

POLITECNICO DI TORINO



Collegio di Ingegneria Civile
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Effetti prodotti dalle gomme di PFU sulla risposta sismica delle strutture

Relatore:
Prof. Alessandro Pasquale Fantilli

Candidato:
Paride Tamburrini

Corelatore:
Prof. John McDougall

Anno accademico 2018/2019

Ai presenti,

a chi ha voluto esserci

Sommario

INTRODUZIONE	1
1. LA SOLUZIONE DI DUE PROBLEMI	3
1.1. La sfida dell'ingegneria sismica	3
1.2. Gli Pneumatici Fuori Uso (PFU)	5
1.2.1. Il riciclo	7
1.2.2. Le modalità di recupero	10
1.2.3. Effetti ambientali.....	12
2. BACKGROUND DELL'ISOLAMENTO SISMICO.....	15
2.1. Sviluppo storico dell'isolamento sismico	15
2.1.1. Il presente dell'isolamento sismico	21
2.2. Sistemi di controllo per la protezione sismica delle strutture	21
2.2.1. Controllo attivo	24
2.2.2. Controllo ibrido (semi-attivo).....	26
2.2.3. Controllo passivo.....	28
2.3. Dispositivi antisismici più utilizzati	31
2.3.1. Principi base dei sistemi dissipativi	31
2.3.2. Principi base dell'isolamento sismico.....	37
2.3.2.1. Isolatori elastomerici.....	40
2.3.2.2. Isolatori a scorrimento e a rotolamento	43
2.3.3. Vantaggi e svantaggi degli isolatori sismici	46
3. INFLUENZA DELLA GOMMA SULLE CARATTERISTICHE DEI TERRENI.....	49
3.1. Generalità.....	49
3.2. Nomenclatura.....	52
3.3. Peso specifico	52
3.4. Compressibilità delle miscele RSM.....	53
3.5. Capacità portante.....	58
3.6. Evidenze sperimentali sulla forma della gomma	59
3.6.1. Comportamento di miscele RSM costituite con grani di gomma	60
3.6.1.1. Resistenza a taglio	62
3.6.1.2. Influenza delle dimensioni della gomma sull'angolo di attrito	63
3.6.2. Comportamento di miscele RSM costituita con brandelli di gomma	65
3.6.2.1. Resistenza a taglio	67

3.6.2.2.	Angolo di attrito	71
3.7.	Proprietà dinamiche.....	71
3.7.1.	Generalità.....	71
3.7.2.	Comportamento non lineare.....	73
3.7.3.	Vuoti equivalenti e influenza nelle proprietà dinamiche	75
3.7.4.	Incidenza della dimensione della gomma sulle proprietà dinamiche.....	76
3.7.5.	Determinazione di G_0 e D nelle miscele RSM mediante formule sperimentali ..	79
3.7.6.	Liquefazione	81
4.	SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO.....	85
4.1.	Strumentazione e materiali.....	85
4.1.1.	Tavola vibrante.....	85
4.1.2.	Sabbia	86
4.1.3.	Gomma	87
4.1.4.	Miscela RSM	88
4.1.5.	Descrizione prova	90
4.2.	Analisi dati	92
4.2.1.	Comparazione up e down	95
4.2.2.	Comparazione miscela secca e umida.....	97
4.3.	Smorzamento	101
4.3.1.	Cenni teorici	101
5.	CONCLUSIONI	105
6.	BIBLIOGRAFIA	107
	Allegato A–Accelerazioni registrate alla frequenza di massima amplificazione	109
	Allegato B–Tabelle riassuntive dei valori di accelerazione e amplificazione calcolati in tutte le frequenze analizzate	119
	Allegato C–Confronto delle funzioni di amplificazione prima e dopo la compattazione	129
	Allegato D–Confronto delle funzioni di amplificazione per miscele con e senza acqua	135
	Allegato E–Valutazione smorzamento con il metodo half bandwidth	139

Indice delle Figure

Figura 1.	Mapa di distribuzione dei terremoti nel mondo.....	3
Figura 2.	Struttura dello pneumatico	5
Figura 3.	Discarica di pneumatici	8
Figura 4.	Principali utilizzi del PFU in Europa	9
Figura 5.	Ripartizione delle modalità di recupero degli PFU in Europa nel 2016.....	9

Figura 6. Geografia dei sistemi di gestione dei PFU in Europa.....	10
Figura 7. Mulino tritratore e ciabattato di pneumatico.....	11
Figura 8. Mulino granulatore e granulato di gomma.....	12
Figura 9. Brevetto di Juels Touaillon	16
Figura 10. Brevetto originale di Bechtold.....	16
Figura 11. Brevetto originale di Calantarientes	17
Figura 12. Collasso dell'ospedale Olive View	18
Figura 13. Dettaglio di uno degli isolatori in gomma utilizzati.....	18
Figura 14. Isolatore del sistema "Electricite-de-France"	20
Figura 15. Previsione di risposta al sisma della struttura a base fissa (sinistra) ed isolata (destra)	20
Figura 16. Numero di edifici isolati nel mondo	22
Figura 17. Edifici isolati in Italia.....	22
Figura 18. Collasso del parcheggio California State University	23
Figura 19. Sistemi di protezione sismica delle strutture	24
Figura 20. Schema di funzionamento dei sistemi attivi	25
Figura 21. Shinsuku Park Tower	26
Figura 22. Kyobashi Seiwa Building di Tokyo	26
Figura 23. Schema di funzionamento di un sistema semi-attivo	27
Figura 24. MR Dampers.....	28
Figura 25. Dongting Lake Bridge, China	28
Figura 26. Kajima Technical Research Institute.....	29
Figura 27. Comportamento dinamico di un edificio convenzionale con dissipatori.....	31
Figura 28. Effetto degli smorzatori sullo spettro di risposta.....	32
Figura 29. Smorzatore BRB.....	33
Figura 30. Dispositivi Isteretici X-shaped	33
Figura 31. Esempio di applicazione dei Pall friction dampers in Canada	34
Figura 32. Applicazione un dissipatore VE	34
Figura 33. Smorzatore viscoelastico fluido.....	36
Figura 34. Schema di un dispositivo TMD applicato ad un edificio.....	36
Figura 35. Active Mass Damper (660 t) presente nel grattacielo Taipei 101 (508 m)	36
Figura 36. Il Tuned Liquid Damper della Comcast Tower.....	37
Figura 37. Posizione isolamento.....	38
Figura 38. Comportamento dinamico di un edificio convenzionale con isoladores	39

Figura 39. Comportamento dinamico di un edificio convenzionale con isolatore	40
Figura 40. Isolatore elastomerico.....	41
Figura 41. Isolatore elastomerico con nucleo in piombo.....	43
Figura 42. Isolatore a scorrimento	44
Figura 43. Schemi costruttivi e funzionali di un isolatore a singola superficie di scorrimento e di uno a doppia superficie di scorrimento	46
Figura 44. Classificazione proposta per isolamento sismico geotecnico	50
Figura 45. Schema di utilizzo di un'interfaccia liscia per isolare porzione di terreno(destra), fondazioni (sinistra).....	51
Figura 46. Variazione della densità in funzione del contenuto di gomma per miscele RSM	53
Figura 47. Comportamento delle miscele RSM a diversi contenuti di gomma.....	54
Figura 48. Risposta meccanica di provini a diversi contenuti di gomma sotto carico assiale.....	55
Figura 49. (a) Evoluzione del volume della gomma sotto un ciclo di carico-scarico confrontato con la variazione dell'indice dei vuoti; (b) Evoluzione dell'area di contatto sotto un ciclo di carico-scarico confrontato con la variazione dell'indice dei vuoti	56
Figura 50. Indice di compressibilità e di rigonfiamento in funzione del contenuto di gomma ..	56
Figura 51. Deformazione plastica a seguito dei cicli di carico-scarico	57
Figura 52. (a) Relazione tra la capacità portante e il contenuto di gomma; (b) Evoluzione nel tempo della capacità portante per diverse miscele RSM cementate	58
Figura 53. (1) Test condotto utilizzando granuli di gomma (a) prima di applicare il carico; (b) durante l'applicazione del carico. (2) Test condotto utilizzando brandelli di gomma (a) prima di applicare il carico; (b) durante l'applicazione del carico.....	59
Figura 54. Curve sforzo-deformazione per diverse miscele RSM sottoposte a vari carichi verticali (a) 100 kPa; (b) 200 kPa; (c) 300 kPa; (d) 400 kPa	61
Figura 55. Definizione dell'indice di fragilità (BI).....	62
Figura 56. (a) Inviluppi di rottura per miscele RSM; (b) Variazione della resistenza a taglio per varie miscele RSM in funzione del contenuto di gomma.....	63
Figura 57. Tensione deviatorica rispetto al contenuto di gomma per diversi stati deformativi	64
Figura 58. Diagramma di fase per miscele RSM.....	65
Figura 59. (a) Influenza di η sulla deformazione volumetrica valutata in funzione della deformazione assiale; (b) Influenza di η sulla tensione deviatorica valutata in funzione della deformazione assiale	67
Figura 60. (a) Meccanismo di rinforzo che i brandelli di gomma esercitano sulla matrice sabbiosa; (b) Schematizzazione dell'effetto dei brandelli di gomma sulla resistenza a taglio del materiale	68
Figura 61. Inviluppi di rottura per miscele RSM con diversi contenuti di gomma.....	69
Figura 62. Inviluppi di resistenza a taglio per matrici a differenti densità relative.....	70

Figura 63. Influenza dell'indice di forma sull'inviluppo di rottura	70
Figura 64. Variazione dell'angolo d'attrito equivalente in funzione dell'indice di forma	71
Figura 65. Rappresentazione di un ciclo di isteresi	72
Figura 66. Effetto del contenuto di gomma sulle proprietà dinamiche delle miscele RSM	74
Figura 67. Effetto del contenuto di gomma su (a) Modulo di taglio per piccole deformazioni; (b) Damping per piccole deformazioni	75
Figura 68. (a) Effetto della pressione di confinamento sullo smorzamento del materiale; (b) Effetto del contenuto di gomma sullo smorzamento del materiale.....	76
Figura 69. Andamento del modulo di taglio per piccole defomrazioni in funzione della dimensione dei grani di gomma.....	77
Figura 70. Andamento del modulo di taglio per piccole deformazioni in funzione dell'indice dei vuoti equivalente	78
Figura 71. Effetto del contenuto di gomma e del rapporto $D_{50,s}/D_{50,r}$ sulla defomrazione di riferimento	78
Figura 72. Effetto del rapporto $D_{50,s}/D_{50,r}$ (a) sul valore di x_e ; (b) sul valore di AG	80
Figura 73. Effetto del contenuto di gomma sul Cyclic Resistance Ratio	84
Figura 74. Decadimento della pressione interstiziale dopo il fenomeno della liquefazione per vari contenuti di gomma	84
Figura 75. Apparecchiatura utilizzata nei test.....	86
Figura 76. Immagine al microscopio della sabbia utilizzata	87
Figura 77. Immagine al microscopio della gomma utilizzata	88
Figura 78. Curve granulometriche per la sabbia e per la gomma	88
Figura 79. Busta utilizzata contenente materiale RSM	89
Figura 80. Segnale registrato per 20% RSM secca a 5Hz.....	93
Figura 81. Accelerazione massima del box 5Hz	93
Figura 82. Accelerazione massima del box confrontata con il segnale imposto dall'attuatore e il segnale teorico che riproduce quello registrato	94
Figura 83. Confronto delle funzioni di amplificazione prima e dopo la compattazione	96
Figura 84. Confronto delle funzioni di amplificazione per 20% RSM con e senza acqua.....	98
Figura 85. Variazione della funzione di amplificazione per miscele RSM secche al variare del contenuto di.....	99
Figura 86. Variazione della funzione di amplificazione per miscele RSM umide al variare del contenuto di gomma.....	100
Figura 87. Andamento dell'amplificazione massima in funzione del contenuto di gomma..	100
Figura 88. Esempio di funzione di amplificazione per il calcolo dello smorzamento	102
Figura 89: Valore dello smorzamento in funzione del contenuto di gomma	103

Figura 90. (a) Segnale registrato per la sabbia secca a 5,5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	109
Figura 91. (a) Segnale registrato per 10% RSM secca a 5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	110
Figura 92. (a) Segnale registrato per 20% RSM secca a 5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	111
Figura 93. (a) Segnale registrato per 30% RSM secca a 4,25Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	112
Figura 94. (a) Segnale registrato per 40% RSM secca a 4,25Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	113
Figura 95. (a) Segnale registrato per la sabbia umida a 5,5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	114
Figura 96. (a) Segnale registrato per 10% RSM umida a 5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	115
Figura 97. (a) Segnale registrato per 20% RSM umida a 4,75Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	116
Figura 98. (a) Segnale registrato per 30% RSM umida a 4,25Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	117
Figura 99. (a) Segnale registrato per 40% RSM umida a 4,25Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura	118
Figura 100. Sabbia secca	129
Figura 101. Sabbia umida	129
Figura 102. 10% RSM secca	130
Figura 103. 10% RSM umida.....	130
Figura 104. 20% RSM asciutto.....	131
Figura 105. 20% RSM umido	131
Figura 106. 30% RSM asciutto.....	132
Figura 107. 30% RSM umido	132
Figura 108. 40% RSM asciutto.....	133
Figura 109. 40% RSM umido	133
Figura 110. System response comparisons (dry & wet) sand	135
Figura 111. System response comparisons (dry & wet) 10% RMS.....	135
Figura 112. System response comparisons (dry & wet) 20% RSM.....	136
Figura 113. System response comparisons (wet sand & 10% RSM & 20% RSM).....	136
Figura 114. System response comparisons (up & down).....	137
Figura 115. (a) Sabbia.secca; (b) Sabbia umida.....	139
Figura 116. (a) 10% RSM secca; (b) 10% RSM umida	140

Figura 117. (a) 20% RSM secca; (b) 20% RSM umida	141
Figura 118. (a) 30% RSM secca; (b) 30% RSM umida	142
Figura 119. (a) 40% RSM secca; (b) 40% RSM umida	143

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Elenco dei terremoti e delle fatalità	4
Tabella 2. Composizione gomma	7
Tabella 3. Classificazione sistemi passivi di dissipazione	30
Tabella 4. Vantaggi e svantaggi degli isolatori	47
Tabella 5. Caratteristiche dei campioni analizzati nello studio di Zornberg et al.	66
Tabella 6. Principali caratteristiche dei campioni RSM sottoposti alla prova della colonna risonante	74
Tabella 7. Composizione in termini di massa delle buste di RSM	89
Tabella 8. Riassuntive dei valori di accelerazione e amplificazione calcolati alla frequenza di 5 Hz per 20% RSM secca	95
Tabella 9. Sabbia secca.....	119
Tabella 10. 10% RSM secca	120
Tabella 11. 20% RSM secca	121
Tabella 12. 30% RSM secca	122
Tabella 13. 40% RSM secca	123
Tabella 14. Sabbia umida	124
Tabella 15. 10% RSM umida.....	125
Tabella 16. 20% RSM umida.....	126
Tabella 17. 30% RSM umida.....	127
Tabella 18. 40% RSM umida.....	128

INTRODUZIONE

Gran parte della popolazione mondiale vive sotto la minaccia continua dei terremoti, basti pensare che, nel secolo scorso, questi hanno ucciso oltre 20.000 persone all'anno in tutto il mondo e, il 90% dei decessi si sono verificati nei paesi in via di sviluppo. È impossibile prevenire il verificarsi di fenomeni sismici ma, è possibile mitigarne gli effetti per salvare vite e beni materiali. Con questo obiettivo la comunità internazionale dell'ingegneria antisismica sta affrontando il problema cercando di garantire standard di sicurezza nei paesi più disagiati uguali a quelli dei paesi più sviluppati.

Negli ultimi anni è stata proposta una tecnica di isolamento innovativa denominata "isolamento geotecnico" alternativa all'isolamento tradizionale; questa prevede di sostituire lo strato superficiale del terreno con una miscela di sabbia e elementi di gomma opportunamente tagliati. I due materiali (sabbia e gomma) oltre a essere inerti e quindi non reagenti tra loro, risultano avere caratteristiche complementari: il primo funziona da "rinforzo" mentre il secondo garantisce la dissipazione di energia. Va inoltre ricordato che, a causa del crescente uso dei veicoli, nel mondo vengono prodotti sempre più pneumatici i quali, una volta terminata la loro funzione, diventano un rifiuto e vengono abbandonati nelle discariche. Queste, rappresentano un problema sia per la salute dell'uomo che per l'ambiente quindi, la comunità scientifica sta cercando possibili soluzioni trovando nell'ingegneria civile una valida alternativa. L'idea dell'isolamento geotecnico quindi, produce benefici sulla gestione e lo smaltimento dei pneumatici fuori uso (PFU) e aiuta milioni di persone che, vivendo in paesi in via di sviluppo non possiedono le capacità economiche per difendersi adeguatamente dalla minaccia sismica.

Attraverso sperimentazioni in laboratorio, è già stata individuata l'influenza che la gomma esercita sulle proprietà statiche e dinamiche dei terreni valorizzando i benefici e sottolineando gli svantaggi che questa può apportare. I parametri della gomma che influenzano le proprietà della miscela sono essenzialmente forma, quantità e dimensione. In linea generale si può dire che: a causa dell'elevata deformabilità della

gomma, le deformazioni della miscela aumentano e la capacità portante risulta essere ridotta; sebbene l'angolo di attrito tra gomma e sabbia risulta essere inferiore rispetto a quello prodotto dai contatti sabbia-sabbia, utilizzando gomma tagliata in brandelli piuttosto che in granuli, la resistenza a taglio risulta aumentare poiché questi funzionano come rinforzo nel terreno. Dal punto di vista dinamico, è stato dimostrato che: un aumento del contenuto di gomma produce un minor decadimento del modulo di taglio manifestando quindi un comportamento più lineare e lo smorzamento aumenta notevolmente già per bassi contenuti di gomma.

L'obiettivo di questo studio è andare oltre l'analisi di provini in laboratorio e valutare qualitativamente gli effetti che le miscele di gomma e sabbia producono sulle strutture. A tale scopo si è utilizzato il modello di una struttura incastrata su di una tavola vibrante confinato appunto da questo materiale composto. Nella campagna prove sono stati variati i contenuti di gomma dallo 0% al 40% in termini di massa per individuare il quantitativo di gomma che ottimizzi le caratteristiche della miscela. Si è scelto di imporre al modello frequenze specifiche per valutare puntualmente la risposta nel range 2 Hz-10 Hz, frequenze tipiche dei sismi. Quindi, per ogni contenuto di gomma sono state ricavate le curve di amplificazione nel campo delle frequenze questo, grazie ad accelerometri posti in sommità della struttura e sul basamento della stessa.

Dallo studio emerge che, le accelerazioni subite dalla struttura diminuiscono sensibilmente all'aumentare del contenuto di gomma e il periodo proprio di vibrazione si sposta gradualmente verso periodi maggiori. In accordo con studi precedenti, il contenuto di gomma ideale è compreso tra il 30% e il 40% in termini di massa e questo garantisce un abbattimento dell'amplificazione nell'ordine del 30% e un incremento di smorzamento del 10% rispetto a quello valutato nella sola sabbia. Come già detto, lo smorzamento non risulta essere l'unico beneficio poiché, variando adeguatamente il contenuto di gomma, è possibile traslare il periodo proprio di vibrazione della struttura in modo da utilizzare un'accelerazione massima di progetto inferiore. Infine, si osserva che, già per piccoli contenuti di gomma, la presenza di acqua non influenza più la risposta sismica della struttura.

1. LA SOLUZIONE DI DUE PROBLEMI

1.1. LA SFIDA DELL'INGEGNERIA SISMICA

Vengono definite tre grandi zone sulla superficie terrestre in cui il pericolo sismico è elevato: il maggior numero di sismi si accertano su una fascia che corre lungo i bordi dell'Oceano Pacifico detta cintura di fuoco (Fire Belt), lungo la quale si riscontra anche un numero significativo di vulcani. L'ipocentro va da profondo a superficiale, come previsto dalla teoria della Tettonica delle Placche. La seconda zona corrisponde alle catene montuose (Alpide Belt) e si estende da Java a Sumatra, attraverso il Mar Mediterraneo e la catena dell'Himalaya, fino all'Atlantico. L'ipocentro ha una profondità intermedia. La terza zona coincide con le dorsali oceaniche (Mid-Atlantic Ridge) ed è una catena montuosa sottomarina lunga 10.000 km in cui si manifestano terremoti con epicentri superficiali [1] (Figura 1).

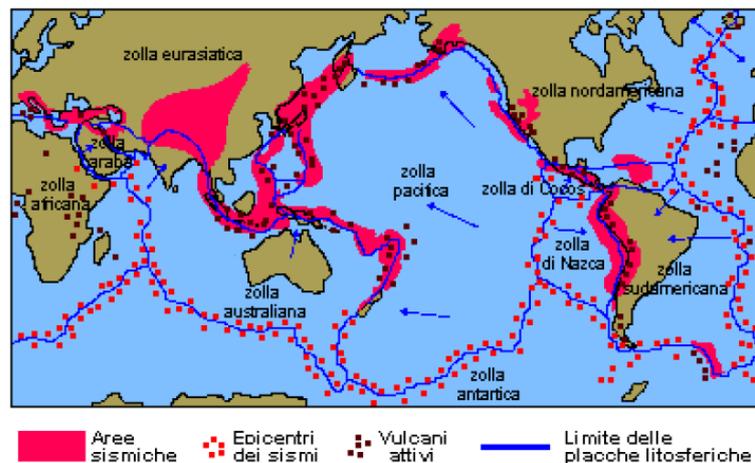


Figura 1. Mappa di distribuzione dei terremoti nel mondo [1]

Come si può vedere dalla cartina, la maggior parte delle aree sismiche e degli epicentri dei sismi corrispondono a zone del mondo meno agiate.

L'articolo 25 della Dichiarazione Universale dei Diritti Umani delle Nazioni Unite del 1948 afferma che "Ogni individuo ha diritto a un tenore di vita adeguato alla salute e al benessere di sé stesso e della propria famiglia, compresi cibo, vestiario, alloggio e cure mediche e i servizi sociali necessari ... ". Il 16 maggio 1994, un gruppo internazionale di esperti ambientali riuniti a Ginevra ha redatto la prima dichiarazione di principi sui diritti

umani e l'ambiente. Questi principi sono stati inclusi nella relazione speciale del 1994 alla Commissione per i Diritti Umani delle Nazioni Unite (UNCHR). Il principio numero 10 afferma "Tutte le persone hanno diritto a un alloggio, un possesso fondiario e condizioni di vita adeguati in un ambiente sicuro, sano ed ecologicamente sano". Le esperienze nei recenti terremoti, in particolare nei paesi in via di sviluppo, dimostrano definitivamente che siamo lontani dal raggiungere questo obiettivo [2]. Nella Tabella 1 vengono brevemente riportati i terremoti che dagli inizi del '900 hanno causato più di 40.000 vittime; si può vedere come la maggior perdita di vite umane sono avvenuti nei paesi del secondo e del terzo mondo (Cina, Pakistan, Perù, Turkmenistan, Indonesia).

Tabella 1. Elenco dei terremoti e delle fatalità [1]

Anno	Luogo	Magnitudo	Vittime
1908	Messina, Italia	7,2	70.000 - 100.000
1920	Gansu, Cina	8,6	200.000
1923	Tokyo e Yokohama, Giappone	7,9	143.000
1927	Qinghai, Cina	7,9	200.000
1932	Gansu, Cina	7,6	70.000
1935	Quetta, Pakistan	7,5	30.000 - 60.000
1948	Aşgabat, Turkmenistan	7,3	110.000
1970	Perù settentrionale	7,9	66.000
1976	Tangshan, Cina	7,5	255.000
1990	Manjil, Iran	7,7	50.000
2003	Bam, Iran	6,6	40.000
2004	Sumatra, Indonesia	9,0	275.950

Il divario tra paesi sviluppati e in via di sviluppo sta aumentando: quattro su cinque dei decessi causati da terremoti nel XX secolo si sono verificati nei paesi in via di sviluppo. Nel 1950, due su tre "terremotati" o "sfollati" provenivano da questi paesi; nel 2000 questa differenza è cresciuta incredibilmente, nove persone su dieci venivano da paesi dove l'isolamento sismico risulta essere troppo costoso. Con l'aumentare della popolazione mondiale, in particolare nei paesi in via di sviluppo, questa vulnerabilità diventa ancora più pronunciata. Secondo le Nazioni Unite, nel 2000, metà della popolazione mondiale viveva in aree urbane affollate (3% della superficie terrestre), con

un preoccupante aumento della densità della popolazione. Tra i primi dieci agglomerati urbani otto sono città con un noto rischio sismico da moderato a elevato, tra cui Tokyo, Mumbai, Dhaka, Karachi, Città del Messico, New York, Giacarta e Calcutta. Un grave terremoto in una di queste città, in particolare in una città con un patrimonio edilizio vulnerabile e infrastrutture fragili, potrebbe causare gravi devastazioni e un numero significativo di morti.

Si stima che circa il 30% della popolazione mondiale vive in tali abitazioni di terra. Solo nel 2001, più di un milione di persone che vivono in abitazioni di adobe sono rimaste senza tetto in El Salvador e in Perù dopo i terremoti che hanno colpito questi due paesi. Nel recente terremoto di Bam (Iran), molte delle migliaia di morti erano attribuibili a strutture vulnerabili [2].

1.2. GLI PNEUMATICI FUORI USO (PFU)

Lo pneumatico è un elemento che viene montato attorno alla ruota di qualsiasi veicolo e ne garantisce il movimento trasferendo le forze d'attrito. Esso è caratterizzato da una struttura piuttosto complessa formata essenzialmente da gomma e nerofumo, rinforzi tessili o metallici e piccole parti di ossido di zolfo e zinco. In Figura 2 viene riportata la struttura dello pneumatico.



Figura 2. Struttura dello pneumatico [3]

Il battistrada (1) è la parte dello pneumatico a diretto contatto con il suolo, è formato da un anello di gomma compatta che ricopre la carcassa e garantisce l'attrito. Il disegno del battistrada è pensato per migliorare le performance del veicolo in termini di prestazioni ad alta velocità, silenziosità e aderenza. La presenza di questi disegni diventa importantissima quando le strade sono bagnate, gli incavi partono dal centro del battistrada verso l'esterno col fine di allontanare l'acqua permettendo alla superficie drenata di sviluppare attrito in maniera più efficace e garantire la stabilità al veicolo. La mescola deve assicurare il giusto compromesso tra la buona aderenza in qualsiasi condizione e la resistenza all'usura. Le mescole comuni sono formate da composti elastomeri-stirene-butadiene (SBR), gomma butilica, gomma naturale, polibutadine, copolimeri butadine-stirene, polisoprene di sintesi) e additivi (zolfo, nerofumo e oli) che esaltano, in funzione delle percentuali, determinate caratteristiche.

La carcassa (2) è la struttura dello pneumatico su cui viene vulcanizzato il battistrada; è prodotta tramite la sovrapposizione di tele incrociate di materiale sintetico o tessile impregnate di gomma e rinforzate con fili metallici. Questa termina attraverso due robusti talloni (4) i quali contengono cerchietti (costituiti da anelli di corda metallica che mantengono la carcassa ben aderente al cerchio). Attraverso il processo di vulcanizzazione si connettono le tele tra loro rendendola una struttura unitaria.

La composizione degli pneumatici è differente a seconda che siano destinati ad autoveicoli o autocarri; oltre alle differenze nelle dimensioni si possono trovare disuguaglianze nella tipologia di rinforzi inclusi nella loro struttura, nella tipologia di gomma utilizzata, e negli additivi. Nella Tabella 2 vengono rappresentate le composizioni degli pneumatici per autocarri e autoveicoli.

A seconda degli ingredienti utilizzati si risaltano certe caratteristiche piuttosto che altre, l'obiettivo è quello di rinforzare la gomma garantendone una vita più lunga e se questa non fosse trattata, sarebbe troppo debole e morbida. Attraverso processi di vulcanizzazione si da origine a legami tra le varie molecole che compongono la gomma e questo attribuisce alla gomma cruda caratteristiche di elasticità e robustezza diventando così più resistente alle azioni chimiche, alle abrasioni, al calore e alla impermeabilità. Questi trattamenti garantiscono inoltre una resistenza maggiore

all'azione dei microrganismi che necessitano di un secolo affinché possano distruggerla rendendo pressochè impossibile lo smaltimento degli pneumatici.

Tabella 2. Composizione gomma [2]

Materiale	Autoveicolo (%)	Autocarro (%)
Gomma/elastomeri	48	43
Nero fumo	22	21
Acciaio	15	27
Tessile	5	-
Ossido di zinco	1	2
Zolfo	1	1
Altri additivi chimici	8	6

1.2.1. IL RICICLO

Gli pneumatici sono sottoposti a continue sollecitazioni che provocano usura nel battistrada inducendo l'utente a sostituirlo ciclicamente. Dopo aver svolto la mansione per cui sono stati creati, gli pneumatici usurati (PU), possono essere rigenerati o riutilizzati. Quando però, gli pneumatici non possiedono più i requisiti necessari di efficienza e sicurezza per essere reimpiegati, neppure attraverso la ricostruzione, diventano un rifiuto pneumatici fuori uso (PFU) (Figura 3) e vengono mandati alla raccolta per il recupero energetico dei materiali. Il recupero e lo smaltimento di PFU è un tema caldo in tutto il mondo: nell'Unione Europa ogni anno vengono generati 5,5 milioni di tonnellate di PFU da gestire secondo criteri ecologici (Figura 4); solamente in Italia ogni anno vengono prodotte 400 mila tonnellate di rifiuti all'anno. Va ricordato che l'eurozona ha leggi restrittive rispetto al resto del mondo, in Nuova Zelanda tanto per fare un esempio, vengono prodotti ogni anno 3,5 milioni di tonnellate di rifiuti mentre negli stati uniti più di 300 milioni. Compresa la dimensione del problema, nel 1989 nasce l'European Rubber & Tyre Manufacturers' Association (ERTMA), associazione costituita da esperti individuati nei maggiori produttori di pneumatici in Europa. Questa associazione ha lo scopo di promuovere la gestione ecologica ed economica dei PFU negli stati dove questi materiali vengono ancora mandati in discariche o ancor peggio inseriti in circuiti illegali. Questa, cerca di creare un mercato sostenibile in grado di

assorbire i derivati dei PFU attraverso la promozione e la ricerca di metodi innovativi per il riciclo e il trattamento. In Figura 5 è possibile vedere come nel tempo l'attenzione a questa problematica sia aumentata e dal 2009 si riesce a recuperare più del 90% dei PFU; è possibile notare come il recupero sottoforma di energia (46%) è preferito al recupero del materiale (28%) e c'è ancora una percentuale troppo elevata (5%) di PFU che viene abbandonato in discarica.

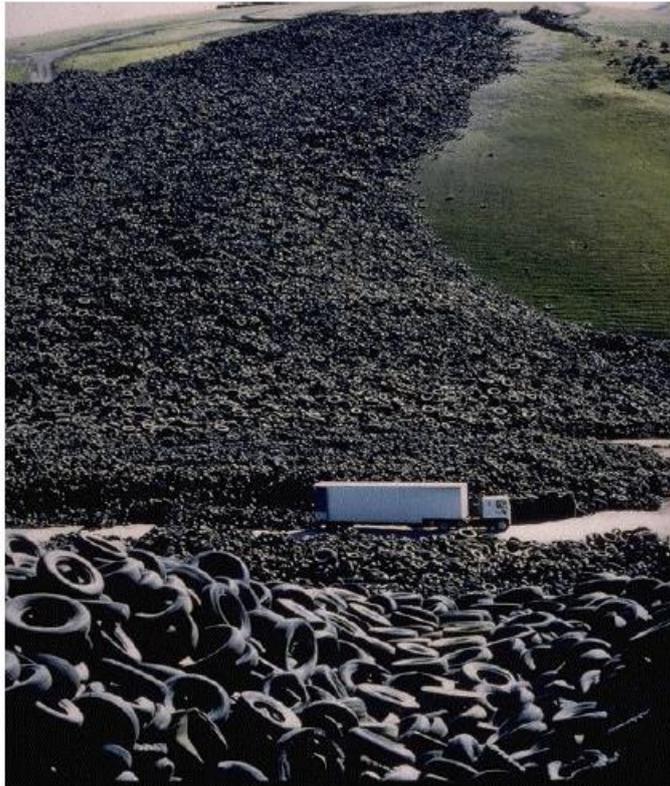


Figura 3. Discarica di pneumatici

Oggi la gestione dei PFU in Europa avviene mediante tre diversi sistemi (Figura 6):

- Sistema a tassazione. I produttori vengono tassati dallo stato il quale è strettamente responsabile dell'organizzazione e paga gli operatori predisposti al recupero; l'imposta viene poi applicata al consumatore.
- Libero mercato. Le entità nazionali predisposte stabiliscono gli obiettivi da raggiungere e i referenti; questo sistema però, non prevede il responsabile di filiera. In questa maniera tutti gli operatori stipulano un contratto e agiscono in maniera conforme con la legislazione locale sui rifiuti.

- Responsabilità del produttore. L'assetto legale viene definito dalla legge, la responsabilità di organizzare la gestione dei PFU viene conferita ai produttori. Grazie a questo sistema si assiste alla nascita di società senza scopo di lucro finalizzate alla gestione di PFU. I produttori devono monitorare e rendicontare alle autorità nazionali; questo garantisce la tracciabilità. I costi necessari alla gestione vengono saldati mediante un contributo al momento dell'acquisto del prodotto seguendo il principio.

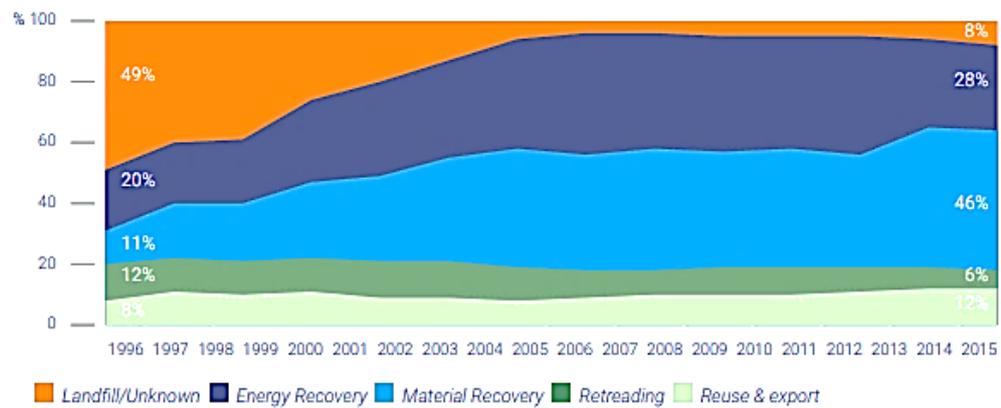


Figura 4. Principali utilizzi del PFU in Europa [4]

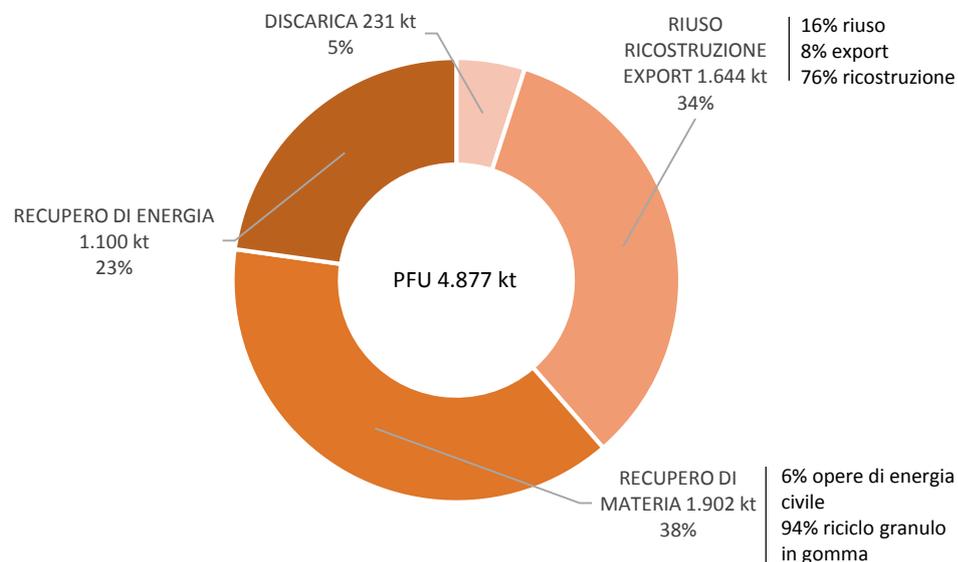


Figura 5. Ripartizione delle modalità di recupero degli PFU in Europa nel 2016 [4]

Questi sistemi hanno in comune l'obiettivo di smaltire i PFU recuperando materiali ed energia. Il PFU possiede caratteristiche chimico-fisiche che lo rendono capace di prestarsi in molte applicazioni sotto forma di granulo di varie forme e dimensioni

inoltre, è caratterizzato da un potere calorifero equiparabile a quello del carbone (circa 7.500-8.000 kcal/kg) rendendolo fonte di energia largamente usata oggi per soddisfare il bisogno di settori industriali. In Italia è stato utilizzato il sistema “responsabilità del produttore” con il DM 82/2011 che aveva appunto l’obiettivo di regolare e fornire trasparenza al fenomeno; questo ha in realtà prodotto complicanze. Il decreto obbliga i produttori a gestire gli pneumatici nella stessa misura in cui questi vengono prodotti; il risultato è stato che i produttori danno in appalto l’attività di raccolta e di riciclaggio a enti terzi, raggiunto il limite imposto dalla legge questi non hanno più obblighi e il sistema collassa. In sostanza i produttori sarebbero obbligati a ritirare gli pneumatici ma, dichiarando che hanno raggiunto il limite imposto, questi rimangono ai gommisti sebbene essi abbiano già pagato l’eco contributo. L’effetto, quindi, è quello di indurre in un’illegalità le attività che si trovano a dover smaltire gli pneumatici [3].

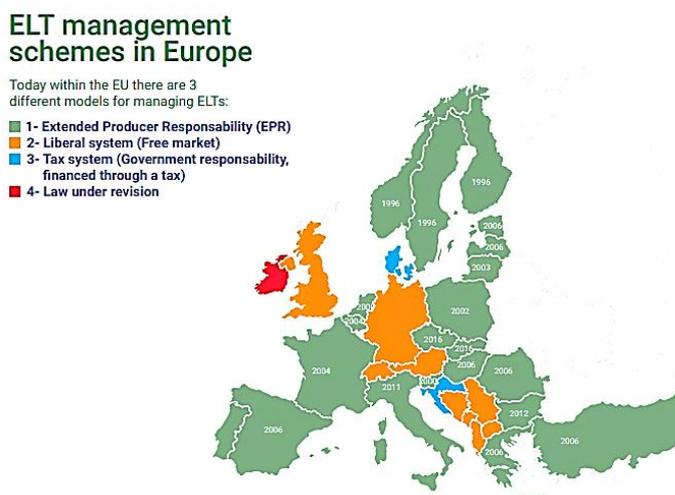


Figura 6. Geografia dei sistemi di gestione dei PFU in Europa [4]

1.2.2. LE MODALITÀ DI RECUPERO

È possibile partire dall’assunto che il problema degli pneumatici è risolvibile capovolgendo l’idea di rifiuto in sottoprodotto da riutilizzare, nell’Unione Europea si stanno affermando sistemi per il recupero di PU molto efficaci.

Attraverso la *termodistruzione* è possibile recuperare lo pneumatico sottoforma di energia: i forni degli impianti che utilizzano questa tecnologia garantiscono processi completamente affidabili ed efficienti dal punto di vista ecologico. Questi utilizzano la

tecnologia dei forni a letto fluido e quella a tamburo rotante. Il riciclaggio energetico degli pneumatici produce un inquinamento in atmosfera pari a quello che si produrrebbe con i tradizionali combustibili fossili quindi, scegliere i PFU come fonte di energia piuttosto che i combustibili fossili, significa non attingere a una fonte in via di esaurimento e allo stesso tempo contribuire allo smaltimento di questi rifiuti accumulati nelle discariche. Nonostante negli anni lo sviluppo di tecnologie innovative garantisca una sostanziale riduzione delle emissioni, la combustione di pneumatici può generare fumo, anidride solforosa, ossido di azoto e altri elementi chimici danneggiano l'inquinamento atmosferico. Dal punto di vista della sostenibilità, il riutilizzo degli pneumatici è da preferirsi alla combustione per la generazione di energia. Solitamente si cerca di eseguire le operazioni di combustione per il recupero energetico in paesi dove i controlli siano minimi (quindi all'estero) disubbidendo alla Direttiva Europea che prevede di trattare i rifiuti nel luogo in cui vengono prodotti. Quindi, oltre all'incremento di CO₂ dovuta alla combustione, si assiste a d un incremento di emissioni per trasportare i rifiuti da una parte all'altra [3].

Mediante la triturazione è possibile ridurre la granulometria dei PFU per poterle riutilizzare nella costruzione di altri manufatti. Prima di tutto si effettua il processo di macinazione a temperatura ambiente, questo è un processo meccanico che utilizza lame rotanti a cui possono essere sottoposti indistintamente pneumatici di auto, di autocarri o in generale, qualsiasi scarto di gomma.



Figura 7. Mulino tritratore e ciabattato di pneumatico

Successivamente agli pneumatici vengono tolti gli anelli metallici e messi all'interno di macchine tritratrici per ottenere dell'ordine di 80x80 mm. La velocità di triturazione risulta piuttosto elevata in modo da evitare il surriscaldamento dei mulini. Il materiale

ottenuto (ciabattato) viene mandato alla fase di granulazione per ridurre ulteriormente le dimensioni (Figura 7). Durante questa fase si separano le tre componenti: l'acciaio, la gomma e la parte tessile. Infine, è possibile continuare a ridurre la granulometria attraverso l'utilizzo di polverizzatori; la dimensione prodotta dipende principalmente dal numero di volte in cui la gomma viene processata. Con "Crumb Rubber" si definisce la gomma granulata di dimensioni comprese tra 5 mm e 0,4 mm mentre il "Powdred Rubber" ha una pezzatura che va da 1 mm a 0,4 mm. Va inoltre ricordato che questi trattamenti mantengono invariata la struttura molecolare del materiale (Figura 8).



Figura 8. Mulino granulatore e granulato di gomma

1.2.3. EFFETTI AMBIENTALI

Le questioni ambientali a lungo termine associate all'uso della gomma riciclata nei terreni, come la contaminazione delle acque sotterranee e gli impatti sull'ecologia locale sono state oggetto di intenso dibattito. Da precedenti test di laboratorio si è dimostrato che le concentrazioni di componenti metallici e di sostanze organiche erano ben al di sotto degli standard di tossicità definiti dai limiti normativi a dimostrazione che la gomma di scarto non è un materiale pericoloso [5]. L'aumento dei livelli di concentrazione di ferro e manganese rimane una preoccupazione comune; tuttavia, il livello di ferro è specificato nei limiti normativi solo nello standard estetico dell'acqua potabile (gusto), piuttosto che per motivi di salute. Inoltre, il manganese è naturalmente presente nelle acque sotterranee. Si può quindi concludere che esiste una scarsa o nessuna probabilità che la gomma ottenuta dagli PFU possa contaminare il terreno o le falde acquifere; questi due materiali risultano essere completamente inerti.

In definitiva, essendo la sabbia un materiale altamente inerte come la gomma, che oltretutto viene processata al fine di aumentare la propria resistenza all'usura e agli agenti atmosferici, si può dire che i due materiali non costituiscono un pericolo per la salute.

2. BACKGROUND DELL'ISOLAMENTO SISMICO

2.1. SVILUPPO STORICO DELL'ISOLAMENTO SISMICO

I terremoti rappresentano sicuramente il fenomeno naturale più pericoloso, sia per quanto riguarda i danni causati alle strutture e infrastrutture, sia, ancor peggio, in termini di perdite di vite umane.

Da sempre l'uomo ha cercato di difendersi da questa minaccia: la prima idea di isolamento sismico risale infatti agli antichi greci che, per rendere "antisismici" alcuni templi antichi, interponevano tra le fondazioni e il terreno strati di materiale appositamente scelto affinché l'edificio, in caso di sisma, scivolasse rispetto al terreno; evitando così gravi danni all'edificio.

Alcuni esempi possono essere:

- Il tempio di Heraion di Olimpia situato su strati alterni di carbone e velli di lana (IV secolo a.C.).
- Il tempio di Atena ad Ilion e il tempio di Paestum costruiti su strati di sabbia e pietrisco.

Inserire strati di terreno soffice tra il terreno e la fondazione era una pratica ben conosciuta anche in America Latina (Perù), ne sono esempi:

- Le mura della città di Cuzco (XIII secolo), le cui fondazioni sono realizzate su uno strato di sabbia e sassi di spessore un metro.
- Il monastero di Santa Catalina di Arequipa (XVI secolo), le cui fondazioni poggiano su una base isolante di sabbia e sassi.

Seppur questi siano metodi semplici e modesti dal punto di vista ingegneristico hanno permesso a parecchie costruzioni di arrivare ai giorni nostri, sopravvivendo a molti fenomeni sismici distruttivi [6].

Per trovare il primo documento che certifica effettivamente il concetto di isolatore sismico si deve aspettare il 1870, quando il francese Juels Touaillon pensò di usare delle sfere portanti interposte tra la fondazione e il basamento della struttura in modo tale

da differenziare il movimento orizzontale da quello verticale. L'idea di Touallion però, non fu mai realizzata e si dovette aspettare un altro secolo per vedere le idee del francese trovare applicazione in prototipi effettivamente utilizzabili (Figura 9).

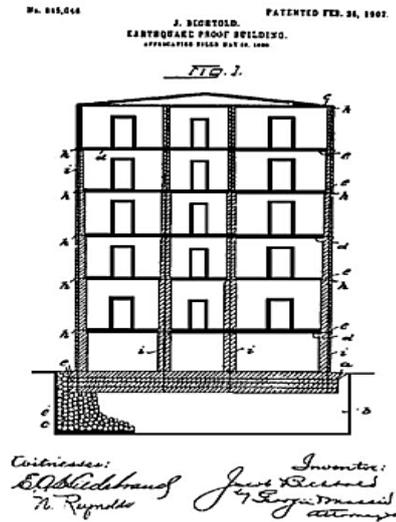


Figura 9. Brevetto di Juels Touaillon [3]

Bechtold nel 1906, in scia all'intuizione di Touaillon, propose di utilizzare un cuscino fatto di sfere metalliche, a supporto della struttura, che potesse essere considerato uno strato isolante per la struttura stessa (Figura 10).

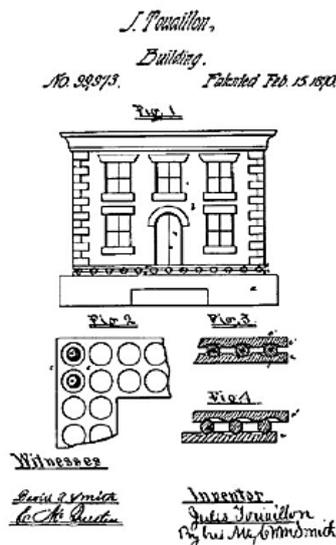


Figura 10. Brevetto originale di Bechtold [7]

Questa idea venne riportata in un lavoro intitolato "Earthquake Proof Building", titolo che andava proprio a testimoniare la forte esigenza del tempo di proteggere le strutture

dai terremoti. Anche questo progetto però non fu realizzato. Sebbene queste idee fossero ancora troppo semplici e rudimentali era chiaro che la ricerca si stava muovendo nella direzione giusta [6].

Nel 1909 il medico inglese Calantarents produsse il primo progetto di isolamento sismico completo, in cui vennero riportati anche i relativi dettagli costruttivi. La proposta era quella di costruire la struttura su uno strato composto da sabbia fine e talco, che avrebbe permesso all'edificio, in caso di terremoto, di scorrere senza produrre gravi danni allo stesso (Figura 11).

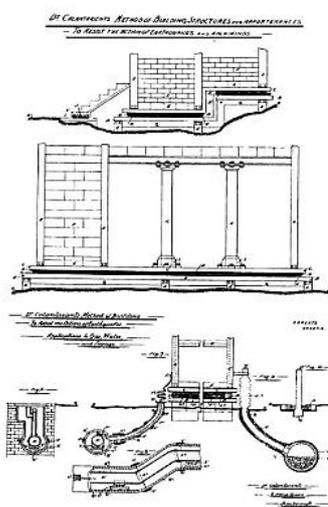


Figura 11. Brevetto originale di Calantarents [7]

Fino a quel momento tutte le idee facevano riferimento all'isolamento della struttura ma. Martel, nel 1929, propose un lavoro che prese il nome di "flexible first story concept". L'idea era quella di introdurre una serie di pilastri flessibili al primo piano dell'edificio, questo per permettere alla struttura di aumentare il proprio periodo naturale e quindi di ridurre le accelerazioni di piano e le conseguenti sollecitazioni prodotte.

Al "flexible first story concept" seguì il lavoro di Green e Jacobsen "the soft first method" che riportò per la prima volta un esempio di come l'energia possa essere dissipata mediante plasticizzazione di elementi strutturali.

A Los Angeles, nel 1971, fu costruito l'ospedale Olive View sfruttando proprio questa idea, ma, non appena finiti i lavori di costruzione, si verificò un terremoto nella località di San Fernando che produsse danni significativi alla struttura (Figura 12). Dunque,

l'applicazione fallì nel suo intento, i risultati non lasciavano dubbi: un piano costituito da pilastri meno rigidi non è sufficiente ad assorbire tutta l'energia che il sisma impone alla sovrastruttura [6].



Figura 12. Collasso dell'ospedale Olive View

Nel 1969 nell'ex Unione Sovietica si realizzò sulla scuola elementare Johan Heinrich Pestalozzi in Skopje (Macedonia) la prima applicazione di isolamento sismico, utilizzando elementi in gomma che facevano da supporto alla sovrastruttura (Figura 13). Sia la fase progettuale che la fase realizzativa fu completamente affidata a un gruppo di ingegneri svizzeri. Il nome del sistema pionieristico impiegato per isolare la struttura era "Swiss Full Isolation 3D (fbi-3D)".

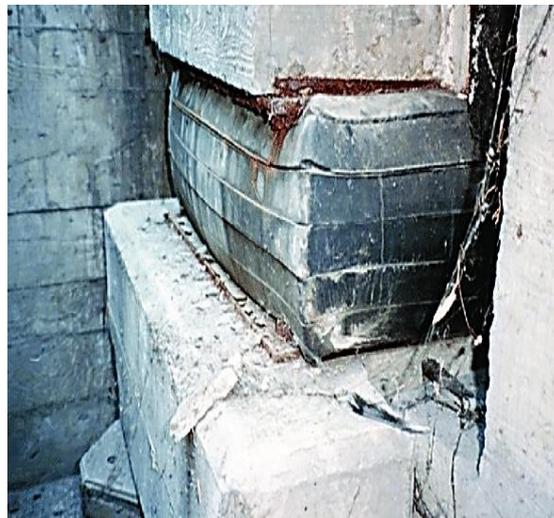


Figura 13. Dettaglio di uno degli isolatori in gomma utilizzati

Il sistema consisteva in cinque appoggi semplici in gomma non armata, prodotti a partire da fogli di gomma di 70 cm in spessore e larghezza. La struttura ebbe problemi causati dall'elevata deformabilità lungo l'asse verticale che produssero una rotazione e

una conseguente modifica dello schema statico della struttura. Questo sistema non rispettò le aspettative, addirittura fu necessario inserire vincoli aggiuntivi per fronteggiare le azioni orizzontali non sismiche di piccola entità, come ad esempio il vento. La ricerca, da questo momento, si incanalò nel percorso che portò in seguito alle moderne tecniche di isolamento sismico.

In Inghilterra, negli anni 70, la Malaysian Rubber Producers's Research Association (MRPRA) produsse, per la prima volta nella storia, dispositivi elastomerici in gomma armata, utilizzando un particolare processo di produzione che si basava sulla vulcanizzazione di strati di gomma e lamierini di acciaio. Tra il 1958 e il 1981 furono eseguite molte ricerche finalizzate ad unire le caratteristiche principali della gomma (elevata deformabilità) alle proprietà dell'acciaio (resistenza a trazione, resistenza a compressione e tensioni di rottura elevate). È proprio in questo periodo che nasce l'isolamento sismico nell'accezione dei tempi moderni.

Negli anni 70 in Francia, cogliendo l'occasione di dover intervenire su una serie di centrali nucleari, si decise di installare i primi dispositivi antisismici. Questi dovevano proteggere le suddette strutture da scosse di intensità pari a 0,2 g e l'obiettivo principale era quello di non modificare le strutture esistenti. A tale proposito, nelle zone con maggiore intensità sismica, vennero installati sia dei dispositivi a scorrimento caratterizzati da un coefficiente attritivo del 20% sia isolatori in gomma armata. L'isolatore in neoprene con lamine di acciaio rappresentava il nucleo del dispositivo, che veniva poi collegato a piatti di bronzo connessi a loro volta a piatti di acciaio inossidabile. La funzione del neoprene era quella di attribuire una ridotta capacità di scorrimento: una volta che si fosse superato il limite di spostamento sarebbe iniziato lo spostamento relativo tra i piatti in bronzo. Ovviamente veniva garantita la completa funzionalità anche per sismi che imponevano grandi scorrimenti. Non venne però pensato un dispositivo di ricentraggio, fatta eccezione per il contributo che il nucleo in neoprene dava nella fase di scarico (Figura 14).

Da qui l'ingegneria antisismica si è evoluta sempre più, le recenti tecniche di isolamento sismico hanno avuto una grande diffusione specialmente nella costruzione di ponti e

viadotti. La maggior parte delle applicazioni avvennero in Giappone che è storicamente uno dei territori più soggetti a fenomeni sismici.

La consacrazione definitiva dell'isolamento sismico avvenne negli anni '80 con applicazioni in tutto il mondo di dispositivi antisismici.

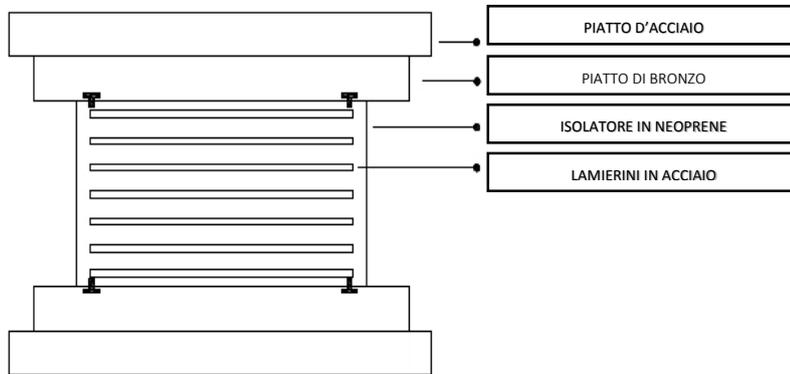


Figura 14. Isolatore del sistema "Electricite-de-France" [8]

Fino a questo momento, i vantaggi ormai palesi degli isolatori erano rimasti "su carta", mancava ancora un riscontro effettivo. Tra il 1994 e il 1995 si sono verificati due sismi catastrofici: nel '94 Northridge in California e nel '95 Kobe in Giappone (che ha provocato più di 6.000 vittime e 300.000 persone sfollate) hanno confermato i vari studi sperimentali sviluppati precedentemente.

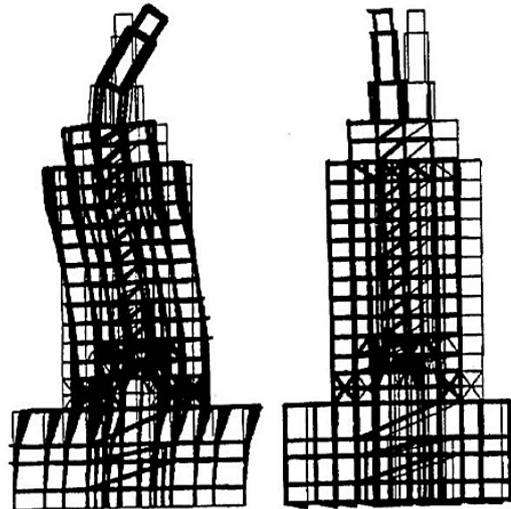


Figura 15. Previsione di risposta al sisma della struttura a base fissa (sinistra) ed isolata (destra) [8]

In queste aree, usualmente colpite dai terremoti, erano già state realizzate delle installazioni di isolatori sismici e si era potuto osservare come, nonostante l'intensità dei due fenomeni fosse notevole, le strutture isolate reagivano particolarmente bene al

terremoto. Negli anni '90 il settore dell'isolamento sismico continuò ad ampliarsi e si iniziarono a realizzare anche interventi di adeguamento strutturale. Gli statunitensi furono i pionieri di questo tipo di interventi con la City Hall di Oakland. Questa struttura, segnata nel registro storico dei monumenti degli USA, risultava essere particolarmente importante. Era dunque fondamentale conservare il valore storico della struttura ma altrettanto importante era conservare l'architettura interna. Poiché nel 1989 il sisma di Loma Prieta produsse notevoli danni sull'edificio si decise di inserire ben 111 isolatori in gomma armata, dei quali 36 possedevano un nucleo in piombo. I dispositivi vennero inseriti tagliando i pilastri al primo piano, durante i lavori l'intera struttura veniva sostenuta momentaneamente mediante martinetti idraulici. Di seguito la previsione del comportamento della struttura nel caso di base fissa e nel caso di base isolata [8]. Un altro esempio di adeguamento sismico piuttosto significativo fu l'intervento di adeguamento della San Francisco City Hall nel 200, dove qui vennero inseriti anche degli shear walls accoppiandoli al sistema di isolamento. Il costo totale dell'intervento fu di 105.000.000 dollari. In fine si ricorda che nel 1981 ci fu la prima applicazione su territorio italiano: la stazione dei vigili del fuoco nel comune di Napoli [8] (Figura 15).

2.1.1- IL PRESENTE DELL'ISOLAMENTO SISMICO

Oggigiorno l'isolamento sismico sta avendo una larghissima diffusione ovunque nel mondo, testa di serie è il Giappone come possibile vedere nella Figura 16 L'Italia attualmente occupa il quarto posto in questa classifica: negli ultimi anni si è potuto osservare un notevole aumento delle opere isolate sismicamente. L'incremento più significativo si è verificato negli ultimi 20 anni come possibile osservare in Figura 17.

2.2. SISTEMI DI CONTROLLO PER LA PROTEZIONE SISMICA DELLE STRUTTURE

Un terremoto produce, all'interno della struttura, forze inerziali pari al prodotto delle masse per le accelerazioni relative alle vibrazioni prodotte dal moto del suolo. Con l'obiettivo di soddisfare la disequazione $\text{capacità} \geq \text{domanda}$, la filosofia iniziale di progettazione antisismica aveva l'obiettivo di incrementare la capacità della struttura. La domanda è imposta dal movimento del terreno mentre la capacità viene definita

sulla base dalle caratteristiche di deformabilità e di resistenza nel campo non lineare della struttura.

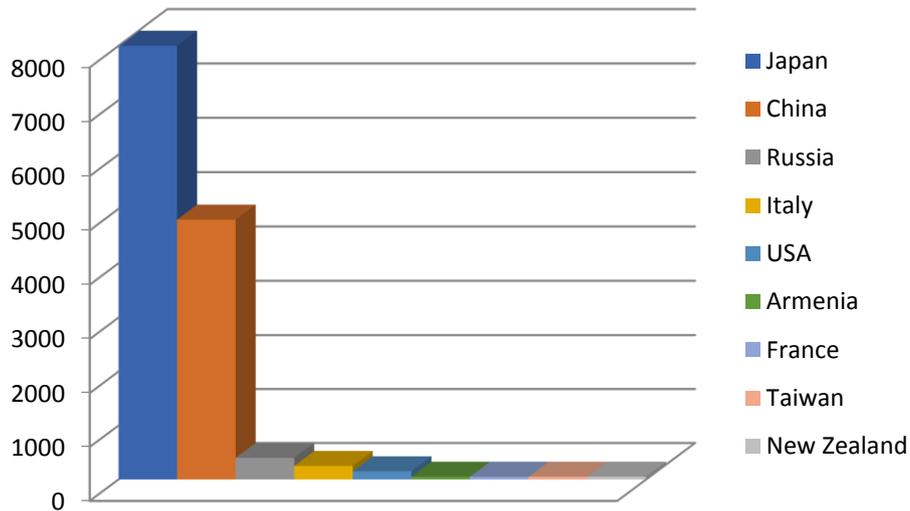


Figura 16. Numero di edifici isolati nel mondo [6]

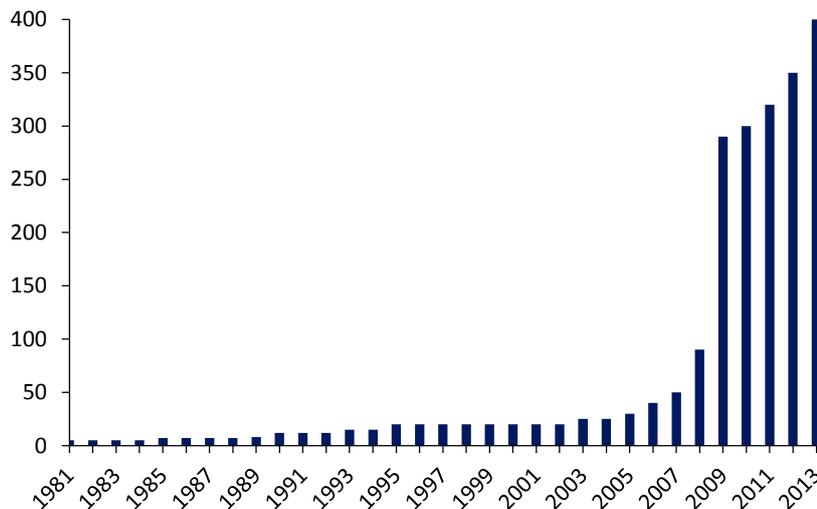


Figura 17. Edifici isolati in Italia [6]

Al fine di evitare danni strutturali, al crescere dell'intensità del sisma atteso, si dovrebbe incrementare la resistenza della struttura in modo proporzionale. Poiché la costruzione possiede riserve importanti di duttilità, il danno prodotto non coincide con il collasso (capacità degli elementi strutturali di reggere variazioni in campo plastico, conservando la loro resistenza costante). Non è inoltre finanziariamente conveniente incrementare la resistenza della costruzione indistintamente, considerando la ridotta possibilità che si

verifichino eventi sismici violenti. I codici sismici attuali quindi, permettono di ricorrere alla duttilità strutturale per soddisfare la disequazione capacità \geq domanda, che diventa dunque condizione sulla duttilità, o sulle deformazioni e non più sulla resistenza. Accettare elevata duttilità, implica accettare danneggiamenti sugli elementi strutturali e i relativi costi di riparazione.

Aumentare la capacità induce ad una scelta tra le due alternative possibili:

- Incrementare la resistenza, con conseguente aumento dei costi di realizzazione e aumento delle accelerazioni sulla struttura.
- Incrementare la duttilità complessiva, attraverso una progettazione rivolta allo sviluppo di meccanismi di plasticizzazione mediante oculati dettagli costruttivi. Questa prende il nome di “capacity design” (o gerarchia delle resistenze) ed è la metodologia che ispira le moderne normative [9].

Tuttavia, alcune strutture pensate con questi criteri non hanno manifestato un comportamento soddisfacente. È esemplare un parcheggio in California che il 17 gennaio 1994 ha subito il collasso a seguito del terremoto di Northridge (Figura 18).

La filosofia alternativa ha invece l'obiettivo di ridurre la domanda sismica e non si affida più sulla deformazione plastica ma tende a ridurre il campo plastico della struttura fino ad eliminarlo, in modo da preservare l'utilizzabilità della struttura. Questi nuovi obiettivi sono perseguiti attraverso l'ausilio della tecnologia dei dispositivi di controllo strutturale.



Figura 18. Collasso del parcheggio California State University

La tecnologia finalizzata al controllo strutturale impiega sistemi capaci di variare la risposta della struttura soggetta all'azione sismica riducendone le vibrazioni, senza ricorrere alle deformazioni plastiche. Le tecniche finalizzate al controllo delle strutture sono senza dubbio uno strumento efficace per minimizzare l'effetto dell'azione sismica

sulle strutture. Per capire in che modo agiscono si può far riferimento alla seguente equazione:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -MB\ddot{u}_g + F(\ddot{u}, \dot{u}, u, t) \quad (1)$$

L'isolamento sismico viene utilizzato per minimizzare le forze sismiche e può essere applicato seguendo due obiettivi diversi:

- Ridurre l'energia sismica entrante nel sistema: per fare ciò è necessario allungare il periodo proprio del sistema.
- Dissipare o assorbire l'energia del sisma mediante cicli isteretici.

Tra questi metodi di controllo si possono identificare principalmente tre approcci distinti: attivo, semi-attivo e passivo (Figura 19).

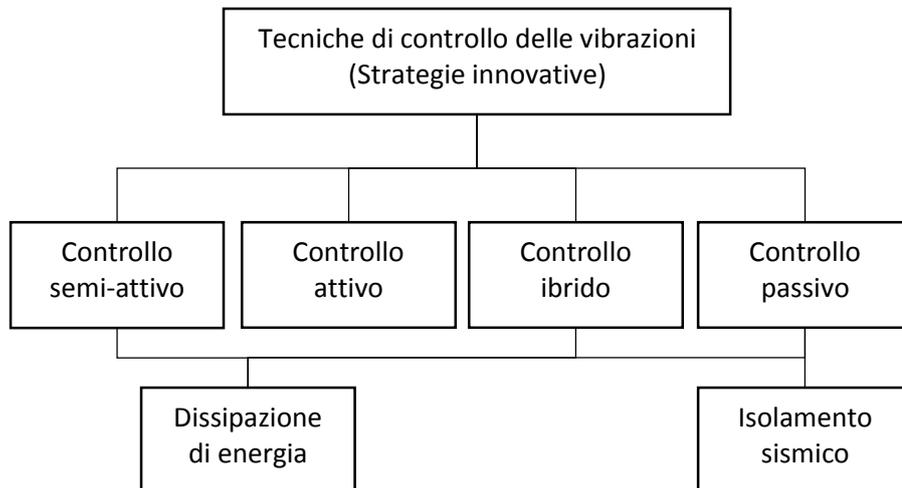


Figura 19. Sistemi di protezione sismica delle strutture [1]

2.2.1. CONTROLLO ATTIVO

Questo tipo di sistemi monitorano la costruzione nel tempo, elaborano le informazioni e applicano in tempo reale un sistema di forze, in maniera tale da regolare più facilmente lo stato dinamico della struttura [10]. Il sistema di forze viene generato utilizzando un segnale di controllo prodotto da uno specifico algoritmo, il quale dipende dalla risposta della struttura. Facendo riferimento all'equazione 1 possiamo dire che questo sistema di controllo interviene direttamente sul termine $F(\ddot{u}, \dot{u}, u, t)$ modificando la risposta strutturale. Questa tecnica necessita di dispositivi elettronici e sensori, utilizzati per monitorare e controllare la risposta strutturale, che richiedono un'attenta e continua

manutenzione per reagire in maniera adeguata al fenomeno sismico. Una mancata manutenzione potrebbe portare ad un malfunzionamento dei dispositivi e questo renderebbe la struttura vulnerabile all'azione sismica. È possibile proteggere strutture mediante controllo attivo, per esempio, installando sulla sommità delle stesse degli attuatori idraulici che vanno a movimentare masse appoggiate su rulli. In questo modo si creano delle forze inerziali in controfase, ovvero si creano oscillazioni che vanno ad opporsi a quelle prodotte dall'evento sismico [6]. Le principali componenti di un sistema di controllo attivo sono (Figura 20):

- Sistema di monitoraggio: in grado di avvertire lo stato della costruzione.
- Sistema di controllo: riceve le informazioni e sceglie le contromisure da applicare.
- Sistema di attuazione dei comandi: impone fisicamente le contromisure alla struttura.

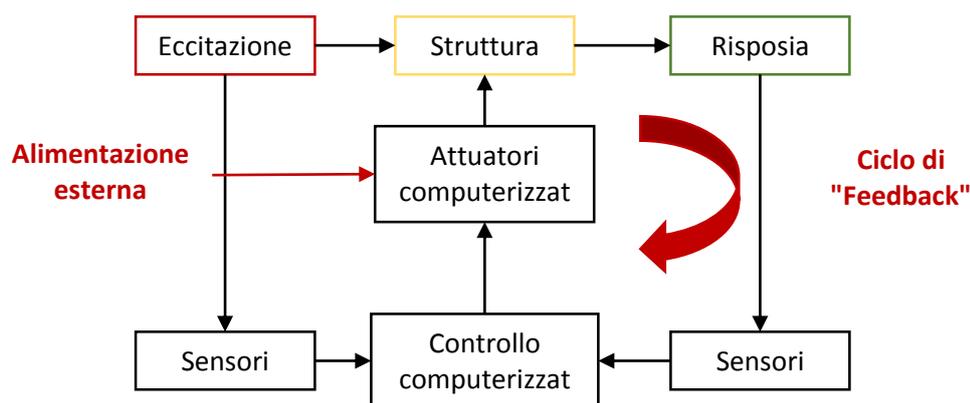


Figura 20. Schema di funzionamento dei sistemi attivi [10]

I vantaggi di questa tecnica sono: il garantire una risposta sismica efficace per ampi range di intensità e frequenze e l'ottimizzare la risposta all'eccitazione indotta da sisma e vento. Per contro si ha l'esigenza di una minuziosa manutenzione durante l'intera vita della struttura altrimenti, in caso di malfunzionamento del sistema, la costruzione risulta completamente vulnerabile. Inoltre, la progettazione risulta essere estremamente complessa: vengono impiegati sistemi parecchio onerosi ed è necessario il continuo apporto di energia esterna [6].

La dipendenza dal continuo apporto di potenza esterna ha limitato significativamente l'applicazione di questi sistemi sia in America che in Europa, sono invece più diffusi in

Giappone. Di seguito vengono riportati due esempi di edifici esistenti che utilizzano il sistema attivo come isolamento sismico (Figura 21 e Figure 22).

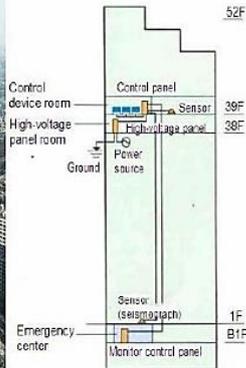


Figura 21. Shinsuku Park Tower [10]

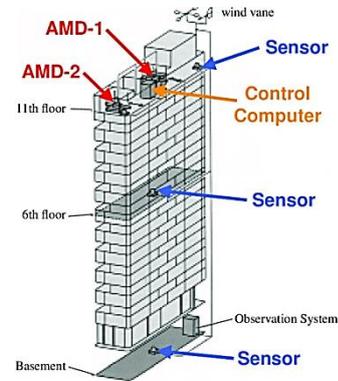


Figura 22. Kyobashi Seiwa Building di Tokyo

2.2.2. CONTROLLO IBRIDO (SEMI-ATTIVO)

Viene chiamato controllo semi-attivo la combinazione delle due tipologie di controllo: attivo e passivo (Figura 23). I sistemi ibridi si distinguono dai sistemi attivi perché hanno bisogno di un apporto relativamente piccolo di potenza esterna, senza la necessità di un sistema di monitoraggio globale [10]. Questi sistemi si basano sull'utilizzo di dispositivi simili a quelli del controllo passivo, hanno però proprietà meccaniche regolabili nel tempo. Il vantaggio di questo sistema è che richiede una potenza davvero bassa e, nell'ipotesi di malfunzionamento, riesce a garantire la protezione passiva.

Con la filosofia del controllo semi-attivo si riesce a superare le due problematiche associate ai sistemi "puri": la parziale efficacia dei sistemi passivi e la lentezza dei sistemi attivi. In questo sistema le forze richieste vengono fornite dall'evento sismico stesso mediante la deformazione di controventi di acciaio, opportunamente inseriti nei punti della struttura più sottoposti a spostamenti, e da dissipatori energetici innovativi, che possono modificare le proprie caratteristiche quasi istantaneamente [6].

In definitiva le prestazioni supplementari vengono attivate o modificate soltanto se si presentano determinati tipi di azioni dinamiche, solitamente quando l'azione sismica giunge ad elevate intensità. Un sistema integrato di sensori/unità di controllo analizza i dati che i sensori trasmettono in tempo reale, stabilisce i parametri meccanici da cambiare. Dopo aver cambiato le prestazioni, il dispositivo si interfaccia "passivamente"

con il resto della struttura. L'apporto di energia è quindi fortemente limitato poiché serve solamente al sistema di controllo e per l'esecuzione operazioni meccaniche poco dispendiose come l'apertura o la chiusura di valvole [10].

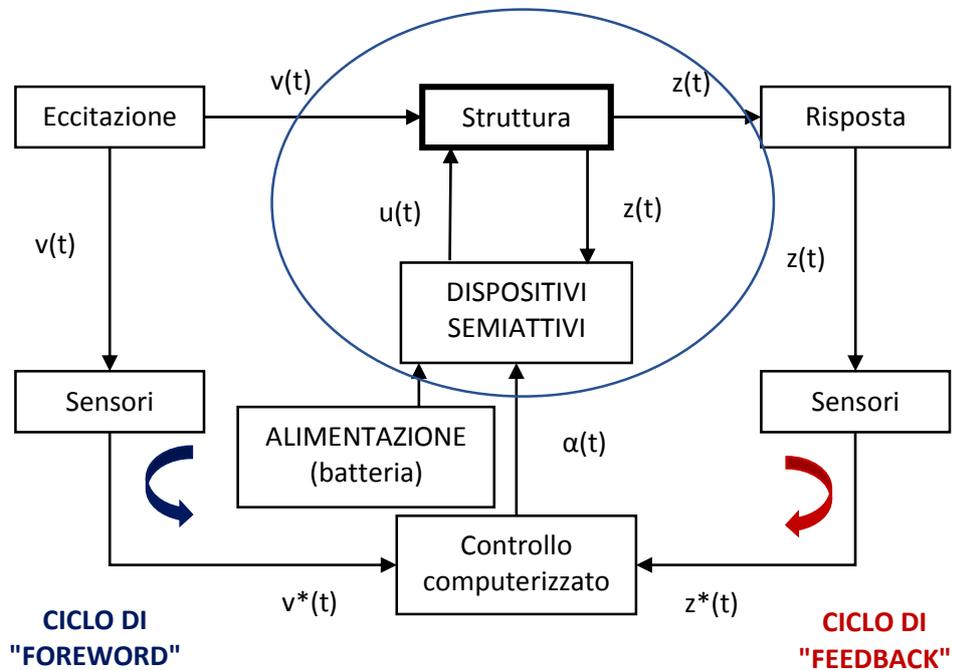


Figura 23. Schema di funzionamento di un sistema semi-attivo [10]

Dispositivi Magneto Reological (MR)

Nell'ambito del progetto Europeo SPACE è stato messo a punto un sistema che si basa su dispositivi oleodinamici che contengono un fluido magnetoreologico capace di modificare la propria viscosità in relazione al campo magnetico che lo circonda: quando il fluido MR è all'interno di un campo magnetico le particelle di ferro nel fluido si allineano, e, cambiando lo stato in semisolido ed aumentando la viscosità, varia la forza necessaria a muovere il dispositivo [10]. Il campo magnetico a sua volta può essere modificato facilmente gestendo una corrente che passa in circuiti posti attorno al dispositivo. In pochi millisecondi è possibile aumentare la rigidità del dispositivo anche di 50 volte. Questi dispositivi generalmente vengono posti tra il "soffitto" e "pavimento" tramite un controvento flessibile. Nel momento in cui si lascia passare la corrente all'interno del circuito i dispositivi si irrigidiscono, il controvento si deforma e accumula energia mentre quando si blocca il flusso di corrente il dispositivo perde rigidità e

torna ad occupare la sua posizione iniziale. Attraverso questo processo si va dunque a dissipare l'energia accumulata precedentemente. Sulla struttura viene inserita una rete di sensori opportunamente distribuiti ai quali viene collegato un computer che gestisce un algoritmo di controllo; in questo modo si definiscono così gli istanti in cui tutto il processo prende forma (Figura 24 e Figura 25).

Questo sistema venne installato per la prima volta a Forcheim, in Germania, su un ponte: i ponti sono generalmente molto flessibili, dal momento che non devono sopportare carichi eccessivi entrano in vibrazione molto facilmente, non solo per l'azione del sisma o del vento ma anche per il transito pedonale [6].

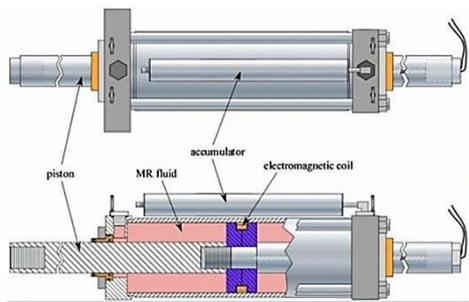


Figura 24. MR Dampers

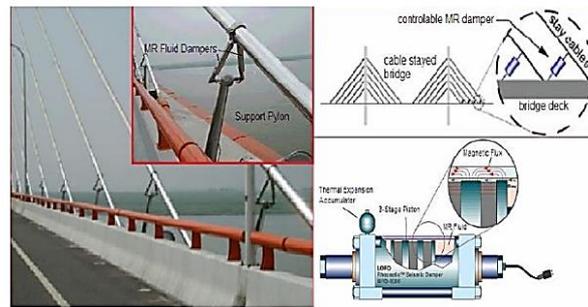


Figura 25. Dongting Lake Bridge, China [10]

Sistema Added Variable Stiffness (AVS)

In questo sistema, la rigidità dei controventi viene modificata dal software di controllo monitorando la risposta della struttura a seguito di un'eccitazione esterna. Il computer regola la chiusura e l'apertura della valvola di collegamento delle due camere d'olio e quindi aumenta o diminuisce la rigidità del controvento [10]. Kajima Technical Research Institute utilizza proprio questo sistema (Figura 26).

2.2.3. CONTROLLO PASSIVO

Nei sistemi passivi particolari dispositivi, disposti in maniera opportuna nella struttura, variano vantaggiosamente le proprietà di rigidità e dissipazione della costruzione, conseguendo una risposta migliore alle sollecitazioni imposte dal fenomeno sismico. I congegni intervengono in maniera passiva sulla struttura, mantenendo per l'intera vita dell'opera un comportamento costante deciso in fase di progetto.

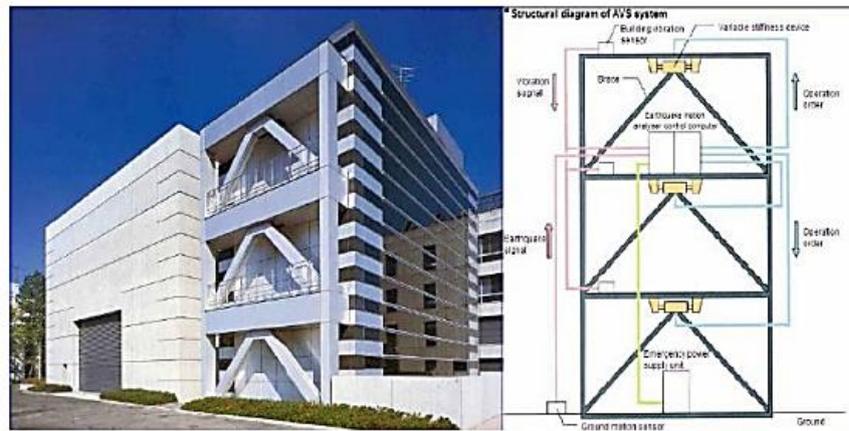


Figura 26. Kajima Technical Research Institute [10]

Questi dispositivi sono pensati per operare più soddisfacentemente durante il picco di intensità del sisma di progetto. Differentemente dai sistemi attivi e quelli semi-attivi il comportamento può essere ottimizzato solamente per un certo livello di azione sismica [10]. La massa, la rigidezza e lo smorzamento che identificano i primi tre termini dell'equazione (1) vengono modificati nel momento in cui si inseriscono i dispositivi di controllo passivo nella struttura.

Possiamo distinguere due tipologie di apparecchi, che sfruttano meccanismi diversi:

- *Dispositivi dipendenti dalla velocità*: apparecchi basati sull'utilizzo di fluidi viscosi che immettono forze nel sistema che dipendono dalla velocità relativa delle due estremità del dispositivo.
- *Dispositivi dipendenti dallo spostamento*: dispositivi che si basano sullo snervamento e sull'attrito attrito di un materiale; la forza che essi producono dipende dallo spostamento relativo delle estremità dell'apparecchio.

Generalmente la dissipazione di energia si può ottenere mediante:

- *Trasferimento di energia tra i vari modi di vibrare*: meccanismo che viene utilizzato negli assorbitori dinamici di vibrazioni attraverso l'inserimento di ulteriori oscillatori, aggiungendo così all'equazione 1 massa, rigidezza e smorzamento. Si richiede che questi dispositivi siano adeguatamente sincronizzati al fine di migliorare le prestazioni della struttura iniziale.
- *Trasformazione di energia cinetica in calore*: meccanismo che include sia dispositivi viscoelastici che dipendono dalla velocità di applicazione del carico, di

questi fanno parte quei dispositivi che si servono della deformazione dei solidi viscoelastici o fluidi e anche quelli che usano l'estrusione dei fluidi, sia dispositivi con funzione isteretica che hanno la capacità di dissipare energia in manieravindipendente alla velocità con la quale viene applicato il carico. Tra questi troviamo dispositivi basati sull'attrito tra superfici scorrenti e sullo snervamento dei metalli, ma anche una terza categoria rappresentata da quei dispositivi che attraverso molle interne o fluidi pressurizzati producono un comportamento forza-spostamento che include il ricentraggio del sistema.

Tabella 3. Classificazione sistemi passivi di dissipazione [6]

Classificazione dei dispositivi	Principi di funzionamento	Materiali e tecnologia	Obiettivi prestazionali
Dispositivi isteretici	<ul style="list-style-type: none"> • Attrito • Snervamento di metalli 	<ul style="list-style-type: none"> • Acciaio o piombo 	<ul style="list-style-type: none"> • Dissipazione di energia • Aumento di resistenza
Dispositivi viscoelastici	<ul style="list-style-type: none"> • Deformazione di fluidi viscoelastici • Deformazione di solidi viscoelastici • Estrusione di fluidi 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluidi altamente viscosi • Polimeri viscoelastici 	<ul style="list-style-type: none"> • Dissipazione di energia • Aumento di rigidità
Dispositivi ricentranti	<ul style="list-style-type: none"> • Attrito-molle • Fluidi pressurizzati • Materiali a trasformazione di fase 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluidi compressibili • Leghe a memoria di forma 	<ul style="list-style-type: none"> • Dissipazione di energia • Aumento di resistenza • Capacità ricentranti
Assorbitori dinamici di vibrazioni	<ul style="list-style-type: none"> • Oscillatori con masse sincronizzate • Oscillatori con liquidi sincronizzati 	<ul style="list-style-type: none"> • Masse-molle-dissipatori fluidi 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento dello smorzamento

I diversi sistemi di dissipazione passivi sono soggetti a una classificazione prestazionale che può essere riassunta nella Tabella 3.

Di fatto le uniche strade percorribili nella protezione sismica sono quelle dell'utilizzo di sistemi semi-attivi e sistemi passivi. In realtà i sistemi semi-attivi vengono messi da parte perché, seppur richiedano piccole quantità di energia, risultano piuttosto

complessi nella gestione e nella manutenzione. Si fa quindi riferimento ai sistemi di controllo passivo che a loro volta possono essere classificati in:

- Isolamento sismico.
- Dissipazione di energia.

2.3. DISPOSITIVI ANTISISMICI PIÙ UTILIZZATI

2.3.1. PRINCIPI BASE DEI SISTEMI DISSIPATIVI

Gli smorzatori sono elementi che hanno la capacità di assorbire\ dissipare l'energia che il sistema trasferisce alla costruzione. Essi permettono di trasformare l'energia cinetica che il terremoto trasmette alla costruzione in diverse forme di energia. Questo evita che l'energia sismica introdotta nella costruzione possa essere dissipata mediante la plasticizzazione degli elementi strutturali. I dissipatori trovano valida applicazione dove sono possibili spostamenti relativi tra due elementi strutturali: nelle strutture fornite di sistemi dissipativi l'energia entrante nella struttura resta invariata, diversamente da quanto avviene nel caso degli isolatori. Come già detto precedentemente questa energia viene dispersa sotto forma di calore mediante diversi meccanismi, aumentando così le capacità dissipative della struttura. Come è possibile vedere nella Figura 27 l'azione degli elementi dissipativi permette di limitare le deformazioni prodotte dal sisma e quindi ridurre il danno sugli elementi strutturali e sui componenti non strutturali.

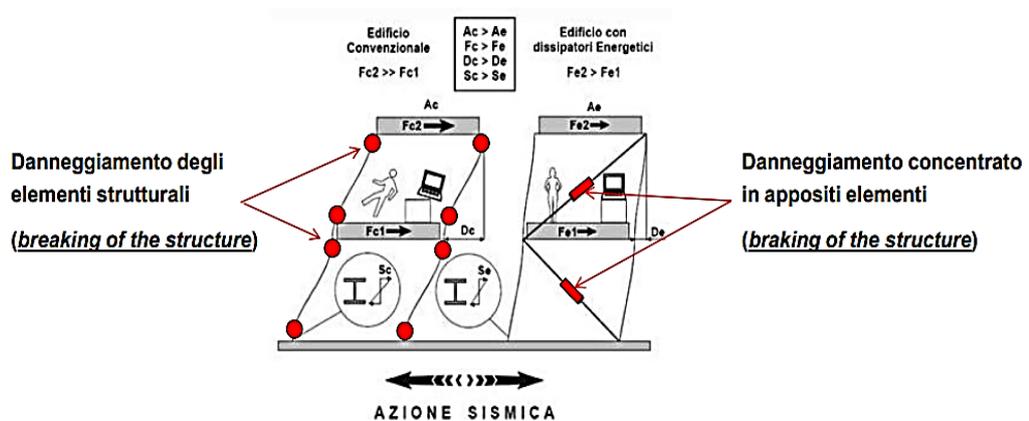


Figura 27. Comportamento dinamico di un edificio convenzionale con dissipatori [10]

L'obiettivo principale dei sistemi dissipativi è quello di ridurre le deformazioni all'interno degli elementi strutturali e quindi di migliorare lo smorzamento, la rigidezza e la resistenza della struttura (Figura 28).

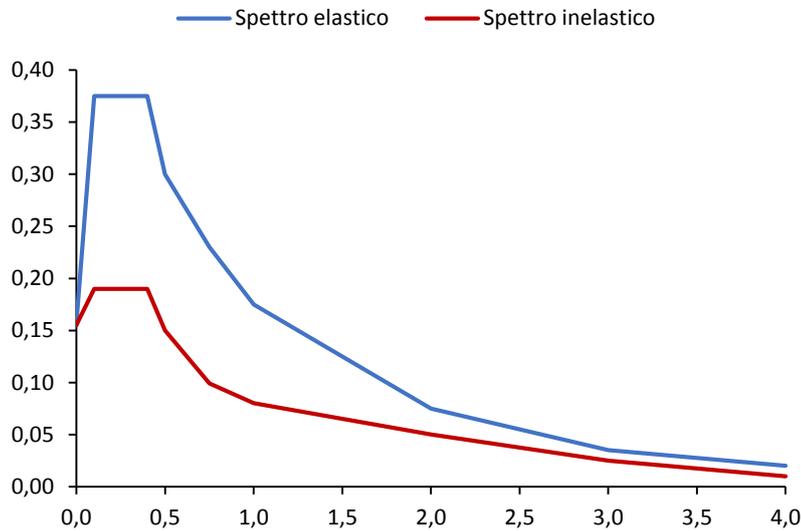


Figura 28. Effetto degli smorzatori sullo spettro di risposta

Smorzatori metallici (Metallic Yield dampers)

Tra i meccanismi disponibili più efficienti per la dissipazione dell'energia si può citare la deformazione inelastica dei metalli. Parecchi dispositivi che utilizzano questo meccanismo, sono formati da piatti di acciaio con una forma a X, oppure triangolare, in modo da raggiungere lo stato di snervamento del materiale in maniera quasi uniforme.

Lo smorzatore metallico Buckling Restrained Brace (BRB) è costituito da un controvento ad instabilità impedita e viene realizzato mediante un fusto interno in acciaio, caratterizzato da un elevato snervamento, circondato da un condotto dello stesso materiale (Figura 29). La zona tra il tubo e il fusto è colmata con un materiale simile al calcestruzzo mentre il fusto viene preservato dal contatto con questo materiale attraverso un rivestimento. Per opera dei carichi assiali il nucleo d'acciaio dissipa energia attraverso lo snervamento del materiale, mentre il tubo d'acciaio garantisce resistenza contro l'instabilità.

Un esempio tipico di smorzatore con piatti disposti a X è ADAS. Questo sistema è caratterizzato da una serie di piatti in acciaio la cui estremità superiore è connessa al solaio mentre l'estremità inferiore è collegata al sistema di controvento. Le più recenti

applicazioni hanno utilizzato questi dispositivi per il miglioramento sismico di edifici in Messico e negli Stati Uniti: questa tecnologia, infatti, può essere impiegata con successo anche su strutture esistenti [1] (Figura 30).

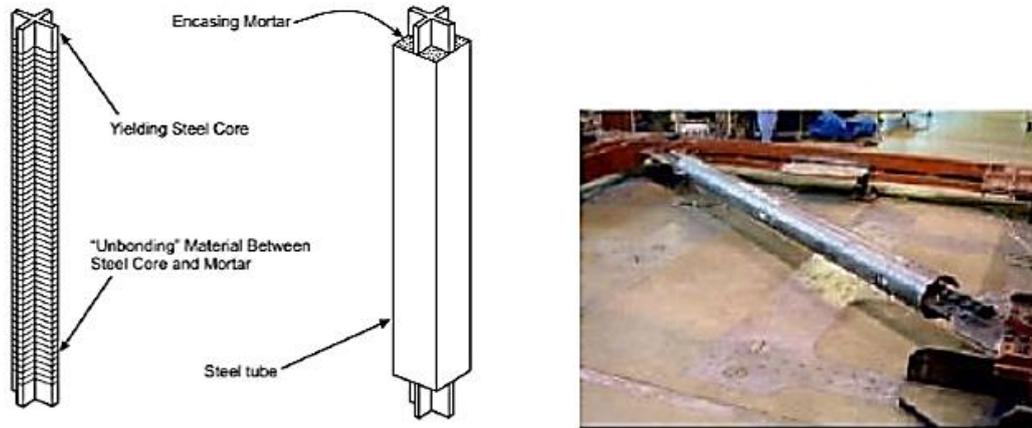


Figura 29. Smorzatore BRB [1]

Dissipatori ad attrito (Friction dampers)

Gli smorzatori ad attrito generano una forza d'attrito dissipativa tra due elementi, questi scivolano l'uno rispetto all'altro, sottoposti a una forza normale alla superficie di contatto. In Figura 31 un esempio di smorzatore rettangolare che viene connesso nel punto centrale, mediante bullonatura, a un sistema di controventatura a croce. Sotto carichi laterali la struttura si deforma in maniera tale che due controventi diventano tesi e gli altri due compressi. Questi dispositivi possono essere implementati sia in strutture nuove che in quelle già esistenti [1].



Figura 30. Dispositivi Isteretici X-shaped [1]



Figura 31. Esempio di applicazione dei Pall friction dampers in Canada [1]

Dissipatori viscoelastici (Viscoelastic dampers)

I materiali viscoelastici usati nelle applicazioni strutturali sono spesso polimeri o comunque sostanze a base vetrosa. Questo tipo di materiali ha la capacità di dissipare energia attraverso la deformazione di taglio. Il dissipatore più comune che sfrutta questo meccanismo è costituito da strati di materiale viscoelastico, posizionati tra due piatti d'acciaio e inseriti all'interno del controvento. Quando le due estremità dello smorzatore subiscono movimenti differenziali si produce del calore che viene dissipato dal dispositivo (Figura 32). Questi dispositivi vengono utilizzati con successo in diversi edifici: il World Trade Center di New York ne rappresenta un esempio [1].

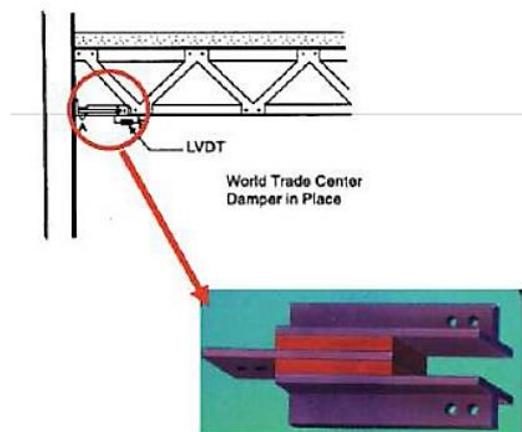


Figura 32. Applicazione un dissipatore VE [1]

Smorzatori viscoelastici fluidi (Viscous fluid dampers)

Gli smorzatori viscosi vengono impiegati già da tempo nell'industria aerospaziale e nel settore militare, mentre sono stati introdotti nel settore dell'ingegneria civile solo recentemente (Figura 33).

Uno smorzatore fluido viscoso è costituito generalmente da un pistone che scorre all'interno di un cilindro riempito da silicone o da un altro materiale viscoso (olio). Il pistone è caratterizzato da una serie di piccoli fori attraverso cui il fluido è costretto a transitare per passare da un lato all'altro del pistone: in questo modo viene dissipata energia. Questi dispositivi sono stati implementati in diverse strutture civili e spesso vengono combinati con l'isolamento sismico: nel 2005, ad esempio, questa tecnologia è stata utilizzata per la realizzazione dell'adeguamento sismico dell'AZADI hotel, un edificio di 26 piani costruito nel 1975 e situato a Teheran [1].

Sistemi Tuned Mass Dampers e Liquid Mass Dampers (LMD)

I Tuned Mass Dampers utilizzano un sistema massa-molla-smorzatore posto generalmente in cima all'edificio per contrastare il movimento del suolo (Figura 34).

Il dispositivo in sommità (TMD) trasferisce la forza d'inerzia alla struttura per ridurre la vibrazione. La sua efficacia è strettamente connessa alle caratteristiche dinamiche del dispositivo mentre le problematiche di questo sistema risiedono nel fatto che risulta efficiente per un solo modo di vibrare, ovvero quello dominante, e, inoltre, necessitano di molto spazio.

Per risolvere il problema che limita l'efficienza al solo primo modo di vibrare sono stati ideati sistemi a Multiple Tuned Mass Dampers (MTMD). Purtroppo, nonostante i diversi studi e sperimentazioni non si è ancora arrivati a una conclusione certa sulla migliore efficacia dei sistemi MTMD rispetto a quelli a massa singola.

Solitamente questi dampers vengono montati all'interno di grattacieli e sono costituiti da enormi blocchi di calcestruzzo sospesi tramite molle o pendoli.

Le prime applicazioni dei TMD sono state pensate per ridurre le vibrazioni indotte dal vento. Sono diversi i grattacieli che sfruttano questo tipo di controllo strutturale: su tutti vanno citati John Hancock Building di Boston, la Taipei 101 Tower in Taiwan e la Sydney Tower in Australia (Figura 35).

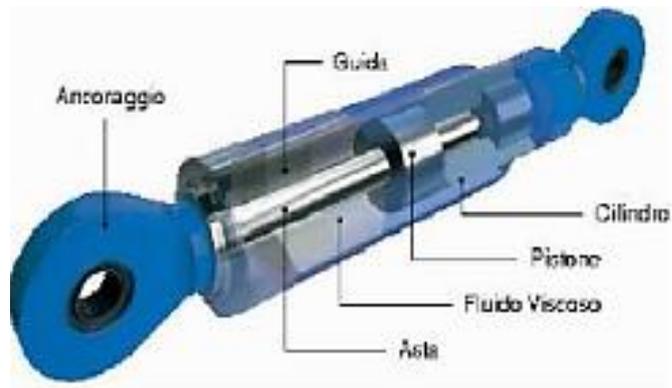


Figura 33. Smorzatore viscoelastice fluido [1]

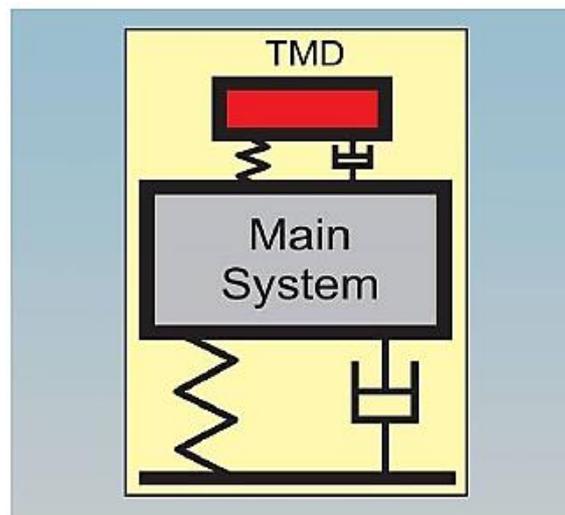


Figura 34. Schema di un dispositivo TMD applicato ad un edificio [1]

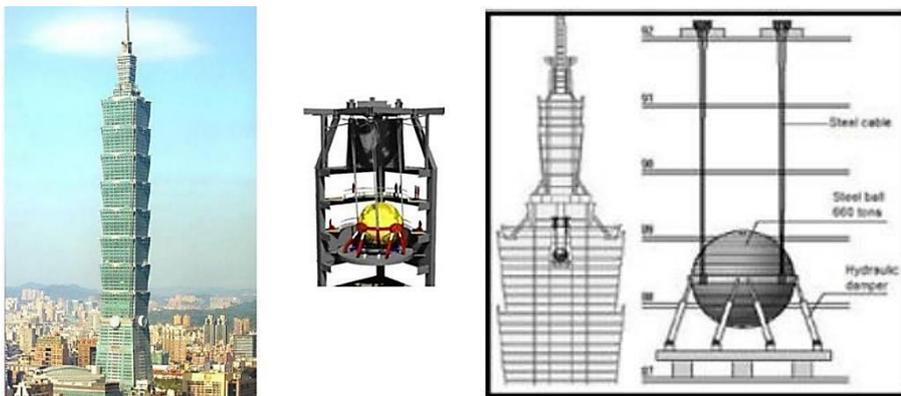


Figura 35. Active Mass Damper (660 t) presente nel grattacielo Taipei 101 (508 m)

Sistemi Tuned Liquid Dampers (TLD)

Nel caso dei Tuned Liquid Dampers Il sistema utilizzato nei sistemi massa-molla-smorzatore (TMD) viene sostituito da recipienti pieni di liquido: l'oscillazione della struttura provoca l'ondeggiare del liquido e questo consente di dissipare energia (Figura 36). Tra i vantaggi dei questi sistemi possiamo citare: il basso costo, la semplicità di installazione e la facilità con cui può essere variata la frequenza. Il TLD si è diffuso principalmente in Giappone, per il controllo di strutture sottoposte a vibrazioni importanti indotte dal vento. Nonostante una comprovata riduzione delle sollecitazioni, che può arrivare anche al 70%, questi sistemi non si sono dimostrati efficienti come i TMD. La più grande Colonna Tuned Liquid Damper del mondo è presente all'interno del Comcast Center di Philadelphia.

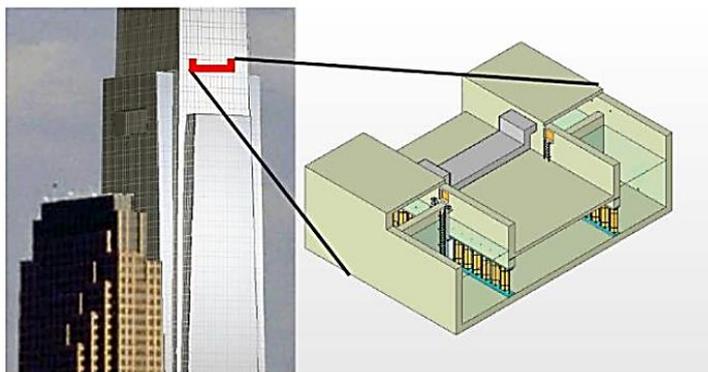


Figura 36. Il Tuned Liquid Damper della Comcast Tower

2.3.2. PRINCIPI BASE DELL'ISOLAMENTO SISMICO

L'isolamento sismico rappresenta il sistema più efficace per proteggere le strutture dagli effetti del terremoto e il principio su cui si fonda consiste nel disaccoppiare la risposta dinamica della struttura dal moto del terreno. Per realizzare questo disaccoppiamento si crea una discontinuità lungo l'altezza della struttura, in modo da permettere spostamenti relativi lungo l'asse orizzontale. In sostanza si deve permettere uno spostamento relativo tra la parte inferiore della struttura (sottostruttura) e quella superiore (sovrastuttura), in modo da ridurre la trasmissione della componente orizzontale dell'azione sismica e il suo relativo effetto dannoso. Spesso questa discontinuità viene realizzata tra la fondazione e l'elevazione o comunque immediatamente sopra di un piano [11].

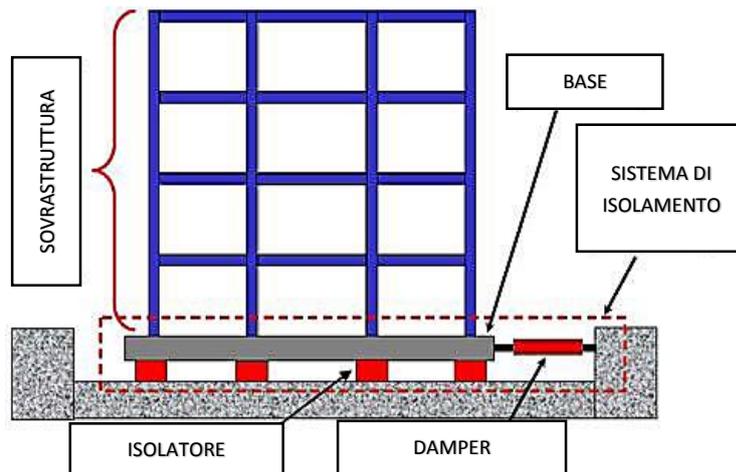


Figura 37. Posizione isolamento

Nota l'*interfaccia di isolamento* come l'area su cui agisce il sistema di isolamento si possono definire (Figura 37):

- Sovrastruttura: porzione della struttura che si trova sopra l'interfaccia di isolamento, che quindi risulta essere isolata.
- Sottostruttura: quella parte della struttura che si trova sotto l'interfaccia di isolamento e che comprende le fondazioni. Solitamente la deformabilità orizzontale è trascurabile ed è la parte della struttura sottoposta in maniera diretta agli spostamenti imposti dal sisma.
- Dispositivi di isolamento: elementi del sistema isolante, ognuno dei quali garantisce una o più combinazioni delle seguenti funzioni:
 - Sostegno dei carichi verticali per mezzo dell'elevate rigidità nella direzione verticale che si va a contrapporre alla scarsa rigidità nella direzione orizzontale, questo implica spostamenti significativi nel piano orizzontale.
 - Dissipazione di energia per mezzo di meccanismi isteretici e/o meccanismi viscosi.
 - Ricentraggio del Sistema.
 - Vincolo laterale (con rigidità elastica adeguata) che ha la funzione di fronteggiare le azioni orizzontali (vento e microsismi).

Al fine di disaccoppiare il movimento della sovrastruttura rispetto alla sottostruttura è necessaria una scelta opportuna delle caratteristiche meccaniche degli isolatori. La scelta del dispositivo può essere influenzata, sia per motivazioni economiche che progettuali, da caratteristiche come la durabilità del dispositivo, la facilità di installazione, il costo e spesso si prediligono elementi con ingombro limitato; queste caratteristiche tuttavia non interferiscono con le prestazioni meccaniche in condizioni ottimali di installazione e manutenzione [11]. Si possono riassumere gli obiettivi prestazionali di un sistema di isolamento come segue:

- Minimizzare il taglio alla base della struttura.
- Minimizzare le accelerazioni di piano.
- Minimizzare lo spostamento alla base della struttura.

L'isolamento sismico non ha solamente vantaggi riconducibili all'abbattimento delle accelerazioni, e quindi delle sollecitazioni, ma si può notare anche una significativa riduzione delle deformazioni di interpiano (drift): questo evita il danneggiamento degli elementi non strutturali. Di conseguenza si hanno benefici nella protezione di contenuti riducendo il rischio di ribaltamenti di arredi, evitando la caduta di oggetti e ultimo ma non meno importante si riduce la percezione del sisma da parte degli individui presenti nella struttura, quindi si riduce il panico nei luoghi affollati [11] (Figura 38).

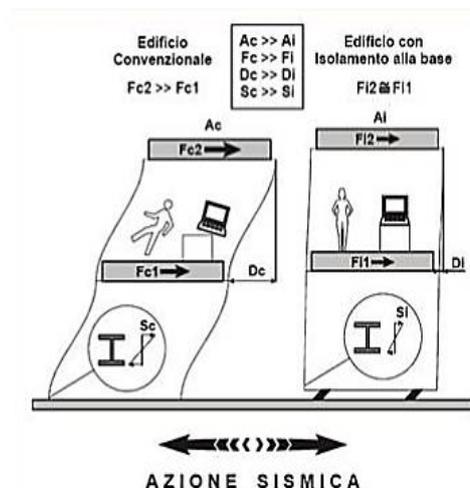


Figure 38. Comportamento dinamico di un edificio convenzionale con isladores [6]

Di seguito una Figura 39 esplicativa della differenza che si ha in termini di comportamento tra una struttura tradizione e una struttura a base isolata.

Si possono descrivere gli effetti che l'isolamento sismico ha su una struttura, riferendosi alle tipiche forme degli spettri di risposta, in spostamenti e in accelerazioni. Dalla Figura 39 enzionale con isolatore si evince come si possa ridurre significativamente l'accelerazione spettrale aumentando il periodo proprio della struttura [11].

Occorre sottolineare che a tale effetto è associato l'incremento degli spostamenti orizzontali. Affinché questi ultimi siano compatibili con l'uso della struttura diventa indispensabile definire correttamente la rigidità del sistema di isolamento e, quindi, mediare il bisogno di ridurre gli spostamenti con il bisogno di incrementare il periodo.

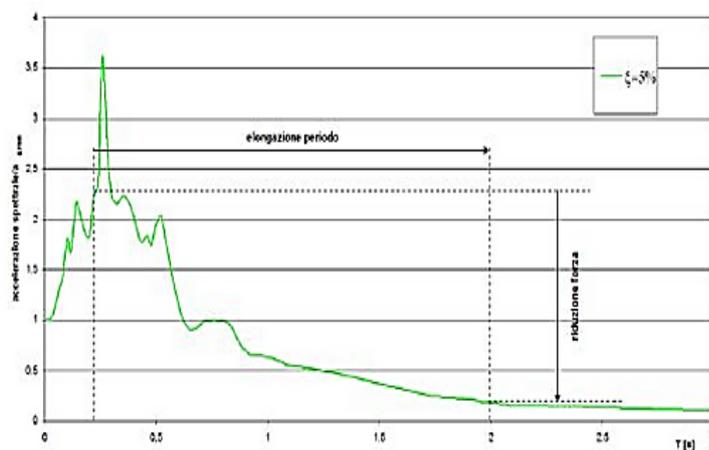


Figura 39. Comportamento dinamico di un edificio convenzionale con isolatore [11]

2.3.2.1. Isolatori elastomerici

Gli isolatori elastomerici sono prodotti con un'alternanza di strati di acciaio (con spessore che varia tra i 2 mm e i 3 mm) e materiale elastomerico (con spessore che può variare da 5 mm a 20 mm). I lamierini di acciaio, che hanno la funzione di confinare l'elastomero, vengono collegati con gli strati di gomma tramite il processo di vulcanizzazione. Questo implica una riduzione della deformabilità rispetto ai carichi verticali (ortogonali alla giacitura degli strati) ma la deformabilità per carichi orizzontali resta invariata. Solitamente l'abbassamento che subisce il dispositivo a causa del carico verticale che gli compete è di circa 1-3 mm. La capacità portante di questi elementi diminuisce in maniera tanto più significativa quanto più significativi sono gli spostamenti orizzontali, questo è dovuto sia alla deformazione a taglio indotta che alla diminuzione dell'effettiva area di impronta (Figura 40).

In funzione dell'eventuale presenza di nuclei dissipativi e delle caratteristiche dissipative dell'elastomero si possono definire le tre principali tipologie di isolatori in acciaio e materiale elastomerico:

- Isolatori in gomma a basso smorzamento o low damping rubber bearing (LDRB).
- Isolatori in gomma ad alto smorzamento o high damping rubber bearing (HDRB).
- Isolatori in gomma con nucleo in piombo o lead rubber bearing (LRB).



Figura 40. Isolatore elastomerico

Low Damping Rubber Bearing (LDRB)

Questo genere di isolatori viene utilizzato principalmente in Giappone e possono essere prodotti sia partendo da isoprene (gomma naturale) sia con neoprene. Entrambe le tipologie di gomma possiedono caratteristiche molto simili e non manifestano il fenomeno del creep per i carichi di lunga durata. Si può osservare da prove sperimentali che questi isolatori presentano cicli di isteresi molto sottili, racchiudono infatti una superficie molto piccola, e questo indica un comportamento elastico lineare allo svilupparsi della deformazione. La relazione forza-deformazione può essere considerata approssimativamente lineare, dal momento che la rigidezza K_r si mantiene all'incirca sempre costante fino al conseguimento del valore di progetto della deformazione a taglio. Questa caratteristica agevola notevolmente la loro modellazione analitica e questo rappresenta un vantaggio caratteristico di questi dispositivi. Tra gli aspetti positivi si può annoverare il basso costo di produzione, la semplicità di installazione e la stabilità delle proprietà meccaniche rispetto ai cicli di carico, all'invecchiamento e alla temperatura. Lo svantaggio che caratterizza questo tipo di isolatori è rappresentato dal

valore di smorzamento molto basso (2-3%) e questo implica l'esigenza di sistemi accessori al fine di limitare gli spostamenti.

High Damping Rubber Bearing (HDRB)

Questi isolatori vengono prodotti inserendo all'elastomero particolari cariche additive (silicio, nerofumo) e questo garantisce:

- Comportamento quasi elastico, garantendo capacità ricentrante (capacità di riportare la struttura nella sua posizione iniziale alla fine del terremoto).
- Elevata capacità dissipative, limitando lo spostamento di progetto a valori accettabili.

Questi isolatori vengono identificati attraverso la sigla SI (Seismic Isolator) a cui segue una lettera identificativa del tipo di mescola (S=morbida, N=normale, H=dura) e due cifre: la prima indica il diametro espresso in millimetri e la seconda lo spessore complessivo degli strati in gomma sempre espresso in millimetri.

Lead Rubber Bearing (LRB)

Questi apparecchi furono inventati nel 1975 in Nuova Zelanda, vengono prodotti con strati alterni di acciaio e elastomero, legati tra loro mediante il processo di vulcanizzazione, e da uno o più elementi cilindrici in piombo inseriti in appositi fori verticali, in modo da ottenere così una rigidità per carichi orizzontali non eccezionali adeguata ma che garantisce al tempo stesso una significativa capacità di dissipazione. Il risultante comportamento meccanico è quindi una combinazione del comportamento lineare degli LDRB con quello elasto-plastico del nucleo in piombo sotto una deformazione di taglio. L'azione di confinamento che svolgono le piastre d'acciaio assicura una deformazione pura a taglio del nucleo in piombo. Lo smorzamento viscoso equivalente che si ottiene è dell'ordine del 15%-35% a seconda dello spostamento imposto e delle dimensioni del nucleo. L'energia dissipata e la rigidità si riducono aumentando il numero di cicli per poi stabilizzarsi, in modo simile allo scragging della gomma, intorno ai 10-15 cicli. Il motivo di questo fenomeno può essere spiegato il surriscaldamento del nucleo in seguito alle oscillazioni ad alta frequenza: introducendo

nuclei con viscosità più elevate si ottengono capacità dissipative più significative (Figura 41).

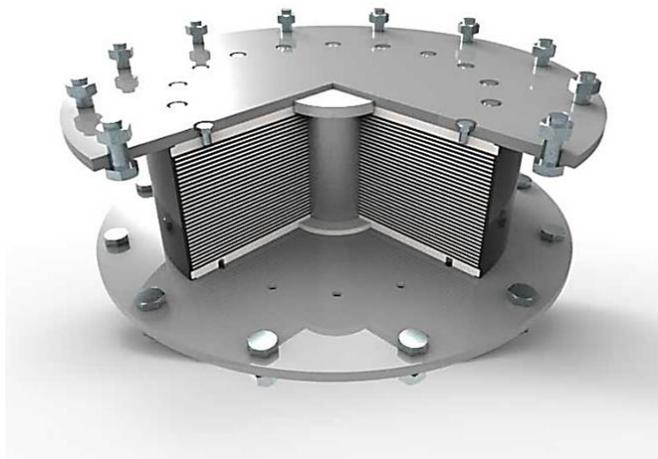


Figura 41. Isolatore elastomerico con nucleo in piombo

Le problematiche di questi dispositivi sono le seguenti:

- Efficacia dell'aderenza tra acciaio e gomma per spostamenti significativi.
- Stabilità del dispositivo sotto taglio e compressione.
- Deformazione sotto carico costante (creep dell'elastomero).
- Diminuzione della capacità portante all'aumentare dello spostamento orizzontale, sia per la riduzione dell'impronta effettiva che per la deformazione a taglio indotta.
- Variazioni del comportamento meccanico della gomma causate dalla variazione di: frequenza di oscillazione, temperatura e invecchiamento.

2.3.2.2. Isolatori a scorrimento e a rotolamento

Questi isolatori sono formati da appoggi a rotolamento (sfere o rulli) i primi mentre da elementi a scorrimento (acciaio-teflon) i secondi. In entrambi i casi questi elementi sono caratterizzati da resistenze di attrito particolarmente basse e le aree di contatto possono essere sia curve che piane. Gli isolatori a scorrimento moderni vengono chiamati sliding device (SD) e sono costituiti da due elementi capaci di scivolare uno sull'altro, le aree di contatto sono foderate infatti da materiali dotati di basso coefficiente di attrito (Figura 42).

Possiamo pensare questi dispositivi divisi in due classi:

- Dispositivi unidirezionali: si utilizzano solitamente per ponti poiché hanno un comportamento completamente differente nelle due direzioni, normalmente necessitano del sistema di isolamento solamente per la direzione longitudinale.
- Dispositivi multidirezionali: vengono impiegati in costruzioni, poiché si tende ad avere un comportamento uguale in tutte le direzioni.

In questi isolatori si utilizzano materiali come l'acciaio lucidato ed il Teflon (PTFE) o altri materiali polimerici che hanno bassa resistenza d'attrito. Il coefficiente d'attrito dinamico per il PTFE è compreso tra il 6% e il 18% che può essere ridotto all'1-3% lubrificando le superfici. Questo coefficiente è funzione di:

- Velocità di scorrimento.
- Livello di usura.
- Pressione di contatto.
- Temperature.

Normalmente la dissipazione per attrito nel dispositivo è trascurata a causa della variabilità del coefficiente e di incertezza delle condizioni ambientali (umidità, pulizia temperatura). Questa approssimazione diventa ancora più realistica nel momento in cui si utilizzano dispositivi con superfici lubrificate, riducendo la resistenza nella direzione orizzontale e considerando il dispositivo resistente ai soli carichi verticali. Gli isolatori a scorrimento sono caratterizzati da un comportamento isteretico di tipo elastico-perfettamente plastico, ossia al crescere della deformazione non si ha incrudimento.



Figura 42. Isolatore a scorrimento

Normalmente questi dispositivi vengono accoppiati ad altri dispositivi in quanto non forniscono capacità dissipative adeguate e non possiedono capacità di ricentraggio al termine del sisma.

Isolatori a pendolo ad attrito (Friction Pendulum System-FPS)

Questi dispositivi sono gli unici tra i dispositivi a scorrimento che hanno le capacità dissipative e la funzione ricentrante. Questo grazie all'utilizzo di superfici di scorrimento curve non lubrificate. Alla base del funzionamento dei dispositivi FPS c'è il moto pendolare, che sfrutta la superficie concava della base ed il peso scaricato che tende a ricentrare il sistema. Il raggio di curvatura della superficie risulta essere indipendente dalla massa sovrastante e una scelta opportuna dello stesso permette di calibrare il periodo di oscillazione della struttura. Questi dispositivi sono composti da una superficie articolata (rivestita da materiale composito ad alta resistenza e basso attrito) che scorre su una calotta di acciaio inox di forma sferica. Le forze di ricentraggio del sistema sono causate dal movimento e dalla geometria. In questi isolatori l'interfaccia di scorrimento svolge un ruolo fondamentale poiché la resistenza per attrito lungo l'interfaccia dipende dal diametro della calotta, dalla velocità di scorrimento, dalla pressione di contatto e dallo stato invecchiamento e dalla temperatura (Figura 43).

Tra le proprietà caratterizzanti di questi dispositivi troviamo:

- Periodo naturale della sovrastruttura che dipende dal raggio di curvatura della superficie di contatto.
- Lo spostamento relativo tra le fondazioni e la sovrastruttura permesso secondo una o due superfici.
- Il periodo naturale non dipende dalla massa della struttura, quindi non si verificano effetti torsionali durante il terremoto perché la coincidenza tra il baricentro delle rigidità e il baricentro delle masse viene garantito.
- Sono autoricentranti: ovviamente questa funzione viene garantita dalla geometria della superficie. La calotta articolata si muove lungo la superficie concava-sferica generando l'innalzamento della sovrastruttura. Questo spostamento verticale fa sì che l'energia cinetica venga convertita in energia

potenziale e questa riporta la sovrastruttura nella posizione iniziale (posizione di equilibrio).

- Lo smorzamento viscoso equivalente viene determinato dall'attrito della superficie di scorrimento: la scelta delle proprietà della superficie di scorrimento e del materiale determina la quantità di energia che il sistema è capace di assorbire (in questi dispositivi si può arrivare a smorzamenti del 20%).

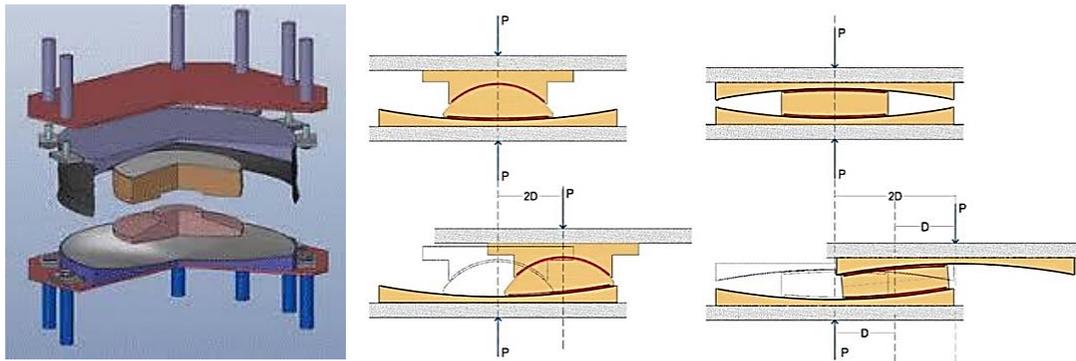


Figura 43. Schemi costruttivi e funzionali di un isolatore a singola superficie di scorrimento e di uno a doppia superficie di scorrimento

2.3.3. VANTAGGI E SVANTAGGI DEGLI ISOLATORI SISMICI

Oltre a quanto riportato nella Tabella 4, uno dei maggiori ostacoli nell'applicazione degli isolatori è quello economico. Il costo dell'isolamento sismico oscilla tra l'10% e il 20% della spesa totale di un edificio, questo significa che l'isolamento sismico costa diverse decine di migliaia di euro.

Tabella 4. Vantaggi e svantaggi degli isolatori

Tipo di isolatore	Vantaggi	Svantaggi
Elastomerico (LDRB)	<ul style="list-style-type: none"> • Basse accelerazioni nella sovrastruttura. • Basso costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Spostamenti significativi. • Basso smorzamento. • Scarsa resistenza al carico di servizio • Momenti P-Δ alla base e sommità
Elastomerico (HDRB)	<ul style="list-style-type: none"> • Resistenza ai carichi di servizio. • Moderate accelerazioni nella sovrastruttura. • Moderato smorzamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitata scelta di rigidezza e smorzamento. • Effetti di instabilità. • Rigidezza e smorzamento dipendente dalle deformazioni. • Analisi complessa. • Momenti P-Δ alla base e sommità.
LRB	<ul style="list-style-type: none"> • Moderate accelerazioni di piano. • Ampia scelta per rigidezza e smorzamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Momenti P-Δ alla base e sommità.
SD	<ul style="list-style-type: none"> • Resistenza al carico di servizio. • Elevato smorzamento. • Momenti P- Δ alla base e sommità. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevate accelerazioni di piano. • Proprietà funzione della pressione e velocità. • Assenza di forze di recupero.
FPS	<ul style="list-style-type: none"> • Resistenza al carico di servizio. • Moderato-alto smorzamento. • Momenti P- Δ alla base e sommità. • Riduzione della risposta torsionale. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevate accelerazioni di piano. • Proprietà funzione della pressione e velocità.

3. INFLUENZA DELLA GOMMA SULLE CARATTERISTICHE DEI TERRENI

3.1. GENERALITÀ

L'isolamento sismico è un'interfaccia scorrevole o flessibile situata tra la sovrastruttura e le sue fondazioni che ha l'obiettivo di disaccoppiare i movimenti del terreno da quelli della struttura. Nella progettazione convenzionale antisismica, una corretta progettazione e costruzione di elementi strutturali fornisce duttilità alla struttura permettendo deformazioni plastiche. Questo implica, in caso di sisma, danni estesi alla struttura e costi di riparazione enormi. Al contrario, l'isolamento sismico mira a ridurre i carichi sismici quindi, a minimizzare il danno indotto in una struttura con conseguente risparmio sui costi di riparazione. Negli ultimi anni sono stati proposti nuovi metodi di isolamento sismico dove il meccanismo di isolamento è strettamente correlato con la geotecnica. Il basso costo di questi metodi, rispetto ai sistemi più comuni e consolidati rappresenta la vera potenzialità di queste tecniche; qualità particolarmente apprezzata nei paesi in via di sviluppo dove le risorse economiche e la tecnologia non sono adeguate a difendere efficacemente le strutture dai fenomeni sismici. Va ricordato che una grande parte della popolazione mondiale vive sotto la minaccia continua dei fenomeni sismici; basti pensare che nel secolo scorso i terremoti hanno ucciso in media oltre 20.000 persone all'anno in tutto il mondo di cui il 90% dei decessi si sono verificati nei paesi in via di sviluppo [12]. È impossibile prevenire il verificarsi di terremoti, ma è possibile mitigare gli effetti disastrosi per salvare vite e beni materiali. Con questo obiettivo la comunità internazionale dell'ingegneria antisismica sta affrontando il problema cercando di garantire standard di sicurezza nei paesi più disagiati uguali a quelli dei paesi sviluppati. Per assolvere a questi obiettivi in maniera economica e utilizzando tecnologie relativamente semplici sono state proposte due soluzioni alternative che vogliono sostituirsi ai classici sistemi di isolamento sismico [13]:

- Inserire tessuti sintetici lisci al di sotto delle fondazioni o tra gli strati del suolo con l'obiettivo di dissipare l'energia sismica attraverso lo scorrimento relativo degli strati confinati.
- Immettere miscele composte da gomma e terreno intorno alle fondazioni con il fine di assorbire l'energia liberata dal sisma.

I suddetti metodi di isolamento sismico che coinvolgono la geotecnica potrebbero essere collettivamente denominati "Isolamento sismico geotecnico", in contrapposizione con "l'Isolamento sismico strutturale" comunemente usato.

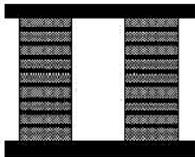
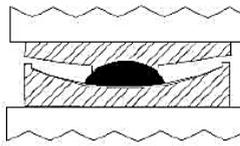
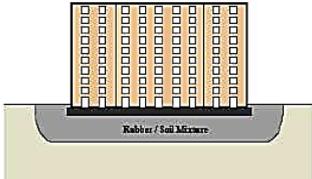
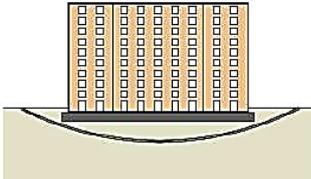
	Stiffness / Damping	Sliding / Friction
Conventional "Structural"	<p>Laminated Rubber Bearing</p>  <p style="text-align: right;">a</p>	<p>Spherical Sliding Bearing</p>  <p style="text-align: right;">b</p>
New "Geotechnical"	<p>Rubber-Soil Mixtures</p>  <p style="text-align: center; font-size: small;">Rubber / Soil Mixture</p>	<p>Geosynthetic Liner</p> 

Figura 44. Classificazione proposta per isolamento sismico geotecnico [13]

Nell'isolamento tradizionale vengono già utilizzati gli isolatori per scorrimento (Figura 44(b)), questi sistemi sono pensati in modo tale che la trasmissione delle forze di taglio sia limitata a un valore predefinito oltre il quale si verifica lo scorrimento; in questo modo viene impedita la trasmissione delle forze taglianti eccedenti tale limite. Nonostante la loro efficacia nel contenere i danni causati dal sisma, gli isolatori a scorrimento comunemente usati sono troppo costosi per cui il loro uso nella protezione sismica non è diffuso. Analogamente ai sistemi scorrevoli convenzionali, a partire dai primi anni '90, si è evoluto un nuovo concetto di isolamento sismico che prevede l'utilizzo di interfacce lisce. Yegian e Lahlaf hanno condotto test su tavola vibrante e sovrapponendo interfacce in gomma hanno dimostrato che la forza di taglio trasmessa da una geo membrana all'altra è limitata [14]. Il programma di ricerca è stato quindi

ampliato e sono stati proposti due possibili schemi: il primo, che può essere indicato come isolamento della fondazione, prevede il posizionamento del rivestimento sintetico immediatamente sotto le fondamenta di una struttura. L'altro approccio prevede "l'isolamento del suolo", in cui le membrane vengono posizionate all'interno del suolo ad una certa profondità al di sotto delle fondamenta in modo da impedire all'energia sismica di raggiungere l'edificio; questi due sistemi vengono mostrati schematicamente in Figura 45. Basandosi sul basso coefficiente di attrito dell'interfaccia tra due rivestimenti sintetici, i due concetti simili ma distinti, mirano a dissipare l'energia del terremoto attraverso lo scorrimento lungo l'interfaccia dei rivestimenti e quindi ridurre l'entità delle accelerazioni trasmesse alla struttura. La corretta scelta dell'interfaccia diventa fondamentale per l'attuazione degli schemi di isolamento proposti. L'idea è quella di utilizzare materiali con coefficienti di attrito bassi per ridurre al minimo l'accelerazione trasmessa attraverso l'interfaccia.

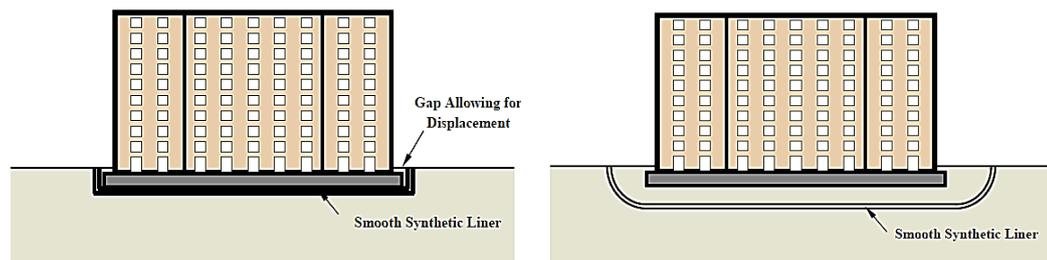


Figura 45. Schema di utilizzo di un'interfaccia liscia per isolare porzione di terreno(destra), fondazioni (sinistra) [15]

La seconda soluzione introduce uno schema di isolamento sismico geotecnico alternativo che utilizza miscele di gomma e sabbia che d'ora in poi verranno chiamate rubber soil mixtures (RSM). In questa soluzione, la dissipazione di energia rappresenta il meccanismo principale per ridurre gli effetti prodotti dal sisma: questo concetto di isolamento è in realtà molto simile a quello del cuscinetto in gomma laminata comunemente adottato nell'ingegneria antisismica (High Damping Rubber Bearing (HDRB)). Gli elementi in gomma e le particelle di terreno sono complementari nelle loro funzioni e rispetto ai terreni normali, il terreno rinforzato con gomma potrebbe produrre un aumento della resistenza al taglio e, soprattutto, un enorme aumento della capacità di dissipazione dell'energia, ulteriori dettagli sulle proprietà ingegneristiche dei terreni rinforzati con gomma verranno discussi più avanti.

3.2. NOMENCLATURA

$$RF = \frac{V_{rubber}}{V_{total}} \times 100 \quad (2)$$

dove RF è la frazione del volume di gomma (%), V_{rubber} è il volume di gomma triturrata e V_{total} è il volume totale del campione di gomma-sabbia.

$$p_r = \chi = \frac{W_{ts}}{W_{ts} + W_s} \times 100 \quad (3)$$

dove χ è il contenuto in gomma, W_{ts} il peso della gomma e W_s il peso della sabbia asciutta.

$$\eta = \frac{l_{ts}}{W_{ts}} \quad (4)$$

dove η rappresenta appunto il rapporto tra la lunghezza maggiore del singolo elemento in gomma (l_{ts}) rispetto al suo peso (W_{ts}).

$$e_{eq} = \frac{V_{voids} + V_{rubber}}{V_{soil}} \quad (5)$$

dove e_{eq} è l'indice dei vuoti equivalente, V_{voids} è il volume dei vuoti, V_{rubber} volume della gomma inserita nella miscela RSM, V_{soil} volume della matrice sabbiosa.

3.3. PESO SPECIFICO

Zhang et al. indagano questa proprietà e cercano di individuare in che modo l'aggiunta di gomma influenzi il peso specifico del materiale originario [16]. La Figura 46 mostra una relazione lineare tra la densità ρ e il contenuto di gomma (Rubber Fraction (RF)). Si può osservare che, rispetto al campione di sabbia puro (RF = 0%), la densità ρ delle miscele di sabbia-gomma diminuisce con l'aumentare della frazione di gomma. La ρ delle miscele RSM è diminuita a causa della presenza di particelle di gomma che hanno un peso specifico considerevolmente inferiore rispetto a quello degli aggregati minerali convenzionali. La Figura 46 rivela anche che nelle miscele RSM con vari rapporti dimensionali delle particelle, la variazione di ρ , vale a dire la pendenza della linea che interpola i punti sperimentali, è quasi la stessa. Si può dedurre che la variazione della

dimensione delle particelle solide ha un effetto trascurabile sulla diminuzione della densità delle miscele RSM. Il modo più efficace per ridurre il peso unitario delle miscele è aumentare il contenuto di particelle di gomma [16]. Il confronto viene fatto utilizzando gomme con diversi rapporti dimensionali ma con stessa forma; utilizzando forme diverse possono essere ottenute variazioni leggermente scostanti da quelle presentate ma con differenze marginali. Si può asserire che la variazione della densità è linearmente dipendente dal contenuto di gomma.

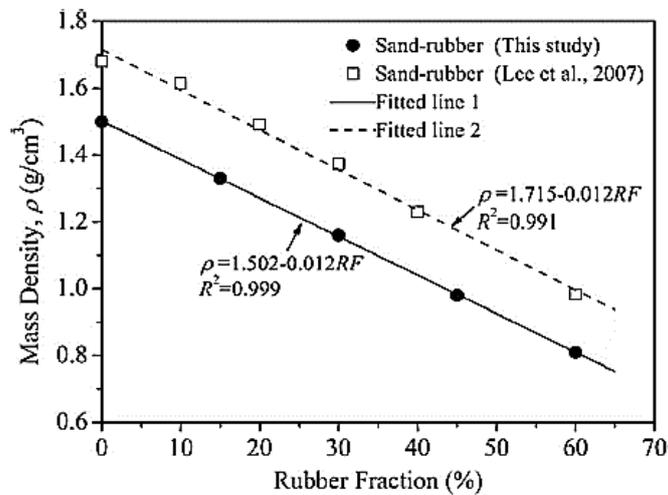


Figura 46. Variazione della densità in funzione del contenuto di gomma per miscele RSM [16]

3.4. COMPRESSIBILITÀ DELLE MISCELE RSM

È noto come i cedimenti differenziali siano dannosi per le strutture ed è bene che questi siano evitati valutando in maniera oculata la comprimibilità delle miscele RSM. La deformabilità della gomma è piuttosto elevata rispetto a quella della sabbia pura pertanto, la deformazione assiale delle miscele RSM dipende fortemente dal contenuto di gomma. Per studiare nel dettaglio il comportamento del materiale composito Fonseca et al., hanno sottoposto provini di sabbia con diversi contenuti di gomma a prove edometriche [19]. In Figura 47 si può notare come la risposta del campione costituito da solo sabbia sia fortemente più rigida rispetto a qualsiasi miscela RSM.

In generale la dissipazione di energia, in tutti i campioni analizzati, è maggiore durante il primo ciclo di carico-scarico; questo può essere spiegato con una riorganizzazione delle particelle che porta ad una modifica dei contatti intergranulari.

Nelle sabbie pure, anche per livelli di sollecitazione elevati, la deformazione assiale risulta essere limitata e la curva sforzo-deformazione ha un andamento quasi lineare. La linearità della risposta del provino costituito da sola sabbia, dopo il primo ciclo di carico-scarico, può essere spiegata con l'incapacità dei granuli di ritornare alla loro posizione originale, quindi le variazioni dell'indice dei vuoti nei cicli successivi sono limitate; a una piccola variazione dell'indice de vuoti corrisponde una deformazione assiale modesta. Al contrario, la gomma pura presenta una deformazione importante ed è fortemente dipendente dal livello di sollecitazione. In questo caso la curva sforzo-deformazione oltre ad essere significativamente non lineare, evidenzia un accumulo importante di deformazioni plastiche [17,18]. La presenza delle particelle di gomma, nei provini RSM, può spiegare la non linearità dello stesso e la dipendenza della deformabilità dallo stato tensionale. Durante il primo ciclo di carico-scarico è probabile che si verifichi una dissipazione a causa dello scorrimento dei grani, il volume dei vuoti si riduce e viene riempito da particelle di gomma deformate producendo un aumento dell'area di contatto gomma-sabbia e gomma-gomma. Aumentando le superfici di contatto aumentano le forze d'attrito trasmesse e questo porta a una maggiore difficoltà negli spostamenti relativi tra le particelle. Nei cicli successivi incrementando lo stato tensionale, le particelle non avranno più la possibilità di spostarsi reciprocamente ma si deformeranno di più andando a occupare i vuoti interstiziali [19].

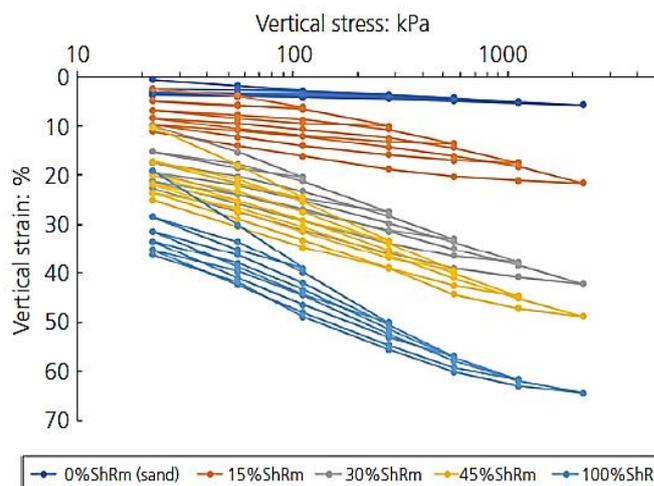


Figura 47. Comportamento delle miscele RSM a diversi contenuti di gomma [19]

A questo punto possiamo dire che la gomma può svolgere due ruoli diversi: partecipare alla trasmissione delle sollecitazioni e/o comportarsi come una porzione inerte vuota.

Quindi, una volta riorganizzato lo scheletro granulare a seguito del primo ciclo di carico-scarico, l'attrito interparticellare non consente lo scorrimento intergranulare, la dissipazione di energia può essere spiegata solo in termini di variazioni dell'indice dei vuoti [19]. In Figura 48 è possibile capire meglio l'interazione tra le varie particelle all'interno della miscela RSM. È chiaro come, aumentando il contenuto di gomma, aumentino anche i contatti gomma-gomma e gomma-sabbia a discapito dei contatti tra particelle di sabbia. I contatti meno rigidi aumentano anche all'aumentare del carico applicato. Questi contatti essendo "meno rigidi" contribuiscono al deformarsi della miscela RSM, la gomma va a occupare i vuoti interstiziali manifestando un aumento della deformazione assiale.

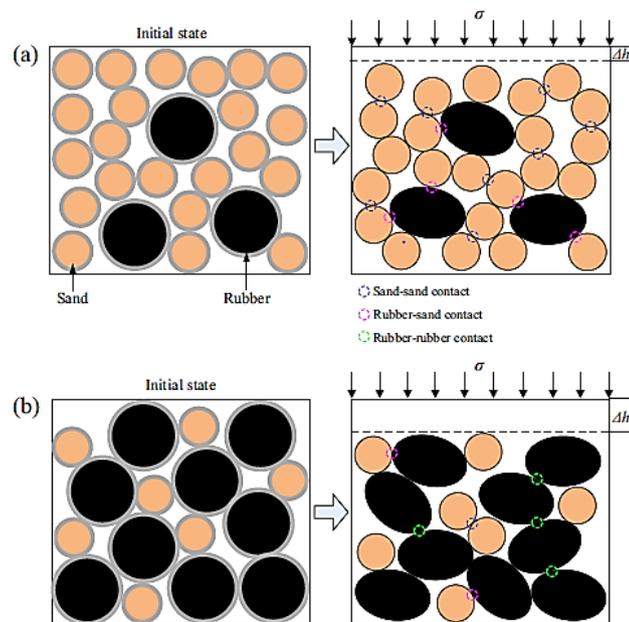


Figura 48. Risposta meccanica di provini a diversi contenuti di gomma sotto carico assiale [16]

In Figura 49(a) a viene riportata l'evoluzione del volume di gomma e dell'indice di vuoti del campione sotto un ciclo di carico e scarico. Si può vedere che la gomma subisce una compressione volumetrica quando i carichi aumentano e allo scarico quasi tutta la deformazione è recuperabile, come previsto. In Figura 49(b) invece, viene mostrata l'evoluzione dell'area di contatto tra i granelli di sabbia e la gomma. In questo caso si può notare che, all'aumentare del carico applicato si manifesta un aumento dell'area di contatto tra le particelle di gomma e di sabbia mentre, allo scarico, solo di una parte del contatto appena formato viene recuperato [19]. Questo a conferma di quanto detto

prima: all'aumentare del carico la gomma va ad occupare i vuoti interstiziali manifestando un comportamento non lineare e una maggiore deformabilità.

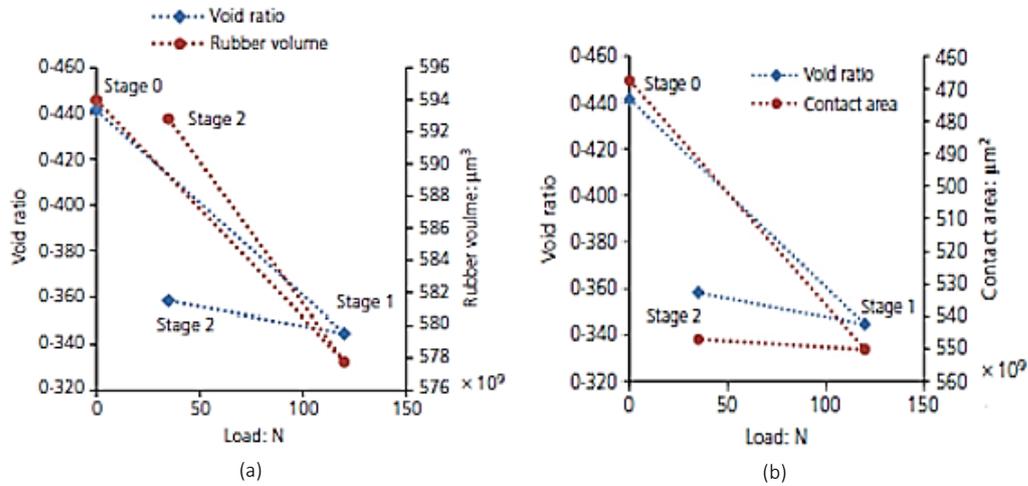


Figura 49. (a) Evoluzione del volume della gomma sotto un ciclo di carico-scarico confrontato con la variazione dell'indice dei vuoti; (b) Evoluzione dell'area di contatto sotto un ciclo di carico-scarico confrontato con la variazione dell'indice dei vuoti

Una volta chiariti i concetti chiave che governano la deformabilità assiale delle miscele RSM si può quantificare l'indice di compressibilità del materiale in funzione del contenuto in gomma. A partire dalle curve di carico e scarico Sheikh et al., hanno calcolato gli indici di compressione e rigonfiamento (C_c e C_s) [20]; la Figura 50 mostra la variazione di questi due indici in funzione del contenuto di gomma.

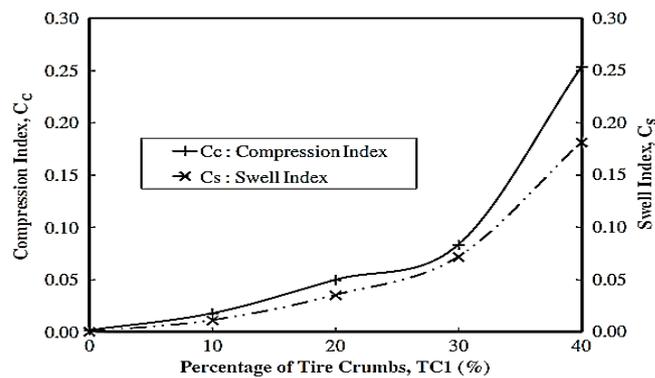


Figura 50. Indice di compressibilità e di rigonfiamento in funzione del contenuto di gomma [20]

È evidente come incrementando il contenuto di gomma si otterranno valori più alti di C_c e C_s in particolare essi crescono esponenzialmente all'aumentare del contenuto di gomma [20].

La Figura 51 mostra lo sviluppo della deformazione plastica (ϵ_u) in miscele di sabbia pura e miscele RSM per quattro cicli di carico-scarico. Nel primo ciclo di scarico, le deformazioni plastiche sono rispettivamente di 0,36%, 1,55% e 6,68% per sabbia pura, RSM (10%) e RSM (30%). È stato evidenziato precedentemente come la deformazione plastica sia correlata alla quantità di gomma presente nella miscela; la deformazione plastica alla fine del quarto ciclo risulta essere rispettivamente dello 0,53%, 2,1% e 8,49% per sabbia pura, RSM (10%) e RSM (30%). La differenza di deformazione plastica tra il quarto ciclo e il primo risulta essere tanto maggiore quanto più importante è il contenuto di gomma nella miscela [20].

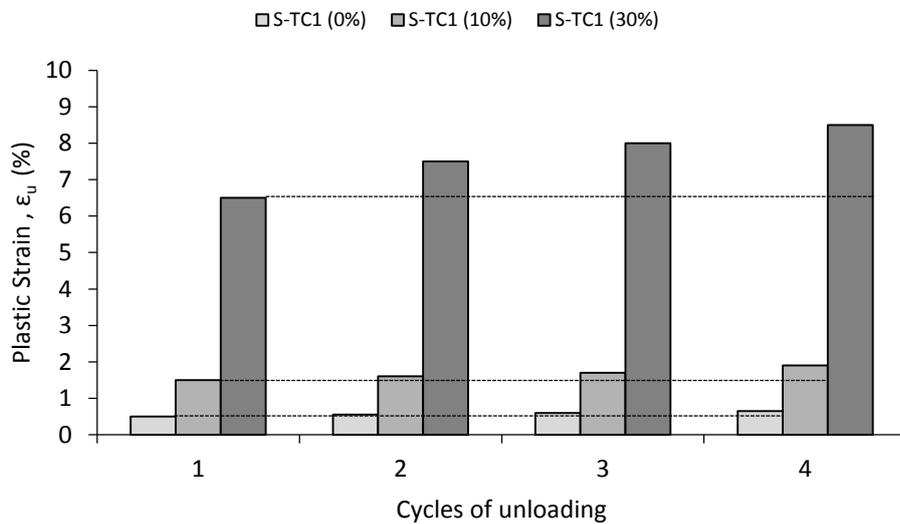


Figura 51. Deformazione plastica a seguito dei cicli di carico-scarico [20]

Sebbene l'inserimento della gomma sia un problema rilevante per le applicazioni proprio per la sua elevata compressibilità, è stato dimostrato che la comprimibilità dei frammenti di pneumatici diminuisce sostanzialmente con una sola applicazione di carico [21]. Sebbene un terrapieno costruito con miscele RSM si assesti leggermente più, utilizzando un ultimo strato di solo terreno (dell'ordine di 1 m di spessore) si può ridurre significativamente la compressibilità e le deflessioni [22]. Inoltre, i cedimenti possono essere ridotti per compattazione; è possibile utilizzare i metodi tradizionali di compattazione anche sulle miscele RSM come i metodi di compattazione dinamica e vibratoria [15]. Tra i metodi di compattazione attualmente disponibili, la compattazione superficiale è la più economica e semplice, rendendola particolarmente adatta ai paesi

in via di sviluppo. Oltre all'aumento della densità, la compattazione porta ad un angolo di attrito interno più elevato e ad una maggiore coesione per terreni.

3.5. CAPACITÀ PORTANTE

Data l'elevata compressibilità e la bassa rigidità della gomma, la capacità portante delle miscele RSM potrebbe rappresentare un problema nelle applicazioni. Figura 52 viene mostrata la relazione tra q_u e il contenuto di gomma; si nota una tendenza decrescente, pressochè lineare, di q_u aumentando il contenuto di gomma (RF). Come precedentemente detto, la diminuzione di q_u con l'aumento di RF può essere attribuita al fatto che la resistenza a compressione delle particelle di gomma è molto più bassa di quella della sabbia, inoltre l'aggiunta nei terreni di quest'ultima porta ad un notevole cambiamento delle caratteristiche microstrutturali e della risposta meccanica delle miscele. Per ovviare a questo problema Zhang et al. provano a valutare il comportamento di miscele RSM leggermente cementate [16]. In Figura 52 viene mostrata l'evoluzione della capacità portante q_u durante il processo di maturazione. È evidente che per una data frazione di gomma, aumentando il tempo di maturazione, q_u aumenta poco rispetto a campioni di sabbia pura.

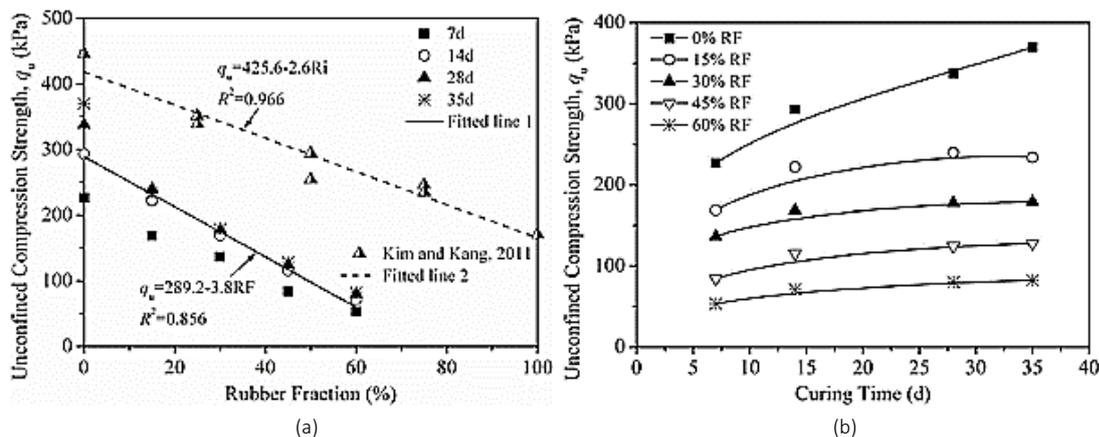


Figura 52. (a) Relazione tra la capacità portante e il contenuto di gomma; (b) Evoluzione nel tempo della capacità portante per diverse miscele RSM cementate [16]

Quindi, l'aggiunta di particelle di gomma riduce l'effetto positivo della cementazione. Si potrebbe dedurre che la presenza di particelle di gomma è svantaggiosa in termini di legame e idratazione del cemento, il che avrebbe un effetto insignificante sullo sviluppo della resistenza [16].

3.6. EVIDENZE SPERIMENTALI SULLA FORMA DELLA GOMMA

Una delle caratteristiche che maggiormente influenza le proprietà delle miscele RSM è la forma della gomma. La gomma che viene inserita all'interno delle miscele può essere tagliata essenzialmente in due modi differenti:

- Trucioli: questi elementi hanno una dimensione preponderante rispetto alle altre due, sono sostanzialmente delle “striscioline” di gomma.
- Grani: tutte le dimensioni sono paragonabili possono essere descritte mediante curve granulometriche.

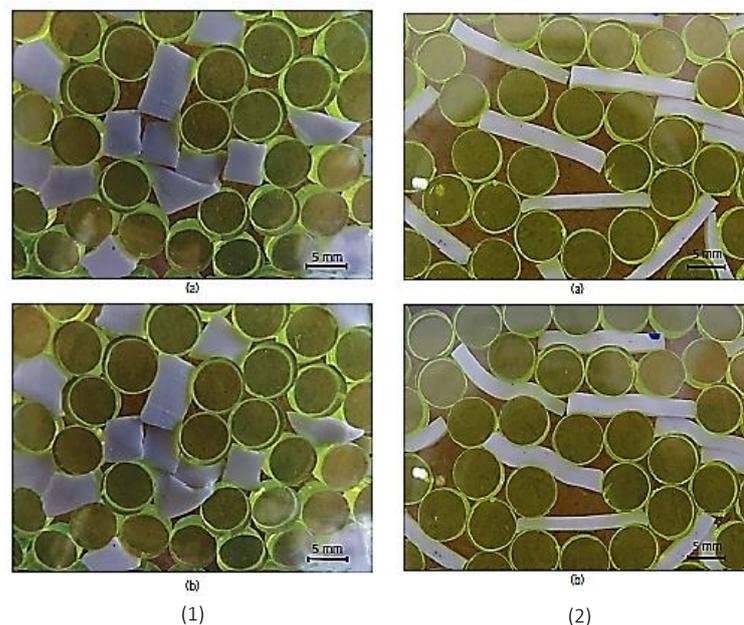


Figura 53. (1) Test condotto utilizzando granuli di gomma (a) prima di applicare il carico; (b) durante l'applicazione del carico. (2) Test condotto utilizzando brandelli di gomma (a) prima di applicare il carico; (b) durante l'applicazione del carico [19]

Al fine di capire meglio l'influenza che la forma esercita sulla risposta del materiale e osservare i meccanismi di interazione alla scala particellare Fonseca et al., hanno sviluppato modelli di deformazione piana utilizzando dischi acrilici (che nel modello rappresentano gli inerti) mescolati con particelle di gomma [19]. Per effettuare osservazioni qualitative sull'effetto della forma delle particelle di gomma, sono state analizzate entrambe le soluzioni (gomma granulare e triturata). La Figura 53(1) mostra una miscela di dischi acrilici mescolati con granuli di gomma sotto un carico monodimensionale e con un vincolo di deformazione laterale prima Figura 53(1a) e dopo Figura 53(1b) l'applicazione del carico. Si può vedere come, dopo il carico,

aumenti l'area di contatto tra le particelle, ciò è evidente notando i cambiamenti nella forma dei granuli di gomma.

La Figura 53(2b) mostra l'effetto del carico sul comportamento di un insieme di dischi acrilici e particelle di gomma triturate (trucioli). Il materiale, la preparazione del campione e il processo di carico sono esattamente uguali a quelli utilizzati per campioni costituiti con briciole, quindi, le differenze sono dovute solamente alla forma delle particelle di gomma. Confrontando le Figure 53(1b) e (2b) si possono fare osservazioni sulla densità iniziale: il campione con trucioli di gomma ha un indice di vuoti più alto rispetto a quello realizzato con granuli di gomma. La Figura 53(2b) mostra che dopo la fase di carico, i trucioli di gomma si sono deformati avvolgendo i dischi acrilici; l'area di contatto tra gomma e disco è notevolmente aumentata rispetto alle condizioni iniziali. Va notato che non tutti i frammenti di gomma si deformano in modo uguale; l'incremento dell'area di contatto non è omogenea e/o proporzionale e questo indica l'esistenza di una trasmissione di sollecitazione non omogenea tra particelle. Inoltre, confrontando la Figura 53(1b) e (2b) si può dedurre che i meccanismi di trasmissione delle sollecitazioni tra le particelle sono significativamente diversi, una diversa forma della gomma implica una diversa trasmissione delle sollecitazioni. Le differenze qualitative osservate, rispetto al comportamento atteso, sono più significative nei frammenti di gomma piuttosto che nei granuli di gomma e queste influenzano principalmente la resistenza a taglio.

3.6.1. COMPORTAMENTO DI MISCELE RSM COSTITUITE CON GRANI DI GOMMA

Per studiare il comportamento a taglio, di un materiale composto da sabbie e gomma granulare, Zhang et al. hanno eseguito una campagna di prove a taglio diretto su campioni di sabbia pura e miscele RSM con contenuto variabile di gomma (RF= 0% sino a RF=60%) [16].

Dai risultati mostrati in Figura 54 si può notare come, incrementando lo spostamento le tensioni di taglio tendono ad aumentare fino al raggiungimento di un valore massimo; raggiunto tale picco, la sollecitazione inizia a decrescere. Facendo riferimento alla resistenza a taglio di picco e alla pendenza iniziale della curva (rigidezza del materiale), si nota come queste diminuiscono con l'aumentare del contenuto di gomma.

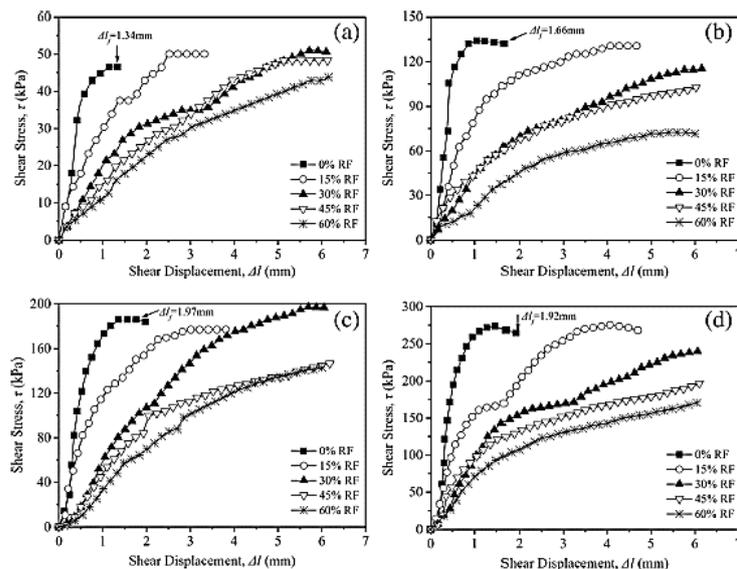


Figura 54. Curve sforzo-deformazione per diverse miscele RSM sottoposte a vari carichi verticali (a) 100 kPa; (b) 200 kPa; (c) 300 kPa; (d) 400 kPa [16]

Il decremento può essere attribuito all'aggiunta di granuli poiché essi posseggono bassa rigidità, inoltre, le frazioni di gomma si possono addensare lungo particolari superfici, questo produce una risposta del materiale significativamente differente visto che le superfici di rottura si potrebbero sviluppare proprio lungo questi piani. Osservando la curva, nella fase post-picco, si può osservare che nelle miscele non contenenti particelle di gomma (RF = 0%), i provini presentano caratteristiche fragili ossia la caduta delle tensioni è piuttosto rapida. Con l'aumento della frazione di gomma invece, le miscele RSM si comportano come un materiale duttile, esibendo un graduale calo delle tensioni post-picco.

Quindi, l'aggiunta di gomma fa cambiare il comportamento delle miscele passando da una risposta tipica degli inerti granulari (fragile) a una più simile a quella della gomma (duttile) [16].

Nella dinamica strutturale, la duttilità garantisce che una struttura/elemento strutturale possa sostenere carichi dinamici che superano la loro resistenza senza rottura. Nel caso delle miscele RSM, la duttilità assicura che si verifichi una rottura per livelli deformativi superiori a quelli che si avrebbero in presenza di un materiale non capace di sviluppare plasticità. In un materiale fragile la maggior parte dell'energia totale generata (area sottesa alla curva sforzo-deformazione) è elastica, mentre per un materiale duttile, l'energia plastica generata è piuttosto significativa. Per valutare la fragilità e quindi la

duttilità di un materiale si può far riferimento all'indice di fragilità (BI) che viene calcolato dal rapporto di A_2/A_1 , dove A_1 è l'area che rappresenta l'energia plastica dissipata, e A_2 è l'energia di deformazione recuperata prima della rottura (Figura 55). Valori più elevati di BI (Brittleness Index) indicano un materiale meno duttile e quindi più fragile.

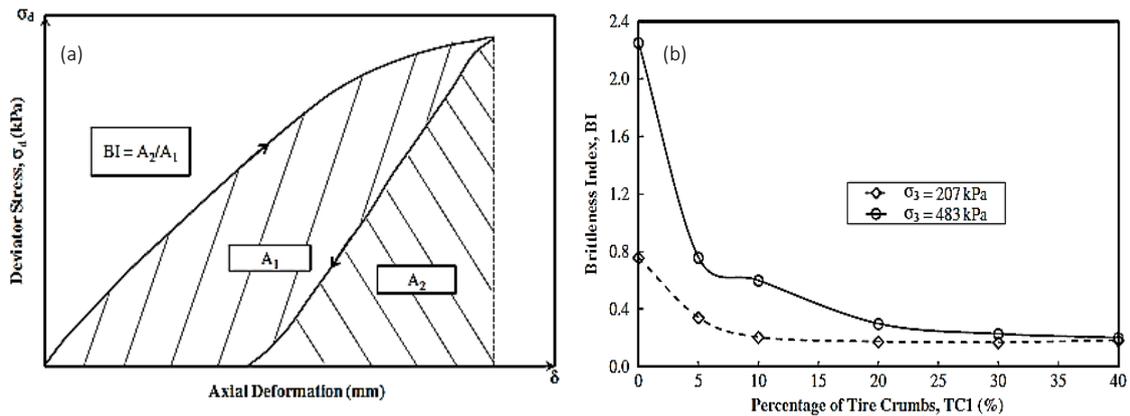


Figura 55. Definizione dell'indice di fragilità (BI) [20]

La sabbia pura ha una BI più alta rispetto alle miscele RSM; all'aumentare del contenuto di gomma, la BI diminuisce, indicando una maggiore duttilità sulle miscele RSM. La diminuzione di BI è abbastanza significativa fino al 10% del contenuto in gomma, e in seguito rimane relativamente costante, questo significa che già una piccola quantità di gomma può essere sufficiente per migliorare la duttilità del materiale [20].

3.6.1.1. Resistenza a taglio

Analizzando il comportamento a taglio delle miscele RSM si può dire che, per una data frazione di gomma, la resistenza a taglio aumenta con la sollecitazione assiale e può essere osservata una relazione non-lineare tra le due grandezze; una tendenza lineare sovrastimerebbe l'angolo di attrito della miscela [20]. In Figura 56(a) si nota come la resistenza non venga influenzata dal contenuto in gomma per bassi valori di tensioni verticali, infatti, per tensioni verticali inferiori a 100 kPa la resistenza a taglio è pressoché la stessa indipendentemente dal contenuto di gomma. Quando però, lo stato tensionale supera i 200 kPa, i valori di resistenza al taglio corrispondenti a ciascuna frazione di gomma sono significativamente differenti. L'influenza che la tensione verticale esercita sulla resistenza a taglio delle miscele è ben illustrata in Figura 56(b).

Come già detto, la resistenza diminuisce indipendentemente dalla tensione verticale però, se questo calo risulta moderato per tensioni verticali basse, sopra i 200 kPa la variazione diventa più marcata [20].

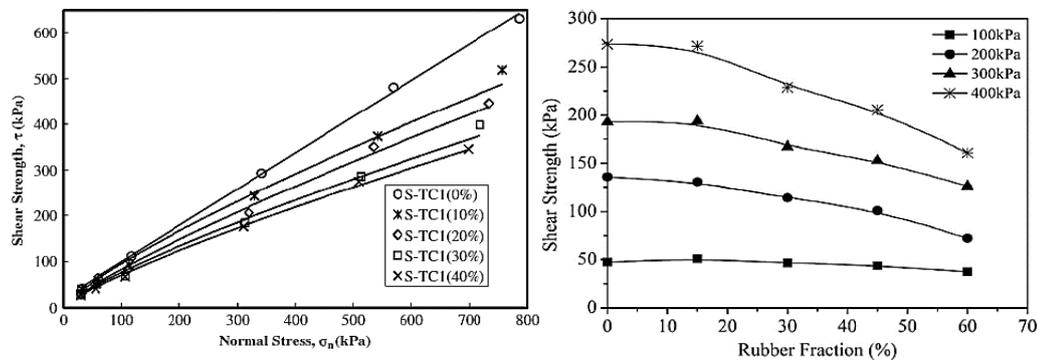


Figura 56. (a) Involupi di rottura per miscele RSM [20]; (b) Variazione della resistenza a taglio per varie miscele RSM in funzione del contenuto di gomma [16]

3.6.1.2. Influenza delle dimensioni della gomma sull'angolo di attrito

Nella meccanica dei terreni, il criterio di rottura più utilizzato è quello di Mohr-Culomb il quale dipende da due parametri: angolo di attrito e coesione. Nelle miscele RSM non si manifestano legami tra l'inerte e la gomma quindi la resistenza a taglio dipende principalmente dall'angolo d'attrito della miscela. Per valutare l'effetto che la gomma manifesta sull'angolo d'attrito della miscela Zhang et al., dimostrano che φ diminuisce linearmente all'aumentare del contenuto di gomma [16].

Perez et al., eseguono una valutazione numerica al fine di quantificare l'effetto che la dimensione delle particelle esercita sulla tensione deviatorica [23]. Dai risultati si osserva che, per dimensioni elevate dei grani di gomma ($D_{50,r}/D_{50,s} = 5,0$), la tensione deviatorica risulta essere meno dipendente dal contenuto di gomma rispetto a rapporti più piccoli. Inoltre, facendo valutazioni sul piano q - p_0 si può asserire che: nelle sabbie pure una variazione di p_0 può produrre dilatazione o contrazione; aggiungendo particelle di gomma invece si osserva un graduale passaggio al solo comportamento al solo comportamento contrattivo. In Figura 57 si rappresenta l'effetto del contenuto di gomma su q a diversi livelli di deformazione. Nel caso di $D_{50,r}/D_{50,s} = 1,0$, all'aumentare del contenuto di gomma, si manifesta sempre una diminuzione della tensione

deviatorica mentre, nei campioni con $D_{50,r}/D_{50,s} = 2,5$ si nota una diminuzione di q meno importante.

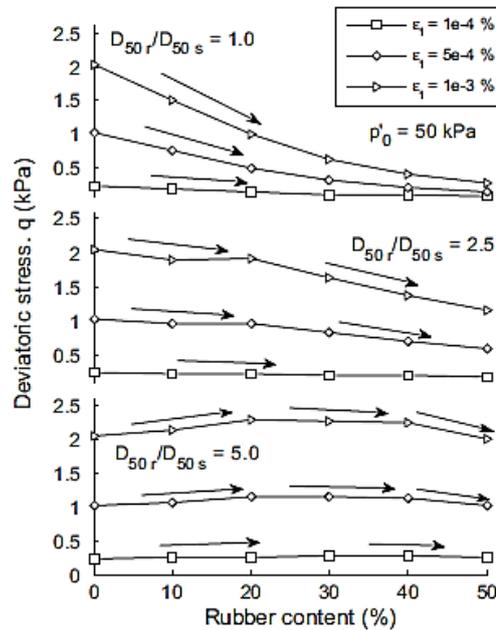


Figura 57. Tensione deviatorica rispetto al contenuto di gomma per diversi stati deformativi [23]

Questa tendenza diventa più chiara analizzando stati deformativi più importanti e con un contenuto di gomma superiore al 20% dove, si osserva un valore quasi costante di q nel caso di $D_{50,r}/D_{50,s} = 5,0$. Per elevati valori deformativi e con $D_{50,r}/D_{50,s} = 5,0$ si può notare addirittura un graduale aumento della tensione deviatorica; quest'ultima cresce aumentando il contenuto di gomma fino al 20%, rimane costante fino al 40% e poi torna a diminuire [23].

Questi risultati possono essere spiegati schematicamente facendo riferimento Figura 58 che mostra un diagramma delle tre possibili fasi per le miscele sabbia-gomma, tenendo conto sia del rapporto dimensionale che del contenuto di gomma fino al 50%. Si osserva una risposta dominata dalla sabbia per rapporti di dimensioni di 1,0 e 2,5 fino a un contenuto di gomma del 20% mentre un comportamento simile a quello della gomma si verifica in miscele contenenti $D_{50,r}/D_{50,s} = 1,0$ e un contenuto di gomma superiore al 30%. In sostanza a parità di contenuto di gomma utilizzare particelle più grandi significa ridurre la superficie specifica della stessa favorendo i contatti tra la sabbia. Viceversa, usare particelle più piccole di gomma significherebbe favorire l'interazione tra gomma e sabbia o addirittura favorire proprio il comportamento "simil-gomma". Le dimensioni e

la percentuale di particelle di gomma devono essere selezionate in base allo scopo di utilizzo delle miscele [23].

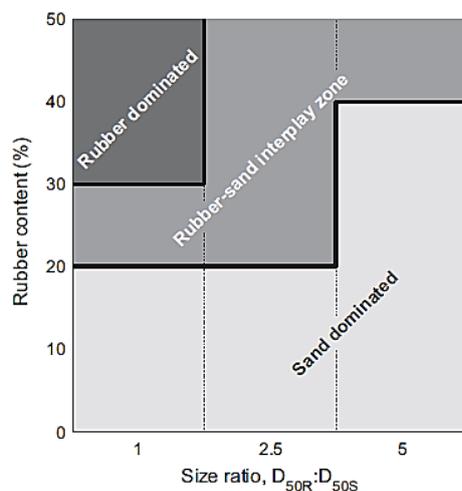


Figura 58. Diagramma di fase per miscele RSM [23]

3.6.2. COMPORTAMENTO DI MISCELE RSM COSTITUITA CON BRANDELLI DI GOMMA

Per valutare come i trucioli di gomma incidono sulla resistenza a taglio del materiale e sulla deformazione volumetrica si fa riferimento allo studio di Zornberg et al., in cui sono state eseguite 15 prove di compressione triassiale consolidata drenata (CD) variando le pressioni confinanti (σ_3), la densità relativa (D_r), contenuto di gomma (χ) e indice di forma (η) [24]. Per chiarezza viene riportata la Tabella 5 che presenta un riassunto delle principali caratteristiche dei test condotti nell'indagine (densità relativa della matrice di sabbia, contenuto di frammenti di pneumatici, dimensioni di frammenti di pneumatici e proporzioni).

Per capire l'effetto di η sulla resistenza a taglio risulta utile osservare gli andamenti delle serie 9,8,4 e 11 le quali sono state prodotte utilizzando la stessa densità relativa della matrice sabbiosa ($D_r = 55\%$) e lo stesso contenuto di gomma ($\chi = 30\%$) ma indice di forma diverso (rispettivamente $\eta = 1, 2, 4$ e 8). Si nota come, per tensioni di confinamento elevate ($\sigma_3 = 207$ kPa), Figura 59(b), l'effetto della geometria della gomma sul comportamento deformativo sia trascurabile invece, in presenza di pressioni confinanti relativamente basse la deformazione volumetrica è significativamente influenzata dal rapporto η della gomma.

Tabella 5. Caratteristiche dei campioni analizzati nello studio di Zornberg et al. [24]

Series	Sand relative density, D_r (%)	Tire shred content, χ (% by weight)	Tire shred width (mm)	Tire shred aspect ratio, η	Shear strength parameters		
					Φ (°)	c (kPa)	ϕ_{eq}
1	55	0	na	na	36.8	7.8	37.9
2	75	0	na	na	41.0	3.8	41.4
3	55	10	12.7 (0.5 in)	4	35.7	21.7	38.9
4	55	30	12.7 (0.5 in)	4	35.7	30.4	40.2
5	55	60	12.7 (0.5 in)	4	34.4	18.2	37.3
6	na	100	12.7 (0.5 in)	4	21.4	22.8	26.5
7	75	30	12.7 (0.5 in)	4	36.4	30.7	40.8
8	55	30	12.7 (0.5 in)	2	35.6	22.3	38.9
9	55	30	25.4 (0.5 in)	1	35.1	23.7	38.7
10	75	20	12.7 (0.5 in)	4	37.2	22.0	40.3
11	55	30	12.7 (0.5 in)	8	36.1	60.0	44.5
12	55	38.3	12.7 (0.5 in)	4	36.1	41.2	42.0
13	55	10	25.4 (0.5 in)	1	36.5	19.8	39.4
14	55	5	12.7 (0.5 in)	4	36.1	7.0	37.1
15	65	15	12.7 (0.5 in)	4	34.8	21.7	38.2

Note: na, not applicable

In particolare, si vede come un indice di forma maggiore implichi una deformazione volumetrica minore. Il contenuto di gomma (χ) influenza in maniera drastica il comportamento della miscela infatti, miscele con basso contenuto di gomma manifestano la dilatanza (comportamento tipico delle sabbie dense) mentre, campioni con valori di (χ) superiori al 30% manifestano un comportamento completamente contrattivo (comportamento tipico dei mezzi elastici). Questa differenza si manifesta anche nella determinazione del valore di picco della tensione deviatorica che, per miscele con componente sabbiosa predominante è piuttosto netto mentre, la determinazione del picco diventa difficoltosa nei campioni con valori elevati di χ [24].

Inoltre, anche il fattore η è influente sulla tensione deviatorica, come si può vedere dalla Figura 59(a), per una data deformazione assiale, maggiore è il valore di η maggiore sarà il valore dello sforzo deviatorico; l'incidenza che la forma della gomma esplica sul comportamento del materiale diventa più significativo per valori di η superiori a 4. Quindi, elementi in gomma di forma allungata risultano avere un'azione positiva sia sulla resistenza a taglio che sulla deformabilità del materiale specialmente quando la lunghezza degli stessi risulta essere importante, viene suggerito però che, usare valori di η maggiori di 8 non produrrebbe miglioramenti apprezzabili poiché si potrebbero avere problemi di miscelazione delle due fasi. Nonostante gli aspetti positivi citati, va detto che, l'indice di forma produce un effetto trascurabile sul comportamento dei provini per deformazioni inferiori al 5% ($\tau_5\%$) [24].

Di conseguenza, il miglioramento della resistenza al taglio indotto dalla presenza di pneumatici non dovrebbe essere decontestualizzato dalle altre caratteristiche che influiscono sul comportamento del materiale, in particolar modo sulla rigidità dello stesso.

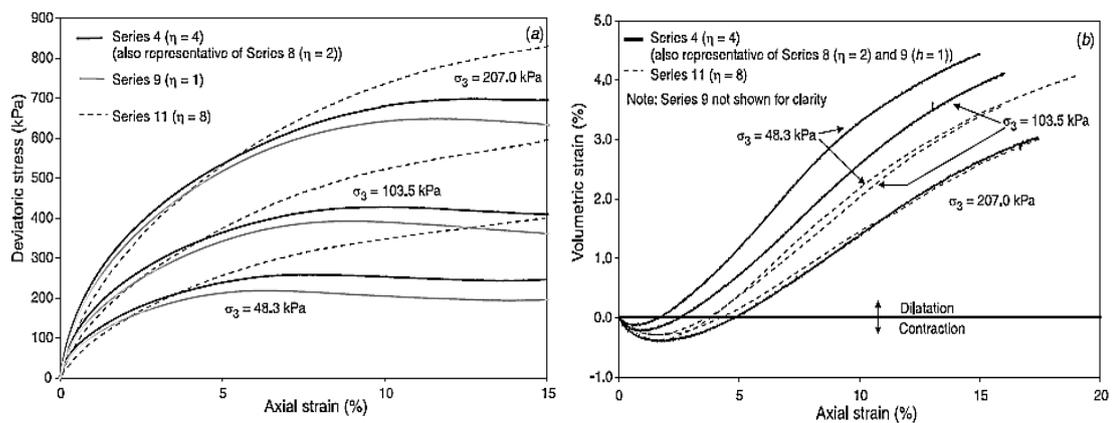


Figura 59. (a) Influenza di η sulla deformazione volumetrica valutata in funzione della deformazione assiale; (b) Influenza di η sulla tensione deviatorica valutata in funzione della deformazione assiale [24]

3.6.2.1. Resistenza a taglio

Come già detto, la resistenza al taglio della sabbia pura ($\chi = 0\%$) è superiore a quella della gomma pura ($\chi = 100\%$), quindi, per contenuti intermedi di gomma, la resistenza a taglio attesa dovrebbe essere la media ponderata delle resistenze dei materiali che compongono la miscela. In definitiva ci si attende un comportamento simile a quello delle miscele RSM con gomma granulare, in cui la presenza di gomma determinava una

riduzione della rigidità e della resistenza a taglio. In realtà si vede che esiste un contributo dato dai trucioli di gomma che incrementa i valori resistenza a taglio ottenendo valori superiori a quelli attesi. In Figura 60(a) viene mostrata una schematizzazione del rinforzo, a causa della deformazione imposta, il truciolo di gomma entra in trazione sviluppando così delle forze positive nella fascia di scorrimento. Quanto appena detto è la manifestazione puntuale del fenomeno, in Figura 60(b) viene illustrato qualitativamente l'effetto prodotto sulla resistenza a taglio. La resistenza totale si esplica attraverso il contributo di due meccanismi:

- Meccanismi di taglio interni sviluppati tra i singoli trucioli di pneumatici e granelli di sabbia.
- Meccanismi di rinforzo dovuti alle forze di trazione interne al truciolo di gomma indotte dalla deformazione imposta.

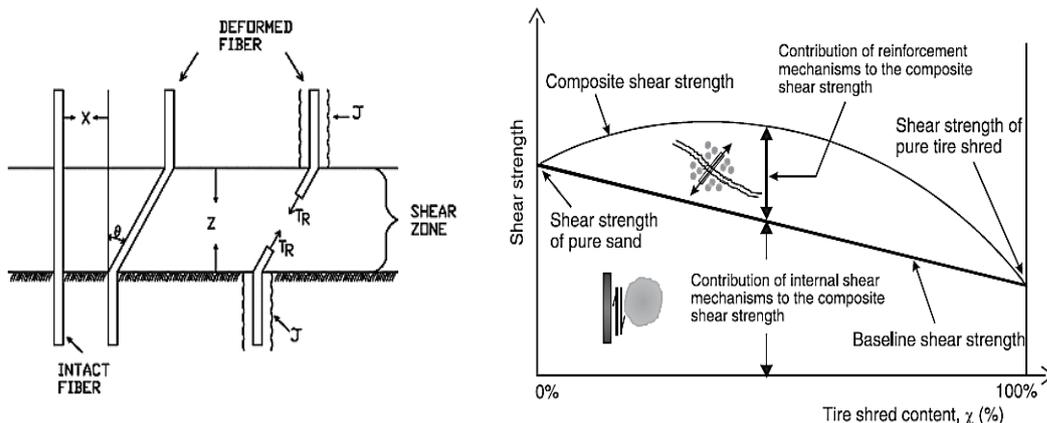


Figura 60. (a) Meccanismo di rinforzo che i brandelli di gomma esercitano sulla matrice sabbiosa [25]; (b) Schematizzazione dell'effetto dei brandelli di gomma sulla resistenza a taglio del materiale [24]

In sostanza, la “baseline shear strength” rappresenta la media ponderata della resistenza a taglio dei due materiali a cui va aggiunto, il meccanismo di rinforzo dato dalla speciale forma della gomma. La “composite shear strength” rappresenta la resistenza a taglio compressiva e si vede come sia massima $0\% \leq \chi \leq 50\%$ di gomma. Inoltre, emerge che il contributo dei meccanismi di rinforzo (cioè la differenza tra la resistenza al taglio composita e la resistenza al taglio di base) è più significativa a pressioni di confinamento basse [24]. In Figura 61 vengono mostrati gli involucri di rottura dei campioni con χ variabile ($\eta = 4$, $D_r = 55\%$), inoltre, nel grafico vengono incluse, come riferimento, la resistenza a taglio per sabbia pura e trucioli di gomma puri.

Dai risultati emerge che la resistenza aumenta con l'aumentare del contenuto di gomma, raggiunge un massimo (corrispondente a $\chi = 38,3\%$) per poi diminuire continuando ad aggiungere gomma.

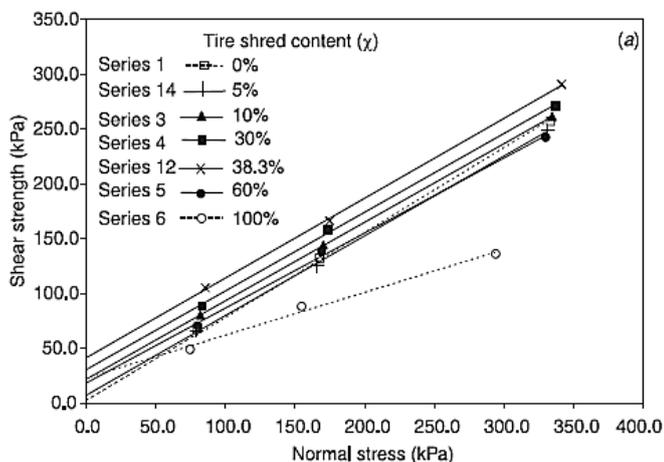


Figura 61. Involuppi di rottura per miscele RSM con diversi contenuti di gomma [24]

Questo suggerisce che la presenza di trucioli di gomma induce un aumento della resistenza al taglio globale della miscela però, per elevati valori di χ la resistenza a taglio dei singoli trucioli di gomma inizia a governare la resistenza al taglio della miscela, portando a valori di resistenza al taglio inferiori. Questi risultati indicano che l'uso di trucioli di gomma nei suoli non dovrebbe essere considerato solo come un'alternativa per il riutilizzo di grandi quantità di pneumatici, ma anche come un approccio per migliorare le proprietà meccaniche dei materiali granulari. In Figura 62 vengono confrontati gli involuppi di rottura per le serie 4 e 7, entrambe con lo stesso contenuto di gomma ($\chi = 30\%$) e indice di forma ($\eta = 4$), ma densità diversa (rispettivamente $D_r = 55\%$ e $D_r = 75\%$). La Figura 62 mostra come non ci siano differenze sostanziali tra i due campioni anzi, gli involuppi di rottura combaciano bene. Questi risultati suggeriscono che, a scopi pratici, compattare la miscela RSM contenente trucioli di pneumatici non apporterebbe benefici significativi.

Infine, la Figura 63 mostra l'effetto dell'indice di forma sulla resistenza a taglio delle miscele confrontando i risultati ottenuti per le serie 9, 8, 4 e 11, che sono stati prodotti utilizzando la stessa densità relativa ($D_r = 55\%$), lo stesso contenuto di gomma ($\chi = 30\%$), ma proporzioni diverse ($\eta = 1, 2, 4$ e 8).

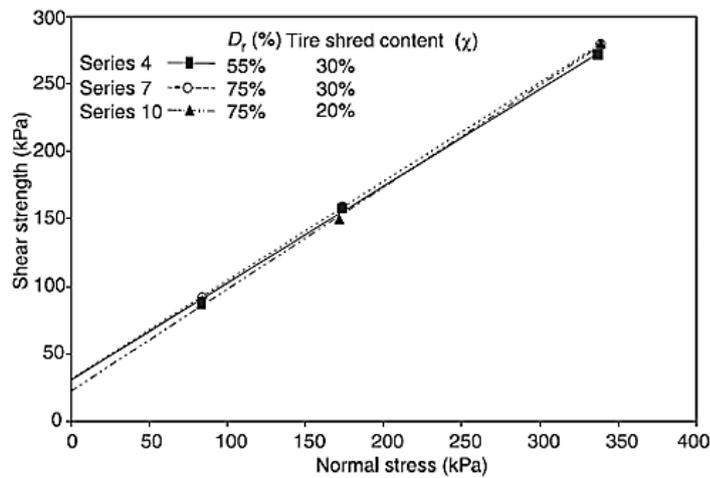


Figura 62. Involuppi di resistenza a taglio per matrici a differenti densità relative

I risultati mostrano che η crescenti portano ad un aumento della resistenza al taglio della miscela e che gli involuppi di rottura sono approssimativamente paralleli indicando che l'aumento della resistenza è principalmente correlato alla coesione. Un indice di forma maggiore produce un "ancoraggio" migliore dei singoli trucioli all'interno del terreno, questo a sua volta, porta ad un incremento delle forze di trazione all'interno dei trucioli con conseguente miglioramento della resistenza a taglio della miscela. Questo però, come già detto, ha un beneficio fino a determinati valori di η (gli autori suggeriscono 8) oltre il quale si ha un effetto controproducente. L'eccessiva lunghezza rende più difficile la miscelazione delle due fasi.

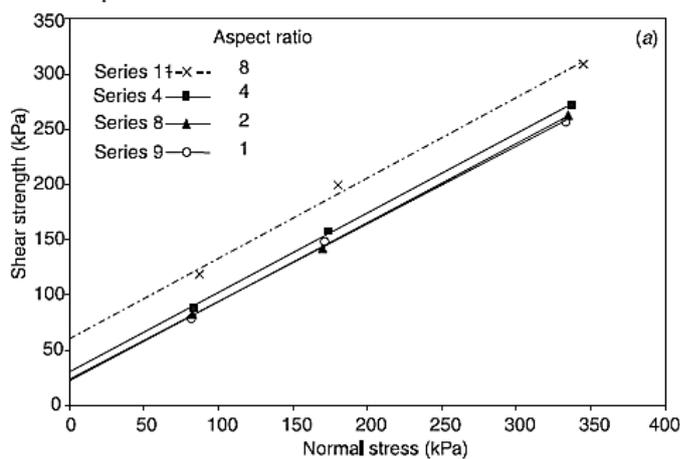


Figura 63. Influenza dell'indice di forma sull'involuppo di rottura

3.6.2.2. Angolo di attrito

In Figura 64 viene mostrato l'effetto di η sull'angolo di attrito equivalente per le miscele RSM. Come già detto l'incremento più significativo si manifesta per valori di η superiori a 4 [24].

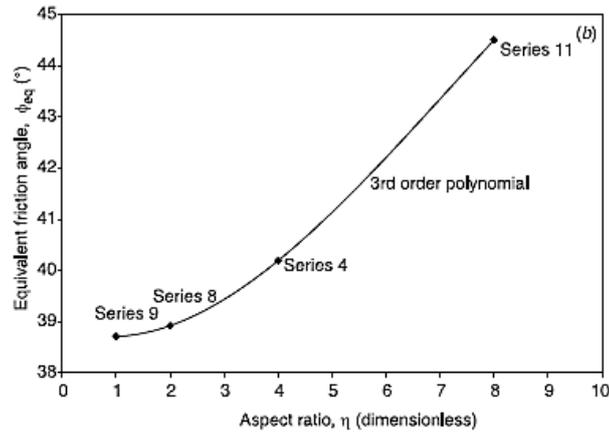


Figura 64. Variazione dell'angolo d'attrito equivalente in funzione dell'indice di forma [24]

3.7. PROPRIETÀ DINAMICHE

3.7.1. GENERALITÀ

Un campione di terreno sottoposto a carichi ciclici manifesta un comportamento non lineare, produce una dissipazione di energia e accumula deformazioni permanenti. Immaginando di eseguire una prova dinamica su un campione di terreno si osserverebbe una curva sforzo-deformazione non lineare e allo scarico il livello deformativo non sarebbe nullo a causa della plasticizzazione (deformazioni permanenti). Iterando il processo di carico-scarico si creerebbe un ciclo di isteresi chiuso con conseguente dissipazione di energia. Poiché avviene una variazione delle caratteristiche all'aumentare del numero di cicli si assisterebbe all'effetto fatica: la rigidità diminuirebbe e l'energia dissipata ad ogni ciclo aumenterebbe. In realtà gli effetti sono diversi al variare del livello deformativo imposto infatti, per bassi livelli deformativi, la non linearità è poco marcata e il comportamento è quasi lineare. Per elevati livelli deformativi, la non linearità diventa importante e si combinano gli effetti di riduzione della rigidità del materiale, di incremento della dissipazione di energia e dell'aumento dell'influenza dal numero di cicli. Questi tre aspetti legati al

comportamento reale dei terreni possono essere quantificati facendo riferimento alla Figura 65.

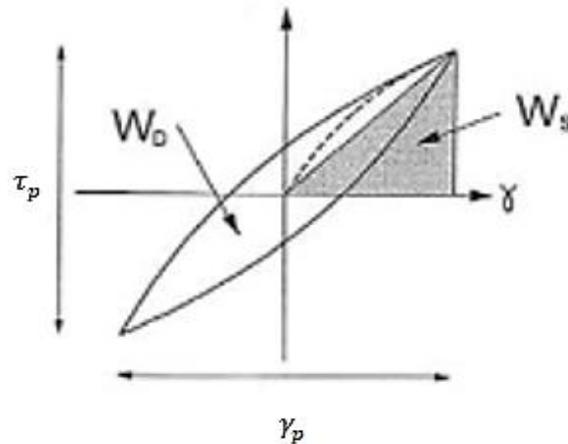


Figura 65. Rappresentazione di un ciclo di isteresi

La rigidezza del materiale viene espressa considerando il modulo di taglio che rappresenta la pendenza media del ciclo di carico-scarico.

$$G = \frac{\tau_p}{\gamma_p} \quad (6)$$

dove τ_p è la distanza tra i valori di picco della tensione e γ_p è la distanza tra i valori di picco della deformazione. Questa definizione corrisponde alla definizione di modulo secante, in altri termini, si associa il comportamento non lineare del materiale a uno elastico-lineare con rigidezza data dal modulo secante rispetto al livello deformativo raggiunto. Per piccoli livelli deformativi il modulo di taglio corrisponde al modulo di taglio a piccole deformazioni che viene definito come:

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (7)$$

dove ρ è la densità del materiale e V_s la velocità di propagazione delle onde all'interno dello stesso.

La dissipazione di energia quantifica l'area racchiusa dal ciclo di isteresi e si lega al livello deformativo raggiunto. Viene espressa dal rapporto di smorzamento (D) che è il rapporto tra l'energia dissipata in un ciclo e la massima energia elastica accumulata durante lo stesso.

$$D = \frac{W_D}{4\pi W_s} \quad (8)$$

All'aumentare dell'ampiezza dei cicli, la rigidità e il modulo di taglio diminuiscono mentre il rapporto di smorzamento aumenta. La variazione del modulo secante rispetto al livello deformativo è espressa attraverso le curve di decadimento che descrivono appunto come varia il rapporto adimensionale G/G_0 al variare del livello deformativo; all'incrementare del livello deformativo G diminuisce mentre D aumenta. Già per piccoli livelli deformativi la dissipazione non è nulla perché il comportamento non è mai elastico lineare ma viscoelastico. Nei terreni puri, a piccole deformazioni la dissipazione avviene esclusivamente per attrito tra le particelle che a seguito di una deformazione imposta scorrono l'una sull'altra mentre per livelli deformativi più importanti la dissipazione avviene anche per plasticità.

3.7.2. COMPORTAMENTO NON LINEARE

Per capire le proprietà dinamiche delle miscele RSM (composte con gomma granulare) si fa riferimento allo studio condotto da Anastasiadis et al. per semplicità di lettura dei risultati da loro ottenuti si riporta la Tabella 6 in cui vengono riassunte le caratteristiche dei campioni analizzati [18].

L'aumento del contenuto di gomma porta sistematicamente a curve G/G_0 -log γ più lineari e curve D -log γ più morbide a causa della maggiore interazione tra i vari elementi in gomma. Osservando la Figura 66(a) si evince che: per piccoli valori di γ il modulo di taglio G non è affetto dal contenuto di gomma mentre, per valori di deformazione più importanti il contenuto di gomma diventa rilevante, in particolare tanto più viene incrementato il contenuto di gomma tanto meno G diminuisce. In altre parole, la linearizzazione della curva è tanto più accentuata quanto più il contenuto di gomma è significativo. Per quanto riguarda lo smorzamento si nota che già per piccoli valori di deformazione il valore di D è significativo ed è tanto più grande quanto più il contenuto di gomma è alto, questo a testimoniare che lo smorzamento per piccole deformazioni nelle miscele è governato dalla dissipazione intrinseca della gomma [18].

Quando le deformazioni diventano più importanti tutte le curve si assestano su valori simili; questo accade perché a grandi deformazioni corrispondono grandi spostamenti

interparticellari e quindi grande dissipazione di energia per attrito; in sostanza il meccanismo attritivo diventa importante tanto quanto la dissipazione della gomma [18].

Tabella 6. Principali caratteristiche dei campioni RSM sottoposti alla prova della colonna risonante [18]

Series	Material code	Initial material	D ₃₀ (mm) ^a	C _a ^b	γ _s (gr/cm ³) ^c
Sandy and gravety materials	C2D03	Rounded fluvial sand	0.27	1.58	2.67
	C2D06	Rounded fluvial sand	0.56	2.76	2.67
	C2D1	Rounded fluvial sand	1.33	2.13	2.67
	C2D3	Angular sandy gravel	3.00	2.45	2.67
	C6D1	Angular sandy gravel	2.90	5.95	2.67
	C13D3	Angular sandy gravel	3.00	12.50	2.67
	C1D8	Angular sandy gravel	7.80	1.22	2.67
Granulated rubber materials	R03	Recycled tire rubber	0.34	1.95	1.10
	R06	Recycled tire rubber	0.40	2.65	1.10
	R2	Recycled tire rubber	1.50	1.81	1.10
	R3	Recycled tire rubber	2.80	2.29	1.10

a Mean grain size of particles

b Coefficient of uniformity = D₆₀/D₁₀

c Specific gravity of particles

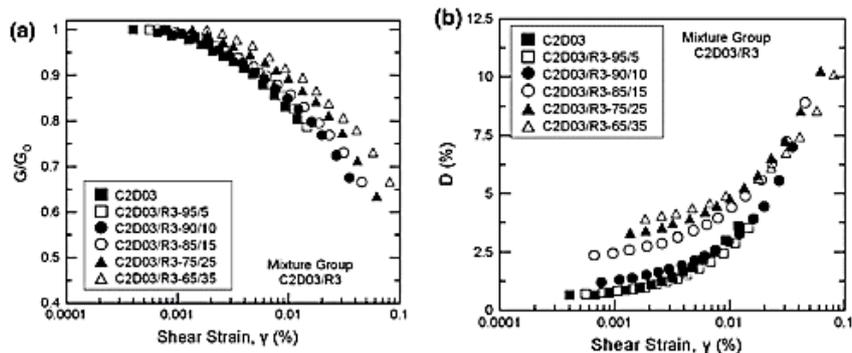


Figura 66. Effetto del contenuto di gomma sulle proprietà dinamiche delle miscele RSM [18]

Sono stati valutati anche gli effetti che l'inclusione di gomma produce sulle proprietà dinamiche valutate per bassi livelli deformativi (G_0, D_{min}) in funzione della tensione di confinamento. Dai risultati sperimentali si nota che, fissata una pressione di confinamento e incrementando il contenuto di gomma nella miscela, G_0 diminuisce

mentre D_{min} aumenta. Questa tendenza è stata osservata in tutti i campioni e diventa più pronunciata per percentuali di gomma superiori al 10% per quanto riguarda G_0 mentre, già contenuti di gomma superiori al 5% influiscono sul valore di D_{min} . Inoltre, è possibile notare che un aumento della tensione di confinamento porta a un incremento della rigidezza e a una diminuzione dello smorzamento, in accordo con il comportamento tipico dei terreni [18] (Figura 67).

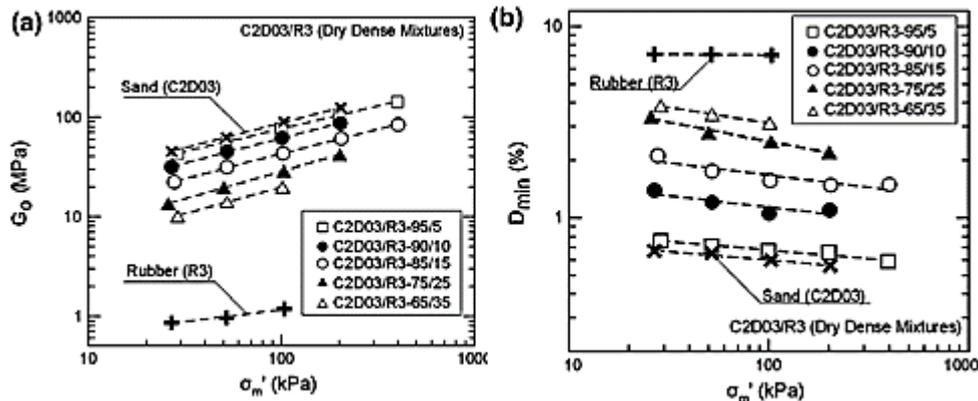


Figura 67. Effetto del contenuto di gomma su (a) Modulo di taglio per piccole deformazioni; (b) Damping per piccole deformazioni [18]

3.7.3. VUOTI EQUIVALENTI E INFLUENZA NELLE PROPRIETÀ DINAMICHE

Data l'elevata deformabilità della gomma che, sotto opportuni carichi può deformarsi ed andare ad occupare i vuoti interstiziali, è possibile affermare che l'indice dei vuoti diminuisce all'aumentare della percentuale di gomma nella miscela [18]. Tuttavia, la bassa rigidezza a taglio della gomma rispetto al campione di sabbia pura indica che il contributo della gomma su G_0 è trascurabile. Per semplicità si può assumere che il volume dei solidi di gomma faccia parte del volume totale dei vuoti e attraverso quest'ultimo esprimere G_0 e D_{min} [18]. L' $e_{eq,mix,100}$, che rappresenta l'indice dei vuoti equivalente rispetto a una pressione di confinamento pari a 100 kPa, viene normalizzato rispetto all'indice dei vuoti della sabbia intatta $e_{soil,100}$ alla stessa pressione confinante. È chiaro che il rapporto $e_{eq,mix,100} / e_{soil,100}$ aumenta all'aumentare del contenuto di gomma, e quindi l'aggiunta di gomma, come già detto, porta a una riduzione dei contatti tra particelle di sabbia e quindi a una riduzione della rigidezza della miscela. Va notato che $e_{eq,mix,100}$ allo 0% di gomma corrisponde all'indice dei vuoti del campione di

sabbia pura ($e_{soil,100}$) e che esiste una corrispondenza biunivoca tra $e_{eq,mix,100}$ e il contenuto di gomma in percentuale nella miscela. Come ci si aspetta la rigidità a taglio diminuisce all'aumentare del contenuto di gomma e in scala logaritmica assume un andamento lineare [18].

In Figura 68(a) a, sono tracciati i valori del rapporto di smorzamento in funzione della pressione di confinamento. I valori vengono sempre normalizzati rispetto ai corrispondenti campioni di sabbia pura per tensioni di confinamento pari a 100 kPa, in questo modo si elimina l'effetto della percentuale di gomma sui risultati sperimentali. Gli autori hanno dimostrato come l'effetto della pressione di confinamento sui valori di D_{min} sia poco significativo a prescindere dal campione analizzato. La Figura 68(b), mostra l'effetto del contenuto di gomma su $D_{min,mix}$, i valori dei campioni vengono normalizzati rispetto al valore corrispondente del terreno intatto alla stessa pressione confinata, denominato come $D_{min,soil,100}$. Si osserva che l'aumento del contenuto di gomma porta sistematicamente a valori più alti del rapporto di smorzamento. Ciò è dovuto al significativo contributo dei solidi di gomma sulla capacità di smorzamento e all'interazione tra particelle di gomma e del suolo che presentano proprietà elastiche significativamente diverse.

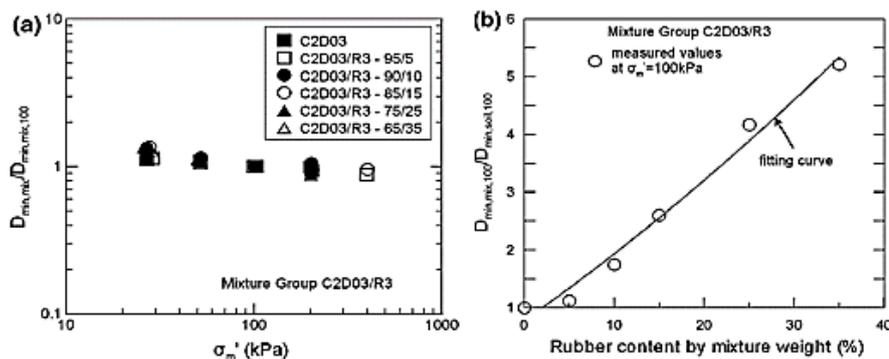


Figura 68. (a) Effetto della pressione di confinamento sullo smorzamento del materiale; (b) Effetto del contenuto di gomma sullo smorzamento del materiale [18]

3.7.4. INCIDENZA DELLA DIMENSIONE DELLA GOMMA SULLE PROPRIETÀ DINAMICHE

Anche se, nei campioni di terreno, valori diversi del coefficiente di uniformità possono portare a un diverso indice dei vuoti, il fattore principale che influenza la rigidità a taglio è la dimensione media del grano di sabbia ($D_{50,s}$). Ad esempio, come mostrato in Figura 69, coefficienti di uniformità variabili presentano approssimativamente gli stessi

valori G_0 , anche se questi campioni hanno valori di indice dei vuoti diversi. Il modulo di taglio a piccole deformazioni di tutti i terreni da densi a molto densi analizzati è ben correlato alla dimensione media del grano, espressa qui come $D_{50,s}$ (Figura 69) [18].

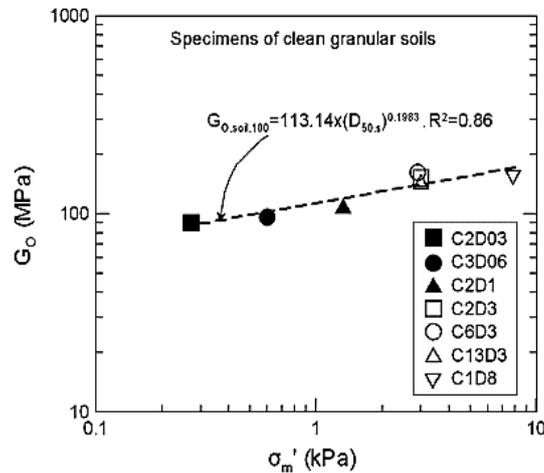


Figura 69. Andamento del modulo di taglio per piccole deformazioni in funzione della dimensione dei grani di gomma [18]

Questa correlazione può essere espressa con la seguente equazione:

$$G_{0,soil,100} = 113,14 * (D_{50,s})^{0,1983} \quad (9)$$

dove $G_{0,soil,100}$ è il modulo di taglio a piccole deformazioni dei terreni granulari da densi a molto densi espresso in MPa ad una pressione di confinamento media di 100 kPa mentre $D_{50,s}$ è la dimensione media del grano delle particelle di terreno, espressa in mm. Quindi maggiore è la dimensione media del grano di sabbia maggiore sarà la rigidità del terreno. In Figura 70 viene tracciato il rapporto $G_{0,mix,100} / G_{0,soil,100}$ rispetto all'indice dei vuoti equivalente dove $G_{0,mix,100}$ e $G_{0,soil,100}$ rappresentano rispettivamente il modulo di taglio per piccole deformazioni della miscela RSM e del terreno sempre per pressioni di confinamento di 100 kPa. In Figura 70 oltre ad esserci una chiara tendenza alla riduzione del rapporto $G_{0,mix,100} / G_{0,soil,100}$ con l'aumento di $e_{eq,mix,100}$ (espresso in scala logaritmica), si nota che, la pendenza della curva diminuisce all'aumentare del rapporto $D_{50,r}/D_{50,s}$. Si è quindi concluso che la diminuzione di $G_{0,mix,100}$ all'aumentare del contenuto di gomma è più pronunciata all'aumentare della dimensione relativa della sabbia rispetto alle particelle di gomma. Ciò è dovuto principalmente all'aumento più pronunciato dei contatti di gomma-gomma al diminuire del rapporto $D_{50,r}/D_{50,s}$.

L'aumento dei contatti gomma-gomma trasforma gradualmente il comportamento di una matrice terreno-gomma simile al suolo a uno simile alla gomma.

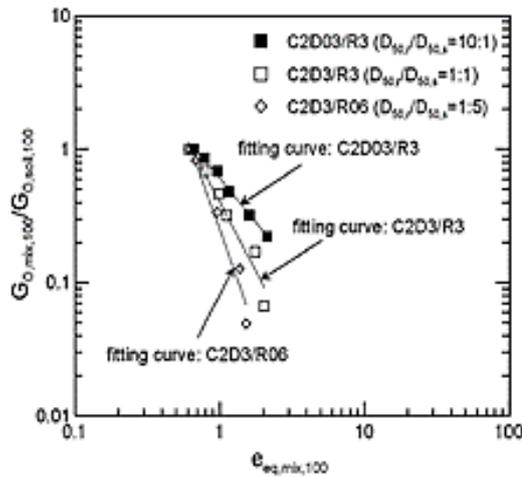


Figura 70. Andamento del modulo di taglio per piccole deformazioni in funzione dell'indice dei vuoti equivalente [18]

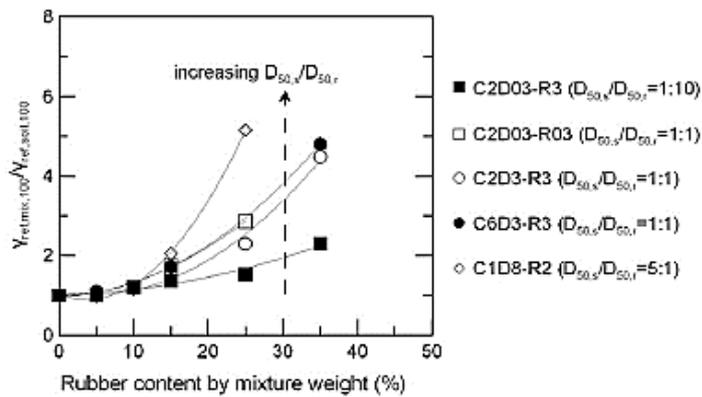


Figura 71. Effetto del contenuto di gomma e del rapporto $D_{50,s}/D_{50,r}$ sulla defomrazione di riferimento [28]

Quanto appena detto viene confermato anche da Senetakis et al., dove attraverso la Figura 71 mostrano gli effetti del contenuto di gomma e del rapporto $D_{50,r}/D_{50,s}$ sulla deformazione di riferimento normalizzata sempre rispetto alla deformazione di riferimento per la sola sabbia alla stessa tensione di confinamento [28]. Si nota come per contenuti di gomma inferiori al 15% l'andamento delle varie curve sia pressochè lo stesso, oltre tale valore, però, si nota come il rapporto $D_{50,r}/D_{50,s}$ svolga un ruolo fondamentale sulla risposta del materiale. Con questo grafico vengono confermati due particolari aspetti: incrementando il contenuto di gomma la risposta del materiale diventa più lineare e che, incrementando il rapporto $D_{50,r}/D_{50,s}$, per un fissato contenuto di gomma, la defomrazione di riferimento aumenta e quindi il materiale diventa meno

rigido. Questo concorda con quanto già detto, ovvero, aumentando il numero di contatti tra gli elementi di gomma (aumentando l'area specifica della gomma, utilizzando quindi elementi in gomma più piccoli) la rigidezza del materiale diminuisce.

3.7.5. DETERMINAZIONE DI G_0 E D NELLE MISCELE RSM MEDIANTE FORMULE SPERIMENTALI

Anastasiadis et al. hanno individuato espressioni analitiche al fine di quantificare l'effetto dei parametri indipendenti coinvolti nel comportamento dinamico delle miscele RSM. Considerando il fatto che l'effettiva rigidezza a taglio della matrice solida RSM è essenzialmente dovuta alla rigidezza della sabbia, si può far riferimento, come già detto, a un indice dei vuoti equivalente considerando appunto, il volume dei solidi di gomma come parte del volume totale di vuoti. L'indice dei vuoti equivalenti nelle miscele RSM può essere espresso in funzione del contenuto di gomma e in funzione dell'indice dei vuoti iniziale del terreno puro mediante la seguente equazione polinomiale:

$$e_{eq,mix,100} = e_{eq,soil,100}(0,008pr^2 + 0,0454pr + 1) \quad (10)$$

Un aumento del contenuto della gomma porta ad un aumento dell'indice dei vuoti equivalenti, con conseguente riduzione del modulo di taglio per piccole deformazioni. Si propone una relazione attraverso la quale è possibile calcolare il modulo di taglio per piccole deformazioni considerando il contenuto di gomma, l'indice dei vuoti della matrice sabbiosa per una pressione di confinamento di 100 kpa e il rapporto $D_{50,r}/D_{50,s}$ secondo la seguente relazione:

$$\frac{G_{0,mix,100}}{G_{0,soil,100}} = A_{G,100} * F(e_{eq,mix,100}) \quad (11)$$

dove $F(e_{eq,mix,100})$ è espresso come:

$$F(e_{eq,mix,100}) = \frac{1}{(e_{eq,mix,100})^{x_e}} \quad (12)$$

x_e rappresenta la pendenza delle curve ottenute, l'effetto del rapporto $D_{50,r}/D_{50,s}$ sull'esponente x_e , è mostrato graficamente in Figura 72(a). L'esponente x_e aumenta con

il rapporto $D_{50,r}/D_{50,s}$ sull'esponente x_e e viene descritto quindi con l'Eq. 13 e 14 rispettivamente per miscele di terreni uniformi e ben classificati [18]:

$$x_e = 2,1365 * \left(\frac{D_{50,s}}{D_{50,r}}\right)^{0,22}, \text{ per matrici sabbiose uniformi} \quad (13)$$

$$x_e = 1,7306 * \left(\frac{D_{50,s}}{D_{50,r}}\right)^{0,22}, \text{ per matrici sabbiose ben graduate} \quad (14)$$

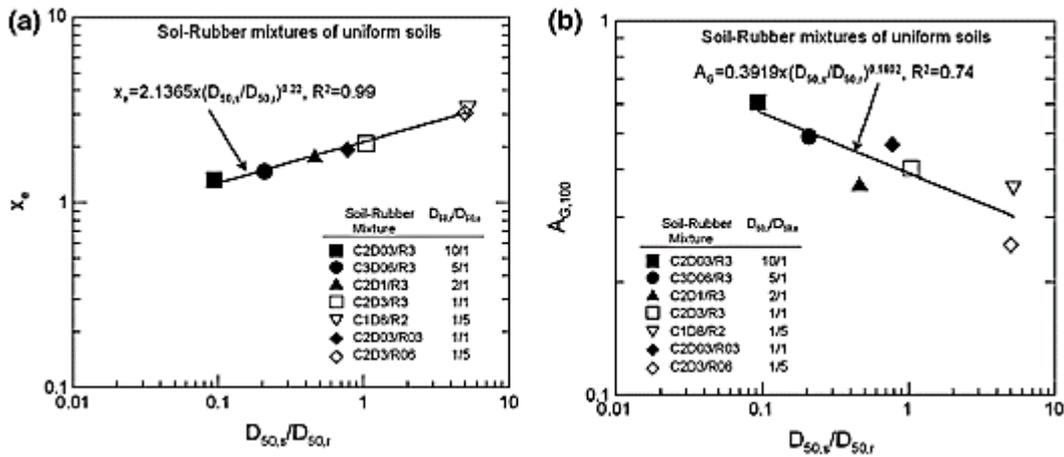


Figura 72. Effetto del rapporto $D_{50,s}/D_{50,r}$ (a) sul valore di x_e ; (b) sul valore di A_G

L'equazione 15 e 16 descrive la variazione di $A_{G,100}$ in funzione del rapporto $D_{50,r}/D_{50,s}$ rispettivamente per le miscele di terreni uniformi e ben classificati:

$$A_{G,100} = 0,3919 * \left(\frac{D_{50,s}}{D_{50,r}}\right)^{-0,1602}, \text{ per matrici sabbiose uniformi} \quad (15)$$

$$A_{G,100} = 0,3292 * \left(\frac{D_{50,s}}{D_{50,r}}\right)^{-0,1602}, \text{ per matrici sabbiose ben graduate} \quad (16)$$

Infine, è possibile esplicitare il modulo di rigidezza per le miscele RSM in funzione dell'ultimo parametro indipendente capace di caratterizzare le miscele: la tensione di confinamento (σ'_m).

$$G_{0,mix} = G_{0,mix,100} * 0,0799 * (\sigma'_m)^{0,55}, \text{ per matrici sabbiose uniformi} \quad (17)$$

$$G_{0,mix} = G_{0,mix,100} * 0,079 * (\sigma'_m)^{0,55}, \text{ per matrici sabbiose ben graduate} \quad (18)$$

Ricalcando gli stessi passi concettuali è possibile calcolare lo smorzamento di una miscela RSM conoscendo: il contenuto di gomma, lo stato tensionale (confinamento) e la dimensione media degli aggregati rispetto alla dimensione media della gomma.

Noto il valore di n_D (0,55 per terreni uniformi e 0,69 per terreni ben graduati), dapprima si va a definire lo smorzamento secondo la seguente formula:

$$D_{\min, \text{mix}} = D_{\min, \text{mix}, 100} A_D (\sigma'_m)^{n_D} \quad (19)$$

dove $D_{\min, \text{mix}}$ deve essere espresso in funzione della pressione di confinamento:

$$D_{\min, \text{mix}} = D_{\min, \text{mix}, 100} 1,750 (\sigma'_m)^{-0,12}, \text{ per terreni uniformi} \quad (20)$$

$$D_{\min, \text{mix}} = D_{\min, \text{mix}, 100} 1,750 (\sigma'_m)^{-0,12}, \text{ per terreni ben graduati} \quad (21)$$

E $D_{\min, \text{mix}, 100}$ viene correlato allo smorzamento del terreno puro mediante il contenuto di gomma in termini volumetrici:

$$D_{50, s} \ll D_{50, r} \quad (22)$$

$$D_{\min, \text{mix}, 100} = D_{\min, \text{soil}, 100} * [0,1004 * (p_r) + 1] \quad (23)$$

$$D_{50, s} \simeq D_{50, r} \quad (24)$$

$$D_{\min, \text{mix}, 100} = D_{\min, \text{soil}, 100} * [0,1487 * (p_r) + 1] \quad (25)$$

$$D_{50, s} \gg D_{50, r} \quad (26)$$

$$D_{\min, \text{mix}, 100} = D_{\min, \text{soil}, 100} * [0,3683 * (p_r) + 1] \quad (27)$$

3.7.6. LIQUEFAZIONE

Nell'ambito dei terreni, è nota la liquefazione statica che avviene in determinate condizioni di depositi sabbiosi e limosi i quali, per effetto di perturbazioni esterne, arrivano ad una situazione critica e si liquefano. In questo paragrafo si parlerà di liquefazione ciclica, che è una liquefazione indotta da carichi variabili nel tempo a frequenze relativamente elevate. Se si immagina una sabbia sciolta soggetta all'azione

sismica si può immaginare che questa si addensi. La densificazione delle sabbie produce una riduzione dell'indice dei vuoti fino ad arrivare a un valore minimo (caratteristico del materiale granulare). Quindi, il granulo sollecitato tenderebbe a muoversi andando ad occupare il vuoto ma, nel momento in cui è presente un fluido interstiziale, questo spostamento viene impedito. A causa dell'elevata velocità di applicazione della sollecitazione sismica, il fluido non ha il tempo per allontanarsi e si carica di sovrappressione interstiziale. Poiché la pressione aumenta, la tensione di contatto tra le particelle si riduce e ciò si traduce in una riduzione delle tensioni efficaci.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (28)$$

Dove u , a causa della sovrappressione del fluido diventa:

$$u = u_0 + \Delta u \quad (29)$$

Questo è importante perché secondo il principio di terzaghi, tutti gli effetti misurabili su un terreno (resistenza, deformabilità) sono legati a variazione di tensioni efficaci e non di tensioni totali. Infatti, durante il sisma, le pressioni crescono e possono annullare le tensioni efficaci, quando eguagliano la tensione iniziale.

$$\Delta u = \sigma ; \sigma' = 0 \quad (30)$$

Questa è la condizione di liquefazione in cui le particelle non sono più in contatto e non sono in grado di trasferire il carico con continuità ottenendo in pratica una sospensione. Si parla di liquefazione, poiché qui non si presenta più il comportamento di un solido con fluido interstiziale, bensì quello di un fluido con particelle sospese. In altri termini, a governare è il comportamento del fluido.

I metodi di verifica prevedono di confrontare la capacità del sistema a resistere nei confronti del fenomeno di liquefazione e la sollecitazione indotta dal fenomeno stessi. A questo fine, generalmente vengono utilizzati metodi empirici; questi prevedono di assimilare la storia temporale delle sollecitazioni indotte dall'evento sismico a una sollecitazione ciclica di ampiezza costante e si confronta l'ampiezza con un parametro di

resistenza ciclica, ottenuto tramite osservazione empirica. Di fatto si definiscono due variabili:

- Cyclic Stress Ratio (CSR), che è la sollecitazione ciclica indotta dal terremoto.
- Cyclic Resistance Ratio (CRR), che è la resistenza ciclica a liquefazione.

Si fa riferimento alla natura ciclica delle sollecitazioni indotte dal terremoto perché la ciclicità porta ad addensamento e quindi alla tendenza a liquefazione. Se la domanda da CSR supera la capacità CRR, si assume in modo deterministico che avvenga liquefazione [26]. In base a questo si definisce il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione come:

$$FSL = \frac{CRR}{CSR} \quad (31)$$

Come si vede dalla Figura 73, il Cyclic Resistance Ratio del campione costituito da sabbia pura è superiore a quello degli altri campioni quindi, la resistenza alla liquefazione della sabbia diminuisce con l'aggiunta della gomma. Come detto precedentemente, l'interazione tra sabbia e gomma influenza il comportamento del terreno in particolare modificando il modulo di taglio del terreno questo, diminuisce con l'aumentare della proporzione volumetrica della gomma. La diminuzione del modulo di taglio implica il raggiungimento della condizione di liquefazione in meno cicli. Tuttavia, con l'aumento della pressione di confinamento, è possibile cambiare lo scheletro solido della miscela, aumentato i contatti tra le particelle, aumentare la resistenza a taglio e quindi la resistenza alla liquefazione. Dallo studio condotto da Shariatmadari et. al. emerge che, cambiando il contenuto di gomma nel terreno, la resistenza alla liquefazione delle miscele è quasi la stessa (i valori di CRR per miscele con 10% di gomma sono praticamente gli stessi di quelle che ne contengono il 25%) [27].

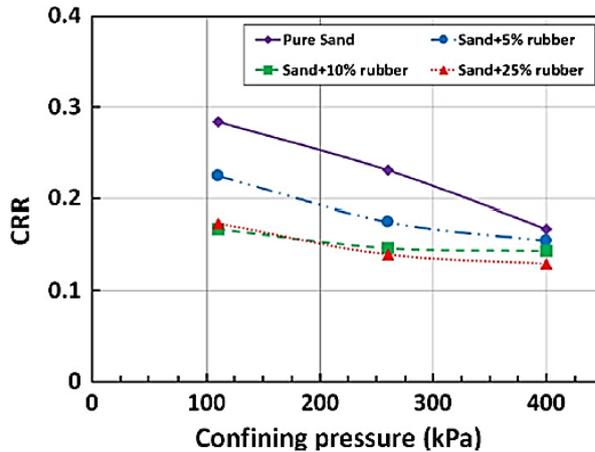


Figura 73. Effetto del contenuto di gomma sul Cyclic Resistance Ratio [27]

D'altra parte, come riportato in letteratura, le particelle di gomma svolgono un ruolo efficace nel controllo dell'accumulo della pressione interstiziale; deformandosi sono capaci di assorbire le sovrappressioni prodotte. Inoltre, lo studio è stato effettuato utilizzando brandelli di gomma; utilizzando una forma differente della gomma (brandelli) si potrebbero ottenere risultati completamente diversi grazie proprio all'aumento di resistenza a taglio che queste producono. Al fine di avere una migliore comprensione dell'effetto del contenuto di gomma sul comportamento della miscela, sono state studiate le variazioni della pressione interstiziale dopo le condizioni di liquefazione. In Figura 74 si riporta la variazione della pressione dell'acqua nei vuoti interstiziali rispetto nel tempo dopo l'interruzione del carico ciclico quindi, dopo la liquefazione. Si può vedere che la dissipazione della pressione dell'acqua per i campioni con più contenuto di gomma è più lento a causa della minore permeabilità degli stessi [27].

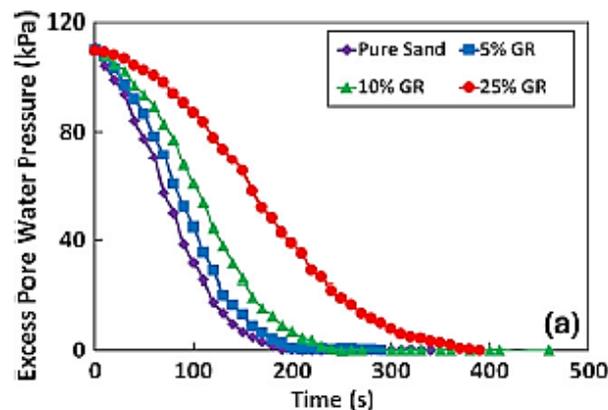


Figura 74. Decadimento della pressione interstiziale dopo il fenomeno della liquefazione per vari contenuti di gomma [27]

4. SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO

Nel presente capitolo verranno descritte le procedure di sperimentazione mirate a valutare l'applicabilità della tecnologia RSM in casi reali. La campagna di prove è stata svolta presso il dipartimento di Geotecnica dell'università Edinburgh Napier University in Edimburgo. Considerate le limitazioni, specialmente dal punto di vista statico, della miscela RSM, si propone un'idea alternativa che permetterebbe di sfruttare le proprietà che rendono appetibile questa tecnologia e limitarne gli svantaggi. L'idea è quella di utilizzare la miscela di materiale solamente intorno alla struttura in modo da lasciare invariate le caratteristiche del suolo su cui poggia la stessa. In questo modo l'installazione diventa versatile e adattabile a qualsiasi contesto, abbattendo i costi e offrendo la possibilità di installarla anche dopo la realizzazione della struttura. Sebbene il modello utilizzato può essere migliorabile questo, rappresenta un valido punto di partenza per sviluppare la ricerca e offre risultati attendibili.

4.1. STRUMENTAZIONE E MATERIALI

4.1.1. TAVOLA VIBRANTE

L'obiettivo della ricerca è quello di valutare qualitativamente l'effetto della gomma nei terreni granulari valutando, come questa possa cambiare la risposta dinamica di una struttura. Fino a questo momento la ricerca si è mossa attraverso test di laboratorio in particolar modo facendo riferimento a prove sia statiche che dinamiche su campioni di terreno. Con il presente lavoro si cerca di valutare, attraverso un modello in scala, l'applicabilità delle miscele RSM in strutture reali.

A tale scopo si è utilizzata una tavola vibrante ad asse singolo; inserendo i parametri di controllo (ampiezza di oscillazione e periodo) all'interno del software (*Rexroth Indraworks*), con l'ausilio dell'attuatore (*Rexroth EMC 80-32 ball-screw*) è possibile imporre sulla piattaforma l'oscillazione sinusoidale desiderata. Alla tavola vibrante è stato rigidamente connesso un box in legno sulla base del quale è stato fissato il modello di un edificio; quest'ultimo consiste in una colonna di materiale polimerico che

termina con una massa di 3 kg; il modello è facilmente rappresentabile con un pendolo rovescio ad un grado di libertà. Successivamente sono stati montati due accelerometri: uno in testa all' "edificio" e l'altro sul box in legno come mostrato in Figura 75. Questi accelerometri sono in grado di registrare 5122 dati al secondo il che significa, un dato ogni 0,000195 secondi. Ai fini pratici è stato ritenuto sufficiente applicare oscillazioni al modello per 5 secondi, tempo necessario per ottenere una risposta stabile del segnale. L'intera campagna di prove è stata gestita da due computer, uno aveva la funzione di imporre l'input (gestione dell'attuatore) e l'altro è servito per registrare l'output (memorizzare i dati registrati dagli accelerometri). Essendo i due software indipendenti è stato necessario un coordinamento di due persone per ottimizzare l'intero processo.

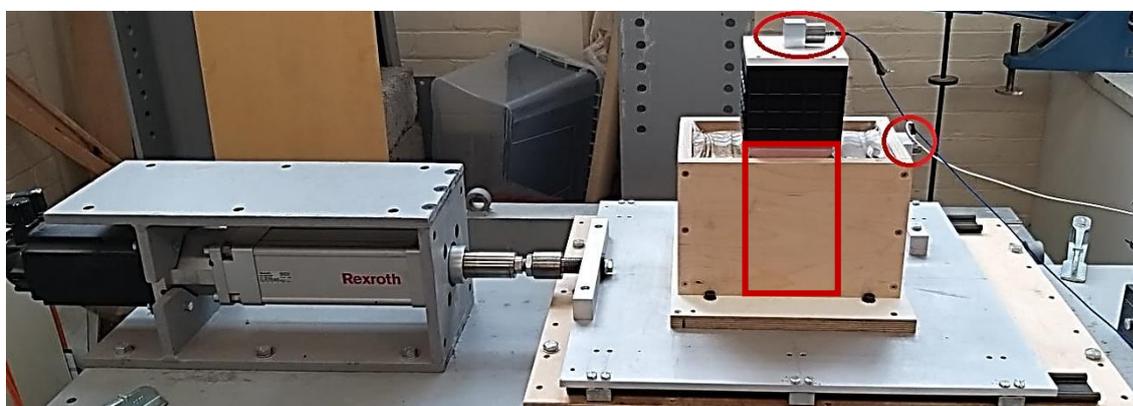


Figura 75. Apparecchiatura utilizzata nei test

4.1.2. SABBIA

Il terreno particellare rigido non comprimibile usato in questo studio è una sabbia arrotondata, mostrata nella Figura 76. La densità relativa della sabbia è $G_s = 2,68$ determinata sulla base di ASTM D854 mentre i risultati della setacciatura (ASTM C136) vengono riportati nel paragrafo 4.1.4. I diametri corrispondenti alle percentuali del 10%, 30%, 50% e 60% sono rispettivamente $D_{10} = 0,71$ mm, $D_{30} = 0,8$ mm, $D_{50} = 0,86$ mm e $D_{60} = 0,89$ mm.

Sono stati calcolati il coefficiente di uniformità (C_u) e il coefficiente di curvatura (C_c) usando le equazioni 32 e 33. Sulla base di questi risultati, la sabbia è classificata come terreno uniforme o di scarsa qualità.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 1.25 \quad (32)$$

$$C_c = \frac{D_{60}^2}{D_{10} \times D_{60}} = 1.01 \quad (33)$$



Figura 76. Immagine al microscopio della sabbia utilizzata

4.1.3. GOMMA

La gomma riciclata è stata ottenuta trattando i fianchi degli pneumatici utilizzati come descritto nel capitolo 1. Una volta rimosse tutte le cinghie d'acciaio, la gomma è stata devulcanizzata e successivamente triturrata meccanicamente fino ad ottenere le dimensioni delle particelle desiderate. In questo studio è stato scelto di utilizzare elementi in gomma allungati per due ragioni. La prima motivazione ha un'accezione accademica: in letteratura non sono presenti ricerche in cui viene studiato il materiale RSM composto da brandelli di gomma in campo dinamico. La seconda motivazione ha un'accezione più ingegneristica, l'idea è quella di valutare le proprietà dinamiche del materiale nelle condizioni che garantiscono maggior sicurezza dal punto di vista statico. Come già detto nel precedente capitolo utilizzare elementi in gomma allungati, non solo permette di conservare le proprietà statiche del terreno ma, in alcuni casi le migliora. La gomma presenta una dimensione media delle particelle $D_{50} = 1,62$ mm; seppur coscienti essere una forzatura, in Figura 77 viene mostrata la curva granulometrica che descrive la gomma e l'indice di forma (cioè dimensione relativa tra lunghezza e larghezza) che risulta essere compresa tra 2 mm e 6 mm. È importante osservare che si è utilizzata una dimensione specifica e non un range di lunghezze per rendere tutti i test comparabili tra loro evitando quindi le piccole differenze che potrebbero esserci tra una miscela e un'altra.

A causa delle piccole dimensioni delle particelle di gomma, queste vengono classificate come fibre di gomma (ASTM6270). Lo spessore è stato limitato a 1 mm e la densità

relativa ottenuta è $G_s = 1,12$. Sebbene in questo caso non sia il modo più adatto, calcolare il rapporto dimensionale confrontando la dimensione media della gomma con quella della sabbia, risulta essere il modo comune di valutare l'interazione tra queste due e in questa campagna prove risulta essere 2. Questo studio riconosce, tuttavia, la limitazione dell'adozione della dimensione media dei brandelli di gomma a causa della forma allungata.

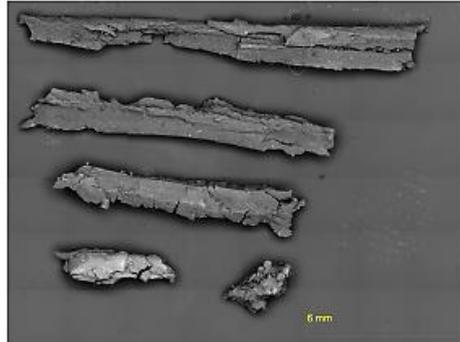


Figura 77. Immagine al microscopio della gomma utilizzata

4.1.4. MISCELA RSM

I materiali sopra descritti vengono mescolati secondo diverse proporzioni per formare la miscela RSM. Innanzitutto, viene messo l'inerte nel forno (105 gradi per 24 ore) al fine di eliminare completamente l'acqua; questo poi viene mescolato manualmente con la gomma, fornita già secca. Successivamente, il nuovo materiale viene inserito all'interno di buste di plastica facendo riferimento al contenuto di gomma in termini di massa (χ).

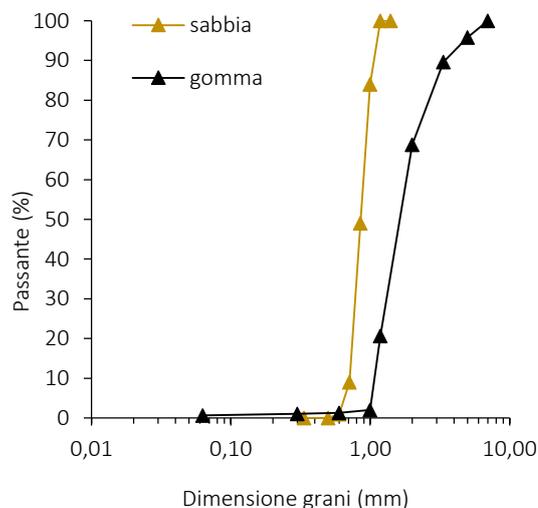


Figura 78. Curve granulometriche per la sabbia e per la gomma



Figura 79. Busta utilizzata contenente materiale RSM

In realtà ci si è resi conto che, prendendo in considerazione soltanto la massa, si sarebbero ottenuti campioni di materiale con volumi completamente diversi; questo avrebbe influito in maniera significativa sulla rigidezza dell'“edificio” producendo risultati non confrontabili tra loro (valori differenti di volume avrebbero prodotto altezze dell'edificio differenti e quindi rigidzze differenti). Per risolvere questo problema, in separata sede sono stati valutati i volumi dei campioni sciolti confezionati in funzione della massa, valutato il volume di questi e, conoscendo il volume desiderato, attraverso delle proporzioni si è risalito al contenuto di gomma e di sabbia necessari da inserire in ogni busta. I test sono stati effettuati sia su materiale asciutto sia su materiale bagnato; facendo riferimento al secondo caso, è stata aggiunta una quantità di acqua pari al 2,5% della massa della sabbia. I campioni vengono confezionati immediatamente prima di eseguire la prova avendo cura di eliminare completamente l'aria presente all'interno della busta, fattore che influenzerebbe in maniera drastica i risultati.

Tabella 7. Composizione in termini di massa delle buste di RSM

Contenuto di gomma (χ) (%)	Massa totale del campione (g)	Massa della gomma (g)	Massa della sabbia (g)
0	217,0	0,0	217,0
10	169,7	17,0	152,7
20	146,1	29,2	116,9
30	123,1	36,9	86,2
40	105,2	42,1	63,1

La scelta di utilizzare buste piuttosto che materiale privo di ulteriore confinamento risiede in due motivazioni principali. La prima ha un carattere accademico, si vuole garantire l'unidirezionalità della prova; riempiendo l'intero box di legno con il materiale RSM si sarebbero manifestati effetti di confinamento nell'altra direzione e questo avrebbe impedito o comunque fortemente limitato l'oscillazione del modello. L'altra motivazione ha una natura più applicativa: seppur ancora prematuro, l'idea è quella di utilizzare sacchi di materiale in strutture reali rendendo l'applicazione di questa tecnologia più semplice, questo inoltre va a risolvere il problema della segregazione. In test preparatori, si è visto che le due fasi tendono a dividersi, la sabbia tende a scivolare verso il basso mentre la gomma a rimanere in superficie. Va ricordato che con questa configurazione si vuole rappresentare un modello in cui vengono variate solamente le condizioni al contorno. Questo significa che, è possibile ottenere effetti positivi sulla struttura cambiando solamente il terreno al di fuori delle fondazioni. Come già detto, i vantaggi di questa configurazione sono essenzialmente due: l'applicabilità della tecnologia in qualsiasi momento (anche dopo che l'opera è stata realizzata) e l'invarianza delle condizioni geostatiche (è noto come sia poco consigliato edificare su terreni vergini, seppur sottoposti a compattazione).

4.1.5. DESCRIZIONE PROVA

Per eseguire i test, come già detto, sono state dapprima confezionate le buste di materiale RSM. Dopo aver inserito il materiale nelle stesse si è cercato di eliminare tutta l'aria presente per poi compattarle, il processo non segue procedure standardizzate ma si è ritenuto comunque sufficiente per raggiungere gli obiettivi della sperimentazione. Le buste sono poi state messe negli spazi tra la "struttura" e il confinamento offerto dal box, in particolare sono state predisposte 13 buste per ogni lato lungo la direzione d'interesse. Le buste sono state posizionate una alla volta alternativamente a destra e sinistra; si è visto che posizionando dapprima le 13 buste su di un lato e successivamente sull'altro, queste esercitano una spinta sulla "struttura" producendo una curvatura dell'asse. Questo avrebbe prodotto implicitamente, una disparità nei volumi alla destra e alla sinistra del modello.

Una volta terminata la configurazione della prova, due operatori si sono coordinati dando contemporaneamente l'avvio all'attuatore e facendo partire la registrazione da parte degli accelerometri. Il coordinamento si è reso necessario per evitare che la "struttura" oscillasse in maniera indefinita falsando così la prova. Le oscillazioni impongono energia sul materiale variando lo stato di addensamento; visto che, la corretta riproduzione della densità relativa ad ogni prova risultava essere impossibile, si è cercato di far oscillare il modello in modo tale che questo imponesse energia al sistema e lo compattasse. In sostanza ci si è serviti dell'oscillazione della struttura per standardizzare il più possibile la densità del sistema e rendere i risultati confrontabili tra loro. Per questa ragione si è cercato di azionare il sistema solamente nel tempo strettamente necessario per il test (5 secondi) tempo per cui la risposta diventi stabile ed evitando oscillazioni superflue. Sono state analizzate 4 diverse miscele (sabbia pura, 10% RSM, 20% RSM, 30% RSM e 40% RSM), queste sono state testate sia in condizioni asciutte che in presenza di acqua.

L'obiettivo è quello di ricavare curve di amplificazione (rapporto tra l'accelerazione della struttura e accelerazione imposta dalla tavola vibrante) in funzione delle varie frequenze; il range di frequenze d'interesse è 1 Hz - 10 Hz. In realtà si è visto che oscillazioni con lunghezze d'onda troppo lunghe vengono disturbate in modo significativo dal rumore di fondo quindi, il segnale ottenuto per la frequenza di 1Hz risulta essere troppo disturbato. Inoltre, i terremoti in genere hanno frequenze che vanno dai 5 Hz ai 10 Hz quindi la misurazione dell'amplificazione a 1 Hz viene omessa; in definitiva il range di frequenze realmente analizzato è 2 Hz – 10 Hz. Per ogni miscela indagata la metodologia della prova è stata sempre la stessa, si è applicata un'oscillazione pari a 2 Hz, si registrano le accelerazioni in input e output (in testa alla struttura), si passa all'oscillazione a 3 Hz e così via, incrementando di volta in volta la frequenza imposta fino ad arrivare a 10 Hz (successione in *up*); una volta raggiunto tale valore si sono ripercorsi gli stessi passi al contrario fino a tornare all'oscillazione di 2 Hz (successione in *down*). Questo ha l'obiettivo, come dicevo prima, di standardizzare il più possibile l'energia di compattazione visto che, la determinazione di quest'ultima risulta essere la vera problematica della campagna prove. Le curve che saranno poi

prese in considerazione saranno quelle di “down” ossia quelle individuate dal passaggio 10 Hz – 2 Hz. Facendo riferimento alla successione in down si analizzeranno i dati e discuteranno i risultati. Ad ogni frequenza si individua l’accelerazione massima registrata sul box e quella registrata sulla modello e valutata la funzione di amplificazione dal rapporto delle due. Viene valutato l’andamento del fattore di amplificazione in funzione delle frequenze e individuato il valore massimo. Successivamente si torna in laboratorio per effettuare altre prove ogni 0,25 Hz nell’intorno del massimo; in particolar modo vengono fatti almeno 2 test prima e 2 test dopo il valore di massima amplificazione. L’infittimento della discretizzazione ha lo scopo di individuare con maggior dettaglio la frequenza di risonanza del sistema e il relativo valore amplificazione.

4.2. ANALISI DATI

I dati registrati vengono analizzati tramite Excel dove, vengono graficate le accelerazioni in funzione del tempo sia del box che della struttura in Figura 80 viene riportato un esempio e in ALLEGATO A vengono riportate le accelerazioni registrate alle frequenze di massima amplificazione. A scopo di sintesi vengono omessi i grafici delle accelerazioni di ogni singola frequenza per ogni miscela studiata riportando appunto solamente le accelerazioni che producono la massima amplificazione.

Come si può vedere dalla Figura 80 il segnale del box, fatta eccezione per l’istante in cui inizia la sollecitazione, risulta essere lo stesso per l’intera durata del test; la struttura invece, incrementa le accelerazioni fino ad arrivare ad un massimo. Inizialmente l’inerzia della struttura offre una sorta di resistenza al movimento quindi, le accelerazioni massime si ottengono solamente dopo che sia trascorso un lasso di tempo (come già detto 5 secondi risultano comunque sufficienti affinché la struttura manifesti le accelerazioni massime ed una risposta stabile).

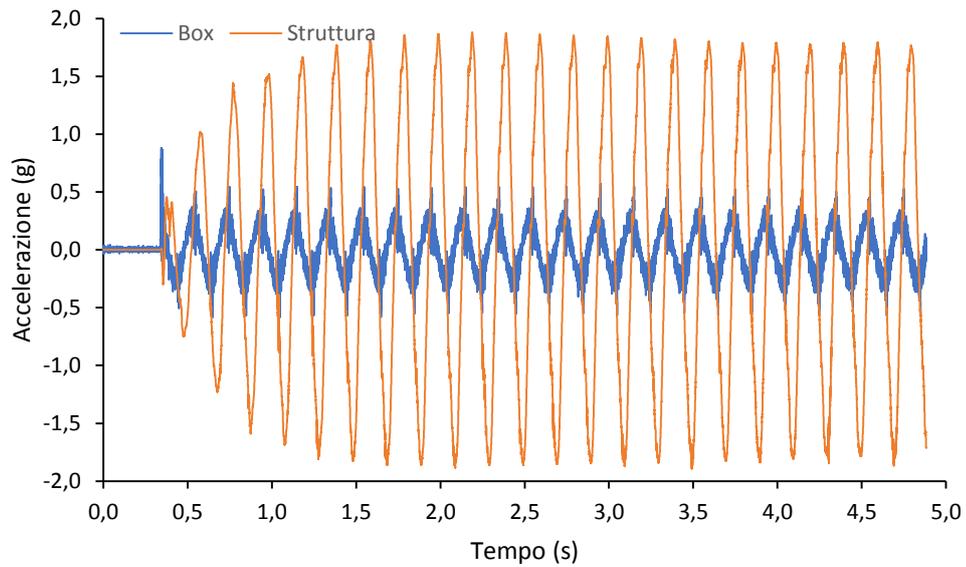


Figura 80. Segnale registrato per 20% RSM secca a 5Hz

Per questo motivo si considera una finestra temporale di 0,5 secondi nella parte finale del segnale e li si vanno a valutare le accelerazioni massime. In Figura 81 si può vedere come le accelerazioni registrate sulla struttura siano piuttosto pulite e questo permette di individuare facilmente l'accelerazione massima come media tra il valore massimo e il modulo del valore minimo.

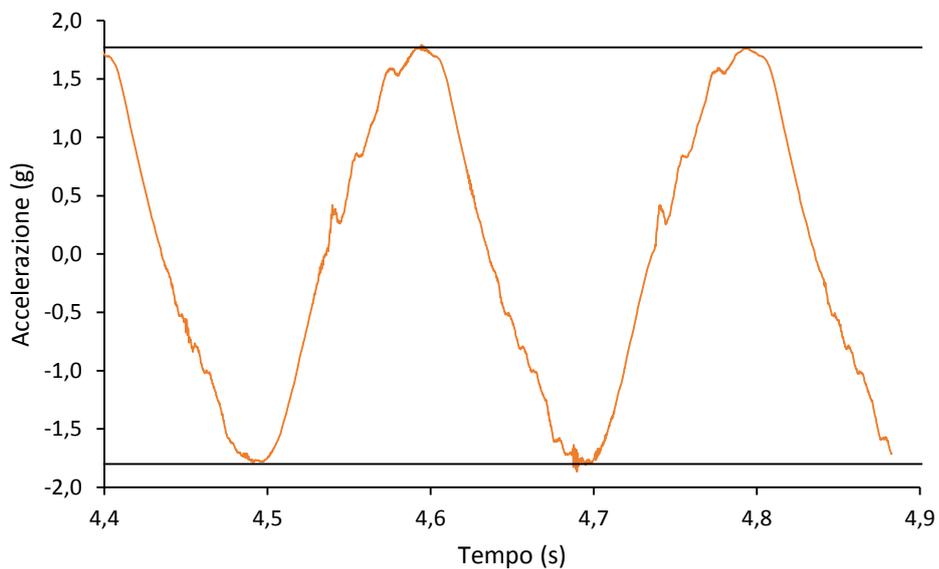


Figura 81. Accelerazione massima del box 5Hz

Il segnale registrato dagli accelerometri sul box invece, viene disturbato dai rumori di fondo specialmente nelle basse frequenze. Per individuare le accelerazioni massime si

individua la sinusoidale che meglio rappresenta il segnale. A tal proposito si fa riferimento alle equazioni dell'oscillatore semplice.

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi) \quad (34)$$

Nota la pulsazione (frequenza imposta dall'attuatore), facendo variare il parametro A (ampiezza dell'oscillazione) e φ (fase) è possibile creare una sovrapposizione tra il segnale registrato e il segnale teorico. Va osservato che questa equazione suppone che le oscillazioni avvengano attorno all'asse 0; in realtà in alcune misurazioni è stata riscontrata una piccola traslazione del segnale, in questi casi, si è ricorso anche alla traslazione del segnale ideale.

In Figura 82 viene riportato un esempio della metodologia applicata per analizzare i dati registrati. Nella stessa viene riportato anche il segnale imposto dall'attuatore che, come si può vedere, è diverso da quello registrato. Seppur il box è considerato rigidamente connesso con la tavola vibrante, questo è stato montato in un secondo momento in laboratorio; l'assunzione risulta essere troppo forte e questo spiega i diversi segnali e giustifica l'utilizzo di un secondo accelerometro (quello sul box di legno).

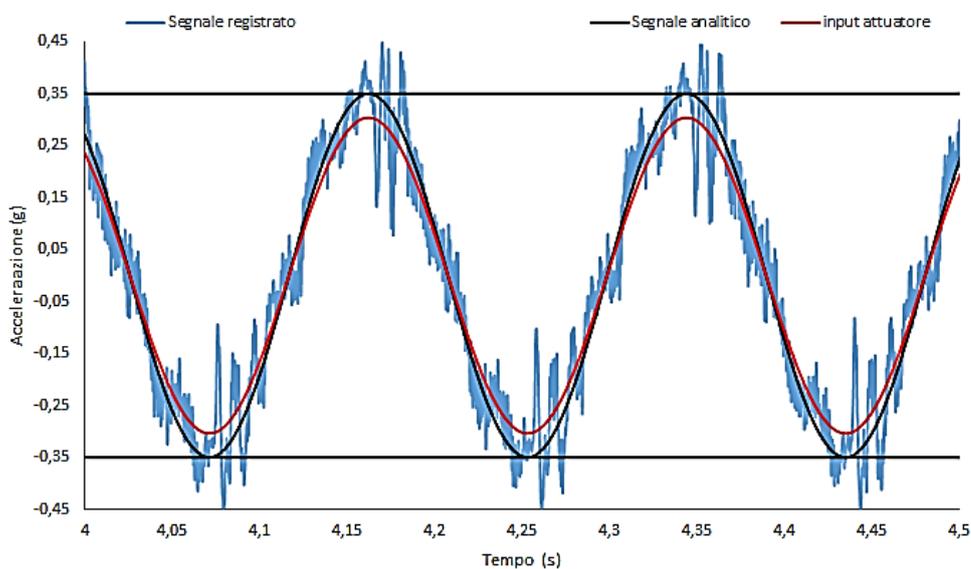


Figura 82. Accelerazione massima del box confrontata con il segnale imposto dall'attuatore e il segnale teorico che riproduce quello registrato

Sulla base di questa procedura si sono valutate le accelerazioni del box e della struttura per ogni valore di frequenza e per tutte le miscele. Come già detto, vengono prima

applicate frequenze di oscillazioni crescenti, una volta arrivati a 10 Hz si sono imposte oscillazioni a frequenze via via decrescenti fino a tornare al valore di 2 Hz. La Tabella 8 riassume tutti i dati valutati per la miscela 20% RSM secca. Seguendo le lettere è possibile individuare la logica seguita nel test (sequenza) individuando così l'ordine temporale delle prove.

Tabella 8. Riassuntive dei valori di accelerazione e amplificazione calcolati alla frequenza di 5 Hz per 20% RSM secca

20%RSM secca				
Sequenza del test	Frequenza [Hz]	Accelerazione box [g]	Accelerazione struttura [g]	Amplificazione [-]
a	2	0,04	0,04	1,00
b	3	0,1	0,12	1,20
c	4	0,2	0,31	1,55
d	5	0,3	1,35	4,50
e	6	0,41	1,43	3,49
f	7	0,55	1,2	2,18
g	8	0,8	1,32	1,65
h	9	1	1,36	1,36
i	10	1,2	1,39	1,16
j	10	1,2	1,39	1,16
k	9	1	1,36	1,36
l	8	0,8	1,34	1,68
m	7	0,55	1,18	2,15
n	6	0,41	1,39	3,39
t	5,5	0,38	1,54	4,05
u	5,25	0,35	1,61	4,60
o	5	0,3	1,79	5,97
v	4,75	0,28	1,57	5,61
s	4,5	0,25	0,88	3,52
p	4	0,2	0,45	2,25
q	3	0,1	0,14	1,40
r	2	0,055	0,04	0,73

In ALLEGATO B è possibile trovare le tabelle riepilogative dei valori calcolati per ogni miscela analizzata nel presente studio.

4.2.1. COMPARAZIONE UP E DOWN

Si riportno come esempio anche le curve relative alla Tabella 8. Dalla Figura 83 è possibile vedere come la parte destra delle due curve combaci perfettamente, questo

significa che, le condizioni litostatiche del materiale, a seguito dell'oscillazione della struttura durante la fase di up (specialmente durante l'oscillazione di risonanza), sono stabili. La variazione dello stato di addensamento e i parametri di resistenza e defomrabilità connessi ad esso sono sostanzialmente gli stessi.

Dalla Figura 83 è possibile notare come la curva di down raggiunga valori di amplificazione più alti e, sebbene in questo caso particolare sia poco apprezzabile, le curve down tendono a spostarsi verso sinistra.

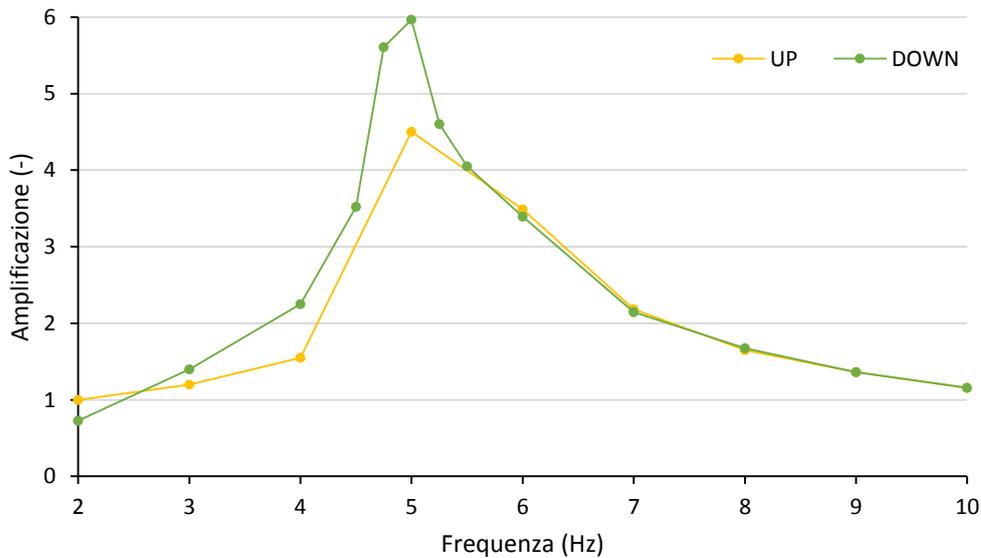


Figura 83. Confronto delle funzioni di amplificazione prima e dopo la compattazione

Si può immaginare che durante l'ascesa delle frequenze applicate (fase di up), il sistema si compatti e la minore amplificazione è dovuta al fatto che gran parte dell'energia venga utilizzata per la riorganizzazione particellare oltre allo smorzamento tipico della gomma. A seguito di questo processo l'indice dei vuoti diminuisce e quindi aumenta la rigidità secondo la Eq. 35:

Modulo di taglio per materiali a grana grossa

$$\frac{G_0}{p_a} = n_G \left(\frac{p'}{p_a} \right)^n F(e) \quad (35)$$

Dove $F(e)$ è valutato attraverso la Eq. 36:

Hardin e Richard

$$F(e) = \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \quad (36)$$

A una maggiore rigidezza del materiale corrisponde una maggiore amplificazione inoltre, a questo effetto si deve associare anche l'effetto che il cedimento, indotto dall'energia di oscillazione, produce sull'altezza della struttura. Se il modello viene schematizzato come un pendolo inverso la rigidezza dello stesso può essere calcolata come:

$$K = \frac{3I}{h^3} \quad (37)$$

Quindi, al verificarsi del cedimento si verifica un aumento di h e quindi una diminuzione della rigidezza K . Questo implica uno spostamento della curva su frequenze minori secondo la legge:

$$f = 2\pi \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (38)$$

Questo spiega come, a seguito di una compattazione che produrrebbe un aumento di rigidezza e quindi una traslazione verso frequenze maggiori, si manifesti invece una traslazione verso frequenze minori.

Il processo di compattazione risulta più significativo nelle miscele umide grazie appunto alla presenza di acqua questo però, ha valore fino a contenuti di gomma inferiori al 20% dopodiché, il grande contenuto di gomma rende influente la presenza di acqua nella miscela poiché la gomma deformandosi va ad occupare i vuoti riducendo quindi la possibilità di compattazione.

4.2.2. COMPARAZIONE MISCELA SECCA E UMIDA

In figura 84 si nota come la presenza di acqua influisca, seppur sia presente in piccole quantità, sull'amplificazione del sistema. A parità di contenuto di gomma, si registra un'amplificazione maggiore nelle miscele umide rispetto a quelle secche. Per spiegare questo comportamento si può far riferimento agli involucri di rottura dei terreni insaturi. È possibile scrivere l'equazione del criterio di rottura di Mohr-Coulomb generalizzato secondo la seguente equazione 39:

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)\tan\Phi' + (u_a - u_w)\tan\Phi^b \quad (39)$$

dove c' è l'intercetta dell'involuppo di rottura sull'asse delle ordinate, $(\sigma_f - u_a)$ è la tensione netta, u_a è la pressione dell'aria nei vuoti interstiziali alla rottura, ϕ' è l'angolo d'attrito associato alla tensione normale, $(\sigma_f - u_a)$, $(u_a - u_w)$ è la differenza tra la pressione dell'aria e dell'acqua nei vuoti interstiziali, ϕ^b indica la variazione dell'angolo d'attrito con riferimento a $(u_a - u_w)$.

Facendo riferimento a questa equazione 39, si nota come al variare del contenuto d'acqua, e quindi della pressione interstiziale dovuta alla stessa, l'involuppo di rottura si modifica. In particolare, all'interno dei grani si manifesta un fenomeno della suzione varia i parametri di resistenza a taglio e coesione [29]. Immaginando un grado maggiore di coesione, si può dire che il sistema risulti più rigido e quindi produrrà una maggiore amplificazione. In realtà quanto riportato in letteratura si riferisce, ovviamente, a terreni puri, in queste sperimentazioni, invece, sono stati utilizzati due materiali quindi, quanto detto risulta essere semplicemente un'ipotesi visto che ad oggi non è mai stata indagato il comportamento della gomma sotto questo punto di vista. In ALLEGATO D, vengono riportati tutti i confronti tra miscele umide e secche.

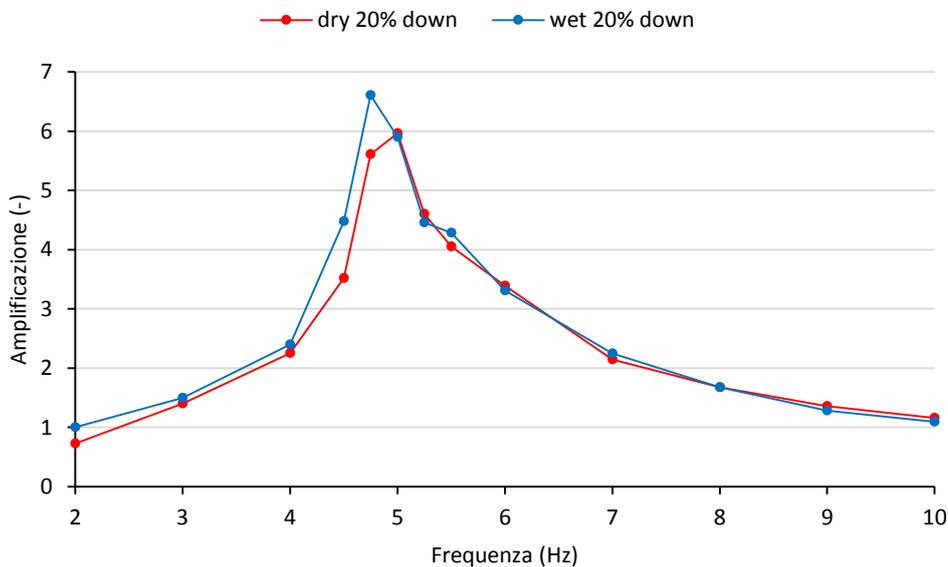


Figura 84. Confronto delle funzioni di amplificazione per 20% RSM con e senza acqua

Di seguito si riportano le curve di amplificazione per tutte le miscele. Come già detto si fa riferimento solamente alle curve in down poiché, solamente quest'ultime hanno valore nel confronto. Dalla Figura 85 e Figura 86 si nota come all'aumentare del

contenuto di gomma, indipendentemente che si parli di miscele asciutte o umide, le curve tendono ad assumere valori più bassi (l'amplificazione è minore), effetto dell'elevato smorzamento intrinseco dalla gomma. Inoltre, si nota come le curve tendono a spostarsi verso frequenze minori; questo avviene a causa della maggior deformabilità che la gomma regala al sistema. In definitiva, la gomma deformandosi tende a smorzare le sollecitazioni abbassando i picchi di amplificazione; d'altro canto, la miscela, all'aumentare del contenuto di gomma, il materiale diventa più deformabile e si sposta verso frequenze minori, tipiche di terreni meno rigidi. In Figura 87 si vede l'andamento dell'amplificazione massima subita dalla struttura in funzione del contenuto di gomma sia per miscele asciutte che per miscele umide. Si nota che, indipendentemente dalla presenza di acqua, si ha un decremento dell'amplificazione. Sebbene nella prima parte (RSM<10%) le pendenze delle due curve siano significativamente differenti per contenuti di gomma maggiori si può dire che le curve siano approssimativamente parallele. Al crescere del contenuto di gomma questa diventa sempre più influente sul comportamento minimizzando tutti gli altri effetti.

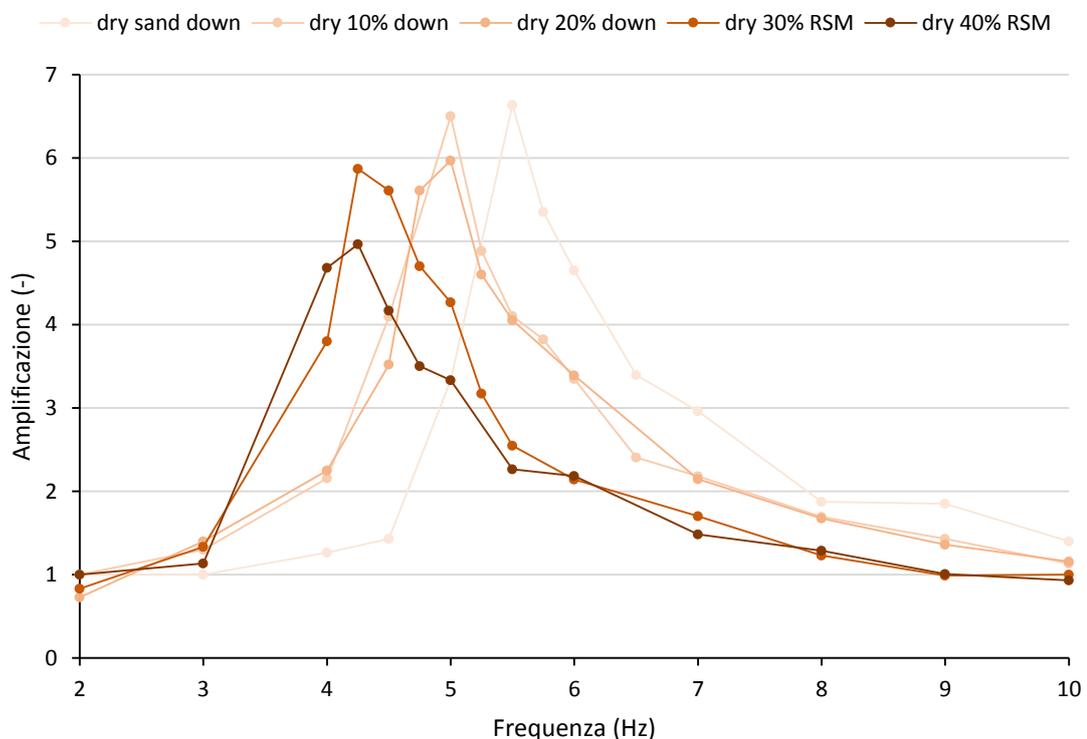


Figura 85. Variazione della funzione di amplificazione per miscele RSM secche al variare del contenuto di gomma

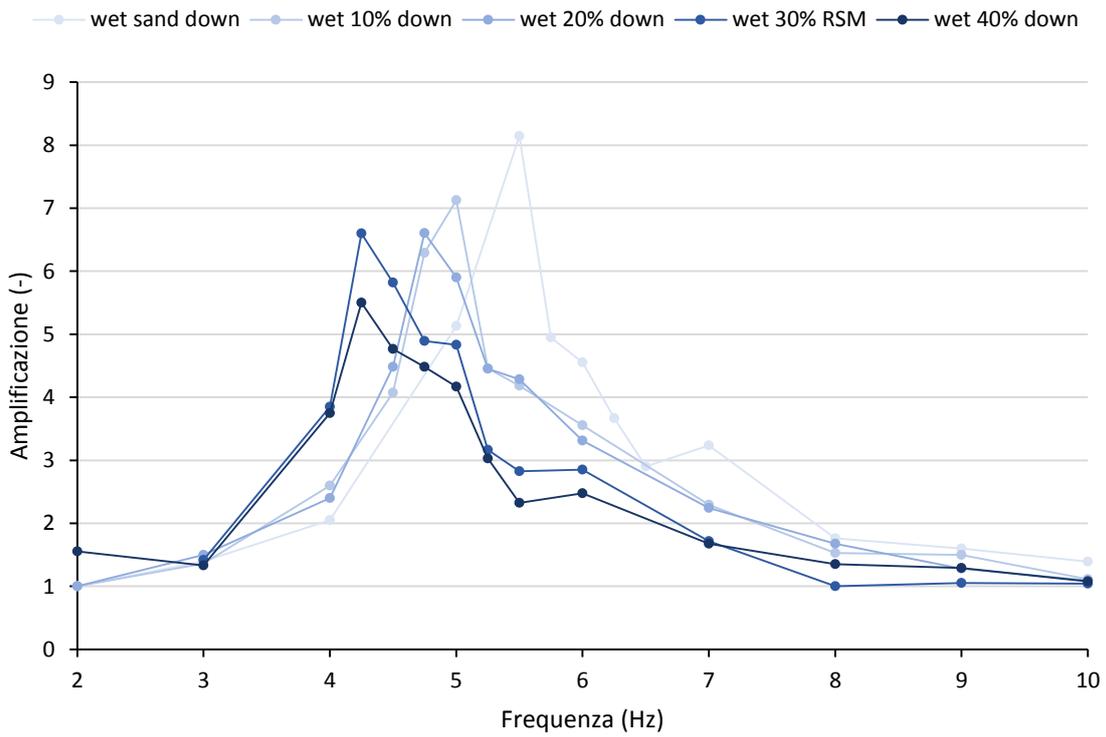


Figura 86. Variazione della funzione di amplificazione per miscele RSM umide al variare del contenuto di gomma

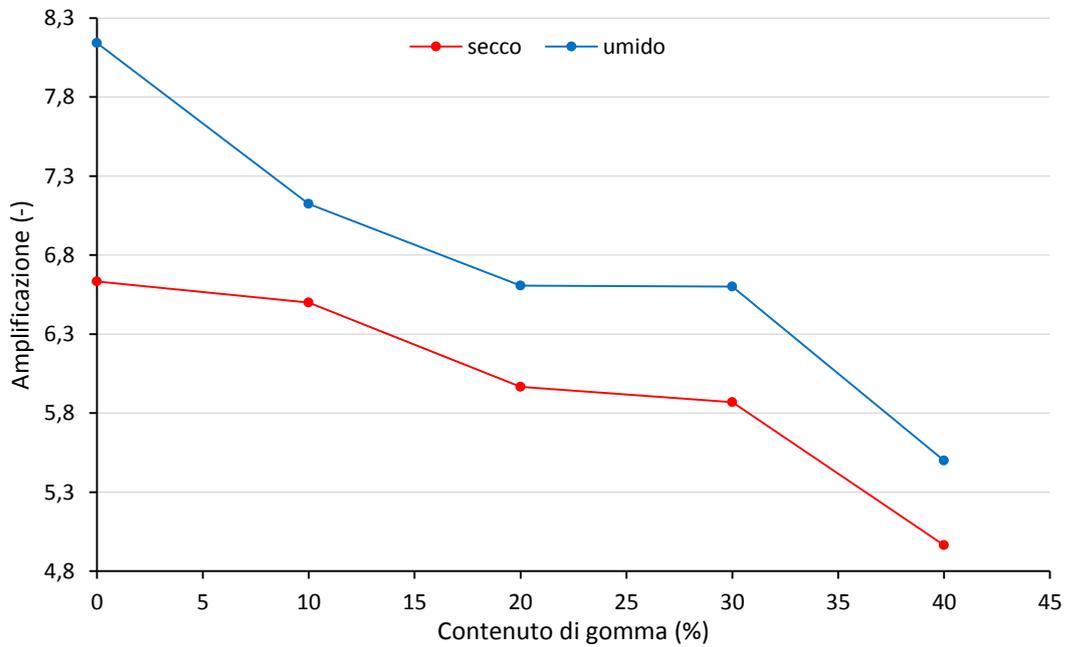


Figura 87. Andamento dell'amplificazione massima in funzione del contenuto di gomma

4.3. SMORZAMENTO

4.3.1. CENNI TEORICI

Sperimentalmente, lo smorzamento può essere stimato con vari metodi, incluso il metodo “half bandwidth”; questo presenta il vantaggio della semplicità nell'applicazione. Questo metodo è stato ampiamente utilizzato per oscillatori ad un grado di libertà Single Degree of Freedom (SDOF) e strutture con più gradi di libertà Multi Degree Of Freedom (MDOF) con smorzamento viscoso lineare. L'utilizzo di questa formulazione ha valore solo nella misura in cui una struttura può essere modellata da un sistema SDOF o da una serie di sistemi SDOF disaccoppiati. Tuttavia, l'uso del metodo half bandwidth è stato esteso alle strutture MDOF sulla base del presupposto che ciascun picco nella funzione di risposta viene influenzato solo dal modo di vibrare considerato; inoltre grazie alla semplicità, con buona approssimazione può essere utilizzato anche in applicazioni geotecniche. D'altra parte, il metodo è messo in discussione nei casi di strutture MDOF con diversi modi di vibrare che hanno frequenze naturali simili poiché potrebbe produrre accoppiamenti nei modi di vibrare. Una struttura SDOF eccitata da una forza armonica produce una funzione di trasferimento descritta come:

$$X(w) = \frac{1}{1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2 + 2\xi\left(\frac{w}{w_n}\right)i} \quad (40)$$

Dove, w_n è la frequenza naturale del sistema, w è la frequenza della sollecitazione e $X(w)$ è l'ampiezza della funzione di trasferimento e $i = \sqrt{-1}$. Dall'equazione 40, il valore massimo della funzione di trasferimento, ossia il valore della funzione di trasferimento alla frequenza di risonanza ($X_r(w)$), è calcolato come:

$$X_r(w) = \frac{1}{2\xi} \sqrt{1 - \xi^2} \quad (41)$$

Per piccoli valori di ξ , $W_r \cong W_n$ cioè $\frac{w}{w_n} \cong 1$

In altre parole, quando consideriamo piccoli valori del rapporto di smorzamento, la frequenza naturale W_n e la frequenza di risonanza W_r possono essere considerate

uguali. Pertanto, dall'equazione 40 si ottiene che la funzione di trasferimento alla frequenza naturale $X_n(\omega) = \frac{1}{2\xi}$ che riflette un'espressione simile alla funzione di trasferimento calcolata alla frequenza di risonanza (equazione 41). Tuttavia, anche quando il valore di ξ è molto vicino a uno, il valore di $X_n(\omega)$ e $X_r(\omega)$ non sono esattamente gli stessi. Di conseguenza, per calcolare ξ vengono considerate due frequenze ω_1 e ω_2 . I due punti di frequenza sono comunemente indicati come punti di frequenza a metà potenza e la banda compresa tra loro è nota come banda a metà potenza.

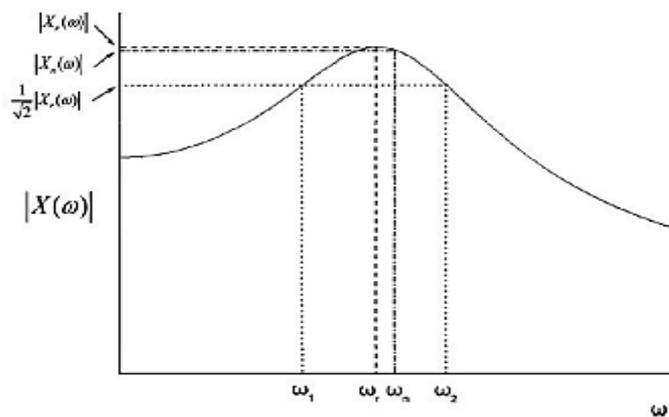


Figura 88. Esempio di funzione di amplificazione per il calcolo dello smorzamento

Ponendo $X(\omega_1) = X(\omega_2)$ e sostituendo $X_n(\omega)$ con $X_r(\omega)$.

l'equazione 40 diventa:

$$\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^4 - 2(1 - 2\xi^2) \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + (1 - 8\xi^2) = 0 \quad (42)$$

La soluzione di questa equazione porta a determinare il valore dello smorzamento ξ

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (43)$$

In definitiva, a partire dal valore massimo di amplificazione che da ora in poi chiameremo A_{max} si considera il valore $A_{max}/\sqrt{2}$ e a questo corrisponde una banda di frequenze. Visto che i terreni sono notoriamente non lineari si otterrà, come possibile vedere in seguito, una risposta irregolare e non simmetrica nel dominio delle frequenze [30]. Utilizzando il metodo half bandwidth si sta facendo riferimento all'oscillatore

semplice (rigidezza costante) cosa che come già detto non accade nei terreni, inoltre il metodo si basa sull'ipotesi di piccole dissipazioni il che non è sempre garantito nei terreni. Quindi, la stima dello smorzamento utilizzando questo metodo potrebbe essere poco accurata ma risulta comunque interessante ai fini dello studio. In figura 89 si riporta l'andamento dello smorzamento in funzione del contenuto di gomma. Con riferimento a questa campagna prove, a un contenuto di gomma del 40% corrisponde, indicativamente, un aumento dello smorzamento dell'8% rispetto quello ottenuto dalla valutazione della sola sabbia. Inoltre, si osserva come lo smorzamento delle miscele umide sia costantemente inferiore rispetto allo smorzamento di miscele secche. Questo può essere spiegato con l'aumento di coesione fornito dall'acqua che, irrigidendo il sistema, non permette la deformazione e quindi la dissipazione. In realtà, si può osservare come per elevati contenuti di gomma, queste differenze si assottigliano sempre più; questo perché il comportamento della gomma prevale sul resto.

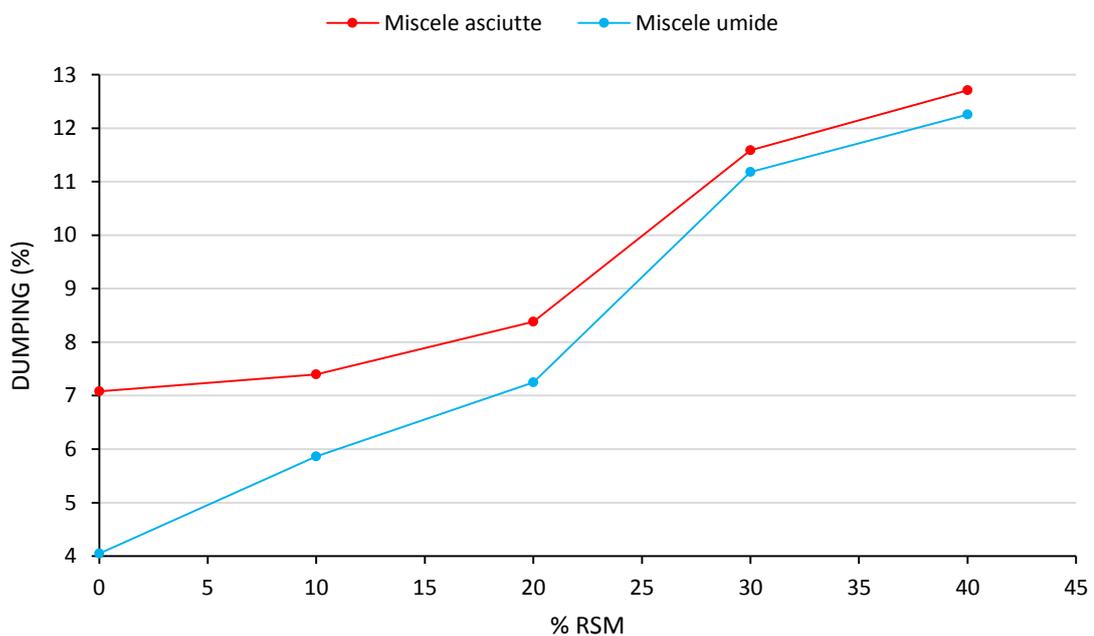


Figura 89. Valore dello smorzamento in funzione del contenuto di gomma

5. CONCLUSIONI

Con il presente lavoro si è valutata in maniera qualitativa l'applicabilità delle miscele RSM come isolamento sismico. L'obiettivo è quello di utilizzare questo materiale come condizione al contorno rendendo questa tecnologia ancor più fruibile e versatile. La vera potenzialità del modello utilizzato sta nel lasciar invariato il terreno sottostante la struttura e cambiare il materiale circostante, in questo modo, oltre a beneficiare delle proprietà del materiale, se ne limitano gli svantaggi. Dallo studio emerghe che:

- L'amplificazione viene ridotta del 30% al picco; sebbene i risultati ottenuti per frequenze maggiori di 5 Hz siano soddisfacenti, per frequenze minori si prevedevano deamplificazioni maggiori. Questo perché la gomma manifesta le sue proprietà per PGA superiori a 0.20 che, per configurazione della prova e limitazioni dell'apparecchiatura, non è stato possibile assegnare.
- Il dumping aumenta all'umentare del contenuto di gomma; per $\chi = 40\%$ lo smorzamento della miscela RSM aumenta del 10% rispetto alla sola sabbia. Seppur la presenza di acqua risulta influente, già contenuti di gomma del 10% annichiscono questo effetto. Il dumping delle miscele asciutte rimane comunque superiore dello smorzamento delle miscele contenenti acqua.
- Nello studio emerge che la risonanza della struttura trasla verso frequenze più basse. L'introduzione della gomma riduce fortemente la rigidità della miscela e quindi ne aumenta il periodo. Questo significa, nell'ottica di una possibile applicazione, che è possibile utilizzare accelerazioni di progetto significativamente inferiori.
- Le miscele RSM, come i terreni granulari, hanno proprietà strettamente correlate con la densità; parametro che non è stato possibile valutare in maniera analitica nella sperimentazione.

Questa tecnologia, oltre che essere molto economica, ha diversi benefici dal punto di vista ingegneristico quindi, vale la pena continuare ad indagare per rendere semplice la sua progettazione.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] B. J. Eslami, Impiego di smorzatori sismici nella protezione di beni architettonici, Pavia, 2016.
- [2] C. Comartin, S. Brzev, F. Naeim, M. Greene, M. Blondet, S. Cherry, D. D'Ayala, M. Farsi, S. Jain, J. Pantelic, L. Samant, «A Challenge to Earthquake Engineering Professionals» Earthquake Spectra, vol. 20, n°.4, 2004.
- [3] A. Cirasole, Studio finalizzato alla caratterizzazione meccanica in situ di conglomerati cementizi additivati con PFU (pneumatici fuori uso), Bologna, 2012.
- [4] ETREMA. Available: <http://www.etrma.org/>
- [5] H. S. Liu, J. L. Mead, R. G. Stacer, «Environmental Effects of Recycled Rubber in Light-Fill Applications» American Chemical Society, 2000.
- [6] E. Patechi, Isolamento sismico del contenuto: il sistema rolling-ball rubber-layer, 2014.
- [7] S. Della Torre, Protezione del rischio sismico, 2014.
- [8] G. Farina, Analisi parametrica della risposta di isolatori sismici a scorrimento (Friction Pendulum), 2014.
- [9] D. Coronetta, Applicazioni dell'isolamento sismico ad un edificio in muratura, Aquila, 2011.
- [10] S. F. M. Walter, Dispositivi strutturali antisismici, Pisa: Università di Pisa, 2014.
- [11] E. Alpoggio, Analisi del funzionamento di dispositivi di isolamento sismico e applicazione e applicazione progettuale di un edificio in cemento armato. Confronto con la soluzione a base fissa, 2015.
- [12] C. Comartin, S. Brzev, F. Naeim, M. Greene, M. Blondet, S. Cherry, D. D'Ayala, M. Farsi, S. Jain, J. Pantelic, L. Samant, «A challenge to earthquake engineering Professionals» Earthquake Spectra, 2004.
- [13] H. H. Tsang, «Geotechnical Seismic Isolation», 2007.
- [14] M. Yegian, A. Lahlaf, «Dynamic Interface Shear Strength Properties of Geomembranes and Geotextiles» Journal of Geotechnical Engineering, 1992.
- [15] H. H. Tsang, «Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries» Earthquake engineering and structural dynamics, 2007.

- [16] T. Zhang, G. Cai, W. Duan, «Strenght amd microstructure characteristics of the recycled rubber tire-sand mixtures as lightweight backfill» *Enviromental Science and Pollution Research*, 2018.
- [17] Z. Yi-Feng, K. G.Sutter, «Dynamic Properties of Granulated Rubber/Sand Mixtures» *Geotechnical Testing Journal*, 2000.
- [18] A. Anastasiadis, K. Senetakis e K. Pitilakis, «Small-Strain Shear Modulud and Damping Ratio of Sand-Rubber and Gravel-Rubber Mixtures» *Geotech Geol Eng*, 2011.
- [19] J. Fonseca, A. Riaz, J. Bernal-Sanchez, A. Barreto, J. McDougall, M. Miranda-Manzanares, A. Marinelle, «Particle-scale interactions and energy dissipation mechanisms in sand-rubber mixtures» *Gèotechnique Letters*, 2019.
- [20] M. Neaz Sheikh, M. Mashiri, J. Vinod, H.-H. Tsang, «Shear and Compressibility Behavior of Sand-Tire Crumb Mixtures» *Journal of materials in civil engineering*, 2013.
- [21] T. B. Edil, P. J. Bossher, «Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures» *Geotechnical Testing Journal*, 1994.
- [22] G. J. Foose, C. H. Benson, P. J. Bossher, *Sand reinforced with shradded waste tires*, 1993.
- [23] J. Lopera Perez, C. Kwok, K. Senetakis, «Effect of rubber size on the behaviour of sand-rubber mixtures: A numerical investigation» *Computers and Geotechnics*, 2016.
- [24] J. G. Zornberg, A. R. Cabral, C. Viratjandr, «Behaviour of tire shred-sand mixtures» *NRC*, 2004.
- [25] M. F. Attom, «The use of shredded waste tires to improve the geotechnical engineering proprieties of sands» *Environ Geol*, 2005.
- [26] S. Foti, «Dispense di ingegneria sismica» 2018.
- [27] N. Shariatmadari, M. Karimpour-Fard, A. Shargh, «An Experimental Investigation of Liquefaction Resistance of Sand–Ground Rubber Mixtures» *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 2018.
- [28] K. Senetakis, A. Anastasiadis, K. Pitilakis, «Dynamic proprieties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011.
- [29] D. G. Fredlund, H. Rahardjo, M. D. Fredlund, «Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice» *John Wiley & Sons, Inc.* 2012.
- [30] A. Rivola, *Meccanica e dinamica delle macchine*, Forlì.

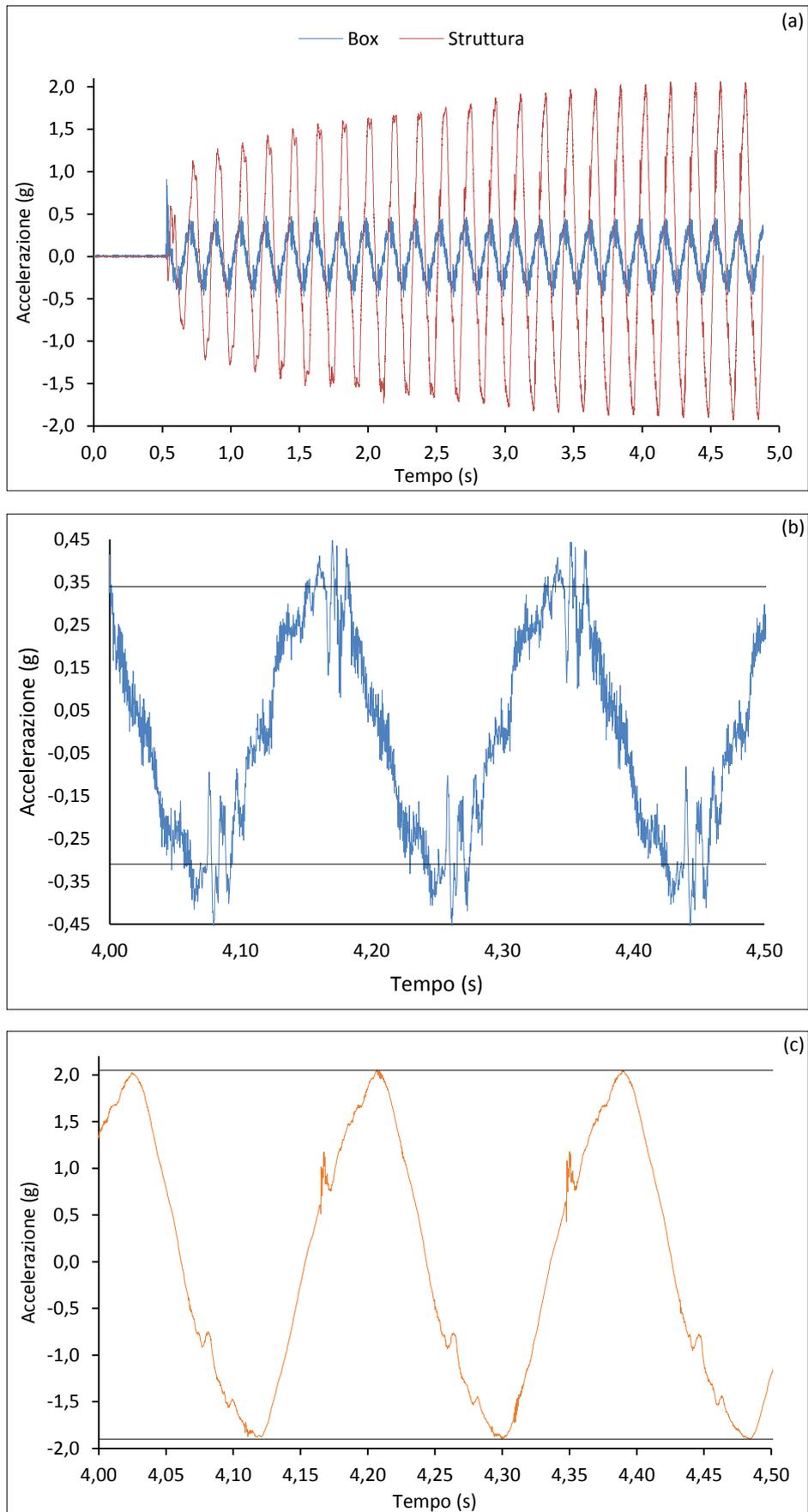


Figura 90. (a) Segnale registrato per la sabbia secca a 5,5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

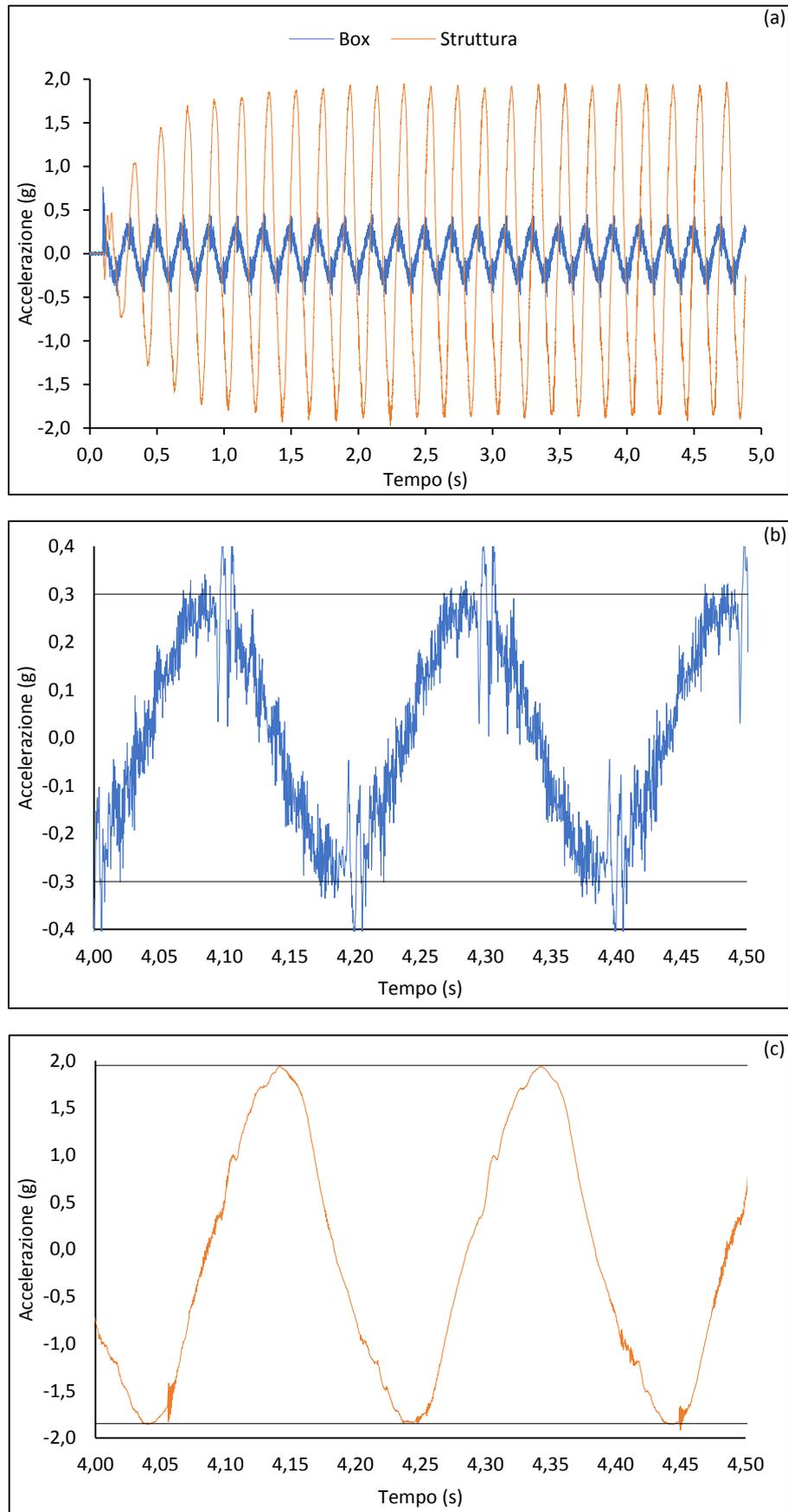


Figura 91. (a) Segnale registrato per 10% RSM secca a 5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

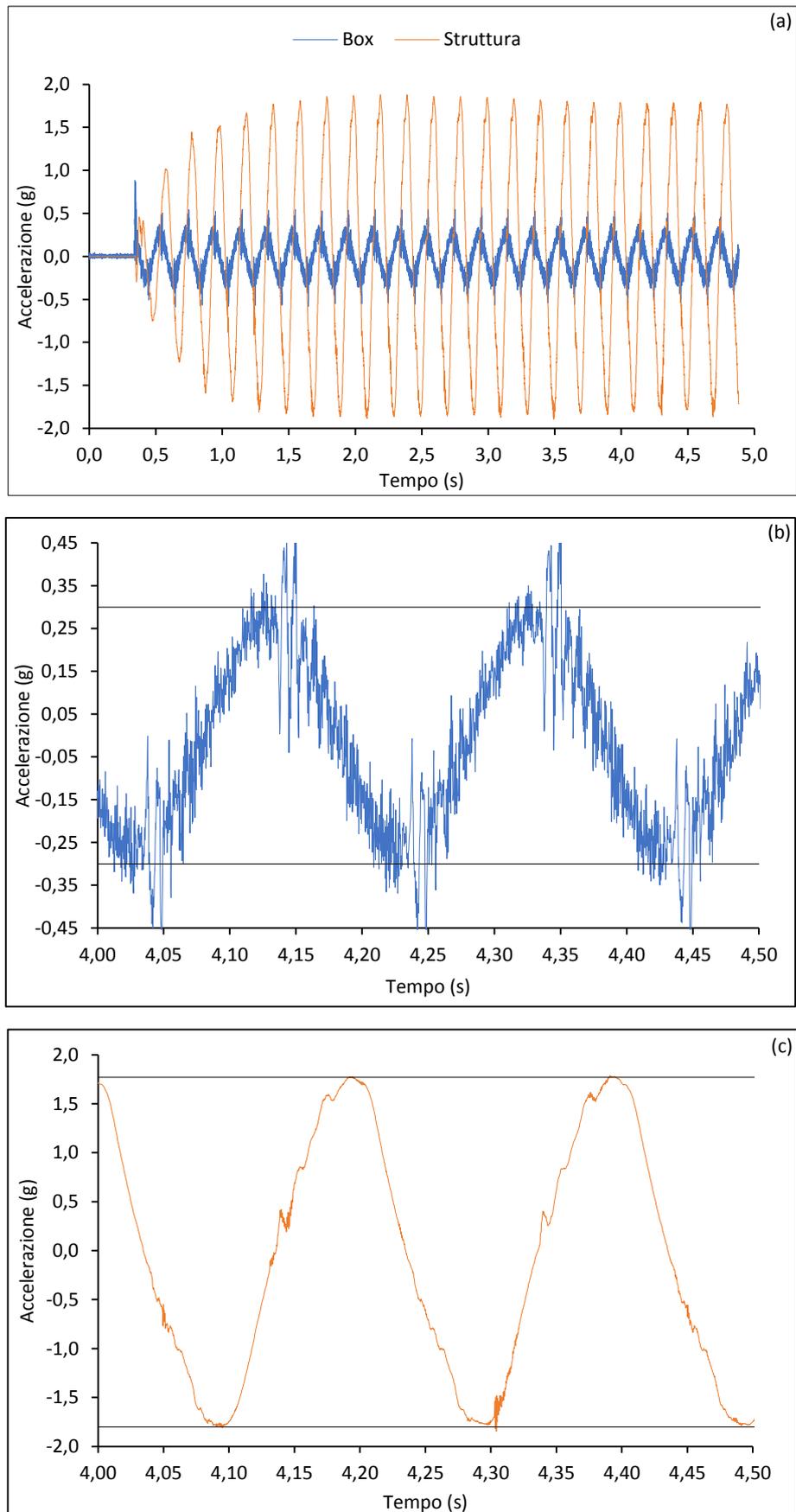


Figura 92. (a) Segnale registrato per 20% RSM secca a 5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

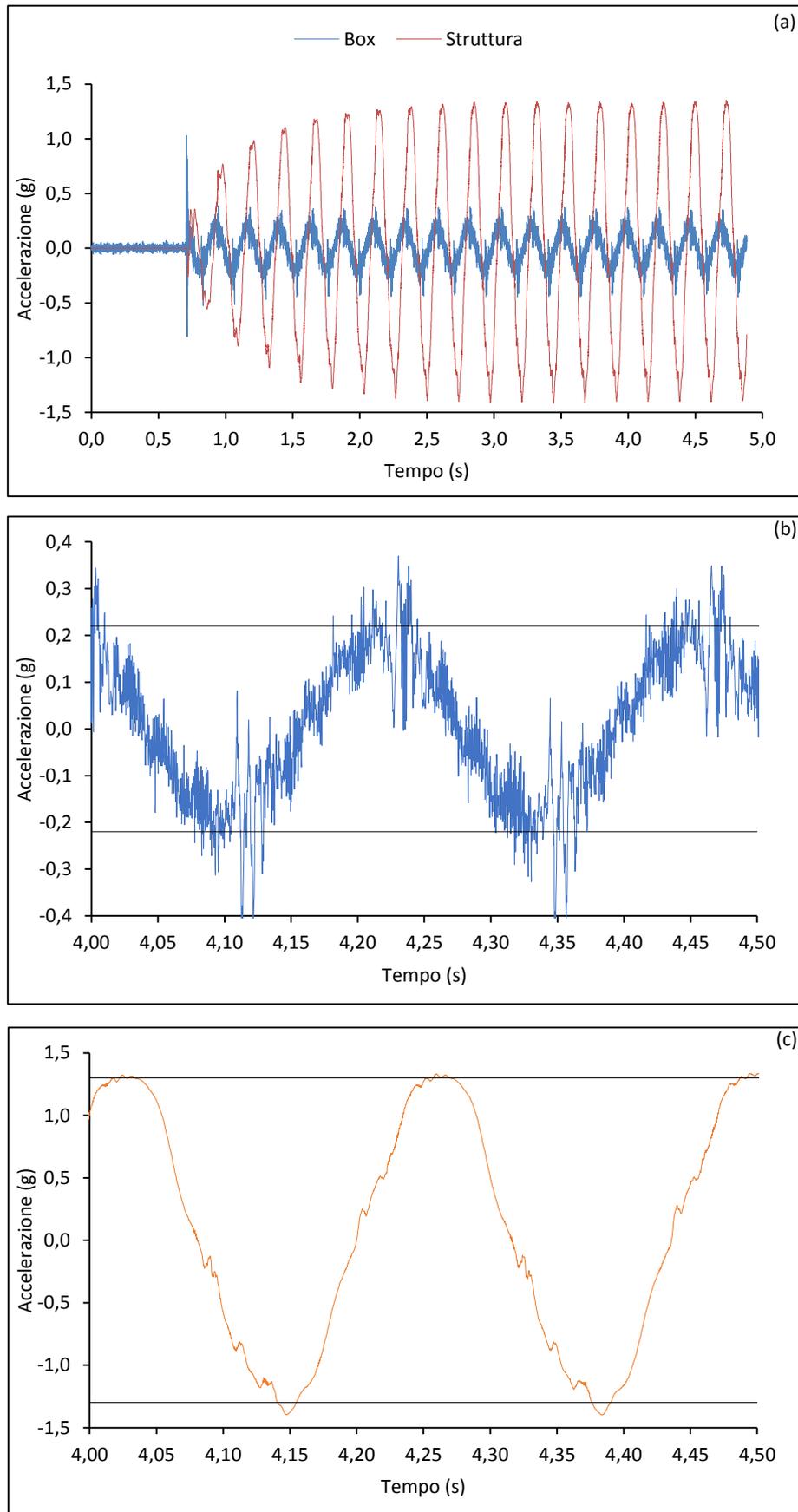


Figura 93. (a) Segnale registrato per 30% RSM secca a 4,25Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

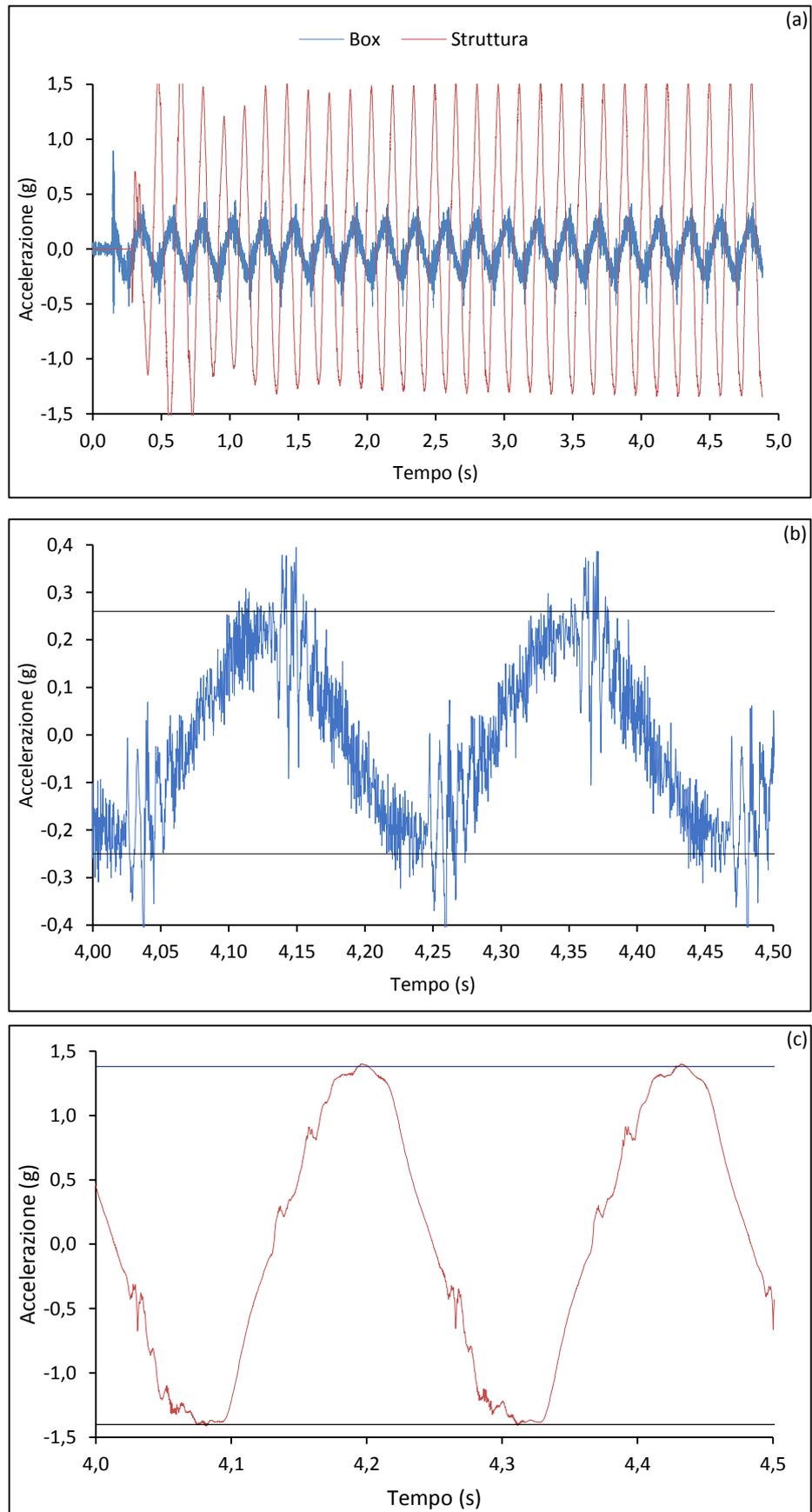


Figura 94. (a) Segnale registrato per 40% RSM secca a 4,25Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

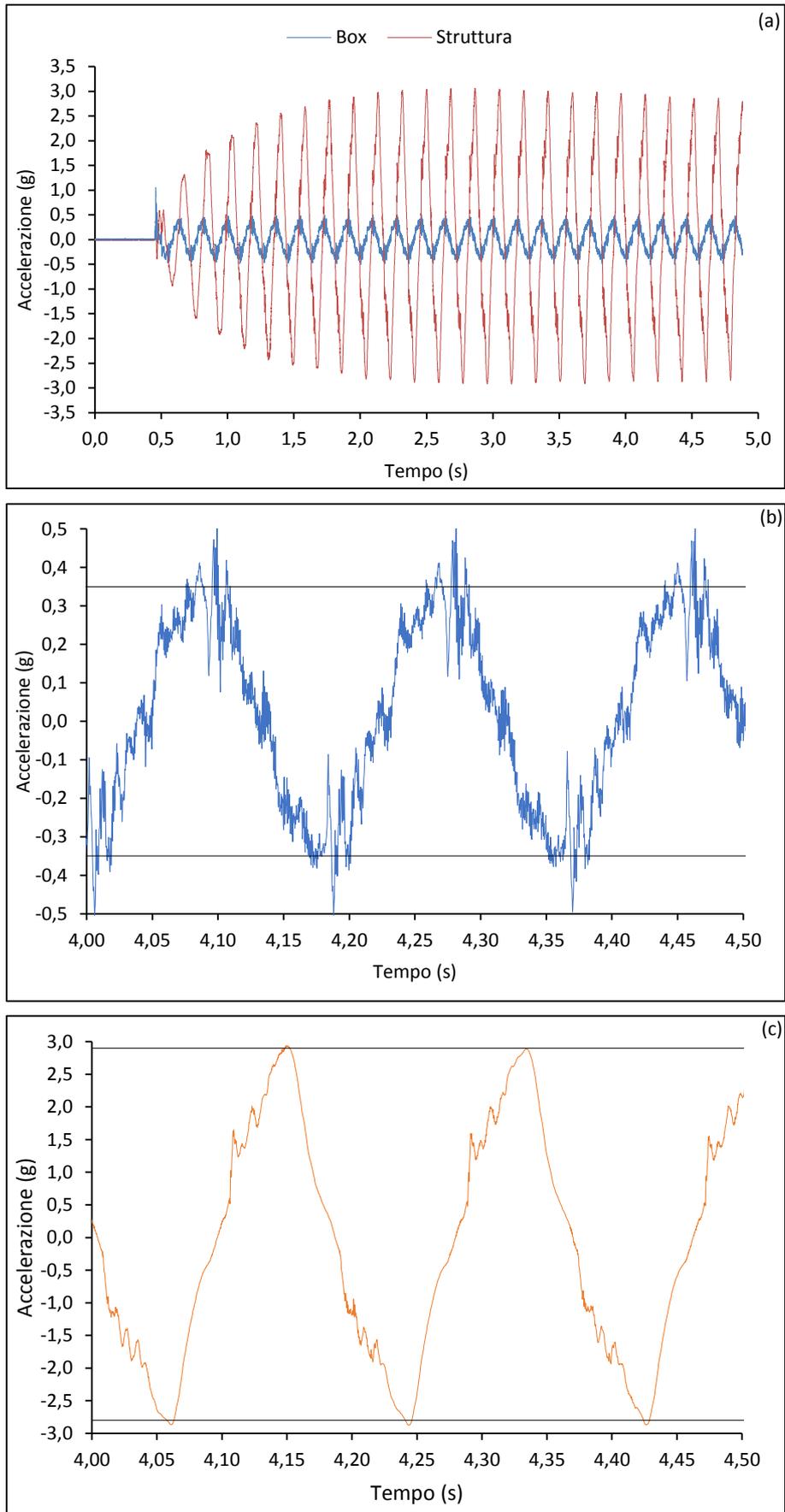


Figura 95. (a) Segnale registrato per la sabbia umida a 5,5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

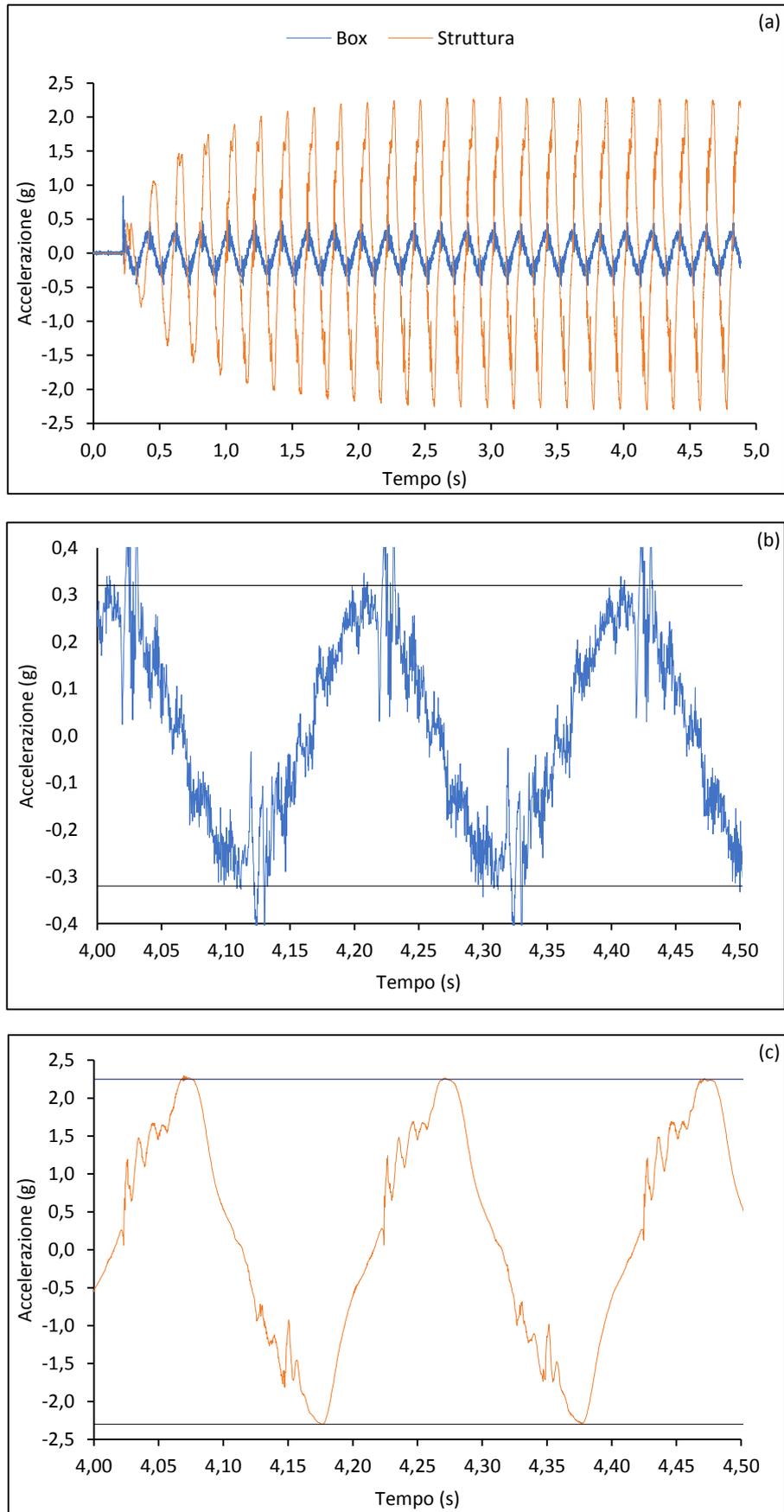


Figura 96. (a) Segnale registrato per 10% RSM umida a 5Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

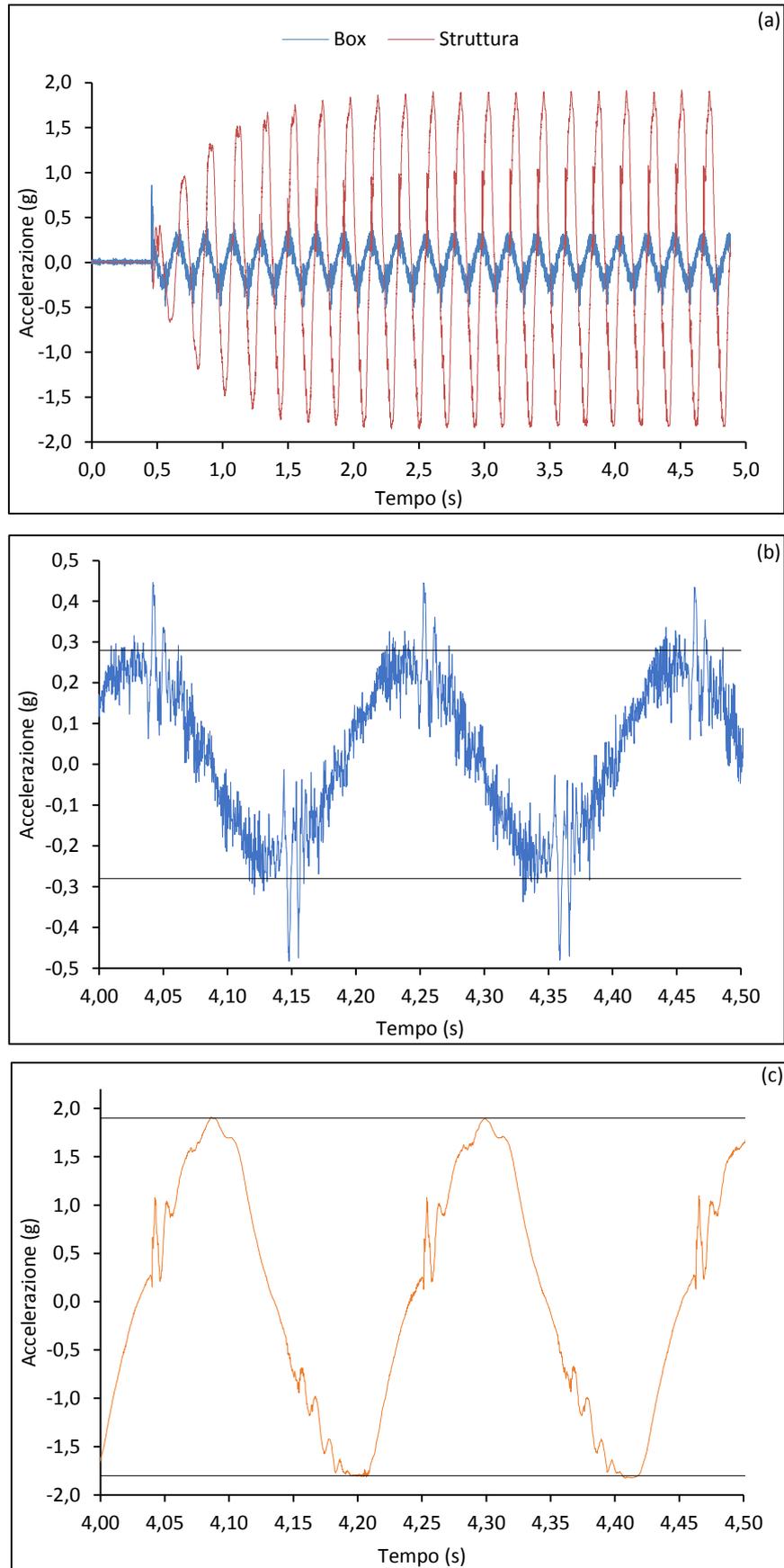


Figura 97. (a) Segnale registrato per 20% RSM umida a 4,75Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

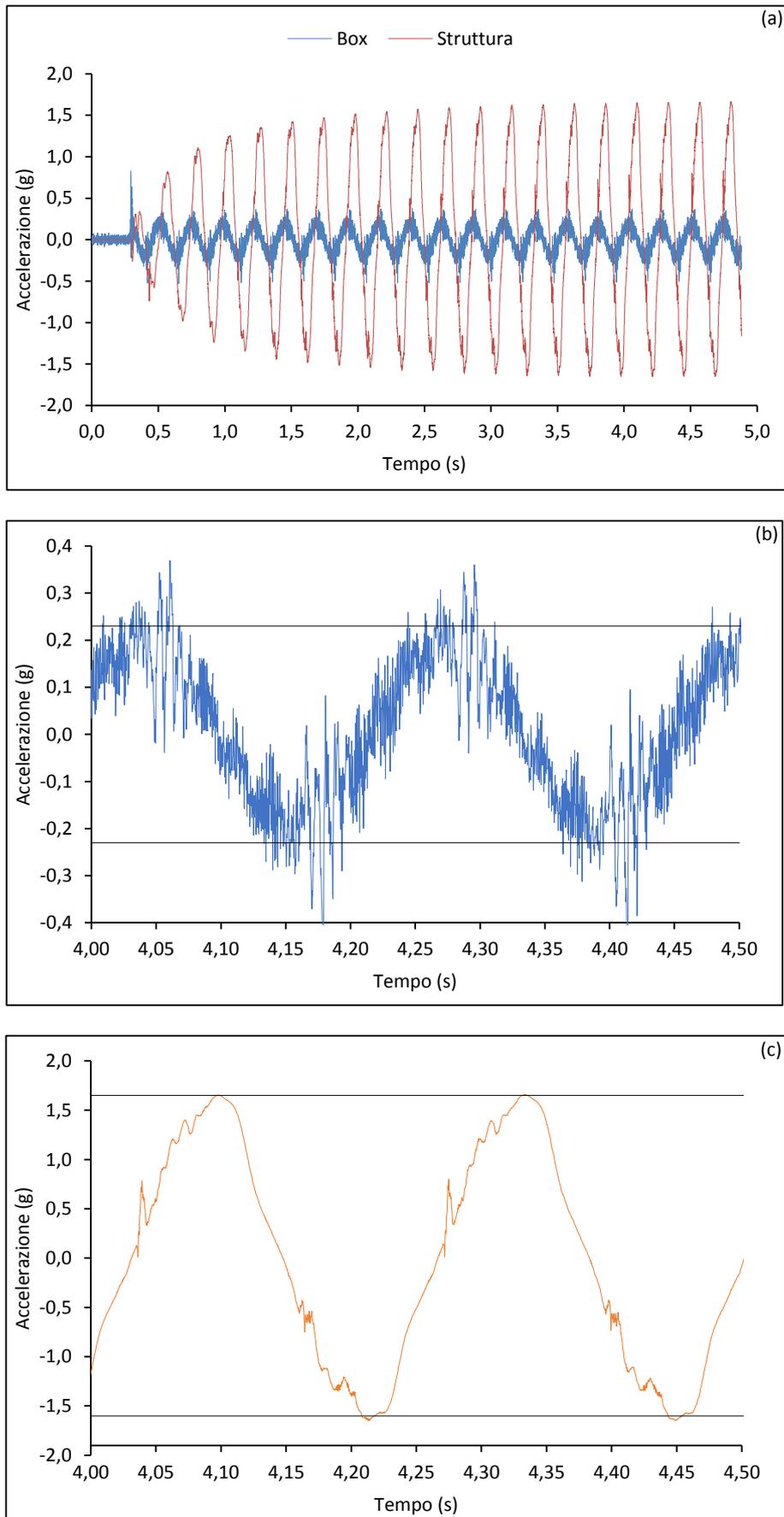


Figura 98. (a) Segnale registrato per 30% RSM umida a 4,25Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

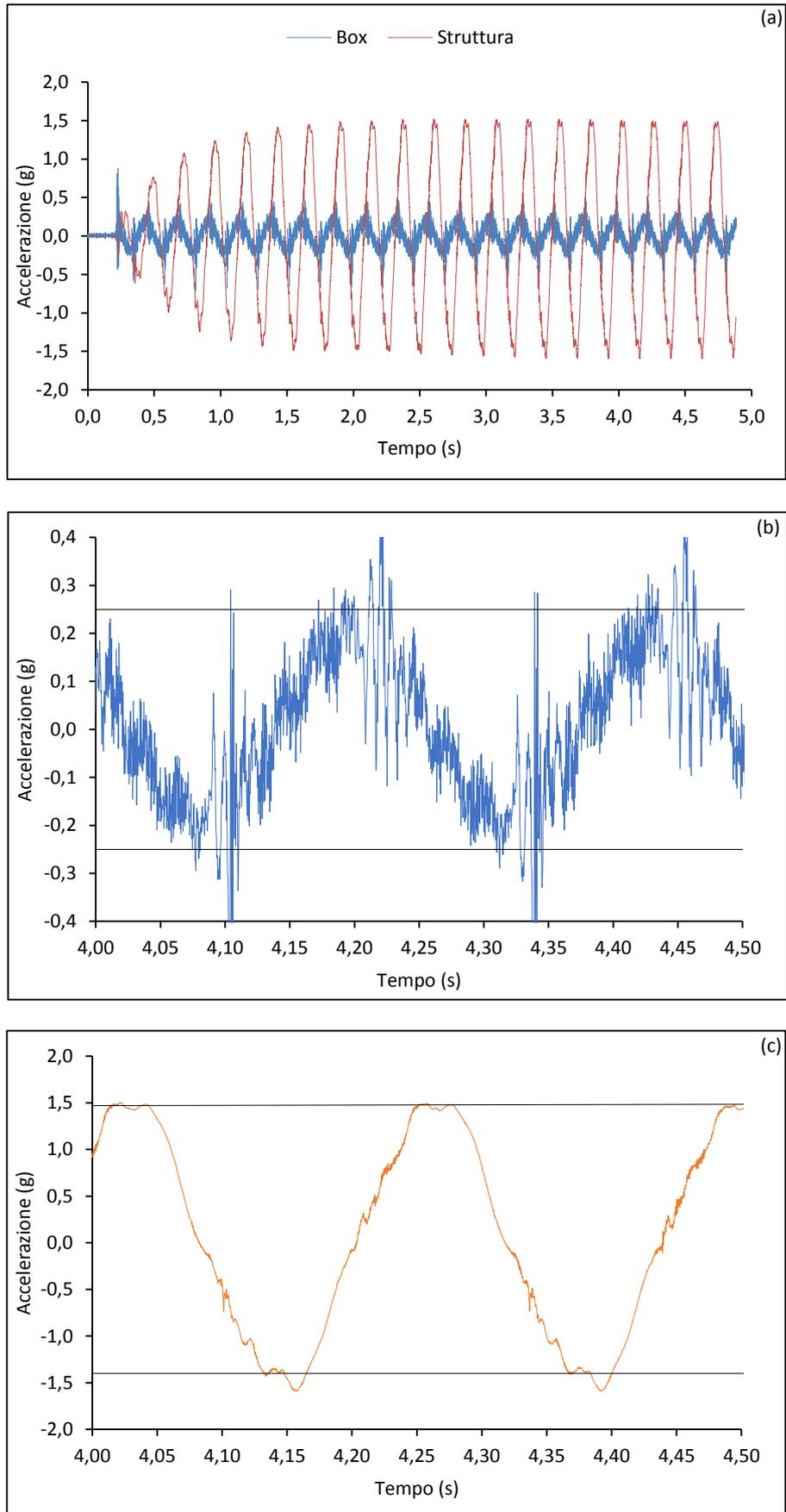


Figura 99. (a) Segnale registrato per 40% RSM umida a 4,25Hz; (b) Accelerazione massima del box; (c) Accelerazione massima della struttura

Tabella 9. Sabbia secca

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,04	0,04	1,00
b	3,00	0,10	0,10	1,00
c	4,00	0,19	0,22	1,16
d	5,00	0,30	0,60	2,00
e	6,00	0,40	2,20	5,50
f	7,00	0,55	1,53	2,78
g	8,00	0,80	1,50	1,88
h	9,00	1,00	1,80	1,80
i	10,00	1,20	1,68	1,40
j	10,00	1,20	1,68	1,40
k	9,00	1,00	1,85	1,85
l	8,00	0,80	1,50	1,88
m	7,00	0,55	1,63	2,96
u	6,50	0,48	1,63	3,40
n	6,00	0,43	2,00	4,65
v	5,75	0,37	1,98	5,35
t	5,50	0,30	1,99	6,63
o	5,00	0,30	1,00	3,33
s	4,50	0,28	0,40	1,43
p	4,00	0,19	0,24	1,26
q	3,00	0,10	0,10	1,00
r	2,00	0,04	0,04	1,00

Tabella 10. 10% RSM secca

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,04	0,04	1,00
b	3,00	0,10	0,11	1,10
c	4,00	0,19	0,28	1,47
d	5,00	0,30	1,80	6,00
e	6,00	0,43	1,37	3,19
f	7,00	0,55	1,19	2,16
g	8,00	0,75	1,24	1,65
h	9,00	0,95	1,36	1,43
i	10,00	1,20	1,37	1,14
j	10,00	1,20	1,36	1,13
k	9,00	0,95	1,36	1,43
l	8,00	0,75	1,27	1,69
m	7,00	0,55	1,20	2,18
u	6,50	0,49	1,18	2,41
n	6,00	0,43	1,44	3,35
v	5,75	0,40	1,53	3,83
t	5,50	0,39	1,60	4,10
w	5,25	0,35	1,71	4,89
o	5,00	0,30	1,95	6,50
s	4,50	0,21	0,86	4,10
p	4,00	0,19	0,41	2,16
q	3,00	0,10	0,13	1,30
r	2,00	0,04	0,04	1,00

Tabella 11. 20% RSM secca

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,04	0,04	1,00
b	3,00	0,10	0,12	1,20
c	4,00	0,20	0,31	1,55
d	5,00	0,30	1,35	4,50
e	6,00	0,41	1,43	3,49
f	7,00	0,55	1,20	2,18
g	8,00	0,80	1,32	1,65
h	9,00	1,00	1,36	1,36
i	10,00	1,20	1,39	1,16
j	10,00	1,20	1,39	1,16
k	9,00	1,00	1,36	1,36
l	8,00	0,80	1,34	1,68
m	7,00	0,55	1,18	2,15
n	6,00	0,41	1,39	3,39
t	5,50	0,38	1,54	4,05
u	5,25	0,35	1,61	4,60
o	5,00	0,30	1,79	5,97
v	4,75	0,28	1,57	5,61
s	4,50	0,25	0,88	3,52
p	4,00	0,20	0,45	2,25
q	3,00	0,10	0,14	1,40
r	2,00	0,06	0,04	0,73

Tabella 12. 30% RSM secca

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,06	0,05	0,83
b	3,00	0,12	0,14	1,17
c	4,00	0,20	0,40	2,00
d	5,00	0,30	1,35	4,50
e	6,00	0,49	1,05	2,14
f	7,00	0,57	0,96	1,68
g	8,00	0,87	1,07	1,23
h	9,00	1,10	1,15	1,05
i	10,00	1,25	1,25	1,00
j	10,00	1,25	1,25	1,00
k	9,00	1,10	1,09	0,99
l	8,00	0,87	1,07	1,23
m	7,00	0,57	0,97	1,70
n	6,00	0,49	1,05	2,14
t	5,50	0,40	1,02	2,55
v	5,25	0,35	1,11	3,17
o	5,00	0,30	1,28	4,27
u	4,75	0,30	1,41	4,70
s	4,50	0,28	1,57	5,61
x	4,25	0,23	1,35	5,87
p	4,00	0,20	0,76	3,80
q	3,00	0,12	0,16	1,33
r	2,00	0,06	0,05	0,83

Tabella 13. 40% RSM secca

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,06	0,05	0,83
b	3,00	0,13	0,14	1,08
c	4,00	0,20	0,46	2,30
d	5,00	0,33	1,20	3,64
e	6,00	0,44	0,95	2,16
f	7,00	0,60	0,89	1,48
g	8,00	0,80	1,01	1,26
h	9,00	1,10	1,11	1,01
i	10,00	1,30	1,23	0,95
j	10,00	1,30	1,21	0,93
k	9,00	1,10	1,11	1,01
l	8,00	0,80	1,03	1,29
m	7,00	0,60	0,89	1,48
n	6,00	0,43	0,94	2,19
s	5,50	0,34	0,77	2,26
o	5,00	0,33	1,10	3,33
u	4,75	0,32	1,12	3,50
t	4,50	0,30	1,25	4,17
v	4,25	0,28	1,39	4,96
p	4,00	0,22	1,03	4,68
q	3,00	0,15	0,17	1,13
r	2,00	0,06	0,06	1,00

Tabella 14. Sabbia umida

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,04	0,04	1,00
b	3,00	0,10	0,10	1,00
c	4,00	0,18	0,25	1,39
d	5,00	0,30	0,45	1,50
e	6,00	0,45	3,33	7,40
f	7,00	0,55	1,65	3,00
g	8,00	0,80	1,39	1,74
h	9,00	1,00	1,50	1,50
i	10,00	1,20	1,61	1,34
j	10,00	1,20	1,67	1,39
k	9,00	1,00	1,60	1,60
l	8,00	0,80	1,41	1,76
m	7,00	0,55	1,78	3,24
t	6,50	0,50	1,45	2,90
v	6,25	0,45	1,65	3,67
n	6,00	0,45	2,05	4,56
u	5,75	0,40	1,98	4,95
s	5,50	0,35	2,85	8,14
o	5,00	0,30	1,54	5,13
p	4,00	0,19	0,39	2,05
q	3,00	0,10	0,14	1,40
r	2,00	0,04	0,04	1,00

Tabella 15. 10% RSM umida

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,05	0,05	1,00
b	3,00	0,11	0,12	1,09
c	4,00	0,20	0,25	1,25
d	5,00	0,33	1,05	3,18
e	6,00	0,45	1,62	3,60
f	7,00	0,58	1,33	2,29
g	8,00	0,85	1,31	1,54
h	9,00	1,00	1,59	1,59
i	10,00	1,30	1,48	1,14
j	10,00	1,30	1,45	1,12
k	9,00	1,00	1,50	1,50
l	8,00	0,85	1,30	1,53
m	7,00	0,58	1,33	2,29
n	6,00	0,45	1,60	3,56
t	5,50	0,38	1,59	4,18
v	5,25	0,37	1,65	4,46
o	5,00	0,32	2,28	7,13
u	4,75	0,31	1,95	6,29
s	4,50	0,27	1,10	4,07
p	4,00	0,20	0,52	2,60
q	3,00	0,11	0,15	1,36
r	2,00	0,05	0,05	1,00

Tabella 16. 20% RSM umida

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,04	0,04	1,00
b	3,00	0,10	0,11	1,10
c	4,00	0,19	0,25	1,32
d	5,00	0,31	1,01	3,26
e	6,00	0,45	1,53	3,40
f	7,00	0,58	1,28	2,21
g	8,00	0,85	1,36	1,60
h	9,00	1,10	1,48	1,35
i	10,00	1,20	1,42	1,18
j	10,00	1,30	1,42	1,09
k	9,00	1,10	1,41	1,28
l	8,00	0,80	1,34	1,68
m	7,00	0,57	1,28	2,25
n	6,00	0,45	1,49	3,31
t	5,50	0,35	1,50	4,29
v	5,25	0,33	1,47	4,45
o	5,00	0,31	1,83	5,90
u	4,75	0,28	1,85	6,61
s	4,50	0,25	1,12	4,48
p	4,00	0,20	0,48	2,40
q	3,00	0,10	0,15	1,50
r	2,00	0,04	0,04	1,00

Tabella 17. 30% RSM umida

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,06	0,05	0,83
b	3,00	0,12	0,13	1,08
c	4,00	0,20	0,32	1,60
d	5,00	0,30	1,45	4,83
e	6,00	0,40	1,10	2,75
f	7,00	0,60	0,99	1,65
g	8,00	0,80	1,13	1,41
h	9,00	1,10	1,18	1,07
i	10,00	1,20	1,23	1,03
j	10,00	1,20	1,25	1,04
k	9,00	1,10	1,16	1,05
l	8,00	0,80	0,80	1,00
m	7,00	0,60	1,03	1,72
n	6,00	0,40	1,14	2,85
t	5,50	0,40	1,13	2,83
v	5,25	0,36	1,14	3,17
o	5,00	0,30	1,45	4,83
u	4,75	0,28	1,37	4,89
s	4,50	0,28	1,63	5,82
x	4,25	0,25	1,65	6,60
p	4,00	0,20	0,77	3,85
q	3,00	0,12	0,17	1,42
r	2,00	0,06	0,05	0,83

Tabella 18. 40% RSM umida

Sequenza del test	Frequenza (Hz)	Accelerazione box (g)	Accelerazione struttura (g)	Amplificazione (-)
a	2,00	0,05	0,05	1,00
b	3,00	0,13	0,15	1,12
c	4,00	0,20	0,31	1,55
d	5,00	0,30	1,35	4,50
e	6,00	0,42	1,05	2,50
f	7,00	0,58	0,94	1,62
g	8,00	0,80	1,05	1,31
h	9,00	1,00	1,16	1,16
i	10,00	1,20	1,27	1,06
j	10,00	1,18	1,27	1,08
k	9,00	0,90	1,16	1,29
l	8,00	0,80	1,08	1,35
m	7,00	0,56	0,94	1,68
n	6,00	0,42	1,04	2,48
s	5,50	0,40	0,93	2,33
o	5,25	0,33	1,00	3,03
u	5,00	0,30	1,25	4,17
t	4,75	0,29	1,30	4,48
v	4,50	0,30	1,43	4,77
p	4,25	0,26	1,43	5,50
q	4,00	0,20	0,75	3,75
r	3,00	0,12	0,16	1,33
	2,00	0,05	0,07	1,56

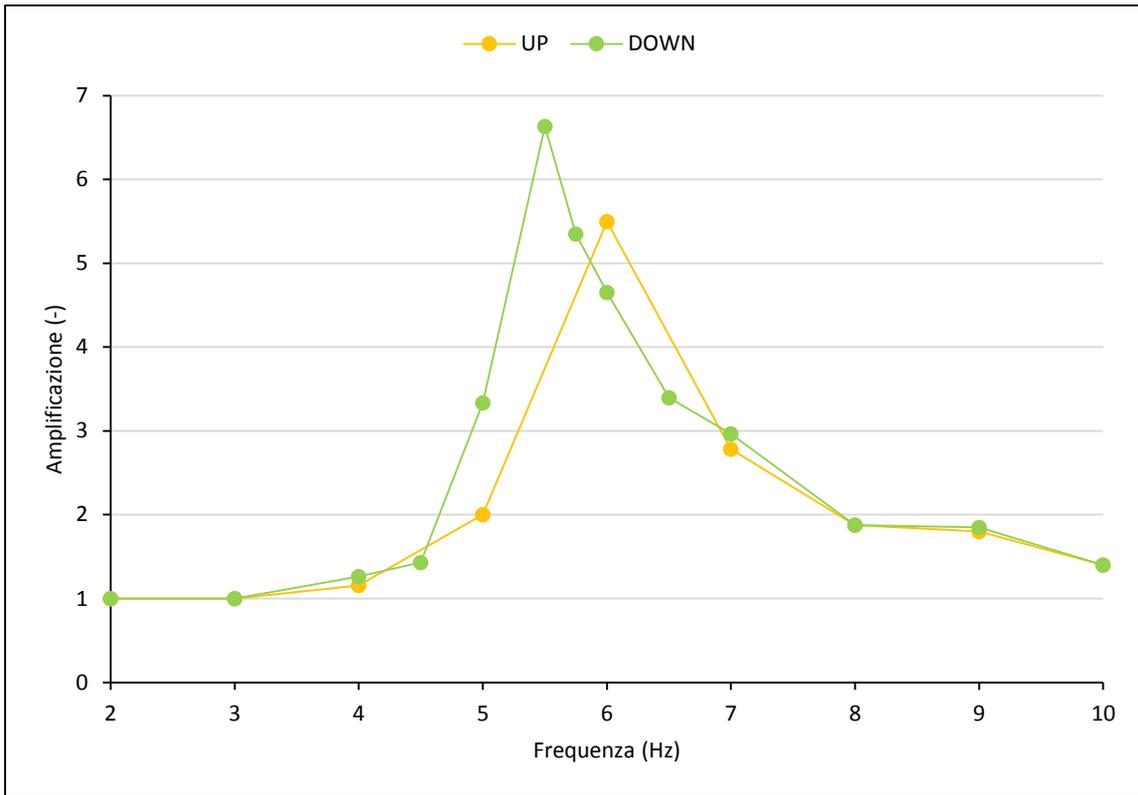


Figura 100. Sabbia secca

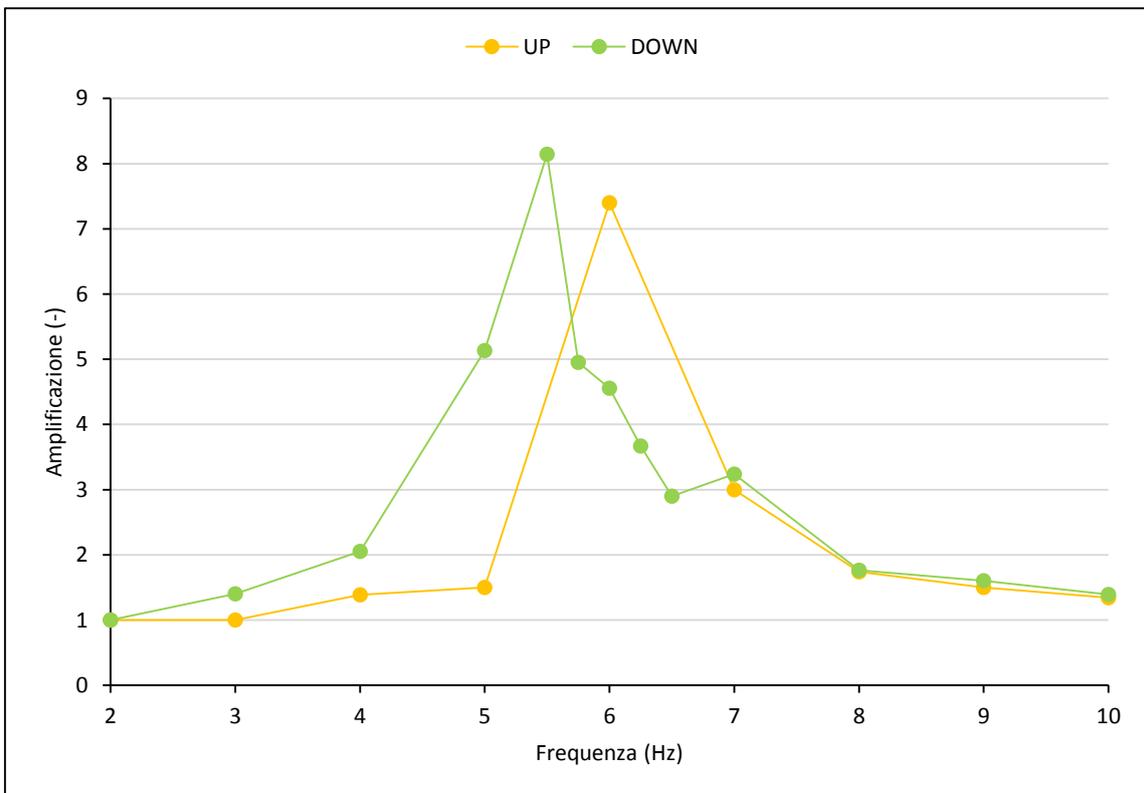


Figura 101. Sabbia umida

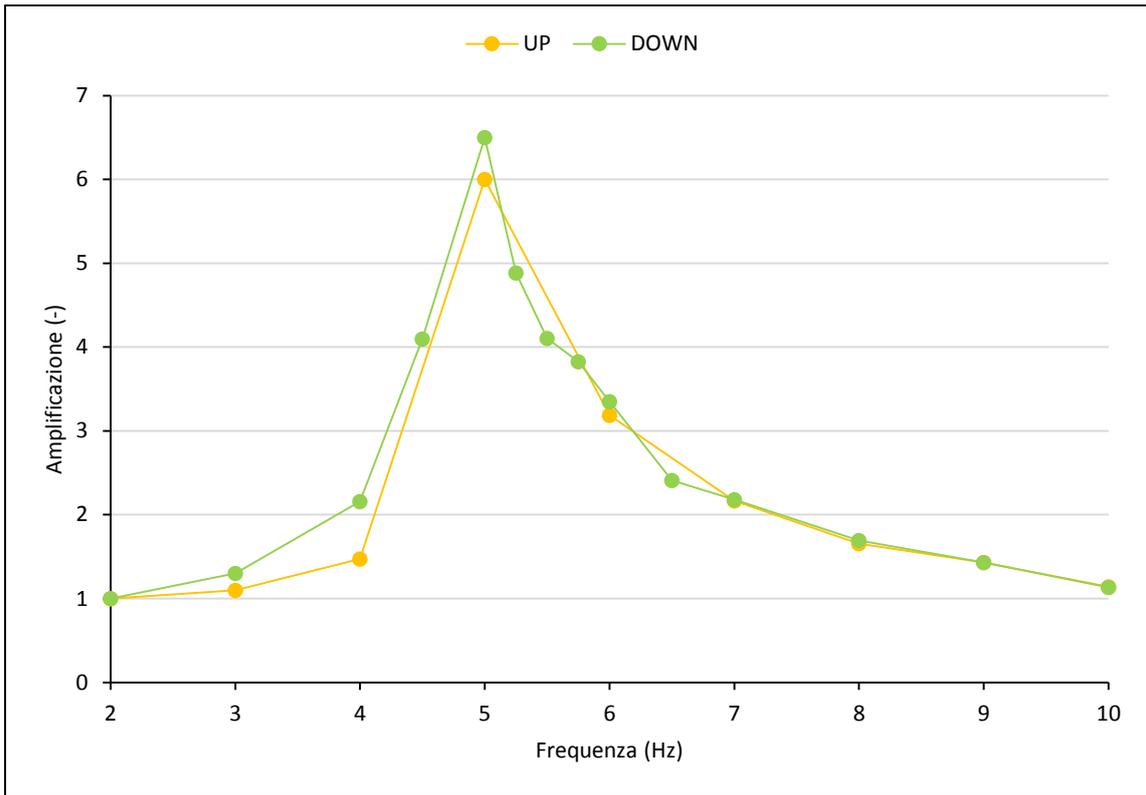


Figura 102. 10% RSM secca

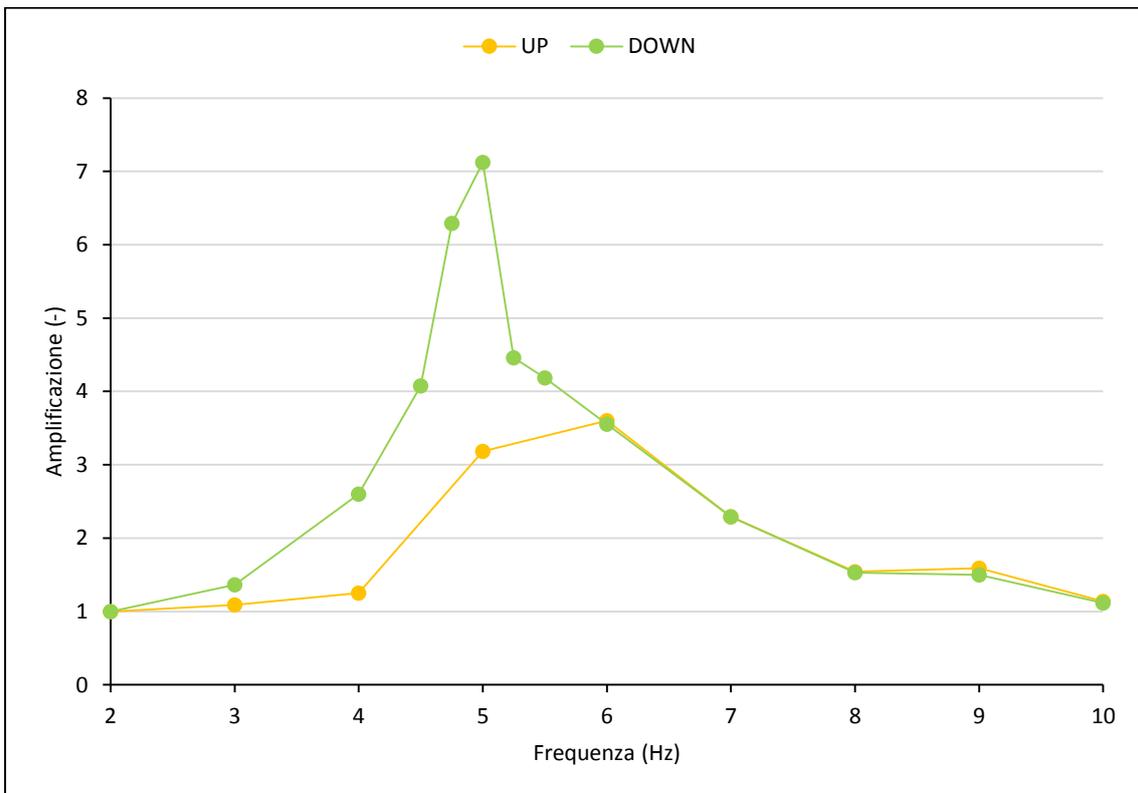


Figura 103. 10% RSM umida

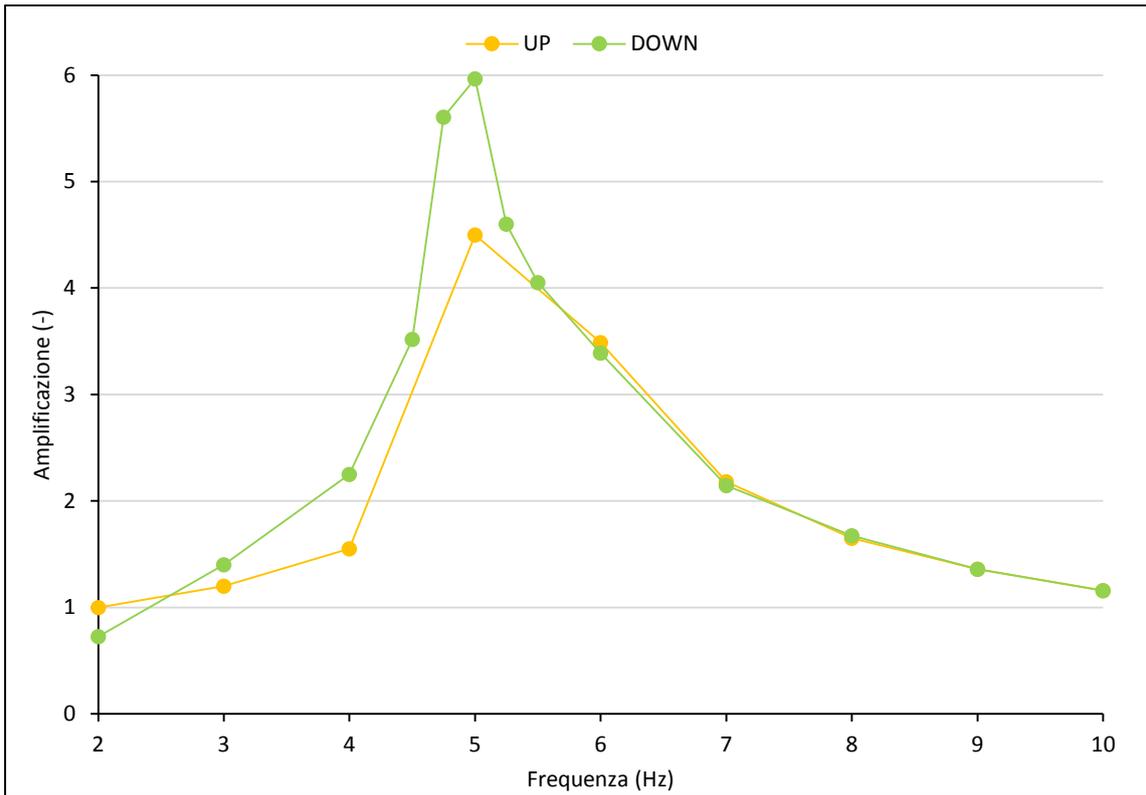


Figura 104. 20% RSM asciutto

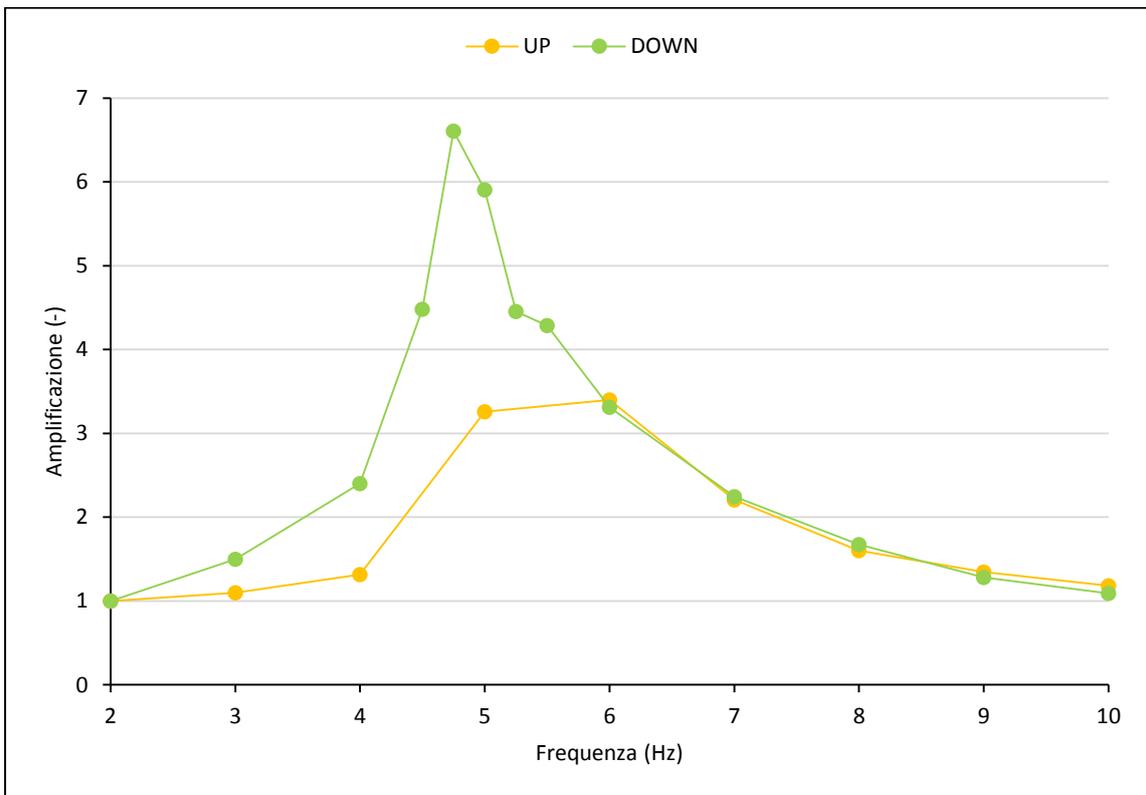


Figura 105. 20% RSM umido

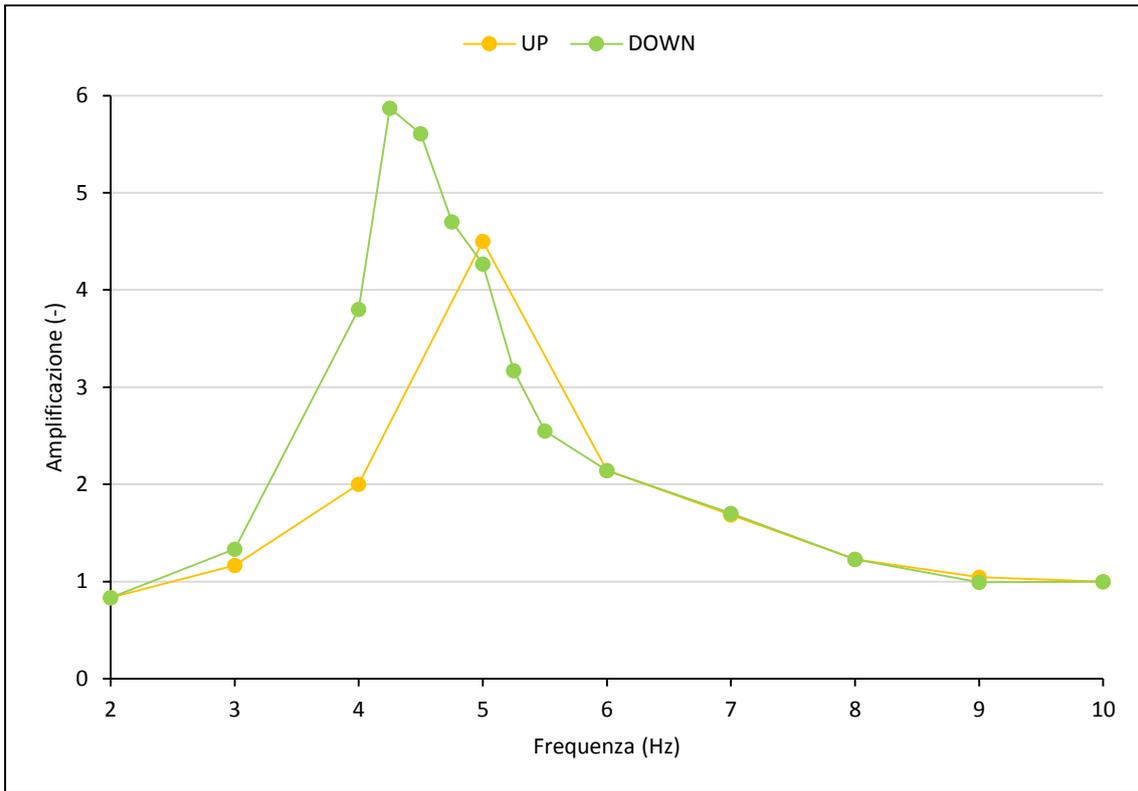


Figura 106. 30% RSM asciutto

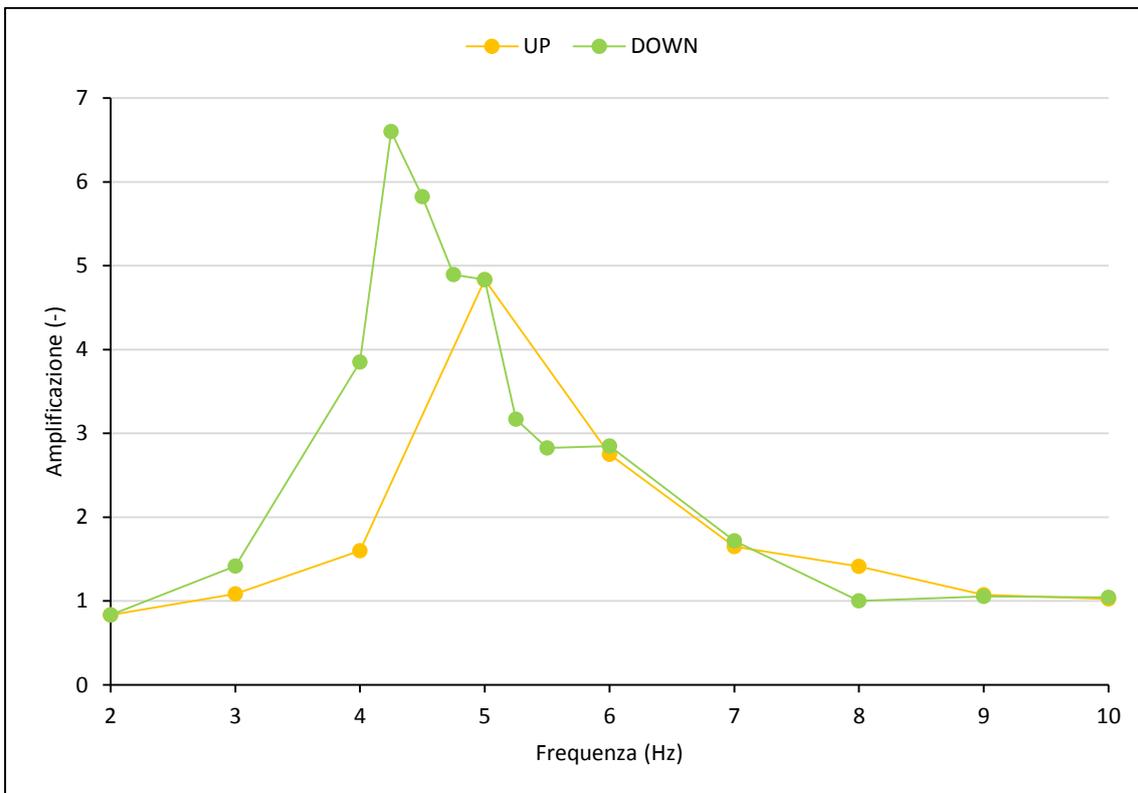


Figura 107108. 30% RSM umido

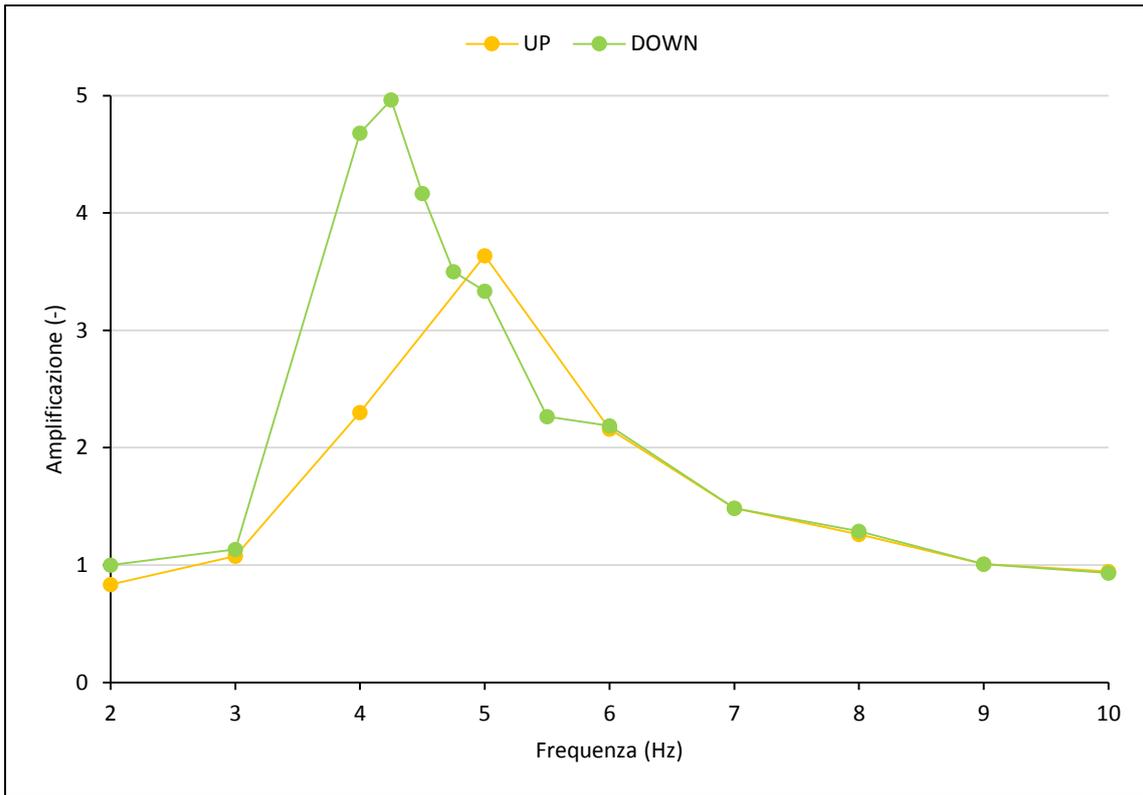


Figura 108. 40% RSM asciutto

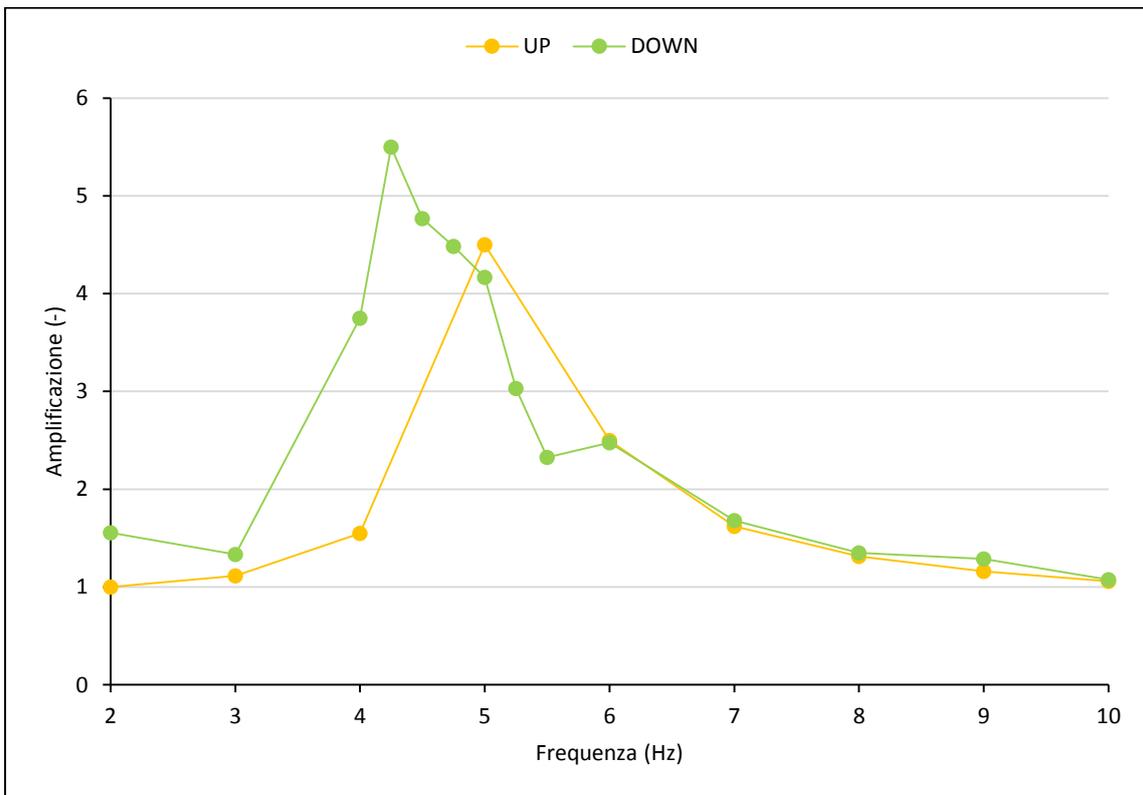


Figura 109. 40% RSM umido

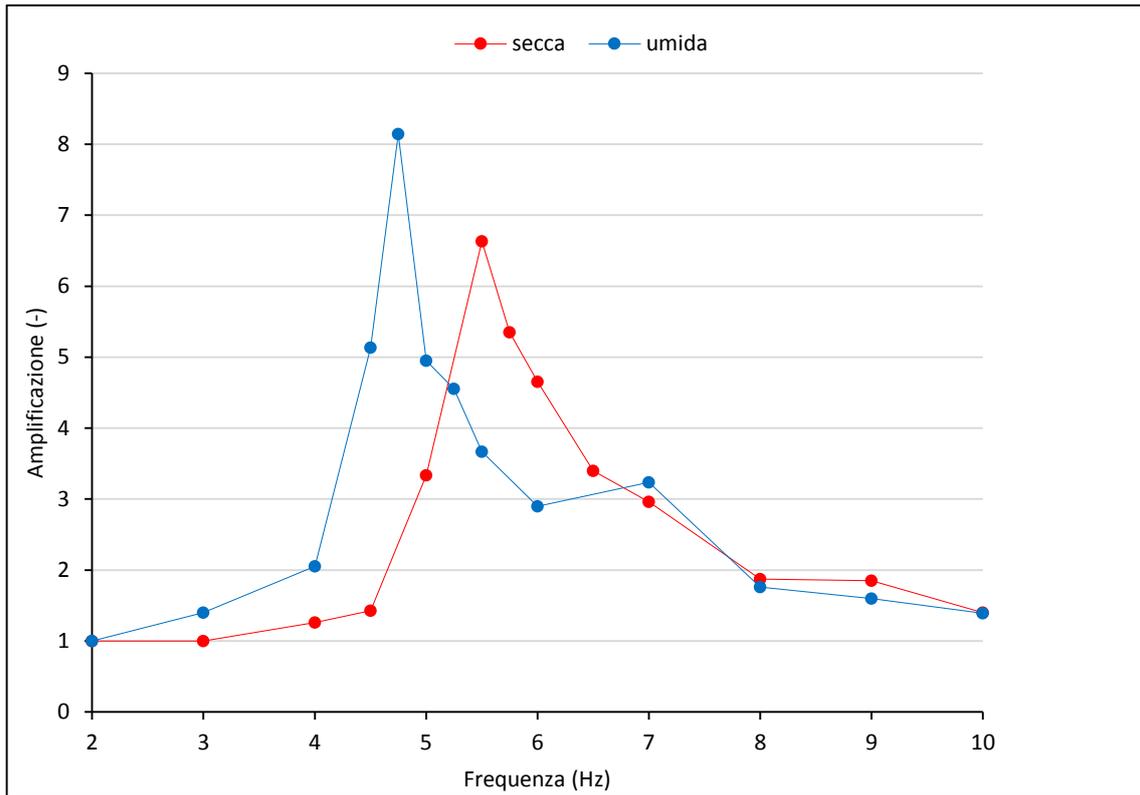


Figura 110. System response comparisons (dry & wet) sand

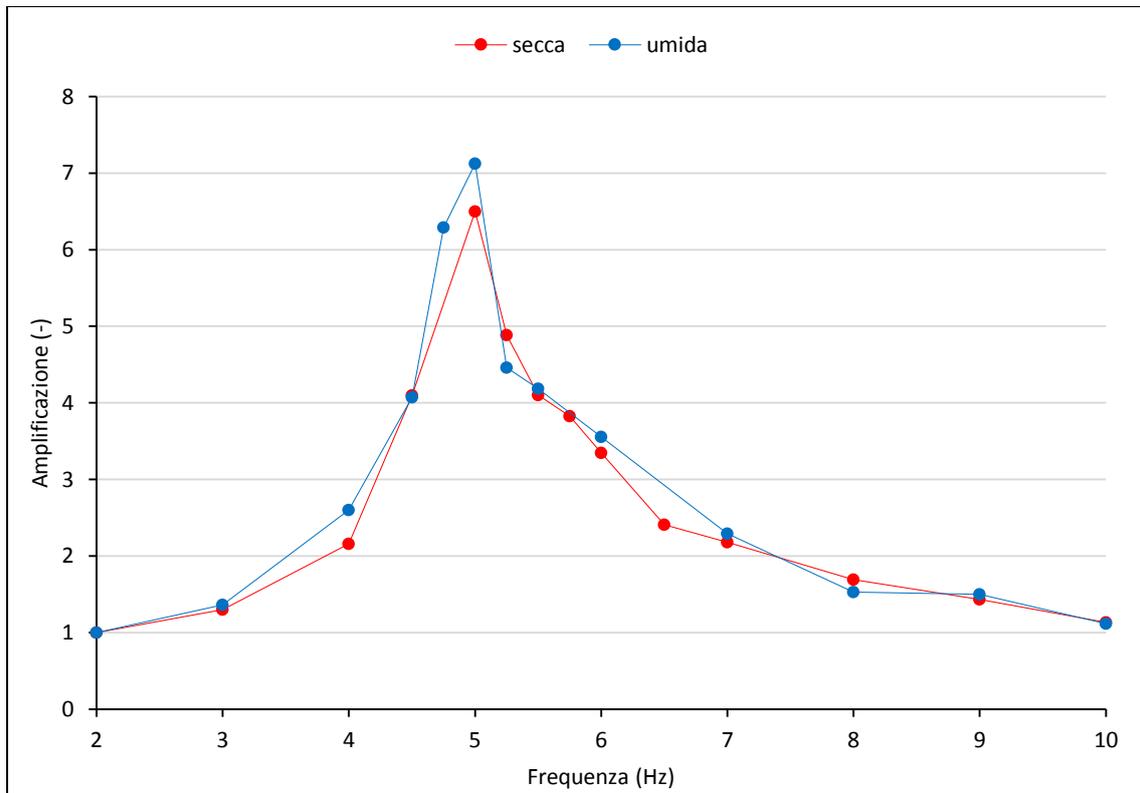


Figura 111. System response comparisons (dry & wet) 10% RMS

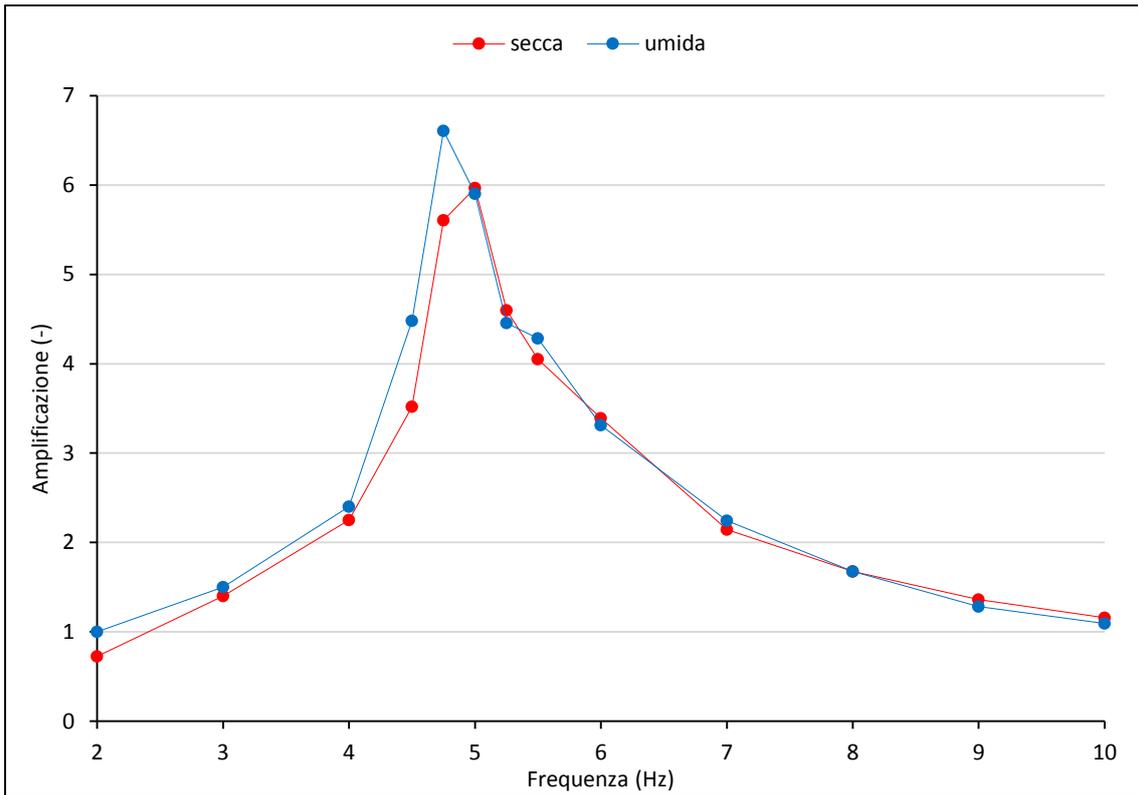


Figura 112. System response comparisons (dry & wet) 20% RSM

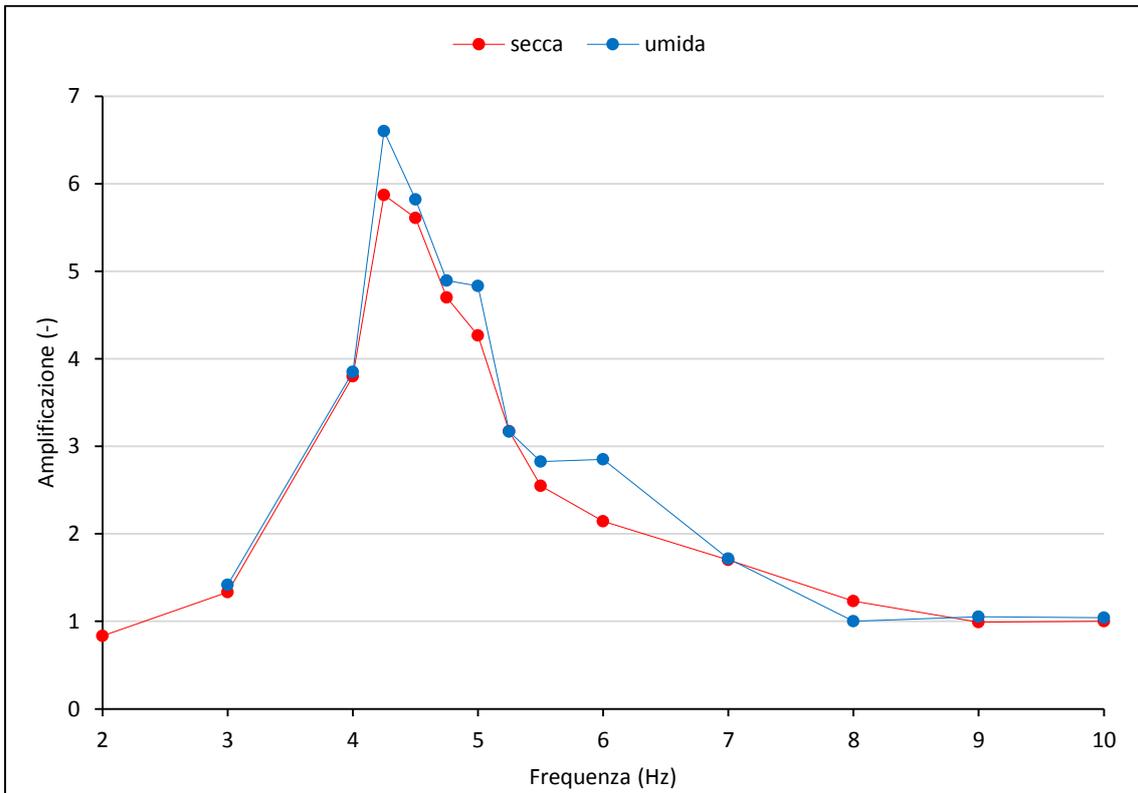


Figura 113. System response comparisons (wet sand & 10% RSM & 20% RSM)

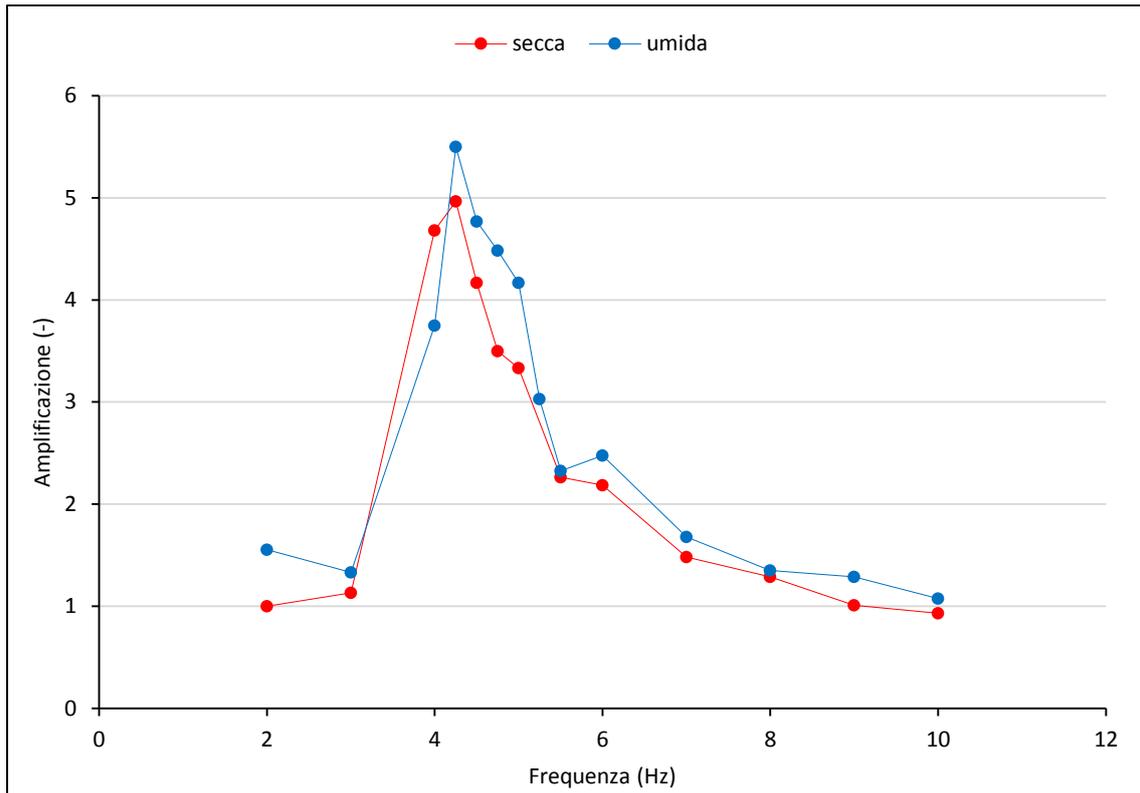


Figura 114. System response comparisons (up & down)

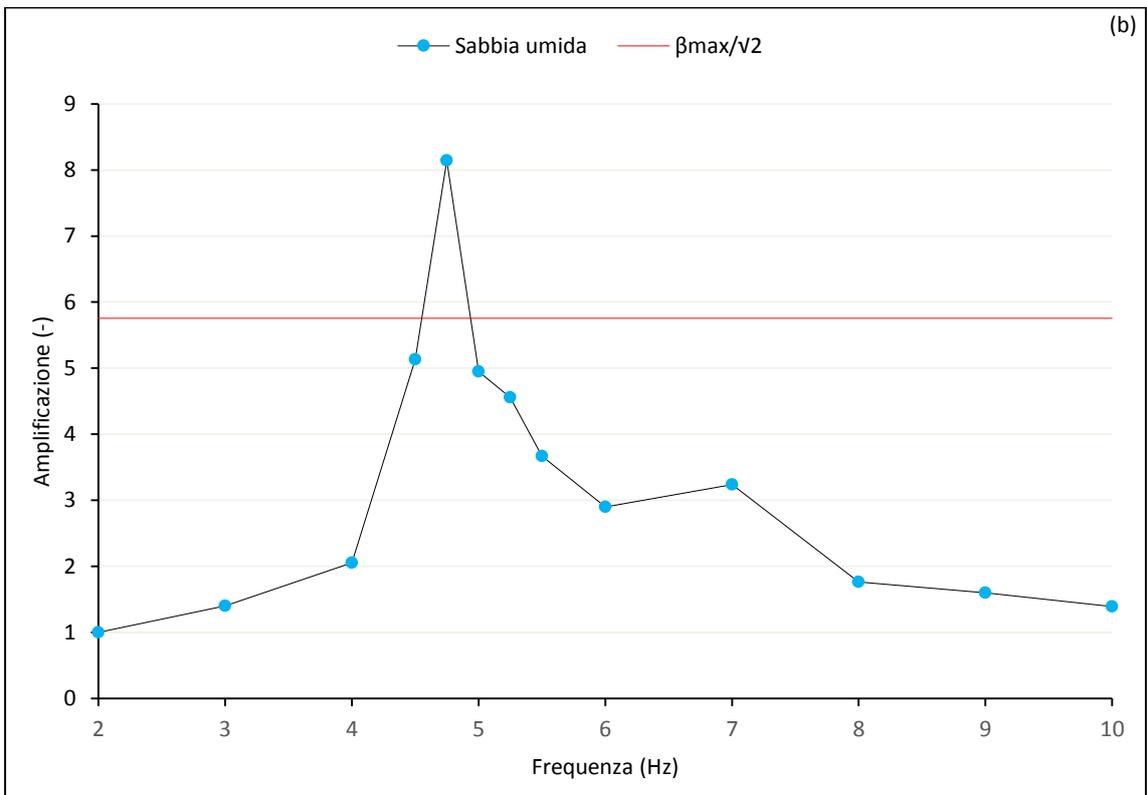
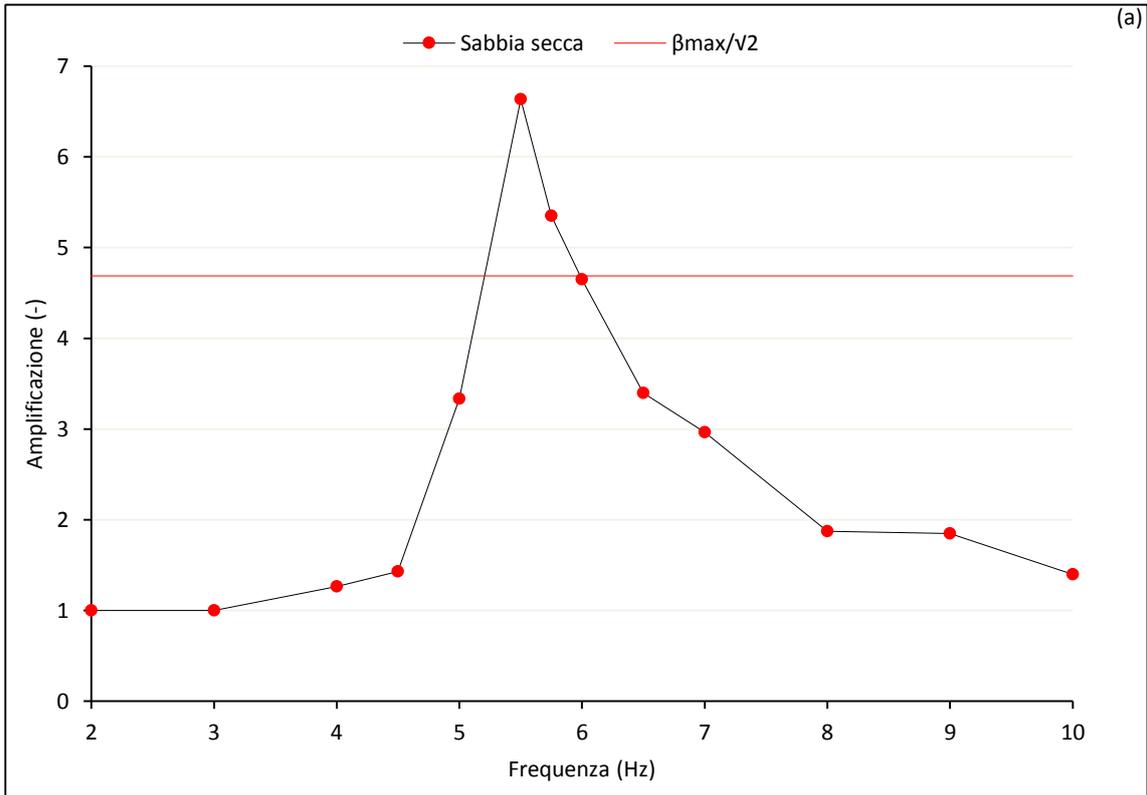


Figura 115. (a) Sabbia secca; (b) Sabbia umida

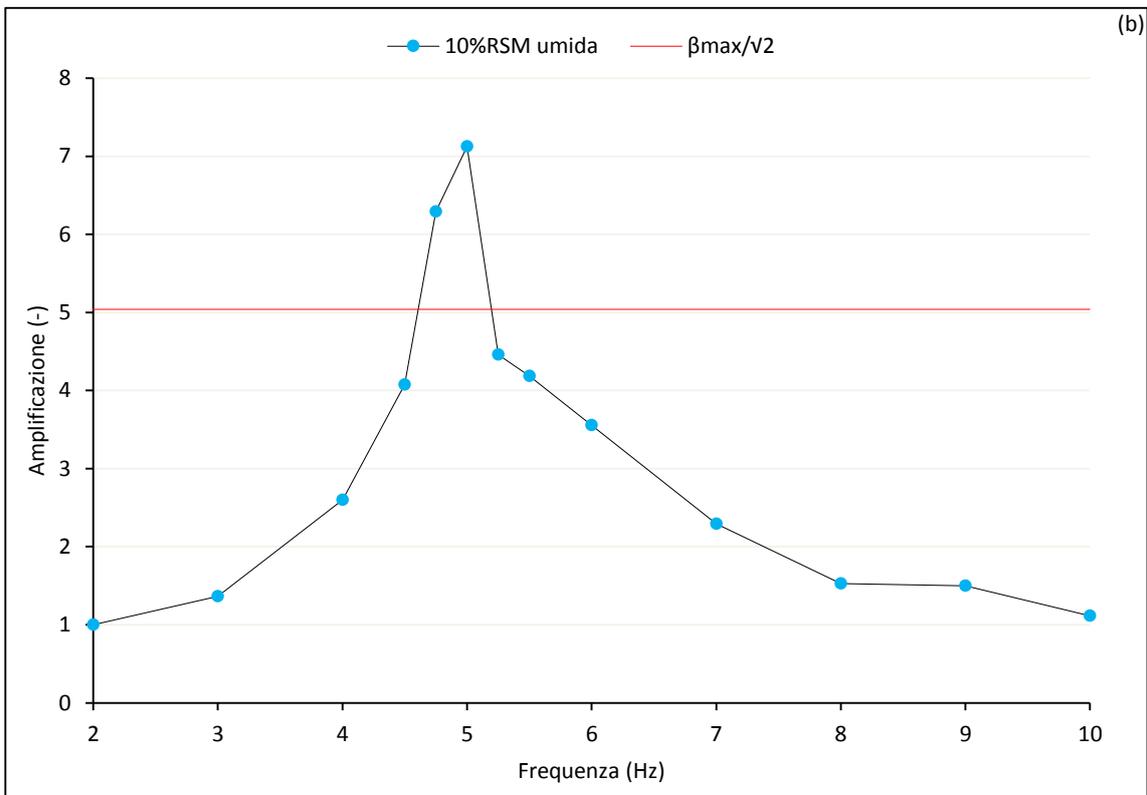
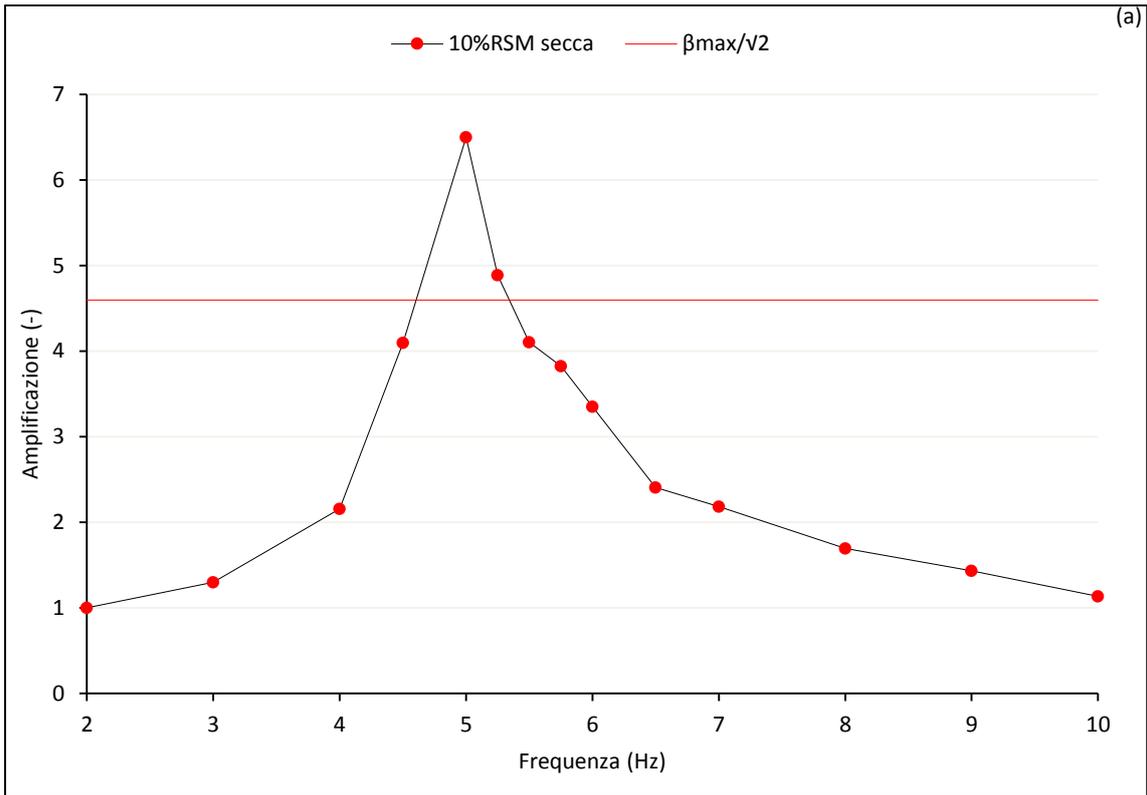


Figura 116. (a) 10% RSM secca; (b) 10% RSM umida

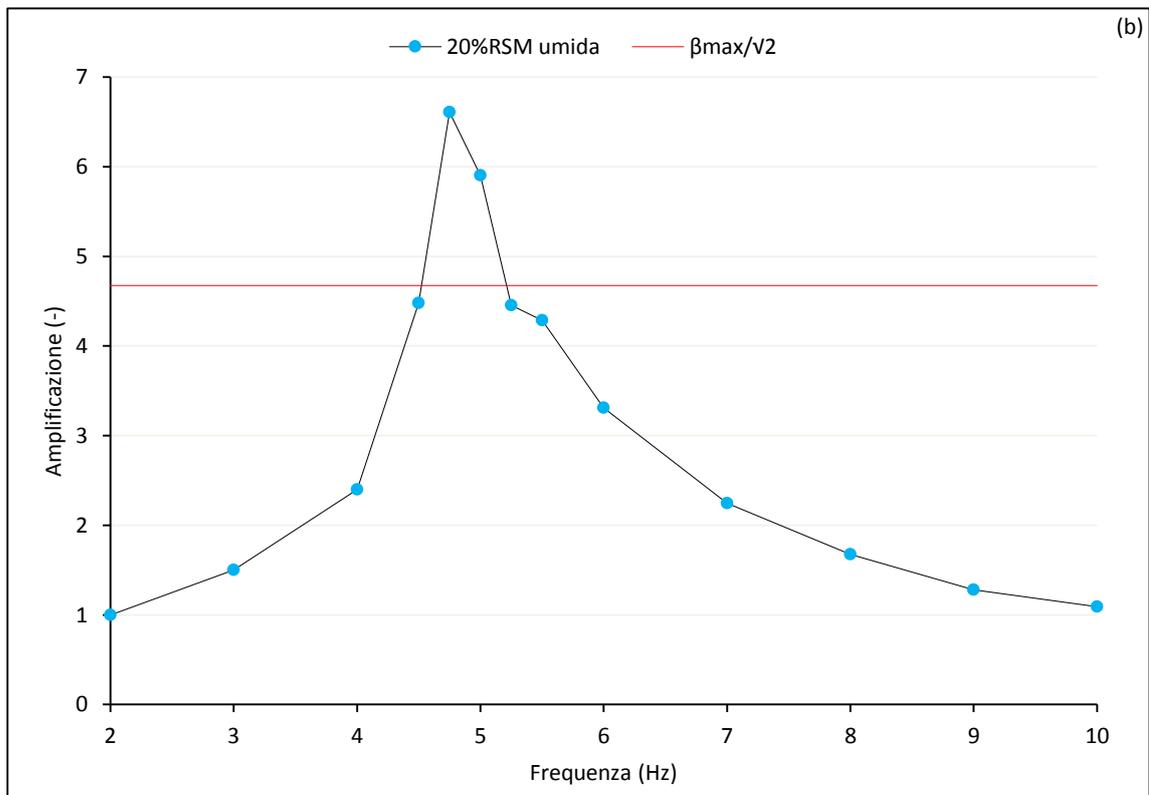
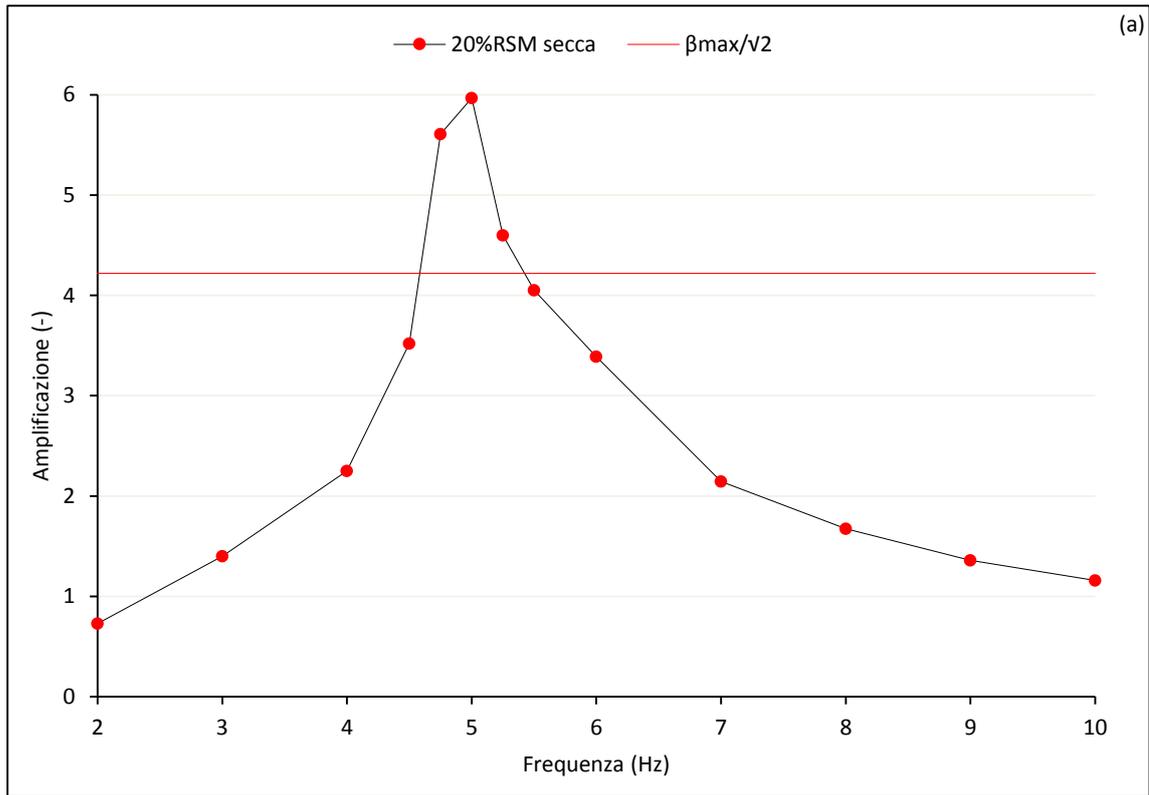


Figura 117. (a) 20% RSM secca; (b) 20% RSM umida

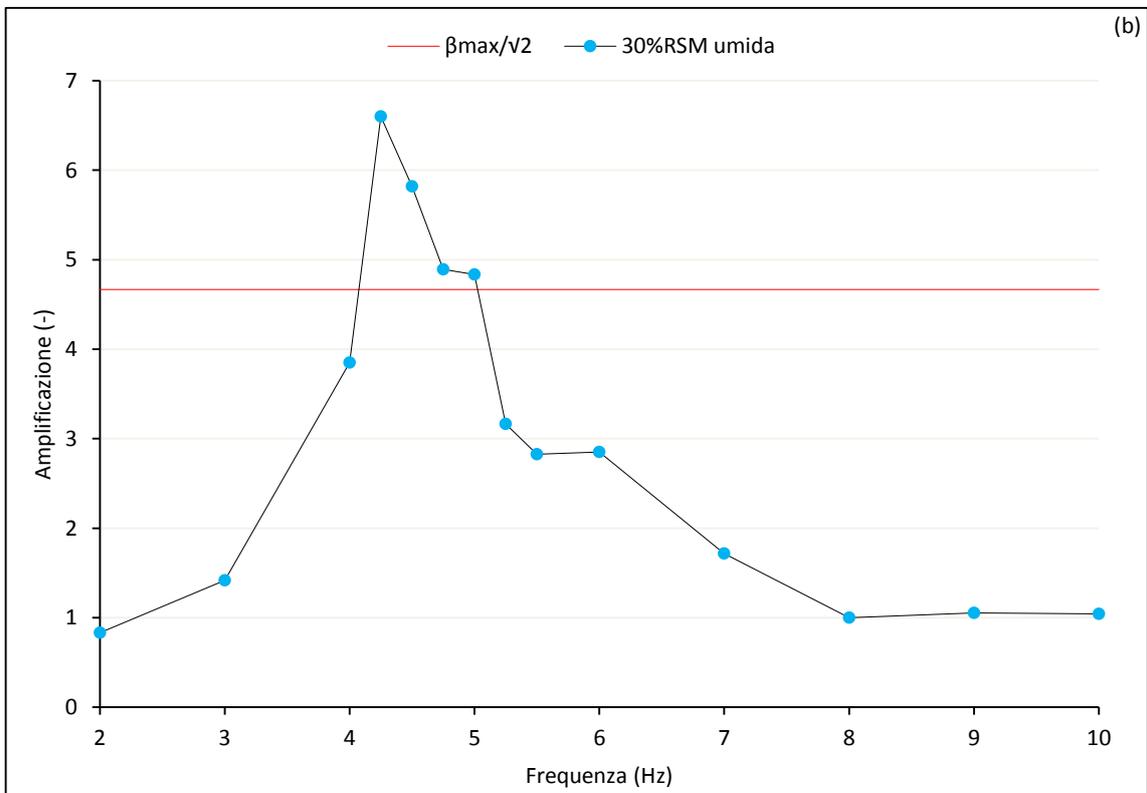
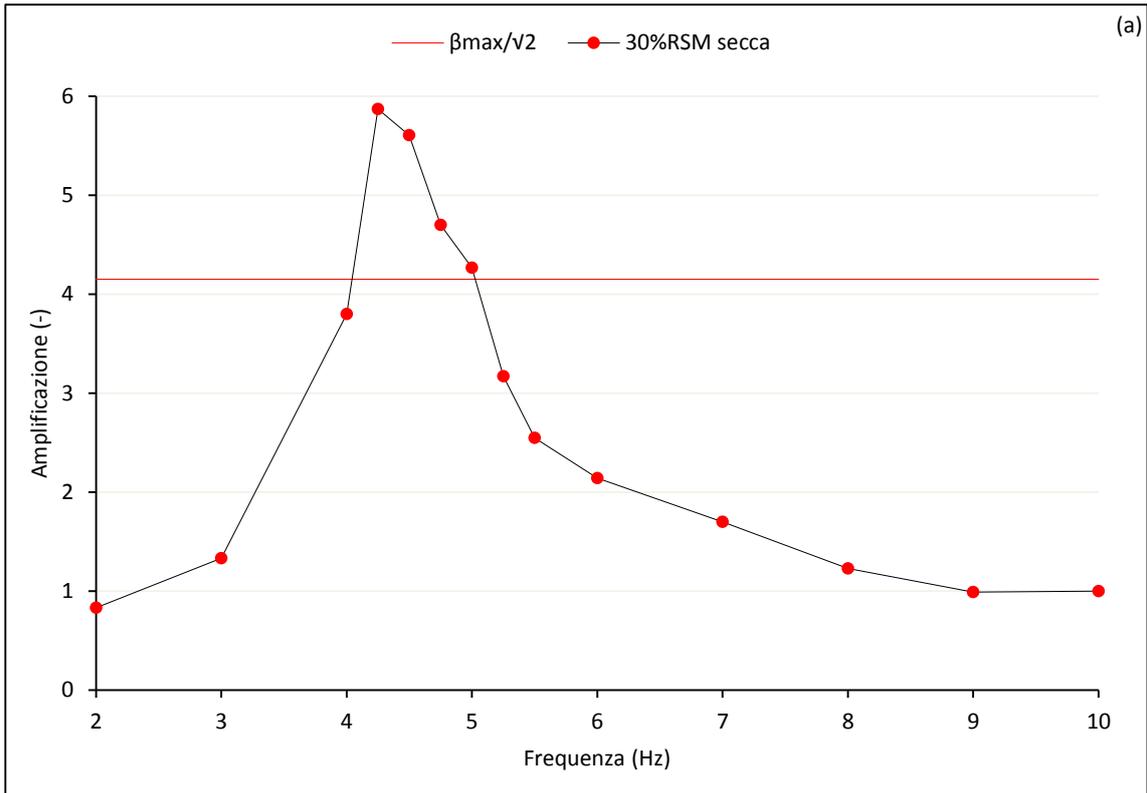


Figura 118. (a) 30% RSM secca; (b) 30% RSM umida

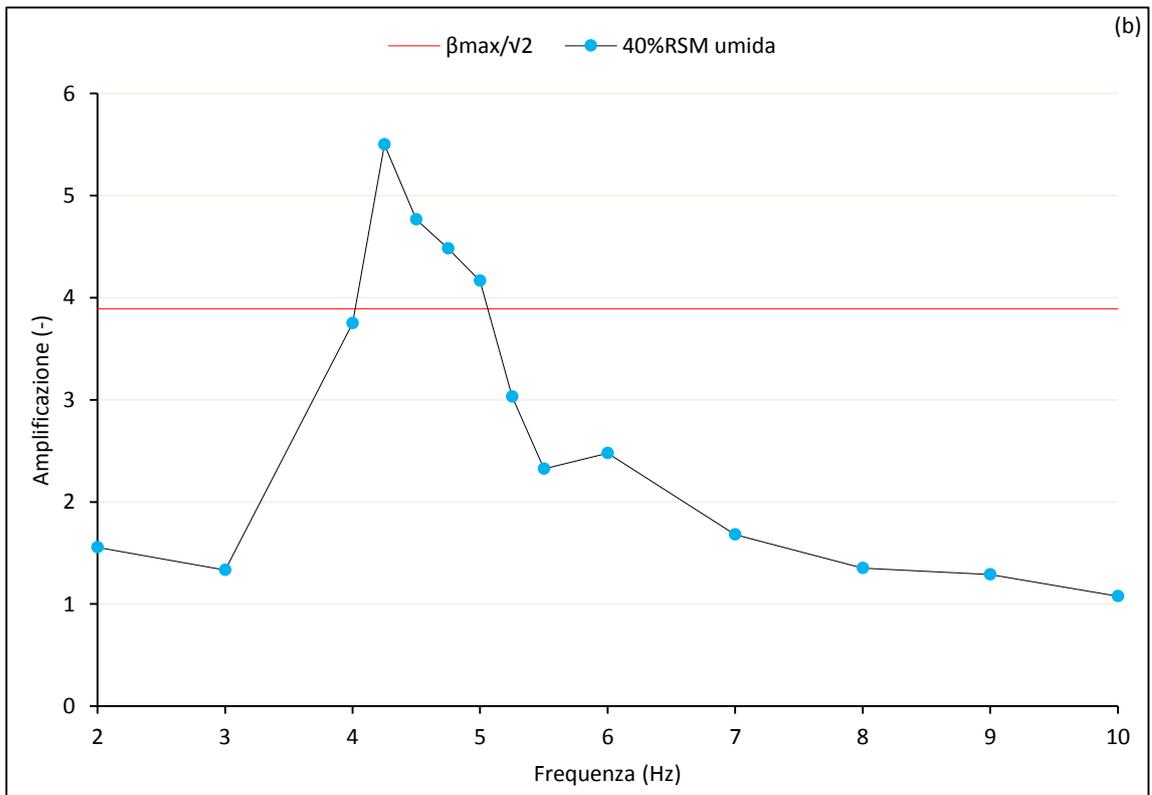
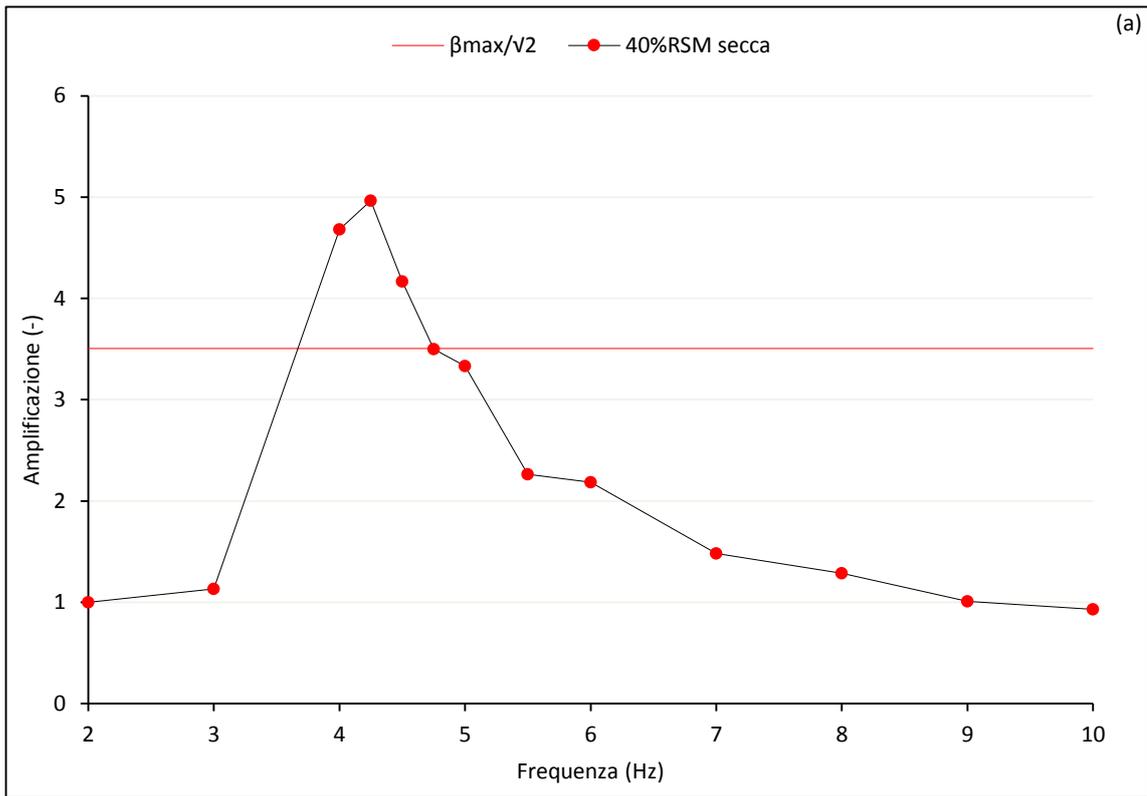


Figura 119. (a) 40% RSM secca; (b) 40% RSM umida

