

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio  
Specializzazione in Rischi Naturali e Protezione Civile



**Politecnico  
di Torino**

## Tesi di Laurea Magistrale

Gallerie paramassi: analisi della risposta all'impatto dei blocchi  
mediante modellazione agli elementi finiti

Relatore

Prof. Daniele Peila

Correlatori

Ing. Maddalena Marchelli

Ing. Stefano Vigna

Candidato

Luca Gally

Anno Accademico 2022/2023

Per prima cosa ci tengo a ringraziare tutti coloro che mi hanno permesso di raggiungere questo importante traguardo.

Ringrazio il Professore Daniele Peila, relatore di questa tesi, che mi ha dato la possibilità di realizzare questo elaborato e, durante le lezioni, mi ha trasmesso parte delle sue conoscenze ma soprattutto tutta la sua passione per l'ingegneria.

Ringrazio la correlatrice Ing. Maddalena Marchelli per la sua infinita disponibilità e professionalità, il suo aiuto è stato fondamentale specialmente nei momenti in cui ho riscontrato delle problematiche che non mi permettevano di proseguire nel lavoro.

Ringrazio l'Ing. Stefano Vigna, la sua conoscenza ed esperienza nell'utilizzo del software ABAQUS sono state essenziali per la creazione del modello agli elementi finiti utilizzato nella tesi.

Voglio ringraziare anche tutti gli altri professori che in questi anni, grazie alla loro dedizione, mi hanno trasmesso molto e mi hanno fatto crescere professionalmente.  
Un pensiero in particolare va al Professor Roberto Revelli...

Grazie ai miei genitori, mia sorella Cristina e a tutta la mia famiglia che mi ha permesso di arrivare fino a questo traguardo, sostenendomi e appoggiandomi Sempre.

Grazie a Giorgia per avermi sopportato e incoraggiato anche nei momenti in cui la determinazione veniva a mancare... Grazie!

E infine Grazie a tutti i miei Amici e Compagni di università che sono sempre riusciti a distrarmi e portare, anche nei momenti più tosti, un po' di spensieratezza e felicità che a mio parere sono alla base di un buon rendimento sia scolastico che nella vita in generale.

# Sommario

Indice delle Figure.....	IV
Indice delle Tabelle .....	X
1 Introduzione .....	1
2 Caduta massi e opere di mitigazione del rischio.....	2
2.1 La caduta massi: generalità del fenomeno e sue caratteristiche .....	2
2.1.1 Cinematismi successivi al distacco .....	3
2.1.2 Cause legate alla caduta massi .....	5
2.2 Interventi di mitigazione del rischio.....	6
2.2.1 Opere di prevenzione .....	6
2.2.2 Opere di protezione .....	12
3 Le gallerie paramassi .....	16
3.1 Tipologie.....	16
3.2 Materiali impiegati .....	21
3.2.1 Calcestruzzo armato .....	21
3.2.2 Strato assorbente .....	21
3.3 Modalità costruttive.....	27
3.4 Normative .....	30
4 Progettazione delle gallerie paramassi.....	32
4.1 Normativa relativa alla progettazione.....	32
4.1.1 Definizione delle azioni .....	32
4.1.2 Stima dei parametri di impatto .....	33
4.1.3 Calcolo dell'azione data dall' impatto del blocco.....	35
4.1.4 Verifiche e stati limite .....	40
4.1.5 Manutenzione delle gallerie .....	42
4.2 Analisi bibliografica dell'impatto di un blocco e della risposta strutturale.....	43
4.2.1 Analisi sperimentali.....	43
4.2.2 Modellazione numerica .....	58
4.2.3 Conclusioni e analisi comparativa.....	67
5 Modellazione della dinamica d'impatto.....	68
5.1 Analisi FEM mediante Abaqus.....	68
5.2 Scelta dei dati di input e Back analysis .....	69
5.2.1 Geometria del modello e tipo di materiale .....	69

5.2.2	Proprietà meccaniche di base .....	69
5.2.3	Condizioni al contorno .....	72
5.2.4	Output analizzati .....	73
5.2.5	Generazione della Mesh .....	74
5.2.6	Simulazioni, variazione e stabilimento dei parametri migliori .....	75
5.3	Analisi di sensitività sullo strato assorbente.....	82
5.4	Risultati.....	85
5.4.1	Variazione del volume e della massa del blocco.....	89
5.4.2	Variazione della velocità e dell'altezza di caduta del blocco.....	97
5.4.3	Variazione dello spessore dello strato assorbente .....	103
5.4.4	Variazione dello spessore della soletta.....	109
5.4.5	Considerazioni finali sullo studio di sensitività .....	114
6	Conclusioni .....	117
7	APPENDICE A.....	119
8	Bibliografia .....	131
9	Sitografia.....	134

## Indice delle Figure

Figura 2.1: Rappresentazione schematica di un crollo (materiale didattico del corso Landslide & Slope Engineering Politecnico di Torino).....	2
Figura 2.2: Rappresentazione schematica di un ribaltamento rotazionale (materiale didattico del corso Landslide & Slope Engineering Politecnico di Torino). ....	3
Figura 2.3: Rappresentazione del rimbalzo di un blocco con indicate le velocità pre e post impatto (G. P. Giani et al. 2004). ....	4
Figura 2.4: Schematizzazione delle cause che influenzano la caduta massi (www.building.govt.nz). ....	5
Figura 2.5: Intervento di prevenzione costituito da contrafforti in calcestruzzo e chiodatura (foto da sopralluogo effettuato in data 07/05/2023, Exilles). ....	7
Figura 2.6: Rappresentazione di esempio di un chiodo (Catalogo Dywidag Systems International). ....	8
Figura 2.7: Rappresentazione dei due tipi di rete in aderenza (Materiale didattico del corso Consolidamento Rocce e Terreni Politecnico di Torino).....	8
Figura 2.8: Rappresentazione dell' applicazione dello spritz beton (www.piccole-dolomiti.it).9	
Figura 2.9: Foto di dreni suborizzontali (www.sofiacostruzioni.it). ....	9
Figura 2.10: Foto raffigurante delle canalette per la raccolta dell'acqua di ruscellamento (www.geoprodotti.eu). ....	10
Figura 2.11: Esempio di un tirante a barra (Catalogo Dywidag Systems International). ....	11
Figura 2.12: Rappresentazione di esempio di un tirante in trefoli di acciaio (Catalogo Dywidag Systems International). ....	11
Figura 2.13: Barriera elastica paramassi (Sito ufficiale Maccaferri). ....	13
Figura 2.14: Rappresentazione di un vallo e di un rilevato paramassi (www.geostru.eu).....	14
Figura 3.1: Foto di una galleria a portale dall'interno (www.mubre.it). ....	17
Figura 3.2: Foto di una galleria a portale dall'esterno (www.gazzettajonica.it). ....	17
Figura 3.3: Schema rappresentativo di una galleria a mensola (www.lavoripubblici.regione.campania.it).....	18
Figura 3.4: Foto di una galleria a mensola (www.issuu.com).....	18
Figura 3.5: Rappresentazione di una galleria policentrica (foto da "Linee guida per la progettazione di gallerie paramassi" di Calvetti e Prisco). ....	19
Figura 3.6: Galleria paravalanghe sul Passo Giovo in provincia di Bolzano (www.bergmeister.eu). ....	20
Figura 3.7: Rappresentazione di una geogriglia monodirezionale (www.tenax.net). ....	23
Figura 3.8: Rappresentazione di una geogriglia bidirezionale (www.tenax.net). ....	23
Figura 3.9: Vetro cellulare in grani (www.bacchispa.it). ....	24
Figura 3.10: Sistema assorbente ROCKFALL-X™ G (www.geobrug.com). ....	25
Figura 3.11: Sistema assorbente ROCKFALL-X™ A (www.geobrug.com). ....	25
Figura 3.12: Schema della formazione dell'EPS Geofam (Yan et al., 2022). ....	26
Figura 3.13: Fase di completamento del getto della soletta (www.trasparenza.provincia.salerno.it). ....	27

Figura 3.14: Rappresentazione degli elementi prefabbricati di una galleria a mensola e di come vengono posizionati fino a dare la forma di progetto (www.trasparenza.provincia.salerno.it).	28
Figura 3.15: Rappresentazione del getto di sigillatura tra gli elementi prefabbricati (www.trasparenza.provincia.salerno.it).	29
Figura 4.1: : Distinzione delle tre classi di conseguenze legate a un crollo (ONR 24810:2021).	35
Figura 4.2: Definizione dei valori del coefficiente C (ASTRA 12 006).	37
Figura 4.3: Schema rappresentativo della diffusione della forza di sostituzione $A_d$ (ASTRA 12 006 UNI 11211-4).	37
Figura 4.4: rappresentazione della scomposizione delle forze per un impatto obliquo (ASTRA 12 006).	38
Figura 4.5: Schema raffigurante la distribuzione dell'impatto secondo le norme giapponesi (Japan Road Association, 1983).	39
Figura 4.6: Tabella relativa ai coefficienti per le azioni negli SLU (NTC 2018).	40
Figura 4.7: Tabella relativa ai coefficienti per le resistenze dei materiali nelle SLU (NTC 2018).	41
Figura 4.8: Tabella relativa al coefficiente R3 per le SLU (NTC 2018).	41
Figura 4.9: Dimostrazione dello stato e della funzionalità della galleria a seguito di due differenti approcci di manutenzione (ONR 24810).	42
Figura 4.10: Modello degli esperimenti al Politecnico Federale di Losanna (Labiouse et al., 1994).	44
Figura 4.11: Rappresentazione in pianta delle dimensioni del modello utilizzato negli esperimenti del Politecnico Federale di Losanna e nel modello in ABAQUS (Montani et al., 1997).	45
Figura 4.12: Rappresentazione delle tre forze principali agenti negli esperimenti (Labiouse et al., 1994).	46
Figura 4.13: Grafici con rappresentanti il rapporto tra forza 2 (ordinate) e forza 1 (ascisse) (Montani et al., 1997).	48
Figura 4.14: Grafici con rappresentanti il rapporto tra forza 3 (ordinate) e forza 2 (ascisse) (Montani et al., 1997).	48
Figura 4.15: Schema rappresentante il campo prova utilizzato negli esperimenti (Schellenberg et al., 2006).	50
Figura 4.16: Foto raffigurante le modalità d'uso del materiale utilizzato negli esperimenti con strato assorbente (Schellenberg et al., 2006).	51
Figura 4.17: Risultati degli esperimenti effettuati da Schellenberg et al., 2006.	51
Figura 4.18: Grafici dell' accelerazione e della velocità del blocco negli impatti su sabbia e vetro cellulare (Schellenberg et al., 2006).	52
Figura 4.19: Struttura per il sollevamento del blocco utilizzata negli esperimenti del Politecnico di Milano (Calveti & Prisco, 2007).	53
Figura 4.20: Accelerazione del blocco ricavata nelle prove n.6, n.7, n.8 e n.9 del Politecnico di Milano (Calveti & Prisco, 2007).	54
Figura 4.21: Accelerazione del blocco ricavata nelle prove n.10 e n.11 del Politecnico di Milano (Calveti & Prisco, 2007).	55

Figura 4.22: Schema utilizzato negli esperimenti di laboratorio condotti da Meng et al., 2022.	56
Figura 4.23: Grafico rappresentante gli sforzi verticali al centro della soletta con caduta da 0.5 metri (Meng et al., 2022).	57
Figura 4.24: Istogramma relativo ai massimi raggiunti dalla forza di impatto per i diversi test (Meng et al., 2022).	57
Figura 4.25: Modello DEM utilizzato nella simulazione numerica di Calvetti et al.(2005).	58
Figura 4.26: Grafico variazione altezza di caduta con blocco da 850 kg (Calvetti et al., 2005).	59
Figura 4.27: Grafico variazione altezza di caduta con blocco da 5 ton (Calvetti et al., 2005).	59
Figura 4.28: Grafico variazione della massa del blocco con altezza di caduta paria a 20 metri (Calvetti et al., 2005).	60
Figura 4.29: Grafico variazione massa e altezza con energia costante di 1'000 kJ (Calvetti et al., 2005).	60
Figura 4.30: Grafico variazione dello spessore dello strato con massa 850 kg e altezza 20 metri (Calvetti et al., 2005).	61
Figura 4.31: Visualizzazione dei tre diversi tipi di strato assorbente utilizzati nelle simulazioni di Ouyang et al. (2018).	62
Figura 4.32: Rappresentazione del modello utilizzato da Ouyang et al. (2019).	62
Figura 4.33: Deformazioni della soletta con diversi spessori di sabbia configurazione "a" (Ouyang et al., 2019).	63
Figura 4.34: Deformazioni della soletta con diversi spessori di EPS configurazione "b" (Ouyang et al., 2019).	63
Figura 4.35: Forza di impatto al variare del numero di geogriglie (Ouyang et al., 2019).	64
Figura 4.36: Forza di impatto al variare del tipo di geogriglia (Ouyang et al., 2019).	64
Figura 4.37: Modello utilizzato nelle simulazioni numeriche effettuate da Yan et al. 2018.	65
Figura 4.38: Casi oggetto di studio nelle simulazioni di Yan et al. (2018).	65
Figura 4.39: Grafici della forza di impatto adimensionalizzata con direzione impatto pari a zero gradi (Yan et al., 2018).	66
Figura 4.40: Grafici della forza di impatto adimensionalizzata con direzione impatto pari a 45 gradi (Yan et al., 2018).	66
Figura 4.41: Grafici della forza di impatto adimensionalizzata con direzione impatto pari a 90 gradi (Yan et al., 2018).	66
Figura 5.1: Relazione tra sforzi e deformazioni nel modello elastico lineare isotropo utilizzato in ABAQUS (ABAQUS User's Manual).	70
Figura 5.2: Rappresentazione grafica del modello Mohr-Coulomb (ABAQUS User's Manual).	71
Figura 5.3: Grafico relativo all'applicazione graduale del campo gravitazionale con smooth step.	72
Figura 5.4: Confronto in pianta tra modello sperimentale e modello in ABAQUS.	73
Figura 5.5: Modello visualizzato su ABAQUS con visualizzazione della mesh.	74
Figura 5.6: Grafico rappresentante la penetrazione del blocco nella back analysis con confronto Montani (2004).	76

Figura 5.7: Grafico rappresentante la velocità del blocco nella back analysis con confronto Montani et al. (2004) con focus sulla parte di grafico in cui la velocità diventa negativa.....	76
Figura 5.8: Grafico rappresentante l'accelerazione del blocco nella back analysis con confronto Montani (2004).....	77
Figura 5.9: Grafico rappresentante l'accelerazione filtrata con media mobile del blocco nella back analysis con confronto Montani (2004).....	77
Figura 5.10: Grafico rappresentante la reazione vincolare dei vincoli della soletta nella back analysis con confronto Montani (2004). ....	78
Figura 5.11: Grafico rappresentante gli sforzi all'interfaccia terreno-soletta nella back analysis con confronto Montani (2004). ....	79
Figura 5.12: Grafico rappresentante la deformazione della soletta nella back analysis con confronto Montani (2004). ....	80
Figura 5.13: Rappresentazione delle dimensioni e delle posizioni di misurazione degli output nel modello utilizzato per l'analisi di sensitività. ....	82
Figura 5.14: Interfaccia ABAQUS nella selezione degli output derivanti dal blocco: spostamento, velocità e accelerazione.....	85
Figura 5.15: Interfaccia ABAQUS nella selezione degli output legati agli sforzi all' interfaccia terreno-soletta.....	86
Figura 5.16: Interfaccia ABAQUS nella selezione degli output legati alla reazione vincolare agente sulla soletta. ....	87
Figura 5.17: Interfaccia ABAQUS nella selezione degli output legati alla deformazione della soletta. ....	88
Figura 5.18: Penetrazione del blocco con variazione della massa del blocco.....	89
Figura 5.19: Velocità del blocco con variazione della massa del blocco.....	90
Figura 5.20: Deformazione della soletta in D1 con variazione della massa del blocco.....	91
Figura 5.21: Accelerazione del blocco con variazione della massa del blocco. ....	92
Figura 5.22: Forza di impatto con variazione della massa del blocco. ....	92
Figura 5.23: Sforzo all'interfaccia terreno soletta in P1 con variazione della massa del blocco. ....	93
Figura 5.24: Sforzo massimo all'interfaccia terreno soletta in funzione della distanza dal centro, con variazione della massa del blocco. ....	94
Figura 5.25: Sollecitazioni al fondo della vasca di prova di Bovisa (sperimentale) ed ottenute con modello DEM (numerico) al variare dell'altezza di caduta (Calvetti et al., 2005). ....	94
Figura 5.26: Sforzo massimo all'interfaccia terreno soletta in funzione della distanza dal centro normalizzata sul raggio del blocco, con variazione della massa del blocco ....	95
Figura 5.27: Reazione vincolare dei quattro vincoli con variazione della massa del blocco...	96
Figura 5.28: Penetrazione del blocco con variazione della velocità. ....	97
Figura 5.29: Velocità del blocco con variazione della velocità. ....	98
Figura 5.30: Accelerazione del blocco con variazione della velocità. ....	99
Figura 5.31: Forza di impatto con variazione delle velocità. ....	99
Figura 5.32: Grafico variazione altezza di caduta con blocco da 850 kg (Calvetti et al., 2005). ....	100
Figura 5.33: Sforzo all' interfaccia terreno-soletta in P1 con variazione delle velocità.....	100

Figura 5.34: Sforzo massimo all'interfaccia terreno soletta in funzione della distanza dal centro, con variazione della velocità. ....	101
Figura 5.35: Reazione vincolare dei quattro vincoli con variazione della velocità. ....	102
Figura 5.36: Deformazione della soletta in D1 con variazione della velocità. ....	102
Figura 5.37: Penetrazione del blocco con variazione dello spessore dello strato. ....	103
Figura 5.38: Velocità del blocco con variazione dello spessore dello strato. ....	104
Figura 5.39: Accelerazione del blocco con variazione dello spessore dello strato. ....	104
Figura 5.40: Forza di impatto con variazione dello spessore dello strato. ....	105
Figura 5.41: Sforzo all'interfaccia terreno-soletta in P1 con variazione dello spessore dello strato. ....	106
Figura 5.42: Sforzo massimo all'interfaccia terreno-soletta in funzione della distanza dal centro, con variazione dello spessore dello strato. ....	107
Figura 5.43: Reazione vincolare dei quattro vincoli con variazione dello spessore dello strato. ....	108
Figura 5.44: Deformazione della soletta in D1 con variazione dello spessore dello strato. ..	108
Figura 5.45: Penetrazione del blocco con variazione dello spessore della soletta. ....	109
Figura 5.46: Velocità del blocco con variazione dello spessore della soletta. ....	110
Figura 5.47: Deformazione della soletta in D1 con variazione dello spessore della soletta. .	110
Figura 5.48: Accelerazione del blocco con variazione dello spessore della soletta. ....	111
Figura 5.49: Forza di impatto con variazione dello spessore della soletta. ....	112
Figura 5.50: Sforzo all'interfaccia terreno-soletta in P1 con variazione dello spessore della soletta. ....	113
Figura 5.51: Sforzo massimo all'interfaccia terreno-soletta in funzione della distanza dal centro, con variazione dello spessore della soletta. ....	113
Figura 5.52: Reazione vincolare dei quattro vincoli con variazione dello spessore della soletta. ....	114
Figura 7.1: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione della massa del blocco al termine dell'impatto in prospetto. ....	119
Figura 7.2: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione della massa del blocco al termine dell'impatto in pianta. ....	120
Figura 7.3: Sforzi in direzione verticale con variazione della massa del blocco. ....	121
Figura 7.4: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione della velocità di impatto del blocco al termine dell'impatto in prospetto. ....	122
Figura 7.5: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione della velocità di impatto del blocco al termine dell'impatto in pianta. ....	123
Figura 7.6: Sforzi in direzione verticale con variazione della velocità di impatto del blocco (1). ....	124
Figura 7.7: Sforzi in direzione verticale con variazione della velocità di impatto del blocco (2) ....	125
Figura 7.8: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione dello spessore dello strato assorbente al termine dell'impatto in prospetto. ....	126
Figura 7.9: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione dello spessore dello strato assorbente al termine dell'impatto in pianta. ....	127
Figura 7.10: Sforzi in direzione verticale con variazione dello spessore dello strato. ....	128

Figura 7.11: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione dello spessore della soletta al termine dell'impatto in prospetto.....	129
Figura 7.12: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione dello spessore della soletta al termine dell'impatto in pianta. ....	129
Figura 7.13: Sforzi in direzione verticale con variazione dello spessore della soletta.....	130

## Indice delle Tabelle

Tabella 2.1: Definizioni della terminologia legata all'analisi del rischio. ....	6
Tabella 2.2: Riepilogo dei possibili metodi di mitigazione del rischio per la caduta massi. ...	15
Tabella 3.1: Classificazione granulometrica dei materiali inerti.....	22
Tabella 4.1: Scelta per percentile in funzione della frequenza di accadimento dell'evento (ONR 24810:2021). ....	34
Tabella 4.2: Coefficienti utilizzati per le differenti classi di conseguenze (ONR 24810:2021). .....	35
Tabella 4.3: Caratteristi che dei tre tipi di suolo utilizzati negli esperimenti del Politecnico Federale di Losanna (Montani et al., 1999). ....	45
Tabella 4.4: Parametri utilizzati negli esperimenti del Politecnico Federale di Losanna (Montani et al., 2004).....	46
Tabella 4.5: Andamento delle varie misure in funzione della variazione dei parametri (Montani et al., 2004).....	47
Tabella 4.6: Prove effettuate dal Politecnico di Milano (Calveti & Prisco, 2007). ....	53
Tabella 4.7: Schema relativo ai test effettuati da Meng et al. (2022). ....	55
Tabella 5.1: Condizioni dell' esperimento preso in considerazione per la back analysis.....	69
Tabella 5.2: Parametri utilizzati per la definizione delle caratteristiche meccaniche del modello. .....	69
Tabella 5.3: Valori caratteristici del calcestruzzo armato inseriti nel modello ABAQUS. ....	70
Tabella 5.4: Valori caratteristici dello strato assorbente inseriti nel modello ABAQUS .....	71
Tabella 5.5: Coppie migliori dei parametri della back analysis. ....	75
Tabella 5.6: Simulazioni effettuate nell'analisi di sensitività.....	84
Tabella 5.7: Energie di impatto nell'analisi di variazione del volume e della massa del blocco. .....	89
Tabella 5.8: Energie di impatto nell'analisi di variazione della velocità di impatto e dell'altezza di caduta. ....	97
Tabella 5.9: Peso dello strato assorbente al variare dello spessore. ....	106
Tabella 5.10: Confronto dei risultati ottenuti in questa tesi con quelli ricavati da Montani et al. (2004). ....	116

# 1 Introduzione

La caduta massi è un fenomeno gravitativo diffuso che si presenta soprattutto in zone montuose o costiere. La velocità di movimento e le grandi energie in gioco rendono questo evento naturale particolarmente pericoloso, esso può recare gravi danni a persone, costruzioni e infrastrutture. Il continuo aumento dell'urbanizzazione e il surriscaldamento globale hanno fatto sì che, negli ultimi anni, il rischio legato alla caduta massi (ma anche ad altri gli eventi catastrofici di tipo naturale come frane e alluvioni) si sia alzato e sia diventato un tema decisamente attuale che necessita delle dovute attenzioni sia in fase di pianificazione del territorio che in una fase progettuale di mitigazione del rischio.

L'argomento principale della tesi sono le gallerie paramassi che sono uno dei tanti metodi per ridurre il rischio legato ai crolli. Queste opere vengono realizzate per proteggere infrastrutture stradali e ferroviarie andando di fatto a realizzare uno scudo che impedisca ai blocchi di raggiungere l'elemento a rischio (veicoli treni ma soprattutto le persone). La struttura deve quindi resistere agli impatti dei blocchi per tutta la sua vita utile. L'analisi delle azioni legate all' impatto è complicata e richiede un' accurata progettazione.

Lo scopo della tesi è quello di realizzare attraverso l'utilizzo del software ABAQUS un modello agli elementi finiti (FEM) che vada a simulare l'impatto di un blocco su una galleria paramassi. Il modello servirà per compiere uno studio di sensitività atto a osservare come le condizioni al contorno influenzano le azioni sulla galleria e ad analizzare il comportamento dello strato assorbente, elemento che viene comunemente utilizzato al di sopra della copertura delle gallerie al fine di proteggere la soletta dagli urti.

Il testo, articolato in sei capitoli, tratta innanzi tutto le varie tipologie di interventi legati alla mitigazione del rischio legato alla caduta massi per poi focalizzarsi sulle gallerie. Di queste si indicheranno le tipologie, i materiali che le compongono, le modalità costruttive e le normative connesse.

Successivamente, sempre facendo riferimento alle norme, si analizzeranno quelle relative alla progettazione delle gallerie ed ai metodi con cui può essere ricavata l'azione dinamica di impatto.

Terminata l'analisi normativa, si passerà a studiare alcuni esperimenti effettuati sia in campo che in laboratorio, questi forniranno alcune nozioni utili relative alle dinamiche di impatto. L'analisi sperimentale verrà poi confrontata con l'analisi numerica esaminando alcune simulazioni simili a quella effettuata in questa tesi.

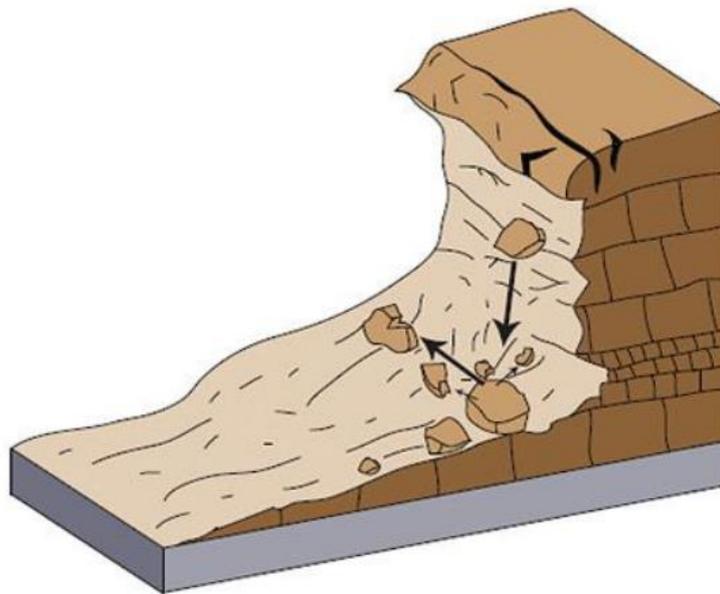
L'analisi di sensitività eseguita con il modello FEM è stata preceduta dalla validazione del modello attraverso una back analysis che ha preso come riferimento uno degli esperimenti analizzati nella tesi. Una volta eseguita la validazione è stato possibile effettuare le diverse simulazioni variando i parametri ed ottenendo interessanti risultati che possono fungere da linee guida e fornire ulteriori informazioni utili per la progettazione di opere sempre più sicure e durature nel tempo.

## 2 Caduta massi e opere di mitigazione del rischio

In questo paragrafo si andrà a descrivere in generale il fenomeno di caduta massi, elencandone le caratteristiche e i possibili interventi di mitigazione focalizzandosi sulle gallerie paramassi, analizzando i materiali che vengono impiegati e le modalità costruttive.

### 2.1 La caduta massi: generalità del fenomeno e sue caratteristiche

La caduta massi è una delle diverse tipologie di frane che possono verificarsi in natura. Prendendo in considerazione la classificazione delle frane proposta da Cruden & Vernes (1996), dove vengono riconosciuti cinque diversi cinematismi, la caduta massi è principalmente legata due di questi. Uno è la caduta vera e propria (Fall, *Figura 2.1*) che può essere preceduta o meno da un movimento iniziale. Questo movimento antecedente la caduta può essere uno scivolamento, un ribaltamento rotazionale (Topple che è il secondo cinematismo riconosciuto da Cruden & Vernes (1996) che può essere legato alla caduta massi) o un insieme dei due. Nel caso del ribaltamento rotazionale, un'intera porzione di ammasso roccioso ruota attorno ad un'asse posizionato al di sotto del centro di gravità della massa in movimento (*Figura 2.2*).



*Figura 2.1: Rappresentazione schematica di un crollo (materiale didattico del corso Landslide & Slope Engineering Politecnico di Torino).*

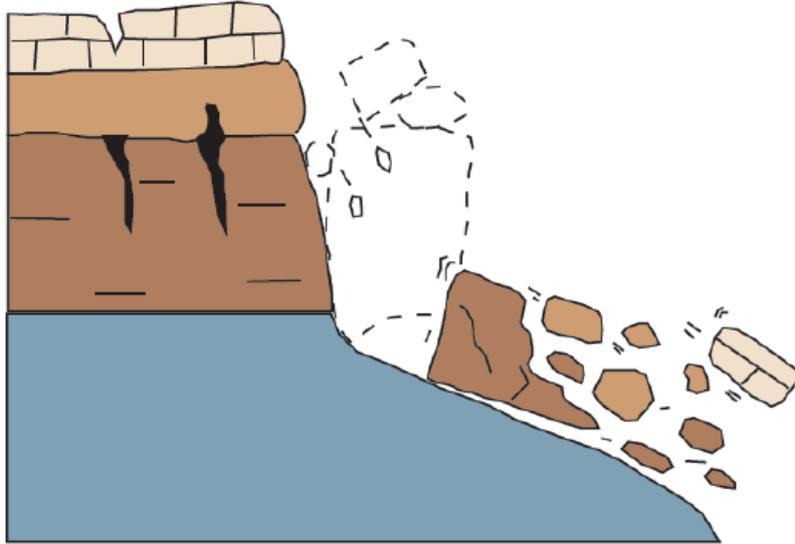


Figura 2.2: Rappresentazione schematica di un ribaltamento rotazionale (materiale didattico del corso Landslide & Slope Engineering Politecnico di Torino).

### 2.1.1 Cinematismi successivi al distacco

In entrambi i casi successivamente al distacco il materiale roccioso prosegue la sua traiettoria lungo il versante, spinto dalla forza di gravità, assumendo diversi tipi di cinematismi:

- caduta libera: il blocco, specialmente nella prima parte del fenomeno, non entra in contatto con il suolo e procede seguendo le leggi del moto uniformemente accelerato (equazione 2.1). Il blocco può o meno avere una velocità iniziale all'inizio di questa fase;

$$\begin{cases} x = x_0 + v_{0x}t \\ y = y_0 + v_{0y}t + \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad 2.1$$

- rimbalzo: il blocco entrando in contatto con il terreno compie dei balzi che sono più o meno ampi a seconda dell'energia in gioco e delle caratteristiche del suolo. L'aspetto impulsivo di questa cinematica porta alla conservazione della quantità di moto e dell'energia totale. L'impatto può essere elastico nel caso in cui si conservasse l'energia cinetica oppure anelastico se la stessa energia venisse dissipata. È possibile definire dei coefficienti di restituzione che indicano come varia la velocità prima e dopo l'impatto (Figura 2.3);

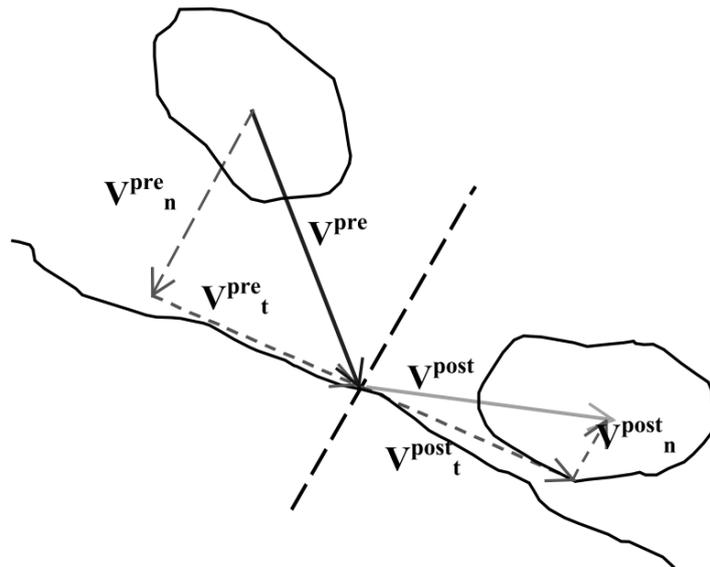


Figura 2.3: Rappresentazione del rimbalzo di un blocco con indicate le velocità pre e post impatto (G. P. Giani et al. 2004).

Nelle equazioni 2.2 e 2.4 viene indicato come vengono calcolati i coefficienti di restituzione (G. P. Giani et al., 2004);

$$\text{Coefficiente normale } R_n = \frac{V_n^{post}}{V_n^{pre}} \quad 2.2$$

$$\text{Coefficiente tangenziale } R_t = \frac{V_t^{post}}{V_t^{pre}} \quad 2.3$$

- rotolamento: il frammento di roccia rimane a contatto con il terreno rotolando lungo il pendio, con questa dinamica il blocco può raggiungere grandi velocità, e subire dei cambi di traiettoria a seconda della forma del blocco stesso;
- scivolamento: anche in questo caso il blocco rimane a contatto con il terreno ma senza rotolare, la superficie a contatto con il terreno è sempre la stessa, in questo moto agisce fortemente l'attrito che rallenta il blocco diminuendone l'energia;
- arresto: in questa fase la massa coinvolta dal fenomeno franoso esaurisce tutta l'energia cinetica arrestandosi, questo può avere luogo sia ai piedi del versante coinvolto che in una posizione intermedia a seconda dell'energia in gioco e della scabrezza del pendio stesso.

Tutti i diversi tipi di movimento a cui può essere soggetto un blocco in caduta sono il più delle volte combinati rendendo l'analisi del fenomeno estremamente complessa. Inoltre, lungo il loro percorso i blocchi possono ridursi di dimensione frantumandosi in parti più piccole.

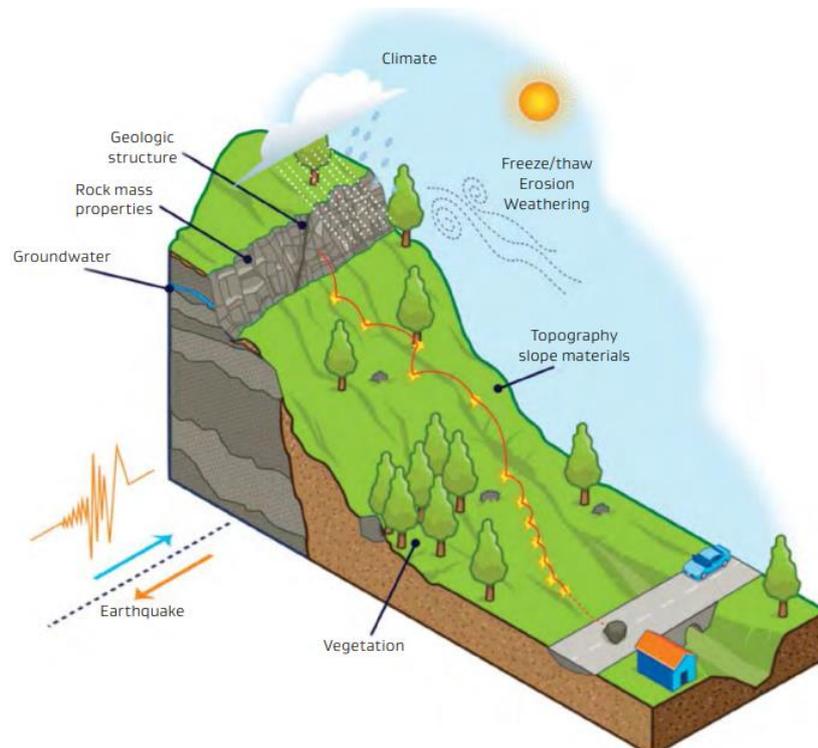
La traiettoria dei blocchi è influenzata dalle caratteristiche morfologiche del versante (es. pendenza) ma anche dal tipo di materiale presente al suolo e dalla presenza di vegetazione. Generalmente i blocchi di dimensione minore vengono arrestati prima di quelli di pezzatura maggiore, come viene anche dimostrato dalla distribuzione dei massi che si possono trovare nei conoidi alle pendici delle pareti rocciose.

### 2.1.2 Cause legate alla caduta massi

Sono diverse le cause che portano alla formazione di una frana da crollo, queste vanno per prima cosa divise in due categorie:

- cause predisponenti: sono le cause che portano nel tempo l'ammasso roccioso in condizioni di instabilità come ad esempio:
  - fratturazione dell'ammasso roccioso;
  - cicli di gelo e disgelo;
  - presenza di acqua nelle fratture;
  - fusione del permafrost;
  - presenza di vegetazione che con gli apparati radicali accelera il deterioramento della roccia;
- cause scatenanti: sono le cause che danno inizio al crollo, le più importanti sono:
  - aumento delle pressioni interstiziali a seguito di forti piogge o fusione nivale;
  - variazioni di temperatura
  - terremoti;

Entrambe le cause vanno analizzate a fondo per comprendere la dinamica che ha portato al crollo, in *Figura 2.4* vengono schematizzate le varie cause che influenzano la caduta massi.



*Figura 2.4: Schematizzazione delle cause che influenzano la caduta massi (www.building.govt.nz).*

## 2.2 Interventi di mitigazione del rischio

Il rischio legato alla caduta massi interessa molte infrastrutture e centri abitati insediati in località montane e costiere. Il rischio, per definizione è dato dal prodotto tra probabilità e danno di un possibile evento (*equazione 2.4*). La probabilità di impatto deriva dal prodotto tra pericolosità ed esposizione mentre il danno prende in considerazione la vulnerabilità e il valore dell'elemento a rischio. In *Tabella 2.1*, viene approfondita la terminologia sopracitata legata alle analisi del rischio:

*Tabella 2.1: Definizioni della terminologia legata all'analisi del rischio.*

<b>Pericolosità H</b>	Probabilità che un crollo di un certo volume si verifichi in un certo periodo di tempo ed in una certa area	<b>PROBABILITÀ DI IMPATTO P</b>
<b>Esposizione E</b>	Probabilità che l'elemento soggetto al rischio si trovi nell'area dove può avvenire un crollo, questo coefficiente è pari a uno per gli elementi fissi (casa) e minore di uno per gli elementi in movimento (auto)	
<b>Vulnerabilità V</b>	Indica quanto l'elemento è vulnerabile al fenomeno che viene valutato ovvero quanto verrebbe danneggiato se avvenisse l'impatto	<b>DANNO D</b>
<b>Valore Val</b>	Indica il valore dell'elemento a rischio, questo può essere fisico, economico, sociale, ambientale	

$$R = (H * E) * (V * Val) = P * D \quad 2.4$$

Per ridurre tale rischio è possibile agire in diversi modi con numerosi tipi di intervento che si distinguono principalmente in due tipologie:

- **interventi di prevenzione:** sono interventi che vanno a ridurre la possibilità che avvenga il crollo agendo direttamente sull' ammasso roccioso;
- **interventi di protezione:** sono interventi che vanno a fermare o deviare i blocchi derivanti da un crollo, andando a proteggere gli elementi soggetti al rischio.

### 2.2.1 Opere di prevenzione

Questo tipo di opere come è stato detto in precedenza evitano che avvenga un eventuale crollo impedendo la mobilitazione del materiale. Questo intervento va quindi a evitare del tutto il crollo, è necessario però investigare attentamente l'ammasso roccioso in modo da conoscere i punti instabili e le volumetrie in gioco.

In questo paragrafo si andranno a descrivere brevemente tutti i vari tipi di interventi di prevenzione focalizzandosi meglio, in un sottoparagrafo dedicato, i tiranti in quanto rappresentano una soluzione molto utilizzata nella costruzione delle gallerie paramassi, oggetto di questa Tesi.

I principali interventi di prevenzione sono:

- contrafforti e speroni: sono strutture in cemento armato che sorreggono la porzione di roccia instabile. Questi interventi sono molto impattanti dal punto di vista paesaggistico, in più il loro peso necessita la presenza di una porzione di versante stabile inferiormente alla parte da stabilizzare. Per questi motivi questi interventi sono oggi sempre meno utilizzati. In *Figura 2.5* è possibile vedere una rappresentazione di un intervento con contrafforti per stabilizzare una porzione di roccia instabile;



*Figura 2.5: Intervento di prevenzione costituito da contrafforti in calcestruzzo e chiodatura (foto da sopralluogo effettuato in data 07/05/2023, Exilles).*

- chiodi: questi sistemi di prevenzione agiscono principalmente grazie alla loro resistenza al taglio. Questi sistemi portano un incremento di resistenza ed esercitano una forza sull'ammasso roccioso solamente in seguito a un piccolo movimento della porzione instabile. Sono composti di una semplice barra di acciaio cementata come è possibile vedere in *Figura 2.6*.  
A differenza dei tiranti (analizzati a fondo nel *Paragrafo 2.2.1.1*) i chiodi non vengono pretensionati;

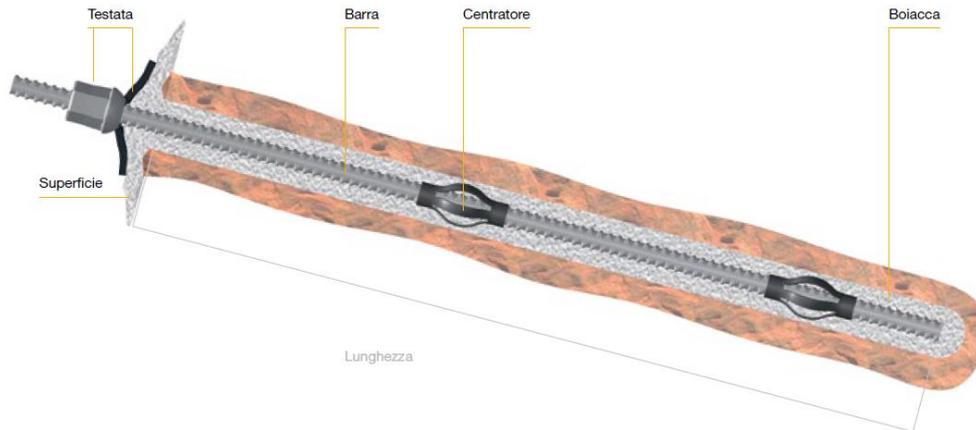


Figura 2.6: Rappresentazione di esempio di un chiodo (Catalogo Dywidag Systems International).

- **reti in aderenza:** si tratta di reti installate aderenti all'ammasso roccioso instabile. Questi interventi possono essere considerate una via di mezzo tra quelli di prevenzione e di protezione in quanto permettono il distacco del materiale roccioso ma lo trattengono a contatto con l'ammasso stesso. È possibile distinguere due tipologie di reti in aderenza (Figura 2.7):
  - **reti Rinforzate:** prevedono oltre che alla stesura di pannelli di rete in acciaio anche un sistema di chiodature distribuito su tutta la parete che ha il compito di rinforzare l'ammasso agendo come intervento di prevenzione; in più la rete contiene i distacchi di materiale superficiale in porzioni di rete che in questo caso viene irrobustita dal posizionamento di funi di acciaio che collegano i diversi chiodi;
  - **reti a Cortina:** queste possono essere considerate come un vero e proprio intervento di protezione; infatti, la chiodatura è limitata alla parte perimetrale per sorreggere la rete. Risulta quindi permessa la mobilitazione di materiale che però viene guidato dalla rete fino ai piedi dell'ammasso roccioso confinando la caduta all'interno della rete stessa;

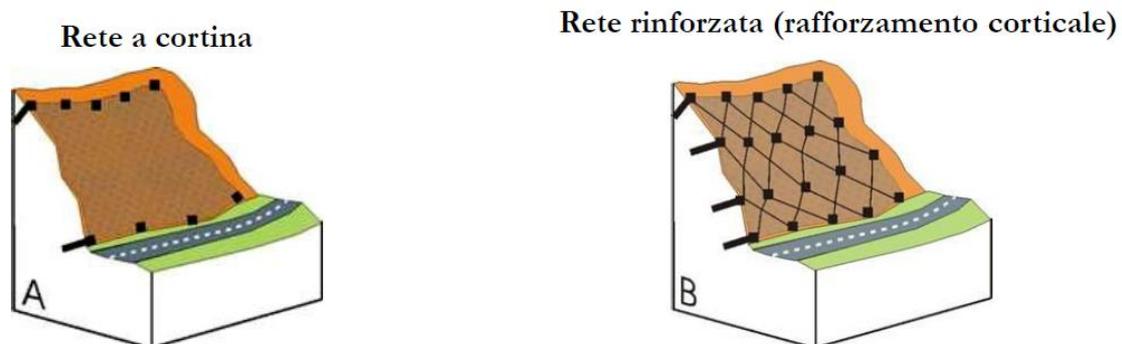


Figura 2.7: Rappresentazione dei due tipi di rete in aderenza (Materiale didattico del corso Consolidamento Rocce e Terreni Politecnico di Torino).

- spritz beton: questo intervento si effettua andando a stendere sull'ammasso roccioso uno strato di boiaccia cementizia tramite l'uso di una lancia (*Figura 2.8*). Questo strato ha il compito di legare tutti i possibili frammenti ed impedire l'infiltrazione dell'acqua. Viene utilizzato specialmente quando l'instabilità è superficiale caratterizzata dal distacco di piccoli blocchi;



*Figura 2.8: Rappresentazione dell'applicazione dello spritz beton (www.piccole-dolomiti.it).*

- dreni suborizzontali: sono composti da tubi forati che si inseriscono all'interno di un apposito foro realizzato nella roccia (*Figura 2.9*). In questo modo l'acqua presente nelle fratture fuoriesce abbassando le sovrappressioni e le forti spinte date dall'aumento di volume dell'acqua in fase di congelamento. Tuttavia, per garantire l'efficacia di questo intervento è necessario intercettare le fratture contenenti acqua, diversamente risulterebbe completamente inefficiente;



*Figura 2.9: Foto di dreni suborizzontali (www.softacostruzioni.it).*

- canalette superficiali: sono semplici canali realizzati in acciaio o in materiale naturale come legno e pietrame (*Figura 2.10*). Queste raccolgono l'acqua di ruscellamento evitando che questa si infiltri nel terreno e successivamente nella roccia.



*Figura 2.10: Foto raffigurante delle canalette per la raccolta dell'acqua di ruscellamento (www.geoprodotti.eu).*

#### 2.2.1.1 I tiranti

I tiranti possono essere utilizzati sia come interventi di prevenzione contro la caduta massi che come elementi strutturali di altre opere come le gallerie paramassi.

Se utilizzati sulla roccia instabile, il tensionamento dei tiranti ha lo scopo di andare a chiudere le fratture presenti nell'ammasso aumentando così l'attrito che viene a generarsi sui piani di scivolamento, portando così la roccia in condizioni di stabilità.

Quando invece, vengono installati sulle gallerie paramassi, lo scopo dei tiranti è quello di esercitare una forza sulla struttura per garantirne la stabilità vincolandola maggiormente al versante su cui viene costruita.

I tiranti possono essere di due tipi a seconda dell'armatura che viene utilizzata:

- tiranti a barre: l'armatura è composta da una barra in acciaio (*Figura 2.11*);

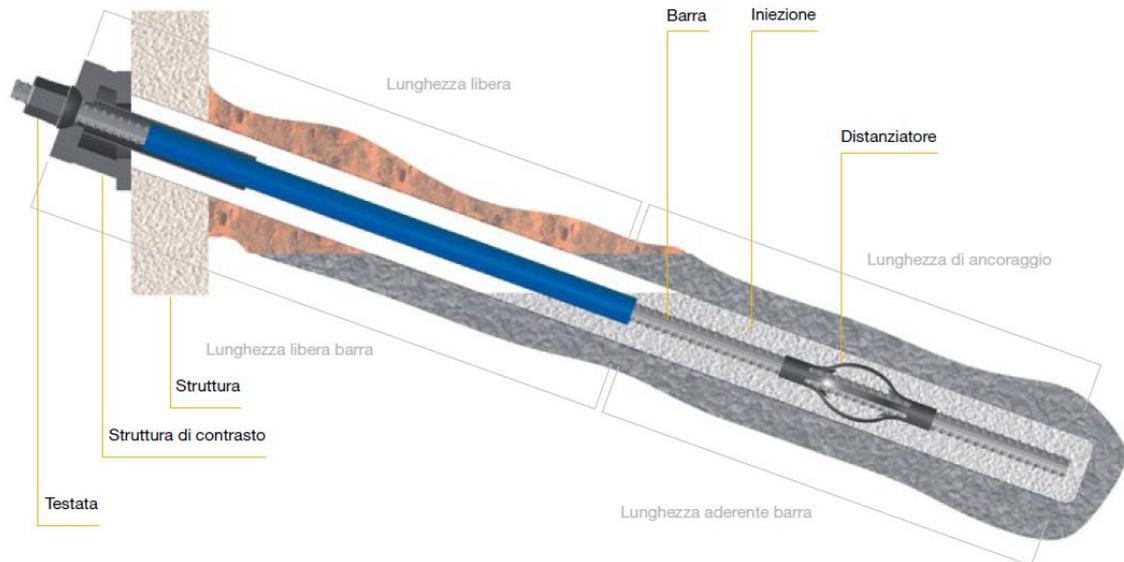


Figura 2.11: Esempio di un tirante a barra (Catalogo Dywidag Systems International).

- tiranti a trefoli: l'armatura è composta da diversi trefoli di acciaio (Figura 2.12).

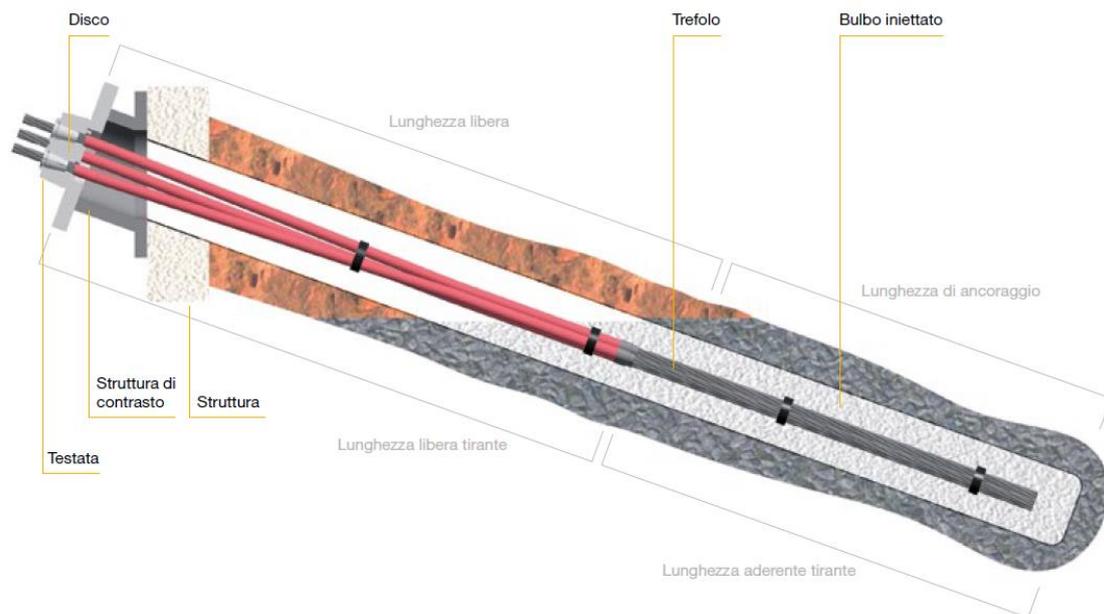


Figura 2.12: Rappresentazione di esempio di un tirante in trefoli di acciaio (Catalogo Dywidag Systems International).

In entrambi i casi, l'adesione tra tirante e terreno è garantita da un'iniezione di boiaccia cementizia, una miscela composta di acqua e cemento. Questa miscela può andare a riempire l'intercapedine tra tirante e terreno per semplice circolazione oppure con forzamento a pressione andando ad utilizzare dei tubi a manchette appositamente inseriti insieme all'armatura del tirante stesso. È necessario controllare i volumi di miscela iniettati per evitarne la dispersione in fratture e vie preferenziali, l'iniezione in pressione del terreno può anche portare alla fratturazione idraulica dello stesso.

I tiranti possono essere suddivisi in tre parti principali:

- testa di ancoraggio: corrispondente alla parte esterna all'ammasso roccioso atta ad esercitare la forza data dal tensionamento;
- armatura libera: tratto di armatura già interno alla roccia ma non vincolato ad essa, questo trasmette le forze di tensionamento dal bulbo alla testa di ancoraggio, in questa parte l'acciaio che compone il tirante può estendersi, scorrendo all'interno di una guaina e rispondendo elasticamente al tensionamento;
- armatura vincolata (bulbo): tratto che crea il vincolo tra la roccia stabile ed il tirante; l'adesione è garantita dall'attrito tra boiaccia cementizia e roccia;

Il tirante, quando viene messo in tensione, viene tenuto in posizione dalle forze di attrito che si generano tra la boiaccia ed il terreno lungo il bulbo, queste devono essere abbastanza forti da evitare che il tirante possa essere sfilato. Seppur meno frequente lo sfilamento può anche avvenire a livello dell'interfaccia tra l'armatura di acciaio e la boiaccia cementizia.

Spesso viene utilizzata una piastra di ripartizione posizionata all'estremità superiore del foro in corrispondenza della testa di ancoraggio. La piastra ha il compito di distribuire meglio la forza, esercitata da uno o più tiranti, sulla struttura o sulla porzione di roccia instabile.

I tiranti possono essere di tipo provvisorio o permanente. Nel primo caso questi hanno breve durata e il loro scopo è garantire la sicurezza per una durata definita (ed esempio durante le fasi di cantierizzazione). Nel secondo caso la loro durata deve essere pari a quella della struttura, se utilizzati sulle gallerie, o nel caso degli interventi su roccia instabile devono garantire la stabilità più a lungo possibile. Per questo motivo è necessario proteggere il tirante dall'ossidazione mediante appositi sistemi a calotta a livello della piastra di ripartizione.

Questo elemento costruttivo è fondamentale specialmente nelle gallerie di tipo a mensola (*Paragrafo 3.1*) per bilanciare il forte sbalzo della soletta superiore.

### 2.2.2 Opere di protezione

Le opere di protezione vanno a limitare la possibilità che a seguito di un crollo un blocco possa raggiungere l'elemento a rischio. Vengono quindi collocati inferiormente alla sorgente, lungo il versante. Per una corretta progettazione è fondamentale uno studio approfondito delle possibili traiettorie che possono essere compiute dai blocchi in modo da massimizzare l'efficienza dell'opera. Le traiettorie sono molto influenzate, oltre che dalle volumetrie del blocco in movimento, anche dalla morfologia, dal materiale e dallo stato vegetativo che caratterizza il versante.

Le soluzioni più comuni adottate in questo tipo di opere sono:

- barriere paramassi: sono composte da pannelli di rete sorretti da una serie di montanti e funi (*Figura 2.13*). La grande deformabilità di queste reti le rende capaci di assorbire ingenti quantità di energia. Oggigiorno si riescono a produrre reti paramassi capaci di assorbire un impatto pari a 10.000 kJ.

Queste opere vengono installate, generalmente, seguendo le isoipse ma è sempre necessario fare riferimento allo studio traiettografico per massimizzare l'intercettazione dei blocchi.

La barriera possiede anche delle funi di controvento a monte, a valle e ai lati; su quelle a monte e ai lati vengono installati dei dissipatori di energia, che sfruttando l'attrito, la deformazione o addirittura la rottura parziale di alcune sue parti permettono una maggiore dissipazione della stessa. I montanti vengono installati su fondazioni e vincolati in genere con cerniere in modo da permetterne la rotazione in caso di impatto. Tuttavia, esistono anche delle barriere dove i montanti sono vincolati al suolo attraverso incastri, questo tipo di barriere vengono in genere utilizzate al margine delle infrastrutture stradali, la capacità massima di assorbimento non supera però i 1000kJ. Le barriere paramassi hanno come grande vantaggio la velocità di installazione, che si effettua generalmente tramite elicottero. Tuttavia, l'energia che può essere assorbita è limitata rispetto ad altri tipi di intervento descritti in seguito;



*Figura 2.13: Barriera elastica paramassi (Sito ufficiale Maccaferri).*

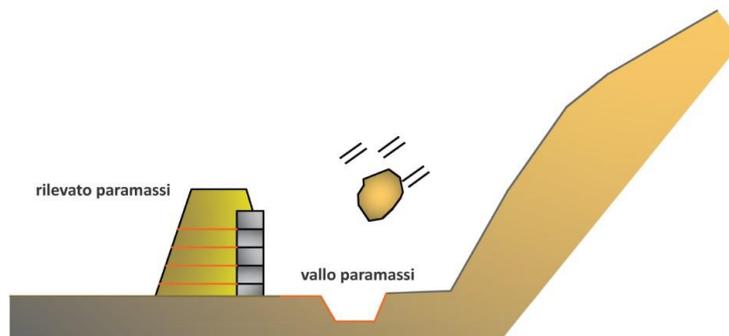
- valli o fossati paramassi: consistono nella modellazione del versante andando ad eseguire uno scavo, la trincea artificiale che si viene a realizzare ha il compito di raccogliere ed arrestare i blocchi, in *Figura 2.14* viene rappresentato questo tipo di intervento che viene generalmente eseguito alla base dei versanti soggetti al rischio e necessita di più spazio rispetto alle barriere paramassi;

- rilevati paramassi: sono strutture che si sviluppano in altezza (minimo due metri) tipicamente di forma trapezoidale, composto da materiale grossolano che successivamente alla sua realizzazione viene inerbato, andando a ridurre notevolmente l'impatto ambientale. Sono realizzati alla base dei versanti e come i valli necessitano più spazio delle barriere.

Spesso il rilevato è realizzato in terra rinforzata, questa tecnica consiste nel realizzare il rilevato per strati utilizzando degli appositi casseri ai lati e un sistema di geogriglie, il terreno viene compattato a piccoli strati in modo da ottenere la densità volumetrica di progetto. Il rilevato è composto da corsi di un'altezza variabile tra i 50 e i 70 centimetri, questi si vanno a sovrapporre l'un l'altro fino a raggiungere l'altezza di progetto. La larghezza minima che deve avere il rilevato in testa deve essere pari a circa un metro.

Le terre rinforzate possono essere realizzate con pareti inclinate anche di settanta gradi, permettendo così di ridurre notevolmente la larghezza della sezione a parità di altezza, basti pensare che l'angolo di riposo tipico di un materiale granulometrico raramente può superare i quaranta gradi.

I rilevati possono essere utilizzati sia singolarmente che accoppiati a valli paramassi, in *Figura 2.14* è possibile vedere la rappresentazione di questi due tipi di intervento.



*Figura 2.14: Rappresentazione di un vallo e di un rilevato paramassi (www.geostru.eu)*

Come è possibile vedere in *Figura 2.14* spesso i rilevati paramassi sono realizzati in parte in terra ed in parte con pietrame o gabbionate. L'utilizzo di questi due componenti dà la possibilità di realizzare rilevati ancora più snelli potendo avere i lati completamente verticali. Tuttavia, queste soluzioni presentano alcune problematiche, infatti, il pietrame se utilizzato a monte rende la struttura più rigida e quindi con una minore capacità di assorbimento energetico. Allo stesso tempo le gabbionate, seppur più deformabili del pietrame, presentano il rischio di proiezione del materiale grossolano di cui sono composte.

- gallerie paramassi: questi interventi atti a proteggere le infrastrutture lineari come strade e ferrovie verranno descritti ampiamente nel *Capitolo 3*.

Si sono dunque trattati tutti i principali interventi di mitigazione del rischio, nella *Tabella 2.2* vengono riassunti indicando brevemente i punti caratterizzanti l'intervento. Per ogni area soggetta a rischio caduta massi non vi è un unico intervento possibile ma spesso ci sono molti

interventi adatti, è discrezione del progettista scegliere l'opera che garantisca una forte riduzione del rischio e fronte della spesa che è possibile sostenere.

*Tabella 2.2: Riepilogo dei possibili metodi di mitigazione del rischio per la caduta massi.*

<b>Opere di prevenzione</b>	
Contrafforti e speroni	Costruiti in cemento armato sorreggono la porzione di roccia instabile. Alto impatto paesaggistico-ambientale.
Chiodi e Tiranti	Interventi puntuali che vanno a consolidare l'ammasso roccioso riducendo la possibilità di un possibile distacco.
Reti in aderenza	Intervento intermedio tra prevenzione e protezione, tende a consolidare l'ammasso roccioso ma anche a limitare le possibili traiettorie di caduta a quelle adiacenti all'ammasso roccioso.
Spritz beton	Strato di boiaccia cementizia applicata tramite delle lance sulla roccia, ha il compito di aumentare la coesione tra i diversi le diverse parti instabili ed evitare l'infiltrazione dell'acqua.
Dreni e canaline	I primi hanno il compito di drenare l'acqua presente nell'ammasso roccioso diminuendo le sovrappressioni, il secondo serve per ridurre l'infiltrazione dell'acqua.
<b>Opere di protezione</b>	
Barriere elastiche	Reti capaci di intercettare le traiettorie dei blocchi lungo la caduta arrestandoli. Grazie alla loro grande deformabilità possono dissipare grandi energie.
Valli e rilevati paramassi	Derivanti dalla modellazione del versante sia in negativo (valli) che in positivo (rilevati), interventi molto efficaci ma necessitano di molto spazio.
Gallerie paramassi	Strutture atte a proteggere vie di comunicazione come strade e ferrovie. Hanno il compito di deviare ma spesso anche arrestare il blocco impedendo che questo raggiunga gli elementi a rischio.

## 3 Le gallerie paramassi

In questo capitolo verranno trattate nello specifico le gallerie paramassi andando ad indicarne le tipologie, i materiali che vengono utilizzati nella costruzione, le modalità costruttive e la normativa connessa ad essa.

### 3.1 Tipologie

Le gallerie paramassi sono degli interventi di protezione di protezione dalla caduta massi. La mansione svolta da queste opere è quella di deviare la traiettoria del blocco in modo che non raggiunga la strada o la ferrovia su cui viene costruita, andando così a ridurre il danno ma non la probabilità che avvenga il fenomeno gravitativo. La costruzione di queste gallerie è tipica delle aree montuose e costiere, dove spesso si hanno strade e ferrovie affiancate a pareti rocciose. La realizzazione di questi tipi di interventi permette di proteggere le infrastrutture anche quando il versante non fornisce lo spazio sufficiente a realizzare altri sistemi di protezione, essendo la parete del tutto adiacente al sedime stradale.

Come affermano Calvetti & Prisco (2007) è possibile distinguere tre diversi tipi di gallerie paramassi:

- gallerie tradizionali a portale: queste strutture sono composte da un muro a monte e da una serie di pilastri e archi a valle, entrambe le strutture verticali sono realizzate in cemento armato. Queste, sorreggono una soletta, anch'essa in cemento armato, che viene protetta mediante uno strato di copertura realizzato con materiale sciolto come sabbia e ghiaia. Spesso si utilizza anche il materiale di risulta che è stato ricavato durante gli scavi di costruzione della galleria. Questo strato ha il compito di ammortizzare l'impatto e distribuire meglio le sollecitazioni sulla soletta. La realizzazione di un sostegno della soletta discontinuo nel lato a valle dà la possibilità di scorgere il panorama. Infatti, le gallerie a protezione delle infrastrutture sorgono il più delle volte in località montuose o costiere caratterizzate da grandi afflussi turistici; è per questo essenziale garantire il minimo impatto paesaggistico dell'opera anche con opere di rinverdimento dello strato assorbente. In *Figura 3.1* e *Figura 3.2* è possibile vedere alcuni esempi di gallerie a portale;



*Figura 3.1: Foto di una galleria a portale dall'interno (www.mubre.it).*



*Figura 3.2: Foto di una galleria a portale dall'esterno (www.gazzettajonica.it).*

- **gallerie a mensola:** queste strutture sono composte da un pilastro a monte su cui poggia una soletta in cemento armato vincolata unicamente da un incastro sul lato di monte andando a massimizzare le discontinuità lungo il lato di valle. Tutta la struttura è opportunamente tirantata a monte in modo da vincere il forte sbilanciamento verso valle. Queste gallerie si compongono per lo più di elementi prefabbricati, e le sezioni di questi ultimi sono ottimizzate per i carichi a cui verranno sottoposti, in particolar modo la soletta che risulta essere di spessore nettamente inferiore lungo il lato a valle. Come avviene per le gallerie tradizionali anche quelle a mensola vengono protette da uno

strato di materiale assorbente. In *Figura 3.3* e *Figura 3.4* è possibile vedere due esempi di gallerie paramassi a mensola;



*Figura 3.3: Schema rappresentativo di una galleria a mensola (www.lavoripubblici.regione.campania.it).*



*Figura 3.4: Foto di una galleria a mensola (www.issuu.com).*

- gallerie policentriche: la galleria sorge, come negli altri casi, adiacente alla parete rocciosa ma una volta realizzata viene completamente coperta dal terreno andando a inglobare la struttura nel versante riducendo di molto l'impatto ambientale (*Figura 3.5*).

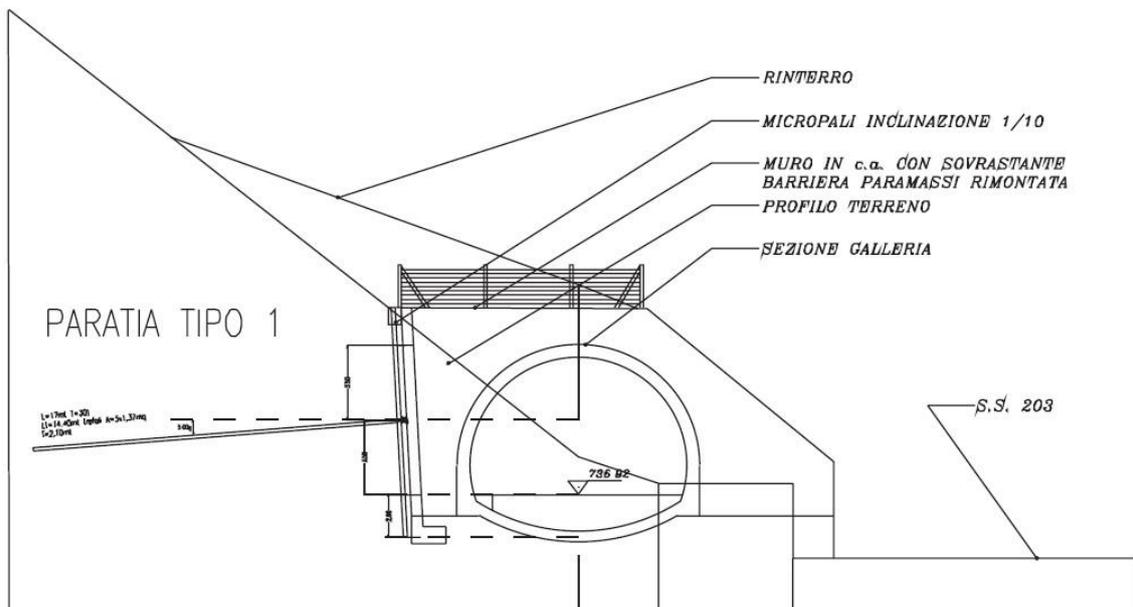


Figura 3.5: Rappresentazione di una galleria policentrica (foto da "Linee guida per la progettazione di gallerie paramassi" di Calvetti e Prisco).

Spesso la realizzazione di una galleria paramassi è l'unica soluzione in grado di proteggere un'infrastruttura stradale, è necessario però considerare che una galleria non va a ridurre il rischio a valle di essa, come avviene per esempio con un rilevato che va a bloccare la caduta riducendo il rischio nell'intera porzione di versante a valle di esso. Quindi, nel caso in cui siano presenti elementi a rischio a valle della galleria, è necessario intervenire costruendo una barriera paramassi al di sopra della galleria stessa.

In alta montagna queste gallerie possono anche essere utilizzate come protezione contro i fenomeni valanghivi. Ovviamente in questo caso le forze e le azioni agenti sulla galleria sono notevolmente differenti, si passa da un impatto puntuale ad un carico distribuito, costituito dalla neve, in movimento che può durare diverse decine di secondi fino a fermarsi e costituire così un carico permanente. Come si può vedere in *Figura 3.6*, raffigurante un intervento eseguito sul colle di Giovo, una galleria paravalanghe risulta essere molto simile a quelle contro la caduta massi.



*Figura 3.6: Galleria paravalanghe sul Passo Giovo in provincia di Bolzano ([www.bergmeister.eu](http://www.bergmeister.eu)).*

## 3.2 Materiali impiegati

I materiali che vengono utilizzati per la realizzazione delle gallerie sono diversi e di diversa natura. Per quanto riguarda la struttura, si tratta sempre di calcestruzzo armato che può essere gettato in situ oppure essere prefabbricato. I manufatti realizzati in calcestruzzo sono, il più delle volte, ancorati tramite tiranti che sono composti di acciaio sotto forma di barre o trefoli e aderenti alla roccia tramite boiacca cementizia.

Per quanto riguarda invece lo strato assorbente vi sono molti tipi diversi di materiali utilizzati dalla ghiaia al tout venant derivante dagli scavi di realizzazione della galleria fino all'impiego di materiali più tecnologici come geogriglie, utilizzate unitamente a sabbie o ghiaia, e EPS (polistirene espanso sinterizzato). In seguito, verranno elencati in diversi paragrafi i materiali comunemente utilizzati per la costruzione di una galleria paramassi indicando anche alcuni nuovi materiali che potranno in futuro essere utilizzati e che sono stati utilizzati in alcuni esperimenti.

### 3.2.1 Calcestruzzo armato

Il calcestruzzo è un materiale artificiale composto da cemento, aggregati lapidei e acqua, con la possibilità di aggiunta di additivi chimici per migliorarne la lavorabilità e la resistenza.

Il calcestruzzo resiste bene a compressione ma non alla trazione, per cui vengono utilizzate armature in acciaio annegate nella miscela cementizia che aumentano la resistenza diventando così calcestruzzo armato.

L'idratazione del cemento causa l'indurimento della miscela che richiede un tempo di maturazione di ventotto giorni. Il calcestruzzo può essere gettato in sito o prefabbricato. Per realizzarlo in cantiere si utilizzano dei casseri e la miscela, prodotta negli impianti di betonaggio, viene trasportata fino al sito tramite beton car.

Invece, per la realizzazione di strutture prefabbricate il getto avviene direttamente in officina. Spesso in officina vengono creati travi prefabbricate precomprese, questa pratica consiste nel precomprimere la trave ove questa sarà soggetta a trazione, ovvero nella parte a intradosso in modo da aumentare la resistenza ai carichi a cui sarà soggetta.

La durabilità del calcestruzzo dipende dalle condizioni ambientali, in quanto il materiale può essere attaccato dai sali presenti e l'acciaio delle armature può ossidarsi riducendo le proprietà meccaniche è per questo necessario scegliere la giusta classe del calcestruzzo in funzione della classe di esposizione.

### 3.2.2 Strato assorbente

Si vanno ora a trattare i materiali di cui si compone lo strato assorbente che vanno dai più comuni materiali inerti fino a materiali metallici polimerici come l'EPS Geofam.

#### 3.2.2.1 Materiali inerti

Questi materiali vengono principalmente classificati in base alla granulometria, vi sono differenti classificazioni, una delle più usate è quella proposta da *Atterberg* all'inizio del ventesimo secolo, indicata in Tabella 3.1: Classificazione granulometrica dei materiali inerti. *Tabella 3.1.*

Tabella 3.1: Classificazione granulometrica dei materiali inerti.

<b>Materiale</b>	<b>Misura minima dei grani [mm]</b>	<b>Misura massima dei grani [mm]</b>
Argilla	-	0.002
Limo	0.002	0.06
Sabbia	0.06	2
Ghiaia	2	60
Ciottoli	60	200
Blocchi	200	-

Per lo strato assorbente in genere le granulometrie più utilizzate sono sabbia e ghiaia. Tuttavia, spesso si utilizza anche il materiale grezzo, senza una precisa granulometria, sotto forma di tout venant ricavato in loco dagli scavi per la realizzazione della galleria.

L'utilizzo però di un materiale con granulometria definita permette di conoscere meglio la risposta dello strato assorbente in seguito all'impatto di un blocco.

Come si vedrà in seguito è fondamentale il grado di compattazione del materiale utilizzato; infatti, questa caratteristica del terreno è inversamente proporzionale alla capacità di assorbimento energetico. Un materiale fortemente compattato trasmette alla soletta sollecitazioni nettamente maggiori a seguito di un impatto, come è possibile vedere dagli esperimenti analizzati nel *paragrafo 4.2.1*;

### 3.2.2.2 Geogriglie

Le geogriglie sono costituite da materiali polimerici (tipicamente polipropilene o polietilene ad alta densità HDPE) e vengono realizzate tramite estrusione e successiva stiratura.

In commercio esistono principalmente due tipologie di geogriglie:

- monodirezionali: che hanno la caratteristica di resistere a trazione principalmente in una direzione con una resistenza in senso longitudinale che può arrivare a 60-80 kN/m (*Figura 3.7*). In bibliografia non sono stati trovati riferimenti rispetto ad un loro impiego per valutare la miglior direzione di utilizzo. In genere gli sforzi dati da un impatto hanno simmetria centrale rispetto al centro per cui si può affermare che le geogriglie monodirezionali risultano meno adatte rispetto a quelle bidirezionali a meno che vengano utilizzate in più starti incrociati tra loro;



Figura 3.7: Rappresentazione di una geogriglia monodirezionale ([www.tenax.net](http://www.tenax.net)).

- bidirezionali: che resistono a trazione in egual modo in entrambe le direzioni, tuttavia, la resistenza è inferiore e si appresta intorno ai 20-30kN/m (Figura 3.8);

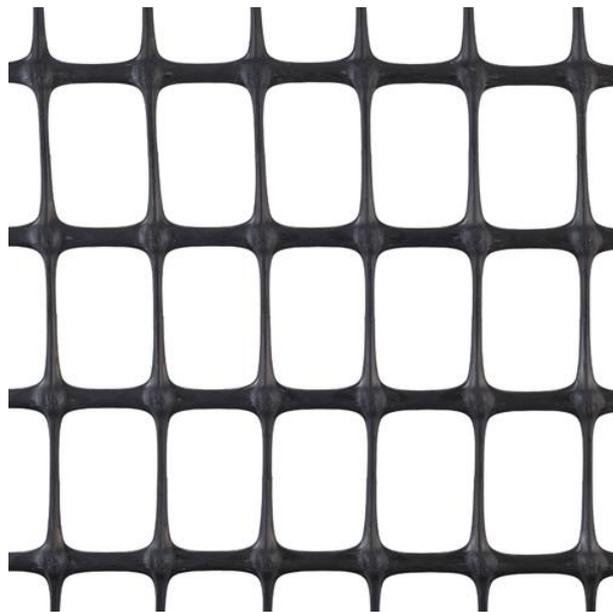


Figura 3.8: Rappresentazione di una geogriglia bidirezionale ([www.tenax.net](http://www.tenax.net)).

Le geogriglie vengono utilizzate nello strato assorbente assieme a materiale granulare, tipicamente sabbia ma anche ghiaia. Il loro uso aumenta la resistenza al taglio del terreno e se utilizzate nel modo corretto portano a una migliore distribuzione degli sforzi nello strato assorbente andando a distribuire le forze dovute all'impatto su un'area maggiore (Meng e al., 2022).

### 3.2.2.3 *Vetro cellulare*

Il vetro cellulare viene realizzato a partire dalla schiuma di vetro, che può derivare dai classici materiali con cui si realizza il vetro (sabbia, calcare e soda) ma anche da vetro riciclato. Alla massa di vetro fusa viene aggiunto un agente chimico espansivo che permette la formazione della schiuma che verrà poi utilizzata per la produzione del prodotto finito. Può trovarsi sia sotto forma di lastre che in grani, per gli strati assorbenti delle gallerie viene appunto usato quest'ultimo formato (*Figura 3.9*) spesso inserito in big bag in modo da facilitarne il posizionamento e limitare l'espansione laterale (*Figura 3.10*).



*Figura 3.9: Vetro cellulare in grani (www.bacchispa.it).*

Una delle caratteristiche più importanti del vetro cellulare è la capacità isolante data dai pori chiusi colmi di gas da cui è composto. Tuttavia, le proprietà utili nel caso dell'impiego nelle gallerie paramassi sono il peso ridotto e la resistenza a compressione. Infatti, il vetro cellulare ha una densità pari a circa  $250 \text{ kg/m}^3$  e una resistenza a compressione di 6 Mpa.

Il peso così ridotto permette di realizzare potenti strati di assorbimento senza andare ad appesantire troppo la struttura (Schellenberg e al., 2006).

### 3.2.2.4 *Reti metalliche*

Al fine di distribuire al meglio gli sforzi sulla soletta si possono utilizzare anche reti metalliche sia in strati, come accade per le geogriglie, che posizionate attorno a grossi sacchi in materiale sintetico al fine di limitarne l'espansione.

La Geobrugg, una nota azienda che produce sistemi di protezione contro la caduta massi e non solo ha ideato due diversi sistemi che utilizzano appunto le reti metalliche:

- **ROCKFALL-X™ G**: questo sistema si compone di big bag con all'interno vetro cellulare, queste sacche sono rivestite da rete TECCO® in modo da limitarne l'espansione laterale e migliorare l'effetto assorbente (*Figura 3.10*) Oltre ad essere molto efficienti nell'assorbimento dell'energia questi sistemi sono utili in quanto a seguito di impatto è possibile sostituire le big bag coinvolte ripristinando facilmente lo strato assorbente alle condizioni ottimali. In alcuni casi questo vantaggio viene

leggermente complicato dall'aggiunta di terreno al di sopra dei sacchi in modo da ridurre l'impatto visivo;



Figura 3.10: Sistema assorbente ROCKFALL-X™ G (www.geobrug.com).

- ROCKFALL-X™ A: questo sistema si compone di strati di copertoni usati uniti con cavi d'acciaio a formare dei pannelli di una decina di metri quadri. Questi strati sono alternati con strati di rete TECCO® per distribuire i carichi su una superficie più ampia (Figura 3.11). Anche in questo caso il sistema può poi essere coperto da uno strato di terreno rinverdito per diminuire l'impatto visivo.

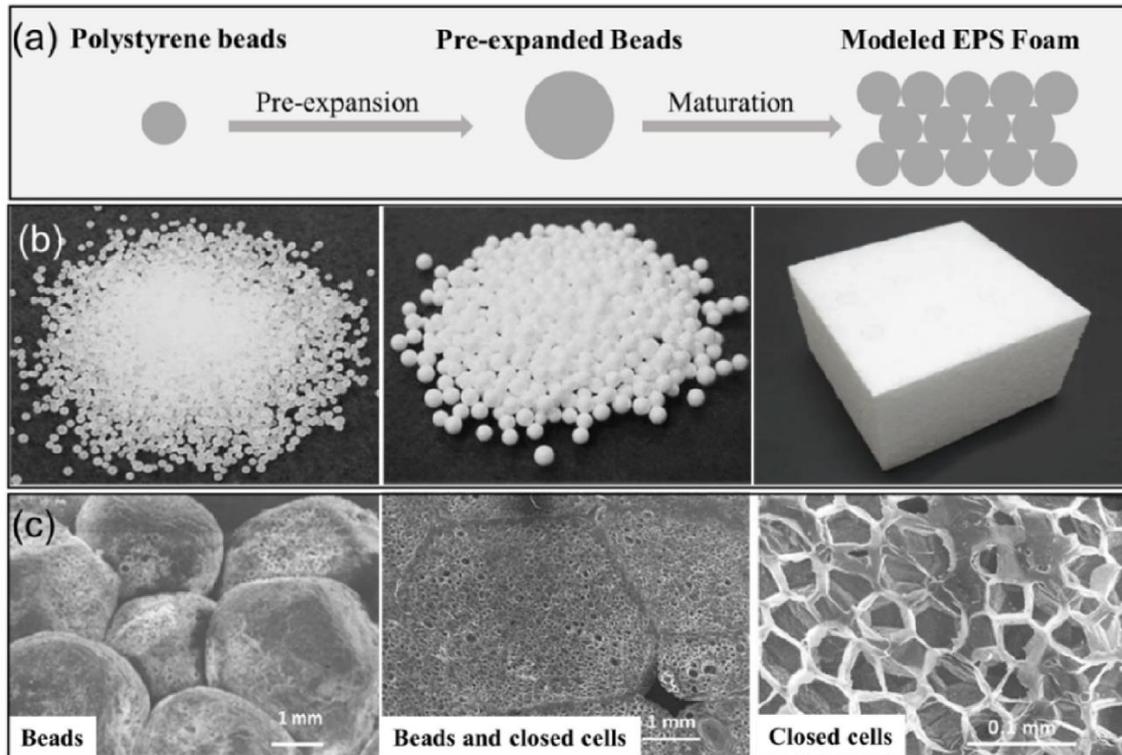


Figura 3.11: Sistema assorbente ROCKFALL-X™ A (www.geobrug.com).

Entrambi i sistemi riducono i carichi statici sulla galleria grazie al peso ridotto e possono arrivare a proteggere la soletta da impatti con energia pari a 5'000 kJ.

### 3.2.2.5 EPS Geofoam

L'EPS Geofoam è composto da polistirene espanso, durante il processo di polimerizzazione viene aggiunto un agente espandente, in questo modo si formano piccole celle colme di gas all'interno del materiale. In *Figura 3.12* vi è uno schema che rappresenta come avviene la formazione dell'EPS Geofoam.



*Figura 3.12: Schema della formazione dell'EPS Geofoam (Yan et al., 2022).*

Il Geofoam è caratterizzato da un'estrema leggerezza, la densità è pari a solamente  $20 \text{ kg/m}^3$  quindi estremamente bassa specialmente in relazione a un modulo elastico pari a  $3.7 \text{ Mpa}$ . Nell'applicazione sulle gallerie questo materiale può essere usato sia da solo che accoppiato ad un secondo materiale granulare come ad esempio la sabbia (Ouyang et al., 2019).

### 3.3 Modalità costruttive

Le modalità costruttive delle gallerie paramassi dipendono principalmente dalla categoria realizzata, in questo capitolo verranno elencate brevemente le principali fasi costruttive per la realizzazione di galleria a portale e a mensola.

Le prime fasi di preparazione del versante ad accogliere la struttura sono simili per tutte le gallerie; per prima cosa si va ad eseguire una riprofilatura del versante con l'esecuzione degli scavi in cui verranno realizzate le fondazioni della struttura.

Siccome le gallerie tendono ad aggiungere peso al versante è necessario che questo sia stabile nei punti in cui si andranno a distribuire i carichi, in caso contrario è necessario procedere al consolidamento del pendio.

Per quanto riguarda le gallerie a portale essendo costituite principalmente da calcestruzzo armato, le modalità sono simili a qualunque struttura in calcestruzzo.

Si utilizzano sistemi di cassetta che servono a contenere la miscela cementizia e le armature in acciaio nel momento del getto e fino a quando il calcestruzzo non fa presa e non raggiunge proprietà meccaniche sufficienti ad autosostenersi. I casseri utilizzati possono essere semplici pannelli in legno ma anche in metallo o in materiali plastici. Oltre a dover contenere il calcestruzzo quando è in fase liquida i casseri hanno il compito di permettere la traspirazione per agevolare la presa.

La fase di presa ha una durata di circa 24/72 ore, questo periodo dipende molto dalle condizioni climatiche, dalle proprietà del calcestruzzo e infine dalle dimensioni dei manufatti che si vanno a realizzare. Per raggiungere le resistenze meccaniche caratteristiche del calcestruzzo armato è necessario attendere 28 giorni.

Partendo dalle fondazioni per passare agli elementi verticali (pilastri a valle e muro a monte) ed infine alla soletta si va a costruire l'intera galleria (*Figura 3.13*).

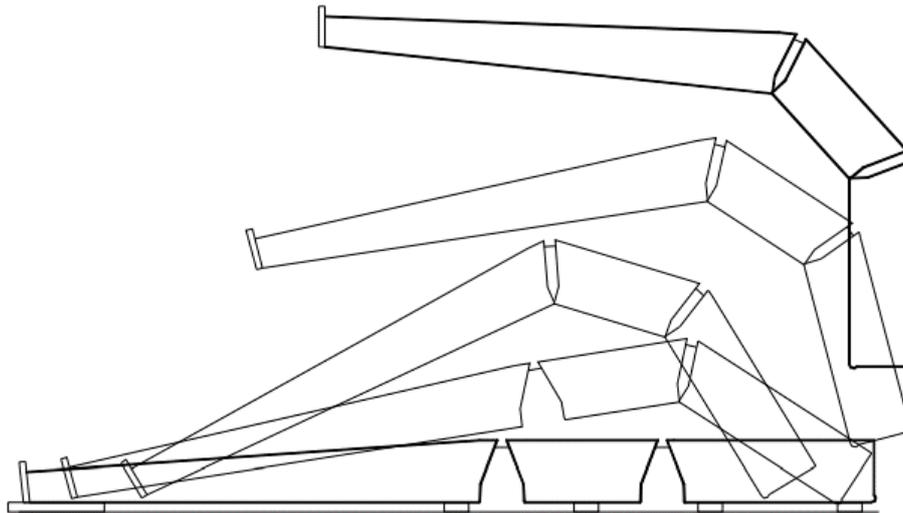


*Figura 3.13: Fase di completamento del getto della soletta (www.trasparenza.provincia.salerno.it).*

Solamente una volta che, tutti gli elementi hanno raggiunto la completa maturazione si va a impermeabilizzare la sommità della galleria e a stendere lo strato di materiale assorbente.

Generalmente per contenere il materiale assorbente si realizza un cordolo sul lato a valle della soletta, questo elemento può essere realizzato in cemento armato oppure in terra rinforzata.

A differenza delle gallerie a portale quelle a mensola sono composte da elementi prefabbricati (*Figura 3.14*), questi vengono montati e ancorati in prima fase ai vincoli composti da una prima serie di tiranti realizzati precedentemente sul lato a monte.



*Figura 3.14: Rappresentazione degli elementi prefabbricati di una galleria a mensola e di come vengono posizionati fino a dare la forma di progetto ([www.trasparenza.provincia.salerno.it](http://www.trasparenza.provincia.salerno.it)).*

Successivamente si vanno a posizionare le armature nei giunti e si procede con un getto di solidarizzazione che rende rigida la struttura facendola diventare come composta di un unico elemento in calcestruzzo (*Figura 3.15*).

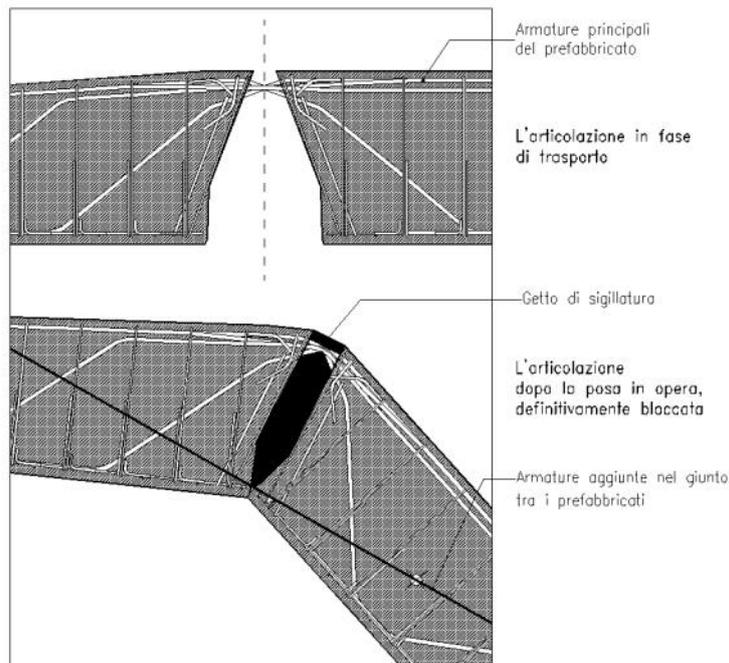


Figura 3.15: Rappresentazione del getto di sigillatura tra gli elementi prefabbricati  
 (www.trasparenza.provincia.salerno.it).

Successivamente si procede con il riempimento dell'intercapedine, che si viene a formare tra struttura e versante, con materiale granulare. La struttura viene spesso ulteriormente tirantata con una serie di tiranti che vanno ad ancorare definitivamente la struttura.

Come per la prima categoria di gallerie analizzate si va poi a creare il cordolo in cima allo sbalzo (sulla parte a valle della soletta) in modo da contenere lo strato assorbente che viene posato successivamente all'impermeabilizzazione della galleria.

La metodologia con la quale viene costruita una galleria dipende anche molto dal contesto ambientale in cui viene realizzata, sono molte infatti le variabili in gioco che necessitano di un'attenta analisi sia in fase di progettazione che in fase di realizzazione. Le metodologie esplicate sono frutto dell'analisi di alcuni progetti di galleria paramassi (www.trasparenza.provincia.salerno.it) e delle norme relative alle costruzioni in calcestruzzo (NTC 2018) di cui si sono riportati unicamente i punti salienti.

### 3.4 Normative

Le normative di riferimento per la realizzazione di gallerie paramassi sono principalmente legate a quelle per la realizzazioni di manufatti in calcestruzzo armato e quelle legate al calcolo delle azioni date dall'impatto dei blocchi sulla struttura.

Per quanto riguarda i manufatti in calcestruzzo vi sono molteplici normative sia a livello nazionale che internazionale.

Le N.T.C. 2018 (Norme Tecniche per le Costruzioni) normano in Italia moltissimi aspetti costruttivi, tra questi ci sono, ovviamente, anche le strutture in calcestruzzo armato come le gallerie paramassi. Questo genere di strutture vengono trattate in particolare modo nel capitolo n. 4.1 dedicato alle strutture in calcestruzzo.

Anche nel capitolo n. 11 al paragrafo n.2 e n. 3 si hanno indicazioni fondamentali per la costruzione delle gallerie in quanto vengono normate le caratteristiche meccaniche ed i controlli da effettuare sul calcestruzzo e sull'acciaio (utilizzato nelle armature).

Anche le norme UNI EN affrontano le tematiche legate alle costruzioni in calcestruzzo, in particolar modo nelle norme:

- UNI EN 206:2021: Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità;
- UNI 11104:2016: Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206 in Italia;
- UNI EN 13670:2010: Esecuzione di strutture di calcestruzzo;
- UNI EN 12390: Prove sul calcestruzzo indurito (diviso in più parti);

Le norme europee per la progettazione di opere in calcestruzzo sono invece raccolte nel:

- eurocodice n.2: Progettazione delle strutture in calcestruzzo;
- eurocodice n.4: Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo.

Tutte le lavorazioni di natura geotecnica sono normate oltre che dalle NTC 2018 anche dall'eurocodice n.7 "Progettazione geotecnica" e dalla norma UNI 1997:2013.

Per quanto riguarda invece le normative dedicate alla caduta massi vi è senz'altro per l'Italia la UNI 11211:2018 divisa in cinque parti differenti:

- 1: termini e definizioni;
- 2: programma preliminare di intervento;
- 3: progetto preliminare;
- 4: progetto definitivo esecutivo;
- 5: ispezione, monitoraggio, manutenzione e ruolo dei gestori.

In Austria vi sono le linee guida ONR 24810:2021 che definiscono gli standard per le protezioni tecniche contro la caduta massi.

In Nuova Zelanda vi è un report governativo intitolato: "Rockfall: design considerations for passive protection structure" e pubblicato nel 2016, dove sono raccolte molte informazioni utili sulla progettazione delle opere di protezione contro la caduta massi.

In Giappone uno dei migliori documenti che tratta la caduta massi e nello specifico gli interventi da effettuare per ridurre il rischio sulle vie di comunicazione è quello realizzato dalla Japan Road Association nel 1983 dal titolo: “*Manual for anti-impact structures against falling rock*”.

Una delle normative però più importanti per le gallerie paramassi, che viene ripresa anche dalla UNI 11211:2018 e dalla ONR 24810:2021, è quella Svizzera ASTRA 12 006 “*Action de chutes de pierres sur les galeries de protection*” entrata in vigore il primo gennaio del 2008

## 4 Progettazione delle gallerie paramassi

In questo capitolo si andranno ad esaminare le normative esistenti riguardanti la progettazione delle gallerie paramassi, analizzando le azioni, i metodi utilizzati per la valutazione dell'impatto del blocco sulla soletta e i criteri per dimensionare al meglio lo strato assorbente.

Successivamente si andrà ad effettuare un'analisi bibliografica, esaminando alcuni esperimenti e modellazioni numeriche effettuate, focalizzandosi sui punti salienti e su un loro confronto.

### 4.1 Normativa relativa alla progettazione

Le normative, come per molte altre strutture, sono fondamentali per la realizzazione delle gallerie paramassi in quanto, se rispettate, garantiscono qualità, efficienza e durabilità dell'opera.

In questa trattazione, per le verifiche ci si andrà ad attenere a quanto prescritto dalle norme NTC che però non specificano nulla per quanto riguarda la stima delle azioni dovute all'impatto. Per ottenerle ci si può rifare alle norme UNI 11211-4, ASTRA 12006 e ONR 24810 che riportano un metodo condiviso e comprovato in più vi è un ulteriore metodo riportato nelle norme giapponesi (Japan Road Association, 1983).

Secondo la norma UNI 11211-4 del 2018 le principali problematiche legate alla progettazione di una galleria paramassi sono:

- struttura in elevazione (pilasti e impalcato);
- sistema fondazionale (fondazioni e tirantature spesso eseguite su versanti acclivi);
- strato assorbente per la dissipazione degli impatti dei blocchi sulla soletta;
- sistema di drenaggio e smaltimento delle acque di versante;
- corpo stradale.

#### 4.1.1 Definizione delle azioni

Le azioni a cui è soggetta una galleria paramassi secondo la norma UNI 11211-4 possono essere di quattro tipi:

- azioni permanenti: queste azioni sono generalmente costanti e sono date dal peso proprio della struttura, dello strato assorbente e dalle spinte agenti sul muro di monte. Per le fondazioni, oltre a considerare le azioni appena citate è necessario anche valutare il peso degli strati di materiale componente la sede stradale.
- azioni variabili: queste azioni possono cambiare nel tempo e sono principalmente dovute ai massi o alla neve depositata sulla soletta ed ai carichi dovuti al traffico che transita attraverso alla galleria;
- azioni di impatto: queste azioni sono dovute all'impatto del blocco sulla soletta e variano in base all'energia e alla composizione dello strato assorbente. Nel *paragrafo 4.1.3* verranno illustrate le procedure che portano al calcolo di questa azione;
- azioni sismiche: dovute a fenomeni sismici.

Le azioni indicate (escluse quelle sismiche) agiscono per lo più in direzione verticale, non sono da sottovalutare però anche le azioni dirette in direzione tangenziale causate da fenomeni franosi o valanghivi.

#### 4.1.2 Stima dei parametri di impatto

Per il calcolo delle azioni dovute all'impatto di un blocco per prima cosa è necessario avere uno studio traiettografico rappresentante la dinamica di caduta in modo da poterne valutare la velocità di impatto. Grazie poi allo studio della sorgente di distacco dei blocchi è possibile stabilire il volume caratteristico e calcolarne la massa. In questo modo è possibile ottenere l'energia di impatto dei blocchi.

##### 4.1.2.1 Norme italiane

La norma UNI 11211-4 stabilisce delle procedure per calcolare l'energia di progetto ( $E_d$ ). In primis viene calcolata la velocità di progetto ( $v_d$ ) come indicato in *equazione 4.1*:

$$v_d = v_t * \gamma_f \quad 4.1$$

Dove:

- $v_t$  è la velocità al 95% (percentile) di quelle calcolate con lo studio traiettografico in corrispondenza dell'opera da progettare;
- $\gamma_f$  è un coefficiente di amplificazione calcolato come in *equazione 4.2*:

$$\gamma_f = \gamma_{Tr} * \gamma_{Dp} \quad 4.2$$

Dove:

- $\gamma_{Tr}$  è il coefficiente di affidabilità del calcolo delle traiettorie e assume i valori di: 1.02 se i coefficienti di restituzione utilizzati nelle simulazioni derivano da una back analysis oppure 1.10 se tali coefficienti si sono ricavati in bibliografia.
- $\gamma_{Dp}$  è il coefficiente che dipende dalla qualità del rilievo topografico del versante ed assume il valore di: 1.02 se il rilievo ha una buona precisione oppure 1.10 se la precisione è medio-bassa.

Successivamente viene calcolata la massa di progetto ( $m_d$ ) come indicato in *equazione 4.3*:

$$m_d = (Vol_b * \gamma) * \gamma_m \quad 4.3$$

Dove:

- $Vol_b$  è il volume del blocco di progetto;
- $\gamma$  è la densità del blocco;
- $\gamma_m$  è un coefficiente di amplificazione calcolato come in *equazione 4.4*:

$$\gamma_m = \gamma_{VolF1} * \gamma_\psi \quad 4.4$$

Dove:

- $\gamma_{VolF1}$  è il coefficiente legato alla precisione della stima del volume del blocco ed assume il valore di: 1.02 se sono stati eseguiti rilievi di precisione o 1.10 in assenza di rilievi finalizzati al progetto;
- $\gamma_{\psi}$  è il coefficiente legato alla stima della densità del blocco assunto in genere pari a 1.

Una volta che si hanno la velocità e la massa di progetto è possibile calcolare anche l'energia cinetica come in *equazione 4.5* :

$$E_{sd} = \frac{1}{2} m_d v_d^2 \quad 4.5$$

#### 4.1.2.2 Norme austriache

Le normative austriache ONR 24810:2021, invece, calcolano l'energia di impatto in modo differente. In primis per la definizione del volume del blocco la scelta dipende dalla frequenza degli eventi di crollo: più un crollo è frequente è più sarà alto il percentile da considerare nella distribuzione della dimensione dei blocchi. Tale scelta segue quanto indicato in *Tabella 4.1*:

*Tabella 4.1: Scelta per percentile in funzione della frequenza di accadimento dell'evento (ONR 24810:2021).*

<b>Classe di frequenza dell'evento</b>	<b>Frequenza</b>	<b>Percentile da utilizzare per il blocco di progetto</b>
EF 4 (molto alta)	Più di 10 eventi anno	98%
EF 3 (alta)	Da 1 a 10 eventi anno	97%
EF 2 (bassa)	Da un evento all'anno a uno ogni trent'anni	96%
EF 1 (rara)	Meno di un evento ogni trent'anni	95%

Una volta ottenuto il volume di progetto si prende il 99% (percentile) della distribuzione di energie ( $T_{E,k}$ ) a questo valore poi si applica un coefficiente ( $\gamma_{E,kin}$ ), che varia a seconda delle conseguenze dell' evento, per ottenere l'energia di progetto ( $T_{E,d}$ ) come in *equazione 4.6*.

$$T_{E,d} = T_{E,k} * \gamma_{E,kin} \quad 4.6$$

Le conseguenze legate alle cadute massi sono suddivise in tre diverse categorie come mostrato in *Figura 4.1*.

Consequence Class CC	Characteristics	Examples
CC 1	Low consequence for human life and small or negligible economic, social or environmentally damaging impact	Agricultural buildings without frequent passage, such as barns, green-houses, forest roads and freight roads with low traffic frequency
CC 2	Medium consequence for human life, considerable economic, social or environmentally damaging impact	Residential and office buildings, public buildings with medium consequences of failure, such as office buildings, regional and national routes with DTV $\leq 50,000$ vehicles
CC 3	High consequence for human life or very large economic or environmentally damaging impact	Grandstands, public buildings with high failure consequences of failure, such as concert halls, regional and national routes with DTV $> 50,000$ vehicles

Figura 4.1: : Distinzione delle tre classi di conseguenze legate a un crollo (ONR 24810:2021).

A seconda della classe di conseguenze il coefficiente  $\gamma_{E,kin}$  utilizzato per il calcolo dell'energia di progetto assume diversi valori come indicato in Tabella 4.2.

Tabella 4.2: Coefficienti utilizzati per le differenti classi di conseguenze (ONR 24810:2021).

	CC1	CC2	CC3
$\gamma_{E,kin}$	1.0	1.05	1.15

I metodi descritti in precedenza, riportati dalle norme UNI 11211-4 e ONR 24810:2021, sono utili per stabilire l'entità del crollo che è una caratteristica fondamentale necessaria come punto di partenza per la progettazione di qualsiasi opera di protezione dalla caduta massi.

#### 4.1.3 Calcolo dell'azione data dall'impatto del blocco

Per il calcolo delle azioni dovute all'impatto di un blocco in assenza di studi specifici eseguiti ad oc per il progetto ci si può basare principalmente su tre norme quella svizzera ASTRA 12006, quella italiana UNI 11211-4 e quella austriaca ONR 24810. Queste tre normative utilizzano lo stesso metodo di calcolo derivante da alcuni articoli scientifici (Labiouse et al.,1994; Montani et al., 1997-1999-2004) che verranno analizzati in seguito al *paragrafo 4.2.1.1*.

Le norme definiscono l'azione di caduta di un blocco come un'azione accidentale dovuta ad un evento raro e generalmente di breve durata ma con un effetto importante.

In base alla parete rocciosa e al versante su cui sorge l'infrastruttura da proteggere si avranno dei valori caratteristici che contraddistinguono il crollo in oggetto, questi valori sono:

- Massa del blocco ( $m_k$ );
- Velocità del blocco ( $v_k$ );
- Angolo della traiettoria rispetto all'orizzontale nel punto di impatto ( $\alpha_k$ ).

Questi valori caratteristici sono quelli definiti "di progetto" nel paragrafo precedente e derivano dall'analisi traiettografica e dallo studio dell'ammasso roccioso.

Il tipo di materiale che andrà a costituire lo strato assorbente andrà deciso soprattutto in base alla massa e alla velocità del blocco.

Il progetto deve tenere conto sia dei mutamenti delle caratteristiche dello strato assorbente, dovute alla consolidazione dello stesso, sia della possibilità che si generino reazioni negative sui vincoli della soletta a seguito dell’impatto.

Non si considerano coefficienti riduttivi dell’azione del blocco qualora, nel momento dell’impatto, la galleria sia coperta di neve o blocchi di dimensioni minori, ponendosi in questo modo a favore di sicurezza.

La normativa Svizzera definisce: “L’azione dinamica  $F_k$  dell’impatto di un blocco è rappresentata da una forza di sostituzione statica  $A_d$ , pesata da un coefficiente di costruzione  $C$ ”. L’azione dinamica viene calcolata nello stesso modo anche nelle norme UNI 11211-4 a cui però non viene applicato alcun coefficiente correttivo per il calcolo della forza di sostituzione statica.

La forza al punto di impatto ( $F_k$ ) viene stimata dall’equazione 4.7 (ASTRA 12006 – UNI 11211-4):

$$F_k = 2.8 * e^{-0.5} * r^{0.7} * M_{E,k}^{0.4} * \tan \varphi_k * \left( \frac{m_k * v_k^2}{2} \right)^{0.6} \quad 4.7$$

Mentre la penetrazione ( $t$ ) è data dall’equazione 4.8:

$$t = \left( \frac{m_k * v_k^2}{F_k} \right) \quad 4.8$$

Dove:

- $t$  è la profondità di penetrazione del blocco in metri;
- $F_k$  è il valore della forza al punti di impatto in kN;
- $m_k$  è il valore caratteristico della massa del blocco in tonnellate;
- $r$  è il raggio della sfera equivalente al blocco in metri;
- $v_k$  è il valore caratteristico della velocità del blocco in metri al secondo;
- $e$  è lo spessore dello strato assorbente;
- $M_{E,k}$  è il valore caratteristico del modulo statico  $M_E$  di compressibilità del materiale assorbente;
- $\varphi_k$  è il valore caratteristico dell’angolo di attrito del materia assorbente in gradi.

Nelle norme ASTRA 12006 viene applicato un ulteriore coefficiente correttivo  $C$  alla forza  $F_k$  come mostrato in equazione 4.9:

$$A_d = C * F_k \quad 4.9$$

Il valore del coefficiente C dipende dalla struttura della galleria come è illustrato nella tabella in *Figura 4.2*.

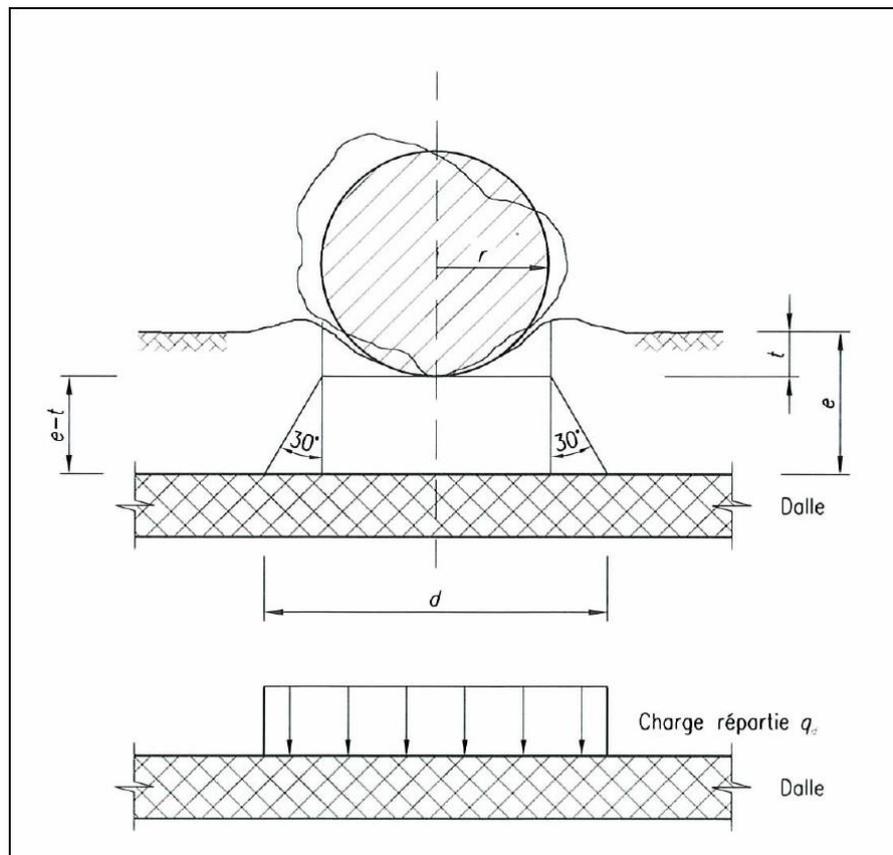
Mode de rupture	Coefficient de construction C
<i>Ductile</i> (rupture en flexion de dalles ou poutres, rupture d'éléments armés à l'effort tranchant ou au poinçonnement)	0,4
<i>Fragile</i> (rupture d'éléments non armés à l'effort tranchant ou au poinçonnement)	1,2

*Figura 4.2: Definizione dei valori del coefficiente C (ASTRA 12 006).*

Come detto in precedenza per le norme UNI 11211-4 non tengono conto del coefficiente di costruzione (C) e dunque la forza di sostituzione risulta essere (*equazione 4.10*):

$$A_d = F_k \quad 4.10$$

Questa forza di sostituzione va poi distribuita su un'area maggiore a quella formata dal contatto tra sfera ideale (rappresentante il blocco in oggetto) e il terreno. L'angolo di diffusione può essere considerato pari a 30°. Si trova così il valore del carico distribuito da utilizzare per il dimensionamento ( $q_d$ ). Lo schema appena illustrato viene mostrato in *Figura 4.3*.



*Figura 4.3: Schema rappresentativo della diffusione della forza di sostituzione  $A_d$  (ASTRA 12 006 UNI 11211-4).*

Nel caso in cui l'impatto sia obliquo la forza  $F_k$  deve essere scomposta in due componenti quella verticale e quella orizzontale. Per quella verticale ( $F_{z,k}$ ) sufficiente utilizzare l'equazione 4.7 utilizzando come valore della velocità quello della sua componente verticale ( $v_{z,k}$ ). La componente orizzontale ( $F_{x,k}$ ) viene calcolata attraverso l'equazione 4.11 (ASTRA 12600):

$$F_{x,k} = F_{z,k} * \cot \alpha_k \quad 4.11$$

Tuttavia, il valore massimo che questa può assumere è pari alla resistenza al taglio del materiale assorbente. In Figura 4.4 è rappresentato uno schema di come vengono scomposte le forze per un impatto obliquo.

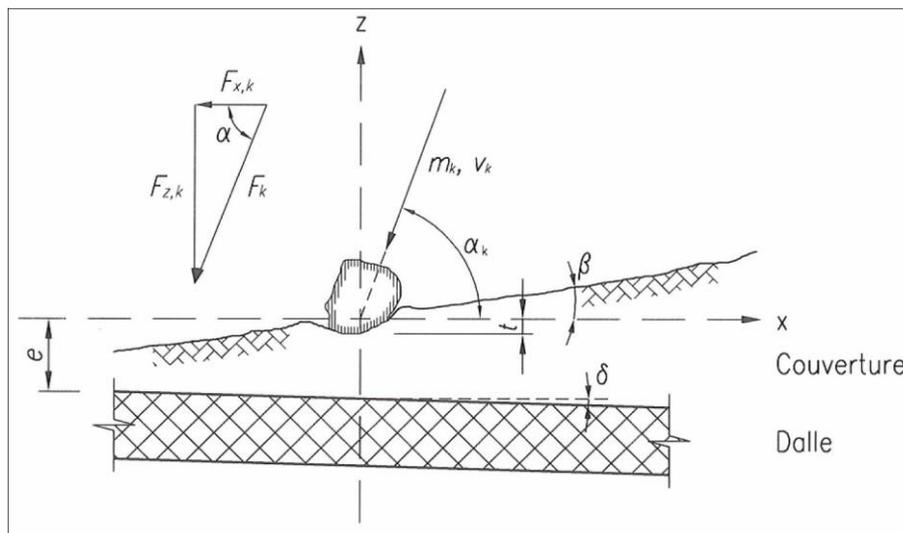


Figura 4.4: rappresentazione della scomposizione delle forze per un impatto obliquo (ASTRA 12 006).

Lo spessore dello strato assorbente deve rispettare tre diverse condizioni indicate nel sistema di equazione 4.12 (ASTRA 12006, UNI 11211-4, ONR 24810):

$$\begin{cases} e \geq 0.5 m \\ e \geq t + 3\phi_{max} \\ e \geq 2t \end{cases} \quad 4.12$$

Dove  $\phi_{max}$  è il diametro massimo dei grani di cui è composto il materiale assorbente in metri.

La normativa rimanda alle norme SN 640317b e SN 670317b per lo stabilimento del valore caratteristico del modulo di compressibilità del materiale assorbente  $M_{E,k}$ .

Il materiale utilizzato in più deve avere bassa coesione e si deve tenere conto di come questo muterà le sue caratteristiche meccaniche nel tempo a seguito del suo consolidamento naturale per esposizione agli agenti atmosferici.

La normativa svizzera analizzata risulta di semplice utilizzo ma al tempo stesso esaustiva. Essa rappresenta un buon punto di partenza per la progettazione delle gallerie paramassi, tant'è che viene utilizzata anche in altre nazioni.

Un altro metodo utilizzato per il calcolo del carico legato all' impatto è quello giapponese riportato nel Japan Road Association (1983) e ripreso da Schellenberg (2009). Il carico dovuto all'impatto del blocco viene calcolato in modo differente attraverso le formule riportate in equazione 4.13 ed equazione 4.14.

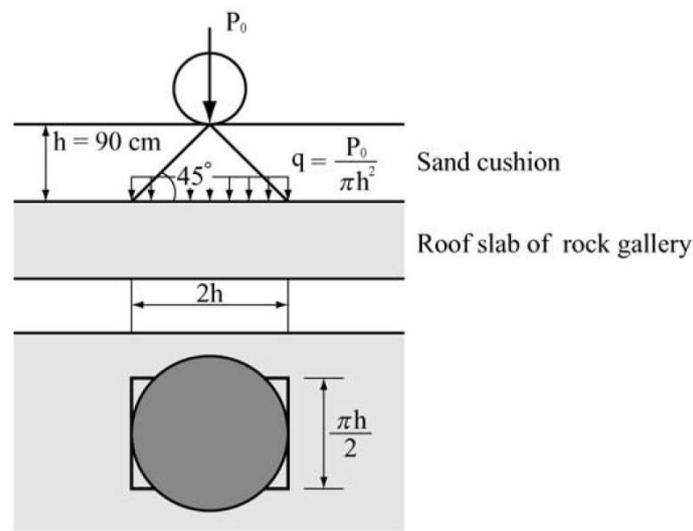
$$P = 2.455 * \lambda^{\frac{2}{5}} * W^{\frac{2}{3}} * H^{\frac{3}{5}} * i \quad 4.13$$

$$i = \left(\frac{h}{D}\right)^{-0.5} \quad 4.14$$

Dove:

- P è il carico di impatto [tf];
- $\lambda$  è la costante di Lamé del terreno [tf/m<sup>2</sup>];
- W è il peso del blocco in [tf];
- H è l'altezza di caduta del blocco in [m];
- h è lo spessore dello strato assorbente [m];
- D è il diametro del blocco [m]

Anche gli angoli di diffusione degli sforzi per calcolare l'area di diffusione del carico sono differenti da quelli considerati nelle norme svizzere. In questo caso l'angolo è di 45 °, in *Figura 4.5* vi è uno schema sulla distribuzione dell'impatto.



*Figura 4.5: Schema raffigurante la distribuzione dell'impatto secondo le norme giapponesi (Japan Road Association, 1983).*

#### 4.1.4 Verifiche e stati limite

Le verifiche di stabilità delle gallerie paramassi vengono eseguite allo stato limite ultimo (SLU) ovvero il limite che anticipa un cedimento strutturale irreversibile che compromette la sicurezza della struttura e quindi indubbiamente di che ne usufruisce.

Come riportato nelle NTC 2018 nelle verifiche SLU il valore delle resistenze di progetto ( $R_d$ ) deve essere maggiore o uguale a quello delle azioni di progetto ( $E_d$ ) come mostrato in *equazione 4.15*.

$$R_d \geq E_d \quad 4.15$$

Per ricavare questi valori di progetto è necessario applicare dei coefficienti che possono essere riduttivi nel per le resistenze del materiale e amplificativi per quanto riguarda le azioni:

- A: coefficienti che vanno a incrementare le azioni;
- M: coefficienti che vanno a decrementare le resistenze dei materiali;
- R: coefficienti che vanno ad agire sulla resistenza globale negli stati limite.

Questi coefficienti possono essere utilizzati con due approcci di cui uno composto da due combinazioni come mostrato in *equazione 4.16*.

$$\begin{aligned} \text{Approccio 1} &\rightarrow \text{Combinazione 1} = A_1 + M_1 + R_1 \\ \text{Approccio 1} &\rightarrow \text{Combinazione 2} = A_2 + M_2 + R_2 \\ \text{Approccio 2} &= A_1 + M_1 + R_3 \end{aligned} \quad 4.16$$

I valori dei coefficienti sono riportati in *Figura 4.6*.

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

*Figura 4.6: Tabella relativa ai coefficienti per le azioni negli SLU (NTC 2018).*

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coazione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

Figura 4.7: Tabella relativa ai coefficienti per le resistenze dei materiali nelle SLU (NTC 2018).

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Carico limite	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$

Figura 4.8: Tabella relativa al coefficiente R3 per le SLU (NTC 2018).

Esistono tre diversi tipi di verifiche agli stati limite ultimi (NTC 2018):

- EQU: equilibrio della struttura, in questa fase essa viene trattata come se fosse un corpo rigido;
- STR: resistenza strutturale, si osserva la resistenza limite di tutte le parti che compongono la struttura comprese le fondazioni;
- GEO: resistenza del terreno su cui poggia e interagisce la struttura.

Le gallerie paramassi essendo localizzate, nella maggior parte dei casi, su pendii naturali è necessario verificare anche la stabilità globale del pendio. Questa va effettuata utilizzando i coefficienti della combinazione 2 dell'approccio1 (A2+M2+R2).

Invece per le verifiche del carico limite e dello scorrimento delle fondazioni viene utilizzato l'approccio2 (A1+M1+R3). Lo stesso approccio viene utilizzato per verificare la resistenza degli elementi che compongono la struttura ma in questo caso viene tralasciato l'utilizzo del coefficiente  $\gamma_R$ .

#### 4.1.5 Manutenzione delle gallerie

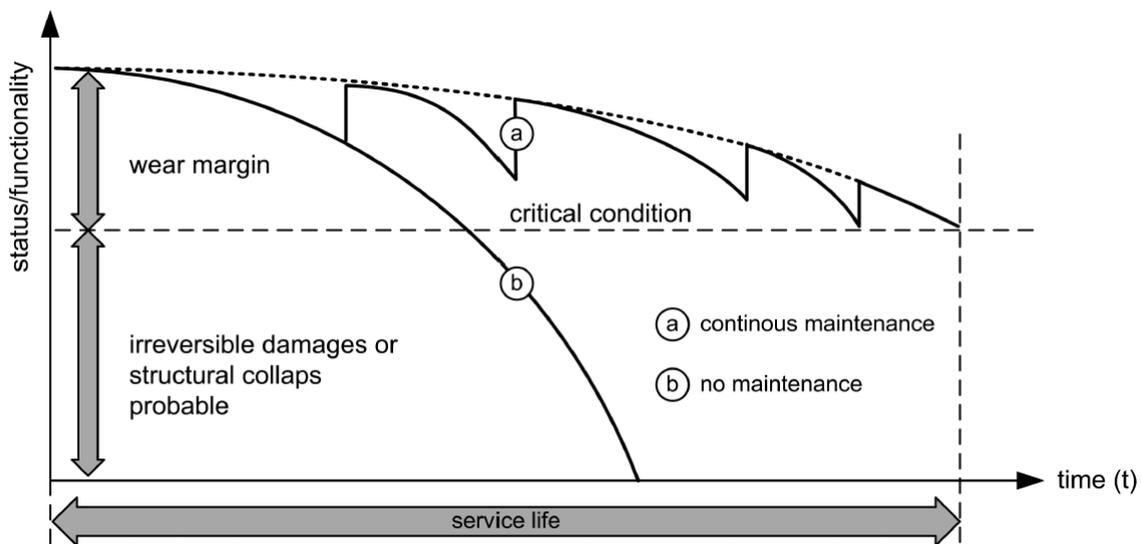
È fondamentale con il passare degli anni procedere a interventi di manutenzione delle gallerie paramassi. Oltre al controllo periodico delle condizioni dei manufatti in calcestruzzo armato è necessario verificare le condizioni dello strato assorbente.

Infatti, lo strato assorbente con il passare del tempo tende a compattarsi e diminuire la sua efficienza di assorbimento. In più le azioni tangenziali (valanghe) possono asportare il materiale riducendo lo spessore dello strato di copertura (UNI 11211-4).

Le norme austriache ONR 24810 definiscono quattro diversi tipi di strategie manutentive di seguito elencate partendo da quella migliore e andando verso quella peggiore:

- strategia preventiva proattiva: la manutenzione viene fatta attraverso piccoli ma periodici operazioni seguendo delle linee guida di manutenzione;
- strategia preventiva condizionale: attraverso il monitoraggio continuo della struttura si studia lo stato della stessa definendo le manutenzioni da svolgere in base alle condizioni della struttura;
- strategia correttiva a medio/lungo termine: la manutenzione non viene eseguita finché non si raggiunge una condizione critica, il margine di usura viene completamente sfruttato;
- strategia correttiva a breve termine: la manutenzione viene effettuata unicamente a seguito di un guasto, questa strategia risulta essere la più gravosa per la struttura con il rischio che questa possa subire danni irreversibili e necessitare così la sostituzione.

Una manutenzione continua della galleria permette di estenderne la durata garantendo sempre un'elevata funzionalità; questo concetto viene ben rappresentato dal grafico in *Figura 4.9*.



*Figura 4.9: Dimostrazione dello stato e della funzionalità della galleria a seguito di due differenti approcci di manutenzione (ONR 24810).*

## 4.2 Analisi bibliografica dell'impatto di un blocco e della risposta strutturale

In questo paragrafo si andranno ad analizzare alcuni articoli scientifici relativi alle gallerie paramassi ed allo studio dello strato assorbente. L'azione legata all'impatto è un parametro cruciale per la progettazione delle gallerie. La difficoltà nella valutazione della forza dinamica legata all'impatto di un blocco rende indispensabile un'analisi bibliografica come quella effettuata in questo paragrafo in modo da avere delle informazioni base per una corretta comprensione del fenomeno fisico. Gli articoli presi in considerazione verranno suddivisi in analisi sperimentali, che tratteranno sia prove di laboratorio che in sito, e in modellazioni numeriche. Al termine del paragrafo si andranno a comparare i concetti principali ricavati da questa analisi bibliografica.

### 4.2.1 Analisi sperimentali

Gli esperimenti sono fondamentali per capire come reagisce lo strato assorbente di una galleria paramassi all'impatto di un blocco, ma sono utili anche per calibrare le modellazioni numeriche. In seguito, verranno analizzati alcuni esperimenti in particolare ci si focalizzerà su quelli eseguiti presso il Politecnico Federale di Losanna in quanto sono stati anche utilizzati per la calibrazione del modello agli elementi finiti utilizzato per l'analisi di sensitività condotta in questa tesi.

#### 4.2.1.1 *Esperimenti del Politecnico Federale di Losanna (Labiouse et al., 1994; Montani et al., 1997-1999-2004)*

Gli esperimenti effettuati da Politecnico Federale di Losanna vengono ripresi da molti articoli e linee guida che trattano lo studio dell'impatto dei blocchi sulle gallerie paramassi. Gli studi effettuati negli articoli vanno soprattutto a focalizzarsi su come variano le azioni al variare di alcuni parametri, valutando la trasmissione delle forze dal blocco fino ai supporti della soletta.

In *Figura 4.10* viene rappresentato lo schema del modello con cui si sono eseguiti gli esperimenti.

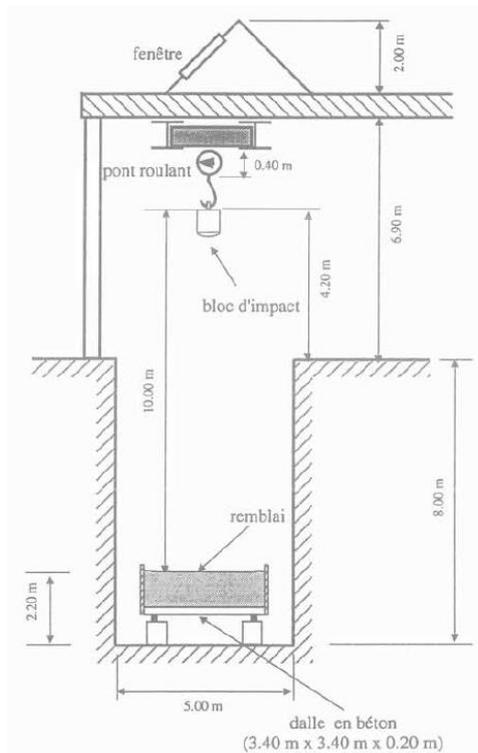


Figura 4.10: Modello degli esperimenti al Politecnico Federale di Losanna (Labiouse et al., 1994).

I blocchi utilizzati nelle simulazioni sono di forma cilindrica con superficie sferica sul lato inferiore dove avviene l’impatto. Le tre forme in acciaio utilizzate sono state colmate con calcestruzzo in modo da raggiungere le masse desiderate ovvero: 100 kg, 500 kg e 1000 kg (Labiouse et al., 1994).

Per le misurazioni legate all’impatto si sono utilizzati diversi tipi di sensori:

- accelerometro: posizionato sul blocco misura l’accelerazione per ottenere la velocità e lo spostamento;
- misuratori di pressione: posizionati a partire dal centro ad una distanza di 30 centimetri l’una dall’altra, riportate in *Figura 4.11* con la lettera “P”;
- misuratori di spostamenti: posizionati sulla diagonale nella parte inferiore della soletta, sono indicati con la lettera “D” in *Figura 4.11*;
- celle di carico: sono quattro e sono posizionate in corrispondenza dei vincoli, in *Figura 4.11* indicate con la lettera “L”.

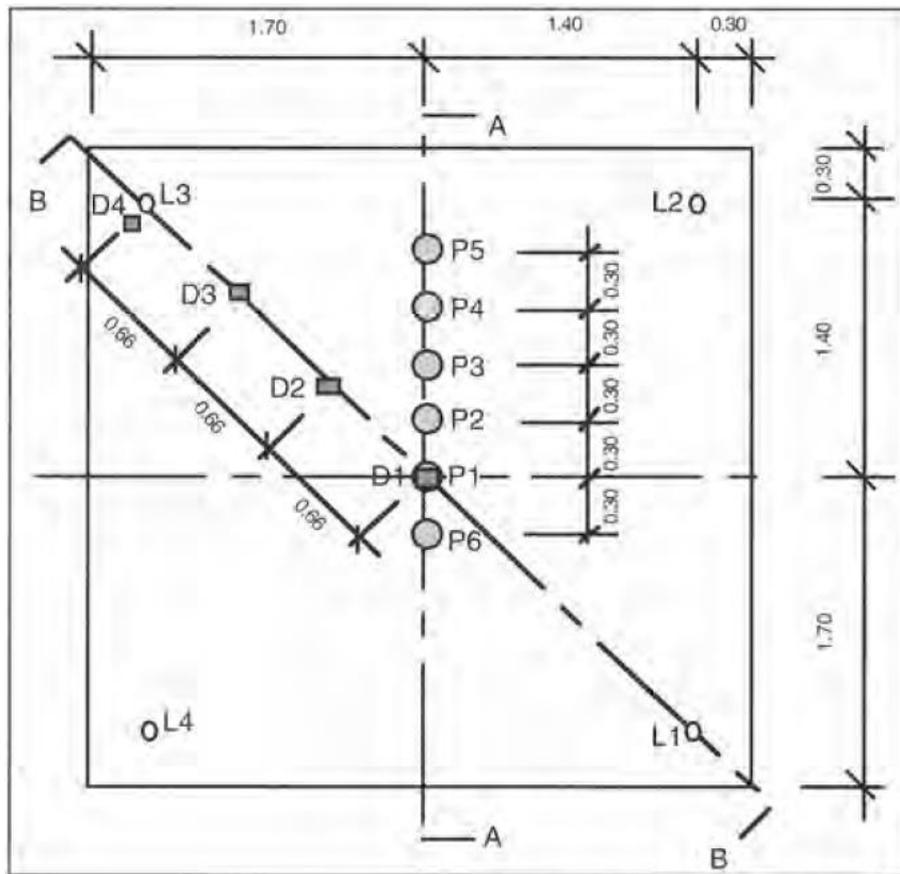


Figura 4.11: Rappresentazione in pianta delle dimensioni del modello utilizzato negli esperimenti del Politecnico Federale di Losanna e nel modello in ABAQUS (Montani et al., 1999).

Negli esperimenti sono stati utilizzati tre tipi diversi di terreno le cui caratteristiche sono riportate in *Tabella 4.3* (Montani et al., 1999).

Tabella 4.3: Caratteristiche dei tre tipi di suolo utilizzati negli esperimenti del Politecnico Federale di Losanna (Montani et al., 1999).

Tipo di suolo	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Angolo di attrito [°]	Coesione [kPa]	M <sub>E</sub> [kPa]
Ghiaia	1650	41	0	2500
Depositi alluvionali	1890	45	0	800
Detriti di roccia	1790	47	0	600

Durante lo studio si sono effettuate diverse prove facendo variare i parametri come indicato in *Tabella 4.4*, dopo ogni caduta si andava a misurare nuovamente il modulo di reazione standardizzato M<sub>E</sub> tramite piastra in modo da tenere traccia anche della compattazione del suolo.

Tabella 4.4: Parametri utilizzati negli esperimenti del Politecnico Federale di Losanna (Montani et al., 2004).

Parametro	Valori utilizzati
Massa del blocco [kg]	100, 500, 1'000
Raggio del blocco [m]	0.21, 0.36, 0.45
Velocità [m/s]	Da 4.4 a 14
Altezza di caduta [m]	Da 1 a 10
Spessore strato assorbente [m]	0.35, 0.5, 1
Modulo dello strato $M_E$ [kPa]	Da 600 a 43'000
Angolo di impatto $\alpha$ [°]	44, 67, 90

Le forze principali in gioco a seguito dell' impatto sono tre e sono illustrate in *Figura 4.12* (Labiouse et al. 1994):

- 1 - forza impulsiva legata all' accelerazione del blocco, agisce sulla superficie superiore dello strato assorbente;
- 2 - sforzo all' interfaccia terreno-soletta, detto anche sforzo integrato;
- 3 - reazione vincolare dei 4 supporti che sorreggono la soletta.

In seguito, verranno indicate rispettivamente come forza 1, forza 2 e forza 3.

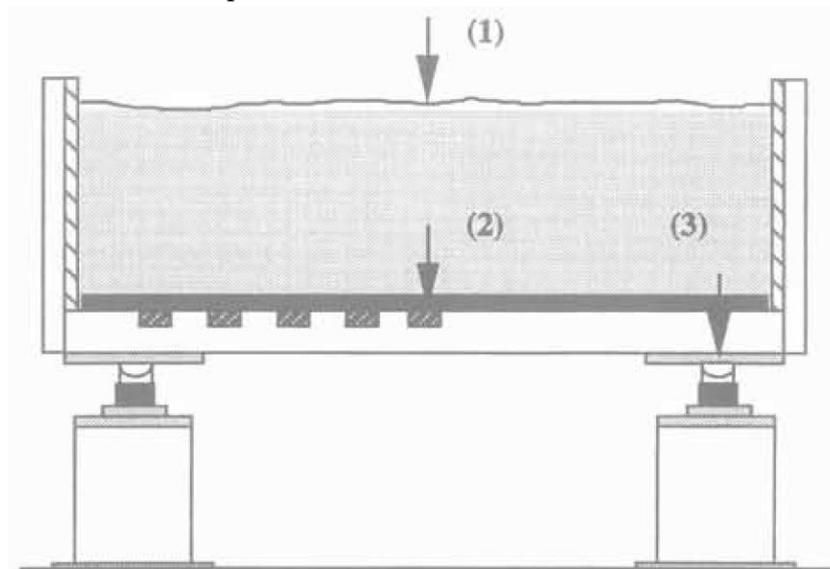


Figura 4.12: Rappresentazione delle tre forze principali agenti negli esperimenti (Labiouse et al., 1994).

I risultati degli esperimenti dal punto di vista della variabilità delle misure a seconda dei parametri si possono riassumere nella *Tabella 4.5* riportata da Montani et al. (2004). I parametri che più influenzano i risultati sono il peso e l' altezza di caduta del blocco unitamente allo spessore e alla compattazione dello strato assorbente.

Tabella 4.5: Andamento delle varie misure in funzione della variazione dei parametri (Montani et al., 2004).

	Blocco			Strato assorbente		Struttura
	Peso ↗	Altezza di caduta ↗	Angolo di impatto ↗	Spessore ↗	Grado di compattazione ↗	Rigidità del sistema ↗
<b>Forza 1</b>	↗	↗	↗	↘	↗	↗
<b>Forza 2</b>	↗	↗	↗	↘	↗	↗
<b>Forza 3</b>	↗	↗		↘		
<b>Spostamento</b>	↗	↗		↘		
<b>Angolo di diffusione</b>	↘	-		-	↘	↗
<b>Tempo di impatto</b>	↗	-	↘	↘	↘	↘
<b>Periodo oscillazione</b>	-	-		↗		
<b>Penetrazione del blocco</b>	↗	↗	-	-	↘	↗

Negli esperimenti si è utilizzata la formula (equazione 4.17) per il calcolo della forza 2, ovvero quella corrispondente all'interfaccia terreno-soletta (forza integrata), a partire dalle misure di pressione ricavate dai sensori.

$$F_2 = 0.333 * \pi * \Delta s^2 (p_1 + 6p_2 + 12p_3 + 18p_4 + 11p_5) \quad 4.17$$

Dove:

- $\Delta s$  è la distanza tra i sensori, in questo caso pari a 0.3 metri;
- $p_n$  è la misura di pressione restituita dal sensore n.

Andando a confrontare i valori massimi raggiunti dalle 3 forze principali ricavate negli esperimenti, è possibile affermare che (Montani et al., 1997):

- il rapporto tra i massimi della forza 2 e della forza 1 è pressoché lineare con una pendenza variabile tra 2 e 1 a seconda dello spessore dello strato assorbente, come è possibile vedere in *Figura 4.13*;

- il rapporto tra i massimi della forza 3 e della forza 2 è nuovamente lineare con coefficiente angolare pari a 2, in questo caso il rapporto non varia al variare dello spessore dello strato (*Figura 4.14*).
- il rapporto tra i massimi raggiunti dalle forze non dipende dal tipo di materiale che viene utilizzato, tuttavia, il valore delle forze massime è molto influenzato dalla compattazione del materiale.

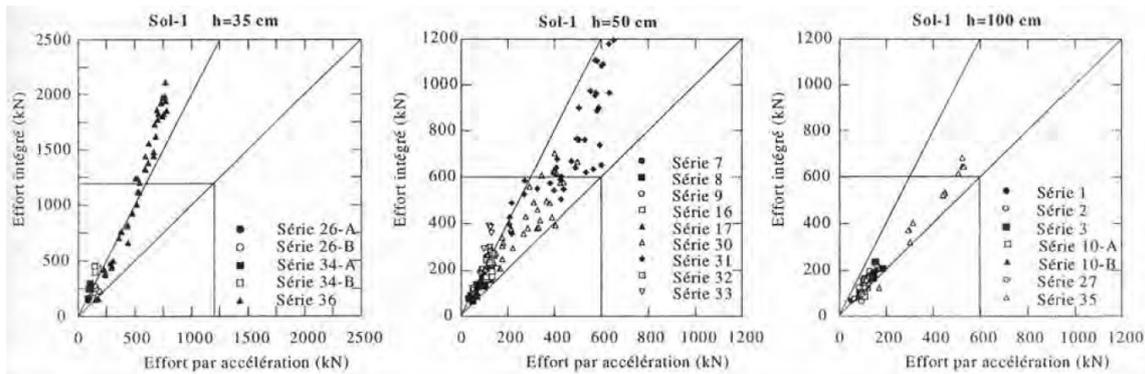


Figura 4.13: Grafici con rappresentanti il rapporto tra forza 2 (ordinate) e forza 1 (ascisse) (Montani et al., 1997).

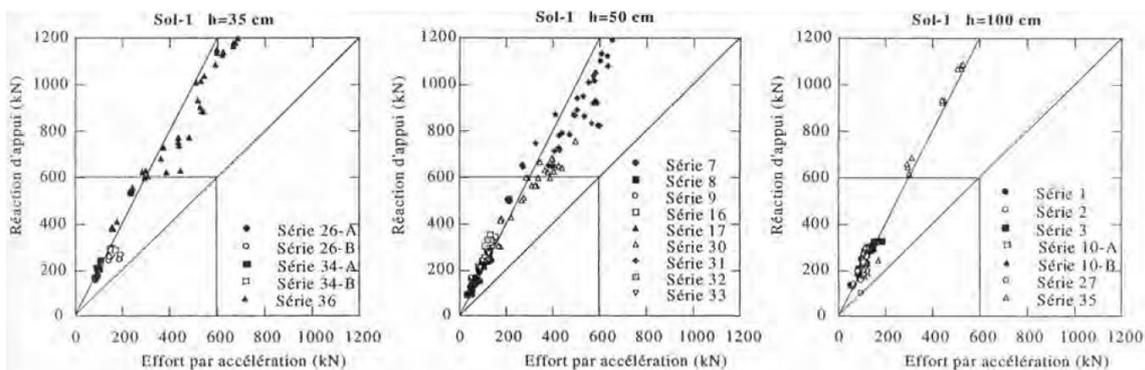


Figura 4.14: Grafici con rappresentanti il rapporto tra forza 3 (ordinate) e forza 2 (ascisse) (Montani et al., 1997).

A seguito di un'analisi statistica Montani et al. (2004) ha ricavato una relazione tra il lavoro compiuto nella deformazione del materiale che compone lo strato assorbente e l'energia potenziale del blocco al momento dell'impatto (*equazione 4.18*):

$$F_1 * d = 1.6 * E_{pot} \quad 4.18$$

Dove  $d$  è la penetrazione del blocco.

Mentre in questa relazione il modulo  $M_E$  non ha alcuna rilevanza in realtà questo parametro è necessario per ricavare la forza 1 tramite la legge elastica di Hertz (corretta con l'inserimento dell'angolo di attrito " $\varphi$ ") che unita alla relazione ricavata precedentemente restituisce l'*equazione 4.19* utile per calcolare la forza 1.

$$F_1 = 1.35 * R^{0.2} * \exp\left(\frac{R}{3e}\right) * M_E^{0.4} * (\tan\varphi)^{0.2} * E_{pot}^{0.6} \quad 4.19$$

Dove “R” è il raggio del blocco ed “e” è lo spessore dello strato assorbente.

Analogamente in Montani et al. (2004) si è ricavata anche una formula (equazione 4.20) per ottenere la forza 2 (forza integrata).

$$F_2 = 0.13 * R^{0.8} * e^{-0.1} * M_E^{0.4} * \sqrt{\frac{k}{(m + M) * g}} * E_{pot}^{0.6} \quad 4.20$$

Dove:

- $\underline{k}$  è la rigidezza della soletta;
- $\underline{m}$  è la massa del blocco;
- $\underline{M}$  è la massa dello strato assorbente e della soletta;
- $\underline{g}$  è la accelerazione di gravità.

Per quanto riguarda gli impatti inclinati negli esperimenti condotti è emerso che, se nell’impatto il blocco esaurisce la sua energia cinetica il valore della forza 1 non cambia mentre se, in seguito all’impatto, viene conservata parte della velocità la forza 1 diminuisce.

La forza 2 diminuisce di intensità in funzione del seno dell’angolo di impatto “ $\alpha$ ” al quadrato (equazione 4.21 ).

$$F_{2,incinata} = F_{2,perpendicolare} * (\sin \alpha)^2 \quad 4.21$$

Nel *paragrafo 5.2*, che tratta la back analysis effettuata per la calibrazione del modello agli elementi finiti, sono riportati molti dei grafici ottenuti in questi esperimenti messi in confronto con quelli ottenuti nelle simulazioni numeriche.

#### 4.2.1.2 Altri esperimenti

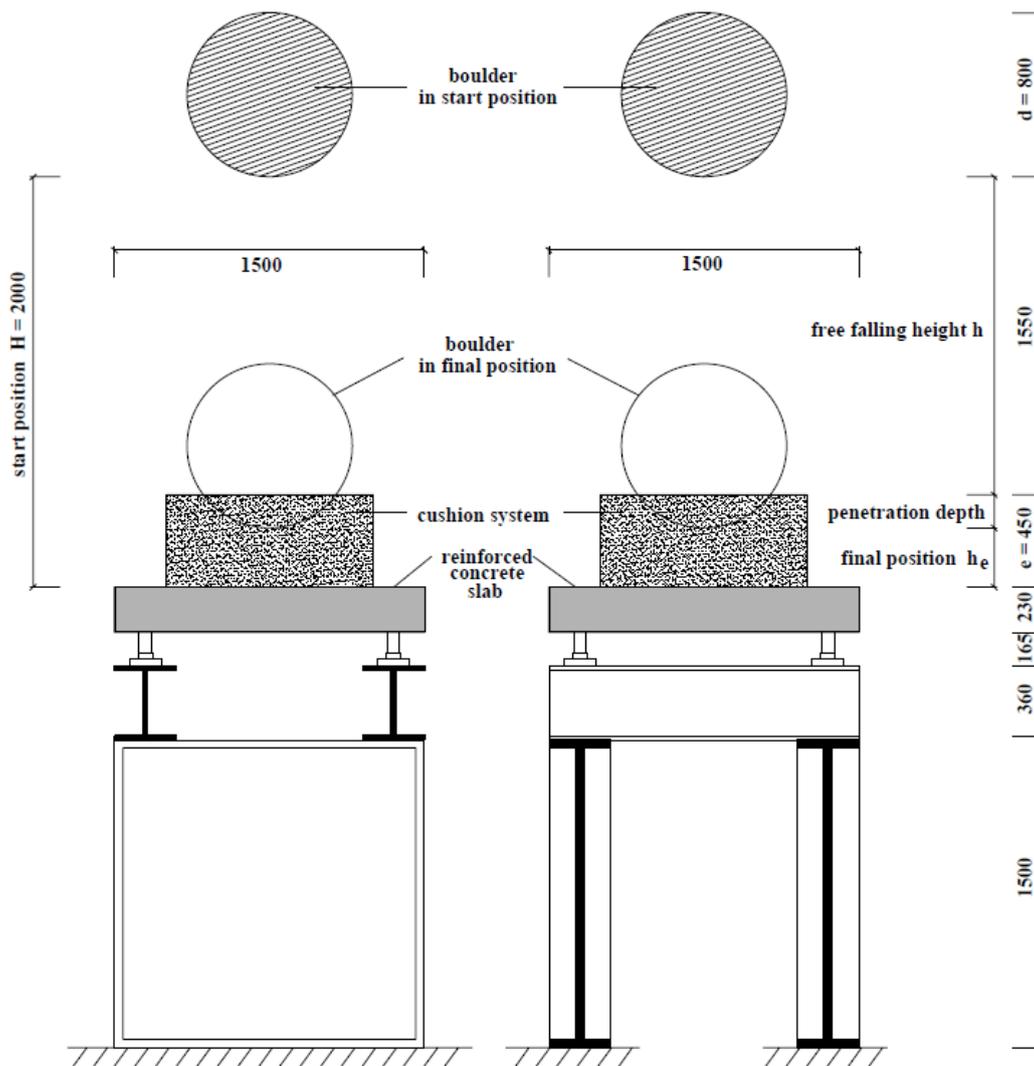
Visti a fondo gli esperimenti effettuati presso il Politecnico Federale di Losanna si vanno ad analizzare altri esperimenti dove si sono andati a testare anche altri tipi di materiali e condizioni al contorno.

Un’importante analisi sperimentale riportata da Schellenberg et al. (2006) confronta l’effetto dell’ impatto su tre diversi materiali costituenti lo strato assorbente:

- sabbia (S);
- vetro cellulare (C);
- ghiaia (G).

Nelle prove effettuate in laboratorio si è utilizzato sempre lo stesso blocco di massa 825 kg e raggio 40 centimetri. Questo viene fatto cadere sulla soletta protetta da uno strato assorbente di

45 centimetri seguendo lo schema in *Figura 4.15*. Il blocco una viene sollevato in posizione e successivamente fatto cadere tramite un gancio a controllo remoto per elicotteri. I sensori utilizzati sono accelerometri sia sul blocco che sulla soletta, misuratori di pressione tra soletta e strato assorbente e celle di carico per misurare le reazioni vincolari sui quattro vincoli della soletta. In più si sono utilizzate anche due fotocamere con alta frequenza di campionamento dei fotogrammi in modo da avere anche un risultato visivo dettagliato dell'impatto e collegare i dati provenienti dai sensori con le fasi di arresto del blocco.



*Figura 4.15: Schema rappresentante il campo prova utilizzato negli esperimenti (Schellenberg et al., 2006).*

Negli esperimenti il materiale assorbente è racchiuso in reti metalliche Tecco per limitare l'espansione laterale del materiale assorbente che è trattenuto all'interno di queste reti anche grazie a uno strato di geotessuto (*Figura 4.16*).



Figura 4.16: Foto raffigurante le modalità d'uso del materiale utilizzato negli esperimenti con strato assorbente (Schellenberg et al., 2006).

In Figura 4.17 vengono riportati i risultati degli esperimenti condotti in Schellenberg et al. (2006).

Test results with sand (S1, S2), cellular glass (C1, C2, C3) and gravel (G1, G2)

			S1	S2	C1	C2	C3	G1	G2
Start position	H	[m]	2.00	2.00	2.00	2.00	1.50	2.00	2.00
Final position	$h_e$	[m]	0.26	0.24	0.20	0.15	0.13	0.21	0.18
Thickness of cushion layer	e	[m]	0.45	0.26	0.45	0.20	0.15	0.45	0.21
Free falling height	h	[m]	1.55	1.74	1.55	1.80	1.35	1.55	1.79
Impact velocity	v	[m/s]	5.5	5.8	5.5	5.9	5.1	5.5	5.9
Kinetic impact energy	$E_i$	[kJ]	12.5	14.1	12.5	14.6	10.9	12.5	14.5
Penetration depth	s	[m]	0.19	0.02	0.25	0.05	0.02	0.24	0.03
Impact time	t	[ms]	55.0	32.5	66.9	28.8	27.5	73.1	38.8
Maximum reaction forces	F	[kN]	233	491	213	374	424	236	615
Maximum boulder acceleration	$a_{s,max}$	[m/s <sup>2</sup> ]	236	421	227	410	478	232	563
Maximum slab acceleration	$a_{p,max}$	[m/s <sup>2</sup> ]	-26	-264	-57	-135	-180	-43	-277
Minimum slab acceleration	$a_{p,min}$	[m/s <sup>2</sup> ]	21	180	30	80	109	28	198
Total energy	E	[kJ]	14.1	14.2	14.6	15.0	11.1	14.5	14.7
Rebound height	$s_{rp}$	[m]	0.028	0.036	0.022	0.041	0.045	0.017	0.028
Rebound energy	$E_{rp}$	[kJ]	0.227	0.291	0.178	0.332	0.364	0.138	0.227
Energy dissipated	D	%	98.4%	98.0%	98.8%	97.8%	96.7%	99.1%	98.5%

Figura 4.17: Risultati degli esperimenti effettuati da Schellenberg et al., 2006.

La caduta del blocco è stata ripetuta due volte per la sabbia (S) e per la ghiaia (G) e tre volte per il vetro cellulare (C). Il materiale tra una caduta e l'altra non è stato rimaneggiato. Come è possibile vedere dai grafici in Figura 4.18 il picco di accelerazione del blocco nel primo impatto viene raggiunto al termine del tempo di impatto sia per la sabbia che per il vetro cellulare. Invece, nel secondo impatto solo il vetro cellulare mantiene in picco alla fine mentre per la sabbia il picco viene anticipato all' inizio dell' impatto.

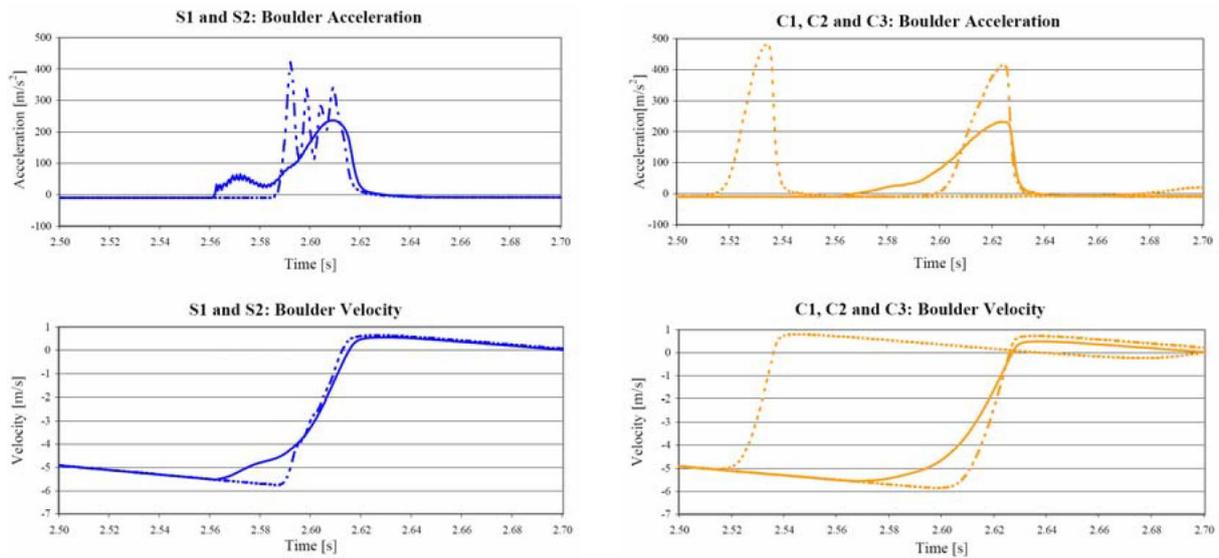


Figura 4.18: Grafici dell' accelerazione e della velocità del blocco negli impatti su sabbia e vetro cellulare (Schellenberg et al., 2006).

Il comportamento del vetro cellulare, specialmente nel primo impatto, è molto simile a quello della ghiaia. Tuttavia, la bassa densità del vetro cellulare (appena  $250 \text{ kg/m}^3$ ) rende possibile una grande riduzione del peso proprio dello strato assorbente permettendo di realizzare strati più potenti e migliorare molto l'assorbimento dell' impatto (Schellenberg et al., 2006).

Negli esperimenti effettuati in sito dal Politecnico di Milano, presso il campus Bovisa, e riportati in Calvetti et al. (2005) e in Calvetti & Prisco (2007) si è utilizzato per lo strato assorbente del materiale inerte con una granulometria massima pari a 10 millimetri. Il materiale a seguito di ogni impatto è stato rimaneggiato per circa metà del suo spessore pari a due metri (tranne che per le prove n.10 e n.11 dove non si è rimaneggiato per valutare l'effetto della compattazione).

Il blocco da 825 kg è stato fatto cadere da diverse altezze, come riportato in *Tabella 4.6*, utilizzando la struttura riportata in *Figura 4.19* il blocco non viene fatto cadere su di una soletta come negli esperimenti precedenti ma all' interno di una vasca in CLS di forma circolare e di raggio pari a 5.35 metri. Al fondo di essa sono state posizionate otto celle di carico per rilevare gli sforzi. All'interno del blocco nel centro di gravità sono stati installati due accelerometri in modo da poter rilevare le accelerazioni lungo tutti e tre gli assi principali della sfera.



Figura 4.19: Struttura per il sollevamento del blocco utilizzata negli esperimenti del Politecnico di Milano (Calvetti & Prisco, 2007).

Tabella 4.6: Prove effettuate dal Politecnico di Milano (Calvetti & Prisco, 2007).

Prova	Altezza caduta [m]	Energia impatto [kJ]
6	5	41.7
7	10	83.4
8	13.7	114.2
9	18.45	153.8
10 Materiale non rimaneggiato	10	83.4
11 Materiale non rimaneggiato	10	83.4

I risultati ottenuti da queste prove presentano una peculiarità: la curva di accelerazione del blocco presenta due picchi. Questo descritto da Calvetti & Prisco (2007) è probabilmente dovuto a una riflessione dell'onda di impatto dalla soletta. Siccome il tempo di impatto è piuttosto elevato (comparato per esempio agli esperimenti del Politecnico di Losanna) l'onda ha il tempo necessario per raggiungere nuovamente il blocco e causare un aumento di accelerazione che provoca il secondo picco riportato nel grafico in *Figura 4.20*.

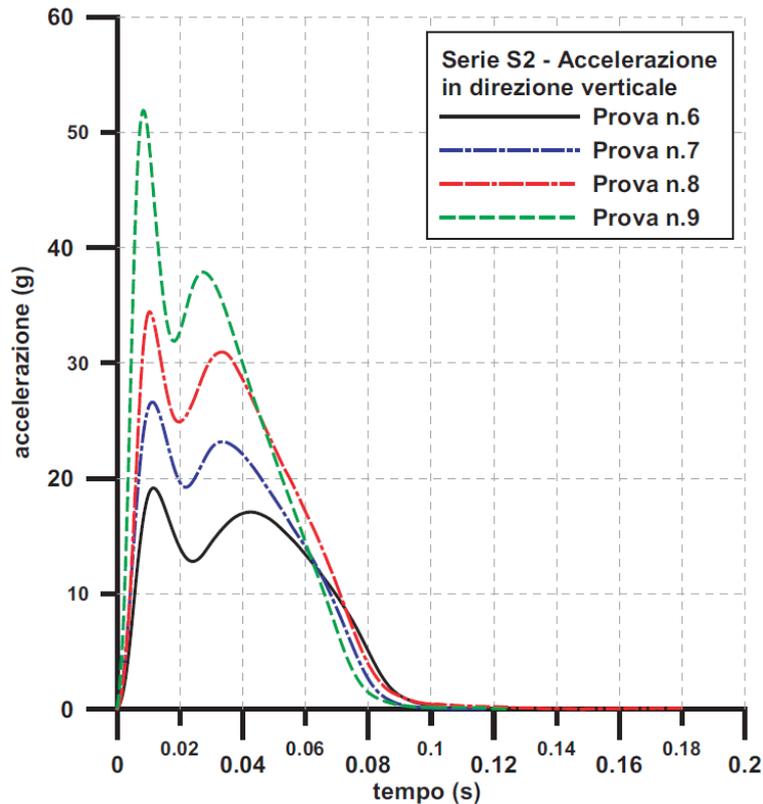


Figura 4.20: Accelerazione del blocco ricavata nelle prove n.6, n.7, n.8 e n.9 del Politecnico di Milano (Calvetti & Prisco, 2007).

Nelle prove n.10 e n.11 si è valutato l'effetto della compattazione facendo cadere il blocco da un'altezza di 10 metri ma senza andare a rimaneggiare il materiale a seguito dell'impatto. Come è possibile vedere dal grafico in *Figura 4.21* la compattazione dello strato assorbente dovuta all'impatto causa una forte perdita della sua caratteristica dissipativa; Gli impatti riducono drasticamente la durata e l'accelerazione massima del blocco aumenta in modo rilevante. La riduzione del tempo di impatto fa sì che il blocco si arresti prima che la riflessione dell'onda lo raggiunga, infatti, l'accelerazione non presenta un secondo picco nelle prove n.10 e n.11.

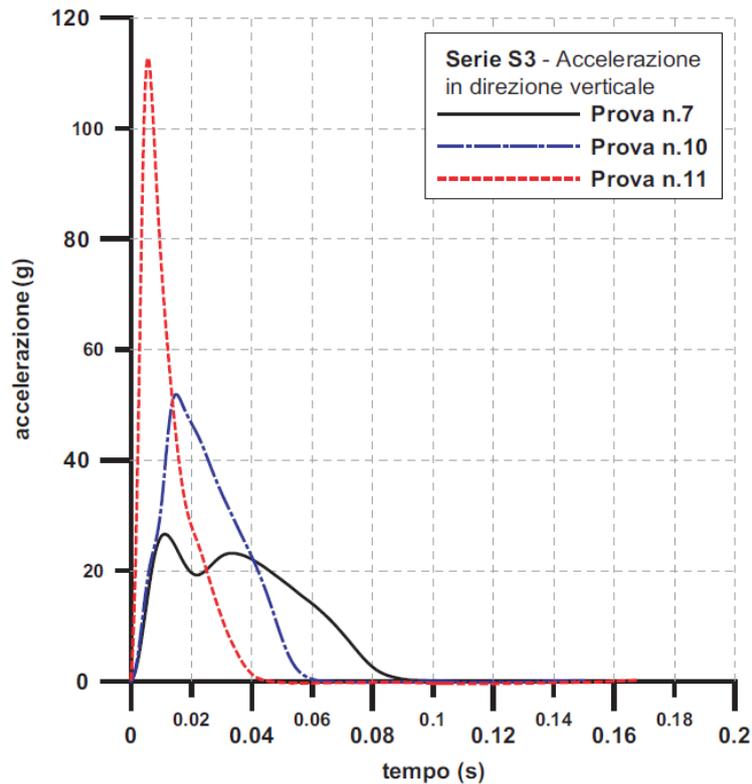


Figura 4.21: Accelerazione del blocco ricavata nelle prove n.10 e n.11 del Politecnico di Milano (Calvetti &Prisco, 2007).

Un'altra analisi sperimentale molto interessante e con risultati chiari è quella condotta da Meng et al. (2022). In questi esperimenti si vanno ad analizzare le risposte date da uno strato assorbente composto di sabbia e geogriglie valutando diverse disposizioni di quest'ultime. In *Tabella 4.7* viene riportato lo schema delle prove con il numero di geogriglie e la loro posizione all'interno dello strato di sabbia di spessore pari a 15 centimetri.

Tabella 4.7: Schema relativo ai test effettuati da Meng et al. (2022).

Test	Rinforzo con geogriglia	Numero di geogriglie	Altezza delle geogriglie rispetto allo spessore dello strato partendo dal basso
U	NO	0	-
G1	SI	1	Un quarto dell' altezza
G2	SI	1	Un terzo dell' altezza
G3	SI	1	A metà dello strato
G4	SI	2	Una a un terzo e l'altra a due terzi dell' altezza
G5	SI	3	Una a un quarto, una a metà e una a un terzo dell' altezza

Il blocco di prova del peso di 9.5 kg è stato fatto cadere da tre altezze diverse: 0.5, 1 e 1.5 metri. Le prove sono state effettuate in laboratorio e le dimensioni del modello, come è possibile vedere dallo schema in *Figura 4.22*, sono molto piccole rispetto a quelle di una galleria

paramassi. Questi esperimenti in scala ridotta però possono comunque dare ottime informazioni riguardanti il comportamento dello strato assorbente e la forza dinamica generata dall'impatto.

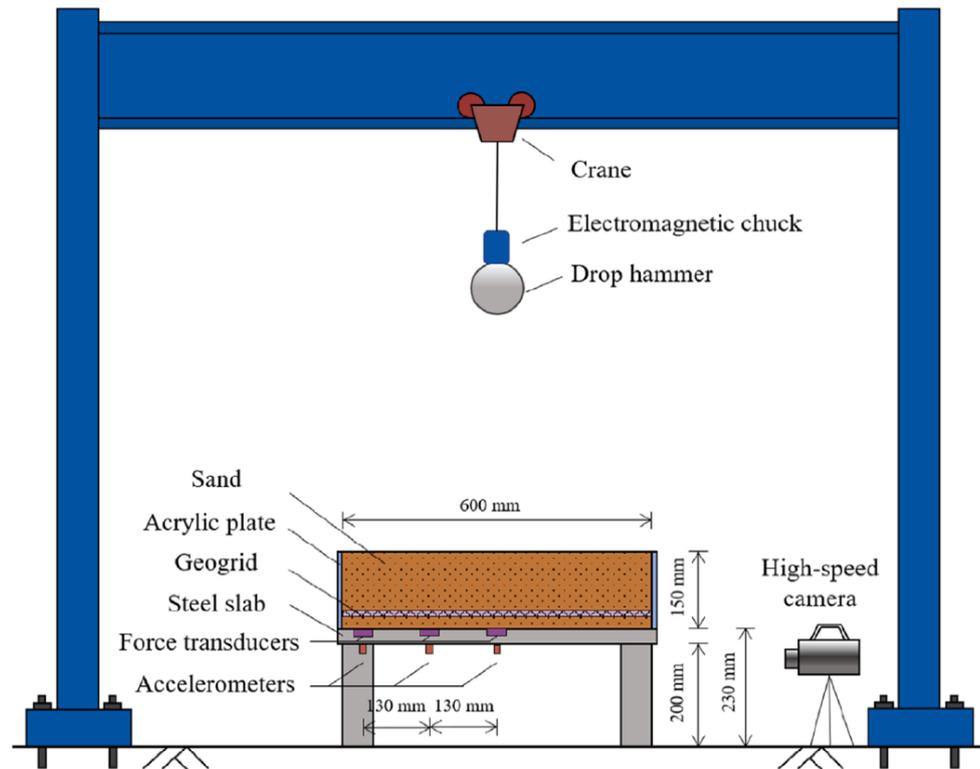


Figura 4.22: Schema utilizzato negli esperimenti di laboratorio condotti da Meng et al., 2022.

Andando ad analizzare gli sforzi verticali al centro della soletta Meng et al. (2022) hanno ricavato il grafico in Figura 4.23, dove è possibile notare che nei test G1 e G2 l'utilizzo di geogriglie è favorevole rispetto all'impiego unicamente della sabbia. Allo stesso tempo un utilizzo sbagliato delle geogriglie rende lo strato assorbente troppo rigido andando a peggiorare l'assorbimento. La condizione migliore è la G2.

Questo comportamento è stato rilevato anche nei test con altezze di caduta maggiori, in Figura 4.24 viene riportato un istogramma riepilogativo di tutti i test effettuati andando a indicare il valore massimo raggiunto dalla forza di impatto (Meng et al., 2022).

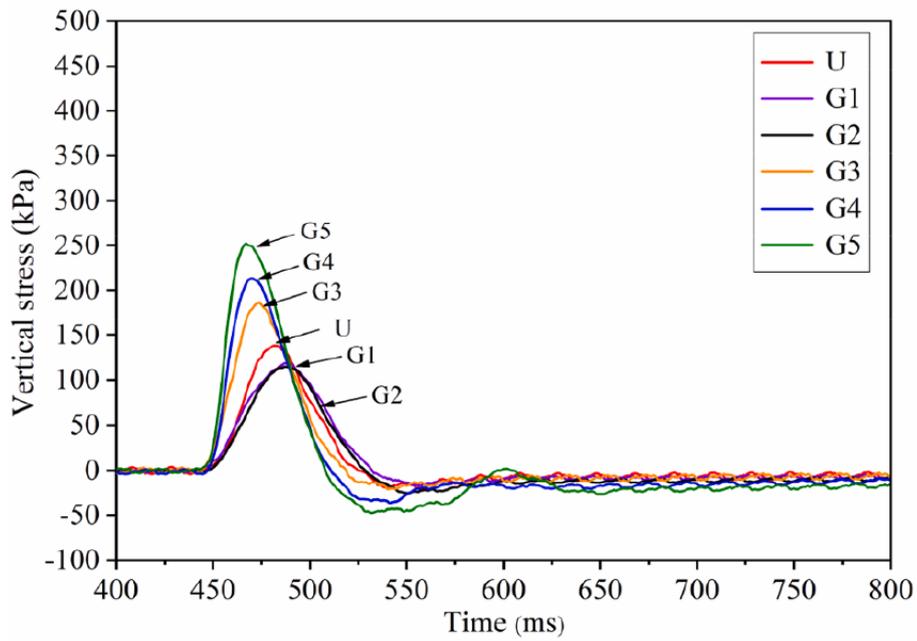


Figura 4.23: Grafico rappresentante gli sforzi verticali al centro della soletta con caduta da 0.5 metri (Meng et al., 2022).

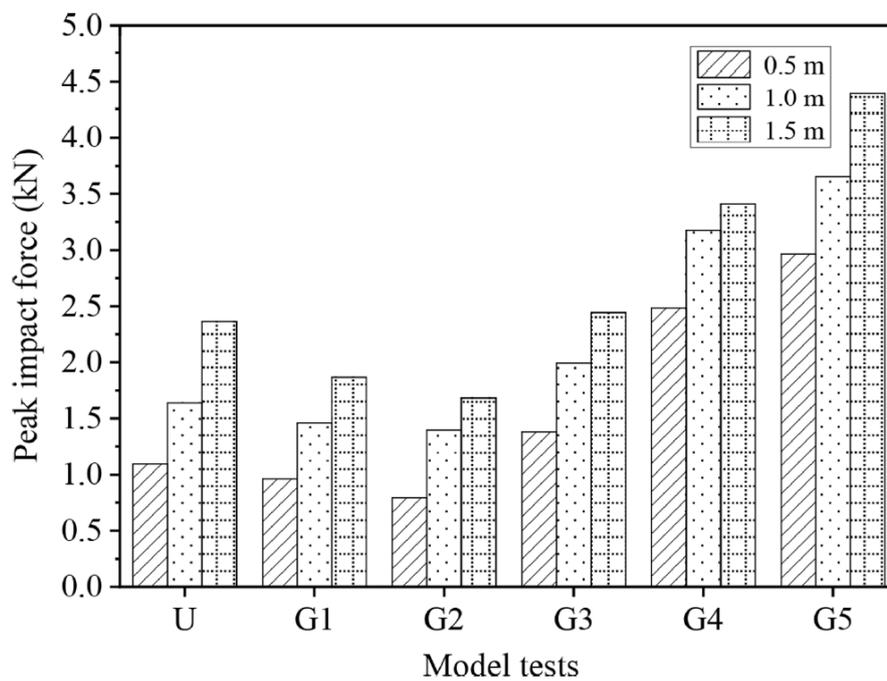


Figura 4.24: Istogramma relativo ai massimi raggiunti dalla forza di impatto per i diversi test (Meng et al., 2022).

## 4.2.2 Modellazione numerica

Si andranno ora ad analizzare alcuni studi effettuati con modellazione numerica degli impatti su modelli paragonabili a una galleria paramassi, ovvero soletta più strato assorbente. Le modellazioni numeriche se ben calibrate possono restituire informazioni molto importanti per la comprensione delle dinamiche di impatto. Infatti, è possibile simulare cadute da grandi altezze e con masse importanti valutando così impatti con energie molto elevate che sarebbero molto complicati da effettuare attraverso esperimenti reali. Tuttavia, è necessario sempre esaminare al meglio i risultati per capire se questi sono fisicamente realistici e se restituiscono un risultato corretto e paragonabile a quello che avverrebbe nella realtà.

### 4.2.2.1 Simulazioni agli elementi distinti (DEM)

Un primo metodo utilizzato per l'analisi numerica degli impatti è quello agli elementi distinti (DEM). In pratica questi modelli sono costituiti da molti elementi che vanno a simulare lo strato assorbente che viene quindi discretizzato in particelle simulando al meglio la realtà. Le particelle hanno quindi la possibilità di muoversi indipendentemente l'una rispetto all'altra andando così a simulare le deformazioni del materiale assorbente.

Gli esperimenti effettuati dal Politecnico di Milano, trattati precedentemente, sono stati utilizzati in Calvetti et al. (2005) per la calibrazione di un modello DEM dove i due metri di strato assorbente vengono sostituiti nel modello da 10'000 sfere con diametro variabile tra 0.1 e 0.3 metri. La granulometria è maggiore rispetto a quella degli esperimenti dove la dimensione massima dei grani era di 0.1 metri. Questa semplificazione è dovuta alla necessità di ridurre il tempo computazionale delle simulazioni ottenendo comunque dei risultati ottimi validati dalla back analysis. Anche la vasca invece di essere di forma circolare è composta da una quadrato di lato 11 metri (Figura 4.25).

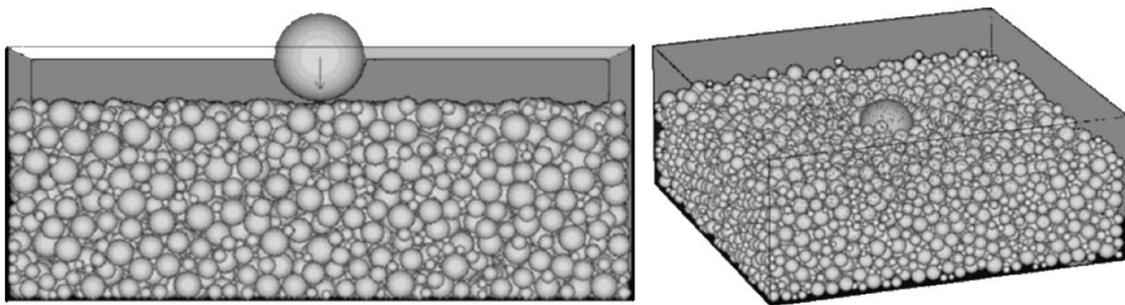


Figura 4.25: Modello DEM utilizzato nella simulazione numerica di Calvetti et al.(2005).

Nelle simulazioni numeriche si sono variati alcuni parametri al fine di osservare come cambiano le sollecitazioni a seguito dell' impatto. I parametri soggetti a variazione sono stati:

- variazione altezza di caduta con blocco da 850 kg (Figura 4.26);
- variazione altezza di caduta con blocco da 5'000 kg (Figura 4.27);
- variazione massa del blocco con caduta da 20 metri (Figura 4.28);
- variazione di massa e altezza di caduta del blocco mantenendo l'energia di impatto costante e pari a 1'000 kJ (Figura 4.29);

- variazione dello spessore dello strato con massa del blocco di 850 kg e altezza di caduta di pari a 20 metri (Figura 4.30).

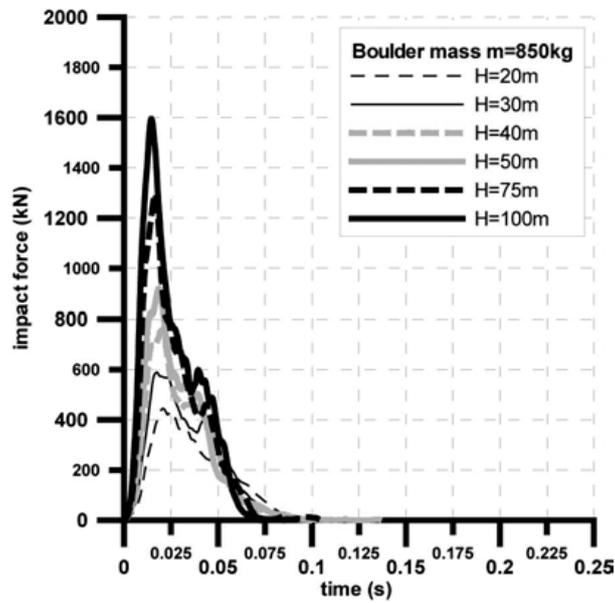


Figura 4.26: Grafico variazione altezza di caduta con blocco da 850 kg (Calveti et al., 2005).

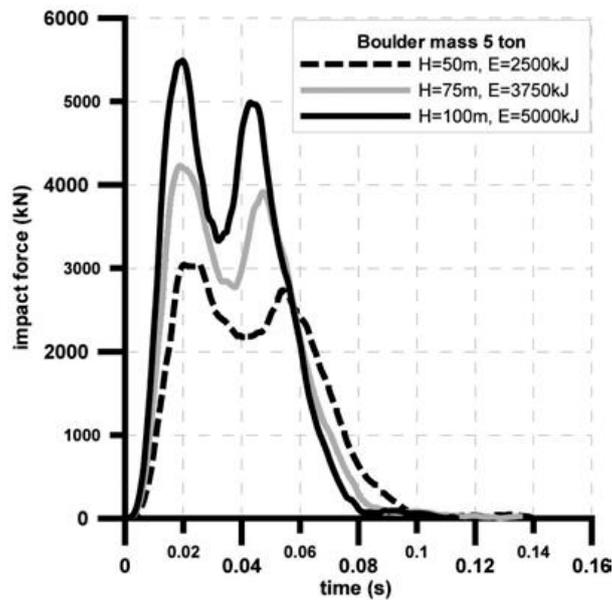


Figura 4.27: Grafico variazione altezza di caduta con blocco da 5 ton (Calveti et al., 2005).

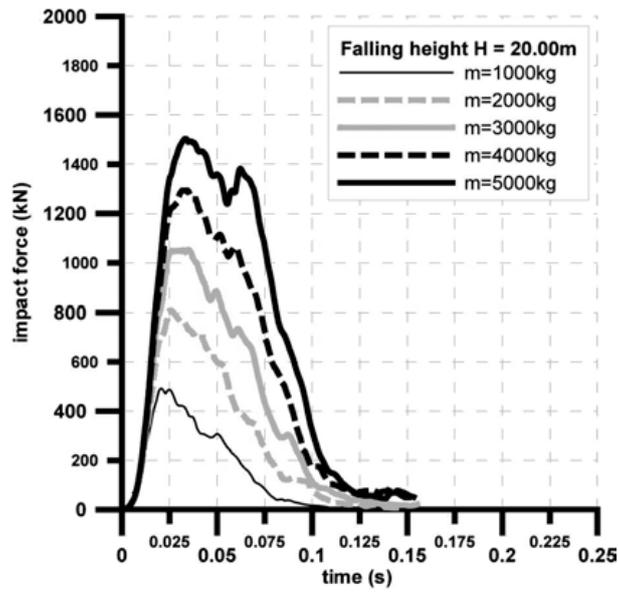


Figura 4.28: Grafico variazione della massa del blocco con altezza di caduta paria a 20 metri (Calvetti et al., 2005).

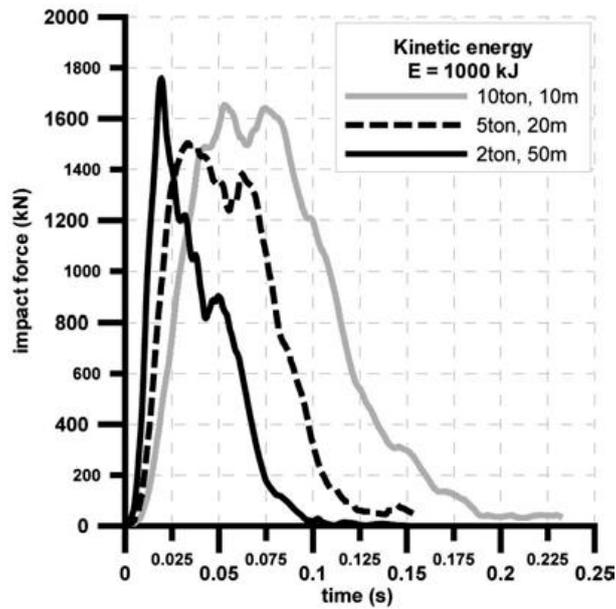


Figura 4.29: Grafico variazione massa e altezza con energia costante di 1'000 kJ (Calvetti et al., 2005).

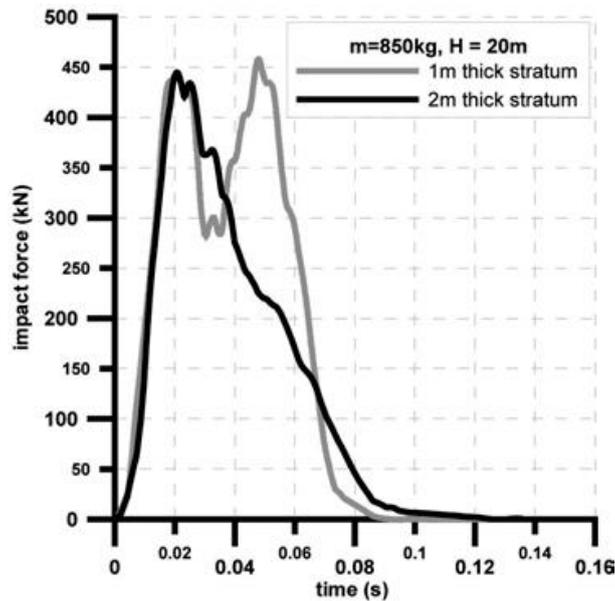


Figura 4.30: Grafico variazione dello spessore dello strato con massa 850 kg e altezza 20 metri (Calveti et al., 2005).

A seguito delle simulazione effettuate Calveti et al. (2005) affermano che:

- il picco della forza di impatto dipende esclusivamente dall'energia di quest'ultimo e non dallo spessore dello strato assorbente a meno che questo non risulti essere di spessore troppo ridotto;
- la distribuzione del carico, dato dall' impatto, sulla soletta dipende fortemente dallo spessore dello strato. Il valore di picco dello sforzo sulla soletta dipende linearmente dal massimo della forza di impatto;
- la riduzione dello spessore dello strato fa sì che la forza di impatto abbia la caratteristica forma con due picchi data dalla riflessione dell'onda di impatto (Figura 4.30);
- per impatti con la stessa energia (Figura 4.29) una diminuzione della massa causa la diminuzione del tempo di impatto.

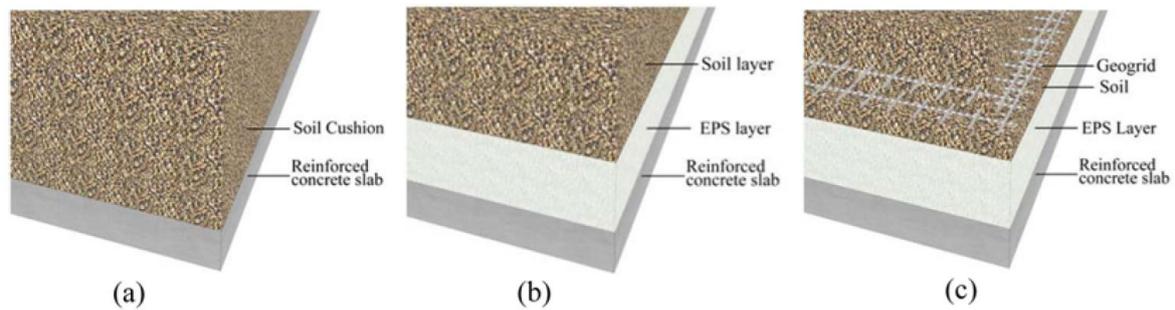
#### 4.2.2.2 Simulazioni agli elementi finiti (FEM)

Un altro tipo di metodo per le simulazioni consiste nell' utilizzo di un modello agli elementi finiti (FEM). In questo caso il modello viene suddiviso in elementi più piccoli, questi però sono continui e non discretizzati come avviene nei DEM. Definendo gli elementi in cui è suddiviso il modello vengono stabiliti i nodi su cui dovrà essere risolta numericamente la simulazione risolvendo delle equazioni differenziali.

Con il metodo agli elementi finiti lo strato assorbente viene simulato come un continuo e, durante l'impatto, possono insorgere alcune problematiche in quanto vanno ad interagire due elementi (blocco e strato assorbente) con caratteristiche meccaniche molto diverse (rispettivamente rigido e deformabile). Questa piccola complicazione non sussiste invece per le simulazioni DEM in quanto la differenza tra blocco e strato consiste unicamente nella dimensione degli oggetti che interagiscono (il blocco di forma sferica impatta su sfere di dimensione nettamente inferiore che tenderanno a muoversi simulando le deformazioni dello strato) (Calveti & Prisco, 2007).

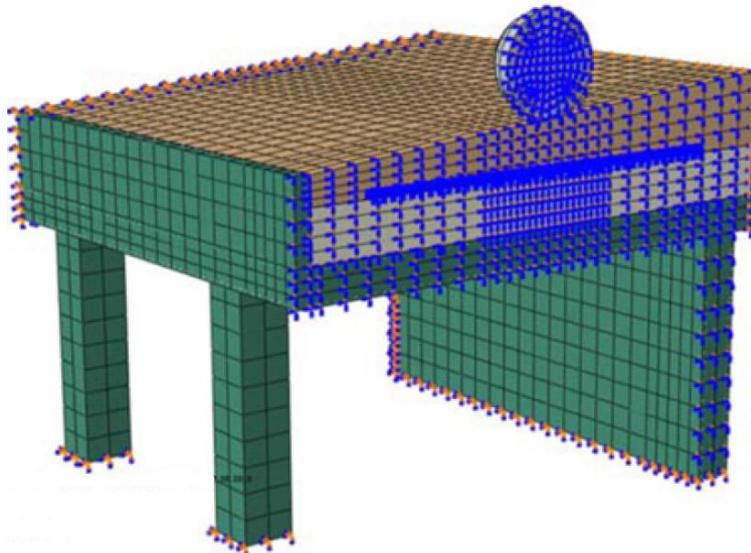
Una delle simulazioni FEM più dettagliate rinvenute in bibliografia è quella eseguita da Ouyang et al. (2019) dove viene analizzato l'assorbimento degli impatti da tre tipi diversi di strato assorbente (*Figura 4.31*):

- sabbia (a);
- sabbia e EPS (b);
- sabbia EPS e geogriglie (c);



*Figura 4.31: Visualizzazione dei tre diversi tipi di strato assorbente utilizzati nelle simulazioni di Ouyang et al. (2018).*

Il modello utilizzato, realizzato con il software ABAQUS, simula un'intera sezione di galleria e non solo una soletta come si è visto negli altri esperimenti e simulazioni (*Figura 4.32*).

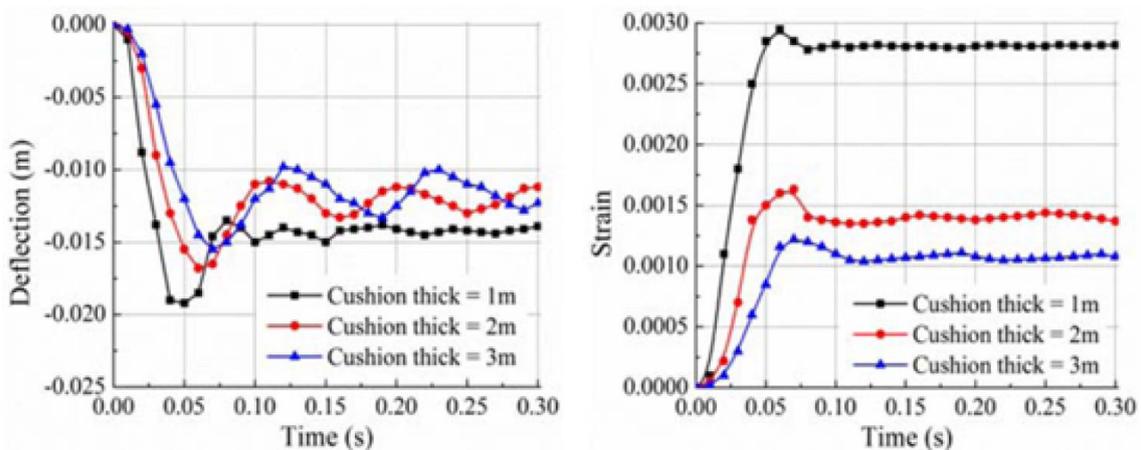


*Figura 4.32: Rappresentazione del modello utilizzato da Ouyang et al. (2019).*

Il blocco utilizzato nelle simulazioni ha raggio pari ad 1 metro e viene fatto impattare sulla galleria con un'energia di 2'000 kJ.

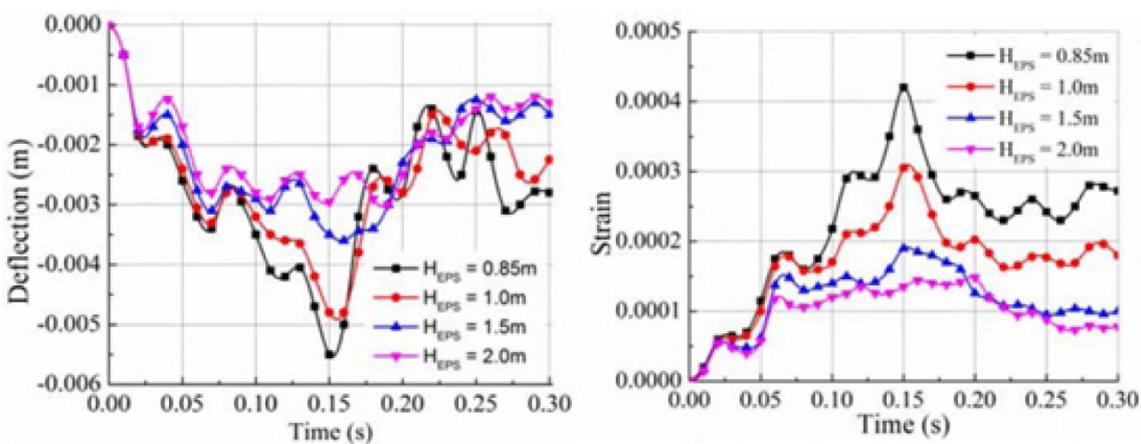
In primis le simulazioni sono state fatte con la configurazione “a” (sabbia) andando a variare lo spessore dello strato, i risultati ottenuti dimostrano che aumentando lo spessore le sollecitazioni sulla soletta diminuiscono. Tuttavia, il miglioramento è asintotico, infatti, come è possibile

vedere in *Figura 4.33* da due a tre metri di spessore non vi è un grande vantaggio dissipativo, a fronte dell'aumento dei carichi dovuti al peso proprio dello strato.



*Figura 4.33: Deformazioni della soletta con diversi spessori di sabbia configurazione "a" (Ouyang et al., 2019).*

Nella configurazione “b” (sabbia-EPS) si è tenuto fisso lo spessore della sabbia a un metro facendo variare lo spessore dell’EPS. Le sollecitazioni sono notevolmente inferiori rispetto all’impiego della sola sabbia. Anche in questo caso non è produttivo e aumentare eccessivamente lo spessore di EPS (*Figura 4.34*).



*Figura 4.34: Deformazioni della soletta con diversi spessori di EPS configurazione "b" (Ouyang et al., 2019).*

Nella configurazione “c” (sabbia + geogriglie-EPS), con uno spessore di un metro sia per la sabbia che per l’EPS, le sollecitazioni diminuiscono ulteriormente, specialmente la forza di impatto diminuisce all’aumentare del numero di geogriglie come è possibile vedere in (*Figura 4.35*).

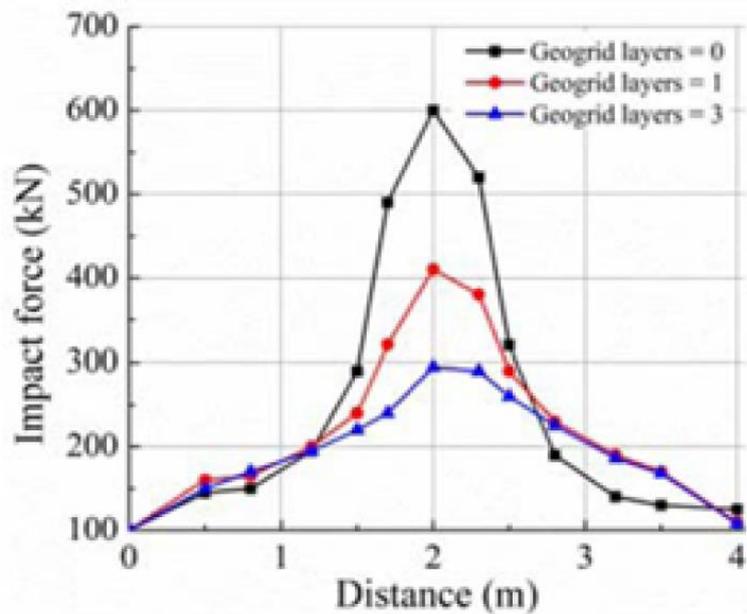


Figura 4.35: Forza di impatto al variare del numero di geogriglie (Ouyang et al., 2019).

Nelle simulazioni di Ouyang et al. (2019) si sono anche valutate le sollecitazioni al variare del tipo di geogriglia. I risultati ottenuti affermano che all' aumentare della resistenza della geogriglia diminuiscono le sollecitazioni. Nel grafico in Figura 4.36 vengono riportati i risultati ottenuti con tre geogriglie differenti con resistenza di 15 kN/m, 30 kN/m e 45 kN/m.

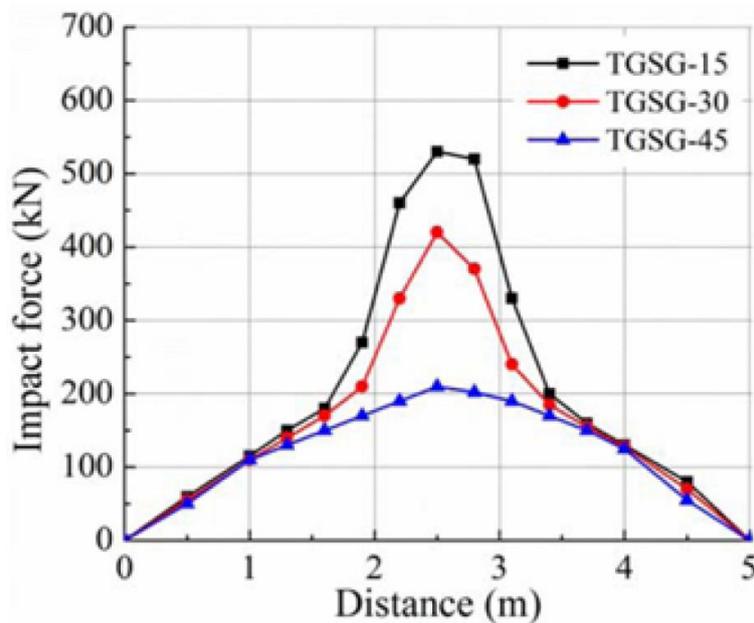
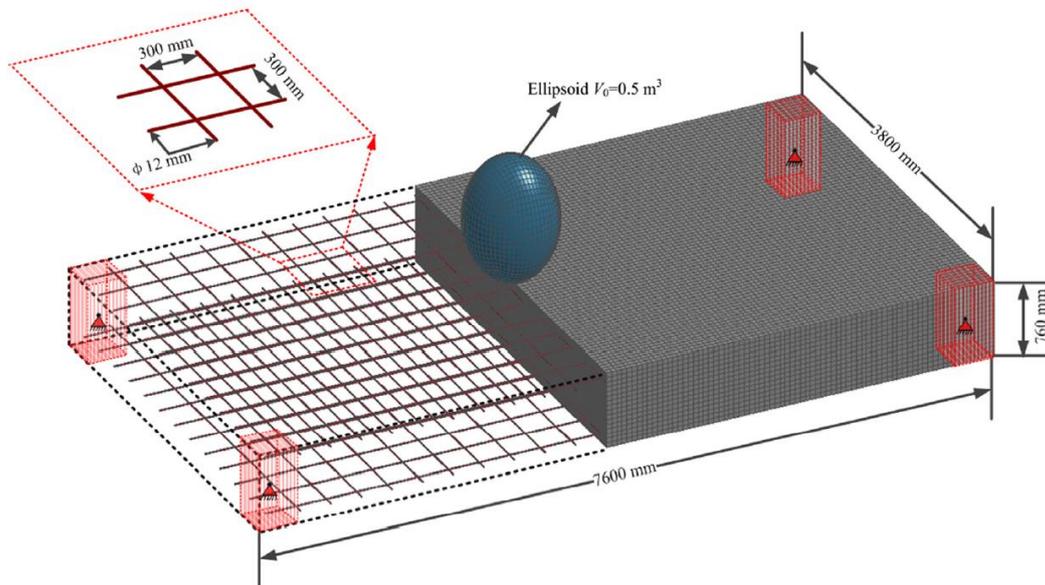


Figura 4.36: Forza di impatto al variare del tipo di geogriglia (Ouyang et al., 2019).

Altre simulazioni numeriche effettuate con modelli agli elementi finiti hanno avuto in oggetto l'analisi dell'influenza della forma del blocco (Yan et al., (2018)).

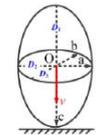
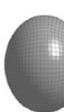
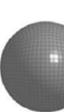
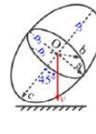
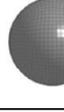
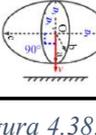
In queste simulazioni si è studiato come influisce la forma del blocco e l'angolo dell' impatto. In questo studio non si è inserito uno strato di materiale assorbente ma il blocco va a impattare

direttamente su una soletta in calcestruzzo armato dello spessore di 76 centimetri, il modello utilizzato è mostrato in *Figura 4.37*. Il blocco in tutte le prove ha la stessa massa pari a 1358 kg con una densità di  $2700 \text{ kg/m}^3$ . Si sono testate diverse velocità di impatto che variano dai 15 ai 37 m/s.



*Figura 4.37: Modello utilizzato nelle simulazioni numeriche effettuate da Yan et al. 2018.*

Durante le simulazioni si sono testati impatti variando l'eccentricità del blocco e l'angolo tra l'asse maggiore e la direzione di impatto (perpendicolare alla soletta). I casi oggetto di studio vengono riportati in *Figura 4.38*.

Sphericity	$S_p = 0.6$	$S_p = 0.7$	$S_p = 0.8$	$S_p = 0.9$	$S_p = 1.0$
$D_1/m$	0.82	0.70	0.62	0.54	0.50
$D_{23}=D_3/m$	0.38	0.41	0.44	0.47	0.50
Cases	0.6-0	0.7-0	0.8-0	0.9-0	1.0
					
Cases	0.6-45	0.7-45	0.8-45	0.9-45	1.0
					
Cases	0.6-90	0.7-90	0.8-90	0.9-90	1.0
					

*Figura 4.38: Casi oggetto di studio nelle simulazioni di Yan et al. (2018).*

Analizzando la forza di impatto Yan et al. (2018) affermano che nel caso in cui la direzione dell' impatto sia parallela o ruotata di  $45^\circ$  rispetto all'asse maggiore dell'ellisse (Figura 4.39 e Figura 4.40) la forza di impatto cresce al crescere della sfericit  mentre nel caso in cui l' impatto avvenga con direzione perpendicolare all' asse maggiore l'entit  dell' impatto cresce al diminuire della sfericit  (Figura 4.41). Questi risultati rivelano come   importante valutare anche la possibile forma dei blocchi che vanno a impattare sulle gallerie paramassi.

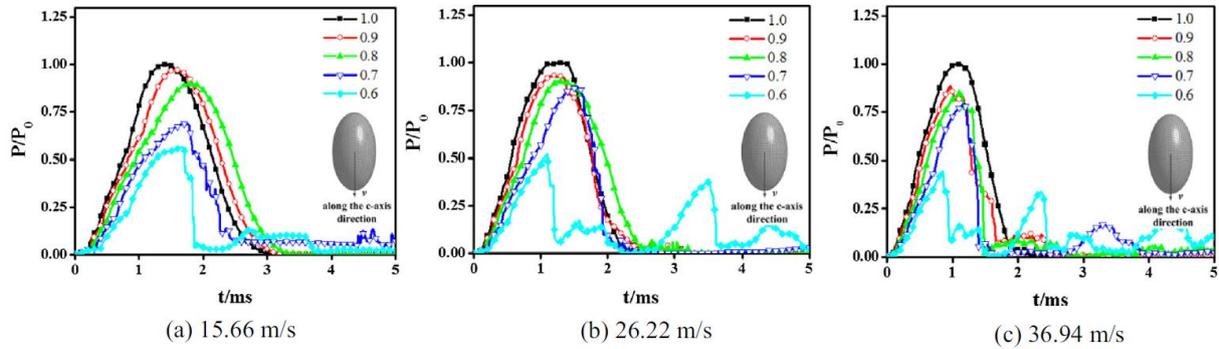


Figura 4.39: Grafici della forza di impatto adimensionalizzata con direzione impatto pari a zero gradi (Yan et al., 2018).

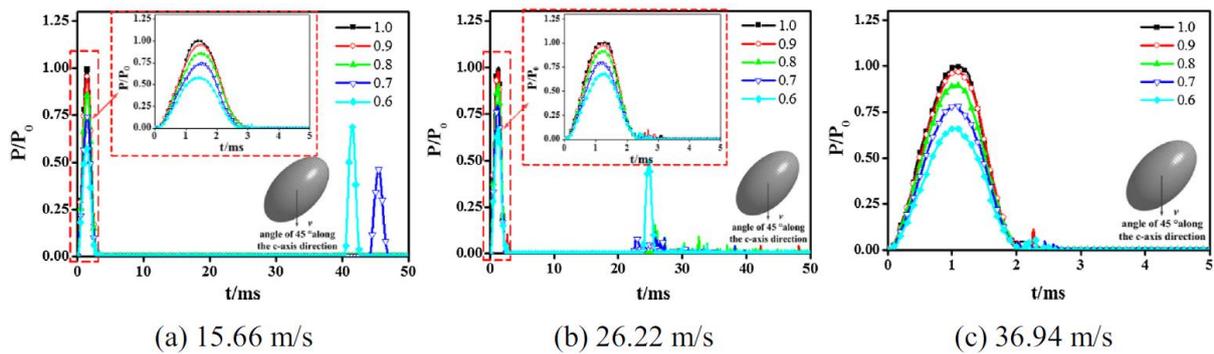


Figura 4.40: Grafici della forza di impatto adimensionalizzata con direzione impatto pari a 45 gradi (Yan et al., 2018).

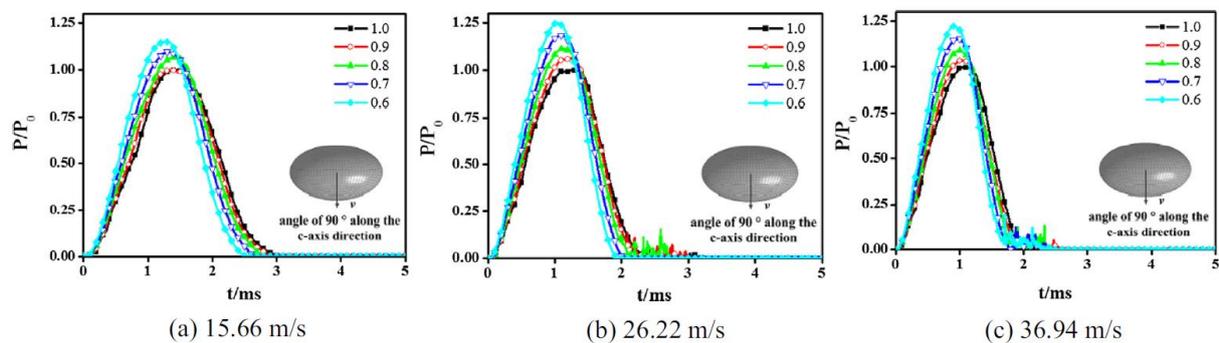


Figura 4.41: Grafici della forza di impatto adimensionalizzata con direzione impatto pari a 90 gradi (Yan et al., 2018).

### 4.2.3 Conclusioni e analisi comparativa

L'analisi bibliografica ha voluto dare un inquadramento generale agli studi tutt'oggi effettuati sull'analisi della caduta di blocchi sulle gallerie paramassi, valutandone unicamente alcuni punti salienti e argomentazioni principali.

Come ci si poteva aspettare tutti gli esperimenti e modellazioni affermano che le variabili che più influenzano le azioni sulle gallerie sono la velocità e la massa del blocco ovvero, unendo le due variabili, l'energia di impatto.

Il dimensionamento dello spessore dello strato assorbente è fondamentale. Infatti, Montani et al. (2004) afferma che diminuendo lo spessore le sollecitazioni sulla soletta aumentano. Questo argomento viene anche ripreso da Ouyang et al. (2019) che conferma questa teoria aggiungendo però che il beneficio dato da un aumento di spessore dello strato è asintotico. È necessario quindi per una corretta progettazione valutare il beneficio visto sottoforma di dissipazione dell'impatto in rapporto ai costi valutati come il peso proprio dato dallo strato assorbente.

L'utilizzo di materiali innovativi come il vetro cellulare (Schellenberg et al., 2006) o l'EPS (Ouyang et al., 2019) possono aumentare nettamente l'efficienza di assorbimento specialmente a fronte di una ridotta densità del materiale.

Per quanto riguarda l'utilizzo delle geogriglie tra gli esperimenti effettuati da (Meng et al., 2022) e le simulazioni numeriche eseguite da (Ouyang et al., 2019) vi sono alcune discordanze. Infatti, negli esperimenti al crescere del numero delle geogriglie, l'aumento della rigidità dello strato di sabbia tendeva a ridurre l'effetto dissipativo dello strato, invece, nelle simulazioni avveniva l'opposto. Tuttavia, le condizioni al contorno dei due casi risultano essere differenti sia come livelli energetici degli impatti (negli esperimenti le energie in gioco sono nettamente inferiori) sia come composizione dello strato assorbente in quanto nelle simulazioni numeriche, oltre del materiale granulare, è presente uno di EPS.

Sia negli esperimenti che nelle modellazioni per tempi di impatto prolungati o spessori dello strato assorbente esigui si hanno forze di impatto caratterizzate da due picchi massimi.

Nel momento in cui si va a progettare una galleria paramassi è necessario tenere conto di tutte le possibili condizioni facendo riferimento in primis alle norme che danno un ottimo punto di partenza in assenza di studi specifici. Tuttavia, è altrettanto importante prendere in considerazione argomentazioni come quelle trattate negli articoli analizzati in questa tesi in modo da poter valutare se, per la progettazione in oggetto, è conveniente effettuare studi specifici come esperimenti e analisi numeriche.

## 5 Modellazione della dinamica d'impatto

In questo capitolo si andrà ad effettuare, tramite simulazioni con modello numerico agli elementi finiti (FEM), uno studio di sensibilità andando a variare sia le geometrie del modello che i parametri di impatto verificando come variano le azioni agenti sulla galleria al variare di questi parametri.

Ci si concentrerà su un unico materiale granulare costituente lo strato assorbente ovvero i detriti di roccia in quanto questo tipo di materiale è molto diffuso in Italia. Per ottenere i parametri meccanici del materiale che compone lo strato assorbente è necessario eseguire una back analysis simulando un esperimento reale e variando i parametri fino all'ottenimento della miglior corrispondenza tra modello numerico e realtà.

Il modello andrà a simulare una porzione di galleria come è stato fatto anche in molti esperimenti e modellazioni viste in precedenza. I risultati di questo studio di sensibilità possono fornire alcune indicazioni utili per la progettazione delle gallerie paramassi andando a evidenziare le caratteristiche che più influenzano il corretto funzionamento della struttura.

### 5.1 Analisi FEM mediante Abaqus

Per effettuare questo studio si è utilizzato il software ABAQUS/CAE, questo potente strumento di calcolo permette di realizzare modelli di ogni genere e sottoporli ad analisi agli elementi finiti (FEM). Il metodo consiste nel suddividere un modello di grandi dimensioni in parti più piccole dette appunto elementi finiti.

La generazione di questa mesh composta dai diversi elementi deve essere quanto più fitta possibile per poter ottenere un risultato accurato. Ovviamente più è grande il numero di elementi e più il tempo computazionale delle simulazioni cresce, per questo motivo è necessario infittire la mesh unicamente nei punti in cui è necessario un grande dettaglio ed ingrandire gli elementi dove non è richiesta grande precisione, in questo modo è possibile ottimizzare al meglio le simulazioni. Il programma va quindi a risolvere una serie di equazioni algebriche e differenziali andando a risolvere il sistema minimizzando gli errori.

Nel programma una volta definita la forma del modello da analizzare è necessario scegliere i materiali di cui è composto inserendo come input tutte le caratteristiche fisiche di quest'ultimo. In più vanno definite le varie condizioni al contorno come campo gravitazionale, velocità iniziali degli elementi, vincoli, forze e molte altre. Questa grande possibilità di personalizzazione delle condizioni al contorno rende il modello molto flessibile e adattabile ad ogni situazione fisica reale.

## 5.2 Scelta dei dati di input e Back analysis

Come detto in precedenza, per poter effettuare l'analisi di sensibilità è necessario prima eseguire una back analysis per risalire ai parametri del terreno che simulano al meglio la realtà. Per l'analisi a ritroso si è scelto di partire dagli esperimenti eseguiti dal Politecnico Federale di Losanna trattati ampiamente nel *paragrafo 4.2.1.1* andando a realizzare un modello in ABAQUS che rappresentasse quello utilizzato negli esperimenti. La descrizione del modello realizzato seguirà l'ordine con cui il programma richiede l'inserimento dei dati in modo da riportare tutti i passaggi utili per la generazione delle simulazioni.

### 5.2.1 Geometria del modello e tipo di materiale

Le dimensioni del modello sono identiche a quello sperimentale, in pianta le dimensioni sono pari a quelle riportate in *Figura 4.11*, mentre gli spessori della soletta e dello strato sono rispettivamente 20 e 50 centimetri.

L'esperimento preso in considerazione per l'esecuzione della back analysis è stato quello rappresentato dalla combinazione di parametri indicati in *Tabella 5.1*, questa scelta è stata dettata dal fatto che, negli articoli, per questa combinazione di variabili, erano stati inseriti più grafici utili per un miglior confronto ed una migliore back analysis.

*Tabella 5.1: Condizioni dell'esperimento preso in considerazione per la back analysis*

<b>Tipo materiale strato assorbente</b>	Detriti di roccia
<b>Spessore dello strato assorbente [cm]</b>	50
<b>Altezza di caduta del blocco [m]</b>	10
<b>Raggio del blocco [cm]</b>	21
<b>Massa del blocco [kg]</b>	100

### 5.2.2 Proprietà meccaniche di base

Il modello generato in ABAQUS sarà di tipo elastoplastico, i parametri utilizzati per la caratterizzazione dei due materiali di cui è composto sono riportati in *Tabella 5.2*.

*Tabella 5.2: Parametri utilizzati per la definizione delle caratteristiche meccaniche del modello.*

	<b>Calcestruzzo armato</b>	<b>Detriti di roccia</b>
<b>Parametri legati alla massa</b>	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	
<b>Parametri elastici</b>	Modulo elastico [Pa]	
	Coefficiente di Poisson [-]	
<b>Parametri plastici</b>	Tensione di snervamento [Pa]	Angolo di attrito [°]
	Deformazione plastica [-]	Angolo di dilatanza [°]
	-	Coesione [Pa]
	-	Deformazione plastica [-]

Il modello costitutivo del CLS è definito dal modello elastico lineare isotropo ovvero il modello elastico meno complesso dove gli sforzi e le deformazioni sono legate dalla relazione indicata in *Figura 5.1*.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}$$

*Figura 5.1: Relazione tra sforzi e deformazioni nel modello elastico lineare isotropo utilizzato in ABAQUS (ABAQUS User's Manual).*

Dove G corrisponde al modulo di taglio e viene ricavato attraverso l'*equazione 5.1*.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu_p)} \quad 5.1$$

Per quanto riguarda la plasticità si è utilizzato il modello costitutivo standard implementato nel software dove viene richiesto l'inserimento della tensione di snervamento e della deformazione plastica legata a tale tensione. È possibile inserire più tensioni e deformazioni a seconda della forma della curva di snervamento del materiale. In questo caso si è inserito il primo valore in cui il CLS inizia ad avere deformazioni plastiche, questo valore in tutte le simulazioni non è mai stato raggiunto, e le deformazioni plastiche per questo materiale sono sempre state nulle. I valori dei parametri del calcestruzzo armato, riportati in *Tabella 5.3*, sono stati ricavati in letteratura e non sono stati fatti variare durante la back analysis.

*Tabella 5.3: Valori caratteristici del calcestruzzo armato inseriti nel modello ABAQUS.*

Parametro	Valore
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	2500
Modulo elastico [GPa]	32.5
Coefficiente di Poisson [-]	0.2
Tensione di snervamento [MPa]	30
Deformazione plastica [-]	0

Per i detriti di roccia componenti lo strato assorbente si è sempre utilizzato un modello elastico lineare isotropo come quello descritto in precedenza per il CLS. Invece, per la plasticità si è utilizzato il modello plastico di Mohr-Coulomb dove la resistenza al taglio ( $\tau$ ) è data dall'*equazione 5.2*.

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi \quad 5.2$$

Dove  $\sigma$  è lo sforzo che, secondo questa formula, a compressione viene considerato di segno positivo;  $\varphi$  è l'angolo di attrito e  $c$  è la coesione. La relazione può essere anche rappresentata in modo grafico (Figura 5.2) dove la retta di pendenza  $\tan\varphi$  rappresenta il valore di resistenza al taglio legato a un certo stato compressivo del materiale.

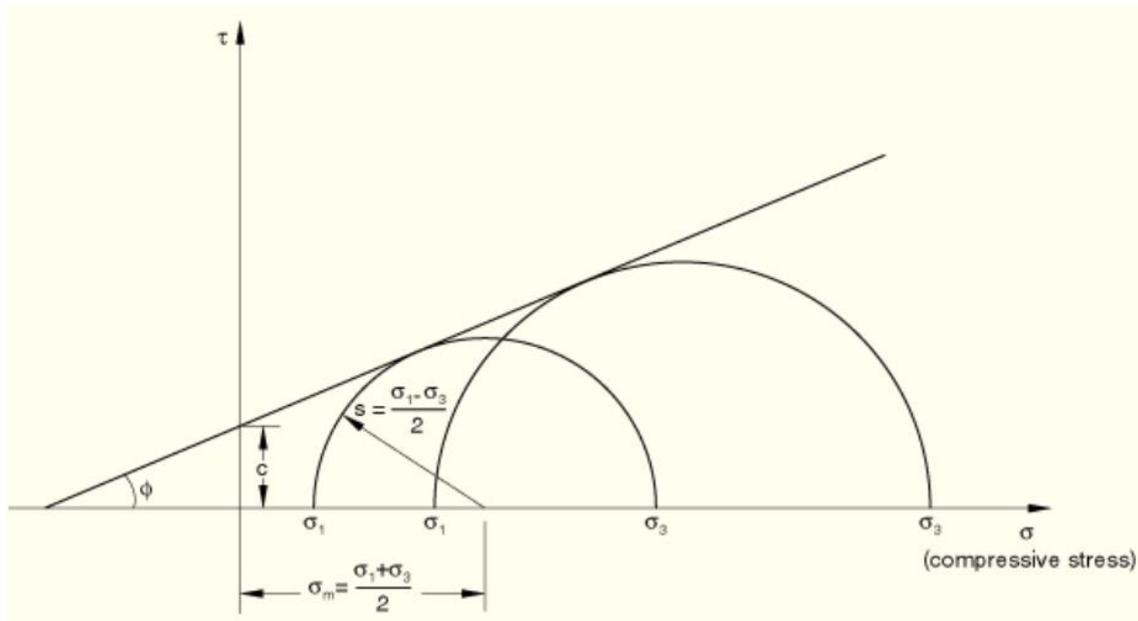


Figura 5.2: Rappresentazione grafica del modello Mohr-Coulomb (ABAQUS User's Manual).

Per quanto riguarda invece i valori dei parametri utilizzati per lo strato assorbente si è deciso di far variare, nella back analysis, l'angolo di attrito ed il modulo elastico in modo da poter variare sia il modello elastico che quello plastico utilizzando i due parametri fondamentali di questi due modelli. Con le diverse simulazioni si andrà a cercare la coppia di valori che meglio rappresenta le proprietà dello strato assorbente utilizzato negli esperimenti. I valori degli altri parametri che non sono stati soggetti a variazione e sono riportati in Tabella 5.4:

Tabella 5.4: Valori caratteristici dello strato assorbente inseriti nel modello ABAQUS

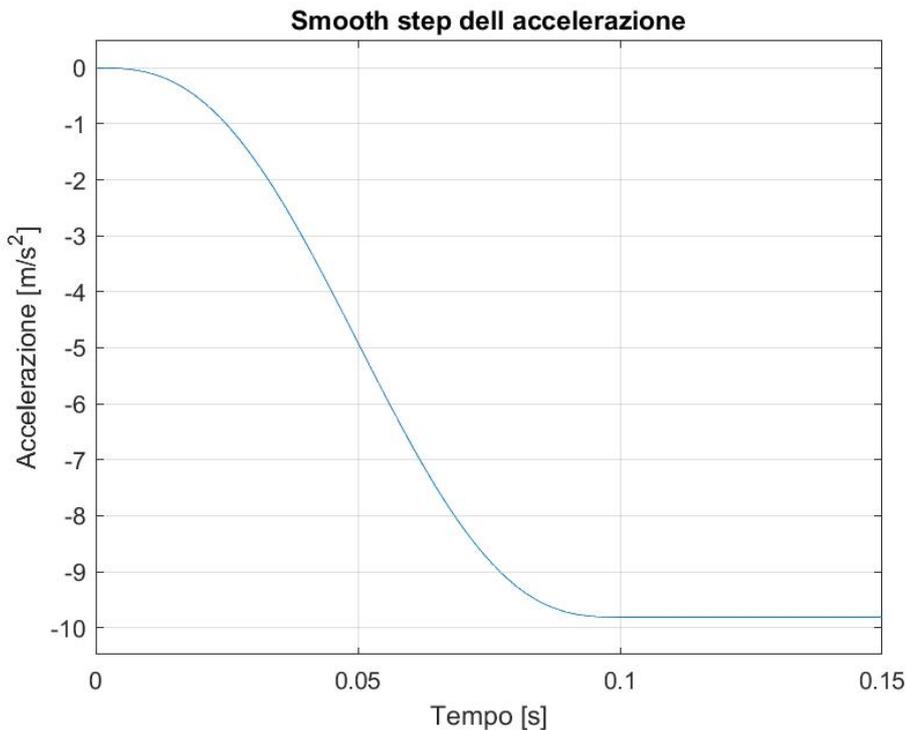
Parametro	Valore
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	1790
Modulo elastico [MPa]	Soggetto a variazione
Coefficiente di Poisson [-]	0.3
Angolo di attrito [°]	Soggetto a variazione
Angolo di dilatanza [°]	0
Coesione [Pa] <sup>1</sup>	0.1
Deformazione plastica [-]	0

<sup>1</sup> Il software ABAQUS necessita di un valore di coesione maggiore di zero, così è stato inserito nel programma il minimo valore che permetteva di effettuare la simulazione.

### 5.2.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno inserite nel modello sono:

- campo gravitazionale: per evitare errori numerici l'applicazione del campo gravitazionale sul modello è dovuta avvenire gradualmente tramite uno smooth step di durata un decimo di secondo. Come è possibile vedere nel grafico in *Figura 5.3* al tempo zero l'accelerazione gravitazionale è pari a zero mentre dopo un decimo di secondo il valore ha raggiunto  $9.81 \text{ m/s}^2$  per poi rimanere costante tutta la prova.



*Figura 5.3: Grafico relativo all'applicazione graduale del campo gravitazionale con smooth step.*

- velocità iniziale: questo dato viene applicato al baricentro del blocco in modo che questo raggiunga la velocità desiderata al momento dell'impatto. La velocità iniziale è stata calcolata a ritroso considerando il successivo aumento di velocità dato dalla caduta libera di durata 0.2 secondi composta da: un decimo di secondo per l'applicazione della gravità attraverso lo smooth step e un decimo di secondo di moto uniformemente accelerato. La velocità di impatto per il caso preso in considerazione è pari a  $14 \text{ m/s}$  corrispondente alla caduta del blocco da un'altezza di 10 metri.
- vincoli inferiori: i 4 vincoli posizionati inferiormente alla soletta sono composti da carrelli che limitano il movimento lungo l'asse verticale del modello permettendo lo spostamento lungo gli altri due lati (spostamento che però non prende luogo in quanto non vi è nessuna forza con componente orizzontale).
- vincoli laterali sullo strato assorbente: per evitare che, a seguito dell'applicazione del campo gravitazionale, la porzione laterale dello strato assorbente si espandesse,

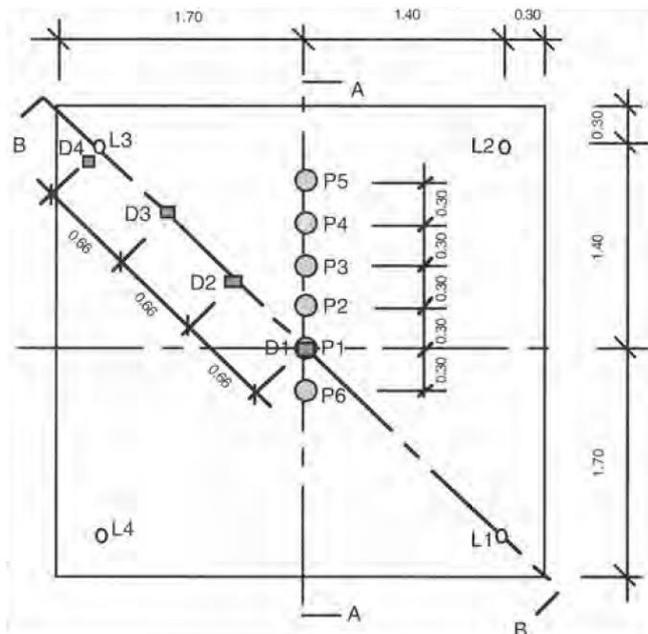
fuoriuscendo dalla soletta, si sono inseriti dei carrelli che limitassero il movimento lungo la normale del lato a cui sono stati applicati. Questa condizione è stata anche simulata andando a costruire delle pareti in calcestruzzo sul perimetro dello strato assorbente, simulando le pareti di contenimento del materiale degli esperimenti. Questa condizione però non portata ad alcuna differenza negli output e quindi si è deciso di optare per la soluzione che semplificasse più possibile il modello in modo da ridurre il tempo computazionale.

#### 5.2.4 Output analizzati

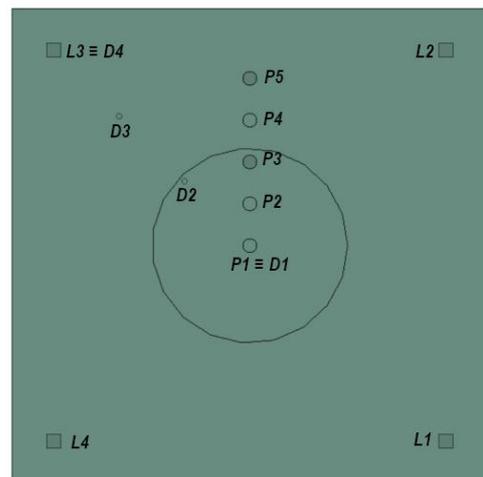
Gli output analizzati sono gli stessi presi in considerazione dagli esperimenti utilizzando anche le stesse posizioni di misura in modo da massimizzare la corrispondenza tra modello numerico e sperimentale.

Le informazioni ricavate da ogni simulazione sono quindi:

- spostamento del blocco misurato nel baricentro;
- velocità del blocco misurata nel baricentro;
- accelerazione del blocco misurata nel baricentro;
- sforzo all'interfaccia terreno soletta misurato su di un'area circolare di raggio cinque centimetri. Le posizioni ove viene presa la misurazione sono in corrispondenza dei punti P1, P2, P3, P4 e P5 rappresentati in *Figura 5.4*;
- reazione vincolare sui quattro vincoli della soletta rispettivamente L1, L2, L3 e L4 di *Figura 5.4*;
- deformazione della soletta nei punti D1, D2, D3 e D4 di *Figura 5.4*;



**Modello degli esperimenti del Politecnico di Losanna**



**Modello implementato in ABAQUS**

*Figura 5.4: Confronto in pianta tra modello sperimentale e modello in ABAQUS.*

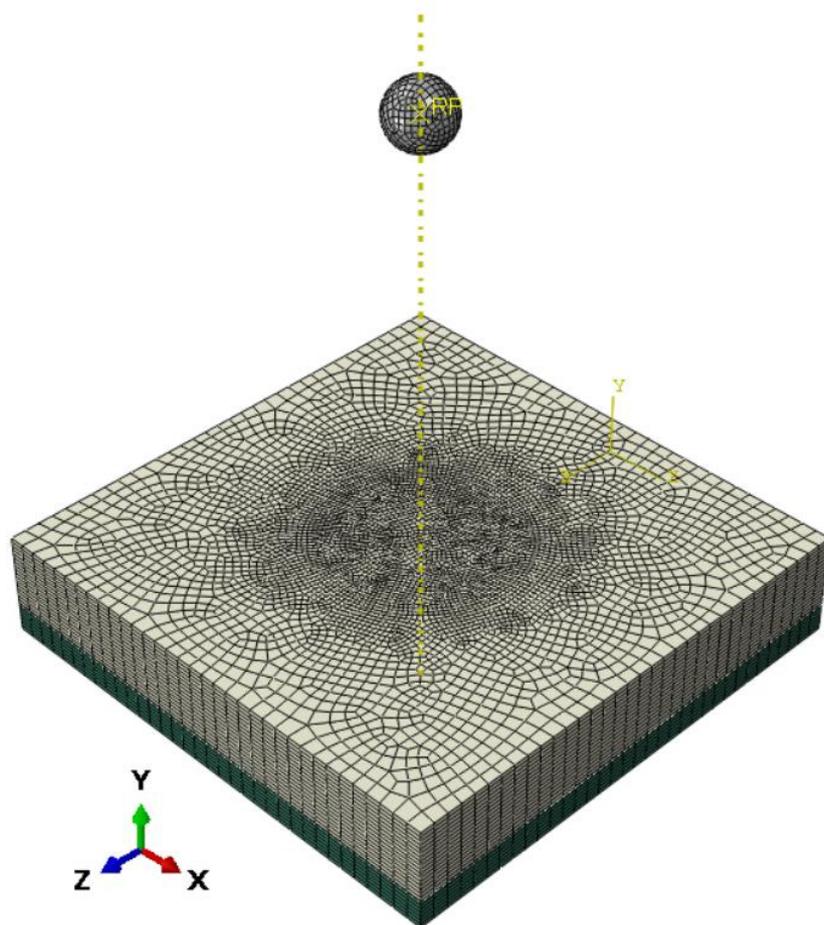
Con questa configurazione degli output è stato possibile fare un buon confronto per la calibrazione del modello.

### 5.2.5 Generazione della Mesh

Per la generazione della mesh è necessario definire le dimensioni dei singoli elementi. Per questo modello si è scelta un grandezza di 10 centimetri sul perimetro andando poi ad infittire la mesh, per rendere più accurate le simulazioni, al centro del modello dove avviene l'impatto. Quest'area è limitata da una circonferenza di raggio 70 centimetri su cui è stata definita una dimensione degli elementi pari a 3 centimetri. Anche sullo spessore del modello sono stati creati elementi di altezza 3 centimetri in modo che nella direzione di movimento del blocco e delle forze analizzate si abbia più accuratezza.

Il blocco invece è stato suddiviso in elementi di dimensione 4 centimetri.

In *Figura 5.5* vi è una rappresentazione del modello visualizzato sul software con il risultato della mesh.



*Figura 5.5: Modello visualizzato su ABAQUS con visualizzazione della mesh.*

### 5.2.6 Simulazioni, variazione e stabilimento dei parametri migliori

Una volta creato il modello è stata effettuata la back analysis andando a eseguire diverse simulazioni in modo da stabilire i parametri che meglio simulano gli esperimenti. Come è stato detto in precedenza sono stati fatti variare il modulo elastico e l'angolo di attrito caratterizzanti lo strato assorbente. Si è partiti dai valori riportati nell'articolo di Montani (2004) per il suolo composto da detriti di roccia utilizzando quindi un modulo elastico pari a 600 kPa e un angolo di attrito di 47°. Con questi parametri la penetrazione del blocco nelle simulazioni corrispondeva a più del doppio rispetto a quella derivante dagli esperimenti. È stato quindi necessario aumentare la rigidità dello strato assorbente.

Essendo una coppia di valori soggetti a variazione ed essendo entrambi direttamente proporzionali alla "rigidità" di risposta del terreno è possibile determinare più coppie che si avvicinano al comportamento sperimentale. Tuttavia, sono state individuate coppie di parametri che simulano meglio gli esperimenti.

In seguito, verranno mostrati alcuni grafici ottenuti utilizzando tre coppie di parametri differenti andando a confrontare i risultati con quelli degli esperimenti. Le tre coppie analizzate simulano bene in molti aspetti gli esperimenti anche se, come sarà spiegato in seguito, solo una di queste risulta corretta in tutte le grandezze analizzate.

Le tre coppie prese in considerazione utilizzeranno i parametri indicati in *Tabella 5.5*, questi parametri sono puramente numerici e non corrispondono a vere caratteristiche meccaniche misurabili nella realtà, per questo è fondamentale sempre eseguire una back analysis per ricondurre questi valori numerici a parametri reali corrispondenti con quelli caratterizzanti l'esperimento.

*Tabella 5.5: Coppie migliori dei parametri della back analysis.*

	<b>Modulo elastico [Mpa]</b>	<b>Angolo di attrito [°]</b>
<b>Coppia n.1</b> (simulazione 1)	2500	40
<b>Coppia n.2</b> (simulazione 2)	10'000	35
<b>Coppia n.3</b> (simulazione 3)	400	43

Come è possibile vedere si è dovuto aumentare di molto il modulo elastico rispetto a quello riportato nell'articolo di Montani (2004).

In *Figura 5.6* è riportata la penetrazione del blocco all'interno dello strato assorbente. Tutte e tre le coppie hanno una penetrazione massima paragonabile con quella degli esperimenti. Tuttavia, nella simulazione 2 il blocco subisce un rimbalzo, questo è molto visibile anche nel grafico in *Figura 5.7*, rappresentante le velocità del blocco, dove nel secondo caso la velocità diventa negativa (quindi rivolta verso l'alto).

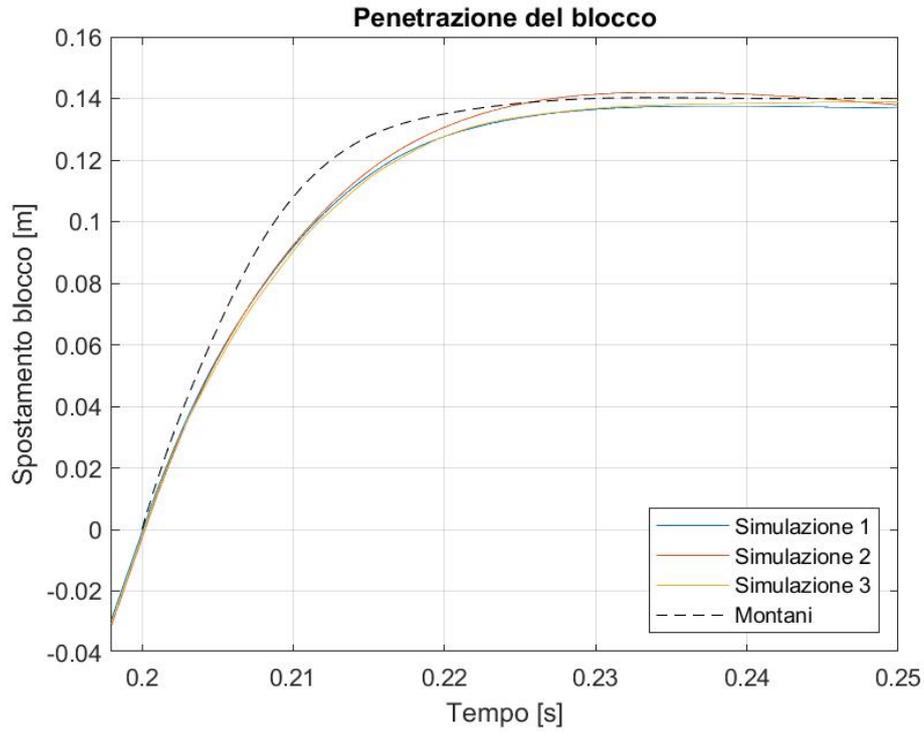


Figura 5.6: Grafico rappresentante la penetrazione del blocco nella back analysis con confronto Montani (2004).

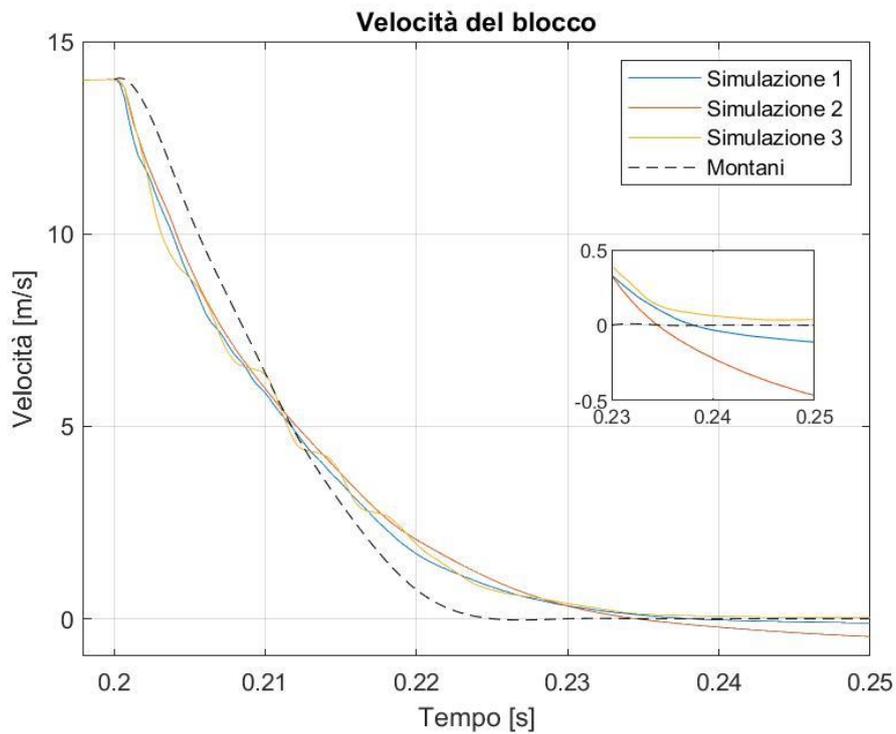
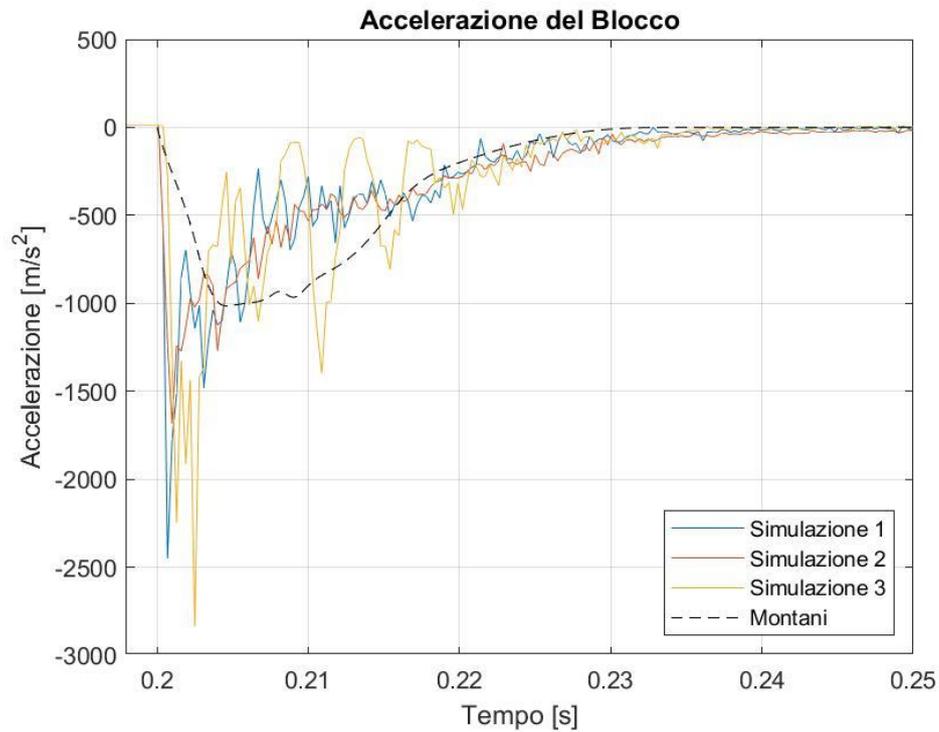
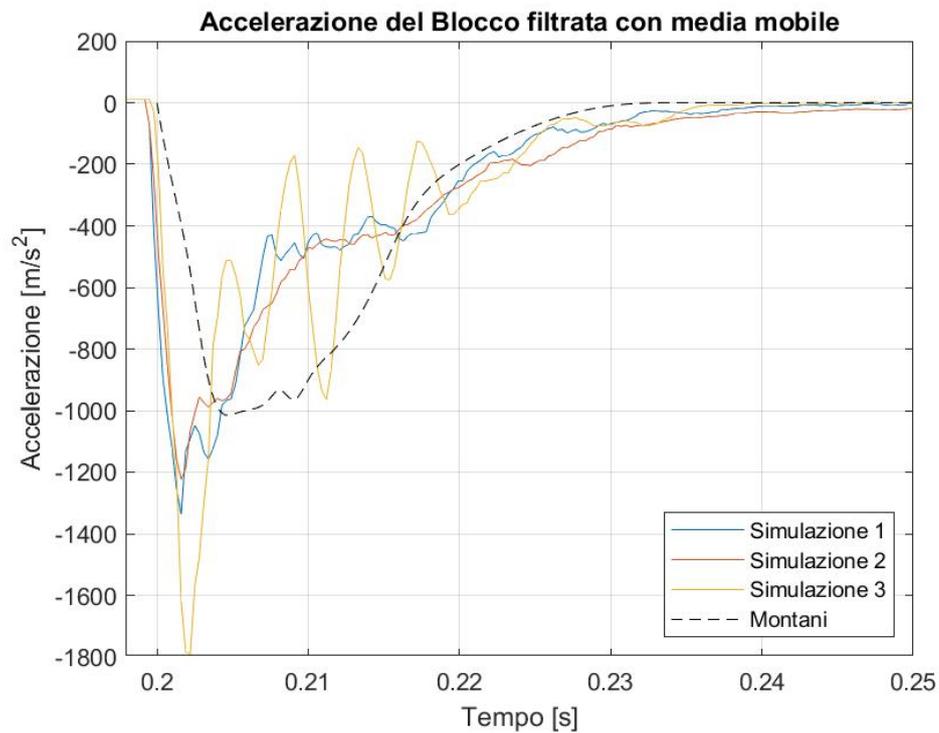


Figura 5.7: Grafico rappresentante la velocità del blocco nella back analysis con confronto Montani et al. (2004) con focus sulla parte di grafico in cui la velocità diventa negativa.

Andando ad analizzare l'accelerazione che subisce il blocco nell' impatto si può notare che questa presenta un forte rumore (*Figura 5.8*) per una miglior lettura si è quindi proceduto filtrando la curva ottenendo così i grafici in *Figura 5.9*.



*Figura 5.8: Grafico rappresentante l'accelerazione del blocco nella back analysis con confronto Montani (2004).*



*Figura 5.9: Grafico rappresentante l'accelerazione filtrata con media mobile del blocco nella back analysis con confronto Montani (2004).*

L'accelerazione del blocco nelle simulazioni 1 e 2 risulta comparabile con quella sperimentale. Invece, quella ricavata nella simulazione tre presenta una forte oscillazione ed un picco decisamente maggiore rispetto a quello ricavato negli esperimenti. Il valore più elevato raggiunto dal picco può essere dovuto alla difficoltà con cui si plasticizza il terreno che è direttamente proporzionale con il valore dell'angolo di attrito. Per quanto riguarda le grandi oscillazioni invece non si è riusciti a stabilire una motivazione precisa, anche a fronte di un'attenta analisi degli output grafici sulla dinamica dell'impatto che il programma è in grado di restituire, si può quindi attribuire tale anomalia a un errore numerico che insorge nel momento in cui viene utilizzata una coppia di parametri con angolo di attrito elevato e modulo elastico ridotto. Infatti, si sono testate anche altre coppie con valori simili a quelli della coppia 3 e l'anomalia risulta sempre evidente e cresce al crescere dell'angolo di attrito.

Andando ora ad analizzare la reazione vincolare esercitata dai quattro vincoli che sorreggono la soletta (Figura 5.10) si può notare come tutte e tre le simulazioni riproducano efficacemente i valori ottenuti da Montani (2004).

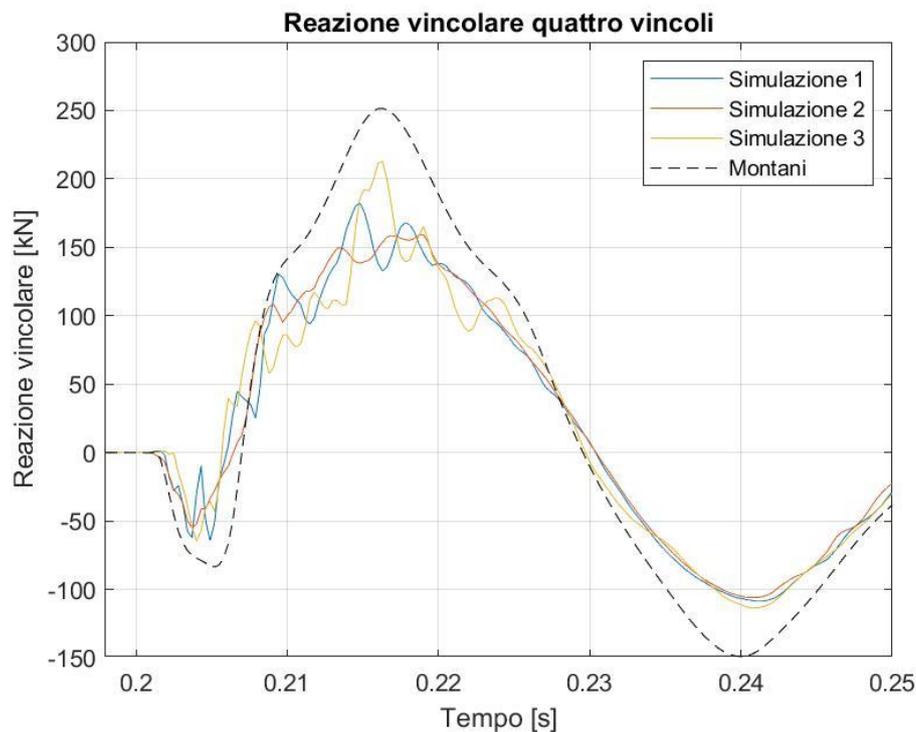


Figura 5.10: Grafico rappresentante la reazione vincolare dei vincoli della soletta nella back analysis con confronto Montani (2004).

Nello sforzo all'interfaccia tra terreno e soletta (Figura 5.11) è possibile osservare come la simulazione 3, al pari di quanto accadeva nell'accelerazione del blocco, oscilla molto senza avvicinarsi alla forma della curva ricavata negli esperimenti, si ritiene che la motivazione di questa anomalia sia analoga a quella indicata per l'accelerazione ovvero un errore numerico della simulazione. Al tempo stesso nella simulazione 2 lo sforzo non tende al valore nullo come accade negli esperimenti. In questo caso quindi la corrispondenza tra la simulazione 1 e gli

esperimenti risulta essere nettamente maggiore rispetto alle simulazione effettuate utilizzando le altre due coppie di parametri.

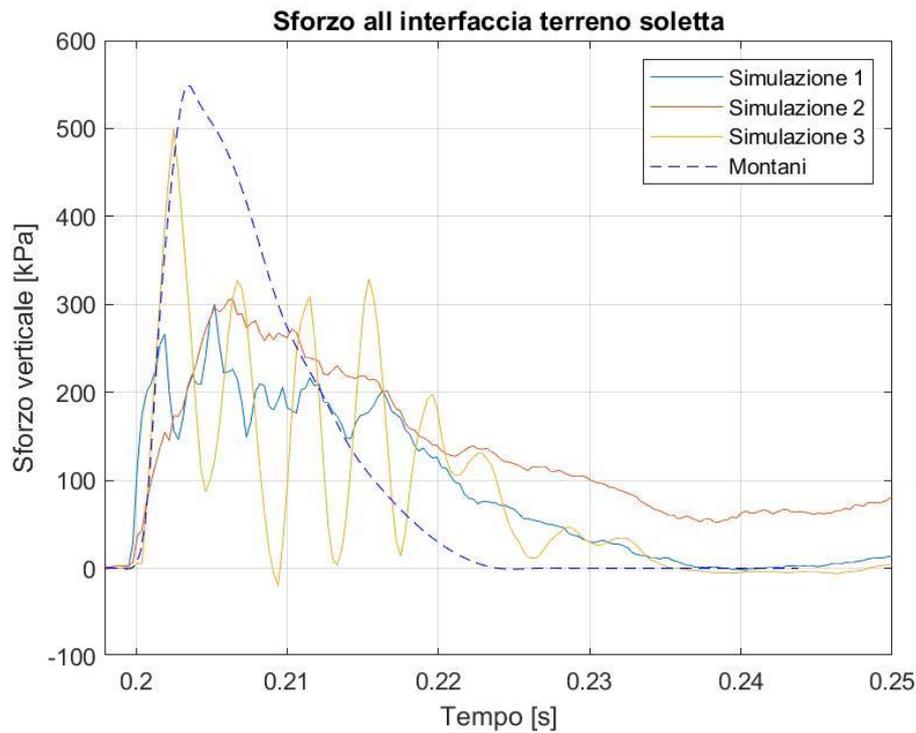


Figura 5.11: Grafico rappresentante gli sforzi all'interfaccia terreno-soletta nella back analysis con confronto Montani (2004).

Per quanto riguarda le deformazioni della soletta tutte e tre le simulazioni restituiscono un output pressoché identico. La deformazione massima raggiunta però risulta essere nettamente inferiore e quella ricavata negli esperimenti. per risolvere tale discordanza si sono effettuate alcune prove andando a ridurre il modulo elastico del calcestruzzo. Questa variazione andava sì ad aumentare la deformazione della soletta ma al tempo stesso la frequenza di oscillazione veniva nettamente alterata differendo di molto da quella degli esperimenti. Inoltre, anche altre grandezze come la reazione vincolare con una riduzione del modulo elastico della soletta tendevano a restituire dati maggiormente discordanti rispetto a quelli sperimentali.

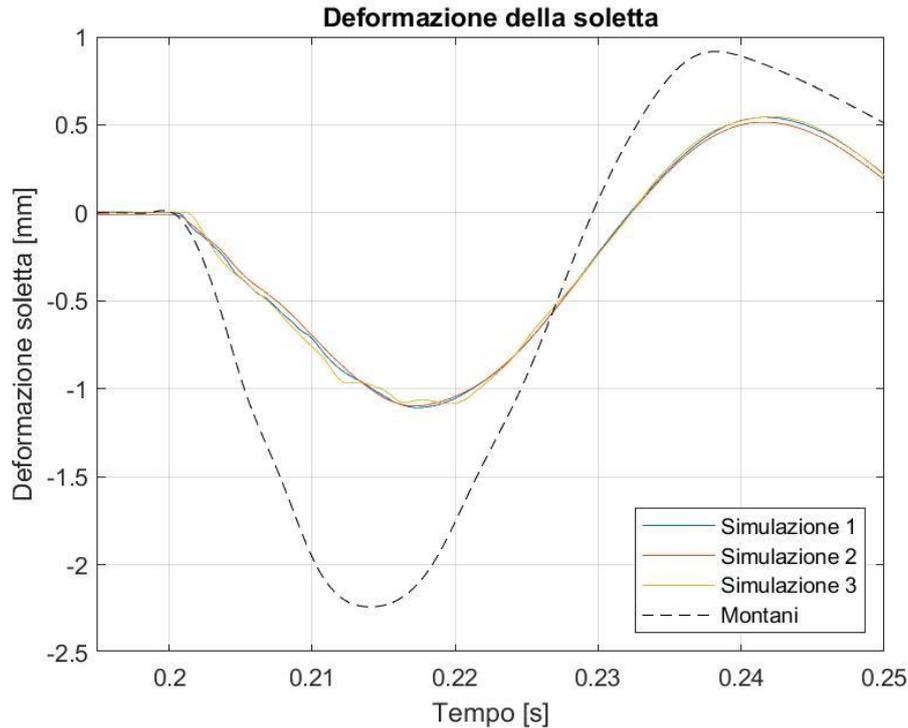


Figura 5.12: Grafico rappresentante la deformazione della soletta nella back analysis con confronto Montani (2004).

In conclusione, analizzando tutte le simulazioni effettuate ed in particolare quelle analizzate in precedenza, dove si sono riportati i risultati ottenuti con tre coppie di parametri che meglio simulavano gli esperimenti, si può affermare che:

- come espresso in precedenza si possono ottenere più coppie che simulano bene gli esperimenti ma si ottengono dei problemi nei casi estremi ovvero:
  - con valori di modulo elastico elevati e di angolo di attrito ridotti è possibile ottenere la stessa penetrazione degli esperimenti ma il blocco tenderà a rimbalzare a causa del terreno più rigido e lo sforzo all' interfaccia tende ad assumere un valore maggiore di zero per tempi più elevati;
  - con valori di modulo elastico ridotti e di angolo di attrito elevati anche ottenendo ugual penetrazione molti risultati sono affetti da grandi oscillazioni che ne pregiudicano una bassa corrispondenza con gli esperimenti;
- la simulazione 1 è quella che rappresenta al meglio gli esperimenti, la coppia di parametri utilizzati si pone a metà dei due casi estremi appena citati;
- seppur lo sforzo all'interfaccia della simulazione 1 abbia un picco inferiore, l'area sottesa al grafico corrisponde a quella sottesa al grafico sperimentale;
- nonostante la deformazione della soletta abbia valori inferiori a quelli ottenuti sperimentalmente si procede con la validazione della back analysis in quanto lo studio di sensitività andrà soprattutto a focalizzarsi sulle forze e con minor dettaglio sulle deformazioni.

Il modello che simula al meglio gli esperimenti di Montani (2004) è quindi quello che utilizza i parametri della coppia 1 riportati in *Tabella 5.5*.

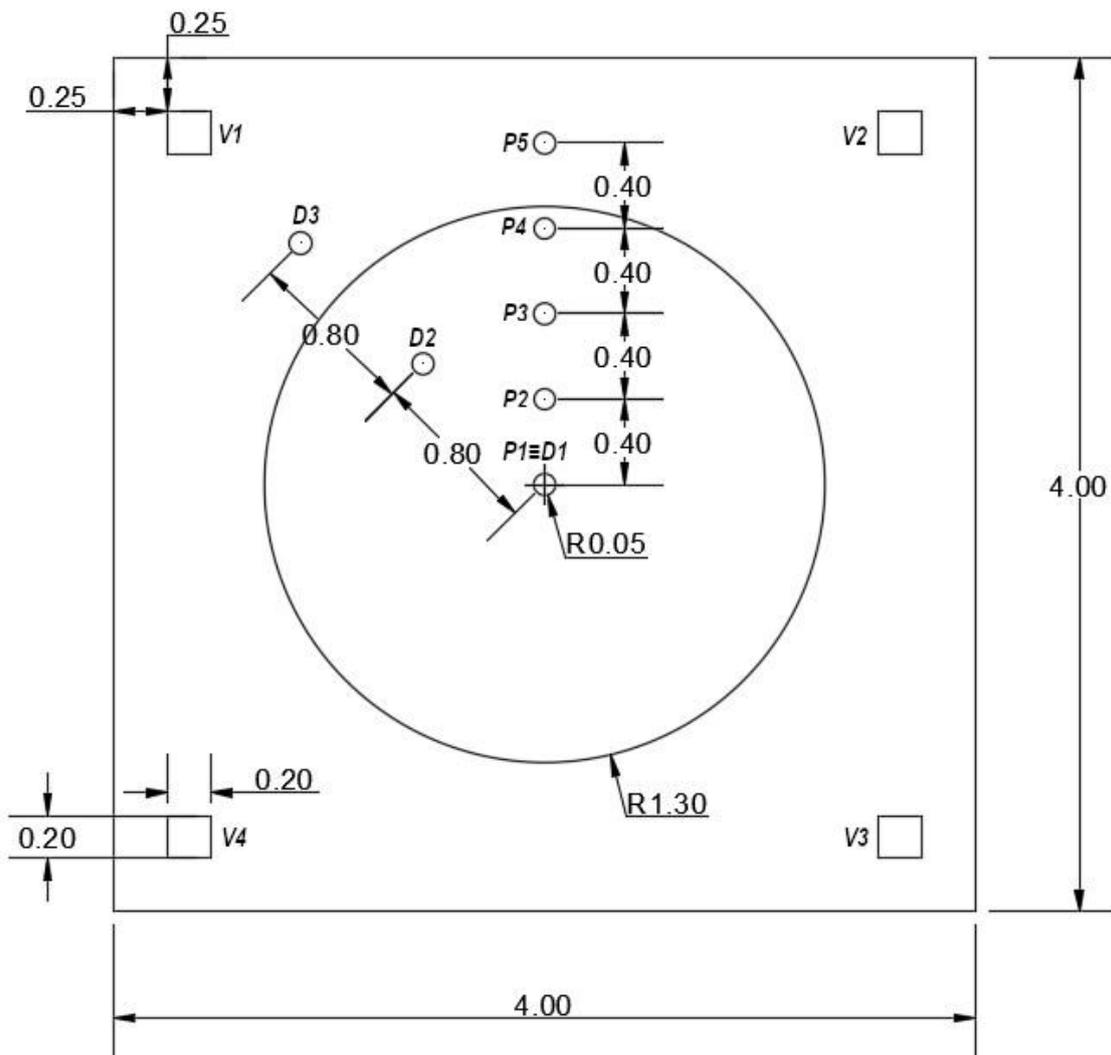
Questi parametri saranno quelli utilizzati in tutte le simulazioni componenti lo studio di sensitività.

### 5.3 Analisi di sensitività sullo strato assorbente

Una volta ricavati i parametri che meglio simulano le condizioni reali si è potuto proseguire con l'analisi di sensitività.

Per far sì che il modello in ABAQUS potesse contenere anche blocchi di pezzatura maggiore si è deciso di aumentare leggermente la dimensione del modello come mostrato con visuale dall'alto vero il basso in *Figura 5.13* dove:

- V1, V2, V3 e V4 sono i quattro vincoli posizionati inferiormente alla soletta;
- P1, P2, P3, P4 e P5 sono le posizioni in cui vengono misurati gli sforzi all' interfaccia terreno soletta;
- D1, D2, D3 sono le posizioni in cui vengono misurate le deformazione della soletta sul lato inferiore.



*Figura 5.13: Rappresentazione delle dimensioni e delle posizioni di misurazione degli output nel modello utilizzato per l'analisi di sensitività.*

Lo studio di sensitività andrà a far variare 4 diversi input del modello:

- volume e massa del blocco (mantenendo la stessa densità e forma sferica);
- velocità di impatto e altezza di caduta;
- spessore dello strato assorbente;
- spessore della soletta.

Facendo variare questi parametri si andrà ad indagare come varia l'assorbimento dell' energia e la diffusione degli sforzi, mettendo i risultati a confronto con quelli ricavati nell' analisi bibliografica.

Si effettua quindi una simulazione con i valori medi andando poi a variare un parametro alla volta ricavando le risposte del modello. Le simulazioni effettuate sono riportate in *Tabella 5.6*.

Tabella 5.6: Simulazioni effettuate nell'analisi di sensitività

Simulazione	Volume del blocco [m <sup>3</sup> ]	Raggio del blocco [m]	Massa del blocco [kg]	Velocità di impatto [m/s]	Altezza di caduta [m]	Spessore dello strato [m]	Spessore della soletta [m]
<b>Variazione del volume e della massa del blocco</b>							
2	0.04	0.21	100	15	11.47	1	0.5
3	0.08	0.26	200				
4	0.19	0.36	500				
5	0.38	0.45	1'000				
6	0.77	0.57	2'000				
<b>Variazione della velocità e dell'altezza di caduta del blocco</b>							
7	0.19	0.36	500	5	1.27	1	0.5
8				10	5.10		
4				15	11.47		
9				17.5	15.61		
10				20	20.39		
11				22.5	25.80		
12				25	31.86		
<b>Variazione dello spessore dello strato assorbente</b>							
13	0.19	0.36	500	15	11.47	0.5	0.5
4						1	
14						1.5	
15						2	
16						2.5	
<b>Variazione dello spessore della soletta</b>							
17	0.19	0.36	500	15	11.47	1	0.25
4							0.5
18							0.75

I dati ottenuti dalle simulazioni sono successivamente stati elaborati e analizzati utilizzando il software MATLAB in modo da ottenere grafici dettagliati utili per studiare l'influenza dei diversi parametri.

Nel *paragrafo 7* sono riportate alcune visualizzazioni del modello in ABAQUS messe a confronto per i diversi parametri in modo da avere una rappresentazione realistica di esempio della propagazione degli sforzi e delle deformazioni durante l'impatto.

## 5.4 Risultati

I risultati ottenuti dallo studio di sensitività sono stati suddivisi in base al parametro oggetto di variazione, andando ad analizzare le varie forze e interazioni tra blocco, strato assorbente e soletta.

In particolare, verranno analizzati:

- la penetrazione del blocco: parametro che indica quanto penetra il blocco nello strato assorbente prima che si arresti completamente o che inverta la direzione di spostamento nel caso in cui avvenga un rimbalzo;
- la velocità del blocco: questo fa vedere come l'impatto faccia decrescere la velocità fino ad arrestare il blocco;
- l'accelerazione del blocco: analizza l'accelerazione a cui è soggetto il blocco durante l'impatto nell'analisi di sensitività verrà sempre mostrata l'accelerazione filtrata attraverso media mobile in modo da rimuovere l'eccesso di rumore dell' output. Tutti e tre i parametri appena elencati vengono misurati nel centro di massa del blocco. L'interfaccia del programma che permette di selezionare i parametri da ricavare è come quella riportata in *Figura 5.14*;

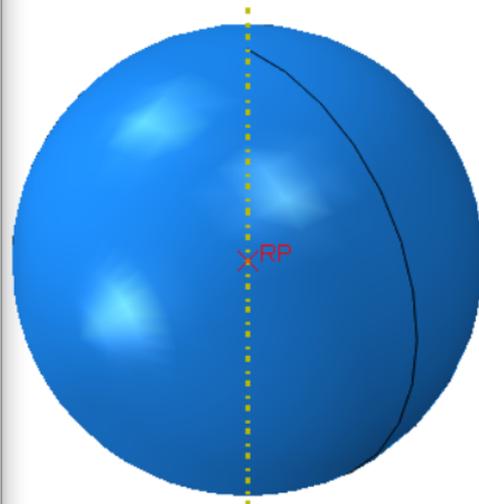
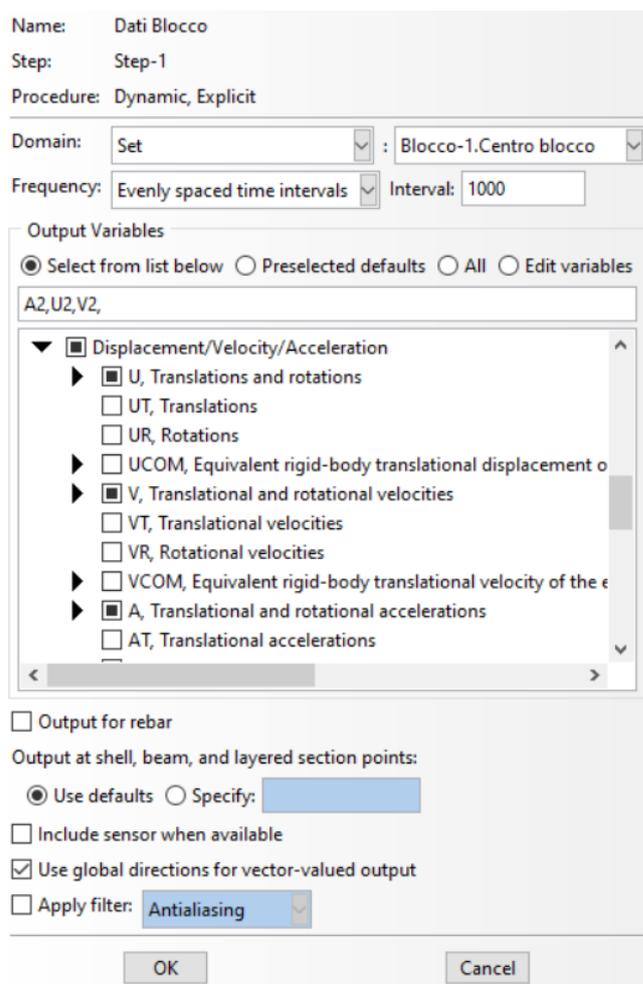


Figura 5.14: Interfaccia ABAQUS nella selezione degli output derivanti dal blocco: spostamento, velocità e accelerazione.

- forza di impatto ( $F_I$ ): questa forza viene ricavata moltiplicando il valore dell'accelerazione del blocco ( $a_b$ ) per la massa dello stesso ( $m_b$ ) come mostrato nell'equazione 5.3, questa forza è la stessa indicata da Labiouse et al. (1994) e riportata nel paragrafo 4.2.1.1 come  $F_1$  o forza di accelerazione;

$$F_1 = a_b * m_b \quad 5.3$$

- sforzo all'interfaccia terreno-soletta ( $\sigma$ ): questo sforzo viene misurato nei punti indicati con la "P" in Figura 5.13, questa misura è utile per determinare gli sforzi agenti sulla soletta e le dimensioni dell'"impronta" su cui questi sforzi vengono distribuiti; In Figura 5.15 viene l'interfaccia di ABAQUS nella selezione dei parametri per la restituzione di questa misura;

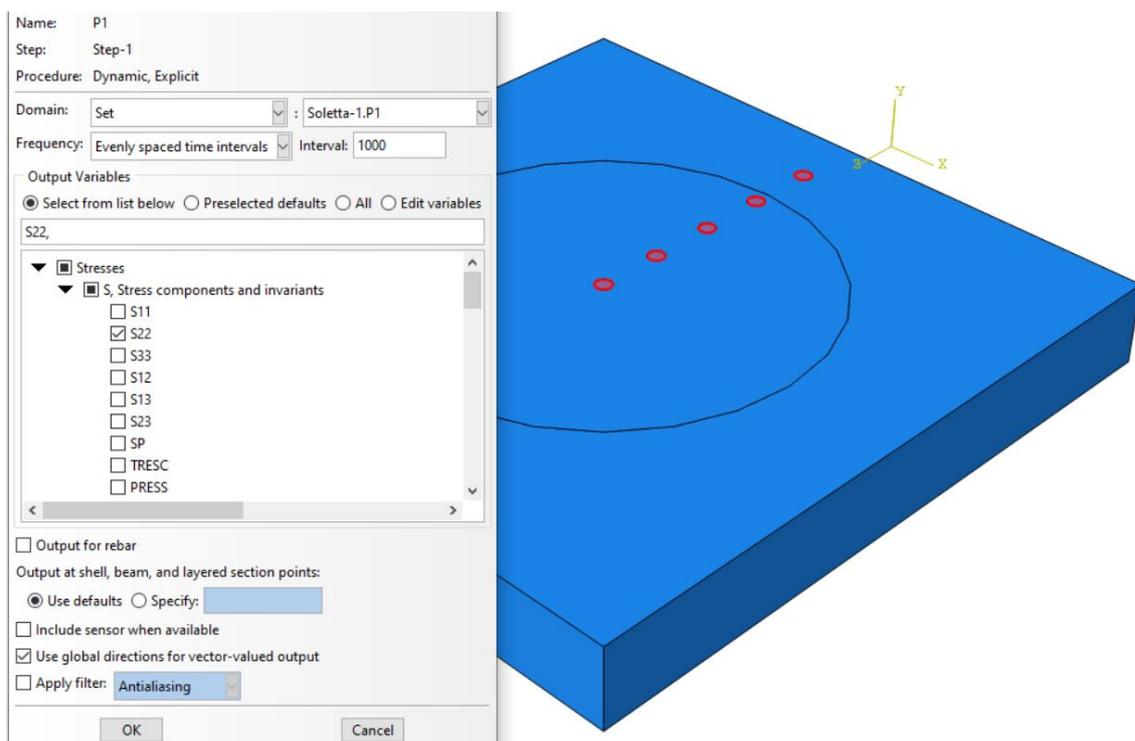
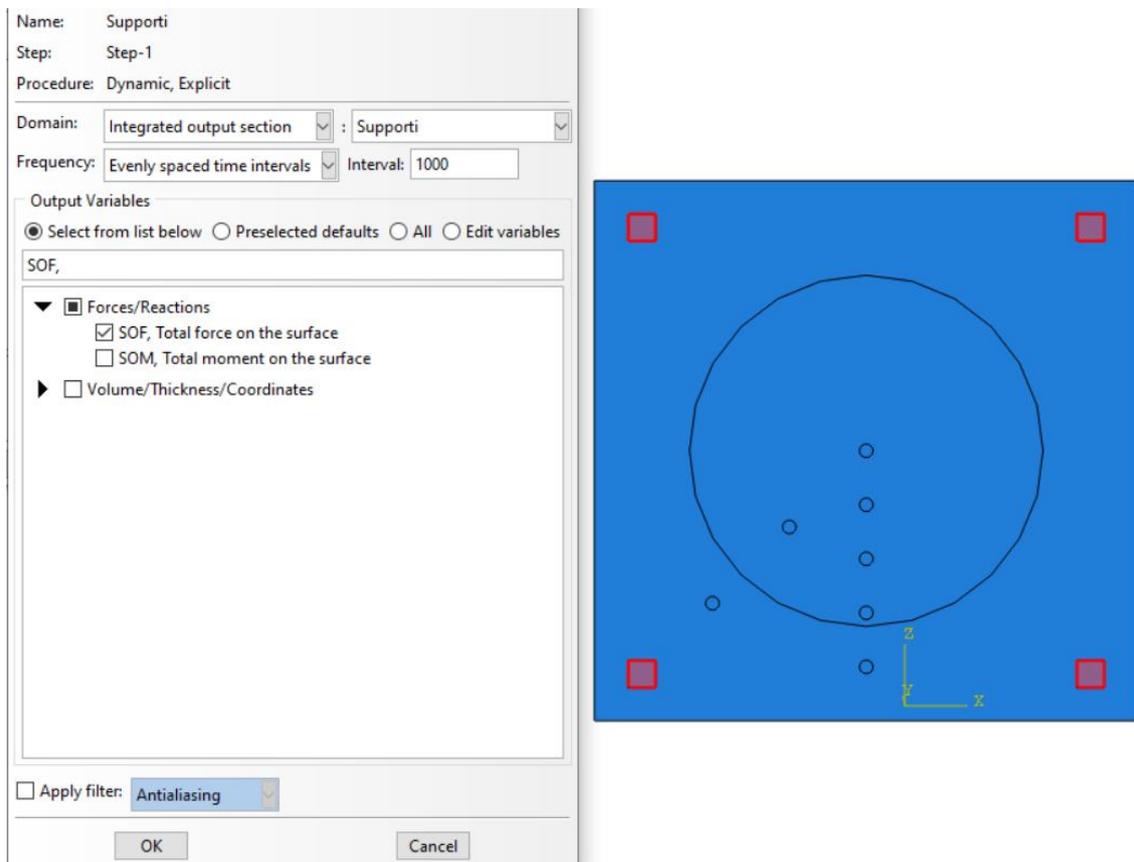


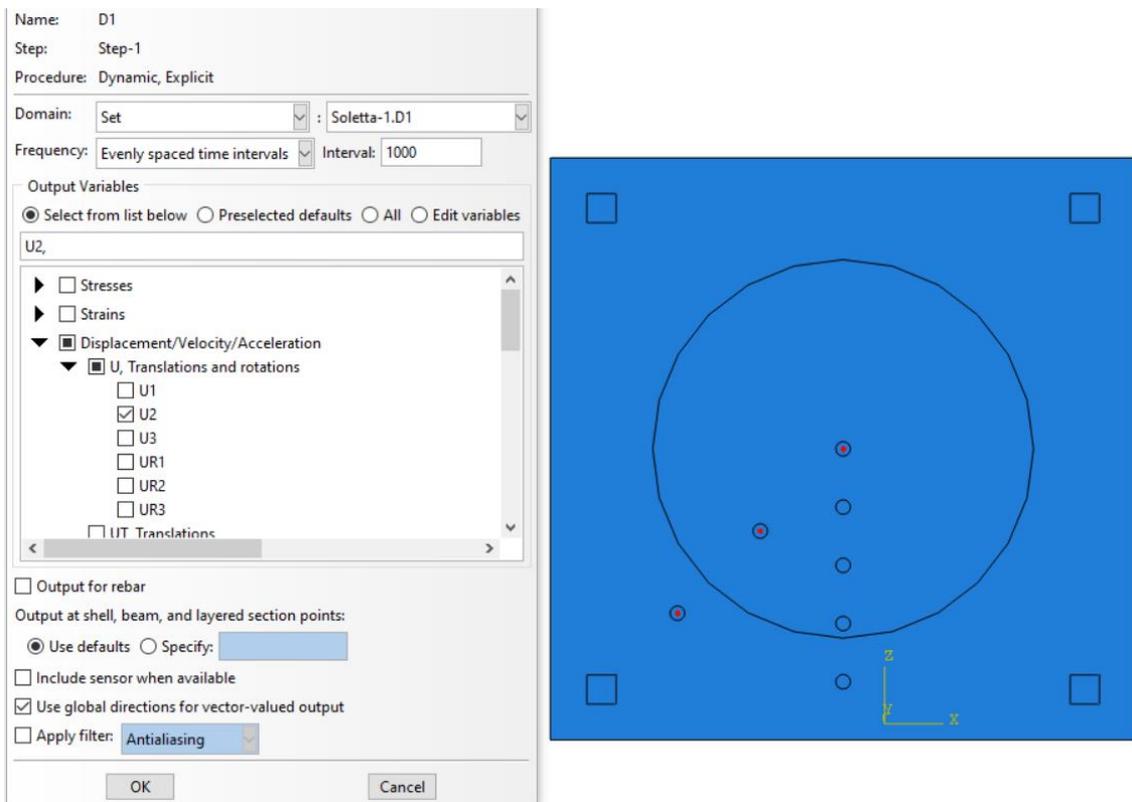
Figura 5.15: Interfaccia ABAQUS nella selezione degli output legati agli sforzi all'interfaccia terreno-soletta.

- reazione vincolare dei quattro vincoli che sorreggono la soletta ( $F_3$ ): indicano le forze che devono esercitare i vincoli della soletta a seguito dell'impatto. In *Figura 5.16* viene mostrata l'interfaccia ABAQUS nella definizione dei parametri per ricavare questo output;



*Figura 5.16: Interfaccia ABAQUS nella selezione degli output legati alla reazione vincolare agente sulla soletta.*

- deformazione della soletta: misurata nei punti indicati con la “D” in *Figura 5.13*, mostra quanto si sposta la soletta in direzione verticale a seguito dell’ impatto, valutandone così la deformazione. In *Figura 5.17* si va a mostrare i punti e i parametri inseriti per la misurazione delle deformazioni.



*Figura 5.17: Interfaccia ABAQUS nella selezione degli output legati alla deformazione della soletta.*

In seguito, si andrà quindi ad esaminare come i diversi parametri influiscano sulle misure appena elencate.

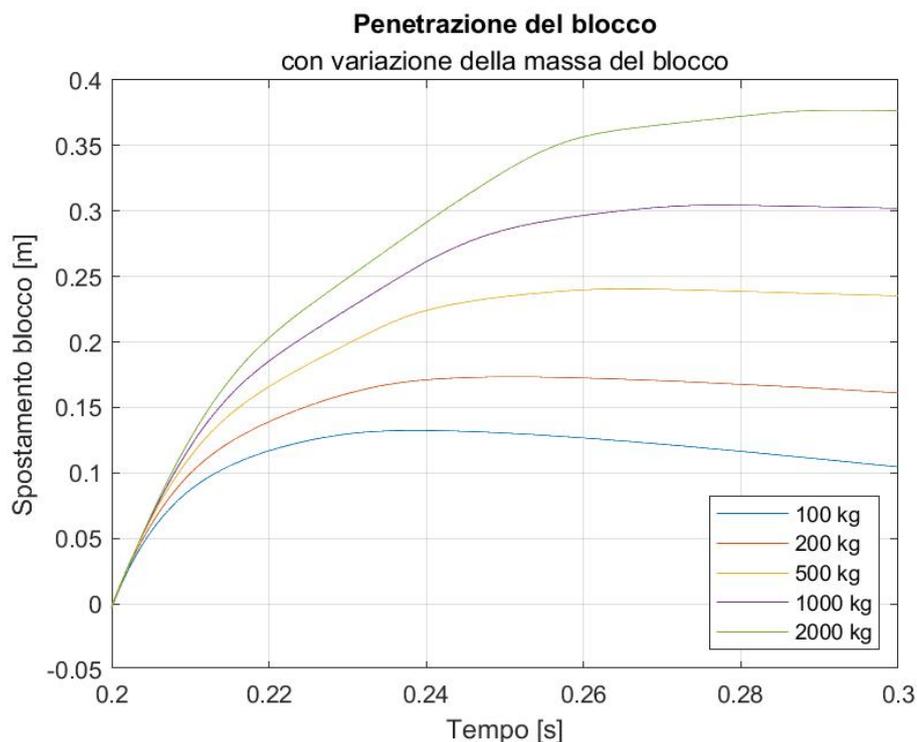
### 5.4.1 Variazione del volume e della massa del blocco

Facendo variare sul software ABAQUS la massa e quindi anche il volume del blocco è possibile analizzare impatti con diversa energia che però avvengono tutti alla medesima velocità. Le energie analizzate con questi impatti sono riportate in *Tabella 5.7*.

*Tabella 5.7: Energie di impatto nell'analisi di variazione del volume e della massa del blocco.*

Simulazione	Massa [kg]	Velocità [m/s]	Energia [kJ]
2	100	15	11.25
3	200		22.5
4	500		56.25
5	1'000		112.5
6	2'000		225

Analizzando la penetrazione del blocco questa tende a crescere al crescere della massa del blocco (*Figura 5.18 e Figura 7.1*), per i blocchi di massa minore si può osservare che la penetrazione dopo aver raggiunto il massimo tende a diminuire, questo è dovuto al presentarsi di un rimbalzo, chiaramente visibile anche dal raggiungimento di velocità negative da parte del blocco (*Figura 5.19*)

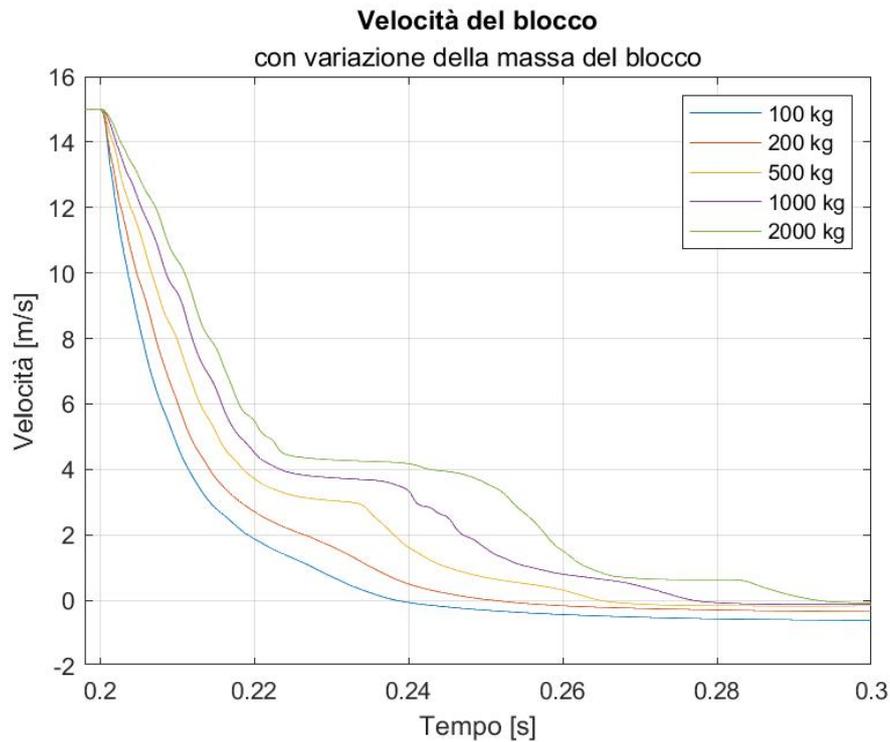


*Figura 5.18: Penetrazione del blocco con variazione della massa del blocco.*

Per blocchi di grandi dimensioni la velocità (*Figura 5.19*) tende a diventare costante all'incirca per tempi pari a 0.23s ovvero dopo 0.03s dall'impatto. Il plateau a velocità costante tende ad avere durata maggiore al crescere della massa del blocco. Questo fenomeno può essere legato al fatto che negli stessi istanti la soletta dopo aver concluso un ciclo deformativo verso l'alto e verso il basso inizia nuovamente a scendere causando così una minore resistenza da parte del

terreno sul blocco (*Figura 5.20*). Questa problematica può però anche essere legata alla riflessione delle onde date dall' impatto all'interno del modello che è confinato da questo punto di vista.

I blocchi di massa minore come visto in precedenza tendono ad avere velocità negativa, ovvero a rimbalzare, mentre per quelli di massa maggiore (da 500 kg in su) la velocità tende subito a zero senza diventare negativa.



*Figura 5.19: Velocità del blocco con variazione della massa del blocco.*

La deformazione massima raggiunta dalla soletta cresce al crescere delle dimensioni del blocco raggiungendo un valore prossimo ai due millimetri. Le oscillazioni per blocchi di grandi dimensioni (soprattutto per il blocco da 2'000 kg) risultano essere disordinate rivelando nuovamente qualche problematica per queste simulazioni aventi grande energia.

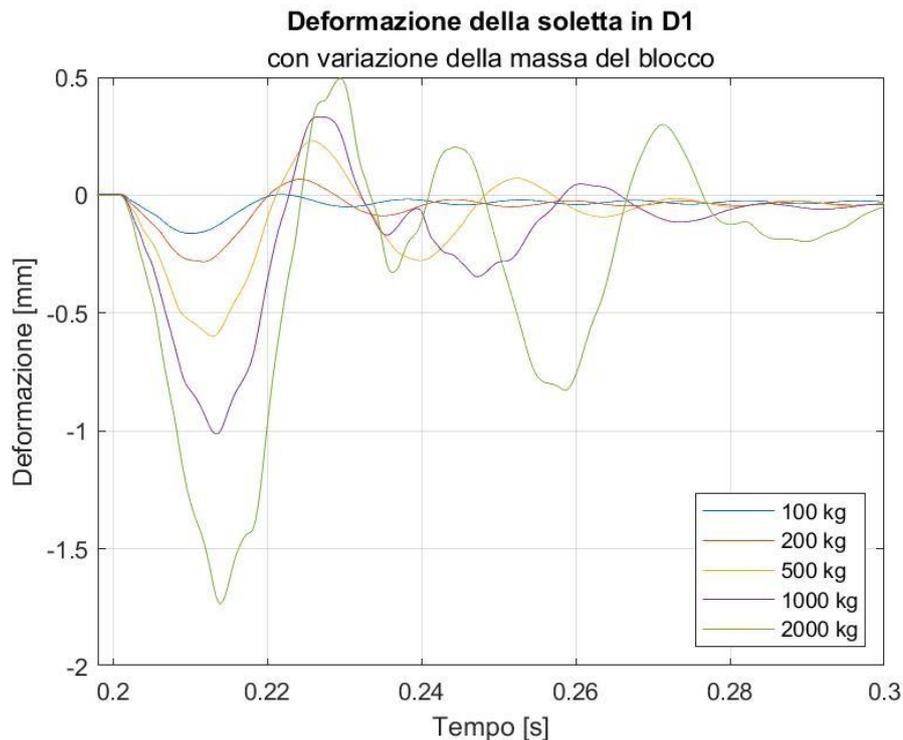


Figura 5.20: Deformazione della soletta in D1 con variazione della massa del blocco.

L'accelerazione risulta diminuire all'aumentare della massa del blocco (Figura 5.21) questo è dovuto al differente rapporto tra l'inerzia dell' impattato (terreno + soletta) e quella dell' impattante (blocco) al crescere di questo rapporto l'accelerazione subita dal blocco risulta essere maggiore. Tuttavia, andando a calcolare la forza di impatto questa tende a crescere all'aumentare della massa del blocco (Figura 5.22). In tutte e due le misure per i blocchi più grandi vi è un secondo picco localizzato temporalmente in corrispondenza della fine del tratto a velocità costante (Figura 5.19).

Il secondo picco è presente anche nei risultati ottenuti in diversi articoli. In primis in Labiouse et al (1994), in questo caso il secondo piccolo risulta essere di modesta entità. Ma anche in Calvetti et al. (2005) e Calvetti & Prisco (2007) dove il secondo picco è ben più marcato e visibile (Figura 4.20 e Figura 4.30). In tutti i casi però la forza di impatto non raggiunge valori nulli come in questo caso. In più per il blocco di massa 2'000 kg si presenta anche un terzo picco prima che il blocco si arresti completamente. Nelle simulazioni il secondo picco della forza di impatto corrisponde temporalmente con il secondo picco deformativo verso il basso della soletta ma anche con quello dello sforzo all'interfaccia e della reazione vincolare.

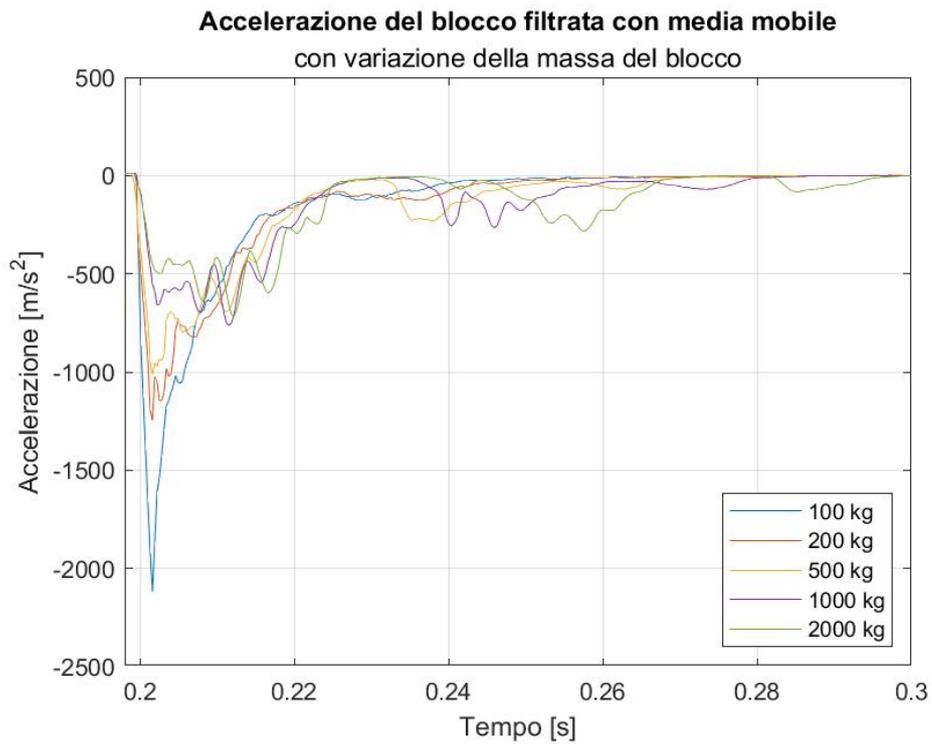


Figura 5.21: Accelerazione del blocco con variazione della massa del blocco.

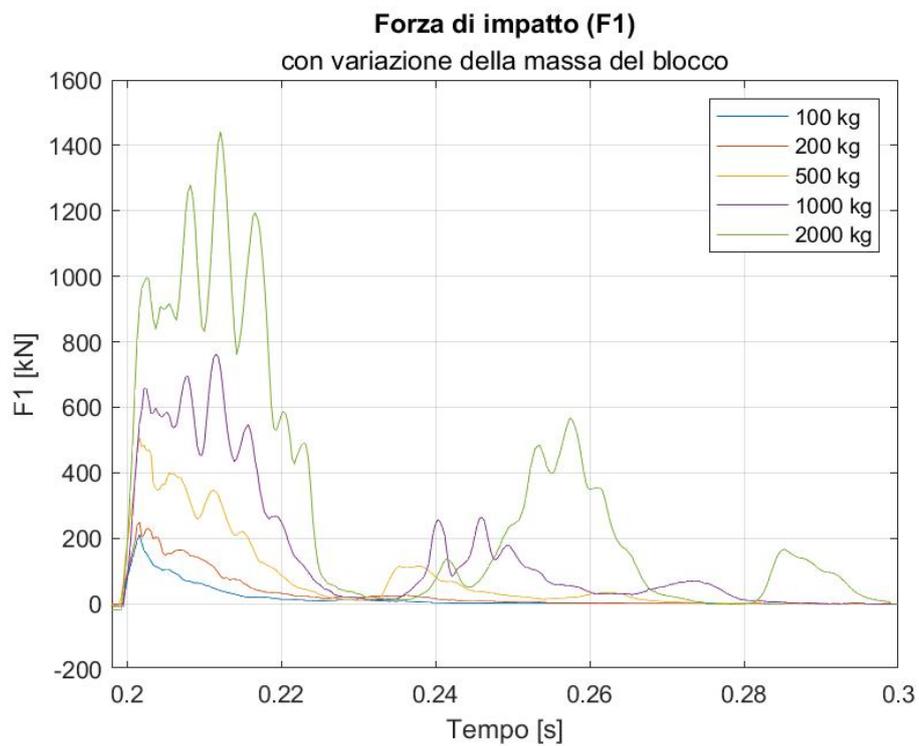
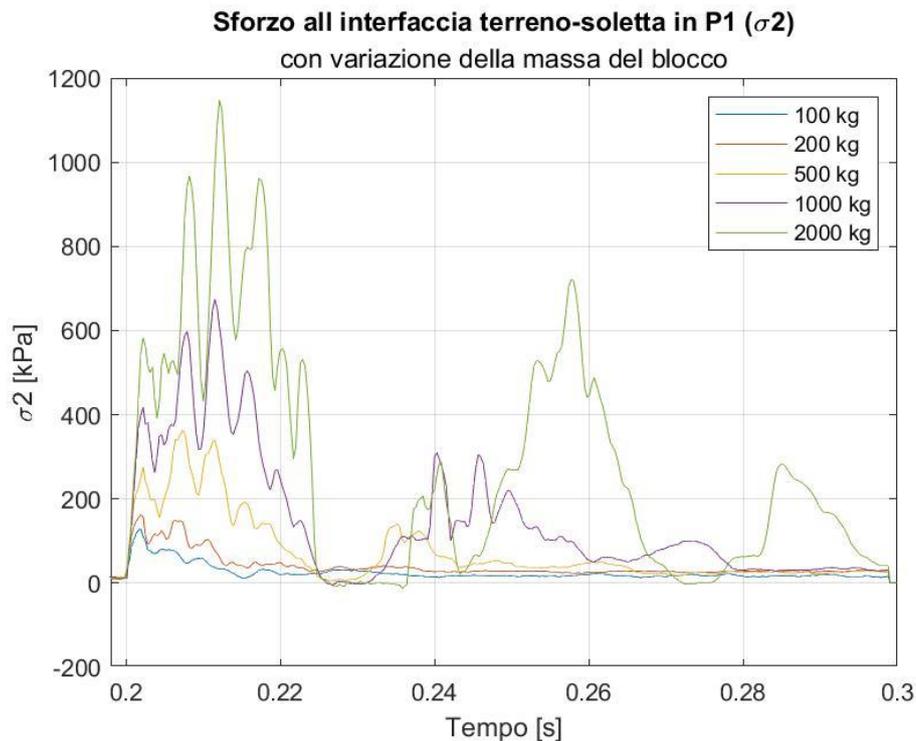


Figura 5.22: Forza di impatto con variazione della massa del blocco.

Lo sforzo tra soletta e terreno aumenta per i blocchi più grandi (*Figura 5.23*). Al pari della forza di impatto sono presenti più picchi.



*Figura 5.23: Sforzo all'interfaccia terreno soletta in P1 con variazione della massa del blocco.*

Analizzando gli sforzi sulla soletta in funzione della distanza dal centro è possibile osservare come questi si diffondono nello strato assorbente andando a distribuirsi su un'area maggiore rispetto alle dimensioni del blocco. Per tutte le prove la maggior parte degli sforzi viene esercitata nella porzione centrale in una regione circolare di raggio un metro (*Figura 5.24*). In media l'angolo di diffusione per queste simulazioni varia da  $35^\circ$  a  $50^\circ$  a partire dal centro del blocco e non dalle sue estremità in contatto con il terreno.

Questa forma a campana formata dalle sollecitazioni sulla soletta ha un andamento molto simile a quello ottenuto da Calvetti et al. (2005) e riportato in *Figura 5.25* (dove viene però variata l'altezza di caduta). Nel modello agli elementi finiti creato in questa tesi l'impronta tende ad avere dimensioni minori; questo è probabilmente legato ai diversi materiali impiegati ed alla diversa geometria del modello. Questo paragone non è valido unicamente per la fase di variazione della massa del blocco ma lo è anche per tutte le altre fasi dell'analisi di sensitività.

In *Figura 7.3* vi è una rappresentazione grafica della diffusione degli sforzi verticali a seguito dell'impatto.

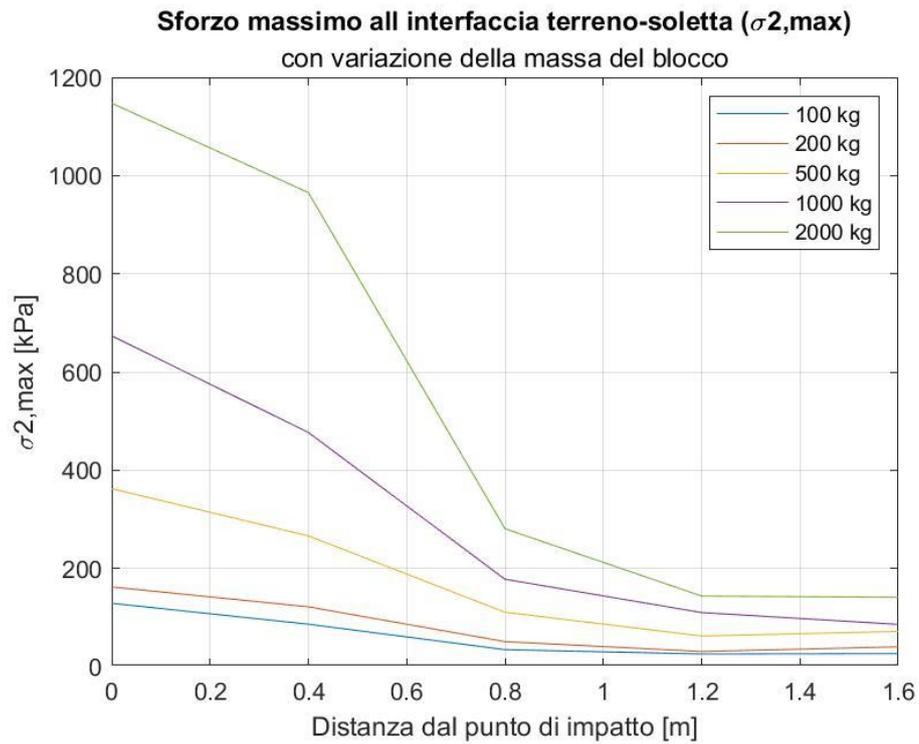


Figura 5.24: Sforzo massimo all'interfaccia terreno soletta in funzione della distanza dal centro, con variazione della massa del blocco.

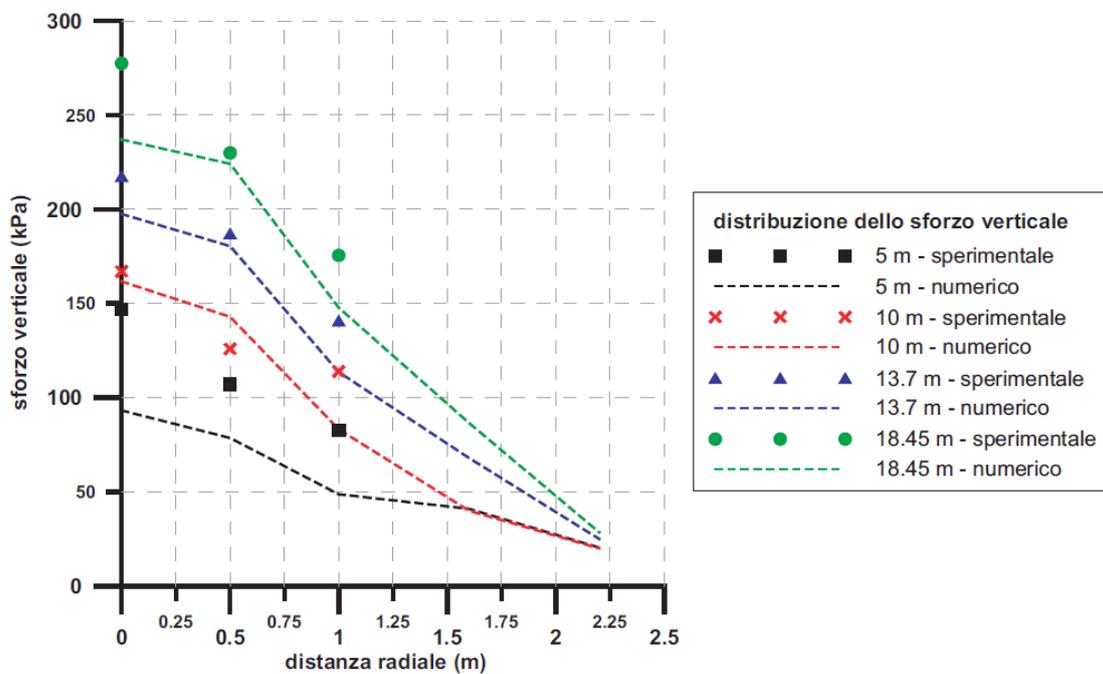
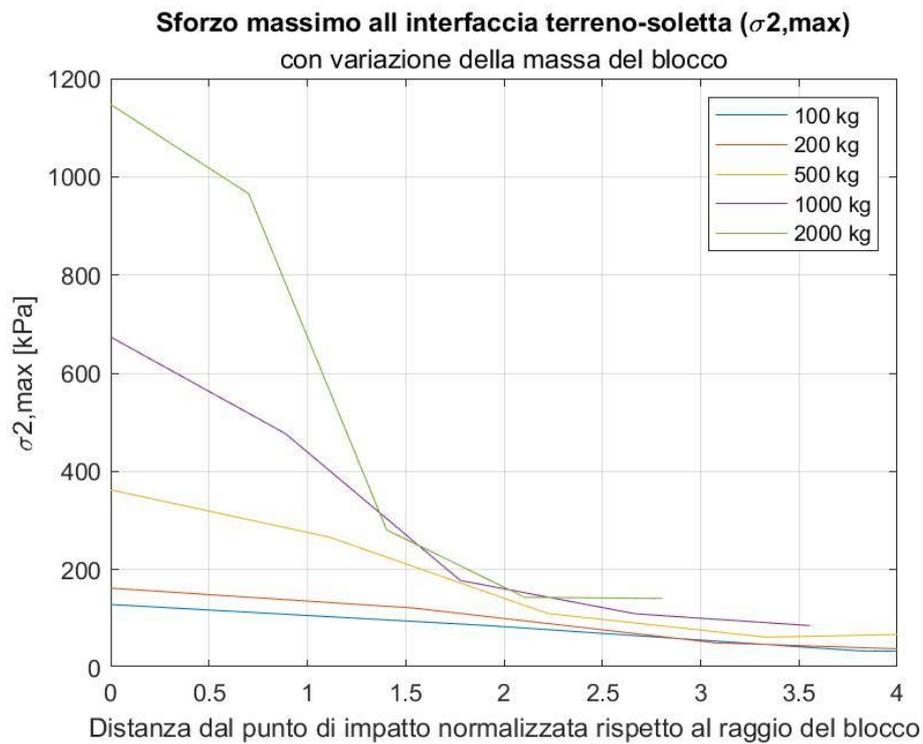


Figura 5.25: Sollecitazioni al fondo della vasca di prova di Bovisa (sperimentale) ed ottenute con modello DEM (numerico) al variare dell'altezza di caduta (Calvetti et al., 2005).

Per una miglior analisi dello sforzo massimo all' interfaccia con la soletta si è normalizzato l'asse delle ascisse del grafico dividendo i valori per il raggio del blocco impattante, ottenendo il grafico in *Figura 5.26*. Da questa rappresentazione si nota che l'angolo di diffusione tende a diminuire all'aumentare della massa del blocco e quindi anche del raggio dello stesso. Il raggio del blocco maggiore tende a far aumentare la massa che viene mobilizzata durante l'impatto come è possibile vedere in *Figura 7.2*.



*Figura 5.26: Sforzo massimo all'interfaccia terreno soletta in funzione della distanza dal centro normalizzata sul raggio del blocco, con variazione della massa del blocco*

La reazione vincolare, come ci si aspettava visto l'andamento delle altre forze in gioco durante l'impatto, cresce all'aumentare della massa del blocco. Anche in questo caso vi è un andamento particolare per i blocchi di 1'000 e 2'000 kg.

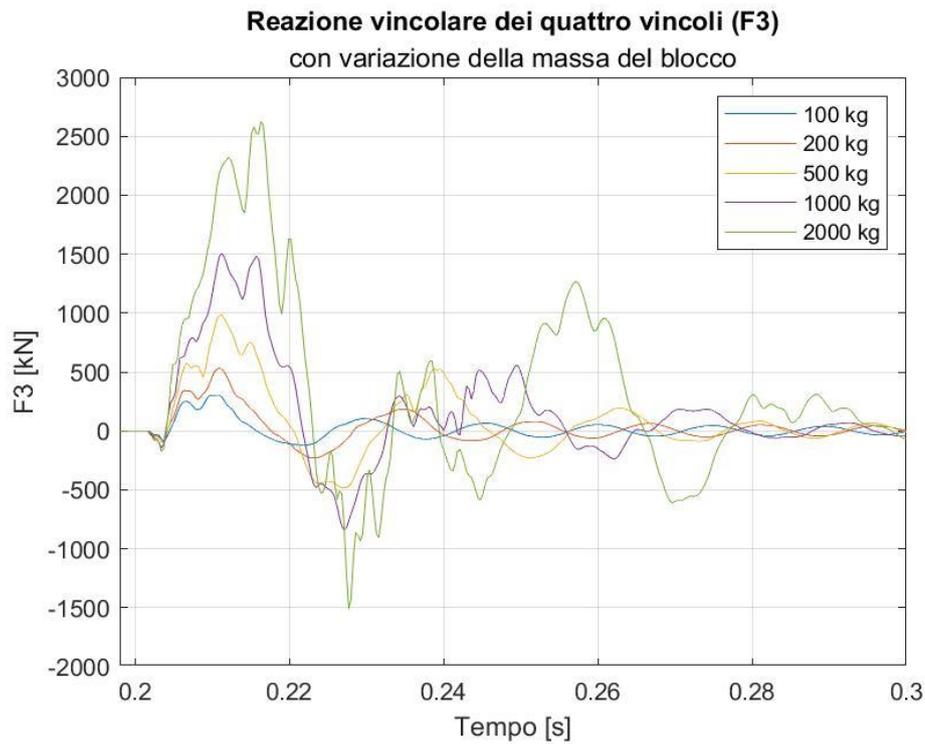


Figura 5.27: Reazione vincolare dei quattro vincoli con variazione della massa del blocco.

Le tendenze di tutti i parametri presi in considerazione ricalcano perfettamente quelle trovate da Montani et al. (2004) e riportate in *Tabella 4.5*. in generale tutti gli sforzi tendono ad aumentare al crescere dell' peso del blocco, gli unici rapporti inversamente proporzionali sono quelli legati all' accelerazione ed all' angolo di diffusione degli sforzi dove il loro valore diminuisce aumentando le dimensioni del blocco.

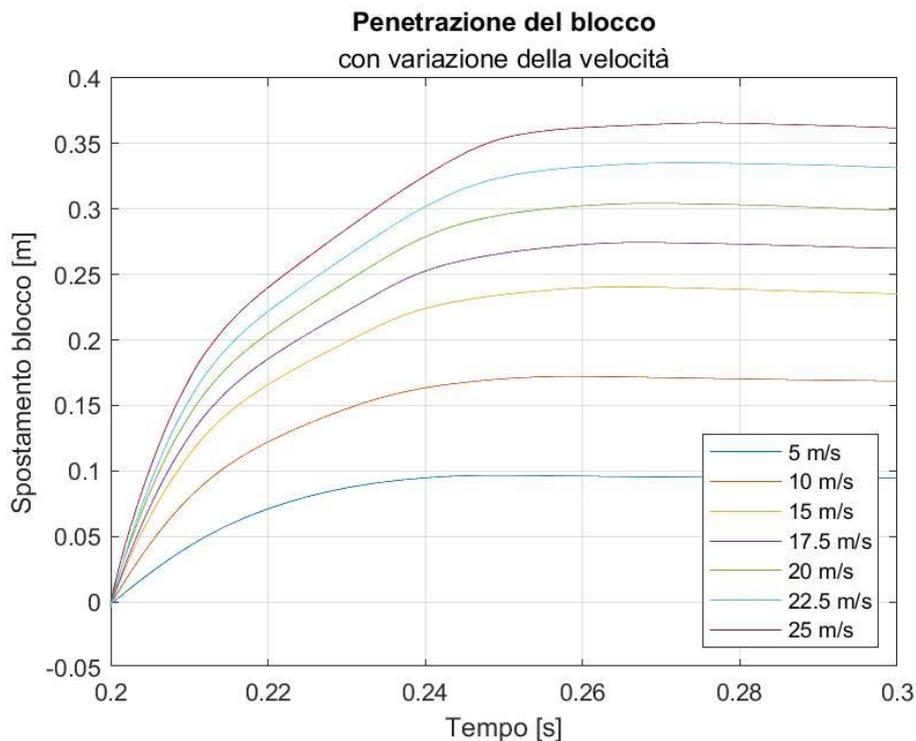
### 5.4.2 Variazione della velocità e dell'altezza di caduta del blocco

Il secondo parametro soggetto a variazione è la velocità di impatto del blocco e conseguentemente anche la sua altezza di caduta. Le energie di impatto di queste simulazioni vengono indicate in *Tabella 5.8*.

*Tabella 5.8: Energie di impatto nell'analisi di variazione della velocità di impatto e dell'altezza di caduta.*

Simulazione	Velocità [m/s]	Altezza di caduta [m]	Energia [kJ]
7	5	1.27	6.25
8	10	5.10	25.00
4	15	11.47	56.25
9	17.5	15.61	76.56
10	20	20.39	100.00
11	22.5	25.80	126.56
12	25	31.86	156.25

La penetrazione del blocco aumenta all'aumentare della velocità di impatto (*Figura 5.28 e Figura 7.4*).



*Figura 5.28: Penetrazione del blocco con variazione della velocità.*

Seppur meno evidente che per i blocchi di grande dimensione, anche quelli con grandi velocità di impatto tendono ad avere un lasso temporale a velocità costante dove l'accelerazione (*Figura 5.30*), e quindi anche la forza di impatto (*Figura 5.31*), si annullano per poi aumentare nuovamente generando un secondo picco. Il plateau tende ad avere durata

maggiore per velocità di impatto più grandi. Similmente con le simulazioni con variazione della massa i plateau si verificano sempre per velocità inferiori a 5 m/s.

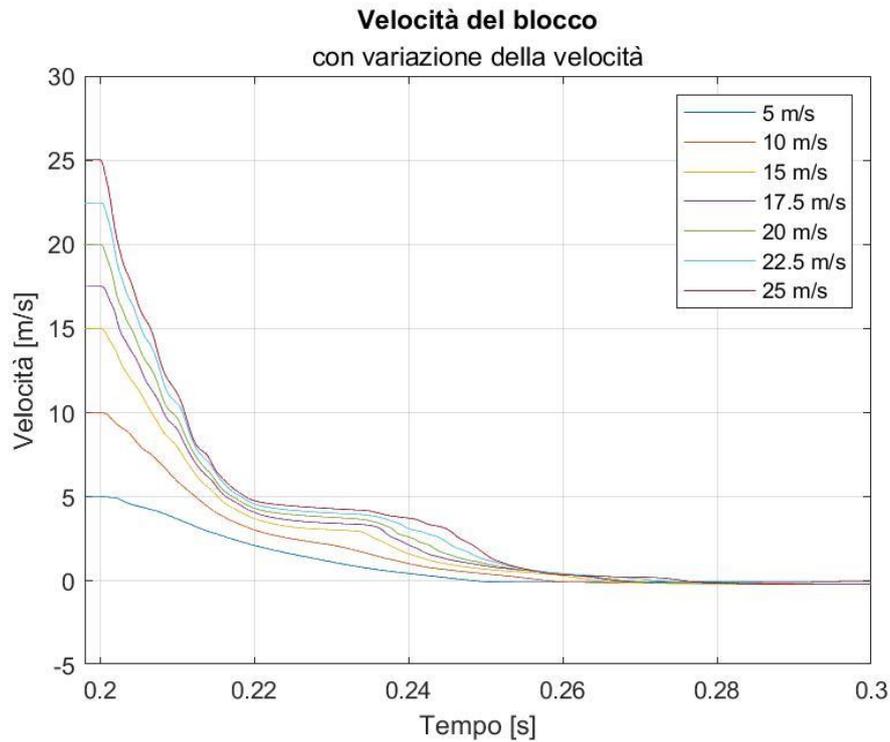


Figura 5.29: Velocità del blocco con variazione della velocità.

Ovviamente in questo caso, dato che i blocchi hanno tutti la stessa massa, al crescere dell'accelerazione cresce anche la forza di impatto. Anche questi due dati sono direttamente proporzionali alla velocità di impatto ovvero all'aumentare di quest'ultima aumentano anche accelerazione e forza di impatto massimi.

Come nelle simulazioni effettuate da Calveti et al. (2005) (Figura 5.32) la forma delle curve della forza di impatto, ottenute variando la velocità, è molto simile e vanno unicamente ad aumentare i valori raggiunti da essa.

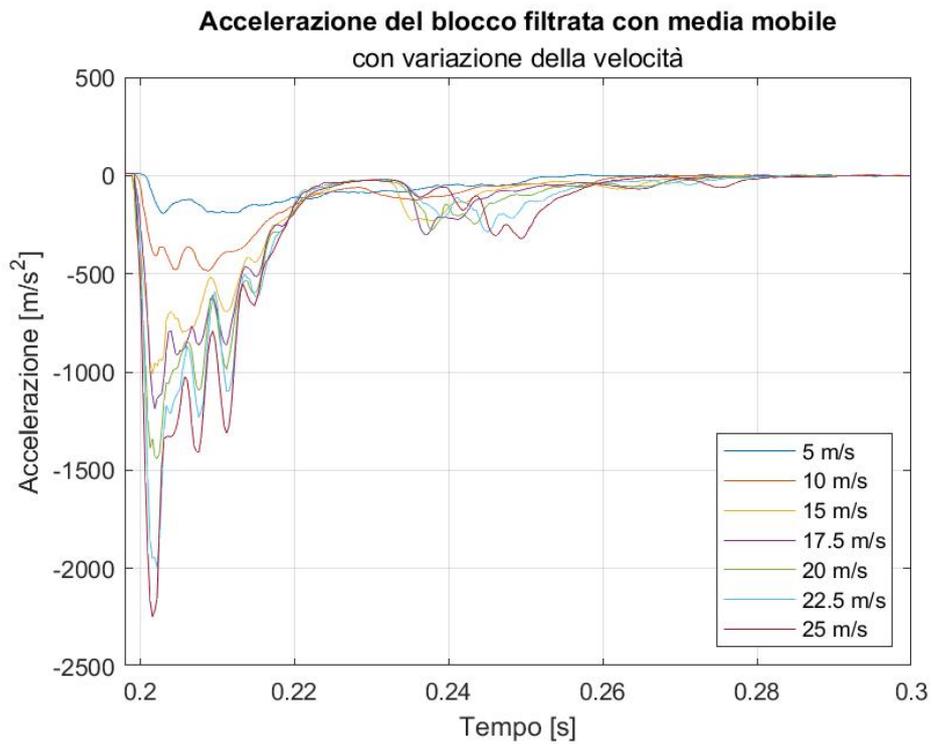


Figura 5.30: Accelerazione del blocco con variazione della velocità.

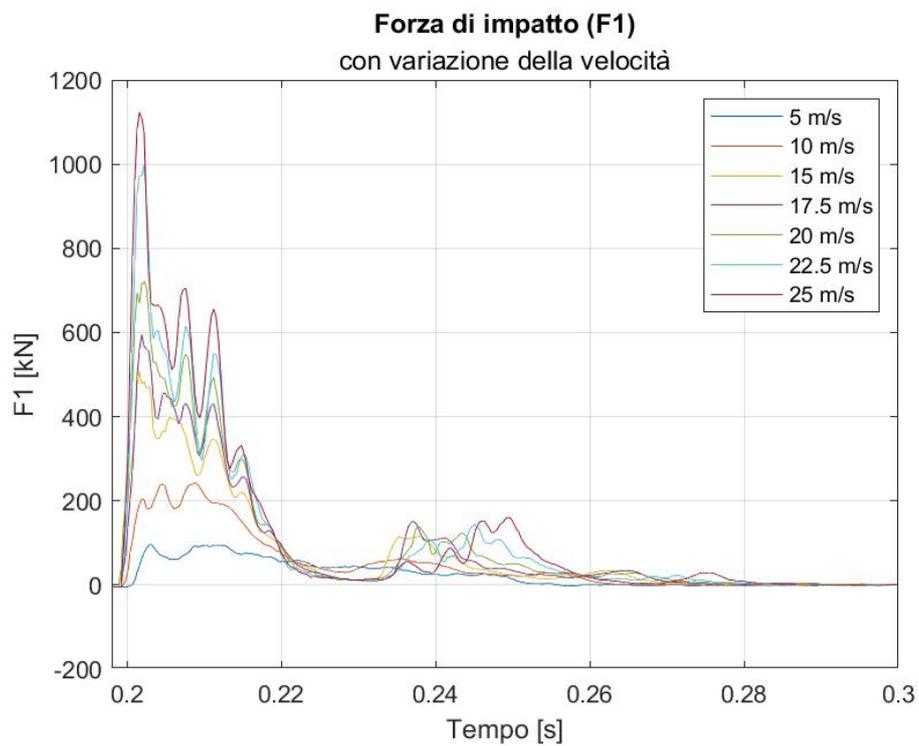


Figura 5.31: Forza di impatto con variazione delle velocità.

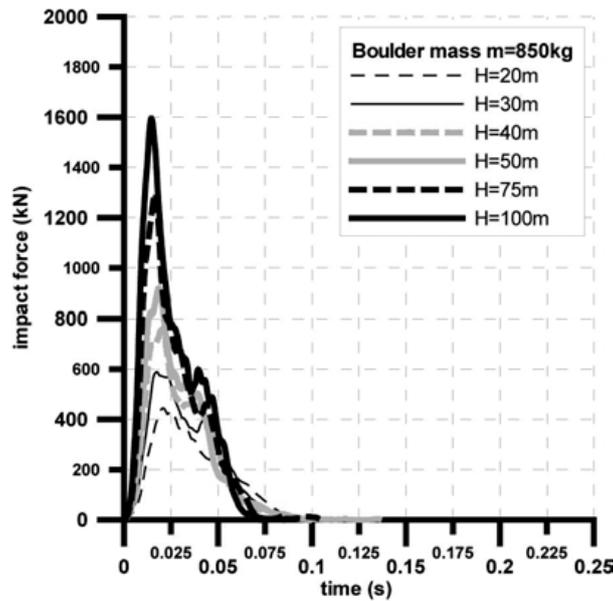


Figura 5.32: Grafico variazione altezza di caduta con blocco da 850 kg (Calveti et al., 2005).

Gli sforzi tra terreno e soletta aumentano all'aumentare della velocità di impatto (Figura 5.33, Figura 7.6 e Figura 7.7), i risultati risultano essere molto altalenanti specialmente nel primo picco della curva, che, per gli impatti ad energia maggiore, è composto da tre massimi differenti tutti all'incirca dello stesso valore. Anche negli sforzi è possibile osservare un secondo picco.

La diffusione degli sforzi sulla soletta (Figura 5.34) è per lo più uniforme per tutte le prove, non vi è un grande cambiamento dell'angolo di diffusione al variare della velocità di impatto.

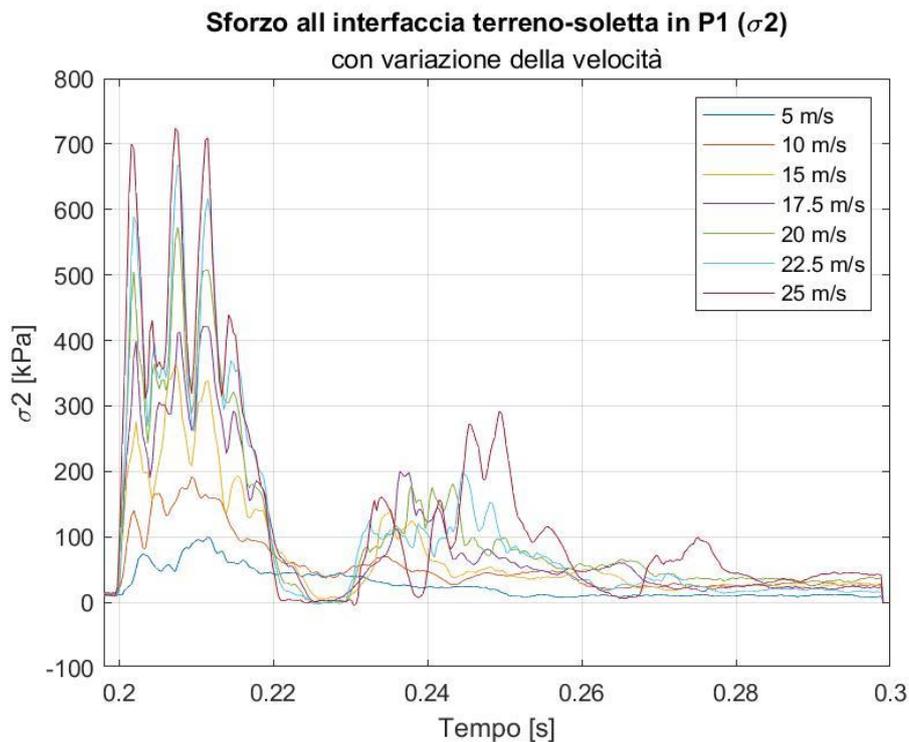


Figura 5.33: Sforzo all'interfaccia terreno-soletta in P1 con variazione delle velocità.

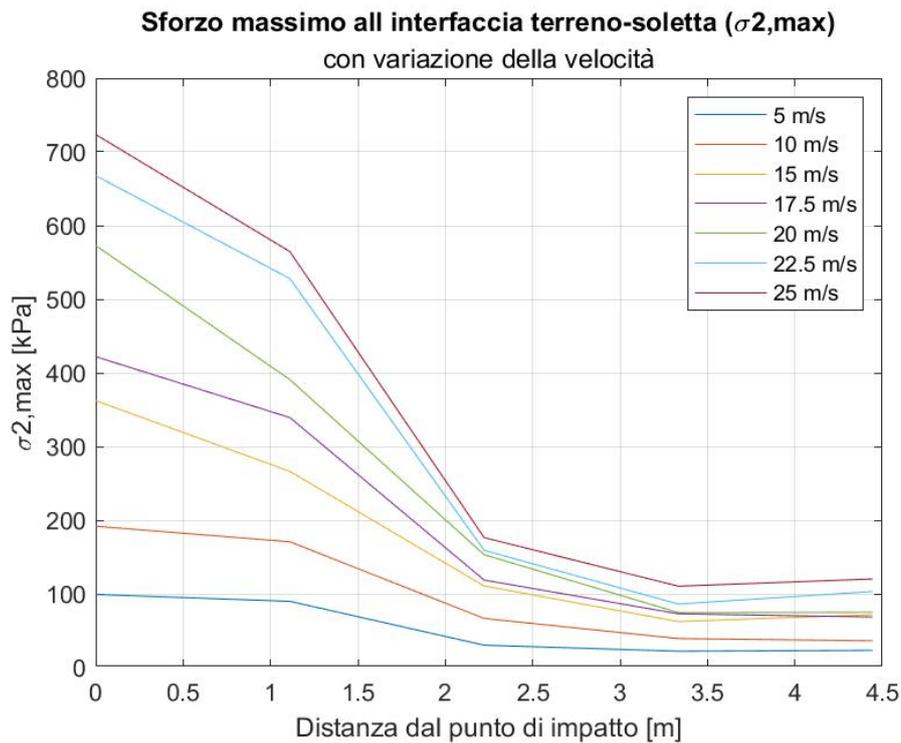


Figura 5.34: Sforzo massimo all'interfaccia terreno soletta in funzione della distanza dal centro, con variazione della velocità.

La reazione vincolare (Figura 5.35) cresce al crescere della velocità come anche la deformazione della soletta (Figura 5.36). Nella fase in cui si ha velocità costante e successivamente il secondo picco, ovvero tra 0.23 e 0.25 secondi entrambe le misure appena citate subiscono come un'inversione della curva. Questo avviene solo per velocità maggiori a 17.5 m/s.

In conclusione, gli effetti generali legati ad un aumento della velocità di impatto sono per molti aspetti molto simili a quelli legati ad un aumento della massa e del volume del blocco come anche ritrovato da Montani et al. (2004) (Tabella 4.5).

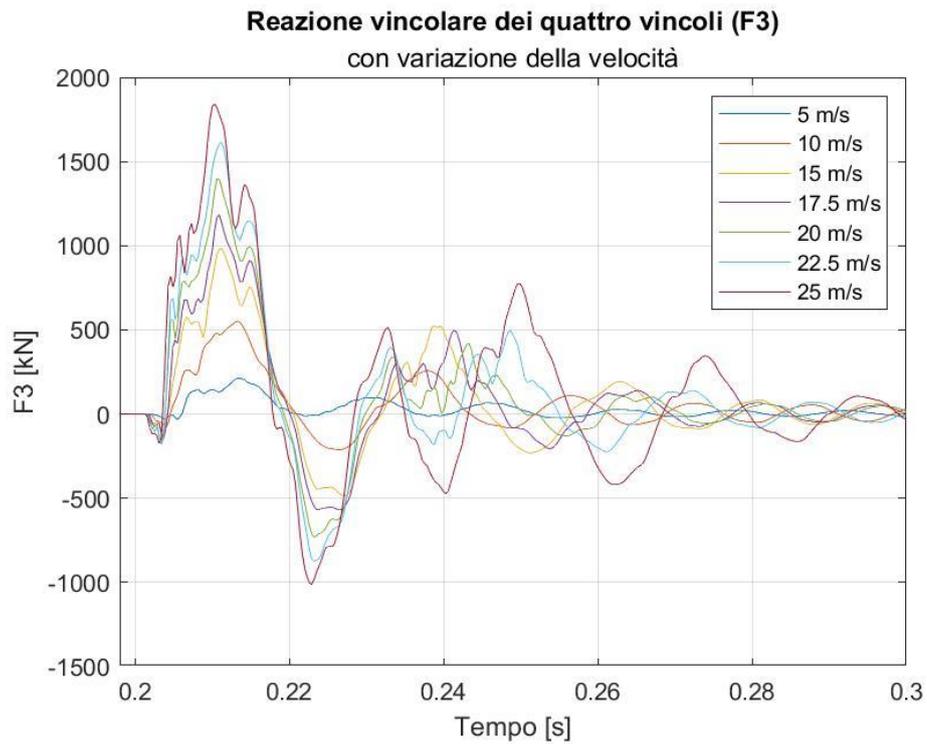


Figura 5.35: Reazione vincolare dei quattro vincoli con variazione della velocità.

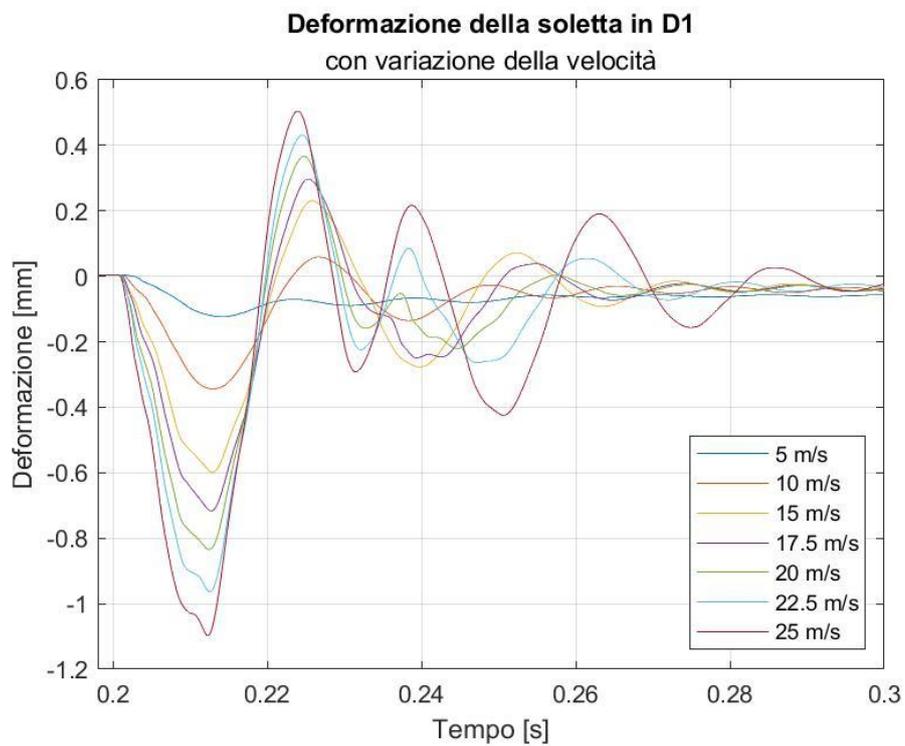


Figura 5.36: Deformazione della soletta in D1 con variazione della velocità.

### 5.4.3 Variazione dello spessore dello strato assorbente

Nelle simulazioni con la variazione dello spessore mantenendo costante massa e velocità di impatto (rispettivamente 500kg e 15 m/s) l'energia di impatto è la stessa per tutti i casi analizzati ed è pari a 56.25 kJ.

I risultati ottenuti evidenziano che per tutte le simulazioni forza di impatto (*Figura 5.40*), accelerazione (*Figura 5.39*), velocità del blocco (*Figura 5.38*) e penetrazione (*Figura 5.37 e Figura 7.8*) risultano essere pressoché identiche. Unica differenza si può notare nella penetrazione dove per uno strato assorbente di 50 centimetri le misure si discostano dalle altre evidenziando un affondamento del blocco leggermente maggiore. Tuttavia, la penetrazione per lo strato più sottile risulta essere rilevante se rapportata con lo spessore dello stesso, infatti, il blocco penetra per circa metà dell'intero spessore.

Anche nelle simulazioni effettuate in Calvetti et al (2005) al variare dello spessore dello strato la forza di impatto rimane la stessa, nell'articolo si evidenzia unicamente la comparsa di un secondo picco per gli strati più sottili (*Figura 4.30*). Anche in queste simulazioni per gli strati di spessore inferiore (specialmente 0.5 e 1 metro) è ben visibile un secondo picco della forza di impatto.

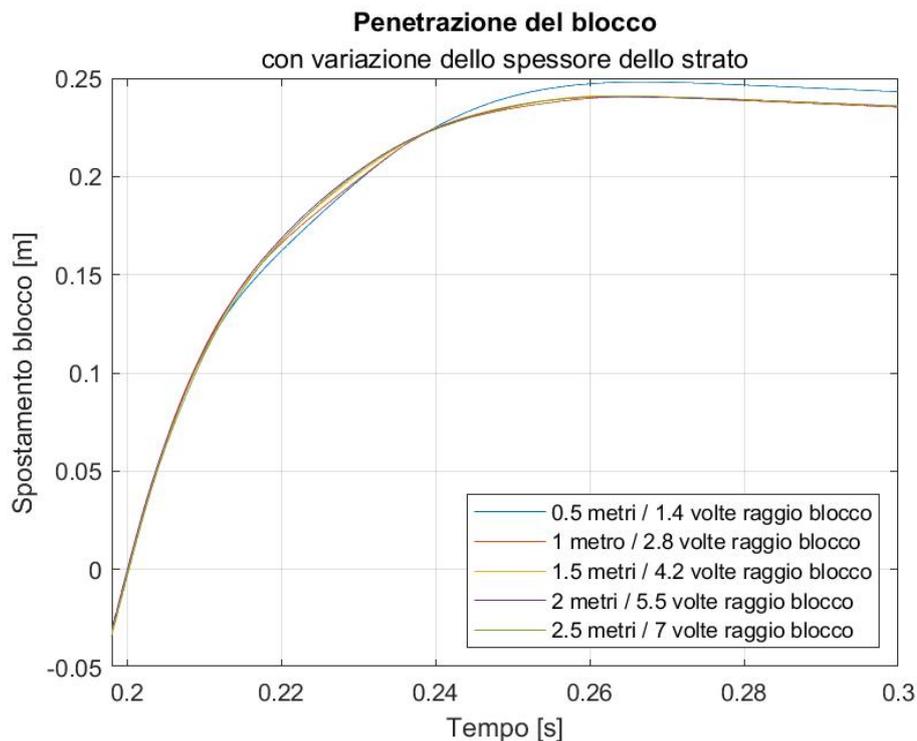


Figura 5.37: Penetrazione del blocco con variazione dello spessore dello strato.

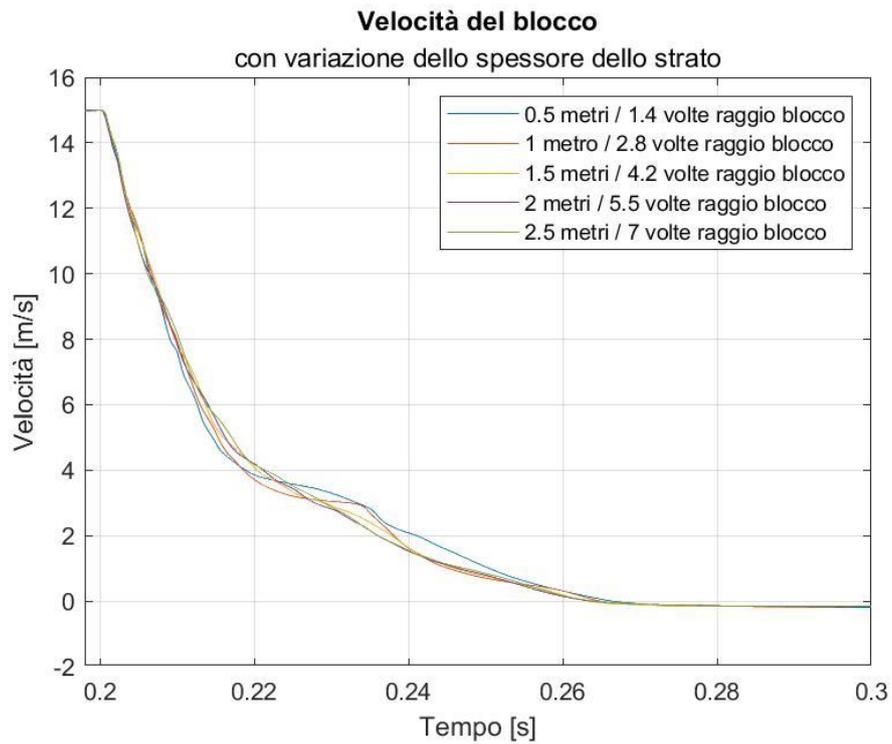


Figura 5.38: Velocità del blocco con variazione dello spessore dello strato.

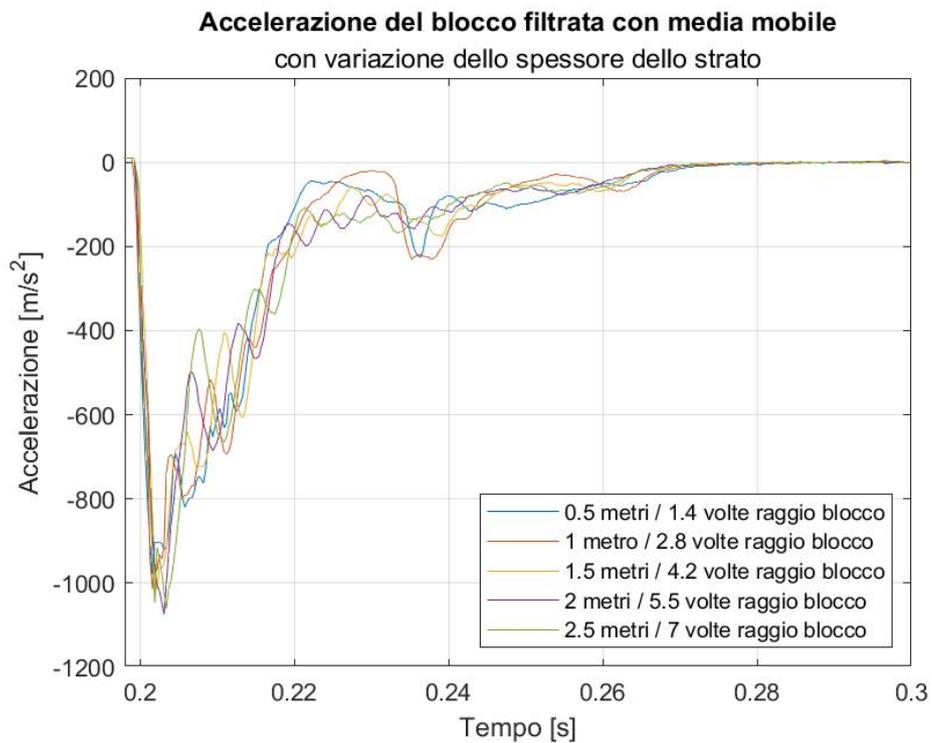


Figura 5.39: Accelerazione del blocco con variazione dello spessore dello strato.

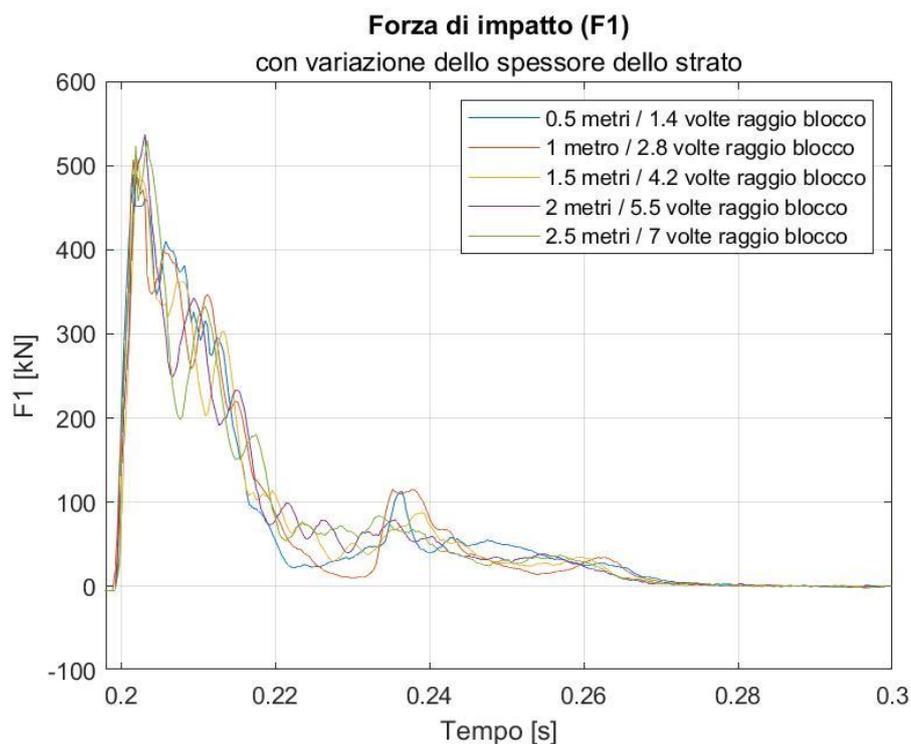


Figura 5.40: Forza di impatto con variazione dello spessore dello strato.

Osservando, invece, lo sforzo sulla soletta si può capire quanto sia importante l'utilizzo di uno strato assorbente adeguato sulle gallerie paramassi. Come è possibile vedere in *Figura 5.41* lo sforzo aumenta esponenzialmente al diminuire dello spessore. Addirittura, il dimezzamento dello spessore da un metro a 50 centimetri causa sollecitazioni al centro della soletta più di tre volte maggiori. Questo è dovuto soprattutto alla ridotta area su cui viene distribuita l'azione dell'impatto. Infatti, come mostra il grafico in *Figura 5.42* tutti gli sforzi sono contenuti nel raggio di 80 centimetri dal centro della soletta, mentre per strati più potenti gli sforzi legati all'impatto sono più diffusi ed i valori massimi raggiunti dal centro della soletta sono particolarmente ridotti.

Come viene affermato anche in Ouyang et al. (2019) non è produttivo aumentare eccessivamente lo spessore dello strato assorbente. Infatti, gli sforzi per spessori maggiori a 1,5 metri non diminuiscono di molto in riferimento a un blocco di progetto di 500 kg. Questo rende inefficace l'utilizzo di strati di 2 o 2,5 metri per condizioni analoghe a quelle prese in considerazione in questo caso studio soprattutto a fronte di un aumento del peso proprio della struttura stessa *Tabella 5.9*.

Tabella 5.9: Peso dello strato assorbente al variare dello spessore.

Simulazione	Spessore [m]	Peso per unità di superficie [kN/m <sup>2</sup> ]	Peso dello strato del modello [kN]
13	0.5	8.78	140.48
4	1	17.56	280.96
14	1.5	26.34	421.44
15	2	35.12	561.92
16	2.5	43.90	702.40

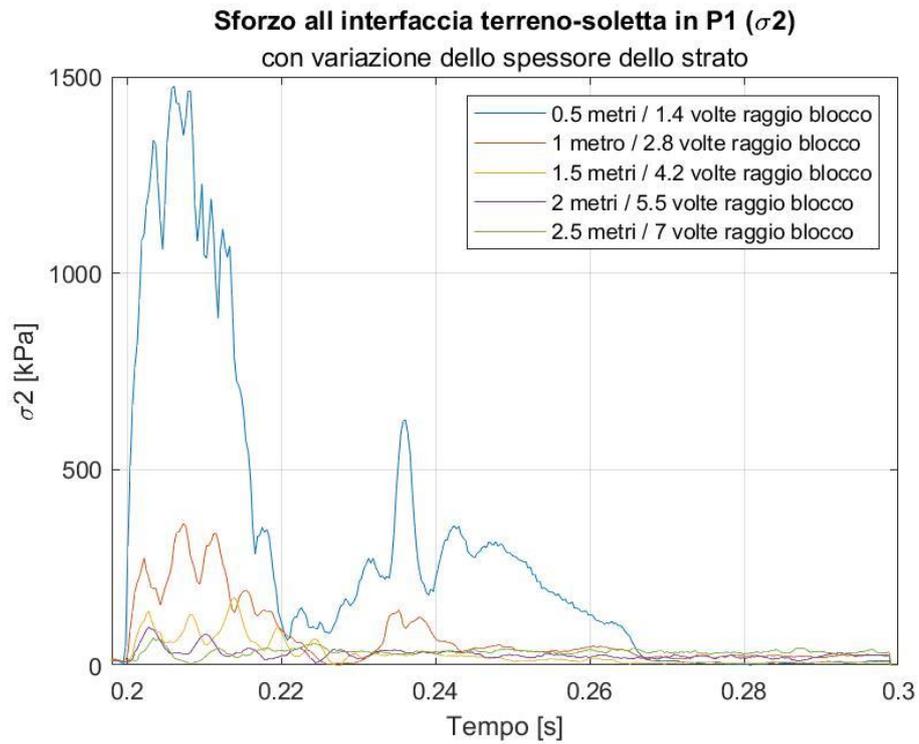


Figura 5.41: Sforzo all'interfaccia terreno-soletta in P1 con variazione dello spessore dello strato.

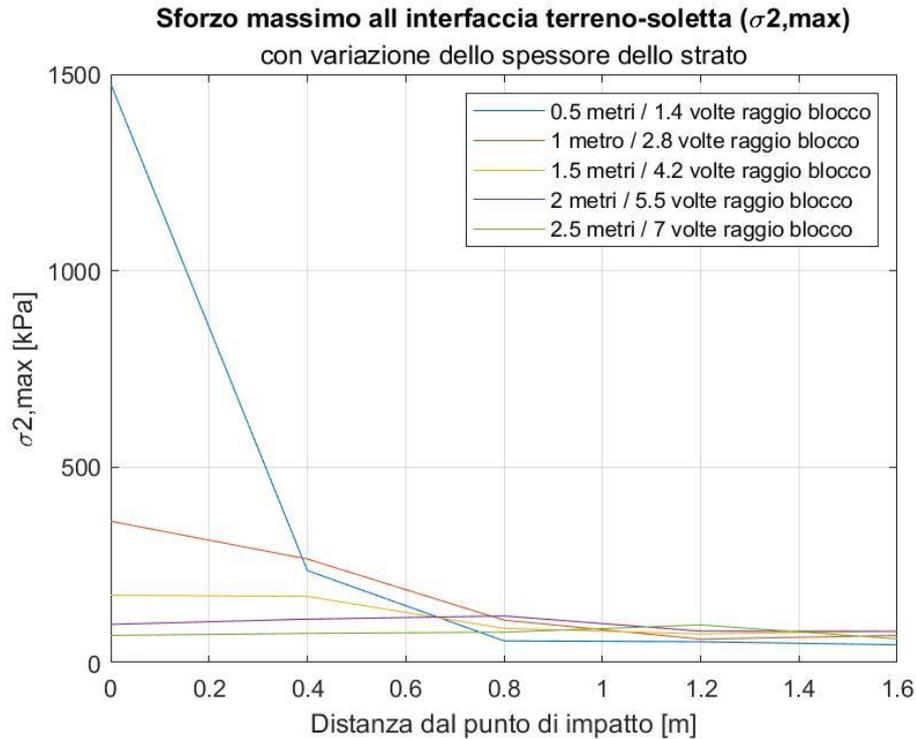


Figura 5.42: Sforzo massimo all'interfaccia terreno-soletta in funzione della distanza dal centro, con variazione dello spessore dello strato.

Nel calcolo della reazione vincolare le misure sono state sgravate dal peso del modello andando così ad analizzare unicamente gli effetti dell'impatto. Come è possibile vedere in *Figura 5.43* l'entità delle reazioni vincolari causate dall'impatto è comparabile per tutte le simulazioni e diminuisce solo leggermente all'aumentare dello spessore.

Per quanto riguarda le deformazione (*Figura 5.44*) questa aumenta al diminuire dello spessore dello strato, in queste simulazioni vi però è una peculiarità in quanto, nonostante sia stata rimossa la deformazione iniziale dovuta all'azione della gravità e quindi data dal peso della soletta e dello strato assorbente, successivamente all'impatto la soletta va a stabilizzarsi ed oscillare attorno ad una posizione più deformata all'aumentare dello spessore dello strato assorbente.

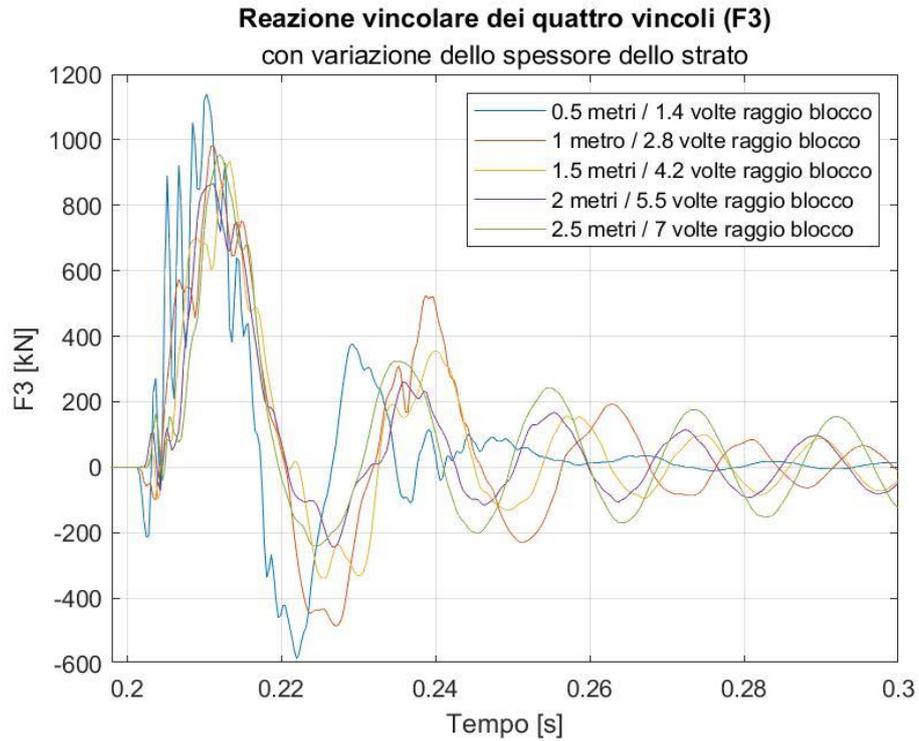


Figura 5.43: Reazione vincolare dei quattro vincoli con variazione dello spessore dello strato.

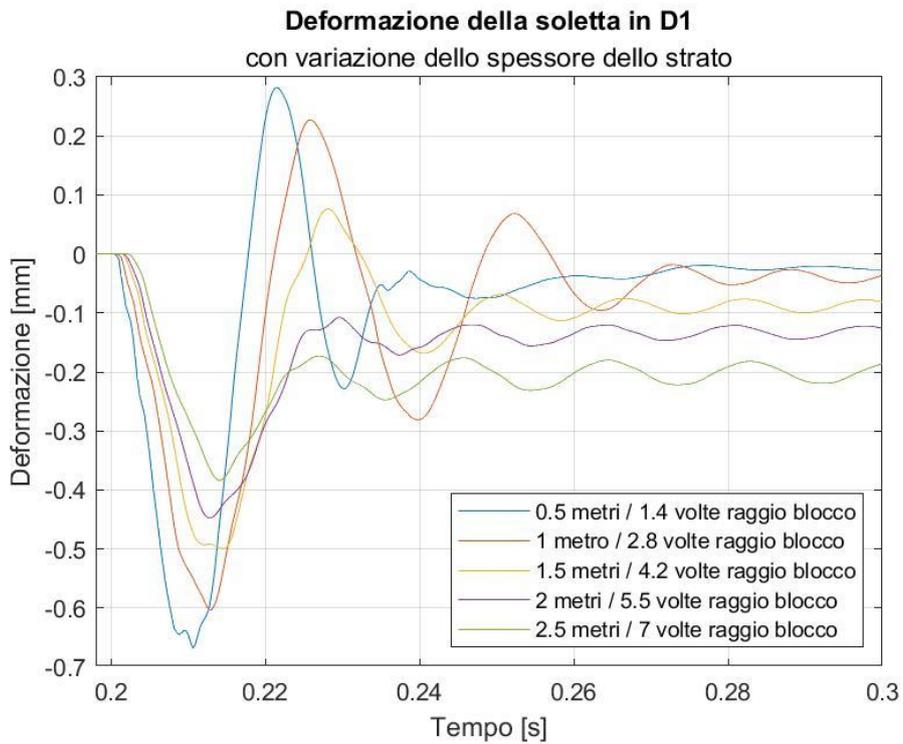


Figura 5.44: Deformazione della soletta in D1 con variazione dello spessore dello strato.

#### 5.4.4 Variazione dello spessore della soletta

In queste tre simulazioni, come in quelle con variazione dello spessore dello strato, l'energia di impatto è sempre la stessa ed è pari a 56.25 kJ. Analizzando la variazione delle azioni al variare dello spessore della soletta si può constatare se anche la struttura in calcestruzzo armato, di cui si compone la galleria, ha effetti sull'assorbimento dell' impatto.

Partendo dalla penetrazione (*Figura 5.45 e Figura 7.11*), si può osservare come questa aumenta leggermente all' aumentare dello spessore della soletta, questo può essere dovuto da un minor assorbimento energetico da parte della soletta che essendo più spessa risulta essere anche più rigida.

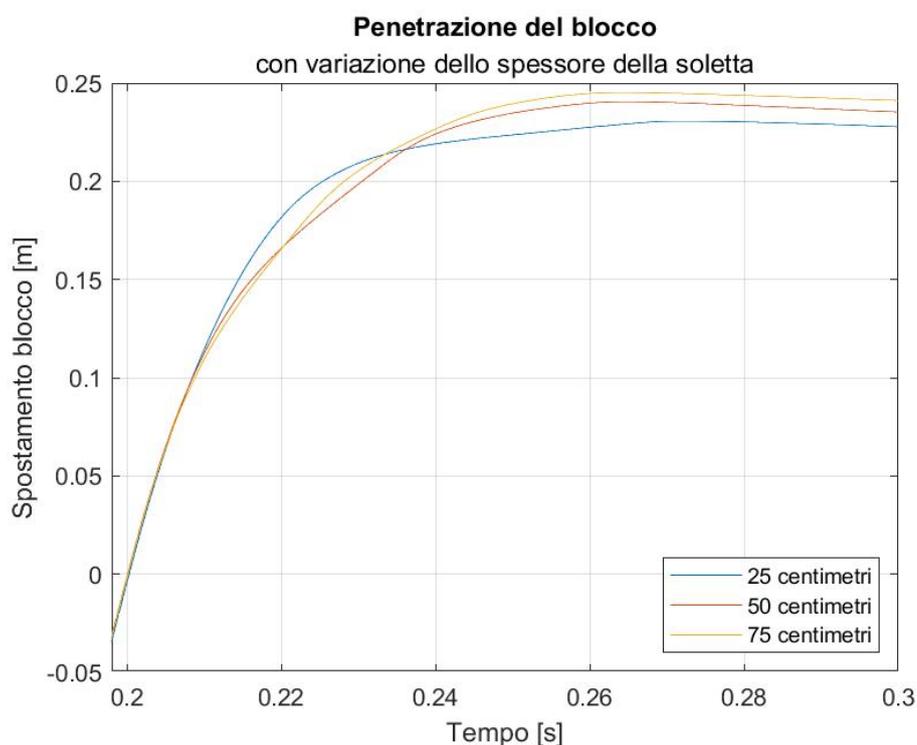


Figura 5.45: Penetrazione del blocco con variazione dello spessore della soletta.

Valutando la velocità del blocco (*Figura 5.46*) si può chiaramente vedere come la parte della curva che tende ad avere valori costanti si sposta nel tempo al variare dello spessore della soletta. In particolare, aumentando lo spessore la parte in piano della curva si sposta più indietro nel tempo. Osservando in parallelo le velocità con le deformazioni della soletta (*Figura 5.47*) si osserva una marcata corrispondenza tra il tratto a velocità costante e la seconda oscillazione verso il basso della soletta. Anche se meno marcata questa corrispondenza è visibile anche nella terza oscillazione verso il basso per le solette da 50 e 75 cm e solo per la più spessa anche nella quarta oscillazione. Questa corrispondenza si può notare anche nelle simulazioni con variazione della massa e della velocità però in questo caso avendo periodi di oscillazione differenti la corrispondenza è nettamente più evidente. Anche in questo caso i plateau hanno durate differenti per le diverse condizioni. In particolare, al crescere dello spessore della soletta il plateau ha una durata inferiore.

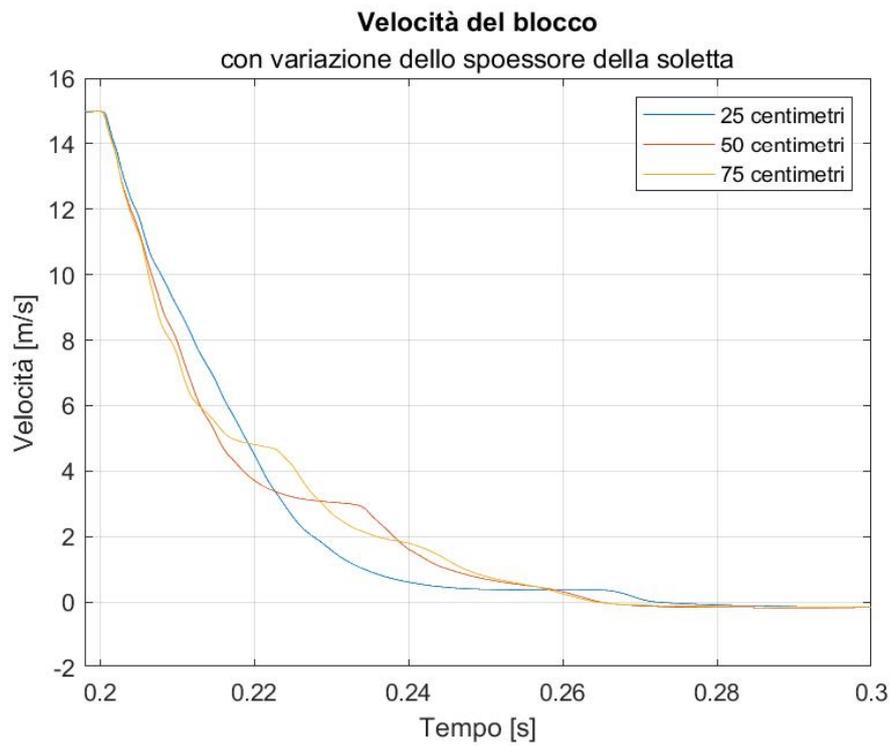


Figura 5.46: Velocità del blocco con variazione dello spessore della soletta.

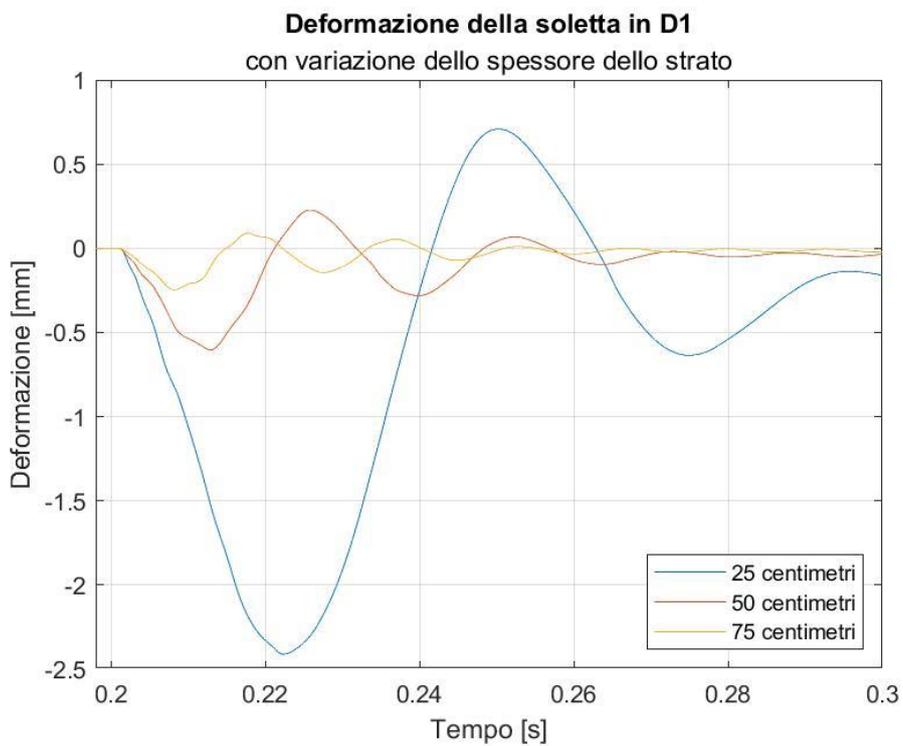
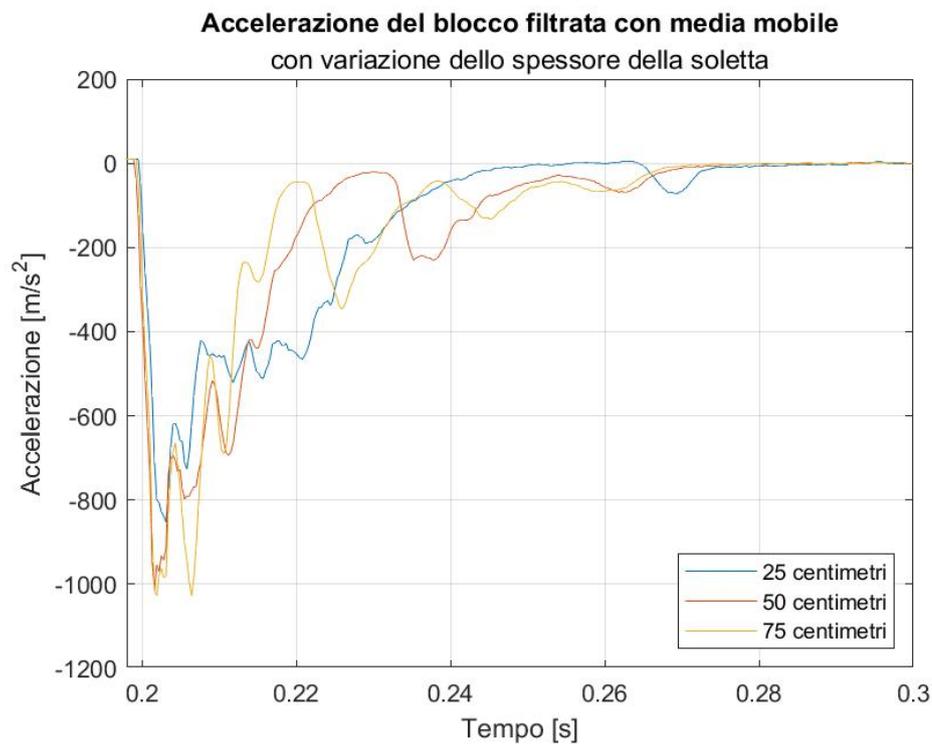


Figura 5.47: Deformazione della soletta in D1 con variazione dello spessore della soletta.

L'accelerazione del blocco (*Figura 5.48*) mostra anch'essa il legame tra i diversi picchi e l'oscillazione della soletta. Il picco è sempre in corrispondenza della fine dell'oscillazione verso il basso e, ovviamente, nella fase in cui la velocità tende a decrescere nuovamente.

La forza di impatto (*Figura 5.49*) massima raggiunta risulta essere la stessa per le due solette di spessore maggiore mentre per quella da 25 centimetri il valore massimo risulta essere leggermente inferiore.

Il numero dei picchi aumenta all'aumentare dello spessore della soletta, questo è dovuto dal fatto che il periodo di oscillazione del modello diminuisce per solette più spesse. Questo comporta che prima che il blocco si arresti completamente si hanno più cicli di oscillazione per le solette più rigide di spessore maggiore.



*Figura 5.48: Accelerazione del blocco con variazione dello spessore della soletta.*

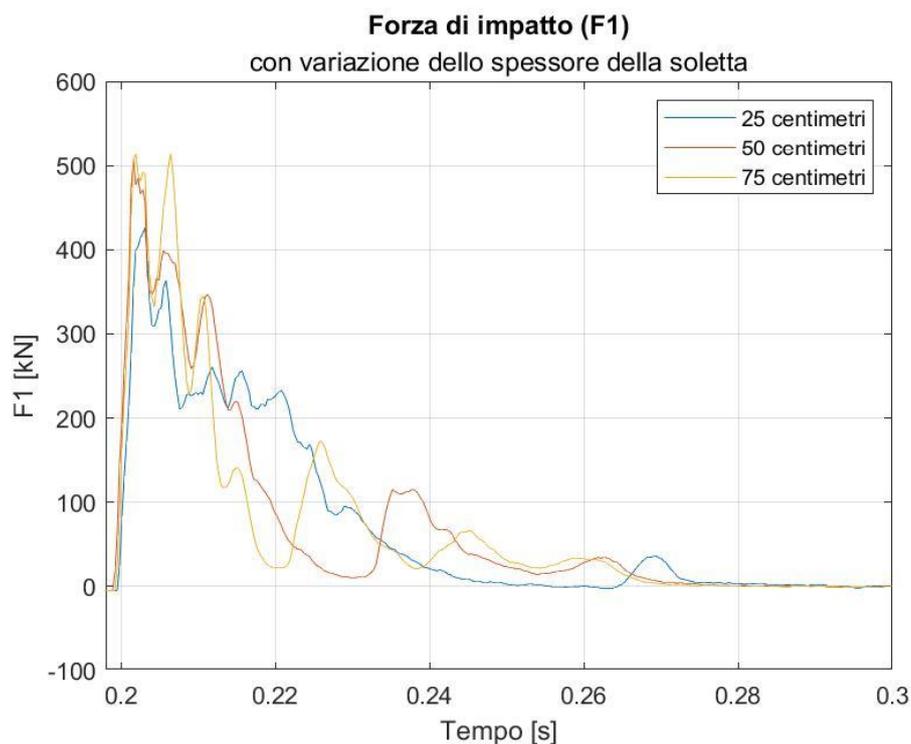


Figura 5.49: Forza di impatto con variazione dello spessore della soletta.

Un fattore che viene influenzato dalla variazione di spessore della soletta è lo sforzo all' interfaccia con lo strato assorbente mostrato in *Figura 5.50* e *Figura 7.13*. Le azioni agenti sulla soletta aumentano all' aumentare della stessa questo è probabilmente legato a una sua minor deformazione e quindi un minor assorbimento.

In più lo sforzo nella soletta più sottile è localizzato in un' area minore rispetto che nelle solette più spesse come è possibile osservare in *Figura 5.51*.

Come avviene per gli sforzi all' interfaccia anche la reazione vincolare (*Figura 5.52*) diminuisce al diminuire dello spessore della soletta.

Quindi in conclusione, come affermato anche in Montani et al (2004) (dov' erano stati valutati impatti al variare della rigidità del sistema *Tabella 4.5*) al fine di ridurre le sollecitazioni è utile avere solette più deformabili. Tale obiettivo deve però essere attentamente valutato in fase di progettazione in quanto bisogna avere grande deformabilità ma senza entrare in campo plastico, rimanendo in deformazioni elastiche in modo che una volta terminato l' effetto dell' impatto la soletta torni nella sua posizione iniziale senza una deformazione permanente legata ad un evitabile danneggiamento della struttura.

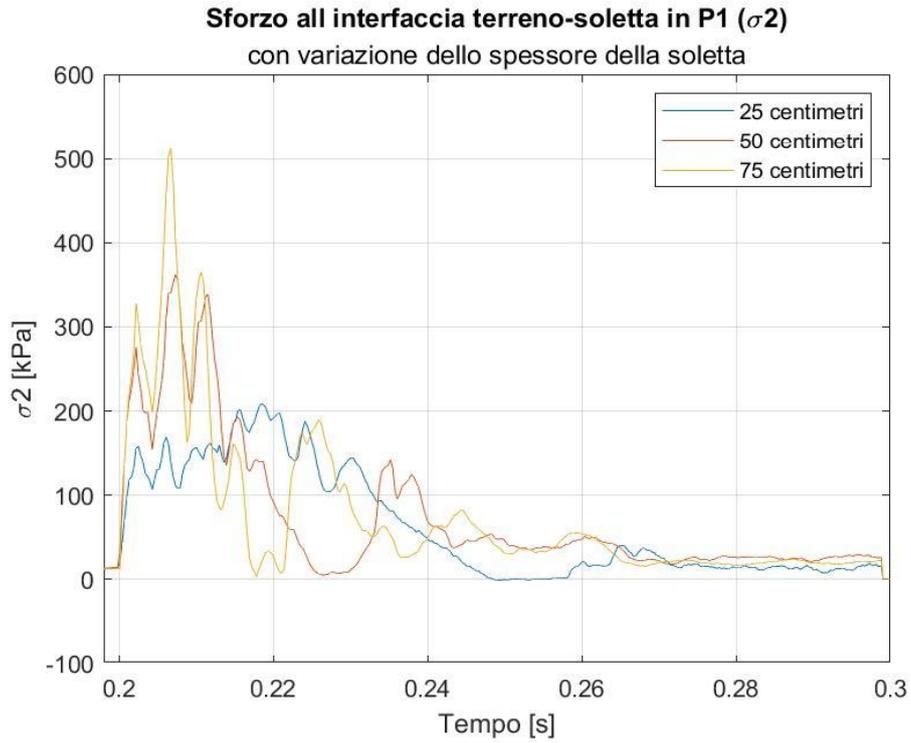


Figura 5.50: Sforzo all'interfaccia terreno-soletta in P1 con variazione dello spessore della soletta.

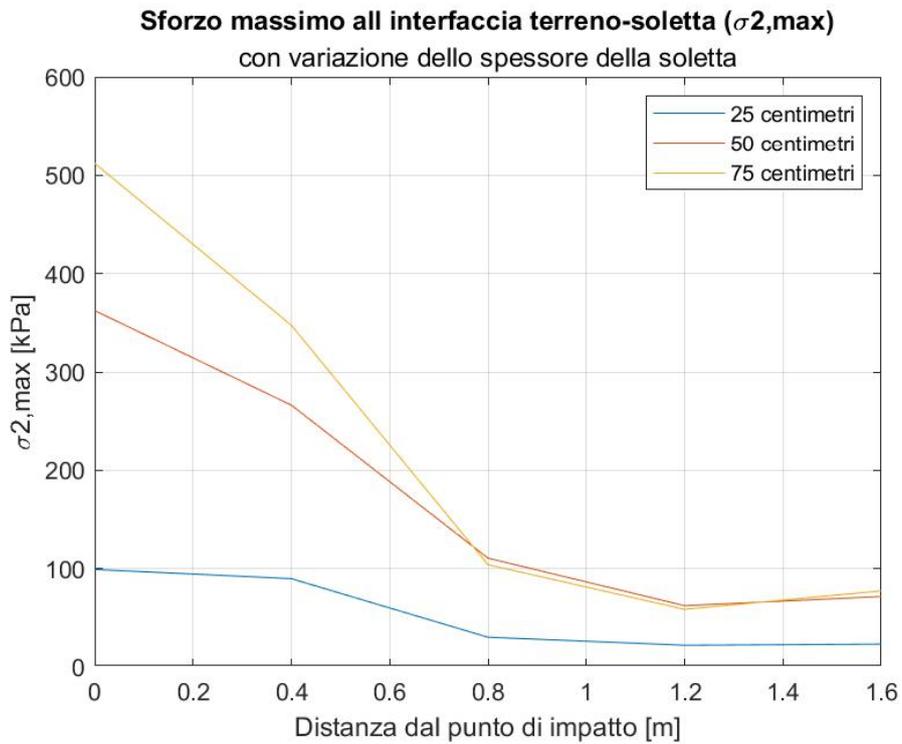


Figura 5.51: Sforzo massimo all'interfaccia terreno-soletta in funzione della distanza dal centro, con variazione dello spessore della soletta.

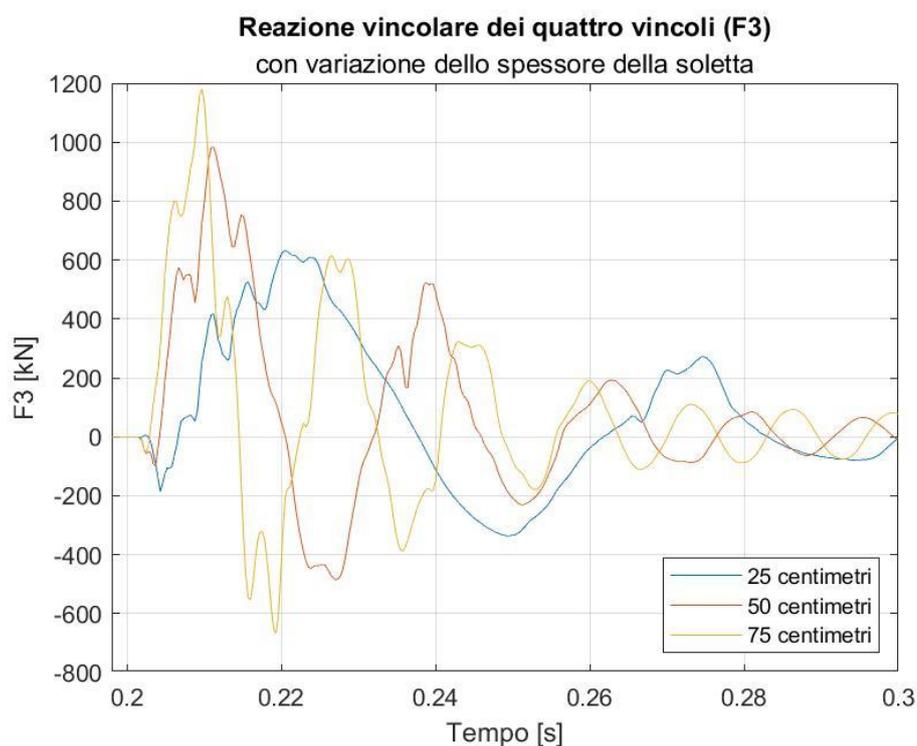


Figura 5.52: Reazione vincolare dei quattro vincoli con variazione dello spessore della soletta.

#### 5.4.5 Considerazioni finali sullo studio di sensitività

Lo studio di sensitività ha confermato molti degli aspetti esaminati nell'analisi bibliografica di questa tesi. Per prima cosa si è visto che la massa e la velocità di impatto del blocco sono gli aspetti che influiscono, come ci si poteva aspettare, maggiormente nella variazione delle azioni agenti sulla soletta. Al variare di questi due parametri, ovvero variano l'energia di impatto, tutte le misure tendono a subire delle variazioni. Invece per quanto riguarda le variazioni legate agli spessori dello strato assorbente e della soletta, le simulazioni evidenziano come il cambiamento di questi parametri non va ad influire su tutte le misure prese in considerazione.

In particolare, si può dire che lo spessore dello strato assorbente influenza soprattutto gli sforzi all'interfaccia terreno soletta e l'impronta su cui questi sforzi si vanno a distribuire.

Lo spessore della soletta, invece, influenza sia gli sforzi all'interfaccia che le reazioni vincolari agenti sulla soletta.

In seguito in *Tabella 5.10* verranno messi a confronto i risultati ottenuti da Montani et al. (2004) (*Tabella 4.5: Andamento delle varie misure in funzione della variazione dei parametri (Montani et al., 2004). Tabella 4.5*) con quelli ricavati dalle simulazioni condotte in questa tesi. La maggior parte dei risultati ottenuti corrispondono. Le uniche divergenze sono:

- la forza 1 all'aumentare dello spessore dello strato non cambia mentre invece per Montani questa diminuisce all'aumentare dello spessore;
- il tempo di impatto nelle simulazioni non è strettamente dipendente con la potenza dello strato di terreno al contrario di Montani dove questo diminuisce all'aumentare dello spessore;

- penetrazione del blocco risulta diminuire all'aumentare dello spessore del materiale mentre in Montani rimane costante;
- al variare dello spessore della soletta Montani non ha indicato tendenze specifiche per forza 3, deformazione della soletta e periodo di oscillazione;
- angolo di diffusione e tempo di impatto risultano essere costanti all'aumentare dello spessore della soletta mentre per Montani l'angolo aumenta ed il tempo diminuisce.

Aver potuto confrontare l'analisi di sensitività con gli esperimenti effettuati in laboratorio dal Politecnico di Losanna è stato utile per analizzare le differenze tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti con il modello numerico agli elementi finiti oggetto di questa tesi. I risultati ottenuti, come detto in precedenza possono offrire un ulteriore punto di vista e di partenza per la valutazione delle azioni agenti sulle gallerie paramassi.

Tabella 5.10: Confronto dei risultati ottenuti in questa tesi con quelli ricavati da Montani et al. (2004).

$\nearrow$ = all'aumentare del parametro (colonna) la misura (riga) aumenta	$\searrow$ = all'aumentare del parametro (colonna) la misura (riga) diminuisce
- = all'aumentare del parametro (colonna) la misura (riga) non cambia	
$\nearrow$ - $\searrow$ = risultati Montani et al. (2004)	$\nearrow$ - $\searrow$ = risultati Tesi.

	Blocco		Strato assorbente	Struttura
	Peso $\nearrow$	Altezza di caduta $\nearrow$	Spessore $\nearrow$	Rigidità del sistema ( <b>spessore della soletta</b> ) $\nearrow$
<b>Forza 1</b>	$\nearrow$ $\nearrow$	$\nearrow$ $\nearrow$	$\searrow$ -	$\nearrow$ $\nearrow$
<b>Forza 2</b>	$\nearrow$ $\nearrow$	$\nearrow$ $\nearrow$	$\searrow$ $\searrow$	$\nearrow$ $\nearrow$
<b>Forza 3</b>	$\nearrow$ $\nearrow$	$\nearrow$ $\nearrow$	$\searrow$ $\searrow$	nessun dato $\nearrow$
<b>Spostamento</b>	$\nearrow$ $\nearrow$	$\nearrow$ $\nearrow$	$\searrow$ $\searrow$	nessun dato $\searrow$
<b>Angolo di diffusione</b>	$\searrow$ $\searrow$	- -	- -	$\nearrow$ -
<b>Tempo di impatto</b>	$\nearrow$ $\nearrow$	- -	$\searrow$ -	$\searrow$ -
<b>Periodo oscillazione</b>	- -	- -	$\nearrow$ $\nearrow$	nessun dato $\searrow$
<b>Penetrazione del blocco</b>	$\nearrow$ $\nearrow$	$\nearrow$ $\nearrow$	- $\searrow$	$\nearrow$ $\nearrow$

## 6 Conclusioni

Il rischio legato alla caduta massi è sempre più in aumento negli ultimi anni. Questa tendenza è dovuta sia all' aumento dell'urbanizzazione e della frequentazione di aree montuose e costiere sia all' surriscaldamento globale che, causando la fusione del permafrost, rende gli ammassi rocciosi più instabili.

Lo sviluppo di nuove tecnologie permette di realizzare interventi sempre più efficienti e sicuri che portano a una maggior riduzione del rischio.

Le gallerie paramassi, intervento oggetto di questa tesi, rappresentano spesso l'unica soluzione per la messa in sicurezza di un' infrastruttura stradale soggetta a fenomeni di caduta massi.

La definizione dell'azione dinamica legata all' impatto dei blocchi è complessa e in alcuni casi necessita di studi specifici effettuati ad oc per il singolo progetto.

Nella tesi si è effettuata un' analisi di sensitività utilizzando un modello numerico agli elementi finiti (FEM) attraverso il software ABAQUS. Il modello realizzato simula l' impatto di un blocco su di una soletta in calcestruzzo armato protetta da uno strato di materiale assorbente. Per la sua calibrazione si è effettuata una back analysis a partire dagli esperimenti di laboratorio condotti dal Politecnico di Losanna e riportati in Labiouse et al. (1994) e Montani et al (1997-1999-2004).

Questa analisi ha avuto lo scopo di indagare come alcune condizioni al contorno possano variare le azioni agenti sulla galleria paramassi in modo da poter fornire alcune informazioni utili per la progettazione di queste strutture.

La variabile che più influenza le azioni sulla galleria è senz'altro l'energia di impatto. Infatti, all' aumentare della massa o della velocità del blocco impattante le sollecitazioni che riceve la galleria aumentano in modo rilevante. È quindi essenziale durante la progettazione eseguire un' analisi traiettografica dettagliata in modo da stabilire l'energia di impatto caratteristica nel modo più accurato possibile.

Anche lo strato assorbente si rivela essere un elemento essenziale per il corretto funzionamento della galleria, infatti, l' utilizzo di uno spessore troppo ridotto causa una cattiva distribuzione degli sforzi legati all' impatto aumentando esponenzialmente le azioni all' interfaccia terreno soletta. Tuttavia lo spessore non deve essere troppo potente in quanto oltre un certo spessore non si ha più beneficio. È importante dunque calibrare lo spessore ottimale in funzione dell' tipo di impatto a cui è soggetta la galleria. Nel testo si sono anche visti alcuni materiali innovativi come il vetro cellulare, l' EPS o gli pneumatici a fine vita. Queste soluzioni hanno un' elevata efficienza di assorbimento a fronte di un peso ridotto. Seppur in quantità minore anche la struttura in CLS, grazie alla sua risposta più o meno elastica, può influire sulle azioni in gioco nell' impatto. La rigidità aumenta le azioni, quindi la realizzazione di strutture in CLS eccessivamente sovradimensionate è controproducente.

In conclusione lo studio ha portato a risultati importanti che in parte hanno confermato quelli ottenuti nell'analisi bibliografica. L'utilizzo di modelli numerici può certamente aiutare nella progettazione delle gallerie paramassi. Tuttavia, questi modelli necessitano di un accurata calibrazione in modo che i risultati ottenuti siano fisicamente corretti e interpretino correttamente la realtà. L'aumento delle capacità computazionali e delle tecnologie a disposizione dei professionisti potrà permettere un giorno l'utilizzo di questi modelli numerici ad ogni progetto andando a rendere gli interventi sempre più accurati e indubbiamente più sicuri.

## 7 APPENDICE A

In questa appendice viene riportato un approfondimento grafico sulla propagazione degli sforzi e delle deformazioni durante gli impatti.

Per rendere più facile la lettura e la comprensione, le immagini riguardanti gli sforzi rappresenteranno sia il modello intero che la sola soletta. In entrambi i casi il modello viene sezionato lungo un asse di simmetria in modo da poter vedere gli sforzi anche in profondità nello strato assorbente e nella soletta.

Gli sforzi riportati nelle immagini sono unicamente quelli lungo l'asse verticale ovvero gli stessi esaminati nella trattazione dei risultati dello studio di sensitività.

Nelle immagini raffiguranti le deformazioni si andranno invece ad evidenziare le parti dello strato assorbente che hanno subito Plasticizzazione andando a dissipare parte dell'energia, queste rappresentazioni saranno visualizzate sia in pianta che in prospettiva.

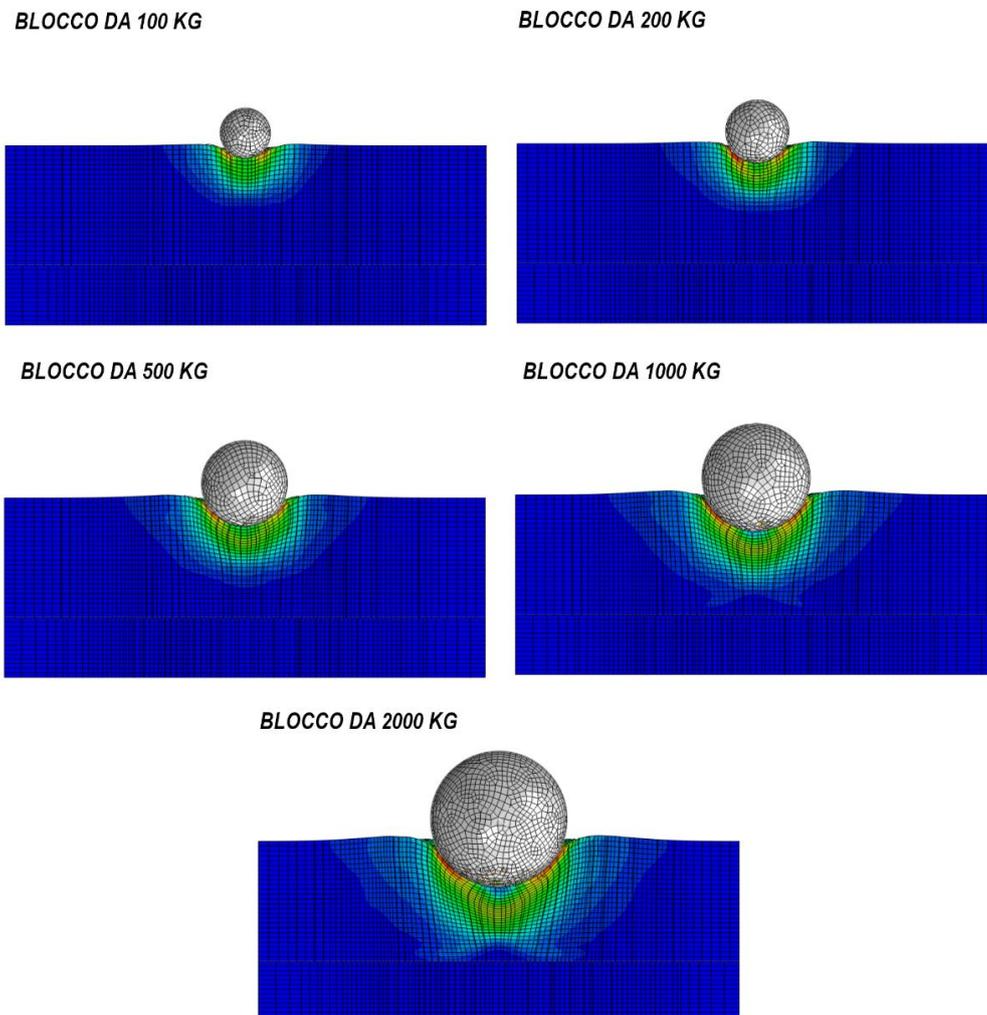
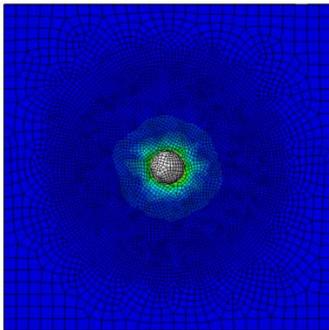
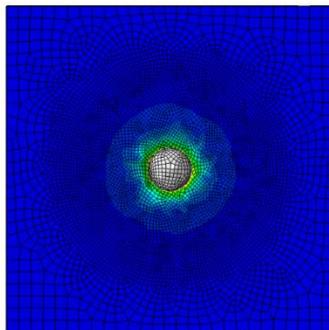


Figura 7.1: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione della massa del blocco al termine dell'impatto in prospettiva.

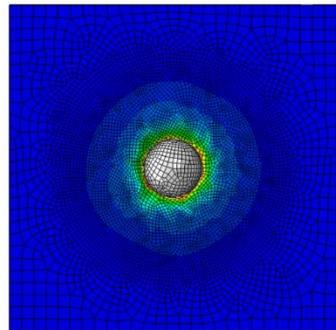
**BLOCCO DA 100 kg**



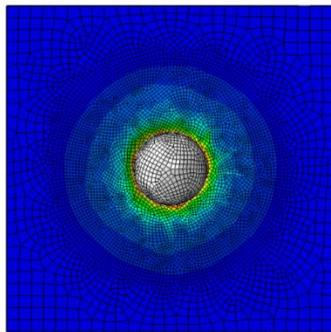
**BLOCCO DA 200 kg**



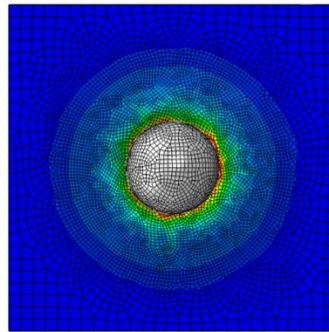
**BLOCCO DA 500 kg**



**BLOCCO DA 1000 kg**



**BLOCCO DA 2000 kg**



*Figura 7.2: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione della massa del blocco al termine dell'impatto in pianta.*

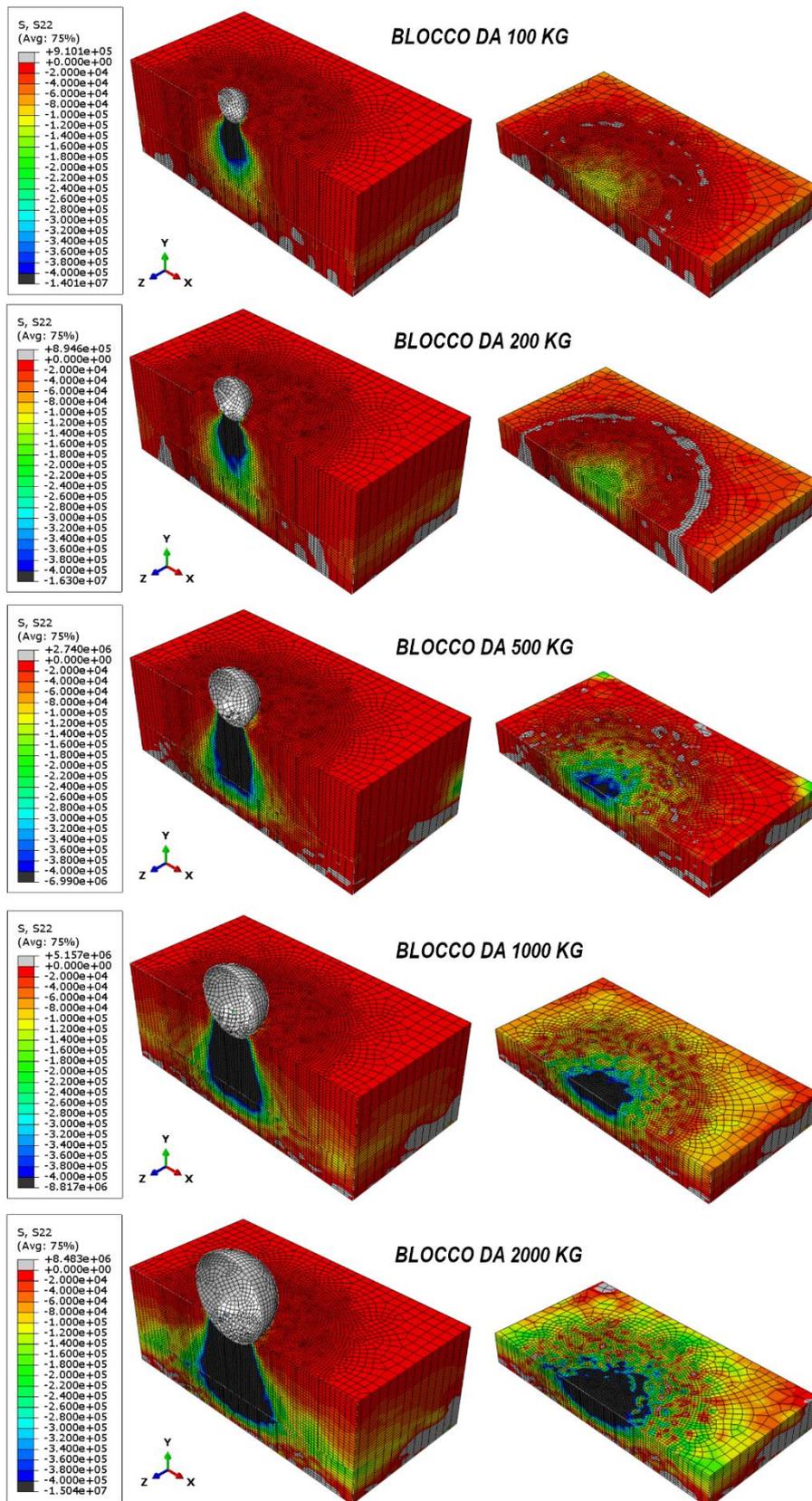
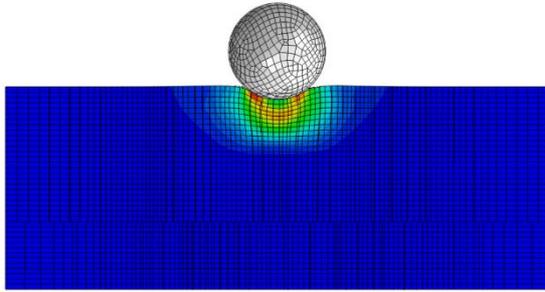
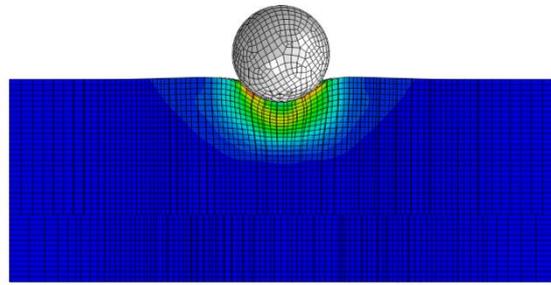


Figura 7.3: Sforzi in direzione verticale con variazione della massa del blocco.

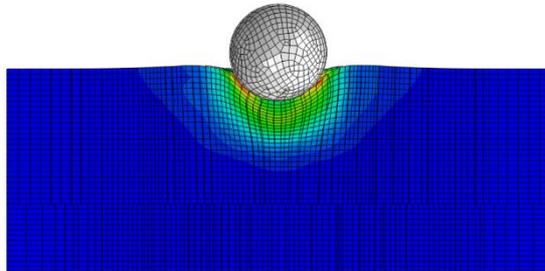
VELOCITA' IMPATTO 5 m/s



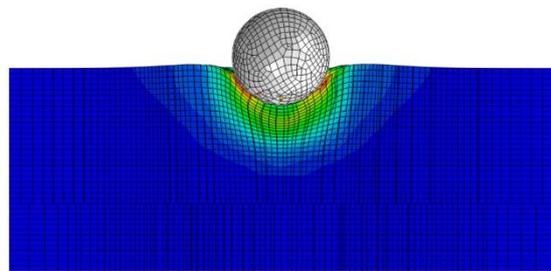
VELOCITA' IMPATTO 10 m/s



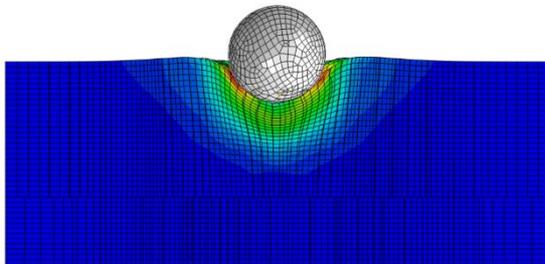
VELOCITA' IMPATTO 15 m/s



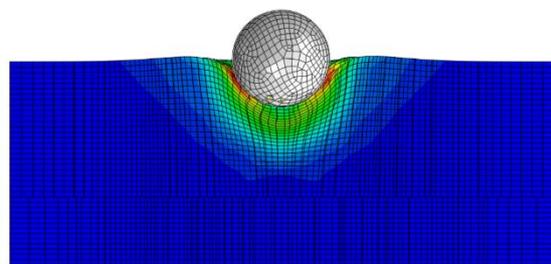
VELOCITA' IMPATTO 17.5 m/



VELOCITA' IMPATTO 20 m/s



VELOCITA' IMPATTO 22.5 m/



VELOCITA' IMPATTO 25 m/s

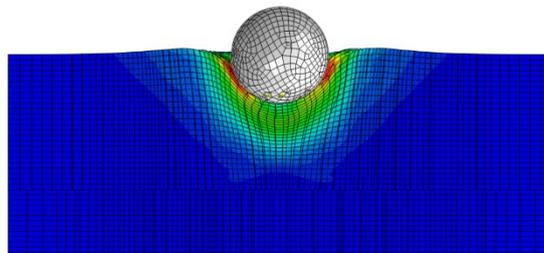
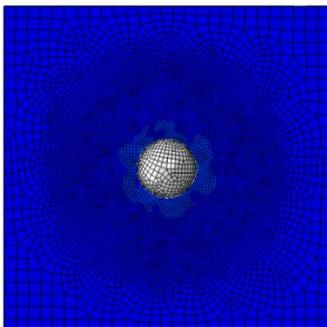
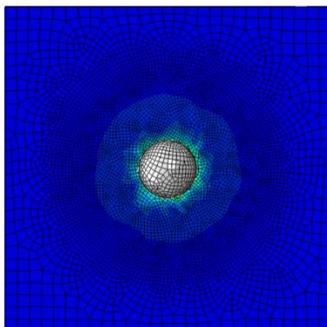


Figura 7.4: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione della velocità di impatto del blocco al termine dell'impatto in prospetto.

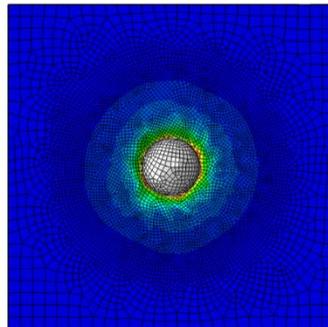
VELOCITA' IMPATTO 5 m/s



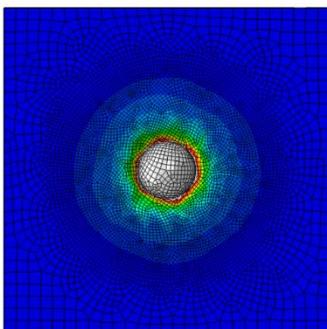
VELOCITA' IMPATTO 10 m/s



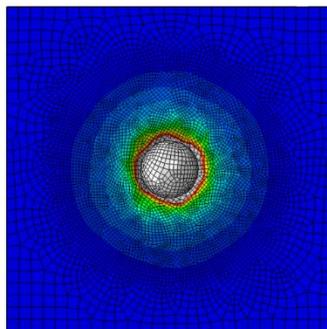
VELOCITA' IMPATTO 15 m/s



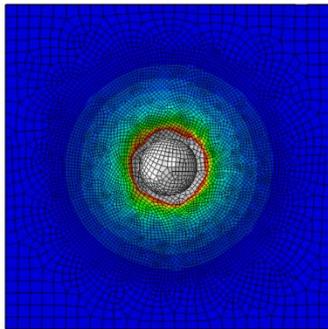
VELOCITA' IMPATTO 17.5 m/s



VELOCITA' IMPATTO 20 m/s



VELOCITA' IMPATTO 22.5 m/s



VELOCITA' IMPATTO 25 m/s

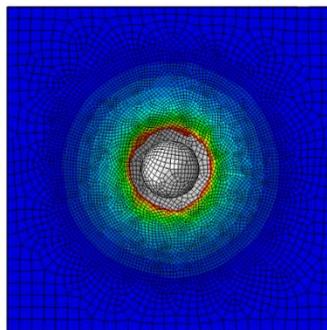


Figura 7.5: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione della velocità di impatto del blocco al termine dell'impatto in pianta.

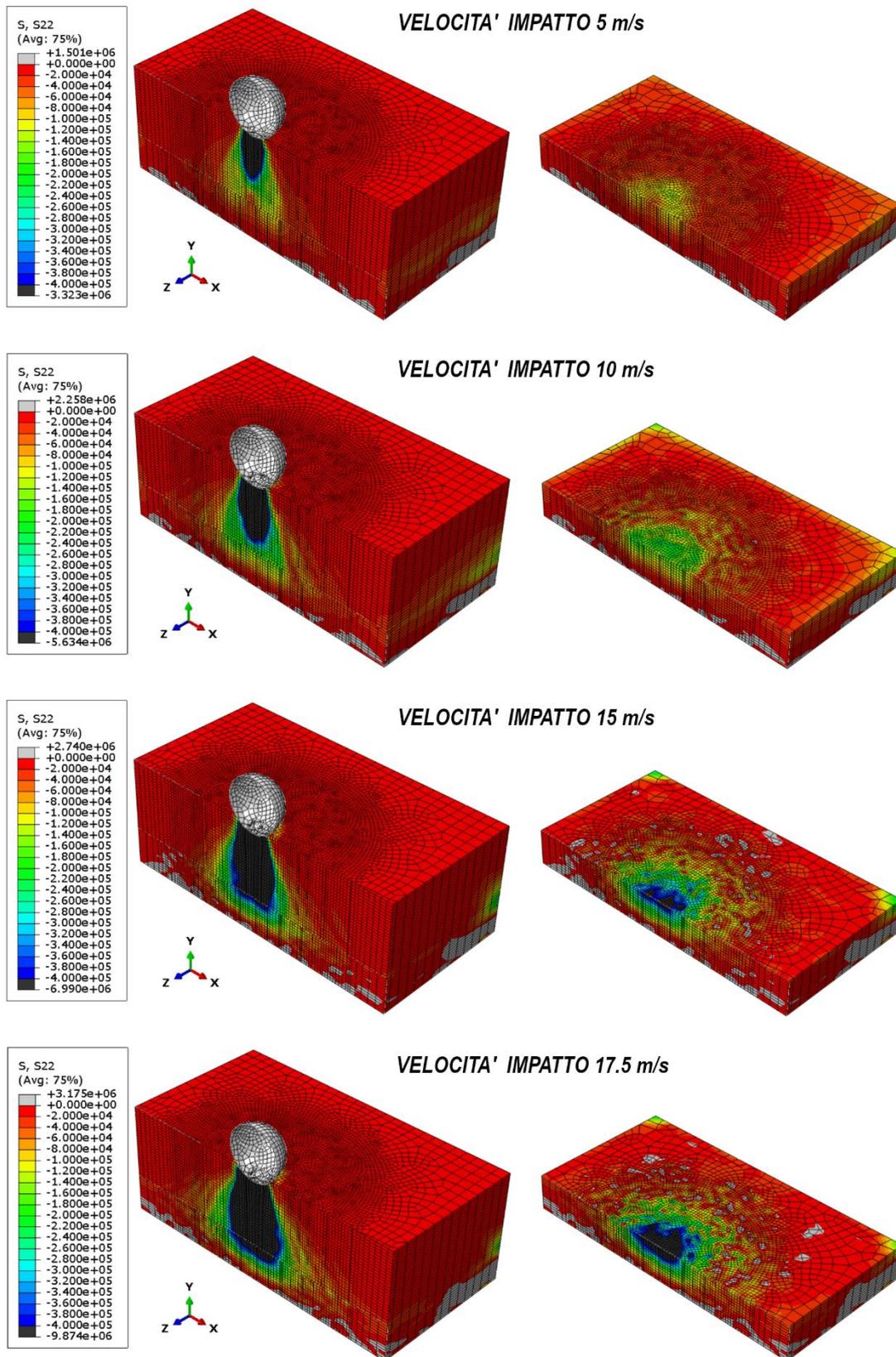


Figura 7.6: Sforzi in direzione verticale con variazione della velocità di impatto del blocco (I).

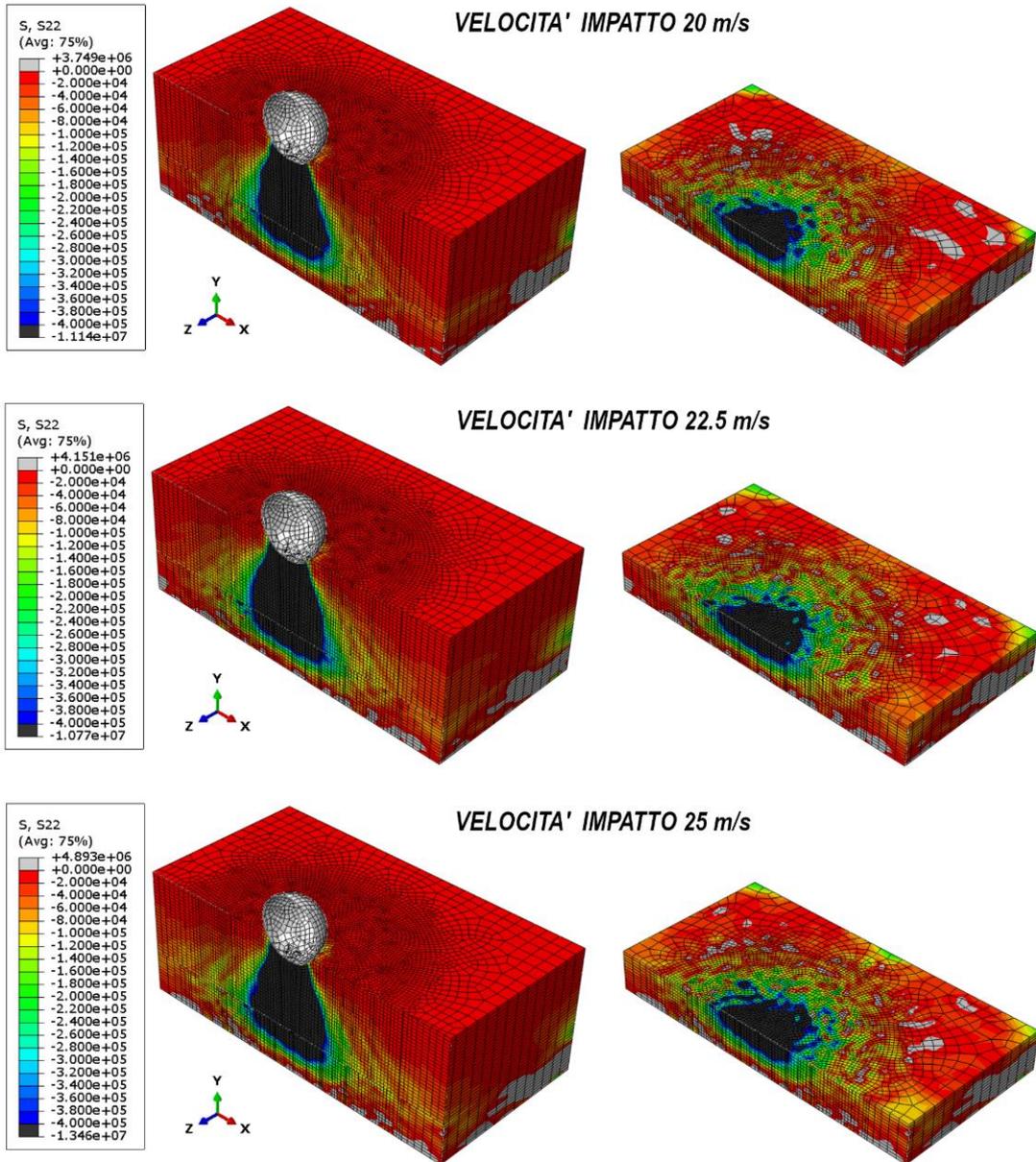
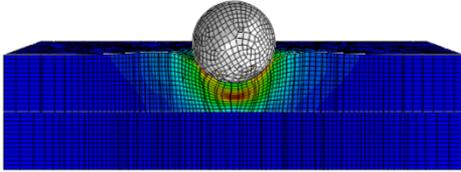
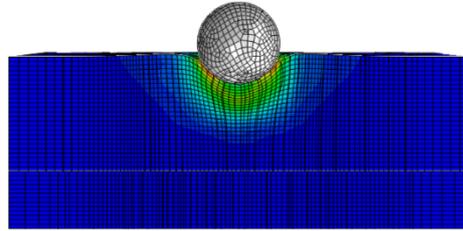


Figura 7.7: Sforzi in direzione verticale con variazione della velocità di impatto del blocco (2)

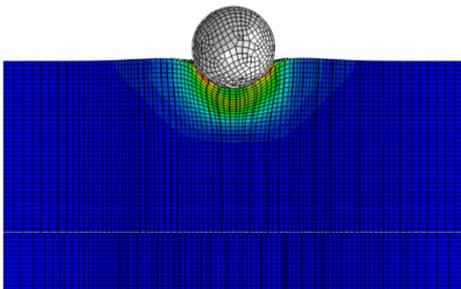
**SPESSORE STRATO 0.5 m**



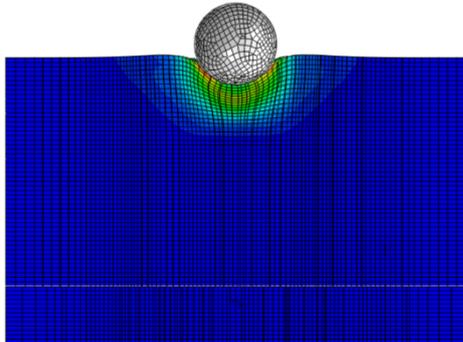
**SPESSORE STRATO 1 m**



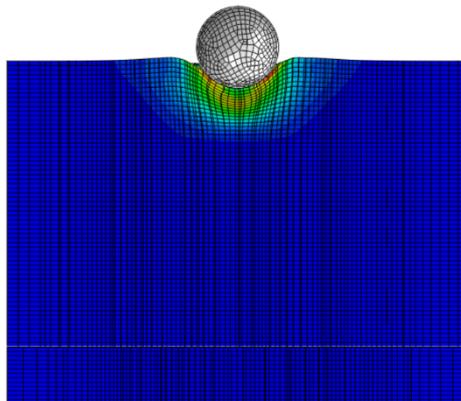
**SPESSORE STRATO 1.5 m**



**SPESSORE STRATO 2 m**

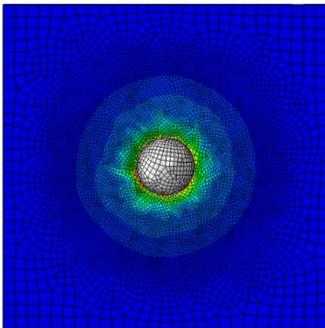


**SPESSORE STRATO 2.5 m**

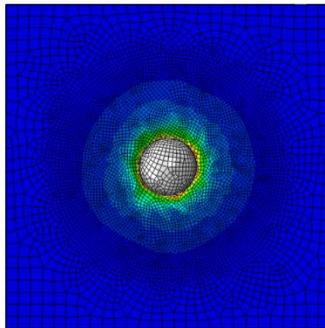


*Figura 7.8: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione dello spessore dello strato assorbente al termine dell'impatto in prospetto.*

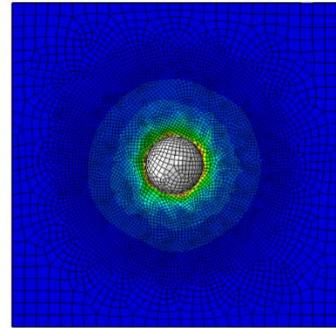
**SPESSORE STRATO 0.5 m**



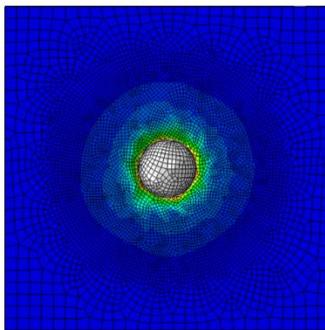
**SPESSORE STRATO 1 m**



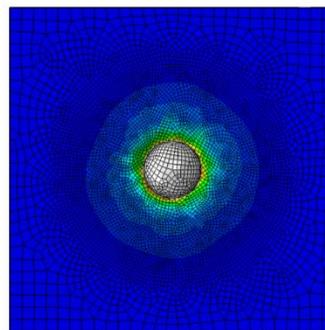
**SPESSORE STRATO 1.5 m**



**SPESSORE STRATO 2 m**



**SPESSORE STRATO 2.5 m**



*Figura 7.9: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione dello spessore dello strato assorbente al termine dell'impatto in pianta.*

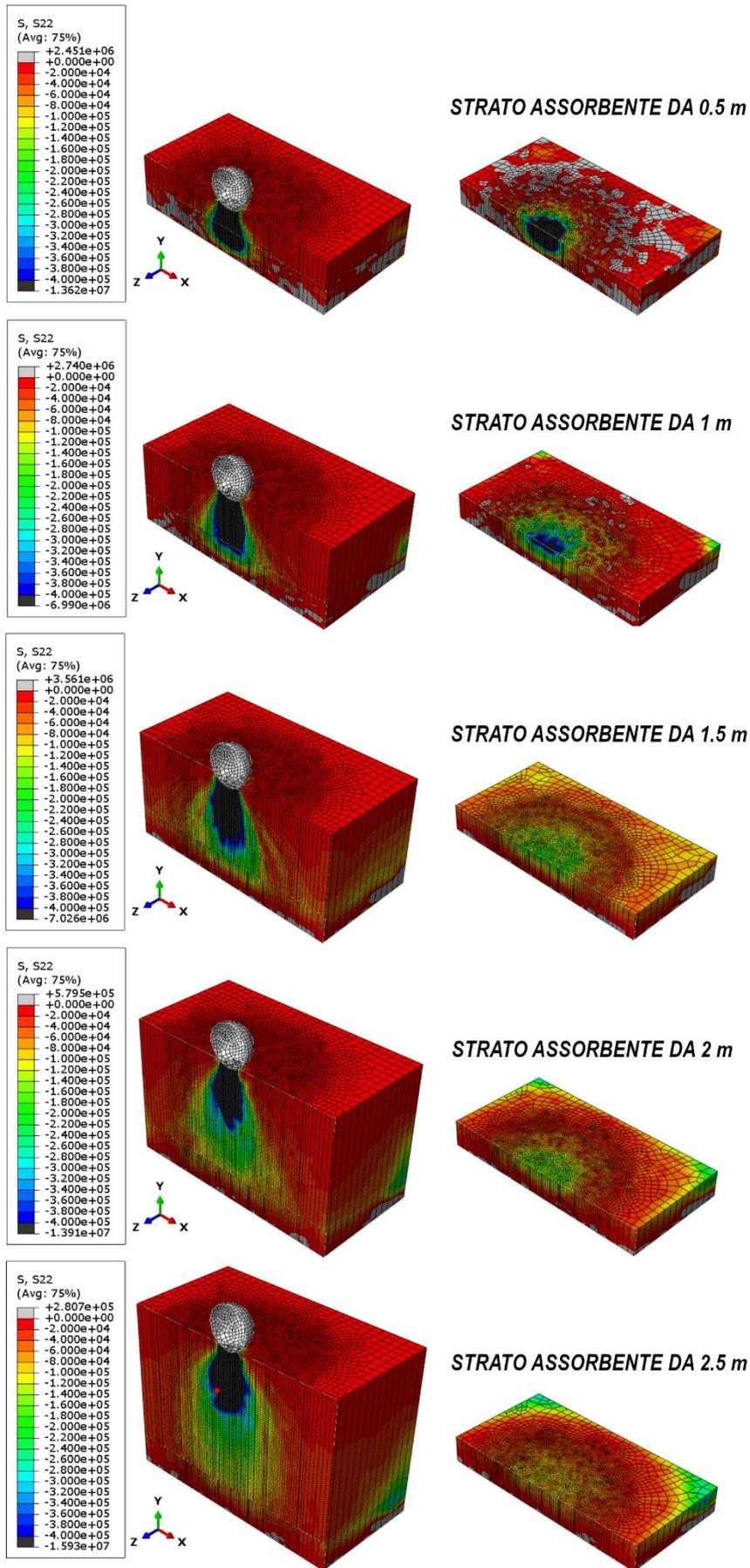
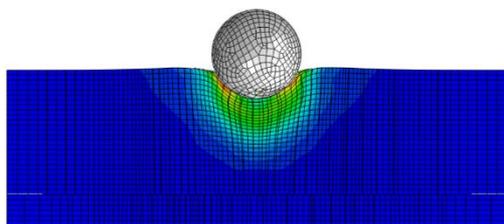
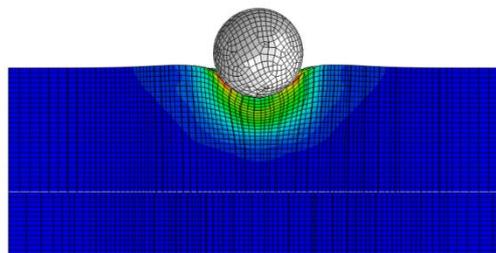


Figura 7.10: Sforzi in direzione verticale con variazione dello spessore dello strato.

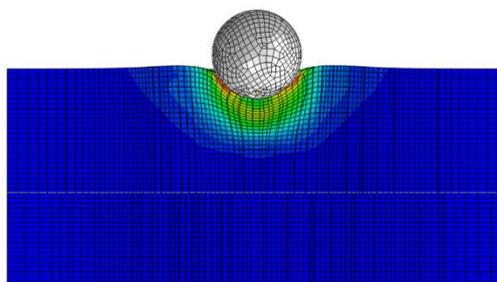
**SOLETTA DA 25 cm**



**SOLETTA DA 50 cm**

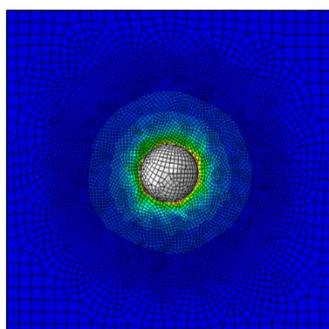


**SOLETTA DA 75 cm**

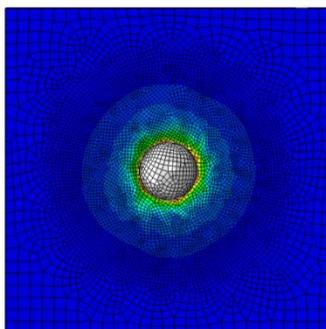


*Figura 7.11: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione dello spessore della soletta al termine dell'impatto in prospetto.*

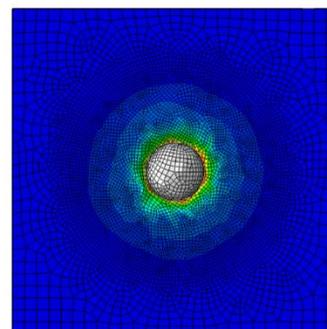
**SPESSORE SOLETTA 25 cm**



**SPESSORE SOLETTA 50 cm**



**SPESSORE SOLETTA 75 cm**



*Figura 7.12: Plasticizzazione dello strato assorbente in funzione dello spessore della soletta al termine dell'impatto in pianta.*

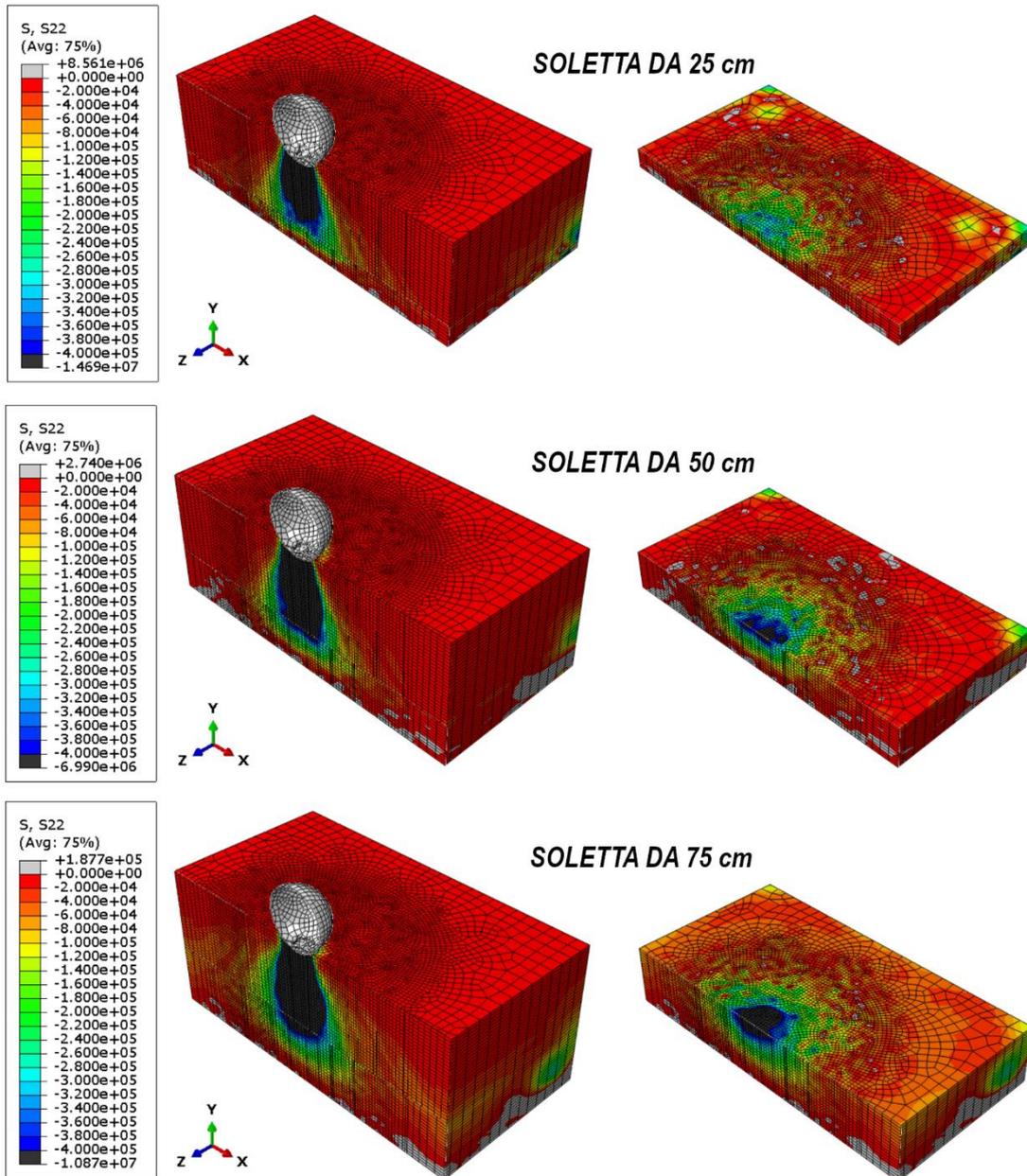


Figura 7.13: Sforzi in direzione verticale con variazione dello spessore della soletta.

## 8 Bibliografia

ASTRA 12006 (2008), Confederazione Svizzera, Département Fédéral de l'environnement, des transports, de énergie et de la comunication (DETEC), Office fédéral des routes (OFROU). “Actions de chutes de pierres sur les galeries de protection”.

Calvetti F., Prisco C., Vecchiotti M. (2005). Experimental and numerical study of rock-fall impacts on granular soils. *Rivista Italiana di Geotecnica*.

Calvetti F, Prisco C. (2007). *Linee guida per la progettazione di gallerie paramassi*. Starrylink Editrice, Brescia.

Cruden D. M., Varnes D. J. (1996). *Landslide types and processes*. Special Report - National Research Council, Transportation Research Board.

Deangeli C. (2021). *Materiale didattico del corso “Landslides and slope engineering”*. Politecnico di Torino.

Giani G. P., Giacomini A., Migliazza M., Segalini A. (2004). *Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Springer.

Japan Road Association (1983). *Manual for anti-impact structures against falling rocks*.

Labieuse V., Descœudres F., Montani Stoffel S., Schmidhalter C.-A. (1994). *Etude expérimentale de la chute de blocs rocheux sur une dalle en béton armé recouverte par des matériaux amortissants*. *Revue Française de Géotechnique*.

Meng X., Jiang Q., Han J., Liu R. (2022). *Experimental investigation of geogrid-reinforced sand cushions for rock sheds against rockfall impact*. *Transportation Geotechnics*.

Ministry of Business, Innovation & Employment (MBIE) (2016). *Rockfall: Design considerations for passive protection structures*. Nuova Zelanda, Wellington 2016.

Montani Stoffel S., Labiouse V., Descœudres F. (1997). Essais d'impacts de blocs sur un modèle de toit de galerie de protection. In Proceedings: Instabilités de falaises rocheuses, chutes de blocs et ouvrages de protection, Montreux, 7 novembre 1997.

Montani Stoffel S., Labiouse V., Descœudres F. (1999). Action of falling blocks impacting rocksheds covered with a soil cushion. In Proceedings: 9th International Congress on Rock Mechanics ISRM'99, Parigi, agosto 1999.

Montani Stoffel S., Labiouse V., Descœudres F. (2004). Impatti di blocchi su un modello di galleria di protezione caduta massi.

NTC 2018, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018), Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.

Ouyang C., Liu Y., Wang D., He S. (2019). Dynamic Analysis of Rockfall Impacts on Geogrid Reinforced Soil and EPS Absorption Cushions. KSCE Journal of Civil Engineering (2019). Springer.

ONR 24810:2021, Austrian Standards International (2021). Technical protection against rockfall: Terms and definitions, effects of actions, design, monitoring and maintenance.

Peila D. Marchelli M (2021). Materiale didattico del corso “Consolidamento di rocce e terreni”. Politecnico di Torino.

Schellenberg K., Volkwein A., Roth A., Vogel T. (2006). Rockfall - falling weight tests on galleries with special cushion layers. In Proceedings: 3rd International Conference on Protection of Structures Against Hazards, Venezia, settembre 2006.

Schellenberg K., Ghadimi Khasraghy S., Vogel T. (2008). Impact behavior of reinforced concrete slabs subjected to rock fall loading. In Proceedings: SUSI 2008. Portogallo, aprile 2008.

Schellenberg K. (2009). On the design of rockfall protection galleries. ETH Library.

UNI 11211-4, UNI Ente Italiano di normazione (2018). Opere di difesa dalla caduta massi – Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo.

Yan P., Zhang J., Fang Q., Zhang Y. (2018). Numerical simulation of the effects of falling rock's shape and impact pose on impact force and response of RC slabs. *Construction and Building Materials* 160 (2018).

## 9 Sitografia

[www.geobrug.com](http://www.geobrug.com)

[www.bacchispa.it](http://www.bacchispa.it)

[www.tenax.net](http://www.tenax.net)).

[www.bergmeister.eu](http://www.bergmeister.eu)

[www.issuu.com](http://www.issuu.com)

[www.lavoripubblici.regione.campania.it](http://www.lavoripubblici.regione.campania.it)

[www.gazzettajonica.it](http://www.gazzettajonica.it)

[www.mubre.it](http://www.mubre.it)

[www.geostru.eu](http://www.geostru.eu)

[www.geoprodotti.eu](http://www.geoprodotti.eu)

[www.sofiacostruzioni.it](http://www.sofiacostruzioni.it)

[www.piccole-dolomiti.it](http://www.piccole-dolomiti.it)

[www.building.govt.nz](http://www.building.govt.nz)

[www.dywit.it](http://www.dywit.it)

[www.trasparenza.provincia.salerno.it](http://www.trasparenza.provincia.salerno.it)