7.5	5.06	18	1.38
1.2	3	4.5	3.04	21.6	1.35
1.4	4	6	4.05	25.2	1.33
1.6	2	3	2.03	28.8	1.31
1.8	1	1.5	1.01	32.4	1.29
Profondità [m]	N1(60)	Phi [°]	E [MPa]	Phi medio [°]	E medio [MPa]
0.2	6.63	27.76	62.4	34.13	129.3
0.4	13.03	36.14	150		
0.6	17.08	38.48	175.5		
0.8	16.79	38.33	175.5	34.58	141.5
1	10.32	34.37	137.25		
1.2	6.09	31.04	111.75		
1.4	7.99	32.64	124.5	29.25	103.25
1.6	3.93	28.87	99		
1.8	1.94	26.22	86.25		

Prova PUSH 7

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	400
Inflessione massima	400

Profondità [m]	Nr. colpi	NsPT	N(60)	Tensione verticale	Cn
0.2	1	1.5	1.01	3.6	1.47
0.4	6	9	6.08	7.2	1.45
0.6	10	15	10.13	10.8	1.42
0.8	12	18	12.15	14.4	1.40
1	15	22.5	15.19	18	1.38
1.2	17	25.5	17.21	21.6	1.35
1.4	15	22.5	15.19	25.2	1.33
1.6	12	18	12.15	28.8	1.31
1.8	10	15	10.13	32.4	1.29
Profondità [m]	N1(60)	Phi [°]	E [MPa]	Phi medio [°]	E medio [MPa]
0.2	2.21	27.25	52.8	34.68	134.6
0.4	13.03	36.14	150		
0.6	21.35	40.66	201		
0.8	25.19	42.44	226.5	31.46	185
1	30.96	44.89	264.75		
1.2	34.52	46.28	290.25		
1.4	29.97	44.48	264.75	41.96	230.75
1.6	23.60	41.73	226.5		
1.8	19.36	39.68	201		

Prova PUSH 8

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	700
Inflessione massima	400

Profondità [m]	Nr. colpi	NSPT	N(60)	Tensione verticale	Cn
0.2	1	1.5	1.01	3.60	1.47
0.4	4	6	4.05	7.20	1.45
0.6	12	18	12.15	10.80	1.42
0.8	27	40.5	27.34	14.40	1.40
1	25	37.5	25.31	18.00	1.38
1.2	12	18	12.15	21.60	1.35
1.4	4	6	4.05	25.20	1.33
1.6	2	3	2.03	28.80	1.31
1.8	1	1.5	1.01	32.40	1.29
Profondità [m]	N1(60)	Phi [°]	E [MPa]	Phi medio [°]	E medio [MPa]
0.2	2.21	27.25	52.8	34.35	134.6
0.4	8.69	33.18	124.5		
0.6	25.62	42.63	226.5		
0.8	56.67	53.67	417.75	33.48	235
1	51.61	52.13	392.25		
1.2	24.37	42.08	226.5		
1.4	7.99	32.64	124.5	29.24	103.25
1.6	3.93	28.87	99		
1.8	1.94	26.22	86.25		

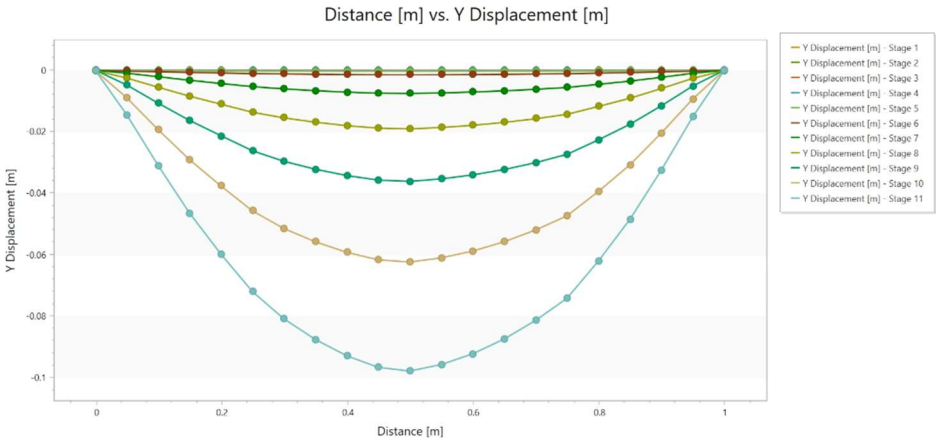
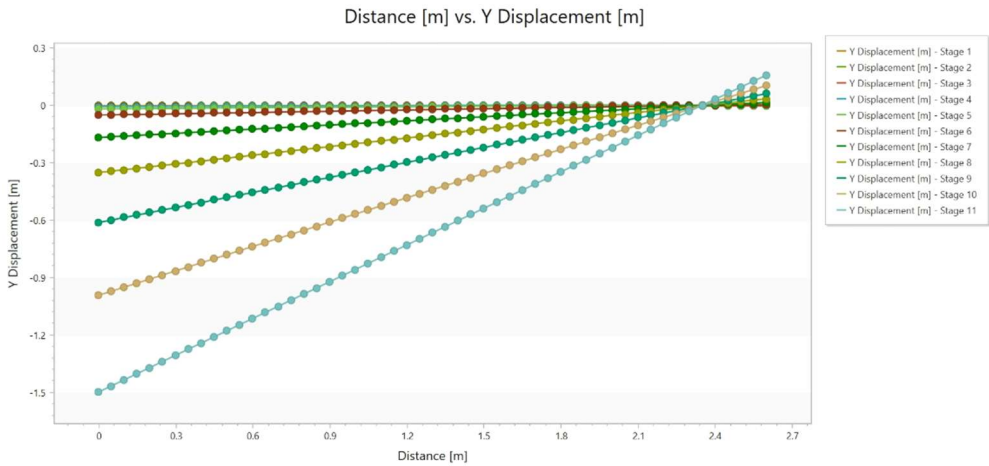
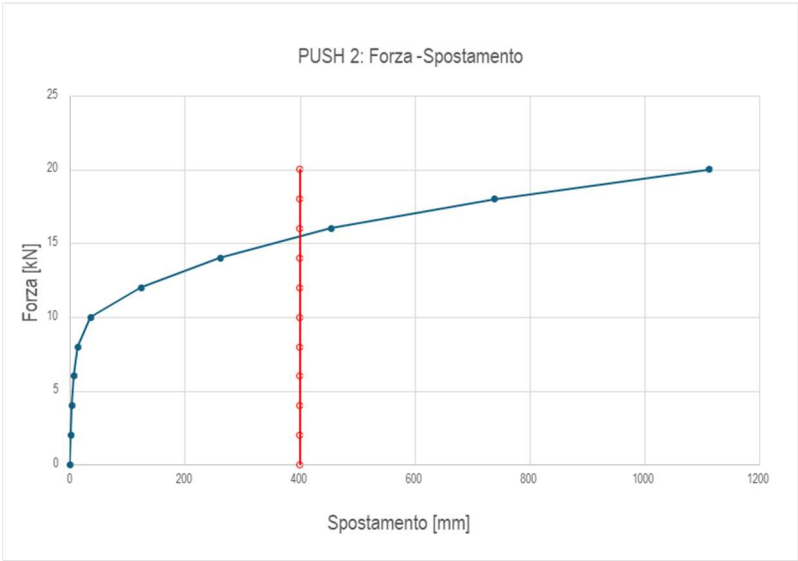
Prova PUSH 9

Dati geometrici [mm]	
Lunghezza paletto	2600
Infissione	1000
H applicazione forza	1000
Distanza posteriore	300
Inflessione massima	400

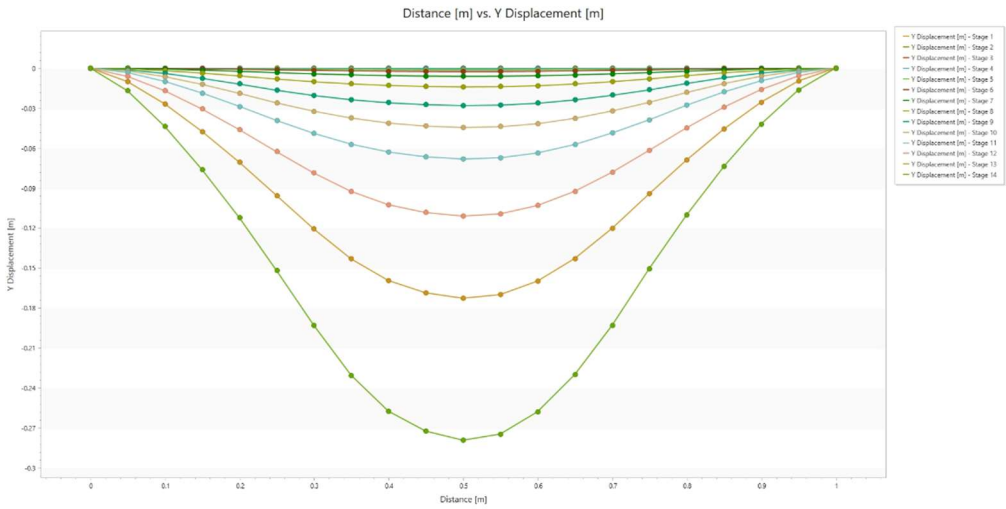
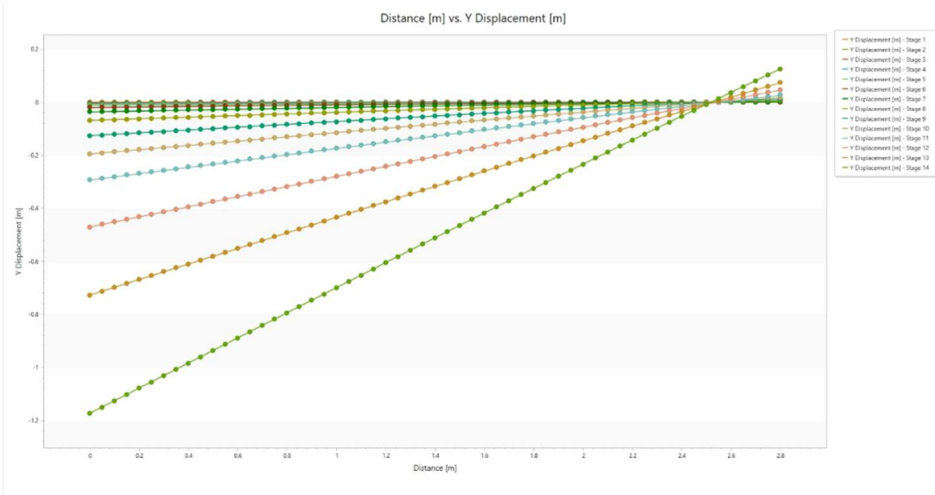
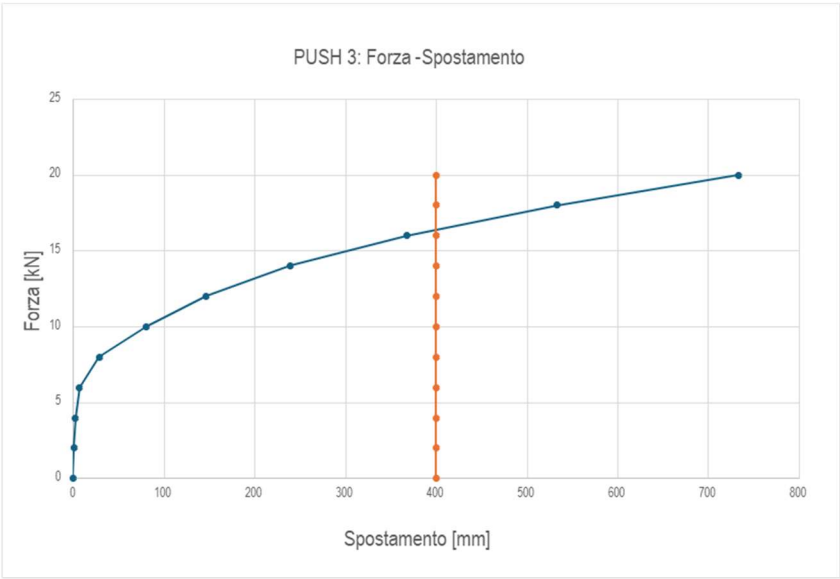
Profondità [m]	Nr. colpi	NSPT	N(60)	Tensione verticale	Cn
0.2	1	1.5	1.01	3.60	1.47
0.4	1	1.5	1.01	7.20	1.45
0.6	3	4.5	3.04	10.80	1.42
0.8	9	13.5	9.11	14.40	1.40
1	13	19.5	13.16	18.00	1.38
1.2	12	18	12.15	21.60	1.35
1.4	15	22.5	15.19	25.20	1.33
1.6	35	52.5	35.44	28.80	1.31
1.8	40	60	40.50	32.40	1.29
Profondità [m]	N1(60)	Phi [°]	E [MPa]	Phi medio [°]	E medio [MPa]
0.2	2.21	27.25	52.8	27.48	83.6
0.4	2.17	27.30	86.25		
0.6	6.40	27.91	111.75		
0.8	18.89	29.73	188.25	30.44	218
1	26.83	30.95	239.25		
1.2	24.37	30.65	226.5		
1.4	29.97	31.56	264.75	36.11	456
1.6	68.84	37.63	519.75		
1.8	77.45	39.15	583.5		

12. Appendice C

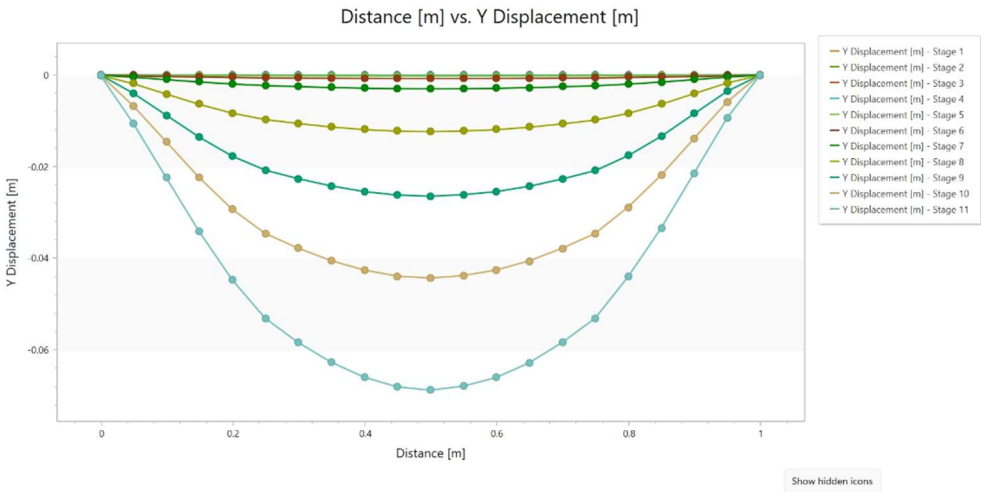
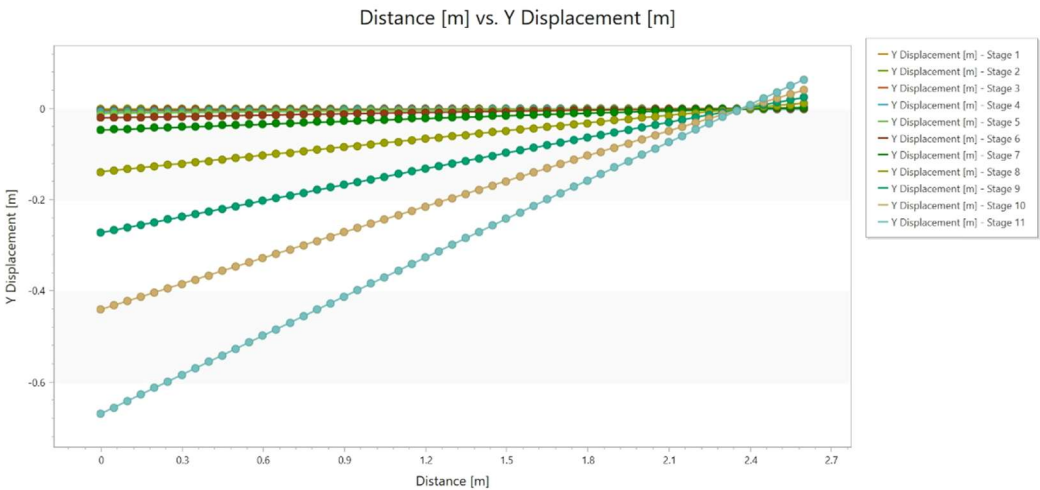
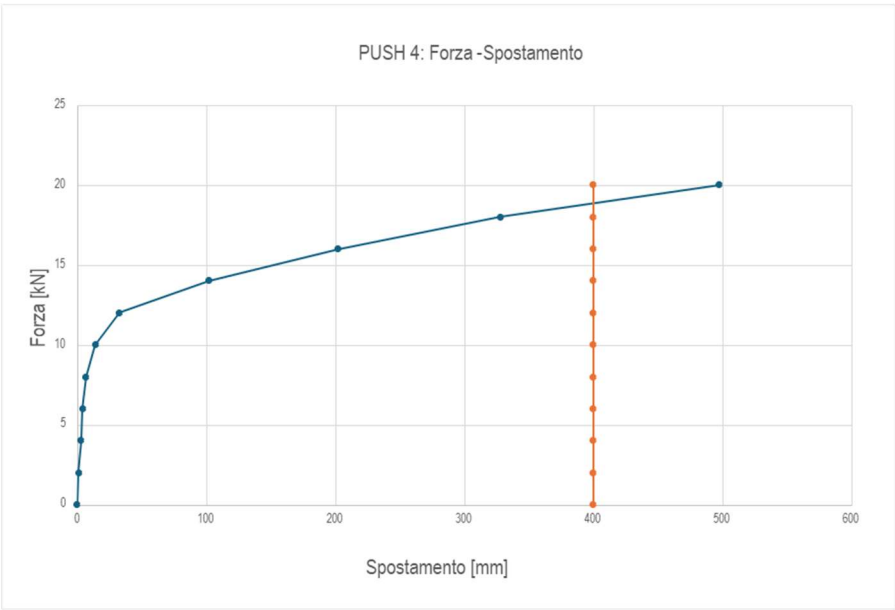
Push 2



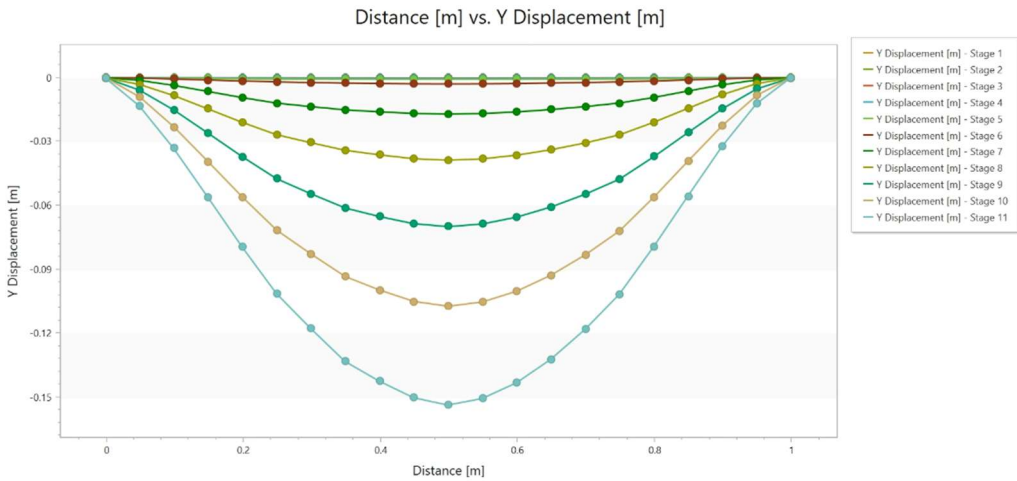
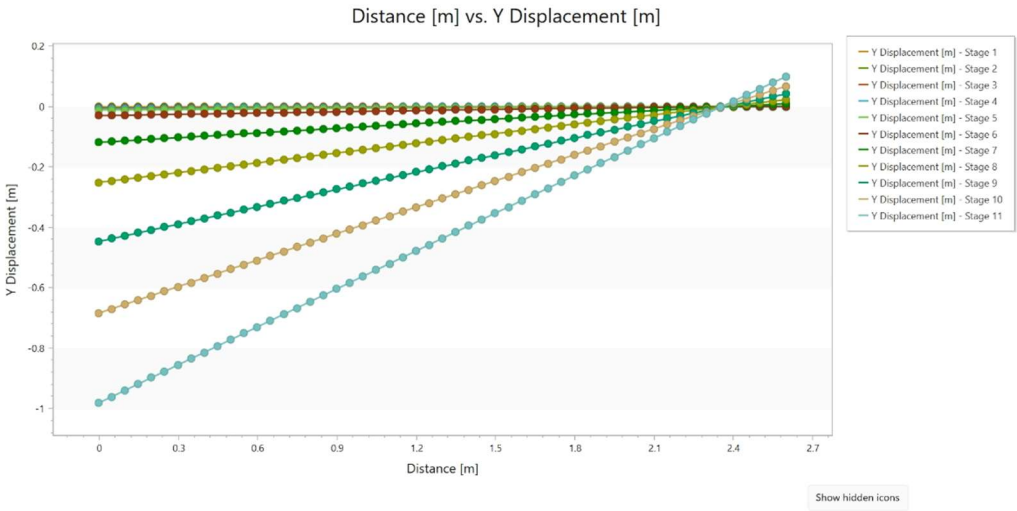
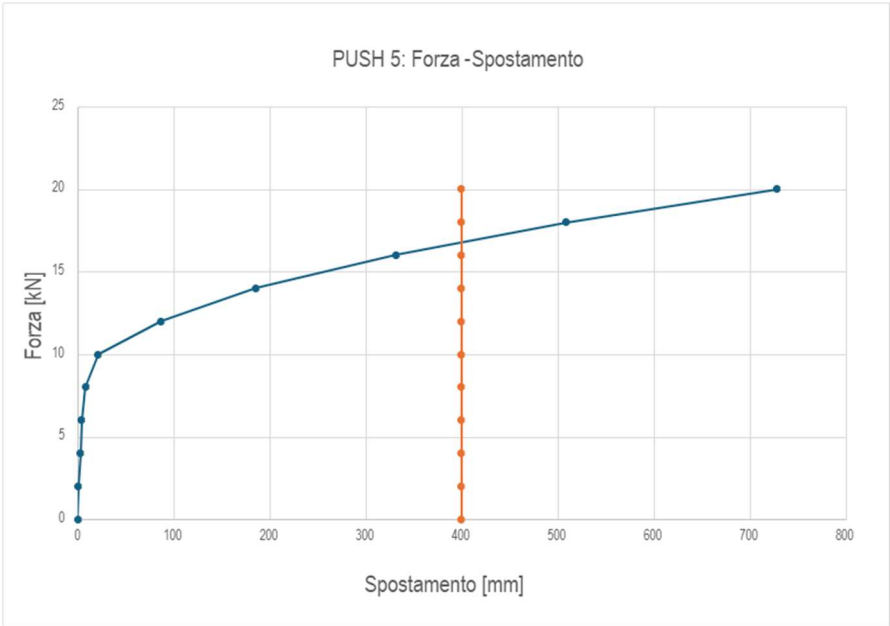
Push 3



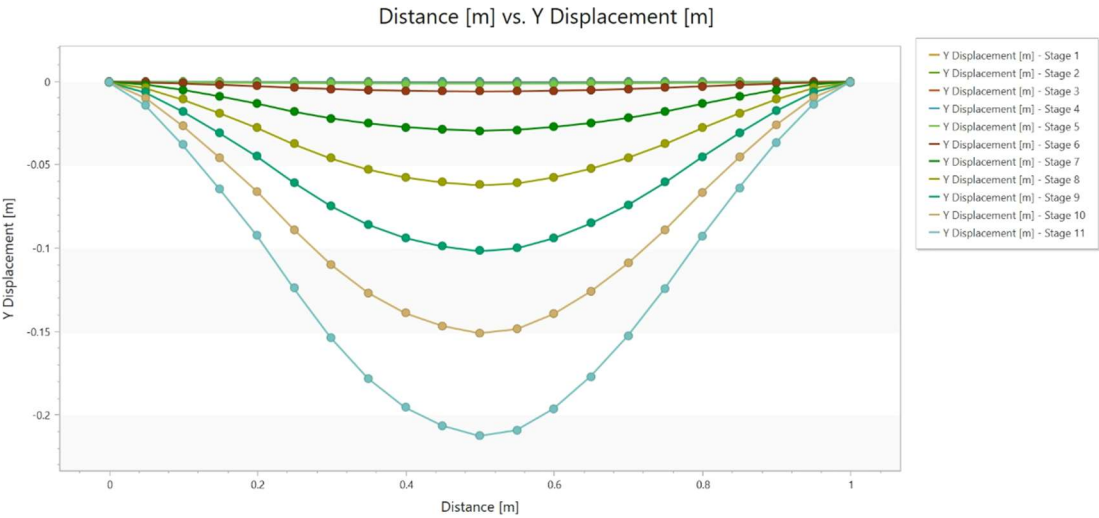
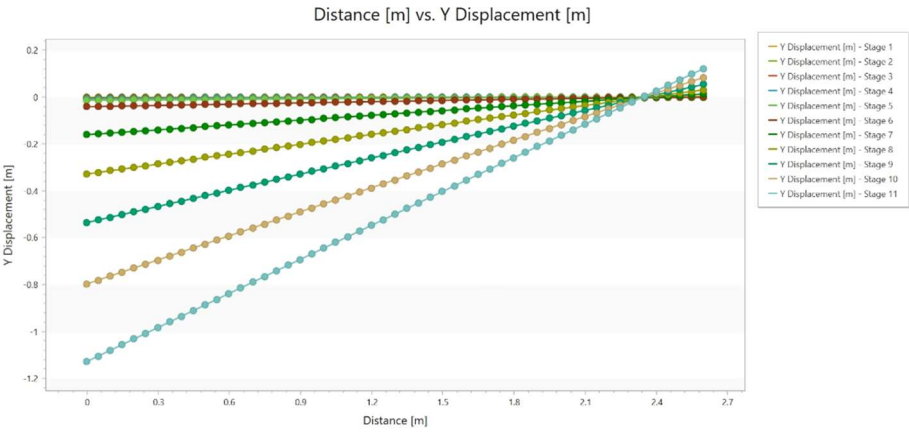
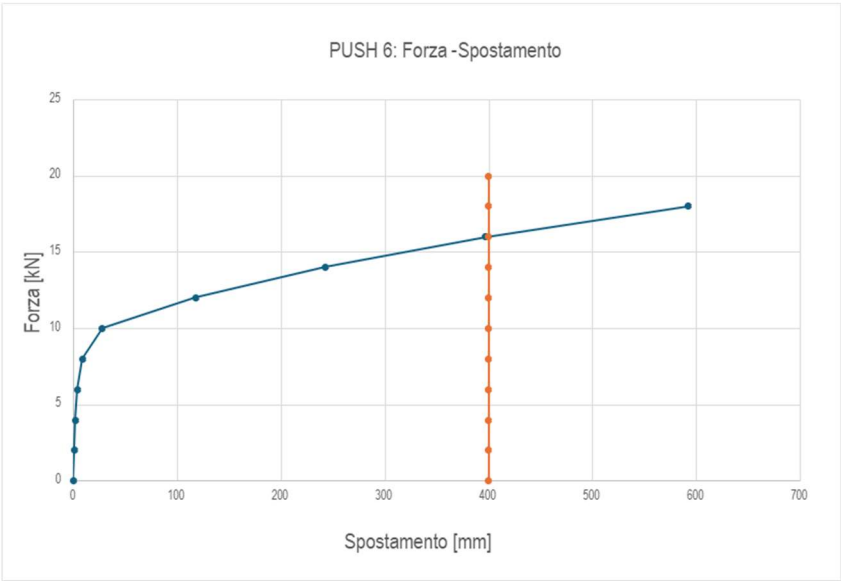
Push 4



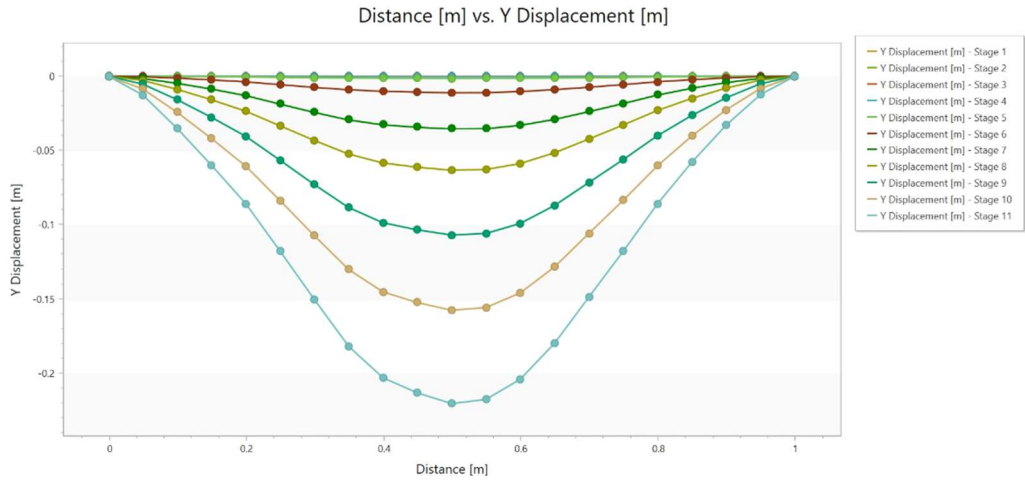
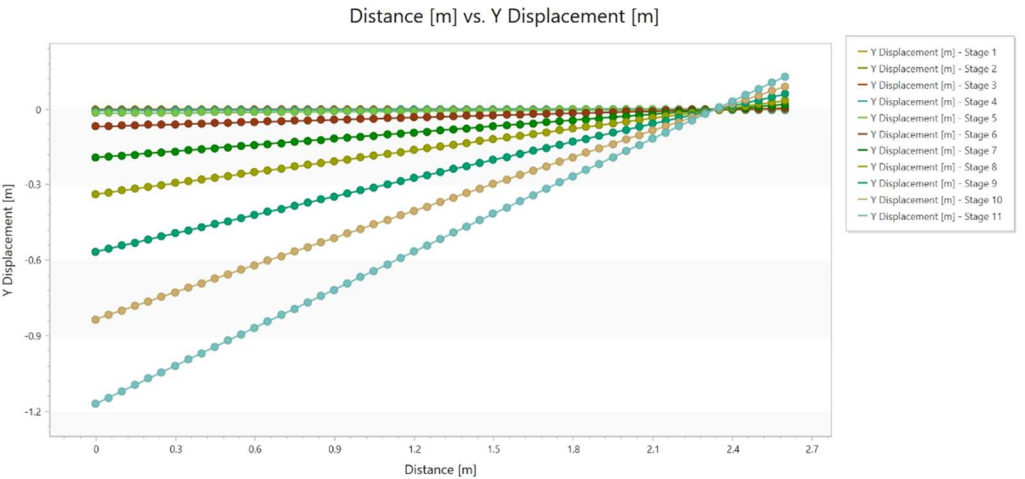
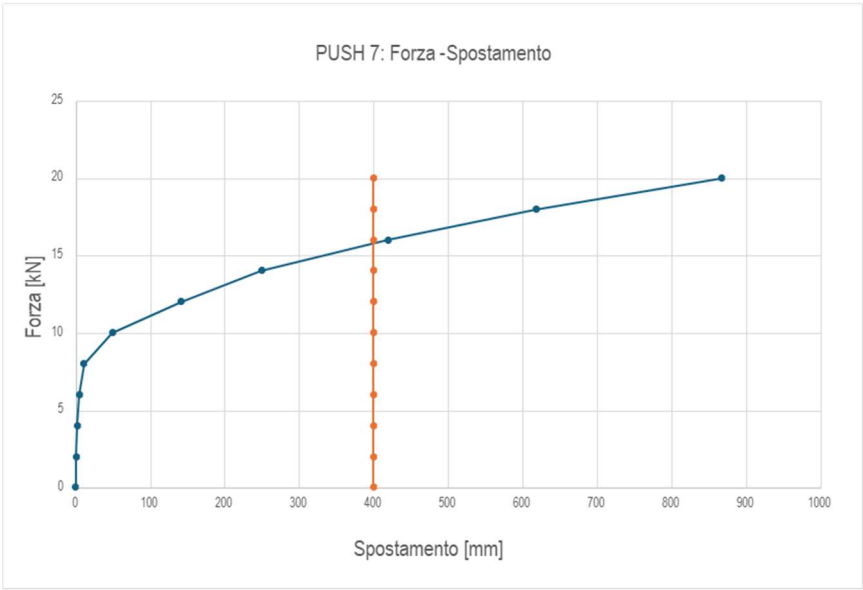
Push 5



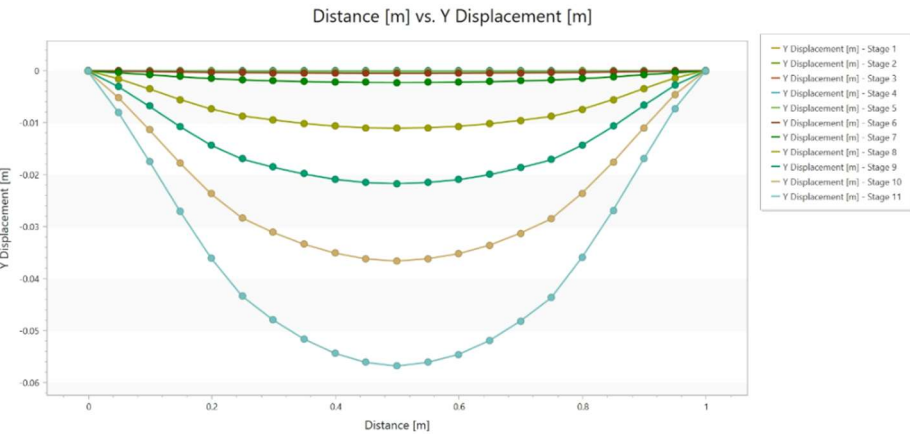
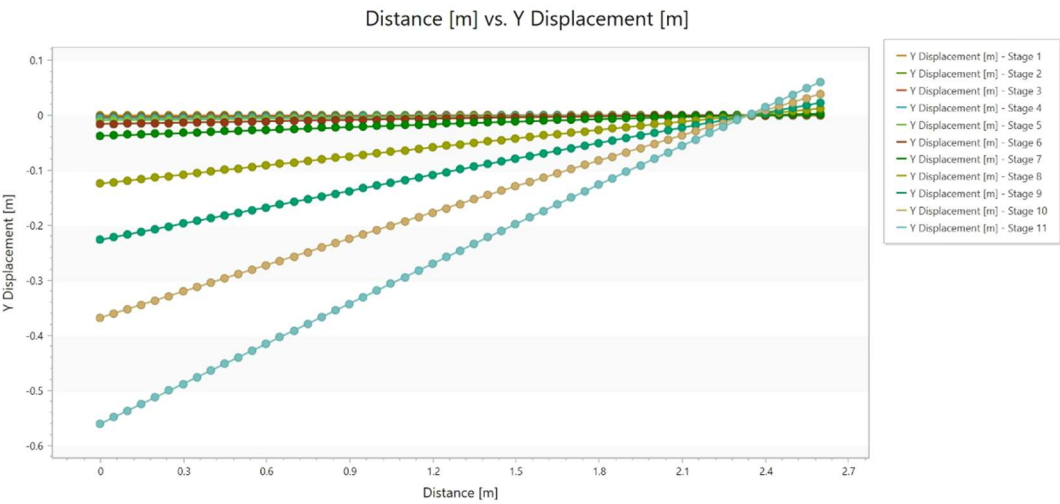
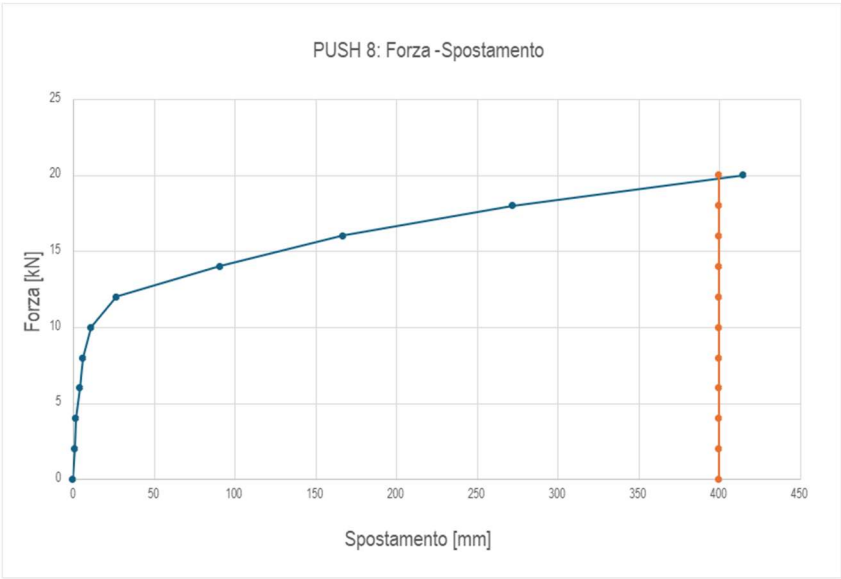
Push 6



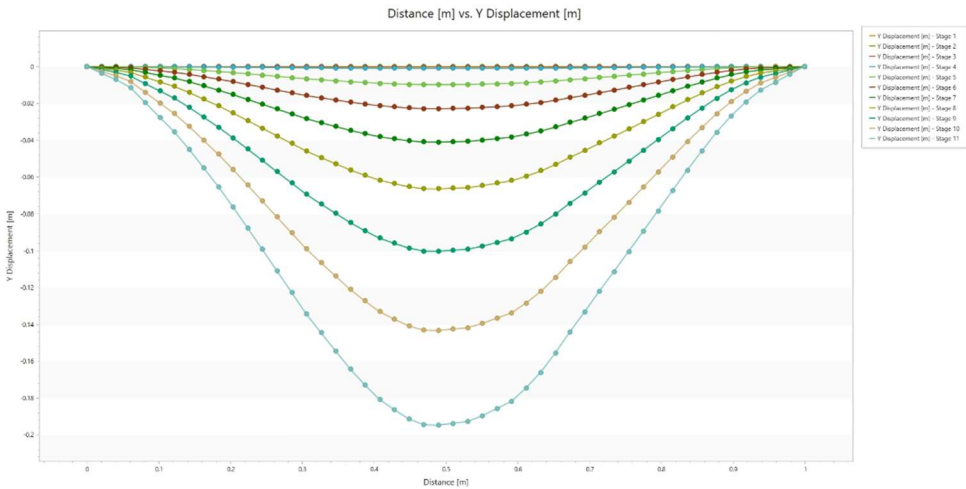
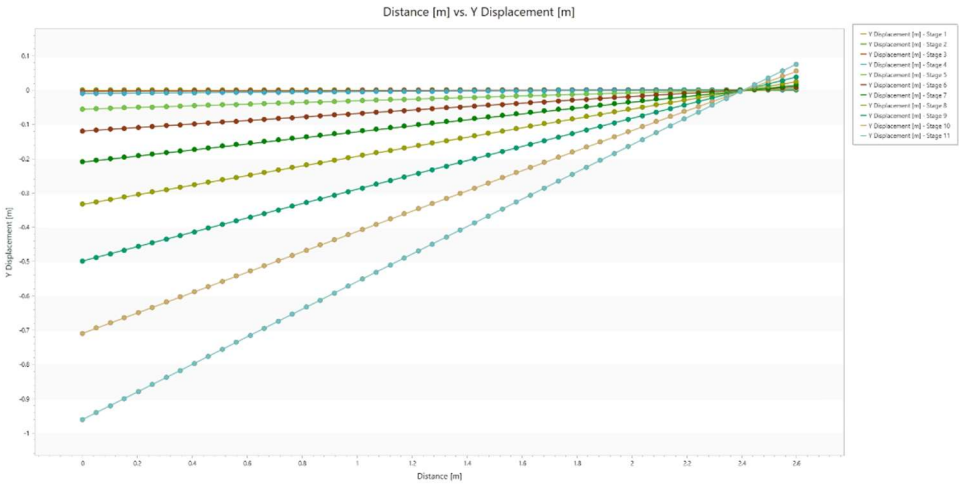
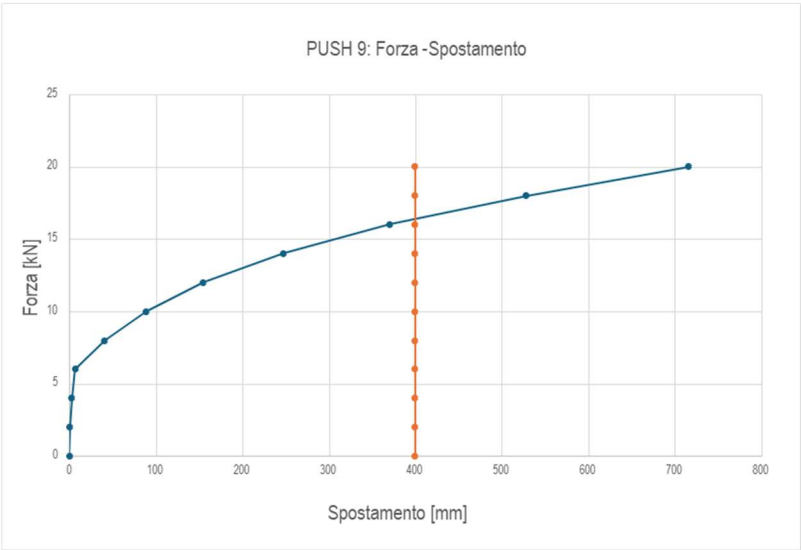
Push 7



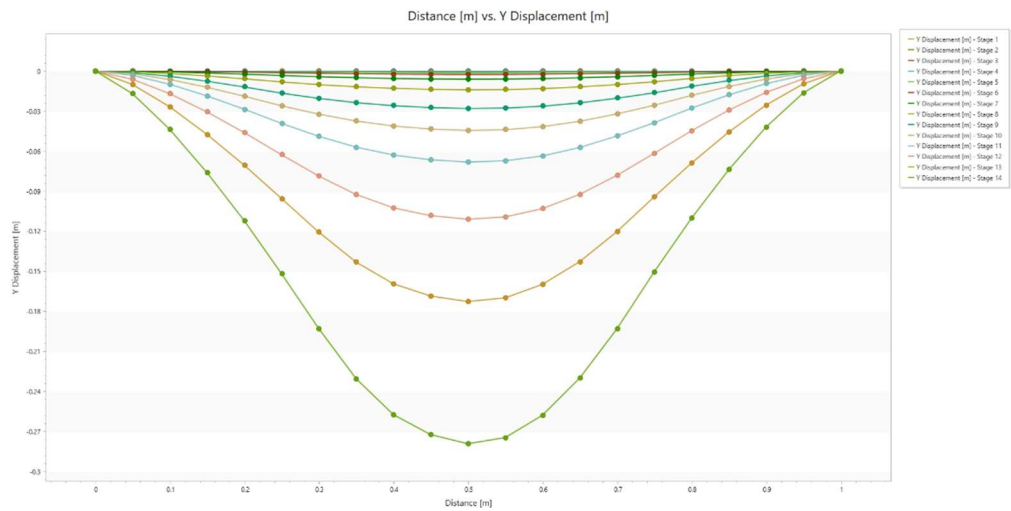
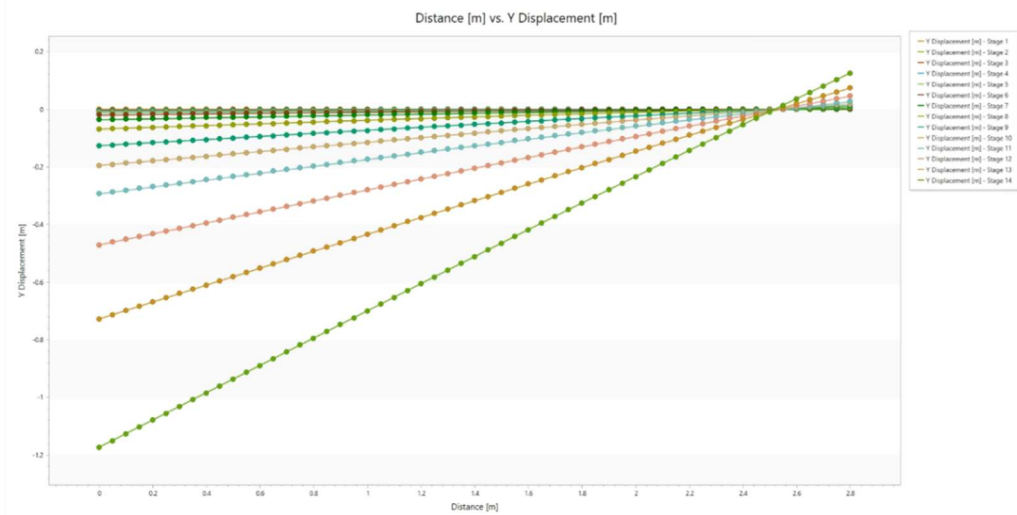
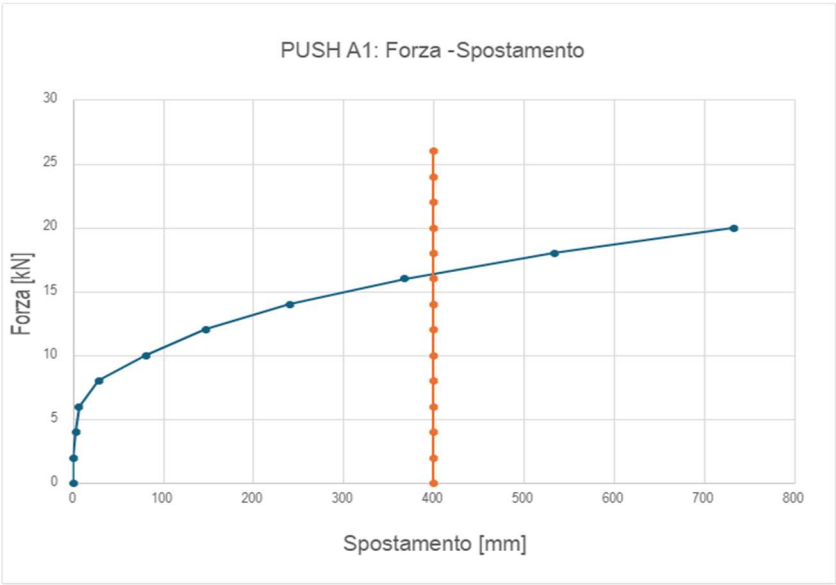
Push 8



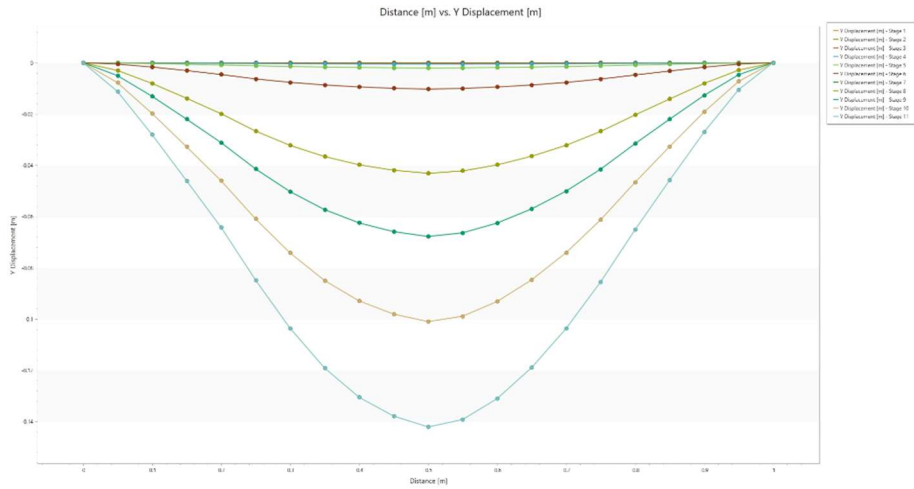
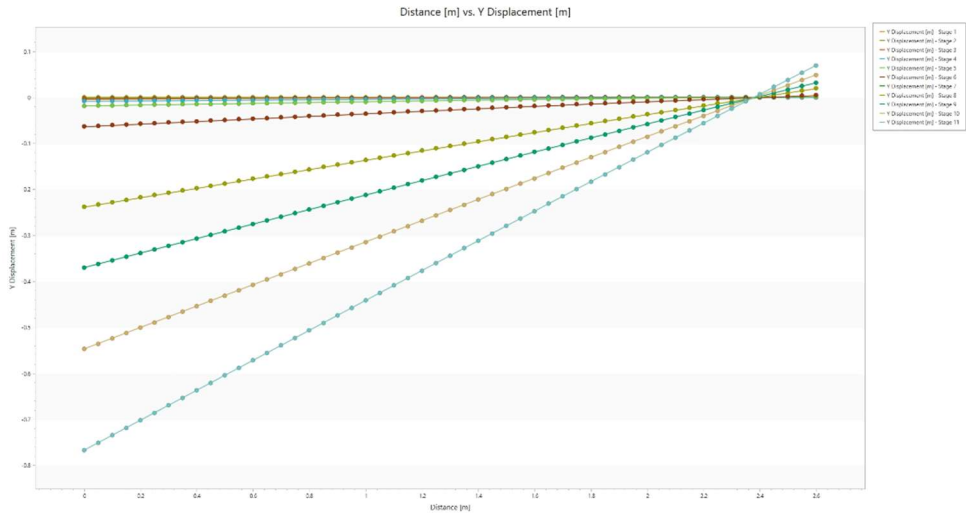
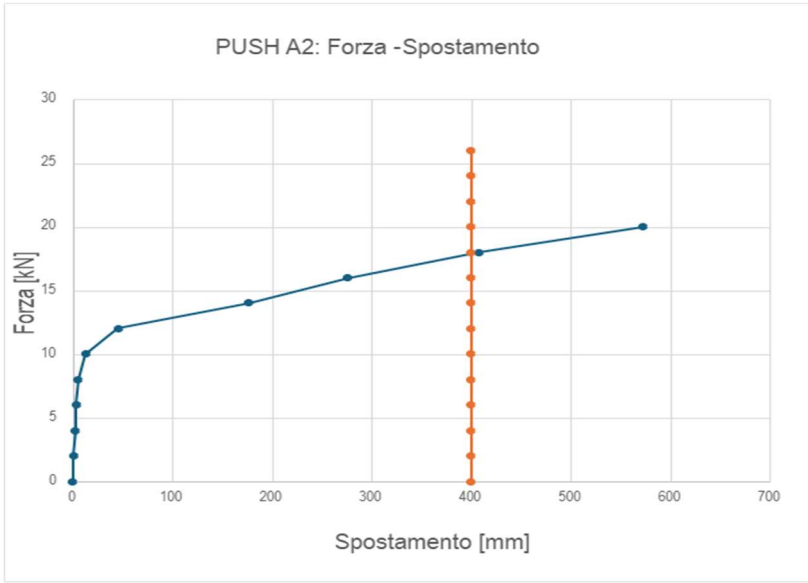
Push 9



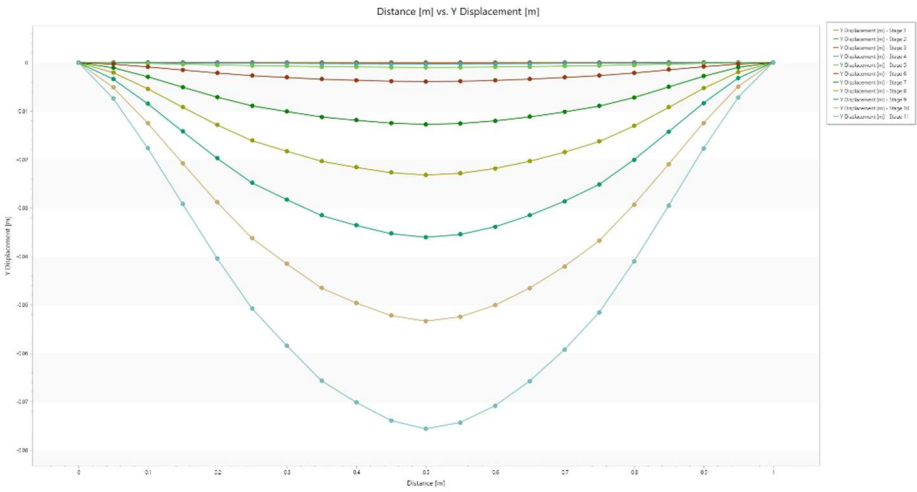
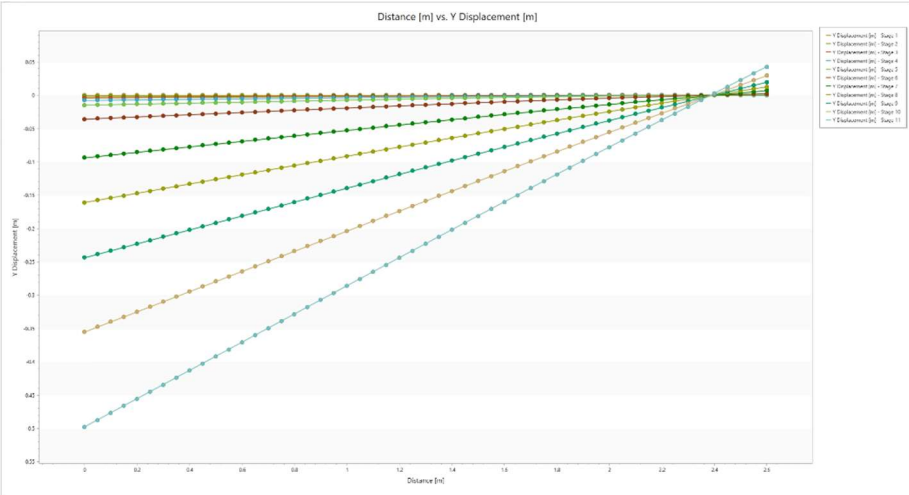
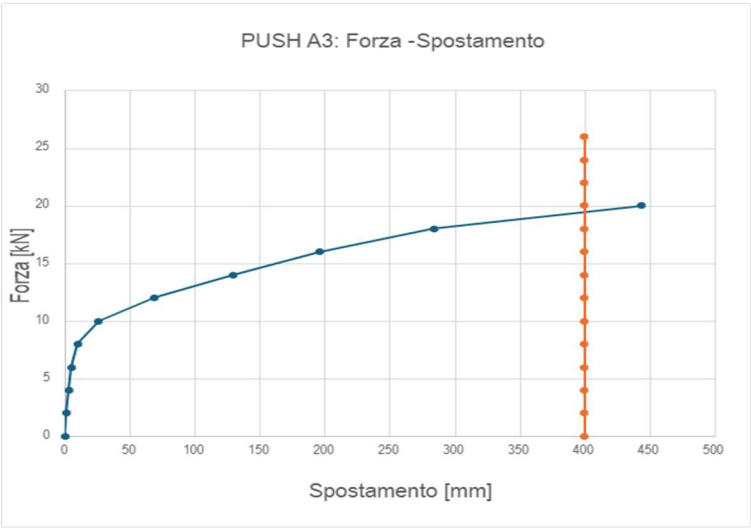
Prova PUSH A1



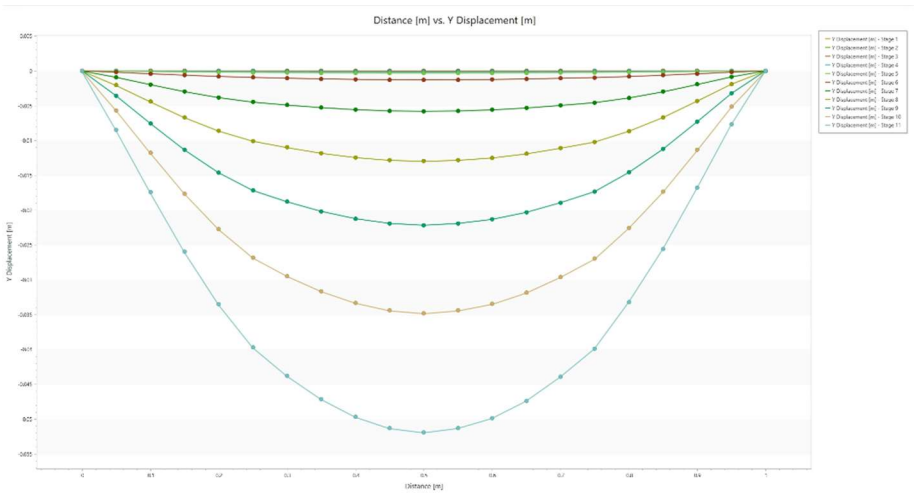
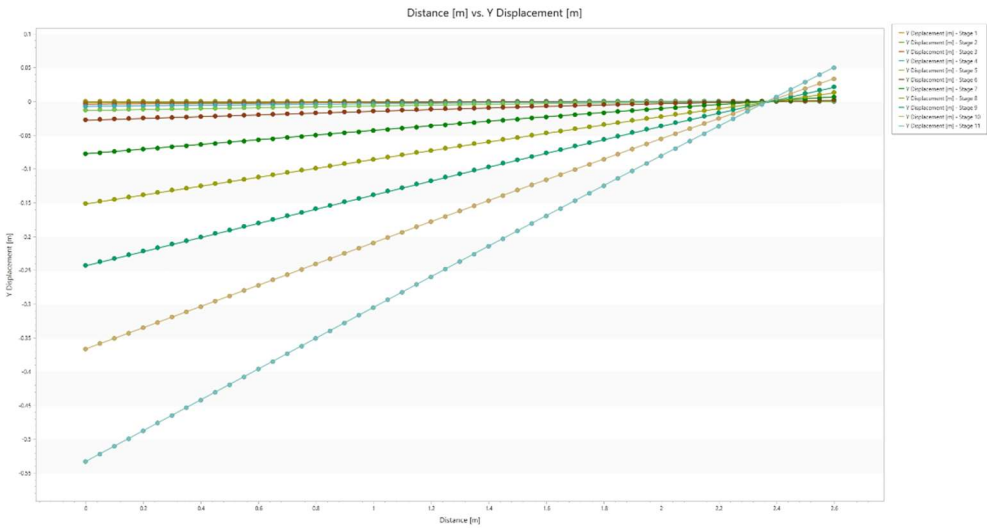
Prova PUSH A2



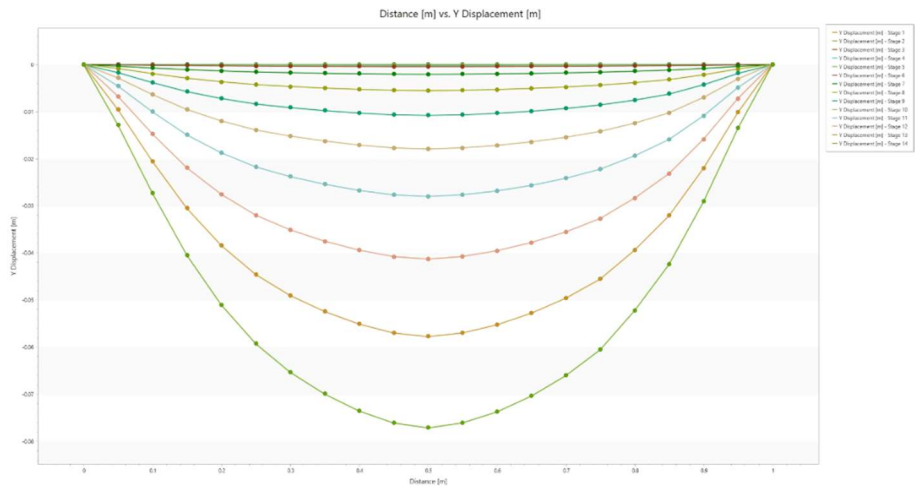
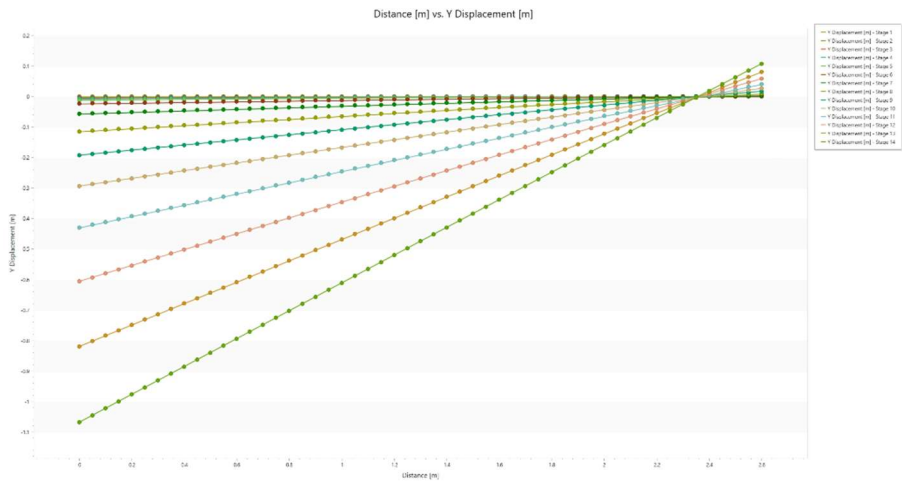
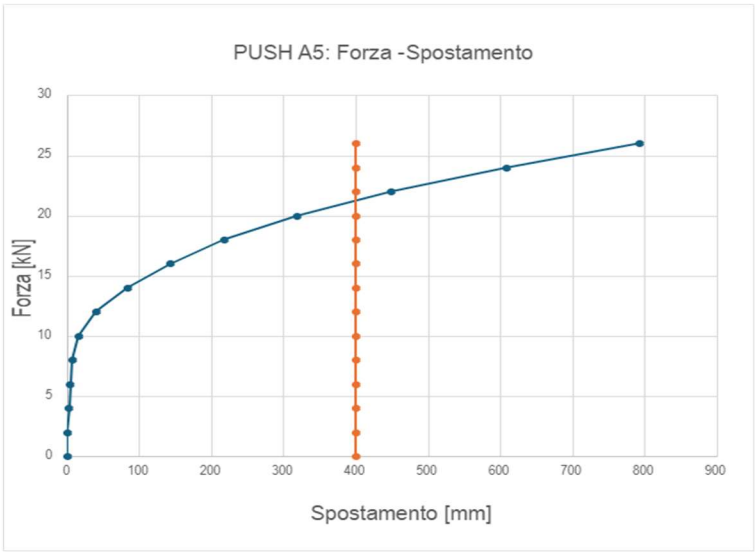
Prova PUSH A3



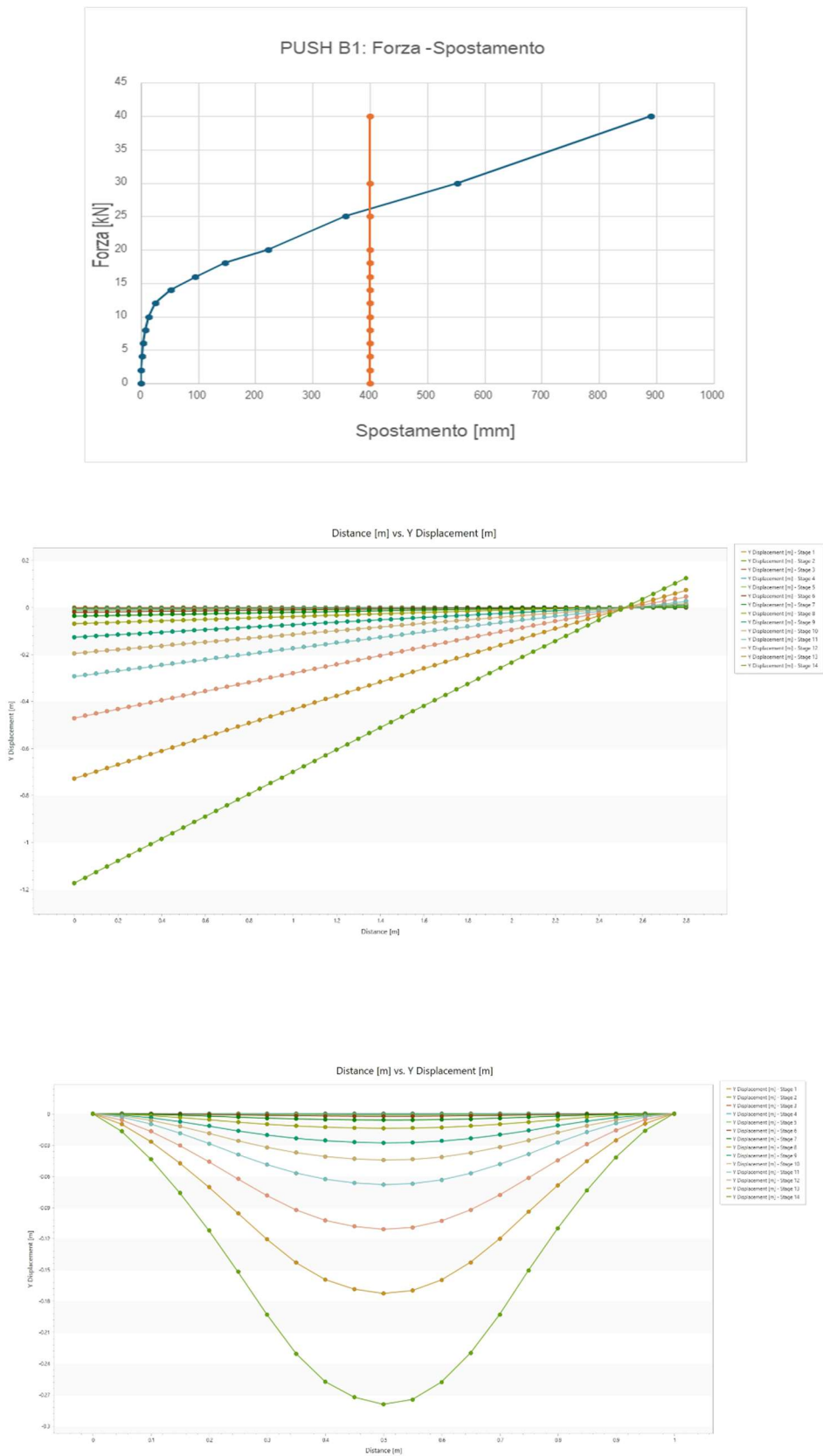
Prova PUSH A4



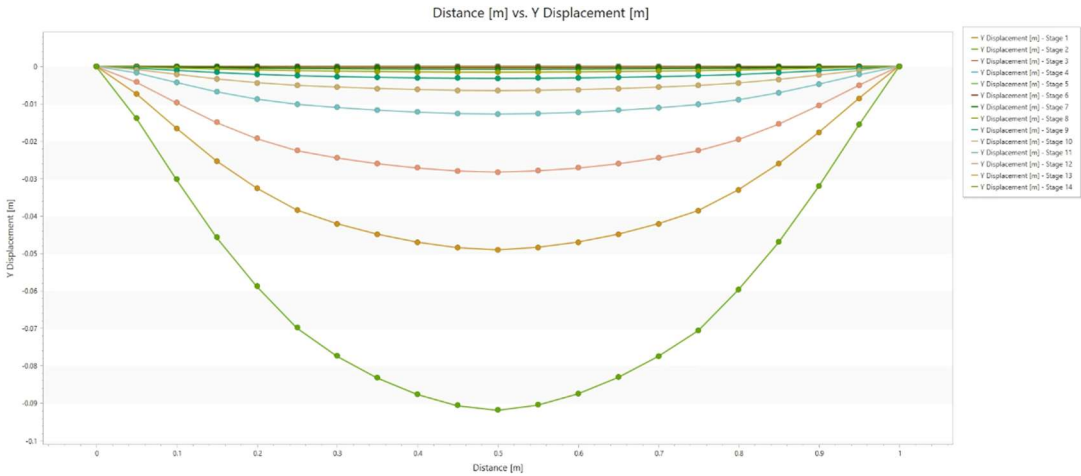
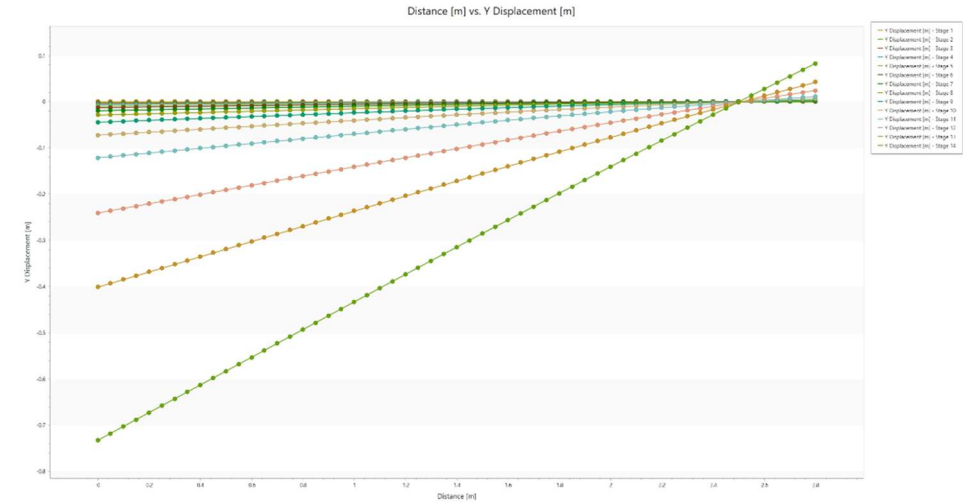
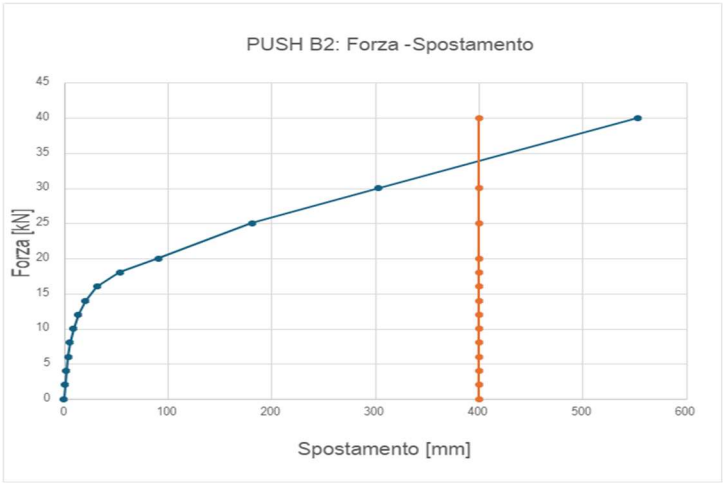
Prova PUSH A5



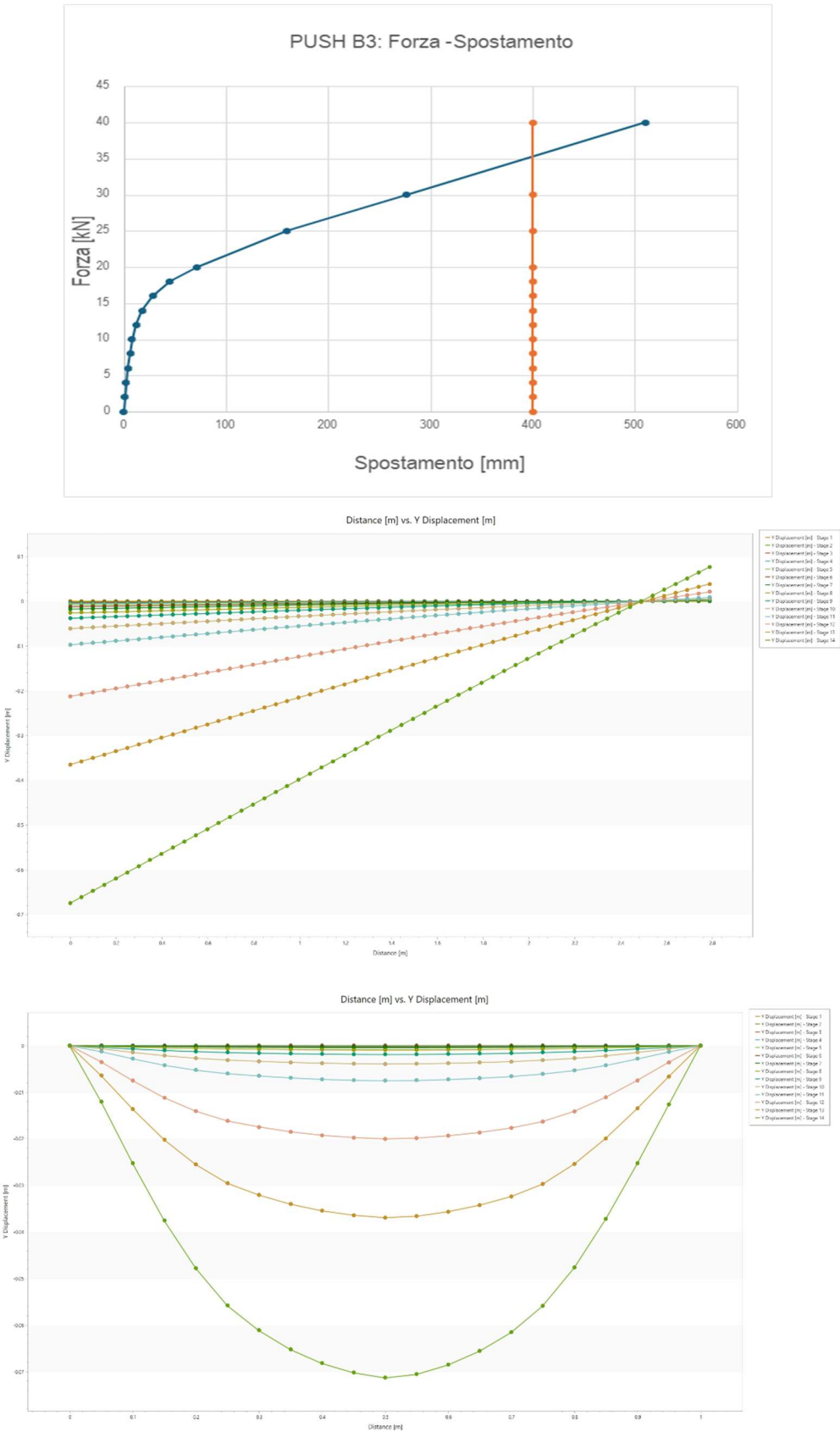
Prova PUSH B1



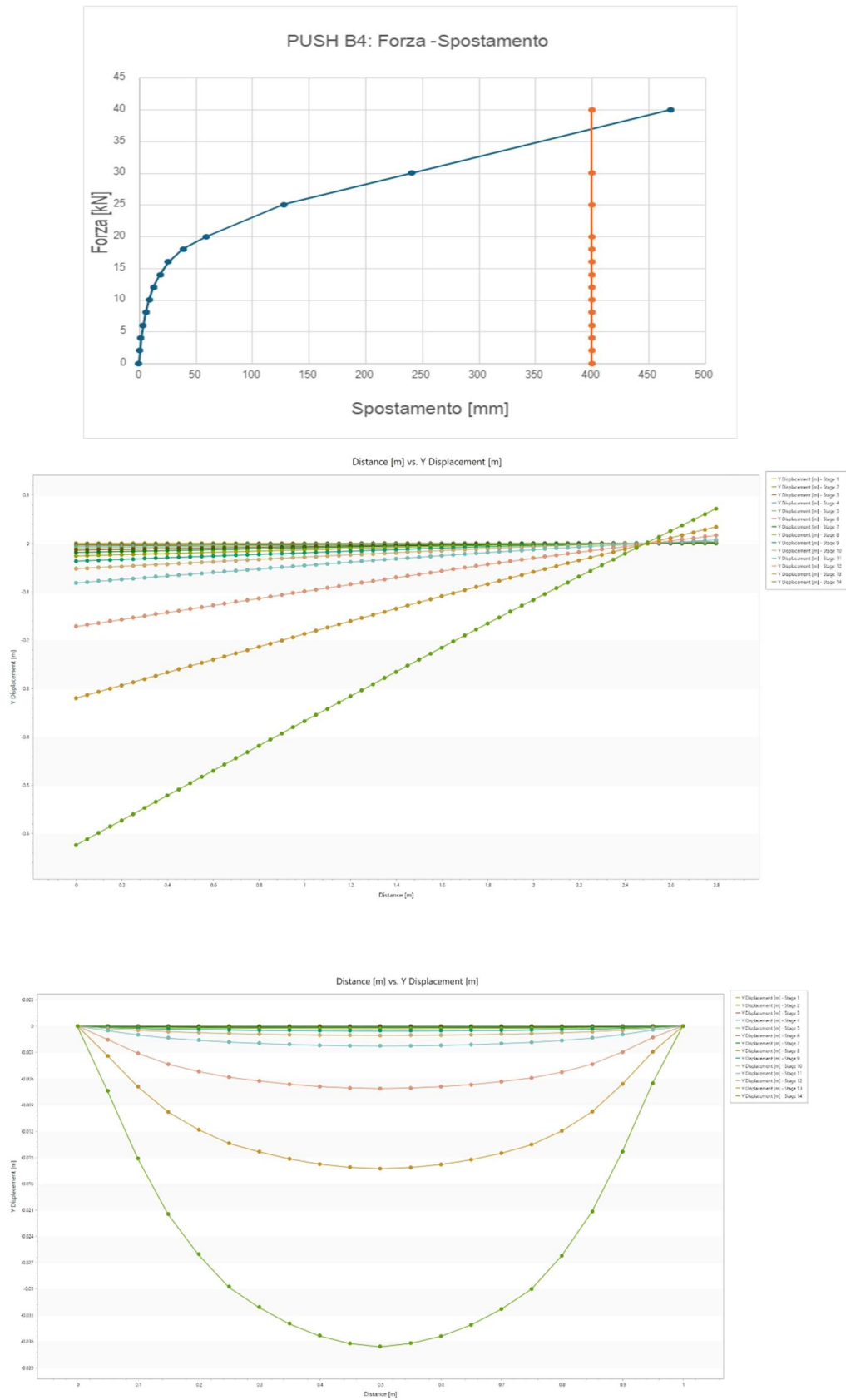
Prova PUSH B2



Prova PUSH B3



Prova PUSH B4



Prova PUSH B5

