UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

LAMINAR SHEAR BOXES NELLA MODELLAZIONE FISICA IN GEOTECNICA: ASPETTI PROGETTUALI, MATERIALI E APPLICAZIONI SPERIMENTALI

LAMINAR SHEAR BOXES IN GEOTECHNICAL PHYSICAL MODELING: DESING ASPECTS, MATERIALS AND EXPERIMENTAL APPLICATIONS

Relatrice:

Ing. **CHIARA GIOSUÈ**

Tesi di Laurea di:

CONCORDIA VALENTINO

Correlatore:

Prof. Ing. **PAOLO RUGGERI**

Correlatrice:

Prof. Ing. **VALERIA CORINALDESI**

A.A. 2025/2026

ABSTRACT

Questa tesi analizza la progettazione, la selezione dei materiali e le applicazioni sperimentali delle Laminar Shear Box (LSB) e dei contenitori flessibili (ESB/FSB) impiegati nella modellazione fisica in geotecnica su tavola vibrante e in centrifuga. L'impiego di tali dispositivi mira a superare i limiti sperimentali dei contenitori rigidi, minimizzando gli effetti di bordo e la riflessione delle onde sismiche per riprodurre fedelmente la deformazione a taglio del terreno in condizioni di campo libero.

Lo studio confronta le soluzioni ingegneristiche adottate dai principali laboratori internazionali, evidenziando la necessità di un delicato bilanciamento tra i due principali aspetti che condizionano il comportamento sperimentale dei dispositivi, la rigidezza (flessionale e a taglio) e il contenimento delle masse inerziali. L'analisi si concentra sulle specifiche scelte costruttive, spiegando come le leghe di alluminio vengano generalmente utilizzate per i telai, al fine di garantire un efficace contenimento del terreno mantenendo basse le forze d'inerzia parassite, mentre l'acciaio strutturale è destinato alle intelaiature esterne. Viene quindi analizzata la tenuta idraulica nei terreni saturi, assicurata da elastomeri e materiali polimerici che evitano l’introduzione di elevate rigidezze parassite (effetto membrana); mentre lo scorrimento dei telai è garantito da sistemi volventi e materiali a bassissimo attrito.

Il lavoro analizza inoltre il ruolo fondamentale della strumentazione avanzata nello studio sperimentale di fenomeni come la liquefazione e l'interazione terreno-struttura.

In conclusione, l'elaborato sottolinea come un'accurata progettazione e un'ottimale sinergia tra i materiali costruttivi siano determinanti per mantenere contenuti gli effetti di bordo, ed ottenere risultati sperimentali affidabili nel replicare la risposta sismica dei depositi naturali in scala ridotta.

Questa tesi nasce dalla necessità di approfondire la tematica legate alla progettazione e alla realizzazione della Laminar Shear box prevista nei progetti STRICT/STRICT+

INDICE

CAPITOLO 1 ..... **1**
Introduzione

1.1 LAMINAR SHEAR BOX ***2***

1.1.1 Configurazione geometrica e gradi di libertà 5

1.2 DESIGN, COSTRUZIONE E MATERIALI DI UNA LSB ***5***

1.2.1 Design e Costruzione 5

1.3 PROGETTO STRICT/STRICT+ ***7***

CAPITOLO 2 ..... **9**
Esempi di Tipologie di LSB nei Laboratori

2.1 ESEMPI DI LSB ***10***

2.2 LSB IN EUROPA ***12***

2.2.1 Italia – Università di Enna "Kore" (L.E.D.A.) 12

2.2.2 Italia – Università di Messina – Laboratorio EUROLAB – CERESI 14

2.2.3 Regno Unito – University of Bristol (EQUALS) 16

2.3 LSB IN ASIA ***17***

2.3.1 Korea - Institute of Nuclear Safety (KINS) 18

2.3.2 India – Indian Institute of Technology Kanpur 19

2.3.3 Iran – Sharif University of Technology (SUT) 20

2.3.4 Cina – Tianjin University 21

2.3.5 Cina – Southeast University – Nanjing 23

2.3.6 Cina – Nanjing University of Technology + Beijing Jiaotong University 24

2.3.7 Cina – Tongji University – Shanghai 26

2.4 LSB IN AMERICA ***26***

2.4.1 Colorado – Colorado Boulder University 27

2.4.2 Canada – University of Western Ontario 28

CAPITOLO 3 ..... **30**
Materiali di Realizzazione

3.1 LE COMPONENTI DI UNA LAMINAR SHEAR BOX ***31***

3.1.1 Progettazione di una Laminar Shear Box 32

3.2 STRUTTURA PORTANTE DI UNA LAMINAR SHEAR BOX....32

3.2.1 Strutture in Alluminio....33

3.2.2 Strutture in Acciaio....36

3.3 MATERIALI POLIMERICI E SISTEMI A BASSISSIMO ATTRITO....38

3.3.1 Materiali Polimerici ed Elastomeri per la Trave Flessibile....39

3.3.2 Polimeri: Tenuta Idraulica e Interazione....39

3.3.3 Rigidezza e Materiali Assorbenti....40

3.3.4 Ottimizzazione delle Superfici di Base e Componenti Compositi....41

3.3.5 Sistemi a Bassissimo Attrito (Cuscinetti e Teflon)....42

CAPITOLO 4....44
Schede Tecniche dei Materiali

4.1 INTRODUZIONE ALLA SCELTA DEI MATERIALI....45

4.1.1 Telai e struttura rigida (Lamine)....46

4.1.2 Sistema di scorrimento....48

4.1.3 Membrana di confinamento interna....50

4.1.4 Bullonatura e attacchi a terra....53

CAPITOLO 5....56
Accelerometri

5.1 ACCELEROMETRI – PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO....57

5.1.1 Funzione degli accelerometri....58

5.1.2 Analisi Sperimentale....59

CAPITOLO 6....63
Conclusione

6.1 SINTESI DEL LAVORO SVOLTO....64

6.2 EVIDENZE EMERSE....64

6.3 VALIDAZIONE SPERIMENTALE TRAMITE ACCELEROMETRI....65

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA....68

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 LAMINAR SHEAR BOX

Negli ultimi anni, le ricerche in campo ingegneristico/geotecnico e la modellazione numerica del comportamento dinamico dei terreni hanno conosciuto una crescita significativa; l'esigenza di valorizzare la risposta del terreno sotto carichi ciclici e dinamici, di stimare l'interazione terreno-struttura e di studiare fenomeni critici, quali la liquefazione dei terreni in condizioni sismiche, impone di ricorrere a metodologie di studio avanzate. Sebbene le indagini in situ e le prove di laboratorio su campioni di terreno costituiscano la base per la definizione dei parametri geotecnici (Bagheri, O. 2024), spesso risultano inadeguate a cogliere la complessa risposta sismica bi- e tridimensionale dei sistemi reali. A fronte di tali limiti, la modellazione fisica, condotta sia su tavola vibrante a gravità normale (1g) sia in centrifuga geotecnica a gravità aumentata, si configura come un approccio strategico per riprodurre in ambiente controllato i meccanismi di collasso legati alla liquefazione e analizzare il comportamento dinamico di dighe, rilevati, fondazioni e opere di sostegno.

Nonostante i numerosi vantaggi, la modellazione fisica presenta un limite intrinseco legato alla geometria finita del modello, a fronte della natura semi-infinita dei depositi reali. Per contenere le dimensioni del provino e garantire l'applicazione delle corrette tensioni, si rende indispensabile l'utilizzo di appositi contenitori rigidi (Bagheri, O. 2024); l'impiego di questi ultimi ha tuttavia evidenziato criticità rilevanti, attribuibili all'incompatibilità deformativa con il terreno, alla riflessione delle onde sismiche lungo le pareti e alla conversione dei moti d'onda, con conseguente generazione di onde di compressione anomale. Per ovviare a tali problematiche e replicare al meglio le condizioni di campo libero, la ricerca geotecnica ha promosso lo sviluppo di contenitori flessibili, tra cui emergono in modo particolare le Laminar Shear Box (LSB).

Un contenitore di tipo Laminar Shear Box (LSB) è un'attrezzatura sperimentale progettata per contenere modelli di terreno durante test di simulazione sismica su tavola vibrante o

centrifuga geotecnica. Il principale scopo è quello di consentire al provino di terreno, confinato in uno spazio finito, di deformarsi lateralmente, in modo coerente con la propagazione verticale delle onde di taglio che avviene in un deposito di terreno semi-infinito, simulando le condizioni di deformazione piana (K0). A differenza dei contenitori rigidi tradizionali, che ostacolano la propagazione delle onde sismiche generando riflessioni indesiderate ed effetti di bordo, la LSB è progettata per assecondare la deformazione laterale del terreno. In Figura 1 un esempio di LSB. Grazie a questa configurazione, il sistema consente un movimento di taglio orizzontale analogo a quello di un'ipotetica colonna di terreno sottoposta a un'azione sismica di taglio, riducendo al minimo la resistenza strutturale al contorno e preservando fedelmente le condizioni di deformazione piana. Una panoramica delle diverse tipologie di contenitore è mostrata in Tabella 1 (Bagheri, O. et al., 2024)., mentre le performance in termini di vantaggi e svantaggi principali di ciascuna configurazione è riportata in Tabella 2.

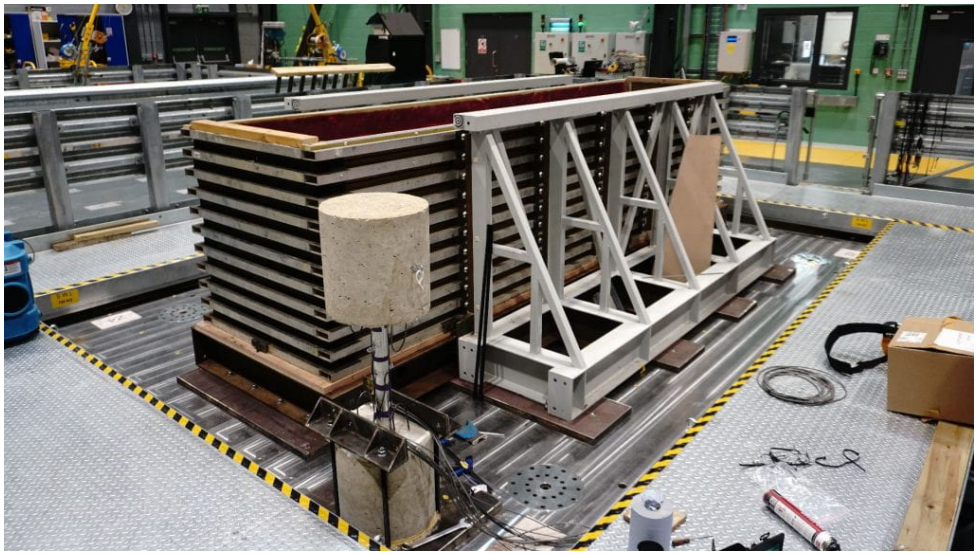


Figura 1 – Laminar Shear Box, University of Bristol

Tabella 1 – Tipologie di contenitori

Tipologia	Vantaggi (Pro)	Limitazioni (contro)	Applicazione
Contenitori Rigidi	Economici, semplici da costruire e molto robusti per carichi elevati	Forti effetti di bordo; le onde riflesse dalle pareti creano interferenze non realistiche	Tesi preliminari o studio di strutture confinate (es. silos)
Rigidi con Bordi Assorbenti	Riducono in parte la riflessione delle onde grazie a materiali smorzanti (gomma/neoprene)	Difficile tarare l'assorbimento perfetto; deformazione laterale non naturale	Studio di fondazioni superficiali dove l'interazione è localizzata
Flexible Shear Box (FSB/ESB)	Permette la deformazione a taglio del terreno; i telai sono collegati da giunti elastici	Rigidezza del contenitore può interferire con quella del terreno se non ben calibrata	Studio della risposta sismica locale e deformazioni del sottosuolo
Hinged Plate Container (HPC)	Pareti incernierate alla base, ottima stabilità laterale	Meccanica complessa; rotazione delle pareti non simula il taglio puro lungo tutta l'altezza	Studio di muri di sostegno e interazione terreno-struttura complessa
Laminar Shear Box (LSB/LSC)	I telai ad anelli indipendenti permettono al terreno di deformarsi in campo libero con attrito minimo	Molto costosi, pesanti, difficili da assemblare; rischio di perdite di materiale tra gli anelli	Ricerca avanzata su interazione terreno-struttura, liquefazione e propagazione onde sismiche

Tabella 2 – Performance: Vantaggi e Svantaggi

Tipologia	Riproducibilità campo libero	Controllo effetti di bordo	Input 3D	Fedeltà fisica globale
Contenitori Rigidi	🔴 Critico	🔴 Critico	🟡 Limitato	O
Rigidi con Bordi Assorbenti	🟡 Parziale	🟡 Ridotti	🟡 Limitato	O O
Flexible Shear Box (FSB)	🟢 Buona	🟢 Elevato	🟡 Complesso	O O O
Hinged Plate Containers (HPC)	🟢 Buona	🟢 Elevato	🔴 Scarso	O O O O
Laminar Shear Box (LSB / LSC)	🟢 Eccellente	🟢 Ottimo	🟢 Ottimo	O O O O O

1.1.1 Configurazione geometrica e gradi di libertà

A seconda della configurazione geometrica e dei gradi di libertà, i contenitori flessibili si suddividono in:

- *Sistemi Monoassiali:* Progettati per prove su tavola vibrante monodirezionale, replicano la propagazione di onde di taglio lungo un'unica direzione orizzontale principale. Sono i più diffusi nella pratica sperimentale per studi di liquefazione bidimensionale e analisi di sito (1D);

- *Sistemi Pluriassiali:* Caratterizzati da sezioni simmetriche (quadrate, circolari o poligonali) e sistemi di vincolo incrociato, consentono il movimento dei telai in due direzioni orizzontali ortogonali (o persino in direzione verticale nei modelli avanzati), permettendo di studiare la risposta sismica sotto input multidirezionali e di valutare gli effetti di torsione ed eccentricità d'inerzia;

- *Contenitori a Elementi Indipendenti:* Varianti avanzate in cui ciascun telaio è azionato mediante attuatori controllati, particolarmente utili per imporre specifici gradienti deformativi in presenza di forti non-linearità del terreno.

1.2 DESIGN, COSTRUZIONE E MATERIALI DI UNA LSB

1.2.1 Design e Costruzione

Il design costruttivo di una LSB/ESB richiede un bilanciamento preciso tra rigidezza, massa e flessibilità (Bagheri, O. 2024): idealmente, un contenitore dovrebbe essere, a rigidezza laterale nulla nel senso del taglio, privo di massa e infinitamente rigido fuori piano.

La costruzione dei contenitori varia a seconda della tipologia, ma tutte possiedono elementi, strutturali e no, comuni:

- *Telai rigidi:* Entrambi i sistemi utilizzano una serie di anelli, telai o profilati sovrapposti realizzati mediante acciaio, fibra di vetro, alluminio o anche materiale acrilico trasparente come vedremo in seguito. Questi elementi hanno la funzione fondamentale di fornire il confinamento laterale al provino di terreno, mantenendo una condizione di deformazione laterale nulla (nota come condizione K_0) durante eccitazioni monodimensionali alla base (possono avere forma rettangolare, quadrata, circolare o poligonale);

- *Interfacce di separazione e scorrimento:* Tra un telaio rigido e l'altro è sempre presente un sistema che permette la deformazione orizzontale del contenitore. Negli ESB, questo ruolo è svolto da strati continui di materiale flessibile come gomma o neoprene, che forniscono una specifica rigidezza a taglio. Negli LSB, si utilizzano sistemi progettati per minimizzare l'attrito (come cuscinetti a rulli, Teflon, guide lineari o combinazioni di gomma e materiali plastici) affinché la resistenza laterale sia minima;

- *Base:* Funge da interfaccia rigida collegata direttamente alla tavola vibrante, il suo scopo principale è trasmettere l'eccitazione sismica dalla tavola al provino di terreno garantendo così la generazione e la propagazione verso l'alto delle onde di taglio.

Per evitare che il terreno scivoli sulla superficie del fondo durante lo scuotimento basale e per assicurare la corretta trasmissione delle tensioni di taglio, la superficie interna della base viene resa adeguatamente ruvida mediante l'utilizzo di carta abrasiva o sabbia incollata alla base.

- *Trattamento differenziato delle superfici interne*:

    - *Superfici ruvide:* La base del contenitore e le pareti di estremità (quelle ortogonali alla direzione del moto) devono essere rese ruvide per trasmettere le onde di taglio verticali

dalla tavola vibrante e per permettere lo sviluppo di tensioni di taglio complementari, necessarie a prevenire momenti ribaltanti;

- *Superfici lisce:* Le pareti laterali (quelle parallele alla direzione del moto) devono essere sufficientemente lisce da non opporre resistenza al movimento del terreno, questo è possibile grazie a strati di fogli lubrificati;

- *Membrana di contenimento:* All'interno dei telai viene generalmente inserita una membrana elastica. Questa deve avere una rigidezza prossima allo zero per non alterare la risposta del sistema, e serve a contenere il materiale del provino e il fluido interstiziale, evitandone la fuoriuscita.

1.3 PROGETTO STRICT/STRICT+

Parallelamente allo sviluppo delle tecniche di modellazione, la sperimentazione su grande scala resta un passaggio chiave per comprendere la reale risposta sismica delle strutture. In questa direzione si inserisce il progetto STRIC (International Center for Research on Sciences and Techniques of Physical, Economic and Social Reconstruction), promosso dall'Università di Camerino insieme a centri di ricerca come INFN, INGV e GSSI (University of Camerino, 2024). Il centro segue i principi del Sendai Framework adottando un approccio multidisciplinare che affianca all'ingegneria ambiti come la geofisica, le scienze sociali e il diritto.

Per l'ambito strutturale, l'elemento centrale è il laboratorio realizzato a Camerino, dotato di un impianto a doppia tavola vibrante a sei gradi di libertà. La particolarità della struttura sta nella presenza di una tavola fissa e di una mobile su un percorso di 30 metri: una soluzione unica in Europa, pensata per testare su scala reale l'effetto di azioni sismiche non sincrone su opere a grande sviluppo longitudinale, come i ponti.

Per supportare le prestazioni di questa imponente infrastruttura, è stata necessaria un'attenta

e complessa progettazione geotecnica. Le due tavole vibranti, ciascuna con una superficie di 25 metri quadrati (5x5 metri) e tarata per un carico massimo di ben 60 tonnellate, sono infatti alloggiate all'interno di una profonda fossa scavata al di sotto del livello del terreno nella grande sala prove. Per far fronte alle enormi forze in gioco durante le simulazioni sismiche e isolare le vibrazioni dal terreno circostante, i progettisti hanno ideato una massiccia fondazione in cemento armato. Sotto gli attuatori idraulici che muovono le tavole, lo spessore della platea di fondazione raggiunge il metro e mezzo. Questa enorme "massa sismica", il cui rapporto rispetto alle parti in movimento è stimato in un valore pari a 20, ha l'obiettivo cruciale di dissipare l'energia e garantire la stabilità dinamica di tutto il sistema.

L'intero apparato sperimentale, poggiato su questo blocco di fondazione, è spinto da un potente impianto idraulico capace di lavorare ininterrottamente per 72 ore. Il sistema è in grado di operare in un range di frequenze molto severo, da 0,1 a 80 Hz (con il 65% del carico), permettendo di simulare spostamenti orizzontali e verticali con picchi estremi di velocità e accelerazione per comprendere appieno il comportamento delle strutture.

CAPITOLO 2

Esempi di Tipologie di LSB nei Laboratori

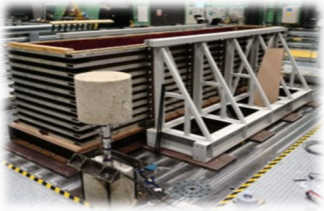
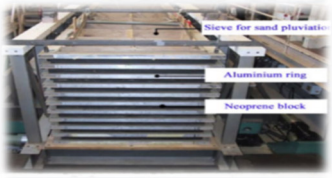
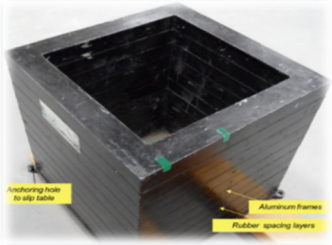
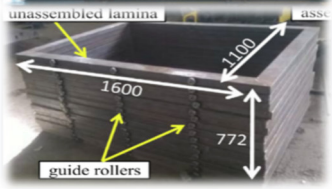
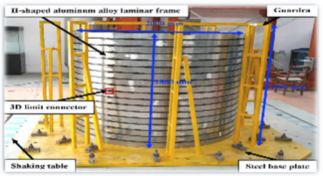
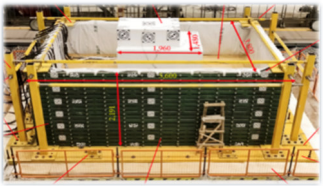
2.1 ESEMPI DI LSB

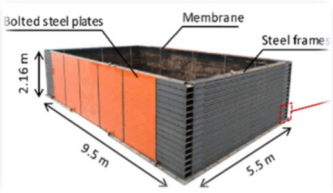
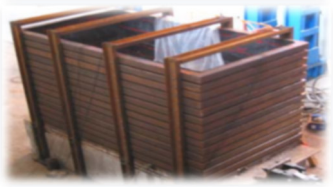
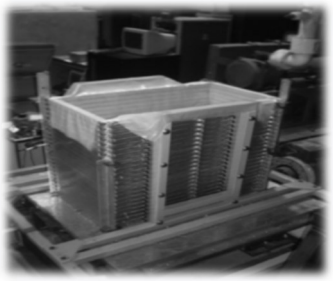
Grazie all'utilizzo della Laminar Shear Box è stato possibile analizzare diversi test dinamici complessi come la risposta sismica locale, l'interazione terreno-struttura e la liquefazione dei depositi saturi, che necessariamente richiedono un'accurata riproduzione sperimentale in laboratorio. In tale contesto, le Laminar Shear Box (LSB) e i contenitori flessibili (Flexible Shear Box) rappresentano lo stato dell'arte per i modelli fisici su tavola vibrante o in centrifuga geotecnica.

La progettazione di questi dispositivi non segue uno standard univoco, bensì si adatta alle specifiche esigenze scientifiche, alle limitazioni di carico delle attrezzature di scuotimento e alle scale geometriche dei test di ciascun centro di ricerca. Di conseguenza, l'analisi dei laboratori a livello globale rivela una straordinaria varietà di soluzioni ingegneristiche, che si differenziano principalmente per configurazione cinematica (sistemi biassiali e/o monoassiali), materiali strutturali, meccanismi di scorrimento e interazione, sistemi di sostegno del peso (telai).

In questo capitolo, come anticipato dalla Tabella 3, è illustrata una panoramica delle principali soluzioni adottate nei laboratori di ricerca a livello globale, partendo dal territorio europeo e poi estendendosi ai laboratori asiatici e americani.

Tabella 3 – Esempi di LSB/ESB e loro descrizione

Laboratorio	Immagine	Dimensioni	Materiali	Scorrimento
Università di Enna "Kore" (L.E.D.A.)		2.6m x 2.3m x 1.6m	struttura in profilati cavi in alluminio	Cuscinetti a sfera
Università di Messina – Laboratorio EUROLAB - CERESI		6,0m x 1,5m x 2,0m	struttura in profilati cavi in alluminio	strati di gomma EPDM (Etilene-Propilene-Diene Monomero) e fogli di polizene
University of Bristol (EQUALS)		versione grande: 5,0m x 1,0m x 1,2m	struttura composta da anelli in lega di alluminio a sezione cava	cuscinetti a rulli o blocchi a seconda della configurazione
University of Bristol (EQUALS)		versione media: 1,2m x 0,5m x 0,8m	struttura composta da anelli in lega di alluminio a sezione cava	cuscinetti a rulli o blocchi a seconda della configurazione
Institute of Nuclear Safety (KINS)		0,65m x 0,65 m x 0,65m	struttura in profilati in alluminio leggero	cuscinetti a sfera
Indian Institute of technology Kanpur		1,8m x 1,3m x 0,8m	struttura in profilati cavi in acciaio	cuscinetti a rulli
Sharif University of Technology (SUT)		3,05m x 1,72 m x 1,8m	struttura in profilati cavi in acciaio	cuscinetti a rulli
Cina – Tianjin University		2.00m x 1.80m (D x H)	struttura interna in profilati in alluminio leggero	cuscinetti a sfera
Cina – Southeast University – Nanjing		5.60m x 3.80m x 2.191m	struttura in profilati cavi in acciaio	cuscinetti a sfera

Cina – Tongji University - Shanghai		9.50m x 5.50m x 2.16m	struttura in profilati cavi in acciaio	cuscinetti a sfera industriali
Nanjing University of Technology + Beijing Jiaotong University		3,0m x 1,5m x 1,8m	struttura in profilati cavi in acciaio	cuscinetti collegati a un telaio esterno
Colorado Boulder University		0,7 m x 0,3m x 0,34m	struttura in profilati in acrilico trasparente	strati di gomma flessibile ad alta resistenza
University of Western Ontario		0,8m x 0,9m x 0,45m	struttura scatolare in acciaio con telai in lega di alluminio ad alta resistenza	cuscinetti a sfera

2.2 LSB IN EUROPA

Le soluzioni europee spaziano da imponenti strutture monoassiali a grande scala per lo studio di terreni in condizioni d'interazione complesse, fino a sofisticati sistemi biassiali progettati per azzerare l'attrito inter-laminare e simulare con ottima fedeltà le condizioni di "campo libero".

Nei paragrafi successivi verranno analizzate le caratteristiche tecniche e le scelte progettuali delle Laminar Shear Box in dotazione presso le Università di Enna, Messina e Bristol.

2.2.1 Italia – Università di Enna “Kore” (L.E.D.A.)

Presso l’università di Enna, in Italia, è operativa una Laminar Shear Box biassiale, appositamente sviluppata per studiare il fenomeno della liquefazione del suolo e convalidare

modelli numerici avanzati attraverso test su tavola vibrante a 1g (Figura 2).

Quest'ultima presenta una sezione trasversale rettangolare strutturata con 16 telai sovrapposti, tra uno strato e l'altro è presente un gap (distanziamento) di 20 mm, che porta l'altezza complessiva della struttura a 1600 mm. Questa configurazione è fondamentale per garantire la flessibilità delle pareti del contenitore, consentendo al sistema di seguire e assecondare le deformazioni del terreno confinato senza opporre la tipica resistenza dei contenitori rigidi (Castelli, F. et al., 2022).

Ogni singolo livello è un'unità complessa formata da due telai indipendenti: il primo interno ha dimensioni di 2570 mm x 2310 mm, mentre quello esterno è più ampio con dimensioni di 2744 mm x 2770 mm.



Figura 2 – Laminar Shear Box, University "Kore" of Enna

Questa distinzione è essenziale per consentire il movimento biassiale: i telai esterni sono progettati per muoversi lungo l'asse x, mentre quelli interni si muovono lungo l'asse y; questa configurazione previene i fenomeni di torsione che solitamente si verificano durante scuotimenti multidimensionali. Entrambi i telai sono realizzati con profili cavi in alluminio (30 x 80 mm), materiale scelto per minimizzare gli effetti di inerzia della struttura sul terreno durante il test, pur mantenendo la robustezza necessaria per il confinamento laterale.

A differenza dei modelli tradizionali, dove gli strati poggiano l'uno sull'altro, in questa LSB ogni modulo è supportato in modo indipendente tramite barre collegate a ben 180 cuscinetti lineari: i telai interni sono collegati a quelli esterni, i quali sono a loro volta ancorati a pareti rigide di contrasto in acciaio esterne alla struttura.

Il sistema di cuscinetti riduce l'attrito a valori quasi trascurabili, permettendo spostamenti fino a 150 mm in entrambe le direzioni orizzontali ed evitando che il peso e l'attrito della struttura si accumulino lungo la profondità del contenitore.

Infine, trattandosi di un'opera impiegata per lo studio della liquefazione sui terreni saturi, le pareti interne sono rivestite con una membrana in gomma elastica spessa 2 mm; oltre a garantire la perfetta tenuta idraulica, la membrana protegge i delicati meccanismi di scorrimento dalle infiltrazioni di acqua e sabbia.

2.2.2 Italia – Università di Messina – Laboratorio EUROLAB – CERESI

Presso l'Università di Messina, Italia, è presente una Laminar Shear Box (LSB) monoassiale sviluppata per simulare il comportamento del terreno sotto carichi sismici estremi (Figura 3).

Il contenitore presenta una sezione rettangolare con una lunghezza interna pari a 6 metri, una larghezza di 1,5 metri e un'altezza di 2 metri, tali proporzioni sono state specificamente calibrate per replicare condizioni di deformazione piana, un requisito fondamentale per lo studio di fenomeni come l'amplificazione del sito e la liquefazione.

Dal punto di vista strutturale, presenta un sistema di tipo flessibile, composto da 18 telai realizzati in sezioni cave rettangolari di lega di alluminio: il materiale utilizzato è stato scelto perché assicuri un'elevata rigidità (che garantisce il confinamento laterale), garantendo al contempo una grande leggerezza, necessaria per minimizzare gli effetti di inerzia del contenitore sulla risposta dinamica del terreno (Bandini, V. et al., 2019).

Tra gli anelli di alluminio sono interposti strati alternati di gomma EPDM (Etilene-Propilene-Diene-Monomero) e fogli di polizene: questa combinazione consente al contenitore di deformarsi orizzontalmente secondo un modello a "trave di taglio", replicando fedelmente il comportamento del terreno in condizioni di campo libero. Per garantire un movimento fluido e controllato, la LSB è vincolata trasversalmente tramite un telaio rigido in acciaio e un sistema di cuscinetti a rulli al fine di inibire qualsiasi movimento torsionale indesiderato durante i test.



Figura 3 – Laminar Shear Box, Università di Messina – Laboratorio EUROLAB – CERESI

Per garantire lo scorrimento lineare, il sistema è dotato di un insieme di guide composte da binari e blocchi di supporto, progettato per azzerare quasi totalmente l'attrito ed evitare oscillazioni verticali.

Una particolare attenzione è stata posta alle condizioni di interfaccia terreno-struttura: le pareti laterali interne sono rivestite con due strati lubrificati con nitruro di boro esagonale per minimizzare l'attrito con il campione di terreno, mentre il fondo e le pareti terminali sono invece rivestiti di carta abrasiva per favorire la trasmissione delle onde di taglio.

NOTA: Il sistema è movimentato da un attuatore idraulico con una corsa di ±255 mm e una capacità di carico di 32 tonnellate. Tre pompe idrauliche forniscono la potenza necessaria

per riprodurre accelerogrammi sismici reali.

2.2.3 Regno Unito – University of Bristol (EQUALS)

La LSB realizzata dall'università di Bristol è un sistema di tipo flessibile composto da 8 telai rettangolari sovrapposti realizzati in alluminio (Figura 4). Complessivamente, le dimensioni sono 5.0 m (lunghezza) x 1.0 m (larghezza) x 1.2 m (altezza). L'impiego dell'alluminio è strategico: il fine ultimo è quello di garantire un'elevata rigidezza dei singoli elementi, mantenendo al contempo una massa contenuta, fattore essenziale affinché il contenitore stesso non domini la risposta dinamica del sistema complessivo.

La connessione interlivello tra gli stessi è garantita mediante blocchi elastomerici (neoprene): questi componenti fungono da giunti flessibili che gli consentono di scorrere orizzontalmente l'uno rispetto all'altro (Castelli, F. et al., 2022); di conseguenza, la struttura è in grado di deformarsi in accordo con la propagazione delle onde di taglio del terreno, simulando efficacemente il comportamento dinamico di un semispazio infinito di terreno soggetto a scuotimento sismico. Un'ulteriore attenzione è stata posta alle pareti interne, le quali risultano rivestite con fogli di neoprene lubrificati, un accorgimento mirato a eliminare l'attrito dell'interfaccia tra il campione di sabbia e le pareti laterali del contenitore, garantendo condizioni di "deformazione piana".

Al contrario, le pareti di estremità sono state rese scabre mediante l'incollaggio di sabbia su di esse: questo trattamento assicura che le tensioni di taglio vengano trasmesse correttamente dalla tavola vibrante alla base e che le pareti di estremità interagiscano pienamente con il deposito, mantenendo la continuità delle deformazioni.

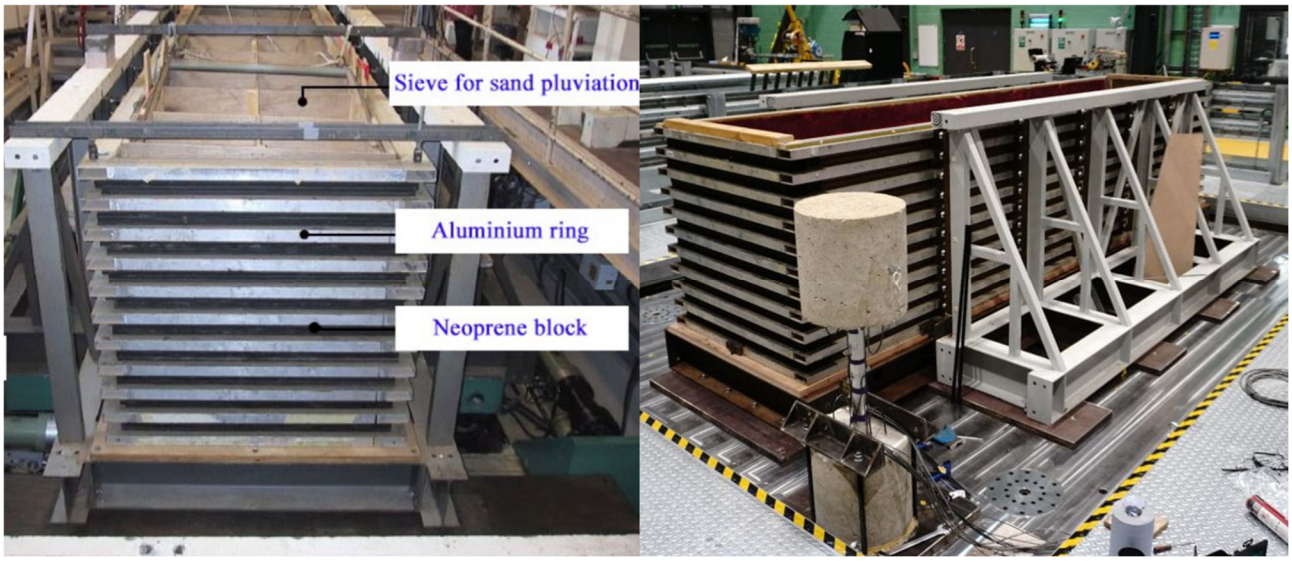


Figura 4 – Laminar Shear Box, University of Bristol

2.3 LSB IN ASIA

I laboratori di ricerca in Asia sono l'avanguardia della sperimentazione geotecnica per la mitigazione del rischio sismico. Le soluzioni sviluppate in questo continente si distinguono per due approcci principali:

- *Contenitori a deformabilità equivalente (ESB):* progettati per test in centrifuga geotecnica, in cui gli interstrati in gomma sono calibrati per mantenere una rigidezza costante, minimizzando gli effetti di bordo (Figura 5);

- *Strutture di grandi dimensioni a 1g*: grandi sistemi per tavole vibranti che utilizzano telai di sospensione esterni per scaricare il peso statico dei telai, ottimizzando la capacità di carico della tavola (Figura 6, 7, 8 e 9).

Nei paragrafi successivi verranno analizzate nel dettaglio le soluzioni sviluppate in Corea (KINS), India (IIT Kanpur), Iran (SUT) e Cina (Nanjing e Beijing Jiaotong University).

2.3.1 Korea - Institute of Nuclear Safety (KINS)

Il contenitore Equivalent Shear Beam (ESB) proposto dal KINS (Lee, S. H., et al., 2013), è stato concepito e progettato per superare i limiti dei contenitori a pareti rigide e delle tradizionali laminar Shear Box (LSB), riproducendo condizioni al contorno più realistiche durante i test geotecnici in centrifuga. Nello specifico modello, il sistema è composto da 10 telai rettangolari realizzati in lega di alluminio, un materiale scelto per garantire un'elevata resistenza meccanica pur minimizzando le forze d'inerzia proprie della struttura.

Ciascun modulo presenta un'altezza di 60 mm, lo spazio interno per il terreno è di 490 mm (lunghezza) x 490 mm (larghezza) x 600 mm (altezza) e l'elemento che conferisce il comportamento "Equivalente" della ESB è la gomma interposta tra i singoli telai, in questo caso è utilizzata una gomma siliconica/neoprene di uno spessore di 3mm tra un telaio e l'altro.

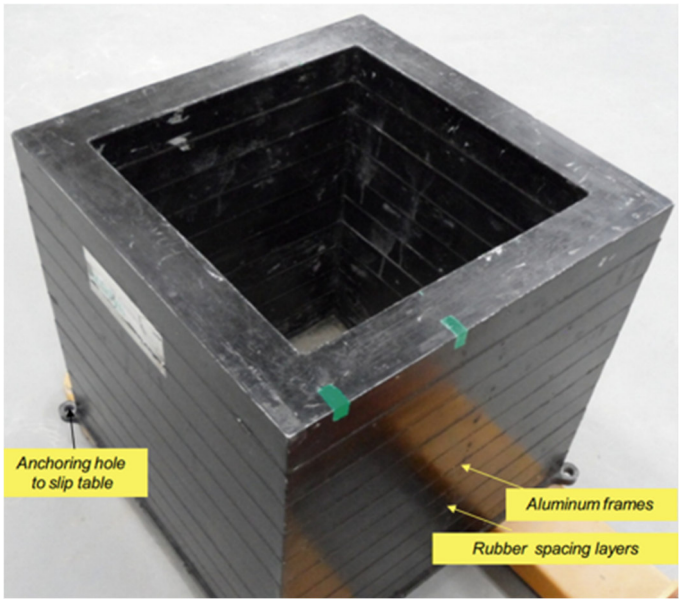


Figura 5 – Equivalent Shear Box, Institute of Nuclear Safety (KINS)

A differenza dei tradizionali sistemi LSB, questa configurazione strutturale offre un vantaggio sostanziale: consente al contenitore di mantenere una rigidezza trasversale al taglio costante, del tutto indipendente dall'accelerazione centrifuga applicata durante la

prova. Per garantire un'ottimale congruenza cinematica tra il contenitore e il modello di terreno, sulle pareti interne (in particolare quelle ortogonali alla direzione dello scuotimento) sono applicati dei fogli di materiale scabro, tipicamente carta abrasiva ad alta resistenza. Questo accorgimento garantisce un trasferimento efficiente degli sforzi di taglio dal terreno ai telai, prevenendo lo scorrimento all'interfaccia e assicurando un movimento coordinato tra sistema e deposito.

Infine, la struttura è dotata di un sistema di cuscinetti a sfera lineari collocati tra i telai, che vincola lo scorrimento al solo asse orizzontale di eccitazione, inibendo rotazioni parassite o spostamenti trasversali indesiderati che potrebbero inficiare l'affidabilità dei dati sperimentali.

2.3.2 India – Indian Institute of Technology Kanpur

La Laminar Shear Box monoassiale sviluppata presso l'IIT Kanpur (Vivek, B. et al., 2019) è stata progettata per simulare il comportamento dei depositi di terreno sotto l'azione dei terremoti, minimizzando gli effetti di riflessione delle onde ai bordi. La struttura è costituita da una serie di 15 telai indipendenti distanziati da un’intercapedine di 2 mm; il contenitore presenta un ingombro esterno di 1.792 m (lunghezza) x 1.292 m (larghezza) x 0.800 m (altezza) a fronte di una dimensione utile di 1.600m (lunghezza) x 1.100 m (larghezza) x 0.772 m (altezza).

L’ elemento distintivo del sistema è il tubolare di supporto esterno: per superare il limite di carico utile della tavola vibrante (pari a 40 kN), gli autori hanno integrato un innovativo meccanismo di scarico del peso, cioè un telaio esterno rigido in profilati d’acciaio cavi che scarica il peso proprio dei telai al di fuori della tavola vibrante, consentendo di massimizzare il volume e l'altezza del terreno testabile.

La base rigida in legno garantisce il trasferimento delle onde di taglio dalla tavola al terreno,

mentre una sottile membrana in plastica interna flessibile in plastica (spessore 0,2 mm) impedisce la fuoriuscita della sabbia attraverso le intercapedini tra i telai.

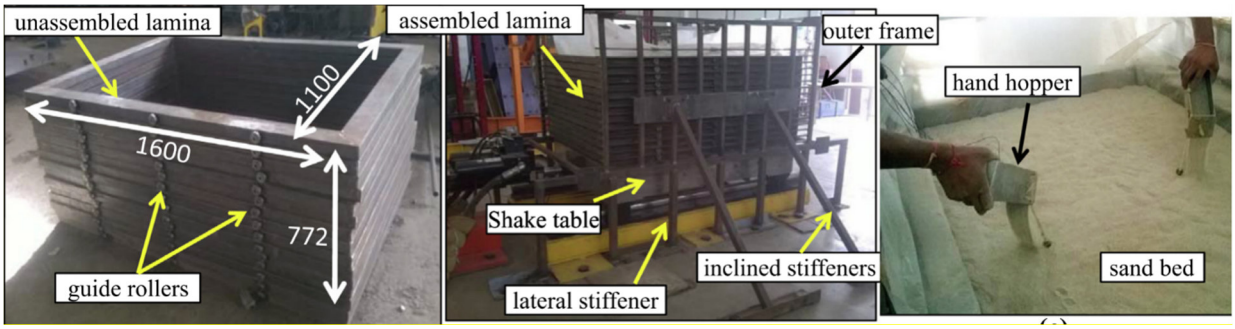


Figura 6 – Laminar Shear Box, Indian Institute of Technology Kanpur

2.3.3 Iran – Sharif University of Technology (SUT)

La Laminar Shear Box sviluppata presso la Sharif University of Technology è stata progettata per simulare la risposta cinematica e deformativa del terreno in modo nettamente più realistico rispetto ai tradizionali contenitori rigidi (Haeri, S. et al., 2023).



Figura 7 – Laminar Shear Box, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Il contenitore è stato realizzato con dimensioni di 3.05 m (lunghezza) x 1.72 m (larghezza) x 1.80 m (altezza) e la sua caratteristica costruttiva risiede nella composizione a 23 profilati in acciaio sovrapposti, ciascuno dei quali è libero di scorrere orizzontalmente rispetto a quelli adiacenti. Questo meccanismo consente al contenitore di assecondare in modo naturale il profilo di deformazione a taglio del terreno durante lo scuotimento sismico contenendo al contempo la spinta laterale, eliminando l'effetto di parete rigida.

Per assicurare una cinematica fluida e controllata, la LSB è integrata con un telaio esterno

rigido e un sistema di cuscinetti a rulli, questo al fine di inibire l'insorgenza di moti torsionali o sbandamenti laterali residui, particolarmente critici durante le fasi di liquefazione del terreno, riducendo al minimo gli effetti di bordo e l'eccessivo confinamento tipico delle pareti rigide.

2.3.4 Cina – Tianjin University

La Laminar Shear Box sviluppata e realizzata presso l'Università di Tianjin (Cina) simula l'interazione dinamica terreno-struttura sotto l'azione di input sismici tridimensionali, rendendo possibile la replica delle condizioni al contorno di un deposito libero e la minimizzazione degli effetti di bordo tipici dei contenitori rigidi o flessibili tradizionali (Lei, H., et al., 2020). Per la validazione prestazionale dell'apparato, il modello è stato sottoposto a simulazioni numeriche avanzate e a una campagna di prove su tavola vibrante presso le strutture della Tongji University di Shanghai. La scatola principale in alluminio presenta una geometria cilindrica con diametro interno di 2000 mm e un'altezza di 1800 mm (come mostrato in Figura 8), dimensioni appositamente calibrate per ospitare una colonna di terreno assecondandone le deformazioni di taglio prive di vincoli laterali rigidi.

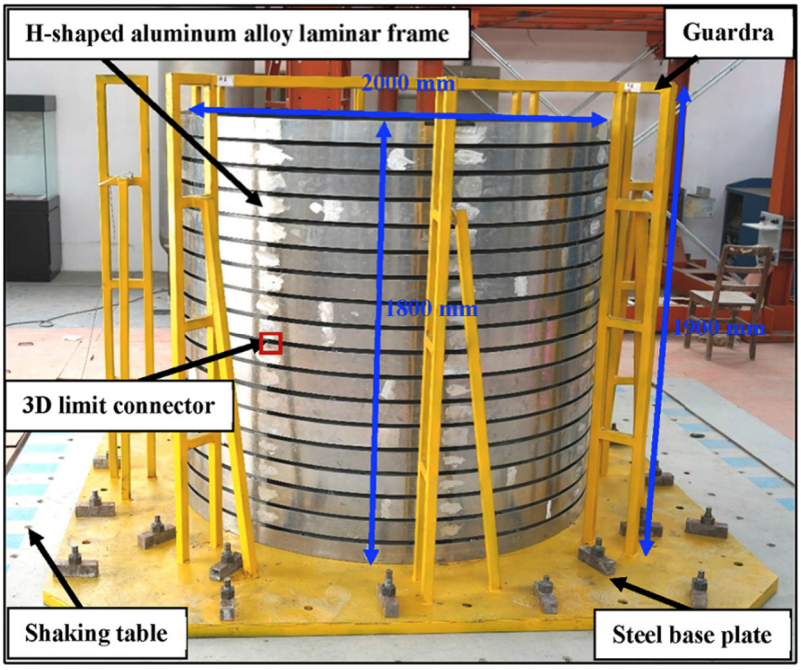


Figura 8 – Laminar Shear Box Tianjin University

L'architettura del contenitore si compone dei seguenti elementi principali:

- Piastra di base: Struttura quadrata in acciaio di dimensioni 2800 mm x 2800 mm con uno spessore di 100 mm, progettata per sostenere l'intero peso del sistema e garantire l'ancoraggio rigido alla tavola vibrante;

- Telai con profilati ad H: 18 telai ad anello sovrapposti lungo lo sviluppo verticale dell'involucro, aventi una sezione trasversale ad H di 80 mm x 80 mm e uno spessore del profilato pari a 5mm;

- Guardrail di sicurezza: 8 elementi rigidi verticali alti 1900 mm, saldati a distanze regolari lungo il perimetro della piastra di base con la funzione di contenere eventuali spostamenti orizzontali eccessivi del contenitore durante le fasi di picco vibratorio;

- Connettori di limite 3D: 144 dispositivi articolati ad alta precisione, aventi ciascuno un'altezza di 95 mm, interposti tra i telai adiacenti;

- Membrana elastica: Una guaina interna in gomma con uno spessore di 2 mm, incollata lungo la parete interna dei telai per impedire la fuoriuscita di acqua e granuli di terreno senza ostacolare i movimenti di taglio relativi tra i vari strati.

La scelta dei materiali da costruzione risponde a un preciso bilanciamento tra la rigidità flessionale dei singoli elementi e il contenimento delle masse d'inerzia dell'intera struttura. Per la realizzazione dei 18 profilati è stata adottata una lega di alluminio, la quale garantisce un'elevata rigidità strutturale alle pareti pur mantenendo contenuto il peso di ciascun anello (circa 16 kg).

Il vero elemento di innovazione tecnologica della LSB risiede nei 144 connettori di limite 3D, disposti in gruppi di 8 a intervalli equidistanti tra l'anima del telaio superiore e quella inferiore di ogni coppia di telai adiacenti. Questi dispositivi funzionano come

snodi/cuscinetti articolati a bassissimo attrito, caratterizzati da un coefficiente di attrito <0,01, consentendo scorrimenti di taglio in tre direzioni dello spazio: due direzioni orizzontali ortogonali nel piano, con un'escursione massima di +/- 5mm e una direzione verticale (con una tolleranza di 5 mm).

2.3.5 Cina – Southeast University – Nanjing

La Southeast University ha progettato un'innovativa scatola di taglio laminare multidirezionale su larga scala (come riportato in Figura 9), concepita specificamente per essere interfacciata con una tavola vibrante tridimensionale (3D). L'obiettivo ingegneristico di tale apparato è mitigare l'effetto di bordo, consentendo così di simulare fedelmente le condizioni di un dominio semi-infinito di un sito (Feng, D., et al., 2025). La calibrazione dimensionale è stata sviluppata per massimizzare le capacità operative della tavola vibrante e per riflettere la necessità di ospitare modelli di fondazioni profonde e strutture di grandi dimensioni.

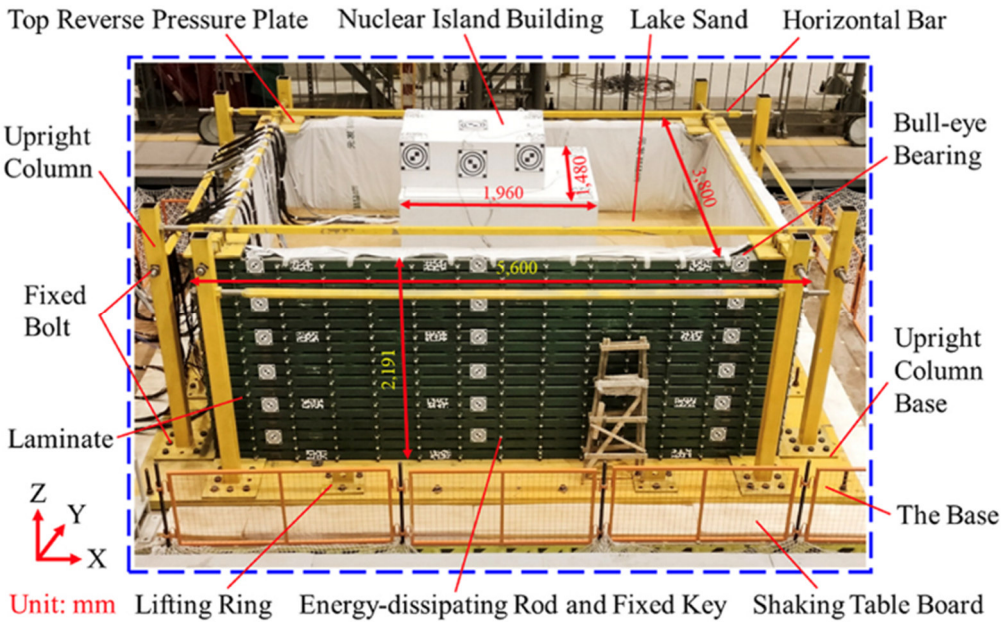


Figura 9 – Laminar Shear Box Southeast University – Nanjing

L'infrastruttura presenta le seguenti geometrie: lunghezza interna di 5600 mm, larghezza di 3800 mm e altezza di 2191 mm, un peso a vuoto di circa 30 tonnellate e una capacità di

accogliere fino a 80 tonnellate di terreno di prova. Strutturalmente, si compone di 18 telai indipendenti realizzate mediante tubi in acciaio cavi a sezione rettangolare, una scelta che assicura un elevato momento d'inerzia flessionale, limitando il peso complessivo.

Il cinematismo multidirezionale è garantito dall'uso di speciali cuscinetti sferici ("bull-eye bearings") interposti tra i telai, che consentono a ciascun telaio di rotolare liberamente sul piano orizzontale in ogni direzione (assi X e Y) per assecondare le deformazioni di taglio indotte dal sisma. La mobilità è regolata da specifici anelli di finecorsa, mentre sul perimetro esterno sono disposte 44 barre dissipative di energia, la cui rigidezza è tarabile in base alle proprietà del terreno. A completamento del sistema, la struttura è dotata di supporti protettivi periferici esterni e di una robusta base di ancoraggio, progettati per preservare l'integrità dell'intera apparecchiatura durante le simulazioni sismiche estreme sulla tavola vibrante.

2.3.6 Cina – Nanjing University of Technology + Beijing Jiaotong University

L'obiettivo principale della LSB presente alla Nanjing University of Technology, in Cina, è quello di superare i limiti dei tradizionali contenitori rigidi tradizionali, simulando in laboratorio il comportamento di un deposito di terreno semi-infinito soggetto alla propagazione verticale di onde sismiche (Chunxia, H., et al., 2008).

Dal punto di vista strutturale, il contenitore è composto da 15 tubolari indipendenti rettangolari rigidi in acciaio, realizzati con tubi quadrati saldati (100 x 100 x 3 mm) per garantire un'elevata rigidezza flessionale ed evitare distorsioni sotto carico (Figura 10). Un elemento fortemente innovativo del progetto risiede nel sistema di sostentamento: i telai non poggiano l'uno sull'altro né scaricano la propria massa direttamente sulla tavola vibrante; ogni telaio è infatti supportato individualmente da una struttura esterna. Tale scelta progettuale trasferisce il peso proprio della cassa al di fuori della tavola vibrante, ottimizzando la capacità di carico utile dell'impianto dinamico. Con dimensioni interne di

3,00 m (lunghezza) × 1,50 m (larghezza) × 1,80 m (altezza), il contenitore offre un volume adeguato a test su grande scala.

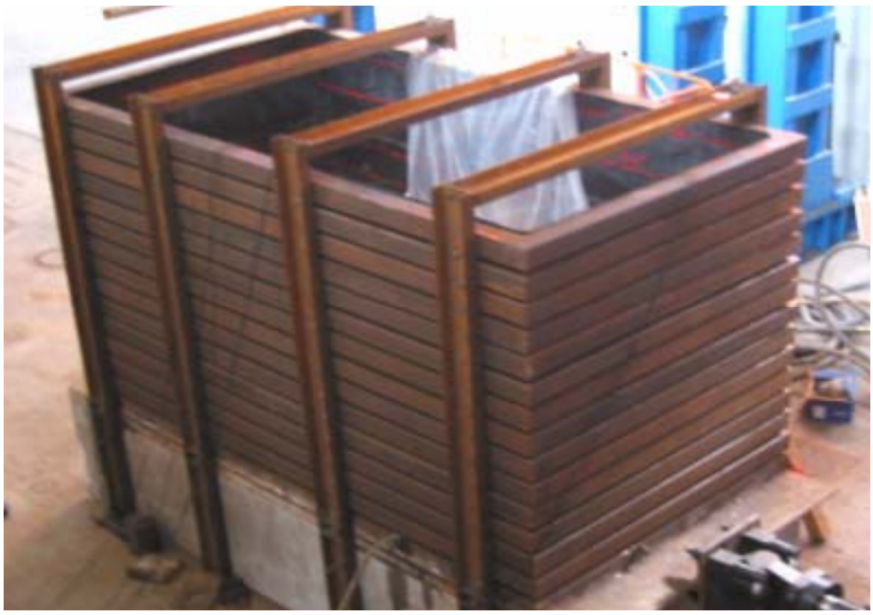


Figura 10 – Laminar Shear Box, Nanjing University of Technology, Nanjing. China

Il corretto comportamento cinematico della struttura dipende in gran parte dai cuscinetti interposti tra i telai e la struttura esterna, progettati per minimizzare l'attrito e facilitare lo scorrimento relativo tra i telai adiacenti. Grazie a questa configurazione, il contenitore acquisisce una flessibilità tale da consentire al terreno di deformarsi secondo il modello "trave di taglio" (shear beam), riproducendo fedelmente il comportamento naturale del suolo sotto sforzo sismico.

L'impermeabilizzazione, indispensabile per le prove su sabbie sature, è garantita da un rivestimento interno costituito da sottili fogli di lattice flessibile, capaci di trattenere l'acqua e il terreno senza vincolare la deformabilità del contenitore. Infine, la base del contenitore è costituita da una piastra in acciaio di 15 mm di spessore, rivestita con sabbia grossolana incollata tramite resina epossidica per incrementare l'attrito all'interfaccia terreno-struttura ed evitare scorrimenti indesiderati.

2.3.7 Cina – Tongji University – Shanghai

Il contenitore laminare impiegato e realizzato dalla Tongji University a Shanghai ha dimensioni interne pari a 9.50 m (lunghezza) x 5.50 m (larghezza) x 2.16 m (altezza) ed è costituito da una gabbia modulare formata da 16 telai in acciaio sovrapposti (figura 11b).

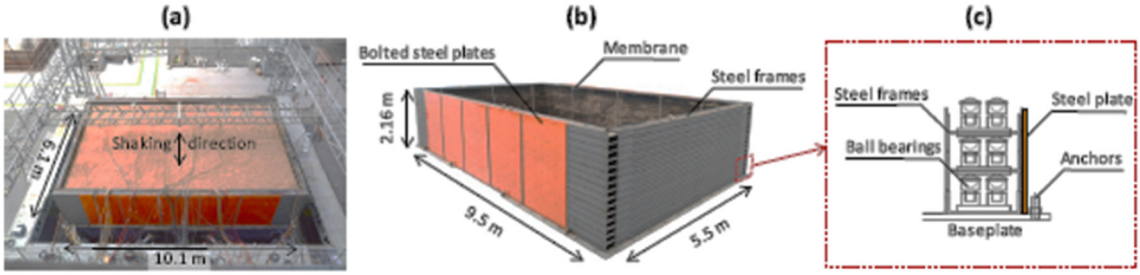


Figura 11 – Laminar Shear Box – Tongji University – Shanghai

Al fine di garantire un movimento lineare nella direzione dello scuotimento sismico, tra i vari telai sono stati inseriti cuscinetti a sfera (Figura 11c), che riducono drasticamente l'attrito meccanico.

Per conferire stabilità strutturale laterale e impedire spostamenti torsionali, nella direzione perpendicolare al moto sono state imbullonate due sottili piastre in acciaio dello spessore di 3 mm, in seguito viene posta una membrana flessibile di tenuta all'interno della struttura scatolare al fine di evitare fuoriuscite durante i cicli sismici.

Ulteriori punti importanti sono le piastre di base e gli ancoraggi: le piastre di base rappresentano l'elemento strutturale di zavorra e raccordo inferiore tra le pareti perimetrali e le colonne centrali, mentre gli ancoraggi fissano rigidamente la base della cassa laminare e le piastre d'acciaio di riscontro per la direzione trasversale alla piastra di base della tavola vibrante multidirezionale.

2.4 LSB IN AMERICA

La ricerca sperimentale nel continente americano si caratterizza per l'innovazione tecnologica e l'integrazione di sistemi diagnostici avanzati. La filosofia di progettazione si

concentra su due filoni fondamentali:

- *Trasparenza e flessibilità:* l'uso di telai in acrilico trasparente accoppiati a giunti elastomerici, che consentono sia di calibrare la risposta dinamica del contenitore sia di monitorare visivamente l'evoluzione delle deformazioni del terreno (Figura 12).

- *Ingegnerizzazione di precisione:* soluzioni studiate per tavole vibranti di minori dimensioni, volte ad azzerare l'attrito inter-lamina tramite cuscinetti lineari ad alta precisione e membrane flessibili a spessore ridotto (Figura 13).

Di seguito verranno analizzati i casi studio della Colorado Boulder University (USA) e della University of Western Ontario (Canada)

2.4.1 Colorado – Colorado Boulder University

La Laminar Shear Box presente presso la Colorado Boulder University, in Colorado, è composta da una pila verticale di quattro telai rettangolari realizzati in acrilico trasparente (come riportato in Figura 12), la scelta di questo materiale è il punto chiave ed è fondamentale, poiché la sua trasparenza consente ai ricercatori di monitorare visivamente, anche attraverso tecniche di analisi dell'immagine, le deformazioni interne del terreno e le interazioni terreno-struttura durante il test (Ghayoomi, M., et al., 2013). Ogni profilato presenta un'altezza di circa 71 mm, delineando, insieme alla base, un volume di prova utile pari a 0.698 m (lunghezza) x 0.305 m (larghezza) x 0.338 m (altezza).



Figura 12 – Laminar Shear Box, Colorado Boulder University

La flessibilità della struttura è garantita dall'interposizione di strati in gomma sintetica (neoprene ad alta resistenza) spessi circa 13 mm, collocati tra i telai in acrilico. Tali strati di gomma non solo garantiscono la tenuta idraulica necessaria per i test su terreni saturi (grazie all'incollaggio con resina epossidica), ma sono stati calibrati per conferire al contenitore una frequenza naturale estremamente bassa. Quest' ultima caratteristica è essenziale affinché la rigidezza laterale del contenitore non interferisca con quella del campione di terreno, specialmente quando quest'ultimo tende a rammollirsi o a liquefarsi sotto scuotimento.

2.4.2 Canada – University of Western Ontario

La Laminar Shear Box progettata dalla University of Western Ontario è stata ideata per l'impiego su tavole vibranti di piccole dimensioni (visibile in Figura 13), rappresenta una soluzione ingegneristica per simulare la propagazione delle onde di taglio verticali attraverso uno strato di terreno (Turan, A., et al., 2008): la sua efficacia risiede in un equilibrio meticoloso tra leggerezza strutturale, precisione meccanica e scelta dei materiali.

La struttura è concepita come una shear box laminare monoassiale, composto da una pila di 24 telai orizzontali in alluminio di dimensioni 0.807 m (lunghezza) x 0.900 m (larghezza) x0.450 m (altezza). L' elemento maggiorente innovativo risiede nell' adozione di un telaio

esterno di supporto indipendente: a differenza delle configurazioni tradizionali, il peso del contenitore non grava interamente sulla tavola vibrante; il telaio esterno sostiene infatti il peso dei telai, permettendo alla tavola di "spostare" solo la massa inerziale del terreno e del telaio stesso. Questo accorgimento tecnico risolve il limite di carico tipico delle tavole vibranti di minori dimensioni, minimizzando al contempo le forze d'inerzia.

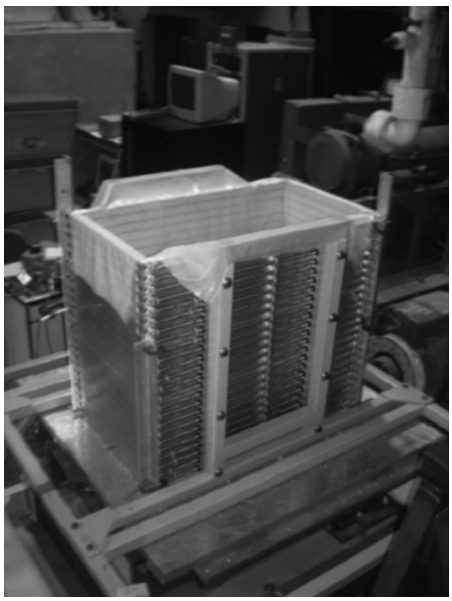


Figura 13 – Laminar Shear Box, The University of Western Ontario

Per garantire che il contenitore si comporti in modo flessibile, i telai in alluminio devono potersi muovere con il minimo attrito possibile, a tale scopo il sistema prevede 96 cuscinetti lineari a sfere ad alta precisione (quattro per ogni telaio), che scorrono su aste di guida in acciaio inossidabile; tra un telaio e l'altro è mantenuto un gioco di 2 mm per evitare contatti diretti; grazie a questa configurazione, la forza d'attrito misurata per ogni singolo telaio è estremamente bassa (Turan, A., et al., 2008).

Infine, la tenuta del campione di terreno è assicurata da una membrana interna in lattice dello spessore di soli 0,2 mm, tale rivestimento impedisce la fuoriuscita di materiale senza introdurre una rigidezza parassita apprezzabile, consentendo alla struttura di assecondare liberamente le deformazioni del terreno.

CAPITOLO 3

Materiali di Realizzazione

3.1 LE COMPONENTI DI UNA LAMINAR SHEAR BOX

La Laminar Shear Box nei suoi elementi costitutivi consente di comprendere come diversi sottosistemi meccanici interagiscano per trasformare un volume finito di terreno confinato in laboratorio in un modello ideale di continuo semi-infinito.

Dal punto di vista dell'ingegneria strutturale e meccanica, una LSB non è un semplice contenitore, ma un sistema cinematico articolato destrutturabile in quattro sezioni principali (Bagheri, O., et al., 2024):

- una pila di lamine, cioè una serie di telai orizzontali indipendenti, impilati verticalmente l'uno sull'altro;
- un sistema di scorrimento composto da strati di cuscinetti a rulli/sfere o guide a bassissimo attrito interposti tra un anello e l'altro, che permettono alle lamine di scivolare orizzontalmente;
- una membrana interna, cioè un rivestimento flessibile (spesso in lattice o gomma) che contiene il terreno, i fluidi di saturazione e previene le perdite;
- un telaio di reazione esterno, ovvero una struttura fissa che confina il sistema e supporta gli elementi meccanici e i carichi verticali

Durante l'applicazione di un sisma alla base, gli anelli slittano lateralmente l'uno rispetto all'altro. Questo movimento consente al terreno di deformarsi per taglio, replicando accuratamente la cinematica di un deposito di terreno infinito in campo aperto (condizioni monodimensionali o bidimensionali).

3.1.1 Progettazione di una Laminar Shear Box

Progettare una Laminar Shear Box è un problema ingegneristico sfidante, la scatola richiede compromessi complessi, deve essere contemporaneamente "invisibile" per la dinamica del terreno, ma "indistruttibile" per le pressioni statiche, in particolare, il design della stessa deve affrontare tre aspetti strutturali fondamentali:

- *Il principio Inerziale:* la massa del contenitore deve essere la più bassa possibile per evitare che la sua inerzia condizioni il movimento del terreno e aggiunga uno smorzamento parassita al sistema;

- *Il principio del Confinamento:* nonostante debbano essere leggeri, i singoli anelli non devono inflettersi o "spanciare" sotto l'elevata spinta laterale del terreno (pressioni orizzontali), mantenendo le rigorose condizioni di spinta a riposo (K_0);

- *Il principio del Carico:* l'intero dispositivo, che può superare la tonnellata di peso a causa del terreno saturo, poggia spesso su tavole vibranti con capacità di azione e di carico limitate, richiedendo strategie per deviare i pesi morti.

Per soddisfare questi requisiti diametralmente opposti, non esiste un singolo materiale in grado di assolvere a tutte le funzioni (Esmaeilpour, P., et al., 2023), e quindi la costruzione di una Laminar Shear Box richiede un'architettura ibrida, dove ogni componente viene scelto per una specifica funzione strutturale.

3.2 STRUTTURA PORTANTE DI UNA LAMINAR SHEAR BOX

Nelle prove di laboratorio e nelle simulazioni avanzate (come i test su tavola vibrante o in centrifuga), la scelta dei materiali per la realizzazione di contenitori, telai e modelli strutturali è un fattore determinante per l'accuratezza dei risultati. Analizzando le scelte progettuali di diversi centri di ricerca internazionali, notiamo come alluminio e acciaio rappresentino le

due tipologie di materiali preferenziali, grazie alle loro proprietà fisico-meccaniche nettamente distinte e complementari:

Le leghe di alluminio sono caratterizzate da una bassa densità (circa 2700 kg/m^3) abbinata a un eccellente rapporto rigidezza-peso e a un modulo elastico di circa 69 GPa (Tsai, C.-C., et al., 2021). Queste proprietà rendono l'alluminio la scelta ideale quando si necessita di ridurre al minimo la massa in movimento e le forze d'inerzia parassite, garantendo al contempo la rigidezza necessaria per confinare il terreno senza deformazioni indesiderate.

L'acciaio (strutturale e ossidabile) possedendo una densità elevata (circa 7850 kg/m^3), un alto modulo di Young (approssimativamente 210 GPa) ed elevate resistenze a trazione e snervamento (Ghimire, P., 2024), risulta perfetto quando si tratta di costruire strutture portanti massicce, componenti meccanici di precisione e sistemi ad altissima resistenza all'usura e alla corrosione.

La combinazione strategica di questi due materiali consente di bilanciare perfettamente la risposta dinamica e la stabilità strutturale delle apparecchiature.

3.2.1 Strutture in Alluminio

L'impiego dell'alluminio e delle sue leghe nella modellazione geotecnica risponde a una serie di sfide sperimentali molto rigorose, analizzando le scelte progettuali di diversi centri di ricerca internazionali, le ragioni che rendono questo materiale imprescindibile si possono raggruppare nelle tre grandi categorie di seguito riportate:

3.2.1.1 Minimizzazione delle forze d'inerzia – Il principio del contenitore invisibile

La sfida principale nei test sismici o dinamici è evitare che il contenitore stesso condizioni il comportamento del terreno e, grazie al suo eccezionale rapporto rigidezza-peso, l'alluminio permette di creare strutture di contenimento dalla massa estremamente ridotta.

Come evidenziato dalle Università di Enna "Kore" (Castelli, F. et al., 2022), Messina (Bandini, V. et al., 2019), Bristol (Castelli, F. et al., 2022), e dall'istituto coreano KINS-KAIST (Lee, S. H., et al., 2013), alleggerire i telai (arrivando a pesare solo circa 12 kg per livello nel caso di Enna) significa abbattere drasticamente le forze inerziali residue e lo smorzamento artificiale. In questo modo, si evita che la massa della struttura influenzi eccessivamente la risposta dinamica, garantendo che i dati riflettano il reale comportamento del terreno con fattori di correzione dell'accelerazione che sfiorano l'unità (0,998).

3.2.1.2 Rigidezza flessionale e confinamento (il mantenimento delle condizioni K0)

Nonostante l'esigenza di leggerezza, i confini del modello devono risultare meccanicamente indeformabili e l'alluminio garantisce un'elevata rigidezza flessionale nel piano, una caratteristica fondamentale per assicurare il rigoroso confinamento laterale e riprodurre le condizioni di spinta a riposo (K_0) del terreno.

Questa rigidità assolve a diversi compiti cruciali:

- *Contrasta le deformazioni*: Come sottolineano dai centri di ricerca di Bristol (Castelli, F. et al., 2022), e Messina (Bandini, V. et al., 2019), impedisce alle pareti di deformarsi sotto la spinta del terreno;

- *Trasferisce il moto in modo puro*: Il centro della Colorado Boulder University (Ghayoomi, M., et al., 2013) evidenzia come l'alto modulo di Young permetta alla piastra di base di trasferire l'input sismico al modello senza flettersi;

- *Resiste ad altissime accelerazioni*: Sfruttando la leggerezza della lega, è possibile aumentare gli spessori (come i profilati da 80 mm usati dal KINS) per prevenire fenomeni di spanciamento laterale anche sotto spinte centrifughe estreme, fino a 100 g (Lee, S. H., et al., 2013);

- *Elimina le torsioni*: L'uso di specifici profilati scatolati o doppi telai concentrici (come proposto dall' Università di Enna e University of Western Ontario) previene le deformazioni flessibili laterali e garantisce un moto biassiale puro (Castelli, F. et al., 2022 e Turan, A., et al., 2008).

3.2.1.3 Rispetto delle leggi di scala, lavorabilità e durabilità

L'alluminio si rivela strategico non solo per i contenitori, ma anche per i modelli fisici delle fondazioni: la Sharif University of Technology, ad esempio, lo sceglie per simulare i pali di fondazione: il modulo elastico della lega T6061 (69 GPa), pari a circa un terzo di quello dell'acciaio, permette di rispettare le stringenti leggi di scala per la rigidezza flessionale del palo prototipo. Questo si ottiene mantenendo spessori della parete sufficientemente ampi da poter essere lavorati e strumentati facilmente con la sensoristica.

Infine, le leghe di alluminio offrono notevoli vantaggi pratici per la vita del modello:

- *Durabilità:* L'anodizzazione (sfruttata dalla Colorado Boulder University) protegge le superfici dalla corrosione innescata dai fluidi di saturazione del terreno (Ghayoomi, M., et al., 2013);

- *Versatilità costruttiva*: Elementi di supporto in alluminio, come gli angolari a "L" (sfruttati dalla University of Western Ontario), risultano perfetti per mantenere l'allineamento geometrico e bloccare temporaneamente i telai durante le delicate e gravose fasi di compattazione del provino (Turan, A., et al., 2008).

In sintesi, l'alluminio è il materiale di elezione perché è l'unico in grado di conciliare due esigenze apparentemente opposte: l'invisibilità inerziale richiesta dalla dinamica e l'assoluta indeformabilità richiesta dalla statica.

3.2.2 Strutture in Acciaio

L'impiego dell'acciaio, nelle sue varianti strutturali e inossidabili, svolge un ruolo complementare e altrettanto cruciale rispetto all'alluminio nella progettazione dei dispositivi per la modellazione geotecnica. Se l'alluminio viene scelto per la sua "invisibilità" inerziale, l'acciaio è impiegato per la sua massiccia capacità portante, l'estrema rigidezza e la resistenza meccanica (Tsai, C.-C., et al., 2021).

Raggruppando e analizzando le scelte progettuali dei vari istituti di ricerca, l'utilizzo dell'acciaio risponde a tre funzioni ingegneristiche fondamentali di seguito riportate:

3.2.2.1 Ottimizzazione dei carichi e supporto strutturale (Il telaio di reazione)

Nei test su tavola vibrante, la capacità di spinta degli attuatori è spesso un fattore limitante. L'acciaio viene strategicamente utilizzato per costruire robusti telai esterni che "scaricano" il peso morto del contenitore, massimizzando il carico utile destinato al terreno:

- *Bypass del tavolo sismico:* L'Indian Institute of Technology di Kanpur (Vivek, B. et al., 2019), la University of Western Ontario (Turan, A., et al., 2008), la Nanjing University e la Beijing Jiaotong University (Chunxia, H., et al., 2008) utilizzano telai portanti in acciaio strutturale per trasferire l'intero peso della cassa esternamente (es. sul pavimento del laboratorio). Questo accorgimento è vitale quando le tavole vibranti hanno capacità limitate (come i 40 kN di Kanpur o i 3000 N canadesi);

- *Fondazioni inattaccabili:* L'Università di Enna "Kore" ed entrambe le università cinesi (Nanjing University of Technology e Beijing Jiaotong University) impiegano pesanti piastre di base in acciaio (spesse fino a 20 mm) e travi di rinforzo (come le HEB240 a Enna). Questa massa crea un vincolo di base perfettamente rigido che trasferisce l'accelerazione in modo puro, assorbendo i carichi verticali ed eliminando le vibrazioni parassite trasmesse dai martinetti (Castelli, F. et al., 2022 e Chunxia,

H., et al., 2008).

3.2.2.2 Contenimento delle spinte estreme e controllo cinematico

I modelli geotecnici generano pressioni laterali significative che potrebbero superare la resistenza a rottura di materiali leggeri ma poco tenaci; l'acciaio fornisce la robustezza necessaria per governare queste forze mantenendo il corretto regime di deformazione del terreno.

- *Robustezza:* La Sharif University of Technology evidenzia come i telai in acciaio siano essenziali per sopportare le pressioni originate da oltre 10 tonnellate di terreno saturo; analogamente, la Nanjing University of Technology e la Beijing Jiaotong University utilizzano telai saldati spessi 3 mm per evitare distorsioni locali, garantendo che il modello si muova fluidamente simulando una deformazione a taglio (Haeri, S. et al., 2023 e Chunxia, H., et al., 2008);

- *Prevenzione delle rotazioni residue*: L'Università di Messina affida all'acciaio del telaio trasversale il compito di contenere la spinta dinamica, guidando il movimento e bloccando sul nascere qualsiasi torsione indesiderata del contenitore (Bandini, V. et al., 2019);

- *Equilibrio degli sforzi*: La Colorado Boulder University adotta un approccio microstrutturale, impiegando barrette filettate ad alta resistenza per applicare tensioni di taglio complementari sulle pareti di estremità, impedendo fisicamente al terreno di distaccarsi dalla scatola durante lo scuotimento (Ghayoomi, M., et al., 2013).

3.2.2.3 Componentistica di precisione e minimizzazione dell'attrito

Oltre alle strutture portanti, l'acciaio, in particolare quello inossidabile e rettificato, è il materiale maggiormente utilizzato per le parti meccaniche mobili, dove la scorrevolezza è il punto fondamentale. Alcuni esempi possono essere:

- *Guide e cuscinetti:* La University of Western Ontario e l'IIT Kanpur utilizzano aste di guida in acciaio inossidabile e cuscinetti a rulli. L'acciaio inox non solo previene l'inflessione sotto i carichi trasversali, ma abbatte l'attrito a valori irrisori (coefficiente d'attrito $\mu = 0.0112$), garantendo un moto unidirezionale netto e resistendo all'usura nel tempo (Vivek, B. et al., 2019);

- *Zavorre e masse aggiunte:* Quando è necessario introdurre artificialmente la massa (anziché toglierla), l'acciaio è la soluzione progettuale migliore. I ricercatori iraniani della Sharif University utilizzano zavorre metalliche da 12 kg per simulare il peso delle sovrastrutture sui pali, permettendo di studiare la delicata interazione tra le forze inerziali della struttura e gli effetti cinematici del terreno (Haeri, S. et al., 2023).

In conclusione, mentre l'alluminio si muove con il terreno, l'acciaio simula l'infrastruttura rigida e sicura che rende possibile quel movimento, confinando pressioni elevate e guidando la meccanica con precisione millimetrica.

3.3 MATERIALI POLIMERICI E SISTEMI A BASSISSIMO ATTRITO

La progettazione avanzata delle LSB/ESB richiede un bilanciamento tra la resistenza strutturale dei telai metallici e la gestione meccanica dei vincoli di bordo: per tradurre in un modello fisico fedele la complessa interazione sismica tra la struttura di contenimento e il terreno, ci si affida a due pilastri fondamentali: da un lato, l'impiego di materiali polimerici ed elastomerici capaci di coniugare tenuta idraulica, smorzamento e modulazione della rigidezza; dall'altro, l'adozione di sistemi a bassissimo attrito e componenti di guida indipendente progettati per azzerare le resistenze parassite interstrato.

Le sezioni seguenti approfondiscono queste specifiche scelte progettuali, suddividendo le metodologie adottate dai principali centri universitari internazionali in base al loro approccio funzionale e ai materiali impiegati per ottimizzare la risposta dinamica complessiva.

3.3.1 Materiali Polimerici ed Elastomeri per la Trave Flessibile

Al fine di riprodurre in laboratorio il comportamento di un deposito di terreno in condizioni di campo libero (free-field), la struttura di contenimento deve possedere una duplice proprietà: garantire un elevato confinamento laterale, sia statico sia dinamico (condizione K_0), ed esibire al contempo una flessibilità a taglio tale da non ostacolare o alterare la propagazione delle onde sismiche.

In questo delicato equilibrio meccanico, i materiali polimerici ed elastomerici non sono semplici elementi accessori, ma veri e propri componenti strutturali e funzionali critici. L'analisi comparativa delle metodologie adottate da alcuni dei principali centri di ricerca internazionali (come l'Università di Enna Kore in Italia, l'Università di Messina, la University of Bristol nel Regno Unito, il KAIST in Corea del Sud e l'IIT Kanpur in India) evidenzia come l'impiego di polimeri, gomme sintetiche e resine sia guidato da motivazioni rigorose legate al comportamento dei terreni saturi, alla meccanica dei continui e alla dinamica delle strutture.

3.3.2 Polimeri: Tenuta Idraulica e Interazione

Nelle prove dinamiche avanzate, in particolare quelle mirate allo studio della liquefazione dei terreni sabbiosi saturi, il contenitore deve assolvere a una funzione imprescindibile: la tenuta idraulica. I telai, per consentire lo scorrimento relativo tra i vari livelli, presentano necessariamente delle intercapedini (gap). La presenza di acqua in pressione e di particelle fini di terreno richiede l'impiego di membrane polimeriche interne continue che permettono l’isolamento della struttura senza comprometterne la mobilità.

Un esempio emblematico è rappresentato dal sistema L.E.D.A. dell'Università di Enna Kore e dal contenitore della University of Bristol (Castelli, F. et al., 2022), dove si utilizzano membrane in gomma ad elevata elasticità (spesse appena 2 mm). La scelta di uno spessore

così ridotto non è casuale: essa risponde alla necessità di evitare il cosiddetto effetto membrana, ovvero l'insorgenza di una rigidezza parassita non desiderata che altererebbe la risposta dinamica del provino di sabbia. La membrana deve essere sufficientemente elastica da seguire passivamente le grandi deformazioni a taglio del terreno senza opporre resistenza flessionale, agendo al contempo come barriera impermeabile e protettiva per impedire ai grani di sabbia di infiltrarsi nei meccanismi di guida (cuscinetti lineari o giunti).

3.3.3 Rigidezza e Materiali Assorbenti

Le università e i centri di ricerca si distinguono in base all'approccio con cui integrano i materiali polimerici ed elastomerici per governare la deformazione a taglio:

3.3.3.1 Approccio a Interstrati Elastomerici Discreti

Nei laboratori orientati alla filosofia dell'Equivalent Shear Box, come nel caso del Regno Unito (Bristol/EQUALS), della Corea del Sud (KAIST/KINS), del Canada (University of Western Ontario) e della Colorado Boulder University (USA), l'obiettivo primario è che la rigidezza a taglio globale del contenitore sia pari a quella della colonna di terreno racchiusa al suo interno.

Per raggiungere tale scopo, vengono interposti tra i telai metallici leggeri (in lega di alluminio) blocchi o strati continui di elastomeri, come il neoprene o la gomma elastica (ad esempio, i 9 strati da 3 mm del modello KAIST).

La motivazione ingegneristica risiede nella capacità di questi materiali polimerici di fornire lo smorzamento dinamico e la flessibilità elastica necessari e controllati. In questo modo si evitano le discontinuità e si riduce drasticamente la riflessione spuria delle onde sismiche dalle pareti verso l'interno del modello.

Nelle configurazioni centrifughe (come al KAIST), l'uso combinato di guide meccaniche e interstrati elastomerici permette di mantenere costante la rigidità dinamica della gomma

anche sotto elevate accelerazioni centrifughe, impedendo lo schiacciamento verticale dei giunti (Lee, S. H., et al., 2013).

3.3.3.2 Approccio a Scorrimento Meccanico Indipendente con Fogli a Basso Attrito

Diverso è l'approccio adottato da laboratori che prediligono telai rigidi disaccoppiati su cuscinetti, come l'Università di Messina (EUROLAB-CERESI), IIT Kanpur, Sharif University of Technology e l'Università di Enna Kore.

In questi sistemi, la flessibilità a taglio è garantita dallo scorrimento meccanico su guide o cuscinetti, ma l'ausilio dei polimeri rimane fondamentale: a Messina vengono impiegati fogli intermedi in polizene (polietilene ad alta densità e ad altissimo peso molecolare) posizionati tra gli anelli strutturali (Bandini, V. et al., 2019). Il polizene viene scelto per il suo eccezionalmente basso coefficiente d'attrito dinamico e la sua elevata resistenza all'usura. Il suo utilizzo riduce al minimo le resistenze residue interstrato, permettendo alla cassa di assecondare liberamente il moto sismico senza introdurre forze dissipative spurie che falserebbero le accelerazioni misurate nel terreno. All'IIT Kanpur si impiegano invece membrane plastiche sottili (0,2 mm) per contenere la sabbia e uno strato superficiale di resina epossidica sulla base in legno per garantire l'aderenza strutturale e il perfetto trasferimento delle onde di taglio (Vivek, B. et al., 2019).

3.3.4 Ottimizzazione delle Superfici di Base e Componenti Compositi

Anche l'interfaccia tra il contenitore e la tavola vibrante beneficia dell'ingegneria dei materiali polimerici. Un caso emblematico è quello dell'Indian Institute of Technology Kanpur (IIT Kanpur), dove la piastra di base in legno viene trattata con uno strato superficiale di resina epossidica caricata per aumentare la scabrezza (rough base).

La resina epossidica viene selezionata per la sua elevata adesione strutturale, la durabilità e la capacità di formare una superficie micro-rugosa che impedisce qualsiasi fenomeno di

scorrimento tra la base del modello e la tavola vibrante.

Questo garantisce il perfetto trasferimento degli sforzi di taglio iniziali all'interno del deposito di sabbia. Allo stesso modo, l'uso di membrane plastiche sottili (0,2 mm) all'IIT Kanpur assolve al compito di sigillare i gap strutturali senza appesantire la risposta meccanica complessiva del sistema (Vivek, B. et al., 2019).

3.3.5 Sistemi a Bassissimo Attrito (Cuscinetti e Teflon)

La progettazione di LSB/ESB richiede una gestione rigorosa dell'attrito e dei vincoli meccanici, l'obiettivo primario di tali accorgimenti è impedire che l'attrito interstrato o l'interazione rigida con le pareti alterino la risposta dinamica del terreno, falsificando le accelerazioni e compromettendo la riproduzione delle reali condizioni di campo libero. Per raggiungere questo scopo, sono state sviluppate soluzioni ingegneristiche differenti, accomunate tuttavia da precise motivazioni di natura meccanica e funzionale, di seguito esposte:

3.3.5.1 Approccio a Sospensione Indipendente e Cuscinetti di Precisione

Un primo gruppo di istituzioni, comprendente l'Università di Enna “Kore” con il progetto L.E.D.A., l'Università di Messina con il laboratorio EUROLAB–CERESI e il KAIST in Corea, ha scelto di affidarsi a sistemi meccanici avanzati basati su cuscinetti dedicati per sostenere i singoli livelli e azzerare l'accumulo di carico verticale.

Nel sistema L.E.D.A. di Enna, ad esempio, l'impiego di ben 180 cuscinetti lineari ad altissima precisione risponde alla necessità di superare il limite dei contenitori tradizionali (Castelli, F. et al., 2022), in cui il peso dei livelli superiori si scarica su quelli inferiori accumulando attrito verso il fondo. Sostenendo ciascun telaio in alluminio in modo indipendente e ancorandolo alle pareti esterne in acciaio, il peso proprio viene scaricato all'esterno, azzerando l'attrito cumulativo e garantendo che la sezione trasversale mantenga

un profilo orizzontale uniforme durante la deformazione.

Sulla stessa linea concettuale si muove l'Università di Messina, che integra ruote e cuscinetti a rulli in acciaio vincolati a un'impalcatura esterna e combinati con guide di scorrimento lineari (Bandini, V. et al., 2019). Questa scelta è motivata dalla volontà di supportare il carico totale della struttura garantendo uno scorrimento orizzontale privo di attrito e, al contempo, sopprimendo qualsiasi componente di moto parassita verticale indesiderato durante lo scuotimento.

Nel caso del KAIST in Corea, l'esigenza progettuale è legata ai test su modelli centrifughi ad alta accelerazione, in cui i livelli di gravità elevati (fino a 100 g) tenderebbero a schiacciare verticalmente gli strati di gomma, alterandone la rigidità (Lee, S. H., et al., 2013). Per ovviare a questo problema, si impiegano cuscinetti a sfera interni, capaci di sopportare il carico verticale derivante dalle forze centrifughe, mantenendo così costante la rigidità dinamica del sistema, indipendentemente dall'accelerazione applicata, e vincolando il movimento a un unico asse parallelo alla direzione di scuotimento.

3.3.5.2 L'Utilizzo di Rulli Meccanici ad Alta Efficienza con Validazione Sperimentale

Un approccio mirato alla riduzione drastica della resistenza inter-laminare è quello invece adottato dall'Indian Institute of Technology Kanpur (IIT Kanpur). Il sistema prevede l'inserimento di 90 cuscinetti e rulli in acciaio tra le lamine scatolari e le aste di guida.

La motivazione principale risiede nella volontà di consentire lo scorrimento reciproco dei telai con una resistenza meccanica quasi nulla. Questa scelta è supportata rigorosamente da valutazioni sperimentali che hanno dimostrato coefficienti di attrito estremamente ridotti, pari a $\mu = 0.0112$ senza membrana e $\mu = 0.0331$ con la membrana interna (Vivek, B. et al., 2019). Tale accorgimento assicura che il contenitore segua in modo puramente passivo le deformazioni imposte dal terreno senza frenarle.

CAPITOLO 4

Schede Tecniche dei Materiali

4.1 INTRODUZIONE ALLA SCELTA DEI MATERIALI

La validità dei risultati sperimentali ottenuti mediante una Laminar Shear Box (LSB) è strettamente vincolata al comportamento meccanico dei materiali che la compongono, l'apparato deve infatti garantire condizioni di deformazione di puro taglio nel terreno, minimizzando le interferenze legate all'inerzia della scatola, all'attrito tra i componenti mobili e alla resistenza offerta dai sistemi di confinamento.

Il presente capitolo approfondisce l'analisi delle schede tecniche dei materiali e dei cuscinetti impiegati: per quanto possibile si è posta la necessità di analizzare materiali e/o cuscinetti utilizzati negli studi precedentemente citati, in caso di impossibilità di ciò, si è deciso di assimilare i materiali utilizzati a elementi con caratteristiche tecniche simili a questi ultimi.

Prima di procedere con l'analisi dei singoli materiali, si elencano i parametri critici delle tre macro-componenti della LSB (Esmaeilpour, P., et al., 2023):

- Telai strutturali: è richiesta un'elevata rigidezza flessionale per sopportare le spinte del terreno e mantenere la deformazione piana, unita a una bassa densità per limitare l'aggiunta di masse parassite al sistema dinamico;

- Sistema di scorrimento: i dispositivi interposti tra i telai devono presentare coefficienti di attrito statico e dinamico prossimi allo zero e tollerare i carichi verticali imposti dal peso proprio degli strati sovrastanti;

- Membrana di confinamento interna: deve garantire la perfetta tenuta stagna (essenziale per prove in condizioni sature), opponendo al contempo una resistenza trascurabile alla traslazione relativa tra i telai.

Di seguito vengono analizzate le schede tecniche dei materiali individuati per ogni macro-componente:

4.1.1 Telai e struttura rigida (Lamine)

4.1.1.1 Lega di Alluminio 6061-T6

L'acciaio risulta un materiale robusto ma molto pesante, per questo la stragrande maggioranza dei laboratori moderni opta per l'alluminio ad uso aerospaziale o strutturale, in particolare la lega 6061 con trattamento termico T6, come descritto nella Figura 14.

Proprietà	Valore tipico
Resistenza alla trazione finale	290-310 MPa (42-45 ksi)
Resistenza allo snervamento (0,2% offset)	240-270 MPa (35-39 ksi)
Allungamento a rottura	~10%
Durezza Brinell	93 HBW
Resistenza a fatica (trave rotante)	96 MPa (14 ksi)
Resistenza al taglio	~210 MPa (30 ksi)
Modulo elastico	~69 GPa (10×10^6 psi)
Densità	2,7 g/cm³ (0,0975 lb/in³)
Conducibilità termica	~167 W/m-K
Coefficiente di espansione termica (20-100°C)	~23 µm/m-K
Conducibilità elettrica	~40% IACS
Tipico temperamento	T6, T651, T6511

Figura 14 – Scheda Tecnica Lega di alluminio 6061-T6

Il rapporto resistenza/peso è fondamentale: i telai devono essere sufficientemente rigidi da non “spanciare” (deformarsi lateralmente) sotto la spinta del terreno, garantendo il confinamento. Tuttavia, se fosse troppo pesante (es. in acciaio massiccio), la sua elevata inerzia di massa si sommerebbe a quella del terreno durante la vibrazione sismica, falsando completamente le misurazioni della reale risposta dinamica del campione.

4.1.1.2 Acciaio Strutturale S355

Per la costruzione delle lamine rigide, il mercato offre profili cavi e telai in acciaio al carbonio ad alta resistenza, tra cui si pongono tra le più usuali le travi ad H o profili tubolari quadrati (secondo UNI EN 10025); il materiale commerciale di riferimento è l'acciaio S355J2 (Siderticino S.r.l. (2026), Figura 15).

S355J2

ACCIAI STRUTTURALI

Norma di riferimento: EN 10025-2:2019

W.n°	1.0577	AFNOR	-
AISI	-	BS	50 D
UNI	Fe510D	JIS	-
DIN	St 52-3 N	Altro	ISO 630 E355

COMPOSIZIONE CHIMICA

C	Si	Mn	P	S	Cu	N
0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	0,55	-

Composizione su analisi di colata, valori massimi in % di massa | Il C in tabella è il massimo: fino a 30 mm vale 0,20 | Acciaio completamente calmato (FF): per la qualità J2 non è prescritto un limite di azoto

Carbonio equivalente CEV max su colata 0,45 (t ≤ 30 mm) - 0,47 (30 < t ≤ 150 mm) - 0,49 (t > 150 mm), 0,54 per i prodotti lunghi | Nessun trattamento termico prescritto: fornitura allo stato di laminazione (+AR) o normalizzato (+N), normalizzazione 890-950 °C in aria

PROPRIETÀ MECCANICHE

LAMINATO A CALDO - Prova di trazione a 20 °C e resilienza in longitudinale a -20 °C
EN 10025-2:2019

Diametro/spess. (in mm)		ReH N/mm² min	R N/mm²	A% min	KV2 J min
>	≤				
-	16	355	470-630	22	27
16	40	345	470-630	22	27
40	63	335	470-630	21	27
63	80	325	470-630	20	27
80	100	315	470-630	20	27
100	150	295	450-600	18	27
150	200	285	450-600	17	27
200	250	275	450-600	17	27
250	400	265	450-600	17	27

Figura 15 – Scheda Tecnica acciaio S355J2

Negli esperimenti, l'acciaio viene impiegato per realizzare batterie di lamine sovrapposte (ad esempio 23 profilati in acciaio) come nello studio di Haeri, S. M., e Rajabigol, M. (Haeri, S. M., et al., 2023) o elementi con profilo ad H. La motivazione fisica risiede nella necessità di avere pareti lateralmente molto rigide per contenere la significativa spinta del terreno senza "spanciare" o deformarsi, assicurando che il campione simuli il moto del terreno in condizioni di campo libero ("free field") mantenendo una corretta deformazione piana. Un acciaio con snervamento a 355 MPa permette di avere lamine sottili ma estremamente resistenti, senza entrare in campo plastico durante l'oscillazione.

4.1.2 Sistema di scorrimento

Come già anticipato, i telai necessitano di attrito quasi nullo, a favore di ciò, l'utilizzo di elementi volventi risolve un problema tecnico fondamentale, ovvero la riduzione al minimo della rigidezza laterale del contenitore stesso.

I cuscinetti a sfera e guide lineari sono tra i sistemi di scorrimento orizzontali ad alto carico maggiormente utilizzati per la realizzazione di LSB, è possibile far riferimento a produttori come SKF (Figura 16 e 17) o Alwayse (Figura18 e 19):

- *I cuscinetti assiali a sfere di SKF:*

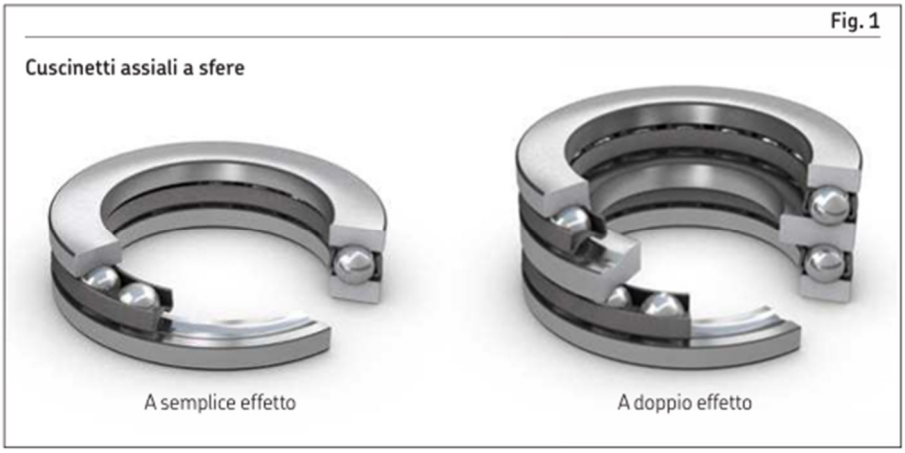


Figura 16 – Cuscinetti a sfera – SKF

Dimensioni principali			Coefficienti di carico base dinamico	statico	Carico limite di fatica	Fattore di carico minimo	Velocità di base Velocità di riferimento	Velocità limite	Massa	Descrizione
d	D	H	C	C_0	P_u	A				
mm			kN		kN	–	giri/min		kg	–
3	8	3,5	0,806	0,72	0,027	0,000 003	26 000	36 000	0,0009	▸ BA 3
4	10	4	0,761	0,72	0,027	0,000 003	22 000	30 000	0,0015	▸ BA 4
5	12	4	0,852	0,965	0,036	0,000 005	20 000	28 000	0,0021	▸ BA 5
6	14	5	1,78	1,92	0,071	0,000 019	17 000	24 000	0,0035	▸ BA 6
7	17	6	2,51	2,9	0,108	0,000 044	14 000	19 000	0,0065	▸ BA 7
8	19	7	3,19	3,8	0,143	0,000 075	12 000	17 000	0,0091	▸ BA 8
9	20	7	3,12	3,8	0,143	0,000 075	12 000	16 000	0,01	▸ BA 9
10	24	9	9,95	15,3	0,56	0,0012	9 500	13 000	0,02	▸ 51100
	26	11	12,7	18,6	0,695	0,0018	8 000	11 000	0,03	▸ 51200
12	26	9	10,4	16,6	0,62	0,0014	9 000	13 000	0,022	▸ 51101
	28	11	13,3	20,8	0,765	0,0022	8 000	11 000	0,034	▸ 51201
15	28	9	10,6	18,3	0,67	0,0017	8 500	12 000	0,023	▸ 51102
	32	12	15,9	25	0,915	0,0038	7 000	10 000	0,046	▸ 51202
17	30	9	11,4	21,2	0,78	0,0023	8 500	12 000	0,025	▸ 51103
	35	12	16,3	27	1	0,0047	6 700	9 500	0,053	▸ 51203
20	35	10	15,1	29	1,08	0,0044	7 500	10 000	0,037	▸ 51104
	40	14	21,2	37,5	1,4	0,0085	6 000	8 000	0,083	▸ 51204
25	42	11	18,2	39	1,43	0,0079	6 300	9 000	0,056	▸ 51105
	47	15	26,5	50	1,86	0,015	5 300	7 500	0,11	▸ 51205
	52	18	34,5	60	2,24	0,018	4 500	6 300	0,17	▸ 51305
	60	24	42,3	67	2,45	0,048	3 600	5 000	0,34	▸ 51405
30	47	11	19	43	1,6	0,0096	6 000	8 500	0,063	▸ 51106
	52	16	25,1	51	1,86	0,013	4 800	6 700	0,13	▸ 51206
	60	21	35,8	65,5	2,4	0,026	3 800	5 300	0,26	▸ 51306
	70	28	70,2	122	4,5	0,097	3 000	4 300	0,52	▸ 51406
35	52	12	19,9	51	1,86	0,013	5 600	7 500	0,08	▸ 51107
	62	18	35,1	73,5	2,7	0,028	4 000	5 600	0,22	▸ 51207
	68	24	49,4	96,5	3,55	0,048	3 400	4 800	0,39	▸ 51307
	80	32	76,1	137	5,1	0,15	2 600	3 600	0,79	▸ 51407

Figura 17 – Scheda Tecnica cuscinetti a sfera – SKF

- *Le "ball transfer unit hevi-load unit 3" di Alwayse (Boniardi, M., et al., 2023)*

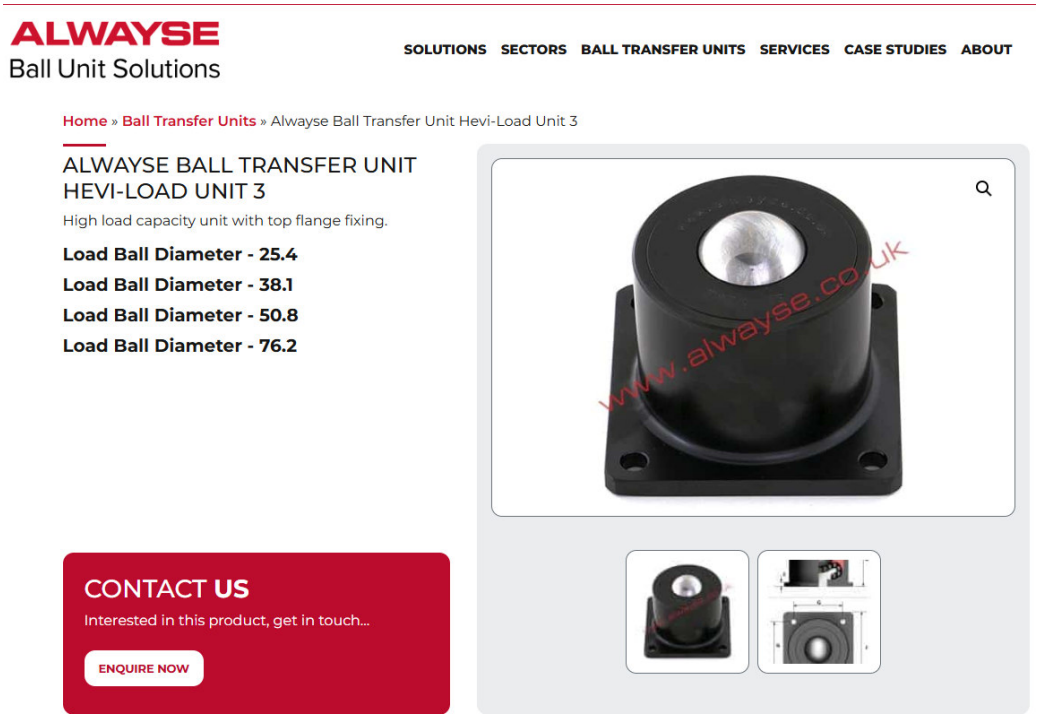


Figura 18 – cuscinetti a sfera – Alwayse

METRIC IMPERIAL

SPECIFICATION	7151	715116
Load Ball Diameter (mm)	38.1	38.1
Fixing Method	Base	Base
Max Load (Ball Up) (kg)	1000	670
Max Load (Ball Down) (kg)	1000	670
Load Ball Material	Carbon Chrome	Stainless Steel
Support Ball Material	Carbon Chrome	Stainless Steel
Unit Housing Finish	Electrophoretic Black Coated	Electrophoretic Black Coated
Product Weight (kg)	1.3	1.3
Dim. A - Max Diameter (mm)	60	60
Dim. B - Working ht. of Ball (mm)	62.2	62.2
Dim. F - Base Thickness (mm)	12.4	12.4
Dim. G - Fixing Holes PCD (mm)	57.9 +/- 0.2	57.9 +/- 0.2
Dim. H - Fixing Hole Size (mm)	4 X 7.1	4 X 7.1
Dim. J - Major Flange Size (mm)	76.2	76.2

Figura 19 – Scheda Tecnica Cuscinetti a sfera – Alwayse

NOTA: Per i sistemi a strisciamento, (utilizzati più di rado) un prodotto assimilabile alle prestazioni dei cuscinetti a sfere sono le lastre e i Fogli in PTFE (Politetrafluoroetilene, Figura 20), questi vengono forniti da aziende come Guarniflon (Guarniflon S.p.A., 2023), garantendo uno scorrimento puro e indipendente.

Proprietà	u.m.	Metodo	Valori	
			Estrusi	Stampati
Peso specifico	g/cm3	ASTM D792	2,14 - 2,18	2,14 - 2,18
Resistenza a trazione	N/mm2	ISO 527	≥ 20	≥ 24
Allungamento a rottura	%	ISO 527	≥ 200	≥ 250
Resistenza a compressione con deformazione 1%	N/mm2	ASTM D695	≥ 4	4-5
Coefficiente di attrito dinamico	/	ASTM D1894	0,06	0,06
Temperatura di esercizio (min - max)	°C	/	-200 / +260	-200 / +260
Rigidità dielettrica in aria	kV/mm	ASTM D149	≥ 20	≥ 40

Figura 20 – scheda tecnica del PTFE vergine (G400) – Guarniflon

4.1.3 Membrana di confinamento interna

Per garantire la deformabilità senza irrigidire il sistema, si utilizzano membrane elastomeriche impermeabili ad alta flessibilità, di seguito descritte:

4.1.3.1 Gomma Neoprene (CR – Policloroprene)

La gomma in neoprene CR (Policloroprene), realizzata in lastre da produttori come Trelleborg è caratterizzata da proprietà ottime, come riportato in Figura 21 (Trelleborg Fluid Handling Solutions, 2024), soprattutto grazie alla loro elasticità e deformabilità; vengono solitamente prodotti con spessori da 2 mm e spesso usati con tele interne di rinforzo in nylon o Kevlar per evitare lo spanciamento laterale.

MECHANICAL & PHYSICAL PROPERTIES

MECHANICAL	
Rubber Compound	CR SBR
Rubber Color	Black
Density	1.35 g/cm3 ±0.05
Hardness (ISO 48-4)	50±5 Shore A
Tensile strength (ISO 37)	≥4.5 MPa
Elongation at break (ISO 37)	≥400 %
Tear resistance (ISO 34-1)	≥13 N/mm
Compression set (ISO 815-1)	22h @ 70°C : ≤40%
TEMPERATURE	
Working temperature	-30/+100 °C
AGEING	
Δ Hardness (ISO 188)	70h @ 70°C : ≤5 Shore A
Δ Tensile strength (ISO 188)	70h @ 70°C : ≤-15%
Δ Elongation at break (ISO 188)	70h @ 70°C : ≤-40%
OIL RESISTANCE	
Oil IRM 901, Δ volume (ISO 1817)	70h @ 70°C : ≤26%

Figura 21 – Scheda Tecnica Policloroprene – Trelleborg

Durante un fenomeno di liquefazione, il terreno può subire spostamenti laterali significativi (lateral spreading). Una membrana in Neoprene con un allungamento del 400% può deformarsi in modo significativo senza strapparsi e senza disperdere la pressione interstiziale dell'acqua, che è il parametro cardine da misurare durante i test di liquefazione. Inoltre, il basso modulo impedisce alla membrana di irrigidire il sistema.

4.1.3.2 Gomma EPDM (Etilene – Propilene Diene Monomero)

Un prodotto di riferimento è la Membrana RubberGard EPDM LSFR, la scheda tecnica con spessori da 1.14 mm o 1.52 mm indica un allungamento a rottura superiore al 300% e

un'elevata resistenza alla lacerazione (Figura 22), ideale per contenere terreni saturi o asciutti seguendo la deformazione di taglio del sistema (Holcim Solutions and Products EMEA BV, 2023).

Tecniche	Metodo di prova	Valore dichiarato 1,1 mm	Valore dichiarato 1,5 mm
Spessore	EN 1849-2	1,1 mm	1,5 mm
Massa areica	EN 1849-2	1,35 kg/m²	1,85 kg/m²
Tenuta all'acqua	EN 1928 (B)	Conforme	Conforme
Resistenza a trazione (L/T)	EN 12311-2 (B)	≥ 7 N/mm²	≥ 7 N/mm²
Allungamento	EN 12311-2 (B)	≥ 300%	≥ 300%
Resistenza al punzonamento statico	EN 12730 (B)	≥ 20 kg	≥ 20 kg
Resistenza al punzonamento dinamico	EN 12691 (B)	≥ 1700 mm	≥ 2000 mm
Resistenza alla lacerazione (L/T)	EN 12310-2	≥ 40 N	≥ 40 N
Resistenza al distacco delle giunzioni	EN 12316-2	≥ 80 N/50 mm	≥ 80 N/50 mm
Resistenza al taglio delle giunzioni	EN 12317-2	≥ 200 N/50 mm	≥ 200 N/50 mm
Esposizione ai raggi UV	EN 1297	Conforme (≥ 7500 h)	Conforme (≥ 7500 h)
Piegabilità a basse temperature	EN 495-5	≤ -45°C	≤ -45°C
Stabilità dimensionale	EN 1107-2	≤ 0,5%	≤ 0,5%
Reazione al fuoco	EN 13501-1	E	E
Comportamento al fuoco esterno	EN 13501-5	B_{ROOF} (t1, t2, t3, t4)*	B_{ROOF} (t1, t2, t3, t4)*

Figura 22 – Scheda Tecnica Membrana RubberGard EPDM LSFR

4.1.3.3 Gomma Siliconica

Le lastre in silicone solido sono una valida soluzione per la membrana di confinamento interna, un esempio è il "kSil™ solid silicone elastomer sheeting" (spessori standard 2 mm o 3 mm), che con una durezza Shore A facilmente personalizzabile (es. 40 o 60 Shore A, Figura 23) garantisce una bassa rigidezza flessionale (Silicone Engineering Ltd., 2017).

Mechanical Properties

Property	Units	Typical Value	Typical Value	Typical Value	Typical Value	Typical Value	Test Method
Hardness	Shore A ±5	40	50	60	70	80	ASTM D2240 DIN ISO 7619-1
Tensile Strength	MPa psi	7 1015	8 1160	9 1305	10 1450	10 1450	ISO 37 type 1 ASTM D412 die C DIN 53504 type S1
Elongation to Failure	%	600	400	350	350	450	ISO 37 type 1 ASTM D412 die C DIN 53504 type S1
Tear Strength	N/mm lb./in.	15 86	18 102	22 125	19 109	29 166	ASTM D624 die B
Compression Set 24 hours @ 150°C	%	13	11	11	10	12	BS 903 pt A6 type B DIN/ISO 815 type B
Compression Set 22 hours @ 300°F	%	13	10	10	10	10	ASTM D395 method B type 2

Figura 23 – Scheda tecnica kSil™ solid silicone elastomer sheeting

4.1.3.4 Resina PMMA (Acrilico/ plexiglass liscio) – *prevalentemente per test monodimensionali*

Rivestire le pareti laterali interne in PMMA avrebbe un duplice vantaggio: primo, ridurrebbe l'attrito laterale; se la sabbia facesse aderenza alle pareti, si genererebbero effetti di bordo tridimensionali che comprometterebbero l'assunto monodimensionale del test. Secondo, la trasparenza permette di installare telecamere ad alta velocità per utilizzare algoritmi di PIV (Particle Image Velocimetry) e tracciare visivamente, frame per frame, lo spostamento dei singoli granuli di terreno durante il "terremoto" simulato. Uno dei produttori di riferimento di questa tipologia di Resina è la Nudec (NUDEC, S. A., 2012):

CARATTERISTICHE STANDARD DELLA RESINA DI PMMA

	NORMA	UNITÀ	VALORE
FISICHE			
Densità	ISO 1183	$g.cm^{-3}$	1,19
MECCANICHE			
Resistenza alla trazione fino alla deformazione	ISO 527	MPa	(*)
Resistenza alla trazione fino alla rottura	ISO 527	MPa	83
Allungamento fino alla rottura	ISO 527	%	5
Modulo d'elasticità in trazione	ISO 527	MPa	3.200
Resistenza alla flessione	ISO 178	MPa	120
Resistenza all'impatto Charpy con intaglio	ISO 179	kJ/m^2	(*)
Resistenza all'impatto Charpy	ISO 179	kJ/m^2	20
Durezza Rockwell, scala M/R			92/ (*)
Durezza alla penetrazione della sfera	ISO 2039	MPa	185
OTTICHE			
Trasmissione della luce	ASTM D-1003	%	92
Rifrazione	ASTM D-542		1,489
TERMICHE			
Temp. massima di uso in continuo		°C	80
Temp. Rammollimento VICAT (10 N)	ISO 306	°C	116
Temp. Rammollimento VICAT (50 N)	ISO 306	°C	107
Temp. Rammollimento HDT A (1,8 MPa)	ISO 75-2	°C	97
Temp. Rammollimento HDT B (0,45 MPa)	ISO 75-2	°C	101
Coefficiente di espansione lineare	ISO 75-2	$x10^{-3}/°C$	7

Questi dati corrispondono ai valori della materia prima.

(*) Non applicabile

RESISTENZA CHIMICA

PRODOTTO CHIMICO	COMPORTAMENTO		
	SODDISFACENTE	REGOLARE	INSODDISFACENTE
Olio Minerale	X		
Olio Vegetale	X		
Acetone			X
Acido Acetico			X
Acqua	X		
Acquaragia		X	
Ammoniaca		X	
Detersivi		X	
Etanolo			X
Benzina	X		
Glicerina	X		
Metanolo			X
Toluene			X

CERTIFICAZIONI

PROPRIETÀ	NORMA	CLASSIFICAZIONE
Food contact	EN 10-2011, FDA	

È disponibile una Scheda di Sicurezza delle lastre in NUDEC®PMMA, per qualsiasi tipo di ulteriore consultazione.

Figura 24 – Scheda Tecnica PMMA – Nudec

4.1.4 Bullonatura e attacchi a terra

Anche se gli studi precedentemente citati non specificano marche commerciali, chiariscono che l'input sismico deve essere imposto in modo rigoroso alla base del sistema. Le pareti di estremità (end-walls) vengono appositamente irruvidite con particelle di sabbia incollate per trasferire correttamente e in modo solidale il moto sismico dalla base direttamente al terreno, di conseguenza un ancoraggio reale deve garantire che non vi sia alcuno slittamento tra il telaio inferiore e la tavola vibrante, altrimenti l'accelerazione letta dai sensori nel terreno non

corrisponderebbe all'input effettivo della macchina.

Per ancorare in modo solidale la LSB alla tavola vibrante, si ricorre a sistemi di fissaggio strutturale per carichi dinamici (Hilti, 2023 e 2025), come gli ancoraggi meccanici/chimici Hilti (Figura 25 e 26) o piastroni in acciaio S355 bullonati:

4.1.4.1 Ancorante meccanico Hilti HST3

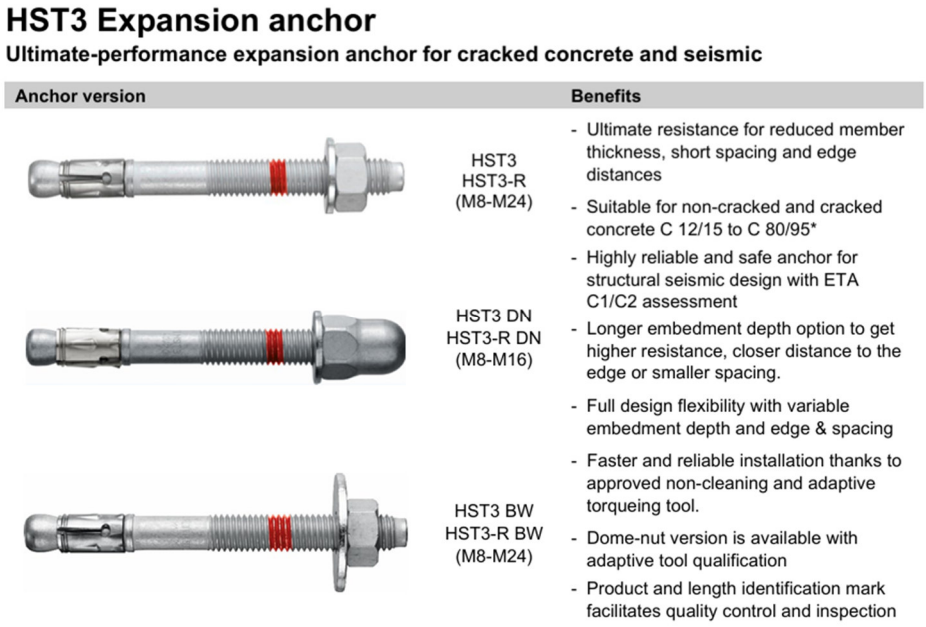
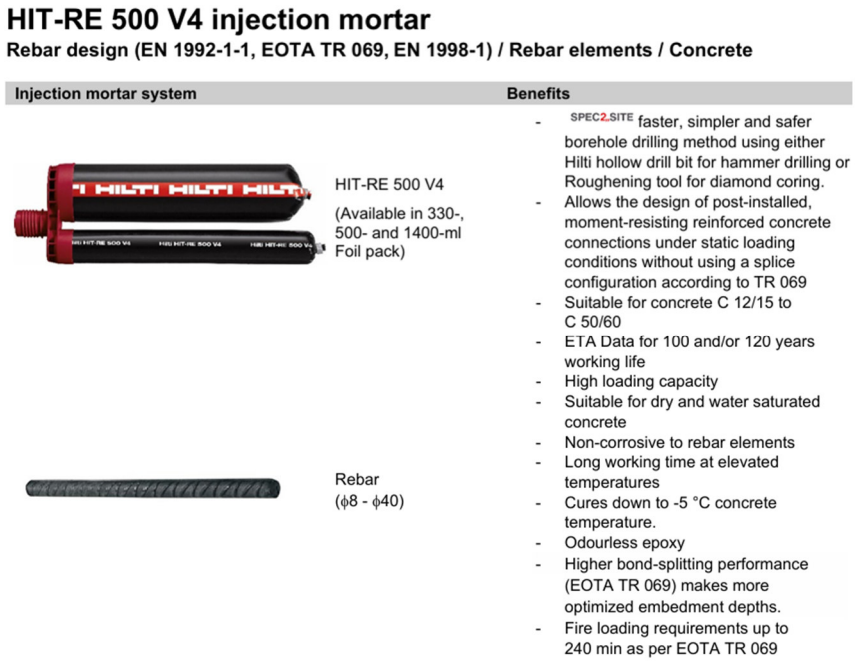


Figura 25 – Ancoraggio meccanico Hilti HST3

4.1.4.2 Ancorante chimico di Resina epossidica Hilti HIT-RE 500



HIT-RE 500 V4 injection mortar

Rebar design (EN 1992-1-1, EOTA TR 069, EN 1998-1) / Rebar elements / Concrete

Injection mortar system		Benefits
	HIT-RE 500 V4 (Available in 330-, 500- and 1400-ml Foil pack)	- SPEC2.SITE faster, simpler and safer borehole drilling method using either Hilti hollow drill bit for hammer drilling or Roughening tool for diamond coring. - Allows the design of post-installed, moment-resisting reinforced concrete connections under static loading conditions without using a splice configuration according to TR 069 - Suitable for concrete C 12/15 to C 50/60 - ETA Data for 100 and/or 120 years working life - High loading capacity - Suitable for dry and water saturated concrete - Non-corrosive to rebar elements - Long working time at elevated temperatures - Cures down to -5 °C concrete temperature. - Odourless epoxy - Higher bond-splitting performance (EOTA TR 069) makes more optimized embedment depths. - Fire loading requirements up to 240 min as per EOTA TR 069
	Rebar (ϕ8 - ϕ40)	

Figura 26 – Ancoraggio chimico Hilti HIT-RE 500 V4

4.1.4.3 Ancoraggio a una piastra in acciaio della tavola vibrante

Il sistema impiega piastre in acciaio S355J2 con uno spessore di 3 mm, caratterizzate da una resistenza allo snervamento di 315-355 N/mm² e un carico di rottura compreso tra 490 e 630 N/mm². A queste viene fissata una bulloneria strutturale ad alta resistenza (bulloni M16 o M20 di classe 8.8 o 10.9, come le viti a testa esagonale ISO 4014/4017). Grazie ai carichi di rottura a taglio elevatissimi, questi componenti garantiscono un'ottima tenuta anche in presenza di forti scuotimenti e sollecitazioni dinamiche.

CAPITOLO 5

Accelerometri

5.1 ACCELEROMETRI – PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

Gli accelerometri costituiscono una componente fondamentale del panorama sensoristico impiegato nella modellazione fisica geotecnica e nell'ingegneria sismica. Tali dispositivi sono trasduttori preposti alla misurazione dell'accelerazione inerziale a cui è soggetto un corpo, convertendo un'azione meccanica cinematico-dinamica in un segnale elettrico misurabile e registrabile dai sistemi di acquisizione dati (DAS). Il principio fisico alla base di qualsiasi accelerometro risiede nella seconda legge della dinamica di Newton (F = m × a) e nel comportamento di un sistema meccanico ad un grado di libertà composto da una massa sismica (m), un elemento elastico di richiamo con rigidezza (k) ed un elemento smorzatore (c). Quando il corpo del sensore subisce un'accelerazione a(t), la massa sismica tende a mantenere il proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme per inerzia, generando uno spostamento relativo z(t) rispetto al telaio esterno. Tale spostamento è direttamente proporzionale all'accelerazione applicata sotto la frequenza di risonanza del sistema: $m \cdot a(t) = k \cdot z(t) + c \cdot \frac{dz(t)}{dz} + m \cdot \frac{d^2z(t)}{dt^2}$

In ambito sperimentale geotecnico avanzato, le tecnologie trasduttive maggiormente diffuse si dividono in tre categorie principali:

- *Accelerometri Piezoelettrici:* Sfruttano principalmente la proprietà di alcuni cristalli (come il quarzo) e sono caratterizzati da un'elevata banda passante e rigidezza, rendendoli ideali per accelerazioni ad alta frequenza;

- *Accelerometri Piezoresistivi*: Utilizzano estensimetri a semiconduttore integrati nel supporto elastico della massa e a differenza dei piezoelettrici, consentono la misura di accelerazioni statiche e a bassissima frequenza;

- *Accelerometri MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems):* Basati su strutture micromeccaniche in silicio realizzate tramite fotolitografia, sfruttano la variazione di

capacità elettrica tra pettini capacitivi fissi e mobili. Offrono dimensioni estremamente ridotte, pesi trascurabili (fondamentali per non alterare la densità del terreno circostante) e un'eccellente robustezza.

5.1.1 Funzione degli accelerometri

Nella pratica ingegneristica e nella ricerca geotecnica sperimentale, con particolare riferimento ai test su tavola vibrante ad 1-g ed ai test in centrifuga a Ng, gli accelerometri assolvono a diverse funzioni cruciali:

- *Caratterizzazione della Risposta Sismica di Sito:* permette di monitorare la propagazione delle onde di taglio e di compressione attraverso lo strato di terreno. Disponendo una serie verticale di accelerometri, è possibile calcolare le funzioni di trasferimento nel dominio delle frequenze tra la base e la superficie, identificando le frequenze naturali di vibrazione del deposito e i fenomeni di amplificazione sismica di sito;

- *Stima dei Moduli Dinamici e dello Smorzamento*: attraverso la registrazione del campo di accelerazioni indotto da vibrazioni ambientali o da scuotimenti sismici, è possibile calcolare la rigidezza a taglio del terreno a piccole deformazioni, il modulo di taglio compatibile con la deformazione G(γ) e il relativo rapporto di smorzamento (D);

- *Valutazione dell'Interazione Terreno-Struttura (SSI) e Terreno-Palo:* nel caso di fondazioni profonde isolate o in gruppo, gli accelerometri posizionati sulle teste dei pali o sui plinti consentono di misurare la risposta cinematica ed inerziale della struttura rispetto al campo libero (free-field);

- *Studio della Liquefazione e dello Spostamento:* durante fenomeni di liquefazione indotta da sisma, gli accelerometri registrano la repentina perdita di rigidezza del

terreno (evidenziata dall'abbattimento delle frequenze e delle ampiezze stazionarie) e l'insorgenza di cinematismi associati a deformazioni laterali.

Nota: Nei test su tavola vibrante, l'accelerazione registrata dall'accelerometro posto sulla testa del palo include sia la componente inerziale ciclica dovuta allo scuotimento sismico di base sia gli effetti cinematici derivanti dalla spinta del terreno in liquefazione. Il filtraggio digitale dei segnali accelerometrici è fondamentale per isolare la risposta strutturale.

5.1.2 Analisi Sperimentale

5.1.2.1 Analisi dei test su tavola vibrante

Lo studio condotto da Haeri S. e Rajabigol M. (Haeri, S. et al., 2023), illustra un'estesa campagna sperimentale eseguita presso il centro di ricerca dell'Università della Tecnologia di Sharif (SUT), focalizzata sulla risposta di fondazioni su pali e gruppi di pali soggetti a "lateral spreading" indotto da liquefazione sismica. Gli esperimenti sono stati condotti su una tavola vibrante 4m × 4m a 3 gradi di libertà, impiegando sia contenitori rigidi sia Laminar Shear Box. In questa prova, la sensoristica è stata installata lungo una verticale con una serie di accelerometri all'interno del terreno in campo libero, in prossimità delle fondazioni e sulla testa dei pali (o sulle masse concentrate rappresentanti la sovrastruttura). L'analisi dei dati accelerometrici ha evidenziato importanti aspetti applicativi:

- *Amplificazione alla testa del palo:* Si osserva che, tra l'accelerazione dell'input di base e quella registrata alla testa del palo, nella maggior parte dei modelli l'accelerazione massima registrata alla testa del palo risulta notevolmente amplificata rispetto al moto di base. In particolari configurazioni (es. Modello 9, terreno migliorato con colonne di ghiaia), l'accelerazione sulla testa del palo ha raggiunto valori fino a 2.6 volte l'accelerazione di ingresso (passando da 0.3g di base a circa 0.78g in testa);

- *Effetti di Contenitore e Bordo:* Il confronto tra i test in scatola rigida (Modello 5) e LSB (Modello 6) mediante i segnali accelerometrici ha dimostrato come la parete rigida generi fenomeni di riflessione dell'onda sismica, incrementando la risposta accelerometrica e i momenti flettenti rilevati rispetto ad un contenitore laminare flessibile.

Lo studio condotto presso la Tianjin University, in Cina, (Lei, H., et al., 2020) analizza invece un contenitore di terreno cilindrico a taglio laminare 3D progettato per tavole vibranti. Per quantificare la risposta dinamica del sistema e validare la LSB, è stata predisposta una complessa rete di sensori. A causa della simmetria del contenitore, sono stati posizionati 12 accelerometri in un quarto dell'area totale. Questi sensori sono stati distribuiti lungo la direzione orizzontale e verticale (a diverse profondità, come superficie, centro e base) per misurare la risposta dinamica sotto diverse eccitazioni.

L'analisi delle risposte accelerometriche fornisce importanti indicazioni sul piano applicativo:

- *Frequenza naturale e rapporto di smorzamento:* I test eseguiti con eccitazione "flat noise" hanno rivelato che la frequenza naturale media del contenitore era di 0,78 Hz, un valore estremamente distante da quello del terreno, misurato a 23,40 Hz. Inoltre, il rapporto di smorzamento del terreno (1,42%) si è rivelato circa 3,7 volte superiore a quello del contenitore (0,38%). Questi risultati dimostrano che il contenitore non influenza le caratteristiche di vibrazione del terreno e soddisfa pienamente i requisiti per i test su tavola vibrante.

- *Analisi dell'effetto di bordo:* Sottoponendo il modello alle onde nelle direzioni x, y e z con diverse accelerazioni di picco (0,1 g, 0,4 g, 0,8 g), gli accelerometri posti alla stessa altezza hanno registrato storie temporali di accelerazione quasi identiche. Utilizzando un "indice di effetto di bordo" per un'analisi quantitativa, i valori si sono mantenuti inferiori

al 12% in quasi tutte le configurazioni, ad eccezione della direzione Z sotto l'azione dell'onda a 0,8 g. Questo dimostra che il contenitore riesce a simulare correttamente le condizioni di limite infinito del sito, minimizzando efficacemente la riflessione delle onde sismiche causata dai bordi rigidi.

- *Amplificazione dell'accelerazione:* I sensori disposti lungo l'altezza hanno registrato un chiaro incremento dell'accelerazione di picco procedendo dalla base verso la superficie. L'amplificazione massima in superficie è risultata pari a 3,07 volte quella della base della tavola vibrante sotto un'eccitazione di 0,4 g nella direzione Z. Ciò indica che il contenitore è in grado di mantenere un comportamento a colonna di terreno 3D, replicando il naturale effetto di amplificazione del deposito di suolo.

5.1.2.2 Analisi dei test in centrifuga

Lo studio condotto presso la centrifuga geotecnica della Colorado Boulder University (Tsai, C.-C., et al., 2021) approfondisce l'influenza dei confini dei contenitori a trave flessibile (Flexible-Shear-Beam) e delle frequenze di sollecitazione sull'interpretazione delle proprietà dinamiche di sabbie asciutte di Ottawa a 70 g.

L'apparato sperimentale comprendeva quattro disposizioni verticali complete di accelerometri posizionati a diverse distanze dai bordi del contenitore: la disposizione degli accelerometri centrale a metà lunghezza (1/2), a un quarto (1/4), ad un ottavo (1/8) e posizionati direttamente sui telai in alluminio della scatola. Le principali evidenze emerse dalle registrazioni accelerometriche includono:

- *Invarianza della posizione rispetto ai bordi per piccole deformazioni:* le Funzioni di Trasferimento calcolate in superficie e alla base durante le vibrazioni ambientali mostrano che la risposta accelerometrica non varia in modo significativo muovendosi dalla disposizione centrale (1/2) fino in prossimità del bordo (1/8);

- *Stima della velocità delle onde di taglio:* attraverso il metodo della propagazione dell'onda applicato alle tracce accelerometriche nei diversi intervalli di profondità, è stato possibile identificare le frequenze fondamentali di primo e secondo modo, a riprova di ciò l'accelerometro si conferma quindi uno strumento di misura indiretta della rigidezza del deposito sotto diverse accelerazioni centrifughe (da 1 g a 70 g);

- *Accoppiamento Contenitore-Terreno:* Tsai et al. evidenziano che sebbene le tracce accelerometriche interne al terreno siano simili tra loro, trascurare la rigidezza e la massa del contenitore FSB nella re-interpretazione dei segnali accelerometrici porta ad una sottostima della reale velocità delle onde sismiche nel terreno.

Come ampiamente discusso nello studio prodotto da Haeri S. e Rajabigol M. (Haeri, S. et al., 2023), l'accuratezza dei dati accelerometrici dipende criticamente dalle modalità di installazione e dalla gestione delle sorgenti di errore in laboratorio, tra cui la rotazione o dislocazione del sensore, il rumore di sistema e acquisizione (interferenze elettromagnetiche) e l’effetto di inclusione (il peso/volume del sensore non deve alterare i risultati).

CAPITOLO 6

Conclusione

6.1 SINTESI DEL LAVORO SVOLTO

Il presente lavoro di tesi si è proposto di analizzare la progettazione, la scelta dei materiali e le applicazioni sperimentali delle Laminar Shear Box (LSB) e dei contenitori flessibili (Equivalent/Flexible Shear Beams, ESB/FSB) impiegati nella modellazione fisica geotecnica su tavola vibrante e in centrifuga.

La modellazione fisica rappresenta un approccio efficace per studiare la risposta sismica locale, i fenomeni di liquefazione e l'interazione terreno-struttura, tuttavia, l'impiego dei tradizionali contenitori rigidi introduce marcati effetti di bordo, legati all'incompatibilità deformativa e alla riflessione delle onde sismiche lungo le pareti. Lo sviluppo delle Laminar Shear Box nasce dall'esigenza di superare tali vincoli, consentendo al terreno confinato di deformarsi lateralmente secondo un regime di puro taglio in modo coerente con la propagazione verticale delle onde, simulando correttamente le condizioni di campo libero (free-field) e di deformazione piana (K0).

6.2 EVIDENZE EMERSE

Dalle soluzioni adottate dai principali centri di ricerca in Europa, Asia e America, è emerso che non esiste uno standard progettuale univoco. Le configurazioni variano notevolmente, spaziando da imponenti strutture biassiali a modelli di dimensioni ridotte per le centrifughe geotecniche. Questa diversità sottolinea che la progettazione di una LSB deve essere un processo “tailorizzato”, pensato per adattarsi alle specifiche limitazioni di carico delle tavole vibranti disponibili e agli obiettivi sperimentali unici di ogni laboratorio.

Di conseguenza a seguito di un’analisi approfondita delle attrezzature esistenti nei principali centri di ricerca, dello studio dei componenti e delle schede tecniche dei materiali, sono emerse alcune chiavi progettuali fondamentali:

- *Bilanciamento tra rigidezza e massa inerziale:* la progettazione di una LSB richiede

di minimizzare la massa del contenitore per evitare che l'inerzia della struttura alteri la risposta dinamica del terreno. L'impiego di leghe di alluminio (come l'alluminio 6061-T6) garantisce un elevato rapporto rigidezza-peso, prevenendo la deformazione delle pareti sotto la spinta orizzontale del terreno e mantenendo contenute le forze inerziali, mentre l'acciaio strutturale (es. S355J2) viene invece adottato per i telai esterni di reazione, le piastre di base e le strutture portanti destinate a scaricare il peso statico al di fuori della tavola vibrante;

- *Minimizzazione dell'attrito e disaccoppiamento dei livelli:* l'adozione di sistemi di scorrimento ad alta precisione (cuscinetti a sfere lineari, ball transfer units, rulli e fogli in PTFE/Teflon) consente il movimento relativo tra le lamine con resistenze parassite trascurabili. Nei sistemi più avanzati, la sospensione indipendente di ciascun telaio, mediante strutture di supporto esterne, impedisce l'accumulo del peso proprio sulle lamine sottostanti;

- *Tenuta idraulica e flessibilità delle membrane:* nei test condotti su terreni saturi soggetti a liquefazione, l'impiego di membrane interne in Neoprene CR, EPDM o silicone (con spessori ridotti a 0,2–2 mm) assicura la tenuta stagna all'acqua interstiziale senza introdurre un "effetto membrana" rigido che ostacolerebbe la libera deformazione del deposito. Inoltre, l'uso di pareti trasparenti in PMMA (acrilico) in alcune configurazioni consente il monitoraggio visivo diretto del movimento dei granelli mediante tecniche ottiche avanzate.

6.3 VALIDAZIONE SPERIMENTALE TRAMITE ACCELEROMETRI

L'analisi del ruolo degli accelerometri (piezoelettrici, piezoresistivi e MEMS) ha evidenziato come tali trasduttori costituiscano l'elemento principale per la validazione qualitativa e quantitativa delle prove in LSB.

Attraverso il posizionamento strategico di batterie verticali di sensori è possibile:

- Determinare le funzioni di trasferimento, l'amplificazione sismica di sito e le frequenze naturali di vibrazione del terreno;
- Valutare l'evoluzione dei moduli dinamici di taglio e dello smorzamento;
- Monitorare la risposta cinematica ed inerziale nelle problematiche di interazione terreno-struttura e terreno-palo, valutando gli effetti del “lateral spreading” indotto dalla liquefazione;
- Verificare l’entità degli effetti di bordo quantificando l'invarianza delle storie temporali di accelerazione lungo la sezione trasversale del contenitore.

In conclusione, la Laminar Shear Box si conferma un dispositivo sperimentale fondamentale nell'ingegneria geotecnica sismica, la corretta selezione dei materiali (alluminio per la leggerezza inerziale, acciaio per il confinamento di reazione, elastomeri per la tenuta e sistemi volventi a basso attrito per la cinematica) consente di realizzare apparati capaci di annullare gli effetti di parete e riprodurre il comportamento del terreno in campo libero.

Le prospettive future della ricerca in questo ambito si orientano verso:

- Lo sviluppo di contenitori laminari 3D e multidirezionali sempre più perfezionati, capaci di simulare ingressi sismici pluriassiali senza introdurre vincoli o torsioni parassite;
- L'integrazione di sistemi di sensoristica non intrusiva e ad alta risoluzione (come la velocimetria ad immagine di particelle - PIV abbinata a pareti trasparenti in acrilico);
- L'affinamento dei modelli numerici avanzati attraverso il benchmarking fornito dai dati accelerometrici e deformativi ottenuti dalle prove con LSB.

Tali avanzamenti permetteranno di migliorare ulteriormente la comprensione dei fenomeni di risposta sismica e di affinare i criteri di progettazione geotecnica delle opere civili ed infrastrutturali.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Bibliografia

Bagheri, O. (2024). Design of a new laminar soil container and its numerical verification for SSI and liquefaction tests.

Bagheri, O., & Eseller-Bayat, E. E. (2024). Laminar Soil Container's Performance Study for Dynamic Laboratory Tests: Comprehensive Review and Numerical Verification. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *28*(7), 2705-2721.

Bandini, V., Cascone, E., Biondi, G., Di Filippo, G., Ingegneri, S., Casablanca, O., ... & Genovese, F. (2019). The shaking table with laminar box of the University of Messina. In *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions* (pp. 1289-1296). CRC Press.

Bistani, A. (2018). Design of a Large-Scale Biaxial Soil-Box for Seismic Soil-Structure-Interaction Studies. *Los Angeles, California, Jun*.

Boniardi, M., Casaroli, A., & Sandrini, V. (2013). Acciai per cuscinetti a rotolamento. *Organi di trasmissione*, 28-34

Castelli, F., Grasso, S., Lentini, V., & Sammito, M. S. V. (2022). Design of a Biaxial Laminar Shear Box for 1g Shaking Table Tests. Geotechnics 2022, 2, 467–487.

Chunxia, H., Hongru, Z., Guoxing, C., & Zhilong, S. (2008). Design and performance of a large-scale soil laminar shear box in shaking table test. In *14th World Conference on Earthquake Engineering*.

Esmaeilpour, P., Mamazizi, A., & Madabhushi, G. S. (2023). An overview of the model container types in physical modeling of geotechnical problems. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 168, 107827.

Feng, D., Zhu, W., Chu, M., El Naggar, M. H., Gong, W., Ren, Y., Dai, G., & Li, B. (2025). Application of innovative multi-directional laminar shear box to evaluate seismic soil - Pile foundation - Nuclear power plant interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *190*, 109152.

Ghayoomi, M., Dashti, S., & McCartney, J. S. (2013). Performance of a transparent Flexible Shear Beam container for geotechnical centrifuge modeling of dynamic problems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *53*, 230-239.

Ghimire, P. (2024). *Development of a Reduced-Order Simulation Model for the Nonlinear Response Analysis of a Large-Scale Laminar Soil Box Experimental System*. University of Nevada, Reno.

Haeri, S. M., & Rajabigol, M. (2023). Effects of liquefaction-induced lateral spreading on piles, an overview of physical modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *173*, 108111.

Lee, S. H., Choo, Y. W., & Kim, D. S. (2013). Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 44, 102-114.

Lei, H., Hu, Y., Han, Q., Zheng, G., Zhao, B., & Du, Y. (2020). Design and test verification of a cylindrical 3D laminar shear soil container for use on shaking tables. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *139*, 106384.

Tsai, C.-C., Lin, C.-Y., Dashti, S., & Kirkwood, P. (2021). Influence of centrifuge container boundaries and loading characteristics on evaluation of dynamic properties in dry sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *142*, 106567.

Turan, A., Hinchberger, S. D., & El Naggar, H. (2009). Design and commissioning of a laminar soil container for use on small shaking tables. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *29*(2), 404-414.

Vivek, B., & Raychowdhury, P. (2019). Design and calibration of a laminar soil box suitable for a low-capacity shake table using free-field tests on Ganga sand. Soils and Foundations, 59(5), 1602-1612.

Wu, W., Ge, S., Yuan, Y., Ding, W., & Anastasopoulos, I. (2020). Seismic response of subway station in soft soil: Shaking table testing versus numerical analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *100*, 103389.

Sitografia

Guarniflon S.p.A. (2023). *Virgin PTFE G400*. Guarniflon. https://www.guarniflon.com/it/risorse/materiali/ptfe/virgin-ptfe-g400

Hilti. (2023). *HST-3 EXPANSION ANCHOR Technical Datasheet*. Hilti Italia. https://www.hilti.it/c/CLS_FASTENER_7135/CLS_MECHANICAL_ANCHORS_7135/r3987939

Hilti. (2025). *PRODUCT TECHNICAL DATASHEET HIT-RE 500 V4 INJECTION MORTAR Concrete-to-concrete*. Hilti Italia. https://www.hilti.it/c/CLS_FASTENER_7135/CLS_CHEMICAL_ANCHORS_7135/r12560055

Holcim Solutions and Products EMEA BV. (2023). Scheda tecnica di prodotto: Membrana RubberGard EPDM LSFR [Scheda tecnica]. Holcim Elevate. https://www.holcimelevate.com

NUDEC, S. A. (2012). *Scheda-Tecnica-NUDEC-PMMA-IT.* https://www.nudec.it/prodotti/nudec-pmma/

Siderticino S.r.l. (2026). scheda-tecnica-acciaio-s355j2. https://siderticino.it/specifiche-tecniche-acciai/s355j2/

Silicone Engineering Ltd. (2017). High Temperature Solid Silicone Elastomer Sheeting (Technical Datasheet SE-NEU-V4-2017). https://silicone.co.uk/products/silicone-sheeting/silicone-solid-sheeting/

SKF. (s.d.). *Cuscinetti assiali a sfere*. https://www.skf.com/it/products/rolling-bearings/ball-bearings/thrust-ball-bearings

Trelleborg Fluid Handling Solutions. (2024). *C500: Black CR SBR 50* - [Scheda tecnica] https://www.trelleborg.com/en/fluidhandling/products-and-solutions/rubber-sheeting-and-matting/sheeting/cr-polychloroprene/c500

Università di Camerino. (s.d., 2024). *Progetto STRIC*. https://www.unicam.it/avvisi/38013