

**POLITECNICO DI TORINO**

*Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Civile*

Tesi di Laurea Magistrale

**Risposta dei terreni a carichi ciclici:  
implementazione di un database di  
prove di laboratorio**



**Relatore**

prof. Ing. Sebastiano Foti

**Correlatori**

Ing. Renato Cosentini  
Ing. Andrea Ciancimino

**Candidato**

Livio Cuffaro

Ottobre 2020



*Alla mia famiglia,  
il bene più prezioso  
che ho*



*Per l'aiuto e i consigli ricevuti nella realizzazione di questo lavoro, vorrei ringraziare il prof. S. Foti e i correlatori Ing. R. Cosentini e Ing. A. Ciancimino, quest'ultimo, in particolar modo, per la sua presenza costante durante tutto il lavoro svolto.*

*Desidero anche ringraziare i tecnici del Laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino, O. Pallara e G. Bianchi, per il loro aiuto e la loro disponibilità durante l'esecuzione delle prove.*

*In ultimo, ma non per importanza, devo un immenso grazie ai miei genitori che mi hanno sempre supportato e che con i loro sacrifici mi hanno permesso di raggiungere questo importante traguardo.*



## SOMMARIO

Il presente studio si inserisce nell'ambito dell'analisi del comportamento dei terreni sottoposti a carichi ciclici e dinamici. La corretta modellazione di tale comportamento costituisce il punto di partenza nella costruzione di un modello numerico affidabile da poter adottare negli studi di risposta sismica locale. In assenza di prove di caratterizzazione specifiche, è prassi comune adottare dei modelli empirici capaci di predire la risposta del terreno in funzione delle proprietà indice dello stesso. Tali modelli vengono generalmente tarati mediante regressioni statistiche effettuate su un'ampia mole di dati sperimentali. La presente tesi si propone come principale obiettivo la realizzazione di un database unificato contenente i risultati delle prove di caratterizzazione fisica e di comportamento ciclico dei terreni effettuate negli ultimi anni presso il Politecnico di Torino. In particolare, alcune di queste prove di colonna risonante (Resonant Column, RC) e taglio torsionale ciclico (Cyclic Torsional Shear, CTS) sono state eseguite nell'ambito del presente lavoro. Il database è stato integrato con i risultati delle prove effettuate da diversi laboratori nell'ambito del progetto di Microzonazione Sismica di Livello 3 per i comuni del Centro Italia colpiti dagli eventi sismici a far data dal 24 agosto 2016. Sono state incluse inoltre diverse prove di taglio semplice ciclico con doppio campione (Double Specimen Direct Simple Shear, DSDSS) svolte dall'Università La Sapienza di Roma. Il database ottenuto si compone di 189 prove di cui 50 condotte su sabbia e 139 su terreni a grana fine. Le prove hanno interessato per lo più campioni indisturbati prelevati in diverse aree del territorio nazionale.

La catalogazione dei risultati delle prove ha consentito di eseguire una valutazione di alcuni modelli presenti in letteratura, tramite il confronto diretto con i dati sperimentali, in relazione alla definizione delle soglie deformative lineari e volumetriche, delle curve di variazione del modulo di rigidezza a taglio e del fattore di smorzamento. Un modello capace di cogliere opportunamente le soglie deformative e le predette curve di variazione può infatti essere utilizzato per predire adeguatamente il comportamento del terreno sotto carichi sismici. Il risultato di tale confronto ha evidenziato che i valori di soglia lineare definiti dai dati sperimentali sono alquanto differenti rispetto a quelli riportati in letteratura, che generalmente ne forniscono una sottostima. La distribuzione dei dati sperimentali varia in un intervallo deformativo che va da  $4 \cdot 10^{-4}\%$  a  $10^{-2}\%$ . Le soglie volumetriche, invece, sono più fedeli ai modelli di letteratura.

Un'ulteriore analisi è stata effettuata al fine di valutare l'influenza della tipologia di prova condotta sul fattore di smorzamento a piccole deformazioni. I valori ottenuti tramite prove di colonna risonante sono risultati, in media, maggiori di quelli ottenuti

con taglio torsionale ciclico. Inoltre il confronto del modello di Darendeli (2001) con i risultati della colonna risonante ha evidenziato una sovrastima del fattore di smorzamento dei dati sperimentali.

L'analisi di un così gran numero di dati e i confronti con i modelli di letteratura hanno evidenziato l'elevata variabilità dei parametri dinamici dei terreni del territorio nazionale. Risulta pertanto necessario lo sviluppo di nuovi modelli empirici, capaci di cogliere maggiormente e adeguatamente le specificità dei terreni del nostro territorio. Ciò consentirà più adeguate valutazioni della pericolosità sismica locale, la cui conoscenza è basilare per programmare strategie di mitigazione del rischio sismico.

## ABSTRACT

This study is part of the analysis of the soil behaviour under cyclic and dynamic loadings. A local seismic response study cannot disregard a proper modelling of the nonlinear soil response. However, in absence of specific laboratory tests, it is common practice to adopt empirical models able to predict the soil behaviour as a function of its physical properties. These models are usually calibrated through a statistic regression over a wide range of experimental data. The main goal of this thesis was the development of a unified database holding the results of physical and cyclic laboratory tests carried out over the past years in the Politecnico di Torino. Some of these tests, in particular, Resonant Column (RC) and cyclic torsional shear (CTS) tests, were carried out during this thesis.

The database was supplemented by the results of several tests carried out by different laboratories within the project of Level 3 Seismic Microzonation, for the municipalities of Central Italy hit by seismic events since August 24, 2016. Moreover, results of Double Specimen Direct Simple Shear (DSDSS) carried out by the laboratory of the University of Rome “La Sapienza” were also included. The obtained database consists of 189 tests, 50 tests performed on sand and 139 on fine-grain soils. The tests were carried out mostly on undisturbed samples taken in different areas in Italy.

The classification of the results allowed for evaluating some literature models through direct comparison with experimental data. The main comparisons concerned the assessment of linear and volumetric cyclic shear strain thresholds and the shear modulus reduction and damping ratio curves (MRD). Indeed, a model able to capture the cyclic shear strain thresholds and the MRD curves can be used to properly predict the soil behaviour under seismic loadings. The experimental data showed quite different linearity thresholds compared to the literature values. The experimental data distribution cover a wide strain range, from  $4 \cdot 10^{-4}\%$  up to  $10^{-2}\%$ , while the empirical models predict usually lower shear strain thresholds. Conversely, the predictive models seems to be more faithful to the experimental data in terms of cyclic shear strain volumetric thresholds.

A further analysis was then performed to evaluate the influence of the method for testing on the small-strain damping ratio. Values obtained by resonant column tests were higher than those obtained by cyclic torsional shear tests. An overestimation of the damping factor of the experimental data was also observed by comparing the Darendeli model (2001) to the results of the resonant column.

The analysis of such a large number of data and their comparison with the literature models allowed to highlight the extreme variability of the cyclic behaviour of the Italian

soil. In this respect, it is of paramount importance to develop new empirical models able to better and adequately capture the peculiarities of soils present in the Italian territory. This will allow a correct assessment of local seismic hazard, the knowledge of which is essential for planning seismic risk mitigation strategies.

# INDICE

Introduzione.....	1
Capitolo 1 : Cenni di teoria e apparecchiatura utilizzata.....	5
Introduzione.....	5
1.1 Comportamento dinamico dei terreni.....	5
1.2 Colonna risonante.....	11
1.3 Taglio torsionale ciclico.....	15
1.4 Taglio semplice ciclico con doppio provino.....	17
1.5 Descrizione dell'apparecchiatura utilizzata per le prove.....	18
Capitolo 2 : Esecuzione delle prove sperimentali.....	23
Introduzione.....	23
2.1 Prove di colonna risonante.....	23
2.2 Prove di taglio torsionale ciclico.....	33
Capitolo 3 : Descrizione del database implementato.....	37
Introduzione.....	37
3.1 Struttura del Database.....	37
3.2 Caratterizzazione fisica dei terreni.....	41
Capitolo 4 : Analisi dei risultati.....	47
4.1 Valori di smorzamento a piccolissime deformazioni da RC e TTC a confronto.....	50
4.2 Analisi delle soglie di deformazione ciclica.....	59
4.3 Curve di variazione del modulo di rigidità a taglio e del rapporto di smorzamento.....	67
4.3.1 Terreni a grana fine.....	67
4.3.2 Sabbie.....	74
CONCLUSIONI.....	82
BIBLIOGRAFIA.....	85
APPENDICE 1.....	88
APPENDICE 2.....	96
APPENDICE 3.....	110
APPENDICE 4.....	113

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1: ANDAMENTO DEL FATTORE DI SMORZAMENTO $D_0$ AL VARIARE DELLA TENSIONE EFFETTIVA E DELLA TIPOLOGIA DI TERRENO (VINALE ET AL., 1996).....	6
FIGURA 1.2: CURVE DI VARIAZIONE DELLE GRANDEZZE DINAMICHE E ANDAMENTO DELLE SOVRAPPRESSIONI INTERSTIZIALI (DA LANZO E SILVESTRI, 1999) .....	7
FIGURA 1.3: PIANO SFORZI-DEFORMAZIONI NEL TRATTO A PICCOLE DEFORMAZIONI DELLE CURVE DI VARIAZIONE (DA LANZO E SILVESTRI, 1999) .....	8
FIGURA 1.4: PIANO SFORZI-DEFORMAZIONI NEL TRATTO A MEDIE DEFORMAZIONI DELLE CURVE DI VARIAZIONE (DA LANZO E SILVESTRI, 1999) .....	9
FIGURA 1.5: PIANO SFORZI-DEFORMAZIONI NEL TRATTO A GRANDI DEFORMAZIONI DELLE CURVE DI VARIAZIONE (DA LANZO E SILVESTRI, 1999) .....	9
FIGURA 1.6: CAMPI DI VARIAZIONE PER DIVERSI TERRENI DELLA CURVA DI DECADIMENTO DEL MODULO DI TAGLIO (DA SEED ET AL., 1986; DOBRY & VUCETIC, 1987) .....	10
FIGURA 1.7: (A) DIPENDENZA DELLE CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO E DEL FATTORE DI SMORZAMENTO DALL'INDICE DI PLASTICITÀ (ARGILLE); (B) DIPENDENZA DELLE CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO E DEL FATTORE DI SMORZAMENTO DALLA TENSIONE DI CONFINAMENTO (SABBIE) (DA DARENDELI 2001) .....	11
FIGURA 1.8: SCHEMA DI COLONNA RISONANTE TIPO FIXED-FREE (DA PALLARA O., 1995) ..	11
FIGURA 1.9: NOMOGRAMMA ISHIHARA, 1996 .....	13
FIGURA 1.10: CURVA DI RISONANZA (DA FOTI S. (2015) CORSO DI GEOTECNICA SISMICA INGEGNERIA CIVILE) .....	13
FIGURA 1.11: "HALF-POWER BANDWIDTH" METHOD (DA FOTI S. (2015) CORSO DI GEOTECNICA SISMICA INGEGNERIA CIVILE) .....	14
FIGURA 1.12: DETERMINAZIONE DELLO SMORZAMENTO DAL CALCOLO DEL DECREMENTO LOGARITMICO (PALLARA O., 1995) .....	15
FIGURA 1.13: CURVA SFORZI-DEFORMAZIONI (DALLE DISPENSE DEL CORSO DI INGEGNERIA CIVILE, FOTI S. (2016)).....	16
FIGURA 1.14: SCHEMA DELL'APPARECCHIATURA DSDSS (DA LANZO G., 2012).....	17
FIGURA 1.15: SCHEMATIZZAZIONE DELL'APPARECCHIATURA DI COLONNA RISONANTE E TAGLIO TORSIONALE CICLICO (DA PALLARA O., 1995).....	18
FIGURA 1.16: PARTE INFERIORE DELL'APPARECCHIATURA, POLITECNICO DI TORINO.....	19
FIGURA 1.17: PIETRA POROSA DI BRONZO ALLA BASE, POLITECNICO DI TORINO.....	19
FIGURA 1.18: STRUTTURA DI SOSTEGNO DEL DRIVE-SYSTEM, POLITECNICO DI TORINO.....	20
FIGURA 1.19: DRIVE-SYSTEM, POLITECNICO DI TORINO.....	21
FIGURA 1.20: CELLA DI PRESSIONE IN ACCIAIO, POLITECNICO DI TORINO .....	22
FIGURA 2.1: CURVE GRANULOMETRICHE DEI CAMPIONI DI MATERIALE NATURALE, PROGETTO RESBA, POLITECNICO DI TORINO (2019) .....	23
FIGURA 2.2: CURVA GRANULOMETRICA DELLA SABBIA DI PERTH (MODIFICATA DA BUCHEISTER 2009) .....	24
FIGURA 2.3: POSIZIONAMENTO DEL CAMPIONE DI ENVIE-LA GRENGIA SULLA BASE DELL'APPARECCHIATURA, POLITECNICO DI TORINO.....	25
FIGURA 2.4: PREPARAZIONE DEL PROVINO DI SABBIA (PERTH), POLITECNICO DI TORINO ...	26
FIGURA 2.5: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, NIELLA TANARO S1-C1 .....	27
FIGURA 2.6: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, NIELLA TANARO S1-C2 .....	28

FIGURA 2.7: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, NIELLA TANARO S1-C3 .....	28
FIGURA 2.8: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, ENVIE-LA GRENGIA S1-C2.....	29
FIGURA 2.9: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, ENVIE-CASCINA RUBIOLO S1-C2.....	29
FIGURA 2.10: CURVE DI RISONANZA AD ELEVATI LIVELLI DEFORMATIVI DELLA PROVA DI COLONNA RISONANTE SU NIELLA TANARO S1-C1 .....	30
FIGURA 2.11: CURVE DI RIDUZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO PER IL CAMPIONE C1, DELLA SABBIA DI PERTH, A DIVERSI LIVELLI TENSIONALI .....	31
FIGURA 2.12: CURVE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO PER IL CAMPIONE C1, DELLA SABBIA DI PERTH, A DIVERSI LIVELLI TENSIONALI .....	31
FIGURA 2.13: CURVE DI RIDUZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO PER IL CAMPIONE C2, DELLA SABBIA DI PERTH, A DIVERSI LIVELLI TENSIONALI .....	32
FIGURA 2.14: CURVE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO PER IL CAMPIONE C2, DELLA SABBIA DI PERTH, A DIVERSI LIVELLI TENSIONALI .....	32
FIGURA 2.15: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE NIELLA TANARO S1-C1 .....	34
FIGURA 2.16: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE NIELLA TANARO S1-C2 .....	34
FIGURA 2.17: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE NIELLA TANARO S1-C3 .....	35
FIGURA 2.18: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE ENVIE-LA GRENGIA S1-C2 .....	35
FIGURA 2.19: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE ENVIE-CASCINA RUBIOLO S1-C2 .....	36
FIGURA 3.1: ORGANIZZAZIONE DELLA VARIABILE STRUTTURATA 'DATA' .....	39
FIGURA 3.2: GEOLOCALIZZAZIONE DEI CAMPIONI PRELEVATI IN ITALIA.....	40
FIGURA 3.3: CLASSIFICAZIONE DEI CAMPIONI INSERITI NEL DATABASE SECONDO LA DESCRIZIONE GRANULOMETRICA .....	42
FIGURA 3.4: DISTRIBUZIONE DELLE CURVE GRANULOMETRICHE DEI CAMPIONI INSERITI ALL'INTERNO DEL DATABASE.....	43
FIGURA 3.5: PERCENTUALE DI CAMPIONI PER INDICE DI PLASTICITÀ DEI TERRENI IN MATERIALE FINE .....	44
FIGURA 3.6: NUMERO DI CAMPIONI PER INDICE DI PLASTICITÀ DEI TERRENI A GRANA GROSSA .....	45
FIGURA 3.7: CARTA DI PLASTICITÀ DI CASAGRANDE PER LA CLASSIFICAZIONE DEI TERRENI CON PREVALENZA DI MATERIALE FINE.....	45
FIGURA 3.8: CLASSIFICAZIONE DEI CAMPIONI INSERITI ALL'INTERNO DEL DATABASE PER I MATERIALI A GRANA FINE SECONDO ACTIVITY CHART .....	46
FIGURA 4.1: PERCENTUALE DI CAMPIONI PER RIGIDEZZA A TAGLIO A PICCOLISSIME DEFORMAZIONI DEI TERRENI IN MATERIALE FINE .....	47
FIGURA 4.2: PERCENTUALI DI CAMPIONI PER RIGIDEZZA A TAGLIO A PICCOLISSIME DEFORMAZIONI DEI TERRENI A GRANA GROSSA .....	48
FIGURA 4.3: DIPENDENZA DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO $D_0$ DALLA TENSIONE EFFETTIVA DI CONSOLIDAZIONE .....	49
FIGURA 4.4: DISTRIBUZIONE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO $D_0$ PER I CAMPIONI A GRANA FINE IN BASE ALLE PROVE DI COLONNA RISONANTE O TAGLIO SEMPLICE CICLICO .....	49

FIGURA 4.5: DISTRIBUZIONE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO $D_0$ PER I CAMPIONI A GRANA GROSSA IN BASE ALLE PROVE DI COLONNA RISONANTE O TAGLIO SEMPLICE CICLICO .....	50
FIGURA 4.6: CONFRONTO TRA $D_0$ VALUTATO CON IL METODO DELLE OSCILLAZIONI LIBERE E QUELLO VALUTATO CON IL TAGLIO TORSIONALE CICLICO .....	51
FIGURA 4.7: CONFRONTO DI $D_0$ DELLA COLONNA RISONANTE (FREE VIBRATIONS) E DEL TAGLIO TORSIONALE PER I CAMPIONI IL CUI LIVELLO DEFORMATIVO ASSOCIATO SIA INFERIORE ALLA SOGLIA DI LINEARITÀ .....	52
FIGURA 4.8: CONFRONTO TRA I VALORI DI SMORZAMENTO DERIVANTI DALLE PROVE DI TAGLIO TORSIONALE CICLICO E COLONNA RISONANTE, CON IL METODO "HALF-POWER BANDWIDTH", LE CUI DEFORMAZIONI RISULTANO MINORI DELLE RISPETTIVE SOGLIE DI LINEARITÀ .....	53
FIGURA 4.9: VALUTAZIONE DEL RAPPORTO TRA SMORZAMENTO MISURATO E SMORZAMENTO CALCOLATO A PICCOLE DEFORMAZIONI IN FUNZIONE DEGLI ANNI.....	54
FIGURA 4.10: SITUAZIONE IN CUI VENGONO TENUTI IN CONTO TUTTI I CICLI (A), CONDIZIONE IN CUI VENGONO CONSIDERATI SOLTANTO 10 CICLI (B) (IN ALTO IL CAMPIONE CON PI MINIMO E IN BASSO IL CAMPIONE CON PI MASSIMO) .....	55
FIGURA 4.11: CURVE DI AMPLIFICAZIONE DEI DUE CAMPIONI A SECONDA DEI CICLI CONSIDERATI .....	56
FIGURA 4.12: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DELLE DUE CONFIGURAZIONI PER IL CAMPIONE CON $PI=8.79\%$ (MINIMO) .....	57
FIGURA 4.13: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DELLE DUE CONFIGURAZIONI PER IL CAMPIONE CON $PI=36.6\%$ (MASSIMO) .....	57
FIGURA 4.14: CONFRONTO TRA I VALORI DEL DAMPING DELLE DUE CONFIGURAZIONI PER IL CAMPIONE CON $PI=8.79\%$ .....	58
FIGURA 4.15: CONFRONTO TRA I VALORI DEL DAMPING DELLE DUE CONFIGURAZIONI PER IL CAMPIONE CON $PI=36.6\%$ .....	58
FIGURA 4.16: DIFFERENZA TRA I VALORI DI $D_0$ , DI TUTTE LE PROVE RIELABORATE, VALUTATI CON IL METODO HALF-POWER BANDWIDTH E CON LE OSCILLAZIONI LIBERE PER LE DUE DIVERSE CONFIGURAZIONI .....	59
FIGURA 4.17: EFFETTO DELL'INDICE DI PLASTICITÀ SULLA SOGLIA LINEARE E SULLA SOGLIA VOLUMETRICA (DA VUCETIC, 1994, SIMBOLOGIA IN APPENDICE 4).....	60
FIGURA 4.18: ANDAMENTI DEL VALORE ADIMENSIONALE $G/G_0$ AL VARIARE DELL'INDICE DI PLASTICITÀ (DA DARENDELI, 2001) .....	61
FIGURA 4.19: CONFRONTO TRA I VALORI DELLE SOGLIE DEFORMATIVE DEI CAMPIONI INSERITI DENTRO IL DATABASE E LE CURVE DEL LAVORO DI VUCETIC E DOBRY (1991).....	61
FIGURA 4.20: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DEI CAMPIONI INSERITI NEL DATABASE E LE CURVE DI VUCETIC E DOBRY (1991), CON PLASTICITÀ INTERNA AL RANGE $5 < PI \leq 15$ .....	62
FIGURA 4.21: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DEI CAMPIONI INSERITI NEL DATABASE E LE CURVE DI VUCETIC E DOBRY (1991), CON PLASTICITÀ INTERNA AL RANGE $15 < PI \leq 40$ .....	63
FIGURA 4.22: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DEI CAMPIONI INSERITI NEL DATABASE E LE CURVE DI VUCETIC E DOBRY (1991), CON PLASTICITÀ $PI > 40$ .....	63
FIGURA 4.23: CONFRONTO TRA LE SOGLIE VOLUMETRICHE VALUTATE SECONDO DIVERSI CRITERI, CON IN ASCISSA LE SOGLIE RICAVATE CONSIDERANDO LA NASCITA DELLE SOVRAPPRESSIONI INTERSTIZIALI E IN ORDINATE LE SOGLIE RICAVATE APPLICANDO IL CRITERIO DI VUCETIC (1994).....	64
FIGURA 4.24: DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI SOGLIA VOLUMETRICA PER DUE DIVERSI CRITERI E CONFRONTO CON LA CURVA DI VUCETIC E DOBRY (1991) .....	66

FIGURA 4.25: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=10$ ) CON LE CURVE DI DECADIMENTO DEL MODULO PER I CAMPIONI CON $PI$ INTERNO AL RANGE $5 < PI \leq 15$ .....	70
FIGURA 4.26: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=10$ ) CON LE CURVE DI VARIAZIONE DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO PER I CAMPIONI CON $PI$ INTERNO AL RANGE $5 < PI \leq 15$ .....	71
FIGURA 4.27: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=27.5$ ) CON LE CURVE DI DECADIMENTO DEL MODULO PER I CAMPIONI CON $PI$ INTERNO AL RANGE $15 < PI \leq 40$ .....	71
FIGURA 4.28: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=27.5$ ) CON LE CURVE DI VARIAZIONE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO PER I CAMPIONI CON $PI$ INTERNO AL RANGE $15 < PI \leq 40$ .....	72
FIGURA 4.29: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=45$ ) CON LE CURVE DI DECADIMENTO DEL MODULO PER I CAMPIONI CON $PI > 40$ .....	72
FIGURA 4.30: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=45$ ) CON LE CURVE DI VARIAZIONE DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO PER CAMPIONI CON $PI > 40$ .....	73
FIGURA 4.31: EFFETTO DEI PARAMETRI ( $D_{50}$ , $e$ , $C_u$ ) SULLA DEFORMAZIONE DI RIFERIMENTO $\gamma_r$ (DA MENQ, 2003) .....	75
FIGURA 4.32: EFFETTO DEI PARAMETRI ( $D_{50}$ , $e$ , $C_u$ ) SUL COEFFICIENTE DI CURVATURA "a" (DA MENQ, 2003) .....	75
FIGURA 4.33: EFFETTO DELLA TENSIONE DI CONFINAMENTO SUI PARAMETRI DEL MODELLO, $\gamma_r$ ED $a$ (DA MENQ, 2003) .....	76
FIGURA 4.34: NUMERO DI CAMPIONI PER TENSIONE DI CONFINAMENTO DELLE PROVE INSERITE ALL'INTERNO DEL DATABASE DEI TERRENI GROSSOLANI .....	77
FIGURA 4.35: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI CON LE CURVE DEL MODELLO DI MENQ (2003) PER $\sigma'_m = 100$ kPa .....	77
FIGURA 4.36: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI CON LE CURVE DEL MODELLO DI MENQ (2003) PER $\sigma'_m = 200$ kPa .....	78
FIGURA 4.37: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI CON LE CURVE DEL MODELLO DI MENQ (2003) PER $C_u = 2$ .....	79
FIGURA 4.38: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI, PER CAMPIONI ASCIUTTI, CON LE CURVE DI MENQ (2003) PER $C_u = 2.34$ .....	80
FIGURA 4.39: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI, PER CAMPIONI SATURI, CON LE CURVE DI MENQ (2003) PER $C_u = 1.79$ .....	80

## INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 2.1: DATI E CARATTERISTICHE DEI CAMPIONI DEL PROGETTO RESBA .....	24
TABELLA 2.2: DATI E CARATTERISTICHE DEI CAMPIONI DI SABBIA (PERTH) .....	25
TABELLA 3.1: DEFINIZIONE DELLA PLASTICITÀ DEI TERRENI .....	44
TABELLA 4.1: PARAMETRI DI DARENDELI TARATI PER IL TERRITORIO ITALIANO.....	53
TABELLA 4.2: SCARTI TRA LE SOGLIE VOLUMETRICHE VALUTATE COL CRITERIO DI VUCETIC E QUELLE RICAVATE CONSIDERANDO DIVERSE PERCENTUALI DEL RAPPORTO TRA SOVRAPPRESSIONI E TENSIONE DI CONFINAMENTO .....	65
TABELLA 4.3: VALORI DEI PARAMETRI DEL MODELLO (DA DARENDELI, 2001) .....	69

## Introduzione

Il comportamento di un terreno sottoposto a carichi sismici è, generalmente, assunto come visco-elastico lineare per bassi livelli deformativi. In questa condizione, esiste un legame di tipo lineare tra tensioni e deformazioni. Questo implica che, durante una sollecitazione ciclica, quando aumenta la sollecitazione aumenta linearmente anche la deformazione. Successivamente, quando viene applicato un carico in direzione contraria ci si muove lungo la stessa linea di carico-scarico. Ciò porta a due conseguenze: 1) la dissipazione di energia è dovuta soltanto all'aliquota di smorzamento viscoso introdotto nel modello e 2) l'assenza di deformazioni permanenti (danneggiamenti) accumulate durante i cicli. Si assumono carichi ciclici perché al sisma viene associato un carico che varia secondo cicli irregolari.

In realtà, nei terreni, il legame tra sforzi e deformazioni è fortemente non lineare e, quindi, non è corretto descriverne il comportamento tramite un modello elastico lineare. Questo comportamento sotto carichi ciclici può essere studiato in laboratorio mediante diverse prove.

Usualmente, nella "*Dinamica dei terreni*", con carichi ciclici si intendono carichi variabili nel tempo che alternano periodicamente fasi di carico, scarico e ricarico (la velocità di applicazione dei carichi è tale che risulta lecito trascurare le forze di inerzia).

Se gli sforzi statici iniziali ( $\tau_0$ ) sono elevati e quelli dovuti ai carichi dinamici e ciclici presentano un'ampiezza ridotta rispetto ad essi, la combinazione delle azioni dà un effetto risultante che risente poco della presenza di questi ultimi; in caso contrario, se i carichi ciclici hanno un'ampiezza elevata, il comportamento del terreno può divenire marcatamente non lineare e irreversibile e, quindi, il comportamento del terreno sarà influenzato sia dalle caratteristiche dell'eccitazione dinamica sia dalla sua stessa natura, nonché dalle condizioni di drenaggio.

Questo comporta delle modifiche sulla struttura dei terreni con un accumulo di pressioni interstiziali, la nascita di deformazioni irreversibili e la variazione di rigidità e resistenza.

Il comportamento del terreno in presenza di carichi dinamici e ciclici è complesso a causa di:

- natura granulare dei terreni;
- presenza di più fasi (solido, liquido e gassoso);
- instaurarsi di condizioni parzialmente o totalmente non drenate.

In generale le azioni dinamiche e cicliche comportano variazione di volume nei terreni asciutti o la nascita di pressioni interstiziali in terreni saturi. Quindi, le modifiche della struttura dei terreni sottoposti a carichi dinamici e ciclici dipendono da:

- natura del terreno, sia esso incoerente o coesivo;
- stato di addensamento iniziale (indice dei vuoti), infatti per un terreno sciolto si avrà inizialmente una riduzione del volume, mentre per un terreno addensato inizialmente si avrà un aumento del volume;
- ampiezza dello sforzo di taglio sollecitante;
- numero di cicli.

Per studiare il comportamento del terreno si ricorre generalmente a prove di laboratorio quali: la prova di colonna risonante e di taglio torsionale ciclico, per bassi e medi livelli deformativi, e la prova di taglio semplice ciclico per elevati livelli deformativi.

Mediante queste prove è possibile avere il controllo sulle tensioni, sulle deformazioni e sul drenaggio del campione, ma, allo stesso tempo, la scala su cui si lavora non riesce a tenere in conto i volumi che interagiscono con le opere di ingegneria.

Nel primo capitolo di questo lavoro viene descritta la teoria e l'apparecchiatura sperimentale delle principali prove che si svolgono in laboratorio per determinare il comportamento meccanico di un terreno soggetto ad azione sismica. Queste sono la prova di colonna risonante, il taglio torsionale ciclico e il taglio semplice con doppio campione.

Il secondo capitolo, invece, costituisce la parte sperimentale di questa tesi. Infatti, sono state svolte 14 prove di colonna risonante e taglio torsionale ciclico; cinque di queste hanno interessato un uguale numero di campioni, prelevati nel comune di Cuneo, mentre le restanti nove sono state eseguite su due campioni di sabbia, prelevata dalla località di Perth (Australia), realizzati in laboratorio, a diversi valori di tensione di confinamento.

Nel terzo capitolo è descritta la costruzione del database di prove di laboratorio che è stato utilizzato per eseguire delle elaborazioni sulle prove da confrontare coi modelli presenti in letteratura. Per la realizzazione del database sono state analizzate 209 prove effettuate da diversi laboratori, presenti nel territorio italiano. Il database comprende tutte le prove realizzate dal Laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino in un periodo di circa vent'anni (1999-2019). Di queste prove ne sono state escluse 20 in quanto non presentavano informazioni sulle grandezze fisiche caratteristiche. Sono inoltre state incluse le prove eseguite da diversi laboratori di Università italiane nell'ambito del progetto di Microzonazione Sismica di Livello 3 per i comuni del Centro Italia colpiti dagli eventi sismici a far data dal 24 agosto 2016.

In definitiva il database comprende 189 prove, di cui 139 sono state eseguite su campioni composti da materiale a grana fine, mentre 50 sono quelle eseguite su materiale grossolano.

L'ultima parte di questo lavoro è dedicata alle elaborazioni. Una prima analisi interessante ha riguardato il fattore di smorzamento a piccole deformazioni, di cui si è considerato solo quello dei campioni per cui erano state eseguite sia la colonna risonante che il taglio torsionale ciclico. Quest'analisi ha evidenziato come il damping calcolato con il taglio torsionale restituisca valori mediamente inferiori di smorzamento. Successivamente è stato fatto un confronto tra il fattore di smorzamento misurato e quello calcolato, seguendo le relazioni di Darendeli (2001) e usando dei parametri validi per il territorio italiano, in relazione agli anni in cui erano state eseguite le prove; questo ha permesso di mettere in evidenza come col passare degli anni, a causa delle correnti parassite e dei componenti elettronici, la differenza tra i due valori di smorzamento risulti sempre più marcata. Per concludere le analisi sullo smorzamento, è stato eseguito, considerando il metodo "half-power bandwidth", un confronto tra i valori di smorzamento ottenuti considerando tutti i cicli di carico e quelli ricavati andando a considerare solamente 10 cicli a risonanza. Questo ha permesso di constatare come i valori del fattore di smorzamento ottenuti con la seconda analisi risultino più vicini ai risultati derivanti dall'applicazione del metodo delle oscillazioni libere.

Per quanto riguarda le elaborazioni più specifiche, si è scelto di operare su due database distinti in base alla tipologia del materiale, in modo da rendere più semplice la trattazione. Per quanto riguarda i campioni in materiale fine sono stati valutati i valori delle soglie lineari e volumetriche con due diversi metodi. Il primo è quello adoperato da Vucetic M. (1994), in cui le soglie vengono determinate come i valori di deformazione a taglio corrispondenti a  $G/G_0=0.99$  e  $G/G_0=0.65$ , rispettivamente per la soglia lineare e per quella volumetrica. Il secondo, invece, per la determinazione della soglia volumetrica considera la nascita delle sovrappressioni interstiziali. La deformazione sarà quella corrispondente ad un valore di  $\Delta u/\sigma'_m=0.01$ .

A questo è seguito il confronto dei dati presenti nel database con le curve di letteratura di Vucetic M. e Dobry R. (1991), in cui si evidenzia come i dati sperimentali forniscano dei valori di soglia lineare alquanto differenti rispetto a quelli che si leggono in letteratura, poiché sottostimati. La loro distribuzione si inserisce in un intervallo deformativo che va da circa  $4 \cdot 10^{-4}\%$  a circa  $10^{-2}\%$ , mentre le soglie volumetriche risultano più fedeli al modello di letteratura.

Un altro confronto dei risultati presenti nel database, è stato eseguito con le curve di Darendeli (2001). L'analisi è stata svolta utilizzando gli stessi parametri adoperati da

Darendeli nel suo lavoro e andando a considerare tre range di indice di plasticità, avendo assunto una tensione di confinamento media all'interno di ogni intervallo di plasticità. Si è scelto di differenziare i risultati delle tre diverse prove di laboratorio (colonna risonante, taglio torsionale ciclico e taglio semplice ciclico con doppio provino) in modo da mettere in luce le differenze presenti nel calcolo delle diverse grandezze meccaniche del terreno.

Per quanto riguarda i campioni in materiale grossolano è stato svolto un confronto con il modello di Menq F. (2003). Inizialmente si è analizzato il comportamento del materiale considerando la tensione di confinamento costante e facendo variare il coefficiente di uniformità  $C_u$  e, successivamente, considerando costante  $C_u$  e facendo variare la tensione di confinamento.

# Capitolo 1 : Cenni di teoria e apparecchiatura utilizzata

## *Introduzione*

La determinazione sperimentale del modulo di rigidezza a taglio e del fattore di smorzamento al variare del livello deformativo  $\gamma$  consente di determinare il comportamento meccanico dei terreni, di cui si parlerà più avanti. A tal fine si ricorre a prove di laboratorio quali: la prova di colonna risonante e di taglio torsionale ciclico, per bassi e medi livelli deformativi, e la prova di taglio semplice ciclico per elevati livelli deformativi.

Grazie alle prove di laboratorio si può garantire il controllo sulle tensioni, sulle deformazioni e sul drenaggio del campione, ma allo stesso tempo è difficile riuscire a riprodurre lo stato tensionale presente in situ e a considerare gli stessi volumi che interagiscono con le opere di ingegneria.

### *1.1 Comportamento dinamico dei terreni*

La risposta dei terreni, sottoposti ad azioni cicliche e variabili nel tempo, presenta un comportamento non lineare con concentrazioni di deformazioni e dissipazione di energia, spesso non recuperabile, oltre ad un decadimento progressivo dei parametri meccanici. Essendo il sisma un'azione di breve durata, qualora vi sia presenza di acqua interstiziale nel terreno, va tenuto in conto la nascita di pressioni interstiziali, in quanto, la maggior parte delle volte, ci si trova in condizioni non drenate.

Per studiare il comportamento dei terreni è opportuno ricorrere a modelli semplificati degli stessi, che riescano a simulare abbastanza fedelmente la risposta del terreno ad un'azione ciclica.

Per comprendere il comportamento dei terreni sottoposti ad una tensione tangenziale variabile nel tempo è possibile, in via semplificata, ricorrere ad una coppia di parametri che variano con la deformazione tangenziale.

Il primo parametro è il modulo di rigidezza a taglio  $G$ , che è l'inclinazione della secante al legame non lineare tra sforzi e deformazioni e che diminuisce quando aumenta la deformazione; l'andamento di questo modulo con la deformazione viene definito come curva di decadimento del modulo di taglio.

Il secondo parametro è il rapporto di smorzamento  $D$ , che corrisponde al rapporto tra l'energia che viene dissipata in un singolo ciclo di carico e la massima energia accumulata. A differenza del modulo a taglio, all'aumentare della deformazione si ha un incremento della dissipazione. All'interno dei database è stato inserito il valore di

rapporto di smorzamento a piccolissime deformazioni, avendo assunto come valore dello smorzamento  $D_0$  quello corrispondente al livello deformativo per cui  $G/G_0=1$ . Il valore dello smorzamento  $D_0$  è influenzato dallo stato tensionale effettivo, in particolare, esso diminuisce all'aumentare dello stato tensionale. Ma i valori di  $D_0$  variano a seconda del materiale e non sempre permettono una precisa valutazione degli effetti dei valori costitutivi (Lanzo e Silvestri, 1999). In base al tipo di terreno e alla pressione di confinamento, il valore atteso di smorzamento a piccole deformazioni varia (vedi FIGURA 1.1, Vinale et al., 1996).

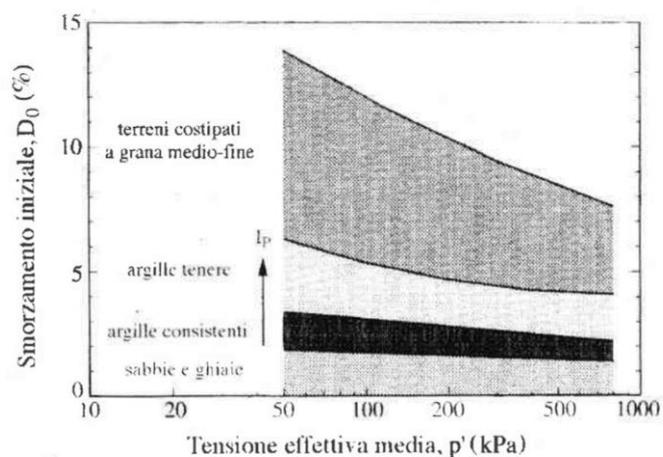


FIGURA 1.1: ANDAMENTO DEL FATTORE DI SMORZAMENTO  $D_0$  AL VARIARE DELLA TENSIONE EFFETTIVA E DELLA TIPOLOGIA DI TERRENO (VINALE ET AL., 1996)

In figura si vede come i valori dello smorzamento  $D_0$ , in relazione allo stato tensionale, si concentrano tra lo 0 e il 2% per terreni grossolani; mentre per i terreni a grana fine si hanno valori maggiori e una marcata diminuzione dei valori del rapporto di smorzamento con lo stato tensionale, passando da argille consistenti a tenere.

A parità di condizioni tensionali, i valori caratteristici di  $D_0$  dovrebbero aumentare con l'indice di plasticità (Vinale et al., 1996).

L'analisi delle curve di variazione dei parametri dinamici ( $G$  e  $D$ ) e delle sovrappressioni interstiziali permette di definire degli intervalli in cui cambia il comportamento del terreno (vedi FIGURA 1.2). Focalizzandosi sul modulo di taglio, si trova un ampio tratto (si rappresenta la deformazione in scala logaritmica) in cui tale modulo si mantiene pressoché costante per poi, superata una soglia di deformazione, vedere un marcato decremento del modulo.

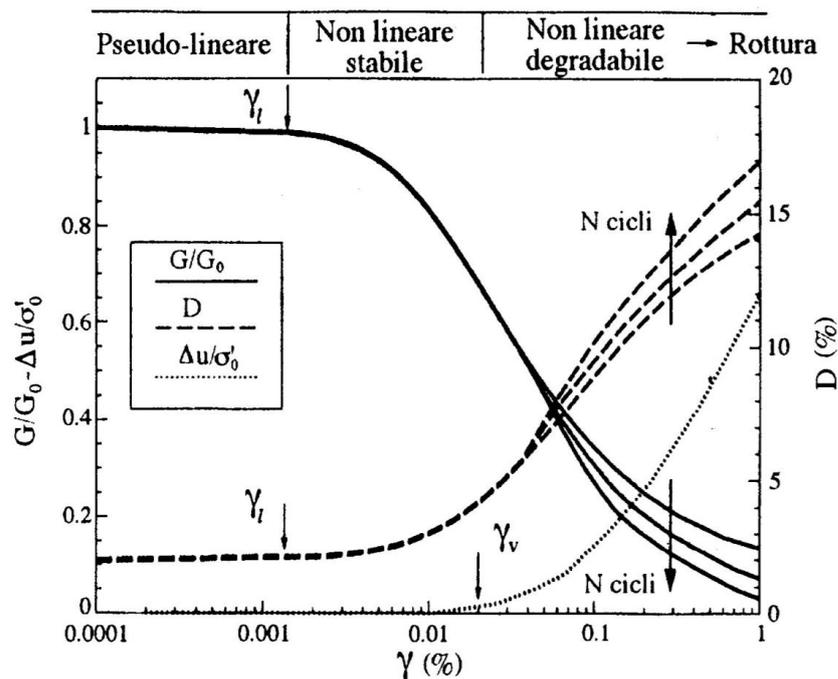


FIGURA 1.2: CURVE DI VARIAZIONE DELLE GRANDEZZE DINAMICHE E ANDAMENTO DELLE SOVRAPPRESSIONI INTERSTIZIALI (DA LANZO E SILVESTRI, 1999)

E' possibile distinguere un tratto in cui il materiale presenta un comportamento lineare (visco-elastico lineare) e una zona in cui viene meno la linearità, evidenziata dalla caduta dei valori di rigidezza. La deformazione in cui si ha il passaggio da comportamento lineare a non lineare è detta soglia di linearità ( $\gamma_l$ ). Questo valore di deformazione varia a seconda del tipo di materiale, per le sabbie tale soglia vale all'incirca  $10^{-4}\%$ , mentre nelle argille è di poco superiore.

Un altro punto fondamentale è quello che determina il passaggio tra la deformazione non lineare, dove ancora non si ha un forte accumulo di deformazione plastica, e la zona a deformazioni plastiche importanti.

A piccole deformazioni, esiste un accoppiamento tra sollecitazioni e deformazioni di volume e un accoppiamento tra sollecitazioni e deformazioni di taglio, infatti una sollecitazione di volume corrisponde a una deformazione di volume e una sollecitazione di taglio corrisponde ad una distorsione. A grandi deformazioni, i mezzi granulari presentano invece un accoppiamento tra i vari termini, e, quindi, a una distorsione corrisponde anche una variazione di volume. Poiché le prove di laboratorio vengono effettuate in condizioni di drenaggio chiuso, quindi assenza di deformazione volumetrica ( $\epsilon_v=0$ ), in presenza di deformazioni plastiche si ha l'insorgere delle sovrappressioni interstiziali. Di conseguenza, applicando una sollecitazione di taglio, fin quando la risposta è assimilabile a quella di un materiale elastico, a questa, corrisponderà una deformazione di taglio e non ci sarà deformazione volumetrica, mentre, passando nella zona a comportamento plastico, per effetto del taglio, ci si

aspetterà anche una deformazione volumetrica che risulterà impedita per via del drenaggio chiuso e, quindi, porterà alla nascita di una sovrappressione interstiziale. Così, ad un certo valore della deformazione, per effetto di questo accoppiamento, in condizioni non drenate, inizierà a crescere la sovrappressione interstiziale.

Il passaggio tra la zona a sovrappressioni nulle e la zona a sovrappressioni crescenti, corrispondente al momento in cui le deformazioni plastiche diventano rilevanti, è un passaggio netto e corrisponde alla soglia volumetrica ( $\gamma_v$ ).

Anche questo valore di deformazione varia a seconda del tipo di materiale, per le sabbie, in media, tale soglia si assesta intorno al  $10^{-2}\%$ , mentre nelle argille è all'incirca pari a  $4 \cdot 10^{-2}\%$  (Vucetic M., 1994).

Sulla base di queste soglie, la curva di decadimento del modulo può essere divisa in tre zone (Vucetic M., 1994):

- zona *pseudo-lineare*, a piccole deformazioni, in cui il comportamento del terreno è simile a quello di un materiale visco-elastico lineare. In questa zona il modulo di taglio assume il valore massimo ( $G_0$ ) che si mantiene costante. Qui, all'interno di un ciclo di isteresi si ha una dissipazione di energia nettamente minore di quella impressa e, ciò, porta ad avere valori del fattore di smorzamento inferiori all'1% (FIGURA 1.3)

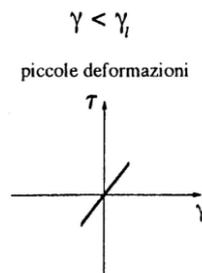


FIGURA 1.3: PIANO SFORZI-DEFORMAZIONI NEL TRATTO A PICCOLE DEFORMAZIONI DELLE CURVE DI VARIAZIONE (DA LANZO E SILVESTRI, 1999)

- zona *non lineare stabile*, a medie deformazioni, in cui il comportamento del terreno è significativamente non lineare e fortemente dissipativo, con una sostanziale riduzione del modulo di taglio e da un corrispondente aumento del fattore di smorzamento. Il materiale presenta un comportamento stabile e non vi è la nascita di pressioni interstiziali in condizioni non drenate (FIGURA 1.4).

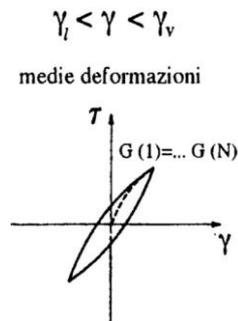


FIGURA 1.4: PIANO SFORZI-DEFORMAZIONI NEL TRATTO A MEDIE DEFORMAZIONI DELLE CURVE DI VARIAZIONE (DA LANZO E SILVESTRI, 1999)

- zona non lineare degradabile, a grandi deformazioni, in cui, all'aumentare dei numeri di cicli, il comportamento del terreno evolve degradandosi. Ad ogni ciclo, in condizioni non drenate, i valori delle sovrappressioni diventano sempre meno trascurabili (FIGURA 1.5).

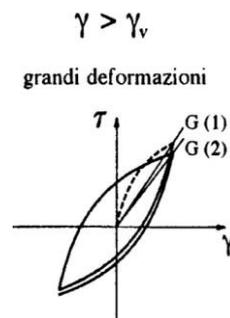


FIGURA 1.5: PIANO SFORZI-DEFORMAZIONI NEL TRATTO A GRANDI DEFORMAZIONI DELLE CURVE DI VARIAZIONE (DA LANZO E SILVESTRI, 1999)

Le curve di decadimento del modulo di taglio e di dissipazione dipendono dalla tipologia di terreno e presentano differenti valori per le soglie. Generalmente, le curve di decadimento del modulo vengono normalizzate rispetto al valore  $G_0$  (valore massimo assunto dalla rigidità a taglio del terreno) in modo da far partire le curve dallo stesso punto per riuscire a cogliere meglio quando insorgono gli effetti di non linearità (FIGURA 1.6).

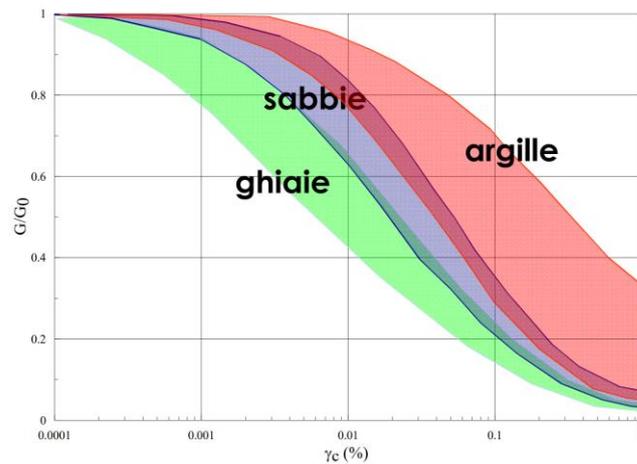


FIGURA 1.6: CAMPI DI VARIAZIONE PER DIVERSI TERRENI DELLA CURVA DI DECADIMENTO DEL MODULO DI TAGLIO (DA SEED ET AL., 1986; DOBRY & VUCETIC, 1987)

Per i materiali argillosi, un ruolo importante è assunto dall'indice di plasticità, mentre per i materiali sabbiosi, il ruolo principale è assunto dalla tensione di confinamento, in quanto, aumentando il confinamento, i grani hanno minor possibilità di muoversi e il materiale risulterà più rigido. In questo modo, la soglia di linearità si sposterà verso livelli deformativi più alti e questo porterà ad avere una minor dissipazione di energia, poiché le forze attrittive saranno meno significative. Questo non succede nelle argille perché il meccanismo prevalente nella variazione del modulo e della dissipazione è legato ai legami chimici interparticellari, quindi la tensione di confinamento gioca un ruolo secondario per questa tipologia di materiale.

Oltre a questi principali fattori, le curve risentono, anche se in modo meno significativo, del grado di sovraconsolidazione, della frequenza di carico e del numero di cicli.

I materiali granulari (ghiaie e sabbie) tendono quindi a dissipare poca energia a piccole deformazioni in quanto si hanno piccoli spostamenti e, di conseguenza, non si sviluppano rilevanti forze attrittive, contrariamente a quanto avviene nelle argille dove si ha una maggiore dissipazione a bassi livelli deformativi. Al crescere della deformazione, i materiali granulari passano per primi in condizioni non lineari perché lo spostamento relativo tra le particelle diventa importante e quindi si dissipa più energia rispetto alle argille (FIGURA 1.7). E' da sottolineare come le argille ad alta plasticità dissipino poca energia e rimangano in condizione lineare fino ad alte deformazioni; questo è un dato fondamentale in quanto in presenza di un sisma forte, per questi terreni, la componente d'onda si attenua poco e gli effetti sono più marcati (Darendeli 2001).

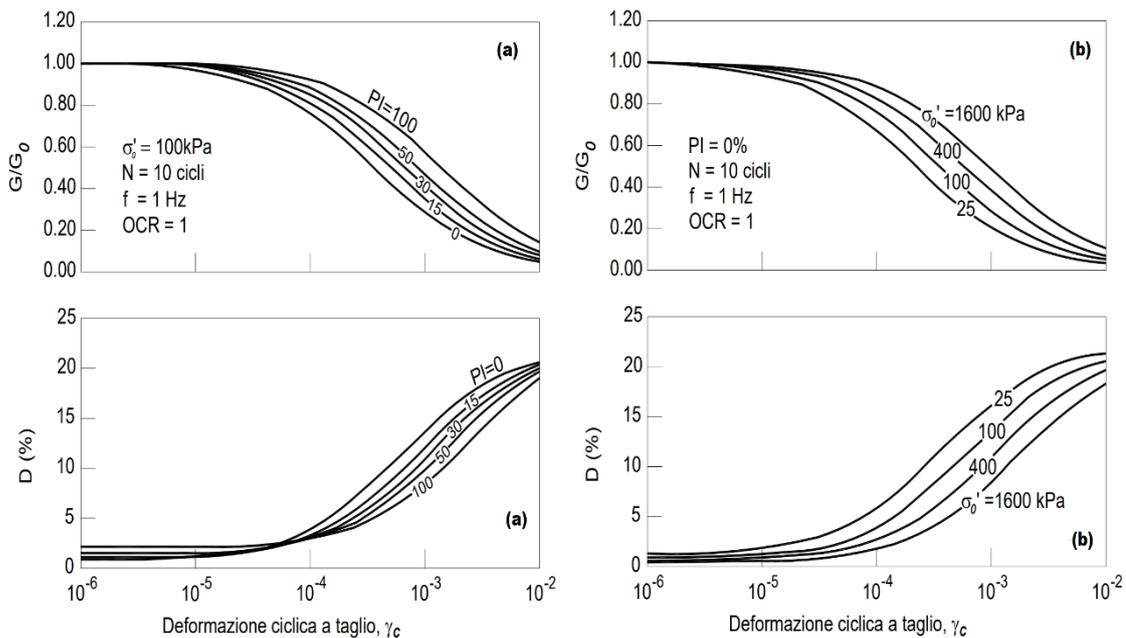


FIGURA 1.7: (A) DIPENDENZA DELLE CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO E DEL FATTORE DI SMORZAMENTO DALL'INDICE DI PLASTICITÀ (ARGILLE); (B) DIPENDENZA DELLE CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO E DEL FATTORE DI SMORZAMENTO DALLA TENSIONE DI CONFINAMENTO (SABBIE) (DA DARENDELI 2001)

## 1.2 Colonna risonante

La prova prevede l'applicazione di un momento torcente, con una certa intensità e con una frequenza variabile nel tempo, ad un campione cilindrico incastrato alla base (FIGURA 1.8).

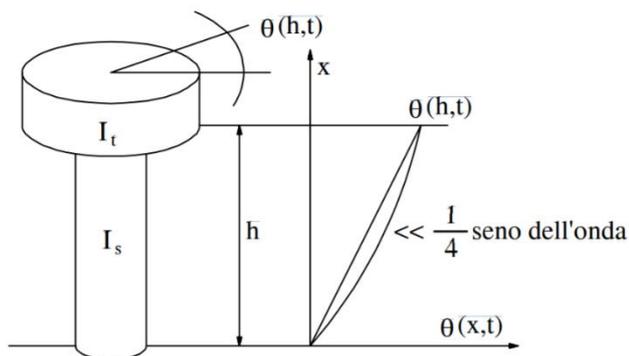


FIGURA 1.8: SCHEMA DI COLONNA RISONANTE TIPO FIXED-FREE (DA PALLARA O., 1995)

Si applica, dunque, un carico ciclico caratterizzato da una certa frequenza e, dopo aver letto la risposta, si varia la frequenza e si mantiene inalterata l'ampiezza dei cicli. Così facendo si riesce ad analizzare il comportamento del campione per un ampio range di frequenze.

Applicando una forzante di uguale intensità e con frequenza variabile, non si leggerà sempre la stessa risposta da parte del materiale, infatti:

- per basse frequenze si ha una risposta quasi statica;
- aumentando via via le frequenze, ad un certo punto, si arriva ad una frequenza pari alla frequenza propria del sistema e qui la risposta tende al suo valore massimo in quanto si va in risonanza. Tale risposta non andrà all'infinito perché il sistema dissipa energia.

Per ricavare i parametri del materiale si effettua un confronto tra il valore di risonanza e il valore fornito dal modello matematico di propagazione di un'onda torsionale su un'asta prismatica, schematizzando il provino di terreno come un materiale visco-elastico o alla Kelvin-Voigt (Richart et Al. 1969).

Il comportamento è governato dall'equazione del moto per sollecitazioni torsionali:

$$\frac{\delta^2 \vartheta}{\delta x^2} = \frac{1}{V_s^2} \frac{\delta^2 \vartheta}{\delta t^2} \quad (1)$$

Dove:  $V_s$  è la velocità di propagazione delle onde di taglio del campione,  $\vartheta$  indica la rotazione,  $x$  è la progressiva lungo l'asse del campione e  $t$  è il tempo.

Nella prova si applica un'eccitazione armonica e si ottiene una soluzione armonica in cui la rotazione ( $\vartheta$ ) è legata al numero d'onda ( $k$ ) e alla pulsazione ( $\omega$ ). Imponendo le condizioni al contorno:

- $\vartheta(x=0; t=0)=0$  (incastro alla base inferiore);
- $T(x=H)=-T_0$  (sollecitazione di momento torcente applicato in testa);

si trova la relazione che governa la condizione di risonanza:

$$\frac{I_\vartheta}{I_t} = \frac{\omega_r H}{V_s} \tan \frac{\omega_r H}{V_s} \quad (2)$$

Dove il primo membro indica il rapporto tra il momento polare di inerzia di massa del campione ( $I_\vartheta$ ) e il momento polare di inerzia dell'apparecchiatura ( $I_t$ ), e al secondo membro compaiono  $\omega_r$ , che è la frequenza di risonanza,  $H$  che è l'altezza del campione.

L'unica incognita è  $V_s$ , ma per calcolarla bisogna risolvere l'equazione implicita (2). Per fare ciò è possibile utilizzare o un metodo numerico o un nomogramma che fornisce la soluzione dell'equazione implicita (2) (FIGURA 1.9).

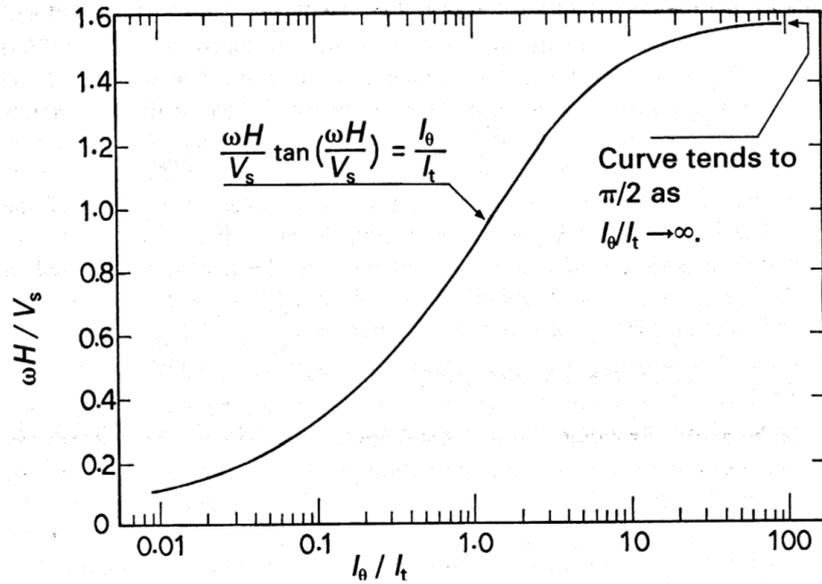


FIGURA 1.9: NOMOGRAMMA ISHIHARA, 1996

Si eseguono diversi test con livelli deformativi via via crescenti e si ricava la frequenza ( $f_r$ ) di risonanza per ogni valore di deformazione  $\gamma$  con la relativa ampiezza massima  $A_{max}$  (FIGURA 1.10).

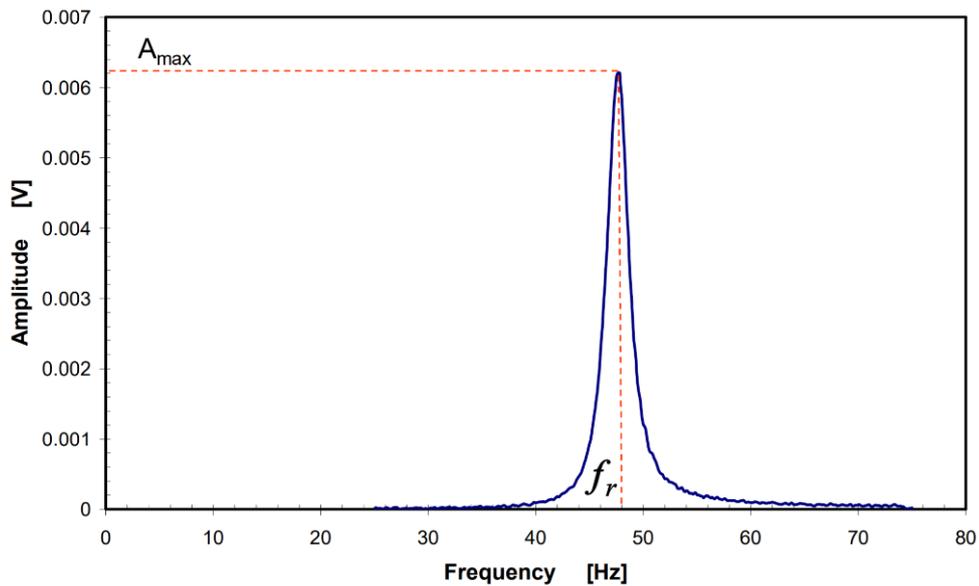


FIGURA 1.10: CURVA DI RISONANZA (DA FOTI S. (2015) CORSO DI GEOTECNICA SISMICA INGEGNERIA CIVILE)

Conoscendo le diverse frequenze di risonanza è possibile ricavare i diversi valori di  $V_s$  (dal valore  $\omega_r H/V_s$ ) e, di conseguenza, i diversi valori del modulo di taglio  $G$  tramite la relazione:

$$G = \rho V_s^2 \quad (3)$$

Dove  $\rho$  indica la densità di massa.

In questo modo si può costruire la curva di decadimento del modulo di taglio. Da tale prova si ottiene anche la curva di dissipazione  $D$  applicando il metodo “*half-power bandwidth*” (seppure questo metodo è indicato per masse concentrate e non distribuite). Il metodo prevede, data la risposta massima  $A_{max}$ , di considerare il valore  $A_{max}/\sqrt{2}$  e da questo considerare la banda di frequenza corrispondente (FIGURA 1.11).

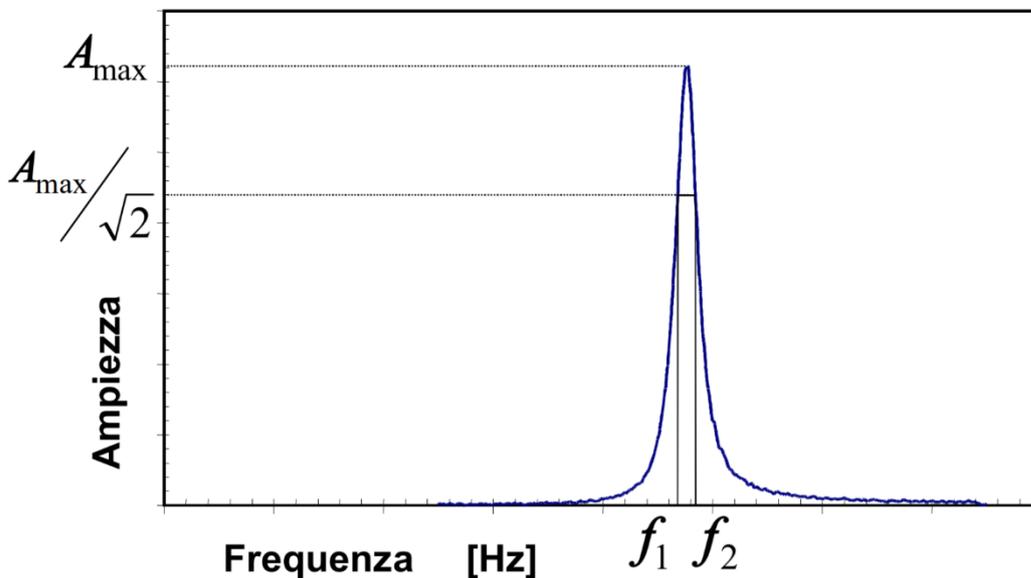


FIGURA 1.11:“HALF-POWER BANDWIDTH” METHOD (DA FOTI S. (2015) CORSO DI GEOTECNICA SISMICA INGEGNERIA CIVILE)

Questo procedimento si esegue per diversi livelli deformativi, per i quali viene calcolato il valore di smorzamento ( $D_i$ ) tramite la relazione:

$$D_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{2f_{0i}} \quad (4)$$

Con  $f_{0i}$  pari alla frequenza di risonanza per quel livello deformativo specifico.

Questo metodo tende talvolta a fornire una sovrastima dei valori di smorzamento (tale bias verrà analizzato nello specifico nel Capitolo 4). In alternativa è possibile adoperare il metodo delle oscillazioni libere (free-vibrations decay method), che consiste nel calcolo del decremento logaritmico sulla rappresentazione grafica delle oscillazioni della testa del provino quando viene meno l'eccitazione. Lo smorzamento varrà (FIGURA 1.12):

$$D = \frac{\Delta_t}{2\pi} \quad (5)$$

Con:

$$\Delta_t = \frac{1}{N-1} \ln\left(\frac{A_1}{A_N}\right) \quad (6)$$

dove N è l'ennesimo ciclo di decremento,  $A_1$  l'ampiezza del ciclo a risonanza ed  $A_N$  l'ampiezza del ciclo ennesimo (Pallara O., 1995).

La prova di colonna risonante si svolge in condizioni non drenate e le frequenze di prova vanno da 10 a 100 Hz circa, investigando un campo deformativo abbastanza ampio (da  $10^{-5}$  a 1%).

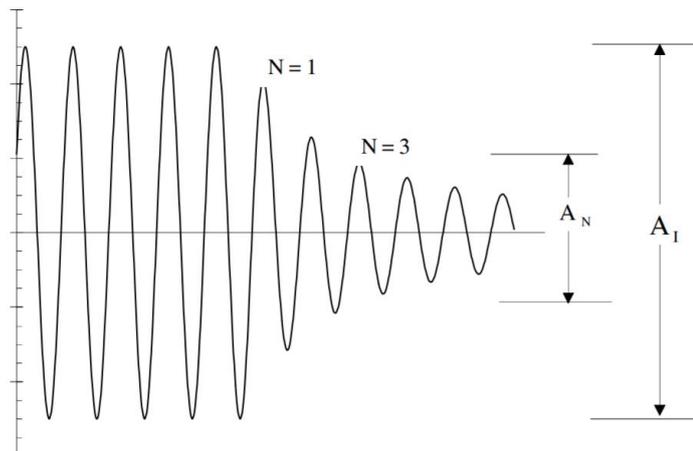


FIGURA 1.12: DETERMINAZIONE DELLO SMORZAMENTO DAL CALCOLO DEL DECREMENTO LOGARITMICO (PALLARA O., 1995)

### 1.3 Taglio torsionale ciclico

La prova consiste nell'applicare, in corrispondenza della superficie superiore, ad un provino incastrato alla base inferiore, un segnale con frequenza preassegnata e costante con ampiezza crescente.

La prova può essere eseguita utilizzando procedure differenti:

- a controllo di tensioni o deformazioni: si utilizza un'ampiezza costante dello sforzo ciclico o della deformazione adoperando, in genere, forme d'onda sinusoidali, che comporta una velocità di carico o di deformazione variabile periodicamente;
- a controllo della velocità di carico o di deformazione: in questo caso si utilizzano necessariamente forme d'onda triangolari, e aumentando l'ampiezza delle deformazioni cicliche bisogna diminuire la frequenza per mantenere una velocità costante;
- a eccitazione irregolare: utilizzando sollecitazioni di tipo non uniforme.

Tutti questi tipi di prova permettono di determinare il modulo di taglio e lo smorzamento di un campione di terreno. La risposta di un elemento di terreno, all'applicazione di uno sforzo di taglio ciclico simmetrico, è assimilabile ad un ciclo di isteresi chiuso e centrato rispetto agli assi, per cui il modulo di taglio secante  $G_0$  e lo smorzamento  $D$  valgono (FIGURA 1.13) (Pallara O., 1995):

$$G_0 = \frac{\tau_a}{\gamma_a} \quad (7)$$

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W^{\text{dissip}}}{W^{\text{max}}} \quad (8)$$

Dove  $\tau_a$  e  $\gamma_a$  indicano rispettivamente la tensione e la deformazione massima, mentre  $\Delta W^{\text{dissip}}$  è l'energia dissipata in un ciclo e  $W^{\text{max}}$  è la massima energia elastica accumulata durante il ciclo.

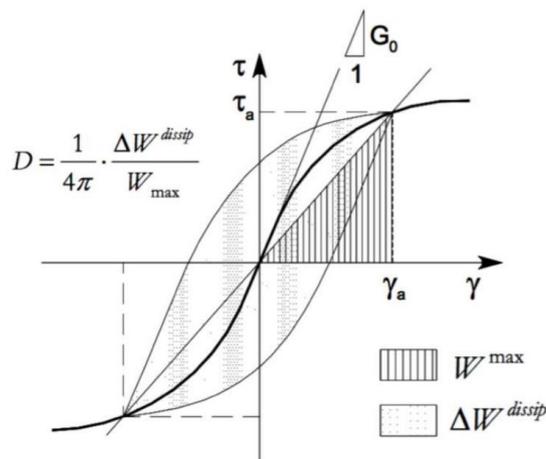


FIGURA 1.13: CURVA SFORZI-DEFORMAZIONI (DALLE DISPENSE DEL CORSO DI INGEGNERIA CIVILE, FOTI S. (2016))

Al variare dell'ampiezza della sollecitazione applicata nei cicli si possono ricavare il modulo di taglio e il rapporto di smorzamento per i diversi livelli deformativi.

La valutazione del rapporto di smorzamento in questa prova risulta più precisa poiché viene determinato in modo diretto dal piano sforzi-deformazioni.

Anche questa prova viene effettuata in condizioni non drenate e le frequenze di prova vanno da 0,01 a 1 Hz, investigando un campo deformativo compreso tra  $10^{-4}\%$  a 1%.

#### 1.4 Taglio semplice ciclico con doppio provino

La prova consiste nell'applicare ad un provino di terreno, cilindrico o prismatico a sezione quadrata e di altezza limitata, saturato e consolidato, una sollecitazione di taglio orizzontale dinamica e ciclica sulla base superiore o inferiore, a deformazione controllata con ampiezza crescente ad ogni passo, misurando la risposta del provino alla sollecitazione applicata (FIGURA 1.14).

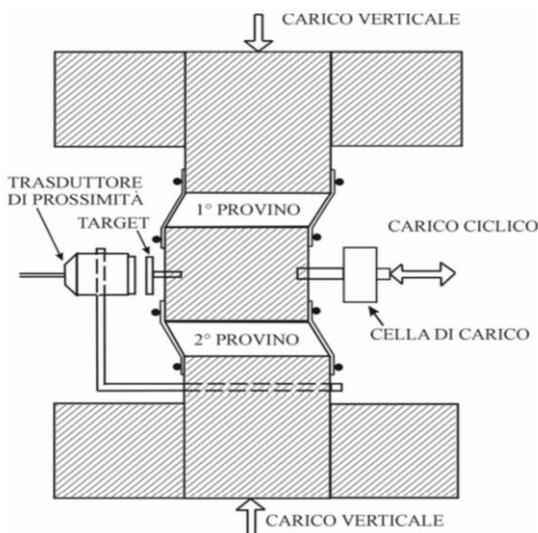


FIGURA 1.14: SCHEMA DELL'APPARECCHIATURA DSDSS (DA LANZO G., 2012)

La misura diretta delle tensioni e deformazioni tangenziali consente la costruzione dei cicli di sforzi-deformazioni, permettendo di misurare il modulo di rigidezza a taglio e il rapporto di smorzamento in modo da poter costruire le curve di variazione.

La prova si svolge in condizioni non drenate in quanto la deformazione tangenziale viene applicata in modo tale da ottenere la condizione di volume costante. Le frequenze di prova vanno da 0,15-0,35 Hz, investigando un campo deformativo che va da  $4 \cdot 10^{-4}\%$  al 7%.

Rispetto alle prove di colonna risonante e di taglio torsionale ciclico, questa prova viene effettuata in condizioni di stato tensionale anisotropo, per cui viene assunta come pressione di confinamento un valore medio calcolato ipotizzando un coefficiente di spinta a riposo pari a 0.5 (Coppetta I., 2019).

Una descrizione dettagliata dell'apparecchiatura può essere trovata in D'Elia et al. (2003) e in Doroudian e Vucetic (1995).

Tale apparecchiatura è stata utilizzata per svolgere le prove eseguite dall'Università di Roma "La Sapienza" nell'ambito del progetto di microzonazione sismica di terzo livello dei comuni in centro Italia colpiti dalla sequenza sismica del 2016-2017.

### 1.5 Descrizione dell'apparecchiatura utilizzata per le prove

L'apparecchiatura di colonna risonante è del tipo fixed-free (Hall and Richart 1963) ed è stata modificata in modo da poter eseguire prove di taglio torsionale monotono su campioni cilindrici pieni e cavi.

Lo schema generale dell'apparecchiatura di colonna risonante e taglio torsionale ciclico è rappresentato in FIGURA 1.15.

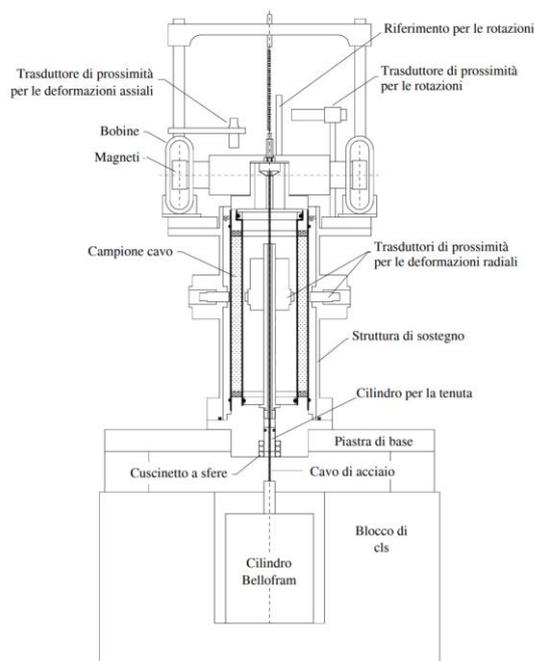


FIGURA 1.15: SCHEMATIZZAZIONE DELL'APPARECCHIATURA DI COLONNA RISONANTE E TAGLIO TORSIONALE CICLICO (DA PALLARA O., 1995)

La piastra di base è ancorata ad un blocco di calcestruzzo, che stabilizza la cella e la isola dinamicamente nel caso di prove di colonna risonante. Tre montanti sostengono

il piatto superiore della cella di pressione e si collocano all'interno di questa dando la possibilità, una volta ricostituito il campione, di posizionare con facilità tutta la strumentazione necessaria ad eseguire la prova (FIGURA 1.16).

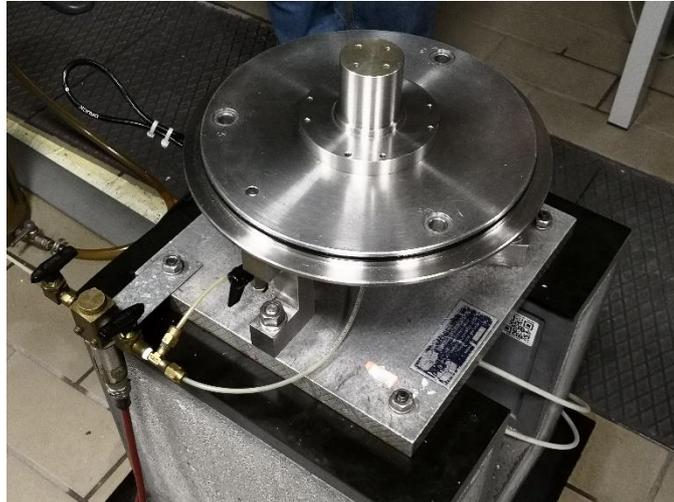


FIGURA 1.16: PARTE INFERIORE DELL'APPARECCHIATURA, POLITECNICO DI TORINO

Sulla base è posta una pietra porosa di bronzo sinterizzato, che consente il drenaggio dei campioni saturi e funge da vincolo alla base del campione per via dell'attrito tra le due superfici (FIGURA 1.17). La base è disponibile in diverse dimensioni a seconda della grandezza del campione da utilizzare:

- cavi, di diametro esterno 50 mm, diametro interno 30 mm e altezza 100 mm;
- pieni, sia di diametro 71.3 mm e altezza 142.2 mm che di diametro 50 mm e altezza 100 mm.



FIGURA 1.17: PIETRA POROSA DI BRONZO ALLA BASE, POLITECNICO DI TORINO

Alla base viene fissata una struttura di sostegno (FIGURA 1.18), al cui interno sarà alloggiato il campione, che permette il posizionamento dei trasduttori di prossimità per la misura della variazione radiale del provino e può essere riempita con acqua o con olio nel caso si effettuino prove su campioni saturi. Questi trasduttori in ceramica piezoelettrica sono sistemati in modo da risultare a metà altezza per i provini di altezza 100mm. Essi misurano la distanza da un piccolo pezzo di alluminio incollato sulla membrana in modo da determinare le variazioni del diametro del campione in base all'ipotesi di deformazioni cilindriche. I due trasduttori sono caratterizzati da un range di 2,5 mm e una precisione di 1  $\mu\text{m}$ .



FIGURA 1.18: STRUTTURA DI SOSTEGNO DEL DRIVE-SYSTEM, POLITECNICO DI TORINO

Sulla sommità della struttura di sostegno viene fissato il drive-system, che è un motore con un sistema di guida elettromagnetico di tipo Stokoe, usato per applicare una coppia in testa al campione. Il drive-system è costituito da (FIGURA 1.19):

- 4 magneti e 8 bobine, fissati su una base di acciaio inossidabile di forma anulare, che generano la coppia applicata al campione attraverso il movimento dei magneti e della corrente alternata che attraversa le bobine;
- struttura per la sospensione del sistema di applicazione dei carichi sinusoidali, all'interno di una vasta gamma di frequenze, con un'ampiezza massima di 1,1 Nm e una precisione di  $2,5 \cdot 10^{-5}$  Nm;

- un LVDT (Linear Variable Differential Transformer) fissato rigidamente che permette di misurare la deformazione assiale su una scala di 4mm e una precisione di 1  $\mu\text{m}$ ;
- una coppia di trasduttori Kaman, fissati rigidamente alla struttura, che misura le rotazioni in testa al campione, ad una distanza di 30 mm. Questi sono in grado di misurare fino a 0,05 rad con una precisione di  $1,7 \cdot 10^{-5}$  rad
- 



FIGURA 1.19: DRIVE-SYSTEM, POLITECNICO DI TORINO

Infine, inserendola dall'alto, viene posizionata la cella di pressione in acciaio, che presenta un oblò di 10 cm di diametro per poter osservare il campione nel corso della prova (FIGURA 1.20). questa viene bloccata nella sua posizione da due piccoli contrasti posti sul piatto superiore (Pallara O., 1995).

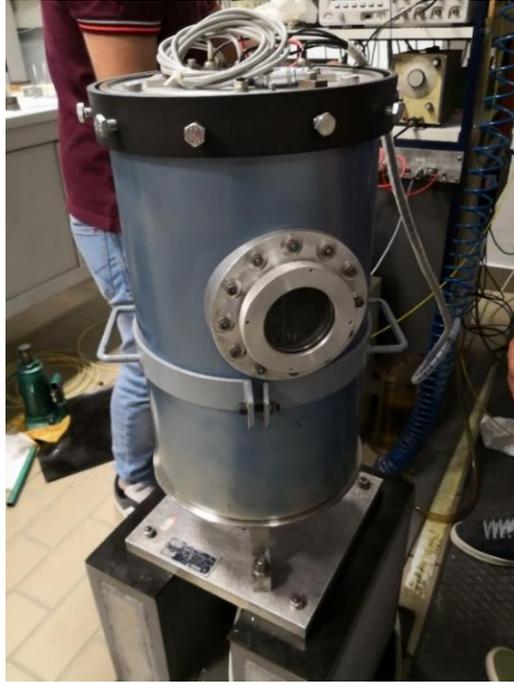


FIGURA 1.20: CELLA DI PRESSIONE IN ACCIAIO, POLITECNICO DI TORINO

## Capitolo 2 : Esecuzione delle prove sperimentali

### Introduzione

Parte di questo lavoro ha riguardato l'esecuzione di alcune prove di colonna risonante e taglio torsionale ciclico.

I campioni utilizzati per le prove erano distinti in:

- n° 5 di materiali prelevati in situ per il progetto RESBA;
- n° 2 di materiale sabbioso, ricostituiti in laboratorio.

Per quest'ultimi sono state effettuate prove a diversi valori di tensione di confinamento.

### 2.1 Prove di colonna risonante

Le prove sono state eseguite nel periodo compreso tra Luglio e Novembre 2019.

I cinque campioni, facenti parte del progetto RESBA, sono stati prelevati nei comuni di Niella Tanaro (CN) ed Envie (CN). Le caratteristiche granulometriche sono mostrate in FIGURA 2.1.

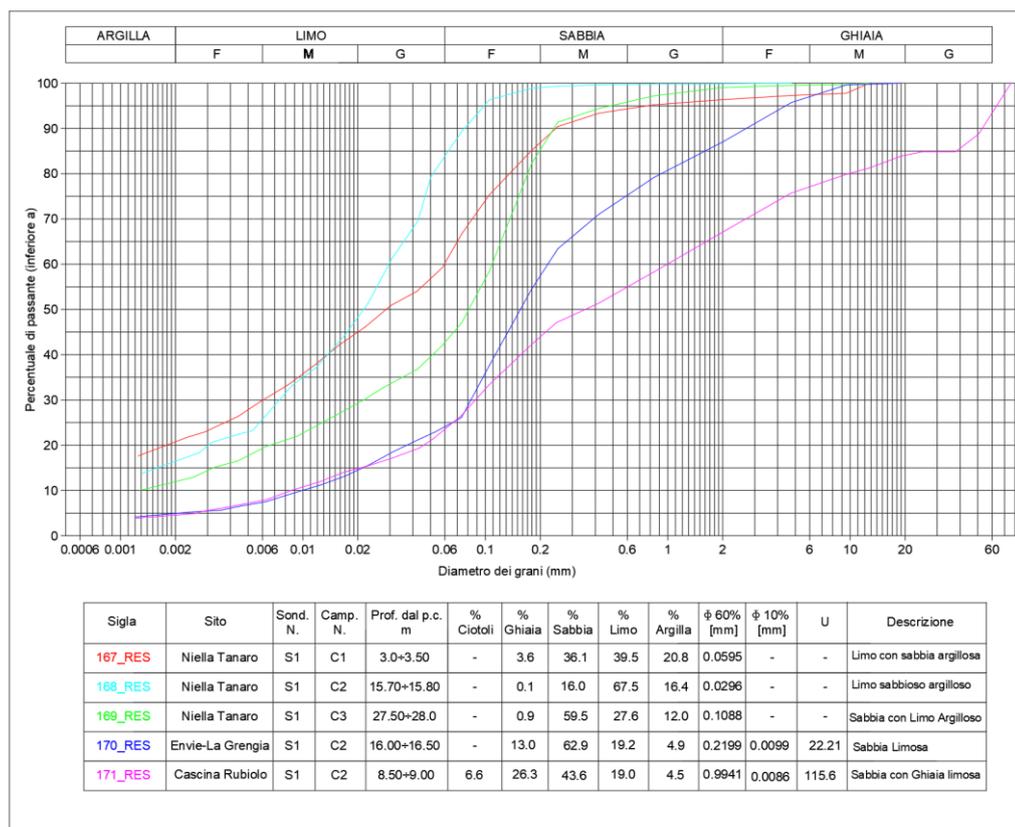


FIGURA 2.1: CURVE GRANULOMETRICHE DEI CAMPIONI DI MATERIALE NATURALE, PROGETTO RESBA, POLITECNICO DI TORINO (2019)

I dati e le caratteristiche dei campioni sono riportati in TABELLA 2.1:

TABELLA 2.1: DATI E CARATTERISTICHE DEI CAMPIONI DEL PROGETTO RESBA

Prova	Località	z [m]	W <sub>iniz.</sub> [g]	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	G <sub>s</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	PI [%]	w <sub>L</sub> [%]	w <sub>n</sub> [%]	D [mm]		H [mm]		σ' <sub>m</sub> [kPa]
									iniziale	fine con.	iniziale	fine con.	
167_RES	Niella Tanaro S1-C1	3,3	394,5	19,70	2,735	14,81	38,95	24,54	50,0	49,37	100,0	99,72	57,7
168_RES	Niella Tanaro S1-C2	15,9	413,1	20,63	2,744	8,95	28,78	18,30	50,0	49,36	100,0	98,70	168,1
169_RES	Niella Tanaro S1-C3	27,5	413,1	20,63	2,730	5,68	24,30	13,90	50,0	48,11	100,0	99,19	250,9
170_RES	Envie-La Grengia S1-C2	16,4	425,0	21,26	2,748	0	-	-	50,0	49,19	100,0	98,80	160,0
171_RES	Envie-Cascina Rubiolo S1-C2	8,6	400,0	20,00	2,706	0	-	-	50,0	49,15	100,0	99,19	97,6

Per quanto riguarda gli altri due campioni, sono stati ricostituiti in laboratorio utilizzando la sabbia proveniente da Perth, la cui granulometria è riportata in FIGURA 2.2.

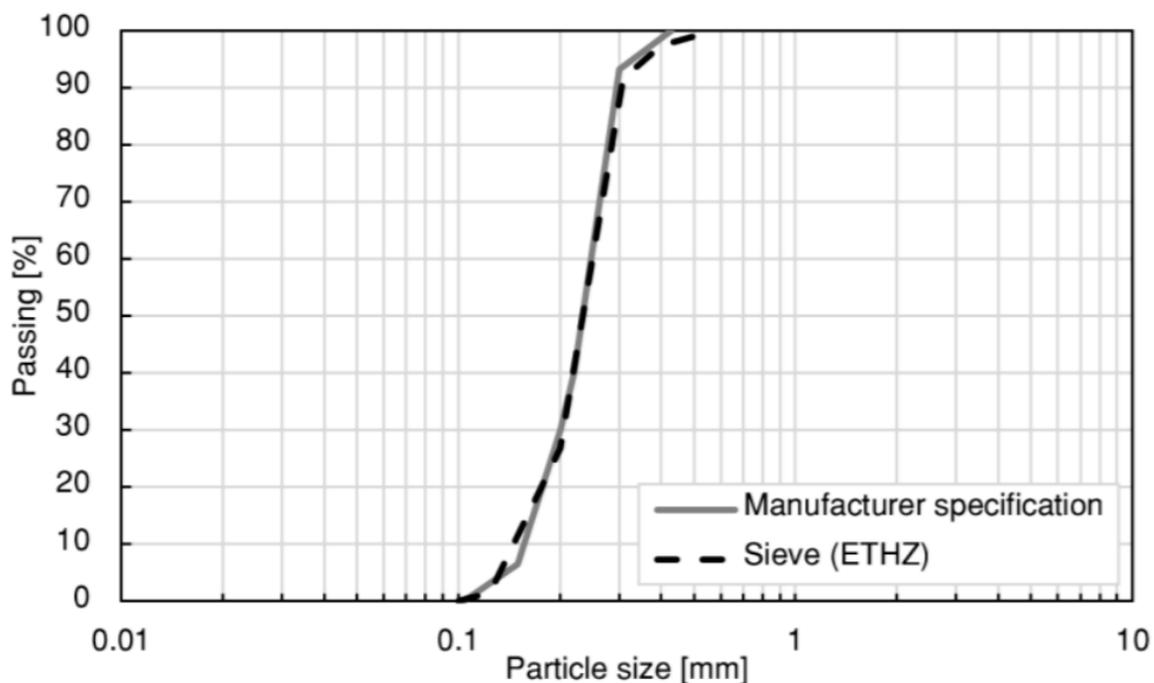


FIGURA 2.2: CURVA GRANULOMETRICA DELLA SABBIA DI PERTH (MODIFICATA DA BUCHEISTER 2009)

I dati e le caratteristiche dei campioni sono riportati in TABELLA 2.2:

TABELLA 2.2: DATI E CARATTERISTICHE DEI CAMPIONI DI SABBIA (PERTH)

Prova	$W_{dry}$ [g]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$G_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	PI [%]	w [%]	D [mm]		H [mm]		e [-]	$\sigma'_m$ [kPa]
						iniziale	fine con.	iniziale	fine con.		
168_PRH_1-C1	305,57	19,95	2,65	0	22,49	49,47	49,47	-	95,70	0,596	25,1
168_PRH_2-C1	305,57	19,95	2,65	0	22,49	49,47	49,47	95,70	95,62	0,594	50,7
168_PRH_3-C1	305,57	19,95	2,65	0	22,49	49,47	49,47	95,62	95,51	0,592	101,0
168_PRH_4-C1	305,57	19,95	2,65	0	22,49	49,47	49,47	95,51	95,50	0,592	199,5
169_PRH_1-C2	325,90	20,10	2,65	0	21,64	50,40	50,39	96,99	96,98	0,573	25,3
169_PRH_2-C2	325,90	20,10	2,65	0	21,64	50,37	50,35	96,95	96,89	0,571	50,8
169_PRH_3-C2	325,90	20,10	2,65	0	21,64	50,30	50,25	96,82	96,73	0,569	99,8
169_PRH_4-C2	325,90	20,10	2,65	0	21,64	50,17	50,07	96,64	96,52	0,566	201,1
169_PRH_5-C2	325,90	20,10	2,65	0	21,64	49,96	49,83	96,38	96,22	0,563	400,1

La preparazione dei campioni prelevati in situ è stata eseguita tramite estrusione del provino (50x100 mm) da una porzione della carota del sondaggio. Nella FIGURA 2.3 è riportato il campione prelevato da Envie-La Grengia, già posizionato sulla base dell'apparecchiatura. In testa è posizionato il top, su cui è montata la pietra porosa, che permetterà di trasferire la sollecitazione dal motore alla testa del campione.



FIGURA 2.3: POSIZIONAMENTO DEL CAMPIONE DI ENVIE-LA GRENGIA SULLA BASE DELL'APPARECCHIATURA, POLITECNICO DI TORINO

Per quanto riguarda la preparazione dei provini di sabbia è stata utilizzata la tecnica di deposizione pluviale (adattamento della tecnica di Miura e Toki, 1982), che prevede:

- un contenitore per immagazzinare la sabbia;
- un sistema di apertura che permette l'uscita della sabbia, con un foro regolabile che consente di controllare l'intensità di deposizione (densità relativa).

L'altezza di caduta, nella ricostituzione dei provini, è stata mantenuta, all'incirca, sempre costante (FIGURA 2.4).

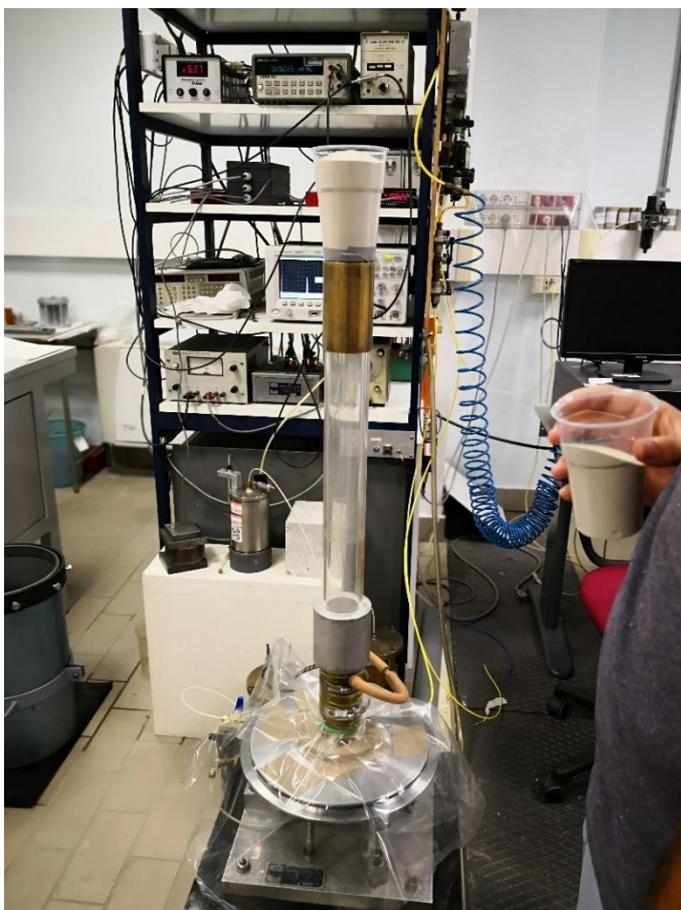


FIGURA 2.4: PREPARAZIONE DEL PROVINO DI SABBIA (PERTH), POLITECNICO DI TORINO

Una volta sistemati i campioni sulla base dell'apparecchiatura, si è proceduto al montaggio della stessa per la prova di colonna risonante, che è stata eseguita secondo la normativa ASTM D4015-2015. Quest'ultima prevede due importanti fasi sperimentali: saturazione e consolidazione del campione.

La fase di saturazione è effettuata tramite l'applicazione di pressioni di cella crescenti. Il grado di saturazione ( $S$ ) del provino viene controllato attraverso la determinazione

del coefficiente B di Skempton, il campione sarà ritenuto saturo quando il coefficiente risulterà prossimo a 1. Tale coefficiente è dato dal rapporto tra la variazione di pressione interstiziale  $\Delta u$  e la variazione di pressioni totali  $\Delta \sigma$ .

Dopo la fase di saturazione, il provino viene sottoposto ad una tensione efficace costante  $\sigma'_m$  pari alla tensione di pre-consolidazione  $\sigma'_{v0}$ , al fine di ottenere una consolidazione isotropa. Tale fase dura circa 24 ore.

Al termine della fase di consolidazione si avvia la prova di colonna risonante.

Nelle figure che seguono sono riportati i risultati delle colonne risonanti effettuate sui campioni di materiale naturale, che sono tabulati nell'Appendice 1. L'elaborazione delle diverse prove è stata effettuata con il software Matlab (vedi Appendice 2, script di Ciancimino A.).

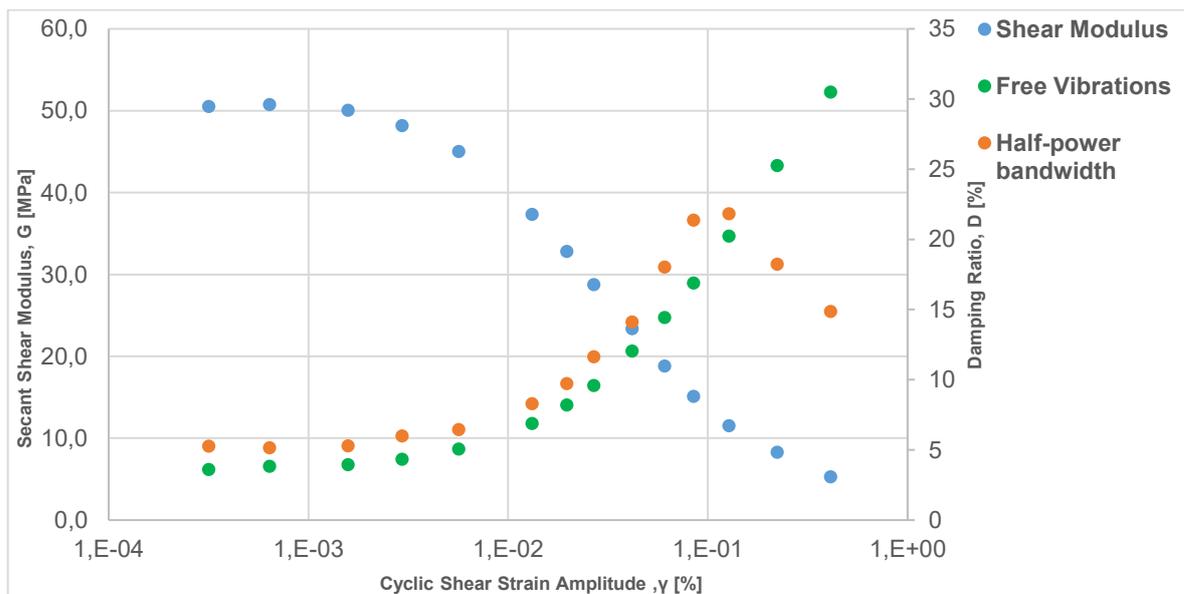


FIGURA 2.5: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, NIELLA TANARO S1-C1

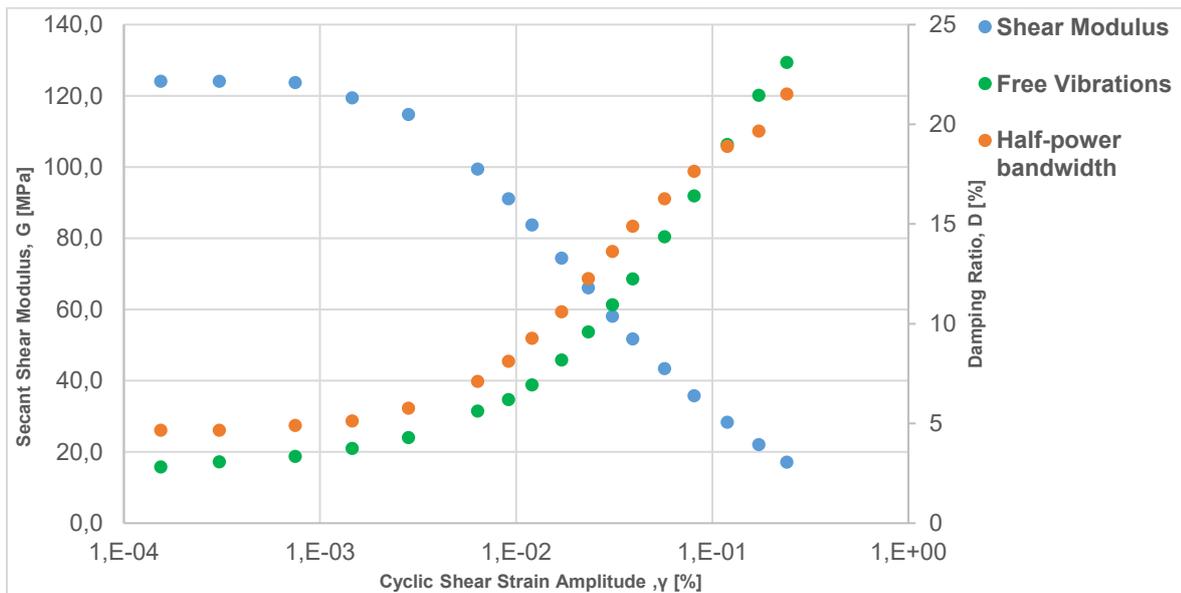


FIGURA 2.6: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, NIELLA TANARO S1-C2

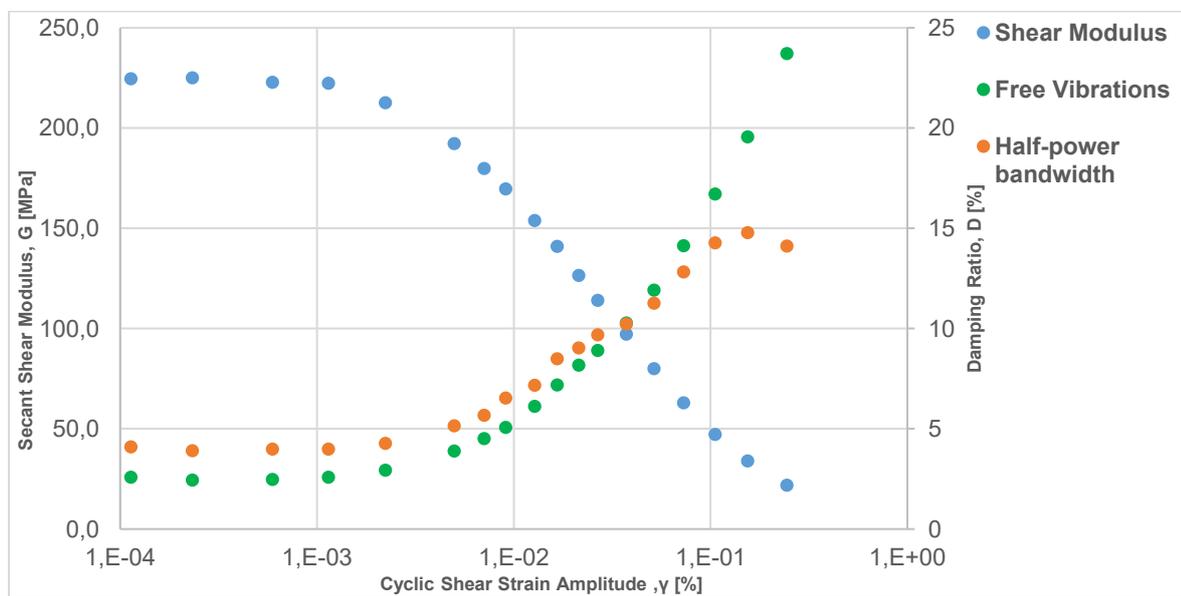


FIGURA 2.7: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, NIELLA TANARO S1-C3

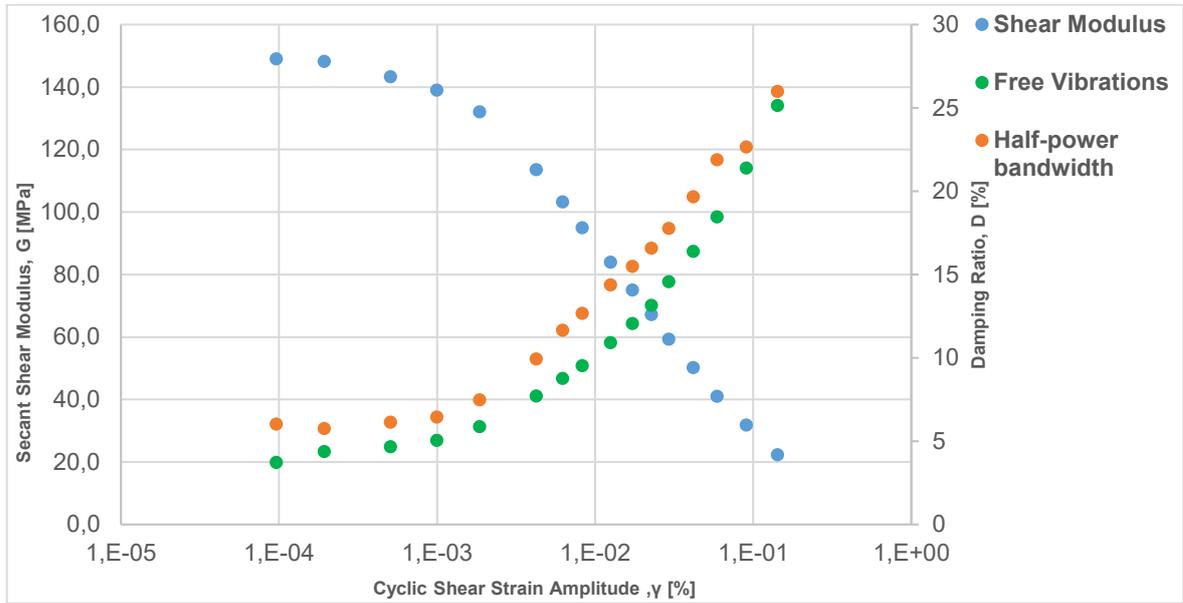


FIGURA 2.8: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, ENVIE-LA GRENGIA S1-C2

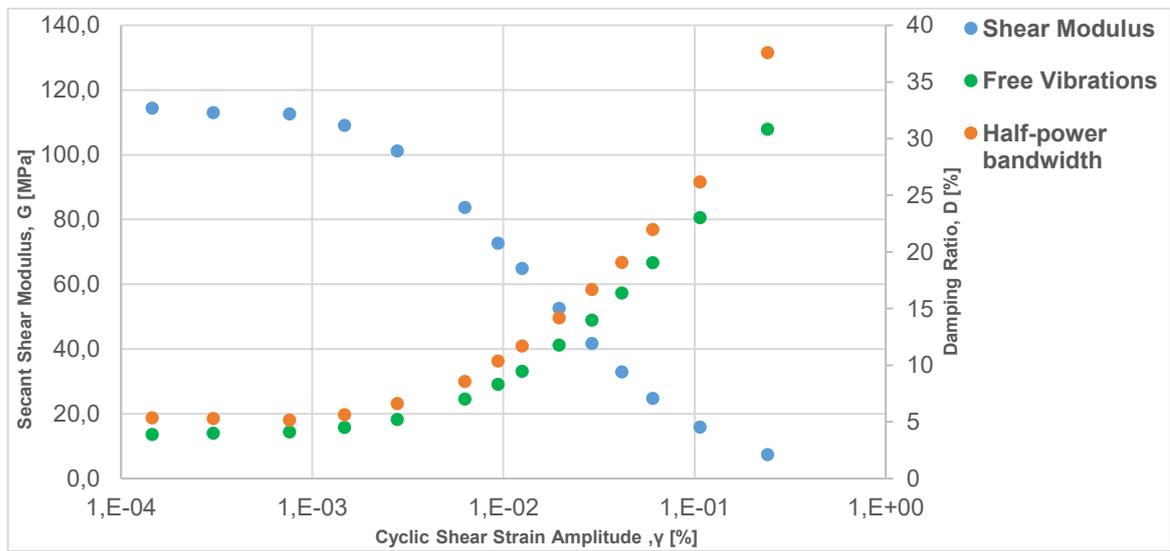


FIGURA 2.9: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, ENVIE-CASCINA RUBIULO S1-C2

I risultati delle prove su terreni naturali evidenziano il comportamento di un terreno sottoposto ad azione ciclica, infatti, si ha una riduzione e un aumento rispettivamente del modulo di rigidezza a taglio e del fattore di smorzamento. Va sottolineato che, per quanto riguarda il damping calcolato con il metodo half-power bandwidth, le curve ad alti livelli deformativi tendono a dare risultati decisamente errati, proprio considerando la modalità con cui viene calcolato il fattore di smorzamento che si basa sull'assunzione, in tal caso errata, di comportamento del terreno visco-elastico lineare. Si veda come esempio la FIGURA 2.10 in cui si riportano le curve di risonanza a livelli deformativi elevati, dove è evidenziata la forma fortemente asimmetrica della campana di risonanza che comporta una decrescita dei valori di smorzamento da un certo livello deformativo in poi (vedi C1 e C3 delle prove sul materiale prelevato a Niella Tanaro).

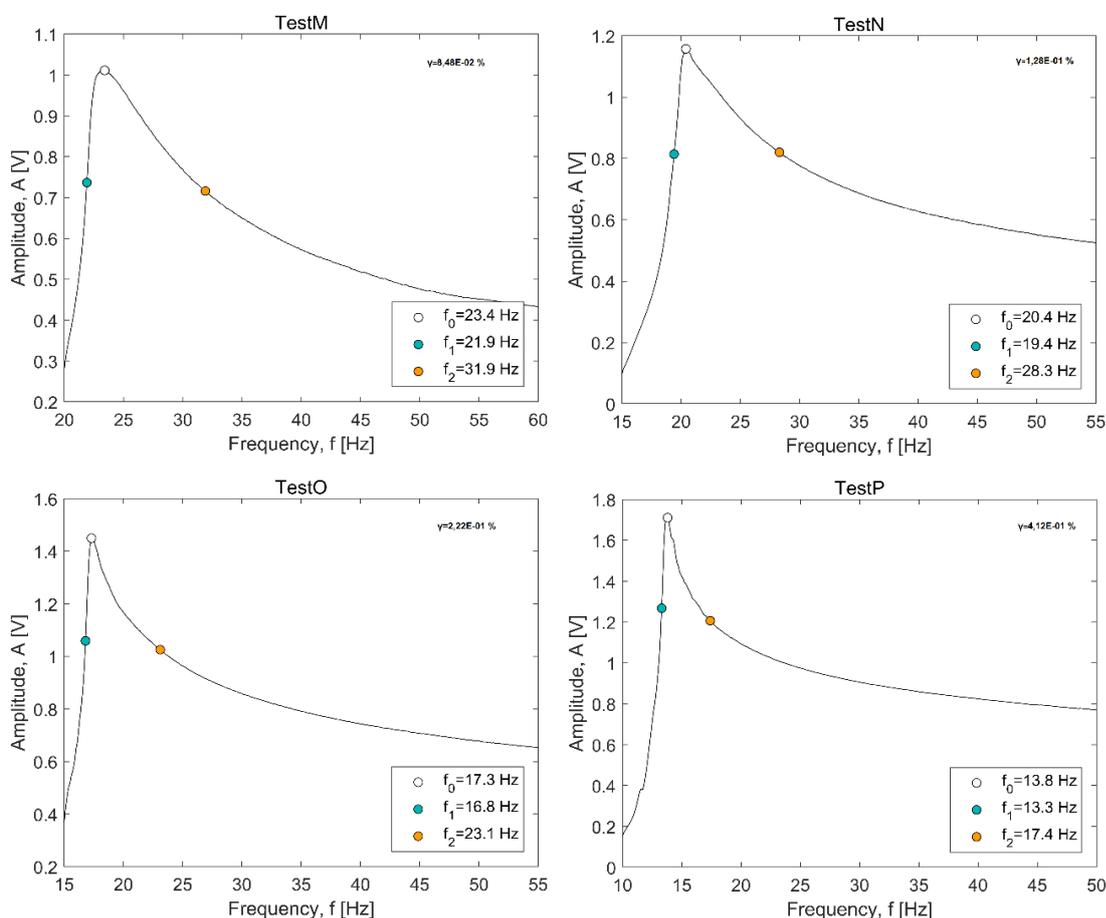


FIGURA 2.10: CURVE DI RISONANZA AD ELEVATI LIVELLI DEFORMATIVI DELLA PROVA DI COLONNA RISONANTE SU NIELLA TANARO S1-C1

Al crescere della deformazione la curva di risonanza tende a schiacciarsi e a spostare il picco, in corrispondenza della frequenza di risonanza, a valori minori di frequenza.

Nelle figure successive, invece, sono riportate le curve del modulo di rigidezza a taglio risultanti dalle colonne risonanti effettuate sui due campioni di materiale grossolano, al variare della tensione di confinamento, e gli andamenti del fattore di smorzamento. L'elaborazione è stata eseguita con lo stesso script riportato in Appendice 2. I valori sono tabulati in Appendice 1.

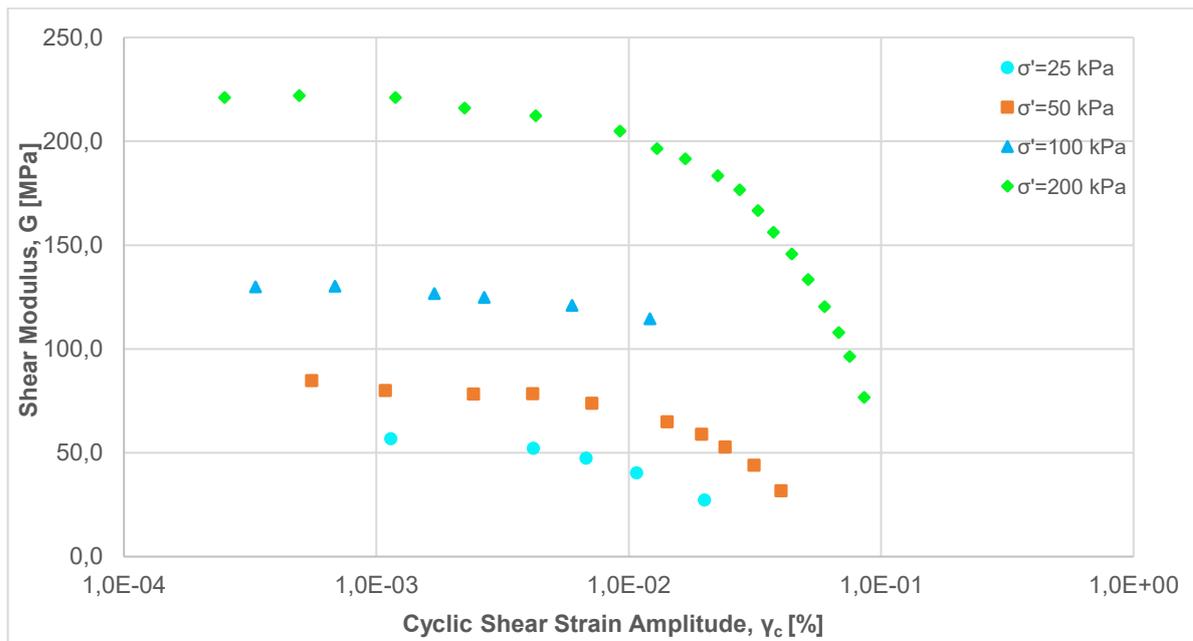


FIGURA 2.11: CURVE DI RIDUZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO PER IL CAMPIONE C1, DELLA SABBIA DI PERTH, A DIVERSI LIVELLI TENSIONALI

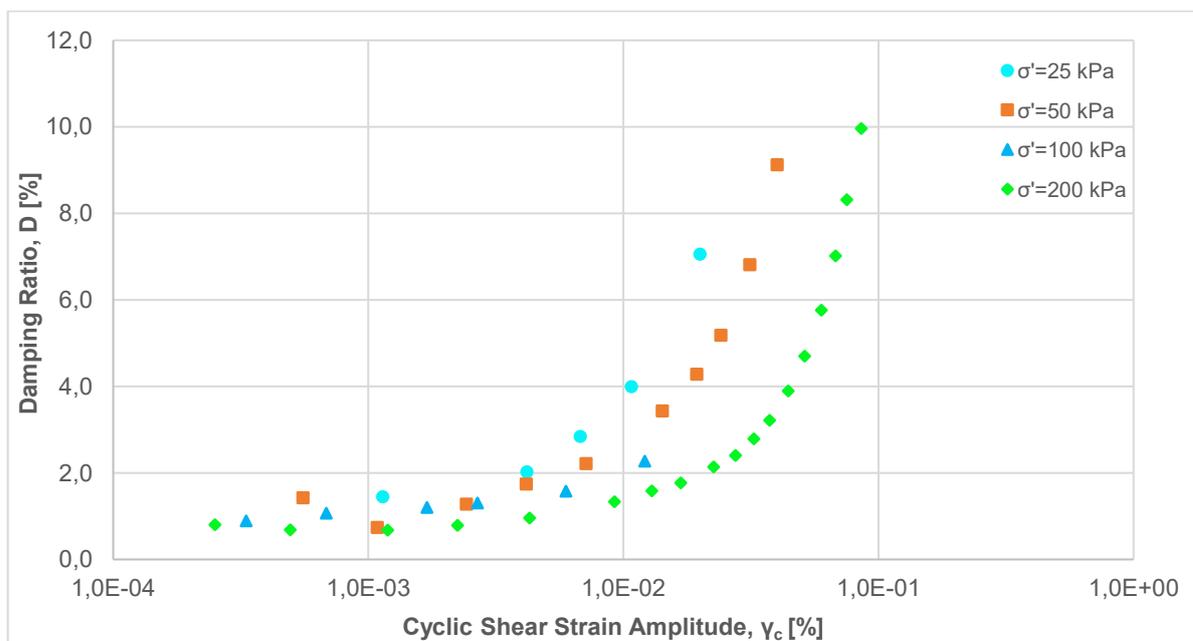


FIGURA 2.12: CURVE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO PER IL CAMPIONE C1, DELLA SABBIA DI PERTH, A DIVERSI LIVELLI TENSIONALI

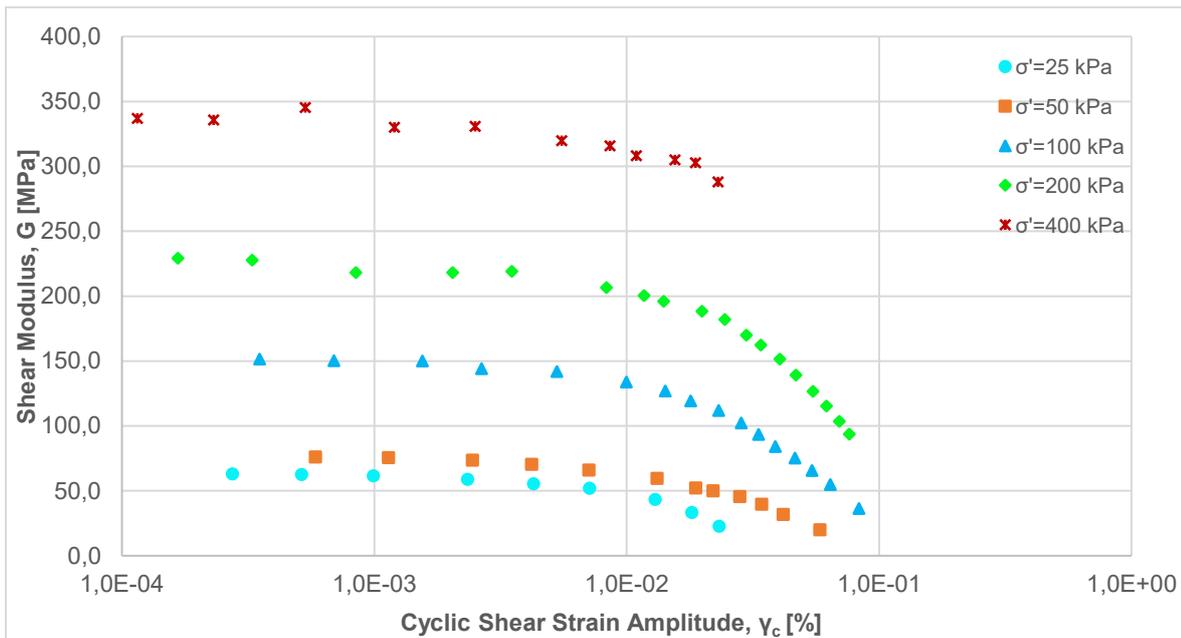


FIGURA 2.13: CURVE DI RIDUZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO PER IL CAMPIONE C2, DELLA SABBIA DI PERTH, A DIVERSI LIVELLI TENSIONALI

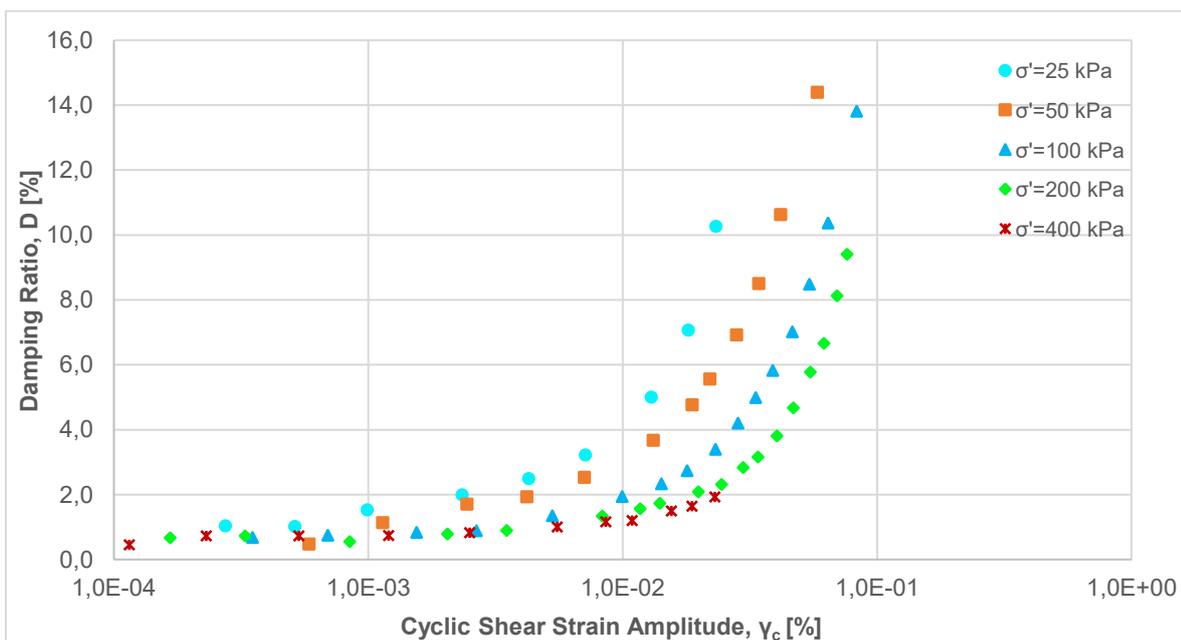


FIGURA 2.14: CURVE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO PER IL CAMPIONE C2, DELLA SABBIA DI PERTH, A DIVERSI LIVELLI TENSIONALI

La procedura multistep consente di studiare il comportamento ciclico del campione a pressioni di confinamento crescenti. Potrebbero sorgere dubbi su eventuali effetti di disturbo, delle fasi precedenti, indotti sulle prove effettuate a tensioni maggiori.

Quando un terreno è eccitato al di sopra della soglia volumetrica, a grandi deformazioni, presenta un comportamento di degradazione graduale, con cambiamenti permanenti nella microstruttura e, in condizioni non drenate, con aumento della pressione interstiziale. Questo avviene maggiormente nei terreni a grana fine, mentre, per quanto riguarda i terreni grossolani, la risposta, sotto carichi ciclici, è in teoria solo correlata ai suoi parametri di stato iniziali, anche se questo è vero per quelle sabbie che presentano grani arrotondati e che, quindi, non hanno un orientamento principale delle particelle. Qualunque possibile effetto di disturbo dei campioni influirebbe comunque prevalentemente sul modulo di rigidità a piccole deformazioni, piuttosto che sulle curve normalizzate.

Le prove hanno riguardato livelli deformativi che vanno dal  $10^{-4}$  % al  $10^{-1}$  %, di fatti, non è stato possibile raggiungere ampiezze deformative  $\gamma_c$  più elevate a causa del notevole accumulo di pressione interstiziale. Infatti, qualora fosse stata applicata ai campioni una coppia maggiore, si sarebbe raggiunta la condizione di liquefazione del provino, impedendo la possibilità di effettuare le fasi successive a tensioni maggiori.

Dalle curve di riduzione del modulo è chiaro come la pressione di confinamento influisca sul valore di  $G$ , infatti, il  $G_0$  aumenta considerevolmente tra una fase e l'altra. Va precisato che all'interno di uno step di prova (condotto a una certa pressione di confinamento iniziale), l'effettiva pressione di confinamento tende a diminuire per via dell'accumulo delle pressioni interstiziali. Questo comporta un decremento più rapido del modulo di taglio. Al contrario, il damping diminuisce all'aumentare della tensione di confinamento, sebbene non presenti una dipendenza ben definita.

Oltre all'aumento del modulo a taglio, con l'aumentare della tensione di confinamento, si ha anche un tratto lineare più esteso per bassi livelli deformativi, questo sta ad indicare un aumento della soglia lineare.

## *2.2 Prove di taglio torsionale ciclico*

Al termine delle prove di colonna risonante, è seguita una fase, della durata di circa 24 ore, in cui si è lasciato il campione sottoposto alla tensione di consolidazione  $\sigma'_m$ .

Al termine di questa fase si è dato inizio alle prove di taglio torsionale ciclico, i cui risultati sono illustrati figure che seguono, mentre per i valori si rimanda alle tabelle in Appendice 1. L'elaborazione dei risultati è avvenuta tramite il software Matlab (vedi Appendice 2, script di Ciancimino A.).

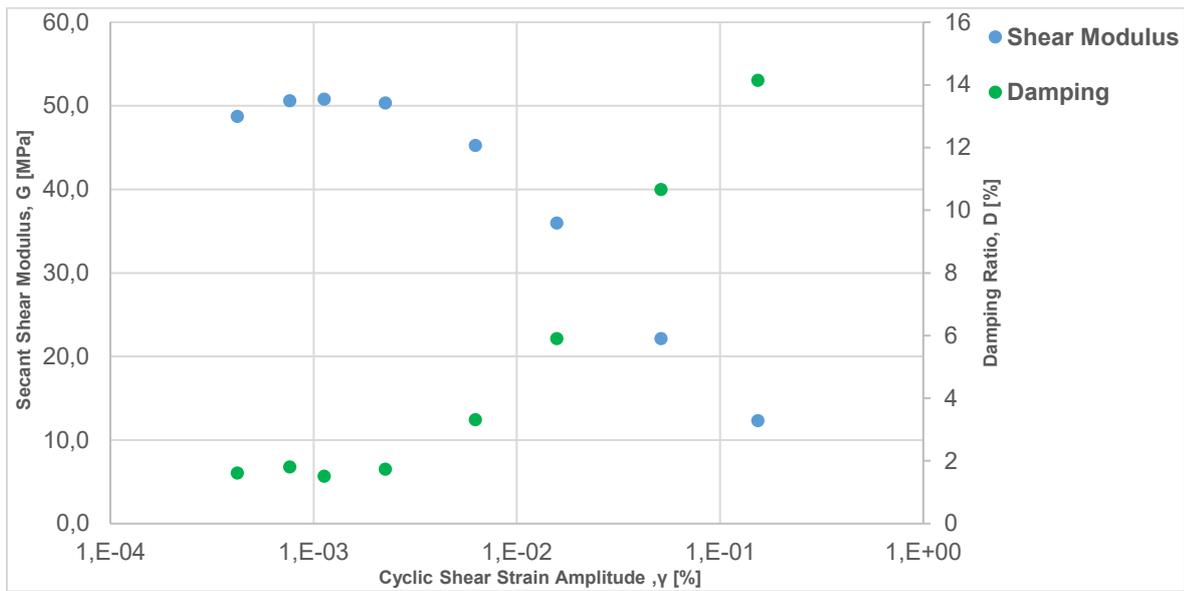


FIGURA 2.15: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE NIELLA TANARO S1-C1

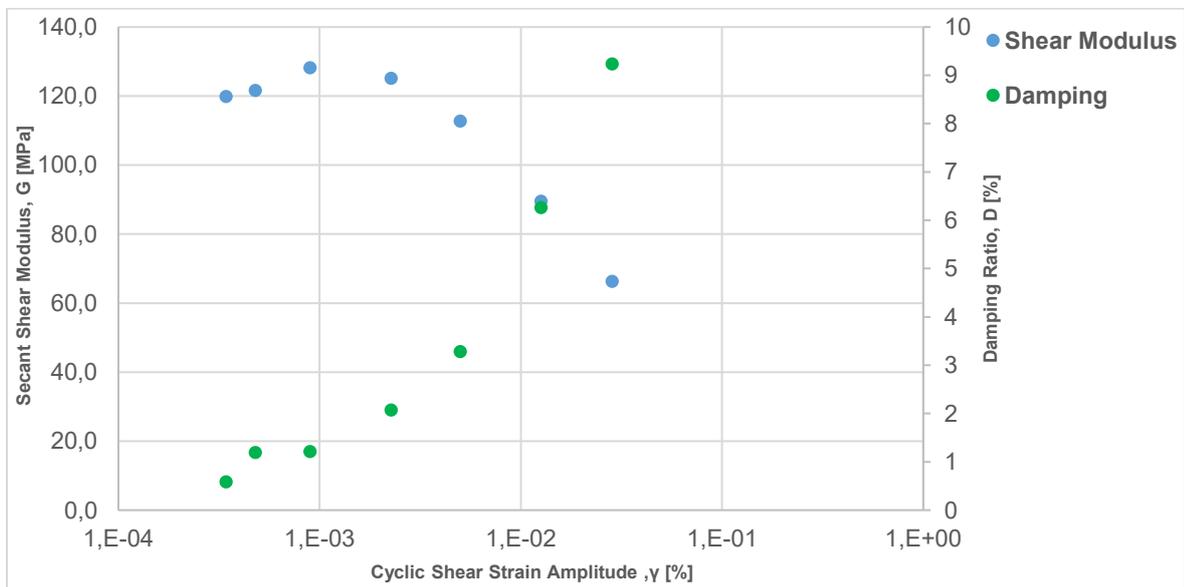


FIGURA 2.16: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE NIELLA TANARO S1-C2

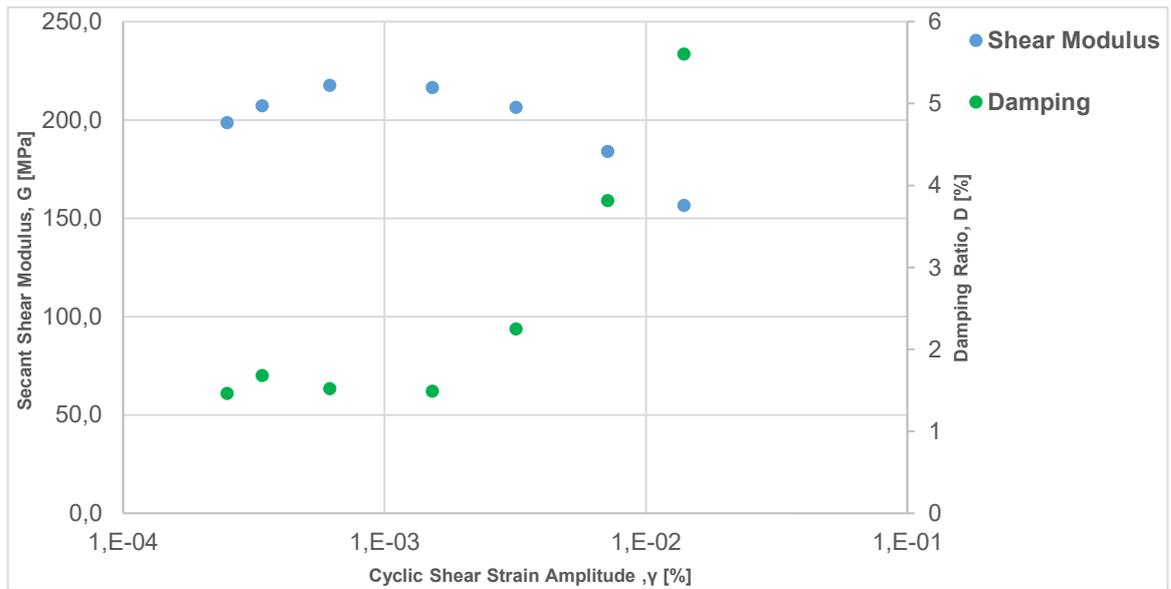


FIGURA 2.17: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE NIELLA TANARO S1-C3

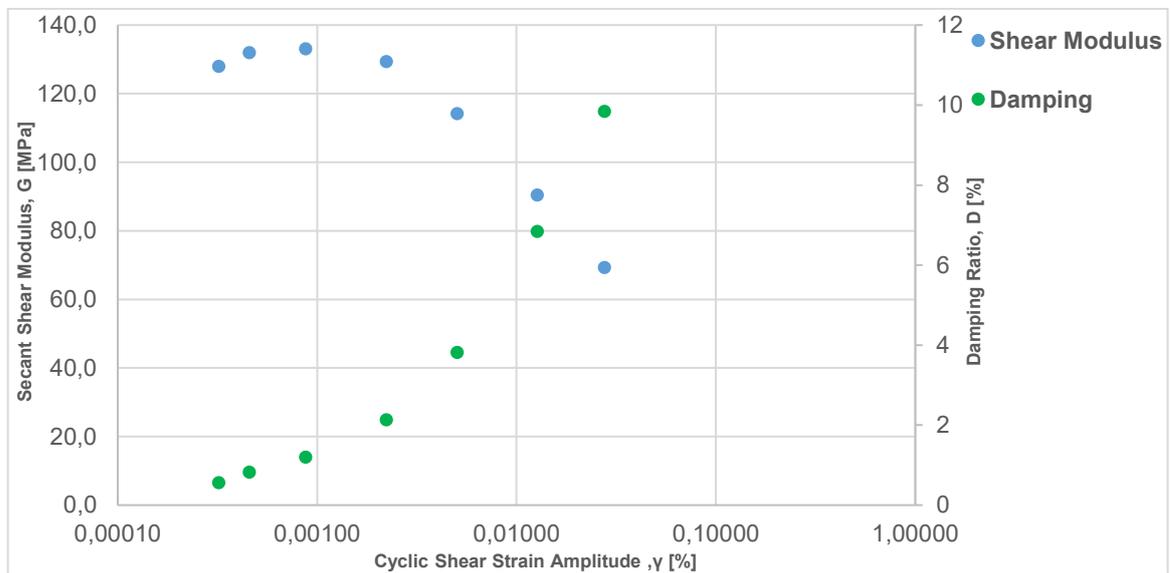


FIGURA 2.18: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE ENVIE-LA GRENGIA S1-C2

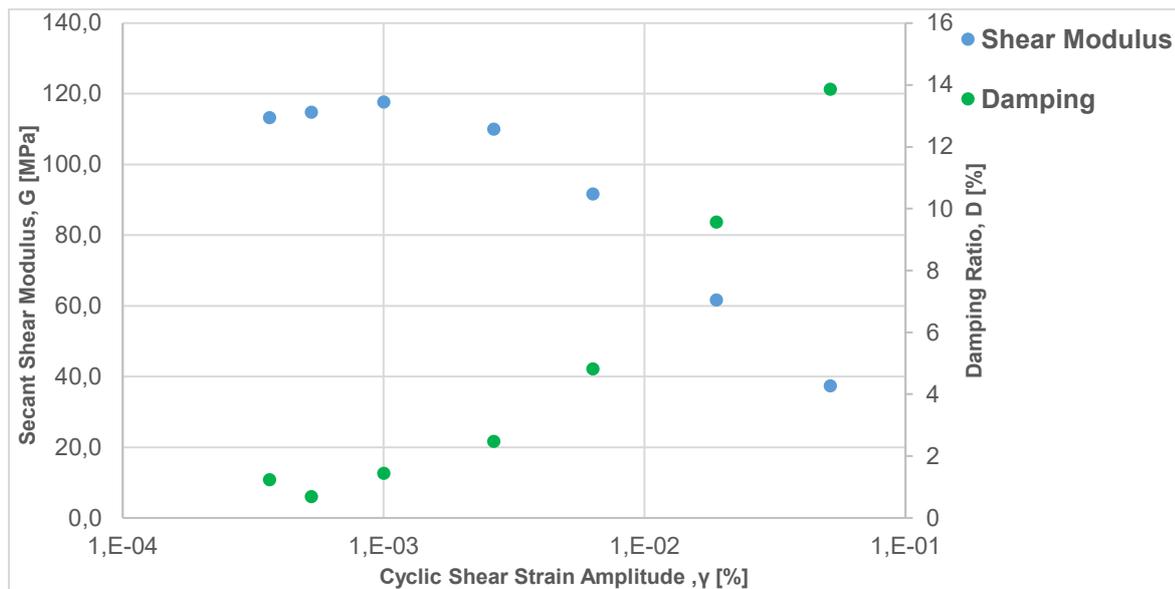


FIGURA 2.19: CURVE DI VARIAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TAGLIO E DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO, TAGLIO TORSIONALE ENVIE-CASCINA RUBIOLO S1-C2

Per quanto riguarda i due campioni di sabbia ricostituiti non sono stati tenuti in conto i risultati delle prove di taglio torsionale ciclico in quanto poco significativi a causa del danneggiamento subito dai provini dopo le prove di colonna risonante.

## Capitolo 3 : Descrizione del database implementato

### *Introduzione*

Nel presente capitolo viene trattata la struttura del database implementato e vengono inoltre presentate le principali caratteristiche dei campioni inclusi.

Nel database sono state incluse le prove eseguite dal Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Torino nel periodo che va dal 1999 ad oggi. In aggiunta sono presenti le prove eseguite nell'ambito del progetto di Microzonazione di terzo livello in Centro Italia, realizzate dai laboratori dell'Università degli Studi di Firenze, l'Università degli Studi di Napoli Federico II, la Sapienza Università di Roma, l'Università degli Studi di Messina e l'Università Kore Enna (Ciancimino et al., 2020).

In totale le prove analizzate sono state 209, di queste ne sono state escluse 20 in quanto non erano presenti la descrizione del campione e/o le caratteristiche fisiche dello stesso, o presentavano dei risultati poco attendibili.

Il database finale, su cui sono state effettuate le elaborazioni per il presente lavoro, si compone di 189 prove e, al fine di agevolare l'elaborazione, è stato suddiviso in due database: il primo per i materiali ad alto contenuto di fine (139 campioni) e il secondo per i materiali a grana grossa (50 campioni).

Accorpate i risultati eseguiti dal 1999 ad oggi non è stato semplice, in quanto negli anni le modalità delle prove e dell'acquisizione dei dati è cambiata, determinando la non uniformità delle informazioni.

Quando possibile, i raw data acquisiti in fase di esecuzione delle prove condotte al Politecnico di Torino sono stati rielaborati mediante lo script di Matlab citato nel capitolo precedente.

### *3.1 Struttura del Database*

Le prove di caratterizzazione fisica e meccanica dei campioni indisturbati sono state ordinate in una variabile strutturata 'Data', realizzata con il software Matlab (vedi Appendice 3). La struttura generale del database, così come i file utilizzati per realizzarlo, sono stati modificati a partire dal lavoro di tesi precedentemente svolto da Coppetta (2019), che comprendeva tutte le prove svolte nell'ambito del progetto di Microzonazione sismica dei comuni in centro Italia.

Per ogni campione sono stati inseriti – se presenti – le seguenti informazioni (vedi FIGURA 3.1):

- ID: numeroprogressivogenerale\_nomedelfile\_numeroprogressivo (nel caso di più file con lo stesso nome);
- nome del progetto;
- laboratorio che ha eseguito la prova;
- comune di provenienza;
- latitudine;
- longitudine;
- data di esecuzione della prova;
- note;
- profondità media di prelievo del campione;
- granulometria: descrizione granulometrica, percentuali di passante in peso,  $D_{10}$  e  $D_{60}$ ;
- peso per unità di volume ( $\text{kN/m}^3$ );
- limiti di Atterberg: indice di plasticità (%), limite liquido (%);
- contenuto d'acqua naturale (%);
- tensione di consolidamento a cui è stata effettuata la prova  $\sigma'_m$  (kPa);
- indice dei vuoti iniziale;
- indice dei vuoti a fine consolidazione;
- peso specifico ( $\text{g/cm}^3$ );
- risultati delle prove meccaniche (RC, TTC e DSDSS): livello deformativo (%), modulo di rigidezza a taglio (MPa), modulo di rigidezza a taglio alle piccole deformazioni (MPa), rapporto adimensionalizzato tra i precedenti due moduli, fattore di smorzamento (%), sovrappressione interstiziale (kPa).

ID	PROGETTO	LABORATORIO	COMUNE	LATITUDINE	LONGITUDINE	DATA	NOTE	Z	GRANULOMETRIA	PS	IP	WL	WN	SIGMA	einiz	econs	Gs	RC	TTC	BSDSS
'001_N2_01.xlsx'	'STRAGO s.r.l.'	'Polito'	'NOTO (SR)'	'36°53'29.00"N'	'15°04'16.01"E'	'16/04/1...'			7.8250	'x1 struct'		0	23.4000	144.6600	0.7670	0.7440	2.6950	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'002_N2_02.xlsx'	'STRAGO s.r.l.'	'Polito'	'NOTO (SR)'	'36°53'29.00"N'	'15°04'16.01"E'	'23/04/1...'			10.25...	'x1 struct'			29.3100	172.1300	0.8035	0.7662	2.7470	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'003_N2_03.xlsx'	'STRAGO s.r.l.'	'Polito'	'NOTO (SR)'	'36°53'29.00"N'	'15°04'16.01"E'	'06/05/1...'			4.7250	'x1 struct'			34.8090	144.1700				'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'004_N2_04.xlsx'	'STRAGO s.r.l.'	'Polito'	'NOTO (SR)'	'36°53'29.00"N'	'15°04'16.01"E'	'12/05/1...'			17.70...	'x1 struct'			24.2060	336.0700	0.6882	0.5859	2.6000	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'005_N2_05.xlsx'	'STRAGO s.r.l.'	'Polito'	'NOTO (SR)'	'36°53'29.00"N'	'15°04'16.01"E'	'26/05/1...'			17.70...	'x1 struct'			36.4830	380.8900				'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'006_GRF_04.xlsx'	'V.E.L.'	'Polito'	'CASTELNU...	'44°06'34.10"N'	'10°24'48.76"E'	'30/11/1...'			25.80...	'x1 struct'			12.8500	330.7600	0.4050	0.2850	2.7090	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'007_GRF_06.xlsx'	'V.E.L.'	'Polito'	'CASTELNU...	'44°06'34.10"N'	'10°24'48.76"E'	'17/12/1...'			2.3000	'x1 struct'			32.9600	39.4000	0.9330	0.8260	2.6890	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'008_MCS_01.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°48'20.18"N'	'10°26'14.09"E'	'16/02/2...'			7.9500	'x1 struct'			30.8500	150.0800	0.8260	0.7640	2.7000	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'009_MCS_02.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°48'20.18"N'	'10°26'14.09"E'	'02/03/2...'			27.95...	'x1 struct'			33.6400	339.3300	0.9630	0.8790	2.6990	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'010_MCS_03.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°48'20.18"N'	'10°26'14.09"E'	'10/03/2...'			37.85...	'x1 struct'			26.4100	467.4400	0.7460	0.6180	2.6890	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'011_MD_01.xlsx'	'PIZZAROTTI'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°40'17.51"N'	'10°55'34.19"E'	'06/11/2...'			8.3000	'x1 struct'			24.7500	79.9300	0.6810	0.6350	2.6960	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'012_MD_02.xlsx'	'PIZZAROTTI'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°40'17.51"N'	'10°55'34.19"E'	'20/11/2...'			16.30...	'x1 struct'			29.7600	161.0400	0.7880	0.7090	2.7260	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'013_MD_03.xlsx'	'PIZZAROTTI'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°40'17.51"N'	'10°55'34.19"E'	'07/12/2...'			24.30...	'x1 struct'			38.2200	236.7500	1.0650	0.9310	2.7350	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'014_MD_04.xlsx'	'PIZZAROTTI'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°40'17.51"N'	'10°55'34.19"E'	'21/12/2...'			40.30...	'x1 struct'			28.9600	399.1100	0.7100	0.6740	2.7230	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'015_MD_05.xlsx'	'PIZZAROTTI'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°40'17.51"N'	'10°55'34.19"E'	'14/01/2...'			24.40...	'x1 struct'			22.9700	232.7600	0.6910	0.6420	2.7180	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'016_MD_06.xlsx'	'PIZZAROTTI'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°40'17.51"N'	'10°55'34.19"E'	'08/01/2...'			32.30...	'x1 struct'			26.8100	309.1300	0.7130	0.5970	2.7210	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'017_PA_01.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°53'08.17"N'	'11°25'22.21"E'	'17/03/2...'			6.6000	'x1 struct'			26.0500	97.8800	0.6360	0.5860	2.7000	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'018_PA_02.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°53'08.17"N'	'11°25'22.21"E'	'23/03/2...'			20.10...	'x1 struct'			128.8...	78.6500	3.1570	3.0040	2.3470	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'019_CE_01.xlsx'	'CERDA RS'	'CERDA (PA)'	'CERDA (PA)'	'37°54'00.00"N'	'13°49'00.00"E'	'03/02/2...'			9.2500	'x1 struct'			27.5800	98.3100	0.7760	0.7630	2.7570	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'020_CE_02.xlsx'	'CERDA RS'	'CERDA (PA)'	'CERDA (PA)'	'37°54'00.00"N'	'13°49'00.00"E'	'11/02/2...'			21.80...	'x1 struct'			13.3900	296.7500	0.4350	0.3690	2.7720	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'021_SN_CT_01.xlsx'	'SIDERCEM'	'Polito'	'CATANIA-...'	'37°30'14.85"N'	'15°04'50.28"E'	'03/10/2...'	'provin...'		8.1500	'x1 struct'			0	104.0500	0.5390	0.5300	2.9600	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'022_SN_CT_02.xlsx'	'SIDERCEM'	'Polito'	'CATANIA-...'	'37°30'14.85"N'	'15°04'50.28"E'	'04/10/2...'	'provin...'		12.30...	'x1 struct'			0	174.8000	0.5550	0.4870	2.8760	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'023_SN_CT_03.xlsx'	'SIDERCEM'	'Polito'	'CATANIA-...'	'37°30'14.85"N'	'15°04'50.28"E'	'05/10/2...'	'provin...'		14.8...	'x1 struct'			0	383.7400	0.9200	0.9180	2.9060	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'024_LA_02.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°31'22.49"N'	'11°14'25.62"E'	'12/04/2...'			14.75...	'x1 struct'			32.2100	148.4800	1.0230	0.9380	2.7010	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'025_LA_03.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'44°31'22.49"N'	'11°14'25.62"E'	'18/04/2...'			37.75...	'x1 struct'			27.4900	379.6500	0.7810	0.6190	2.7050	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'026_BR_01.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'47°00'08.84"N'	'11°30'17.47"E'	'09/05/2...'			21.75...	'x1 struct'			28.2800	224.9200	0.7610	0.6710	2.7100	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'027_BR_02.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'47°00'08.84"N'	'11°30'17.47"E'	'23/06/2...'			29.70...	'x1 struct'			26.5900	281.9300	0.7270	0.5680	2.7070	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'
'028_BR_03.xlsx'	'AQUATER'	'Polito'	'VIADOTTO...	'47°00'08.84"N'	'11°30'17.47"E'	'14/06/2...'			39.30...	'x1 struct'			32.2100	345.8200	0.8620	0.6910	2.6980	'x1 struct'	'x1 struct'	'x1 struct'

FIGURA 3.1: ORGANIZZAZIONE DELLA VARIABILE STRUTTURATA 'DATA'

Avendo indicato la latitudine e la longitudine è stato possibile geolocalizzare, sulla cartina dell'Italia, i luoghi in cui sono stati prelevati i campioni (FIGURA 3.2).

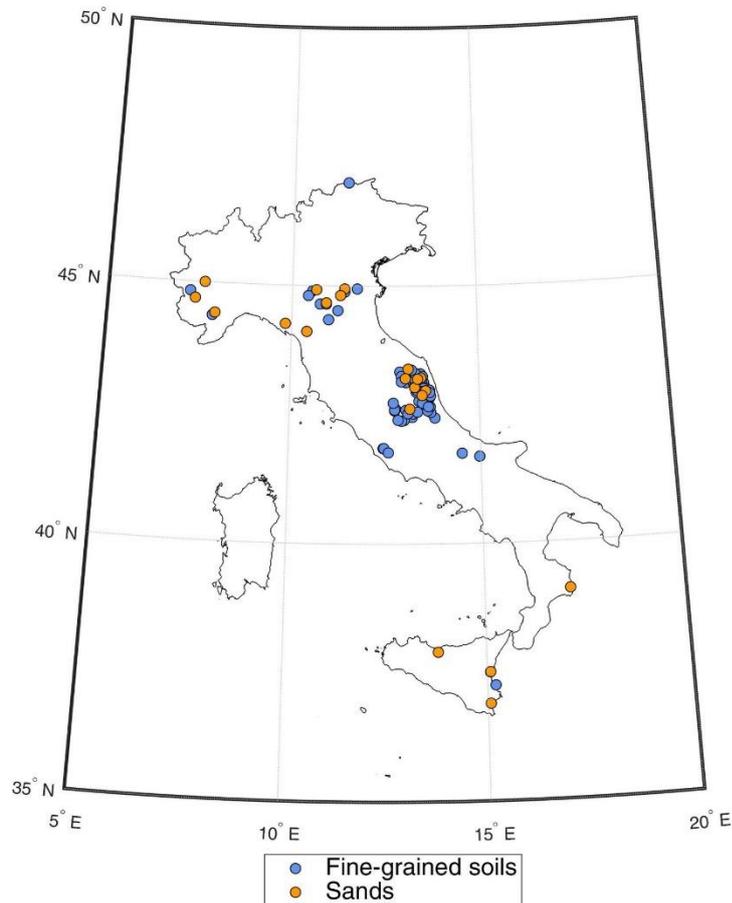


FIGURA 3.2: GEOLOCALIZZAZIONE DEI CAMPIONI PRELEVATI IN ITALIA

Buona parte di questi campioni si trova in centro Italia poiché sono state inserite, all'interno della variabile 'Data', tutte le prove effettuate per il progetto di Microzonazione sismica delle Marche a seguito degli eventi sismici avvenuti nel 2016. Oltre alle prove effettuate sui campioni prelevati sul territorio italiano, sono state eseguite anche delle prove su dei campioni, di materiale a grana grossa, prelevati a Toyoura e a Perth.

L'obiettivo di questo lavoro, visto il gran numero di dati disponibili, è quello di ottenere dati di carattere generale quanto più attendibili, confermando o, a volte, disattendendo, i modelli presenti in letteratura.

### 3.2 Caratterizzazione fisica dei terreni

Le prove adibite alla caratterizzazione fisica dei terreni hanno lo scopo di classificare i terreni facendo leva sul fatto che terreni simili si comportano allo stesso modo.

Il modo più semplice per classificare un terreno consiste nell'analisi granulometrica tramite la quale si individua la distribuzione percentuale in peso dei grani, a seconda delle dimensioni.

La prova consiste nel passare a setaccio il materiale se è a grana grossa,  $d \geq 0,64 \mu\text{m}$ , o in un'analisi per sedimentazione per i terreni a grana fine con  $d \leq 0,64 \mu\text{m}$ .

La prova di setacciatura prevede la presenza di una colonna di setacci con maglie di diametro decrescente, posta su uno scuotitore meccanico, attraverso cui far passare il campione di terreno. Ciò che viene trattenuto ad ogni setaccio, si pesa e tale peso viene indicato con  $T_1, T_2, \dots, T_n$ . Conoscendo il peso totale si va a determinare la percentuale di terreno che passa per ogni setaccio, con la seguente espressione:

$$P_i(\%) = \frac{P_t - (T_1 + T_2 + \dots + T_n)}{P_t} 100 \quad (9)$$

Questo è rappresentabile graficamente mettendo in ascissa, in scala logaritmica, l'apertura della maglia del setaccio e in ordinata la percentuale del materiale passante. Per la prova di sedimentazione si applica la relazione di Stokes che lega le dimensioni delle particelle, che si trovano in sospensione in un liquido, con la loro velocità di sedimentazione, considerando il peso specifico proprio e del liquido:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} gD^2 \quad (10)$$

Con  $g$  accelerazione gravitazionale e con  $\eta$  coefficiente di viscosità.

Il materiale utilizzato per questa prova è quello che rimane nell'ultimo setaccio (setaccio n.200 ASTM) dopo la vagliatura meccanica che viene miscelato con l'acqua. Tale miscela viene posta in una colonna graduata inserita, a sua volta, in un bagno termostatico.

Ad intervalli di tempo prestabiliti, si misura tramite un densimetro la densità della soluzione, in modo da determinare la velocità di sedimentazione attraverso il tempo di sedimentazione. Una volta nota la velocità, tramite la legge di Stokes, è possibile disegnare la curva granulometrica per la parte fine.

Sulla base dell'analisi granulometrica viene assegnato il nome al campione, classificandolo:

- il primo nome è attribuito al componente col maggiore  $P_i$  (%);
- il secondo nome è dato dal secondo componente con riferimento al  $P_i$  (%) con cui è presente:
  - $P_i$  (%)  $\geq 25\%$  “con + nome del componente”
  - $15\% \leq P_i$  (%)  $< 25\%$  “nome del componente + oso”
  - $5\% \leq P_i$  (%)  $< 15\%$  “con + nome del componente + oso”
  - $P_i$  (%)  $< 5\%$  trascurabile
- il terzo nome è assegnato dal terzo componente seguendo le precedenti regole, ma in genere è trascurato (Coppetta I., 2019).

Nell'istogramma di FIGURA 3.3 è rappresentata la classificazione dei campioni, inseriti nel database, in base alla descrizione granulometrica.

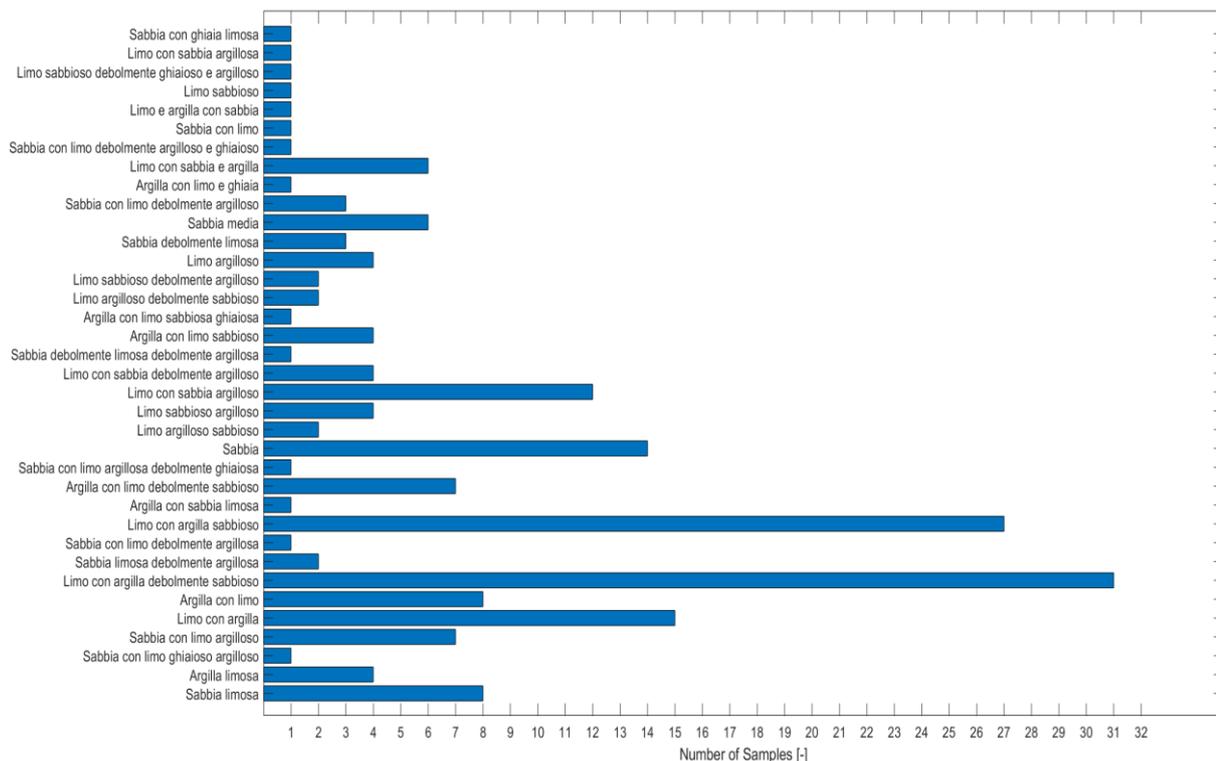


FIGURA 3.3: CLASSIFICAZIONE DEI CAMPIONI INSERITI NEL DATABASE SECONDO LA DESCRIZIONE GRANULOMETRICA

Dall'istogramma si evince una presenza maggiore di campioni di limi con argilla a cui seguono campioni di sabbia e argilla. Questo è visibile anche nelle curve granulometriche riportate in FIGURA 3.4.

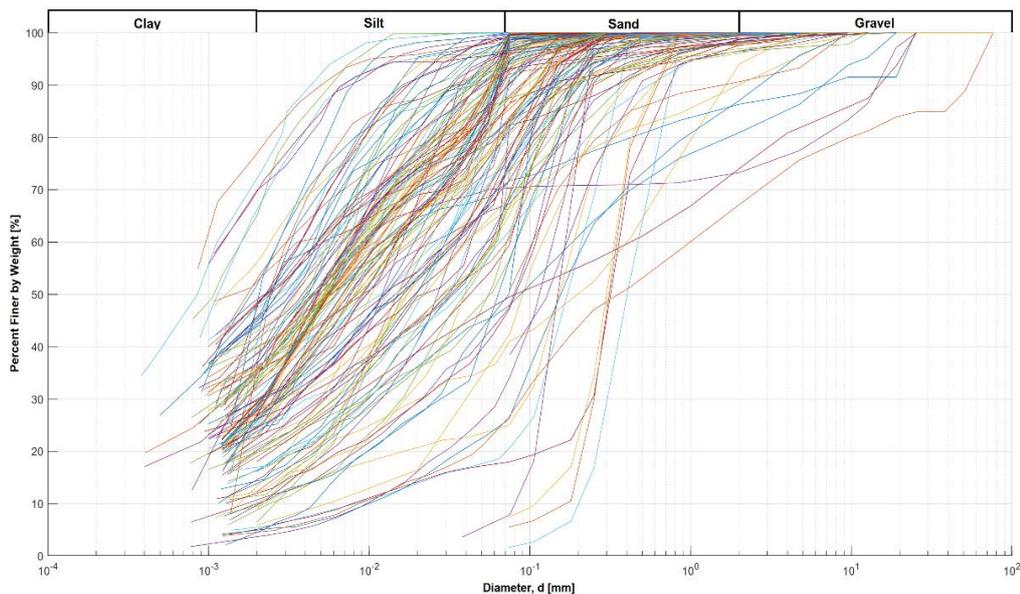


FIGURA 3.4: DISTRIBUZIONE DELLE CURVE GRANULOMETRICHE DEI CAMPIONI INSERITI ALL'INTERNO DEL DATABASE

Per i terreni a grana fine devono essere considerate anche le azioni a distanza, oltre all'azione di puro contatto, in quanto la mineralogia ha un'influenza importante sul comportamento del materiale. Lo studio della composizione mineralogica può essere eseguito tramite la determinazione dei limiti di Atterberg.

Tali limiti si basano sul contenuto d'acqua a cui corrisponde usualmente il passaggio di una terra coesiva dallo stato liquido allo stato plastico (limite liquido), dallo stato plastico a quello semisolido (limite plastico), dallo stato semisolido a quello solido (limite di ritiro).

Per determinare il limite liquido si usa il metodo del cucchiaio di Casagrande. La prova consiste nell'utilizzare uno specifico volume di terreno passante al setaccio con maglia 0,42 mm e amalgamandolo con acqua distillata fino ad ottenere un composto omogeneo. Il composto ottenuto viene posizionato nel cucchiaio, con una spatola si traccia un solco di dimensioni standardizzate nella zona centrale. Da un'altezza standard si fa cadere il cucchiaio più volte e si conta il numero dei colpi necessari a far richiudere il solco di 13 mm.

Si preleva parte del materiale e si determina il contenuto d'acqua. Questa procedura viene ripetuta per 4-5 volte su impasti con contenuto d'acqua via via decrescente, in modo da avere una serie di coppie numero di colpi – contenuto d'acqua. Tali coppie vengono disposte su un piano semilogaritmico e vengono interpolate linearmente. Il limite liquido ( $w_L$ ) corrisponderà al contenuto d'acqua relativo a 25 colpi.

Il limite plastico corrisponde al contenuto d'acqua per cui il terreno inizia a sbriciolarsi e a fessurarsi. Viene determinato con il materiale rimanente dalla prova del limite

liquido formando dei bastoncini di grandezza standardizzata che vengono fatti rotolare con le mani fino al punto in cui si iniziano a fessurare. A questo punto si può determinare il contenuto d'acqua che coincide con  $w_p$ . di solito si effettuano 3 misurazioni e si assume il valore medio come limite plastico.

Il limite plastico non è stato inserito all'interno del database, ma è presente l'indice di plasticità, cioè la differenza tra i due limiti sopra descritti:

$$PI(\%) = w_L - w_p \quad (11)$$

Per plasticità si intende, in questa sede, l'attitudine del materiale ad essere modellato e deformato in maniera irreversibile senza rompersi o fessurarsi (Lancellotta, 2012).

Un materiale può essere definito in funzione dell'indice di plasticità  $PI(\%)$ :

TABELLA 3.1: DEFINIZIONE DELLA PLASTICITÀ DEI TERRENI

$0 \leq PI \leq 5$	non plastico
$5 < PI \leq 15$	poco plastico
$15 < PI \leq 40$	plastico
$PI > 40$	molto plastico

Maggiore è la componente argillosa del terreno, maggiore sarà l'indice di plasticità (crescita lineare).

Per il prosieguo del presente elaborato si farà riferimento ai due database precedentemente citati.

Nella FIGURA 3.5 è indicata la percentuale dei campioni per indice di plasticità  $PI$  dei provini costituiti prevalentemente da materiale fine, mentre nella FIGURA 3.6 sono riportati i campioni costituiti prevalentemente da sabbia. Nell'istogramma che segue non è riportato il campione che presenta un  $PI$  pari a 122,4%.

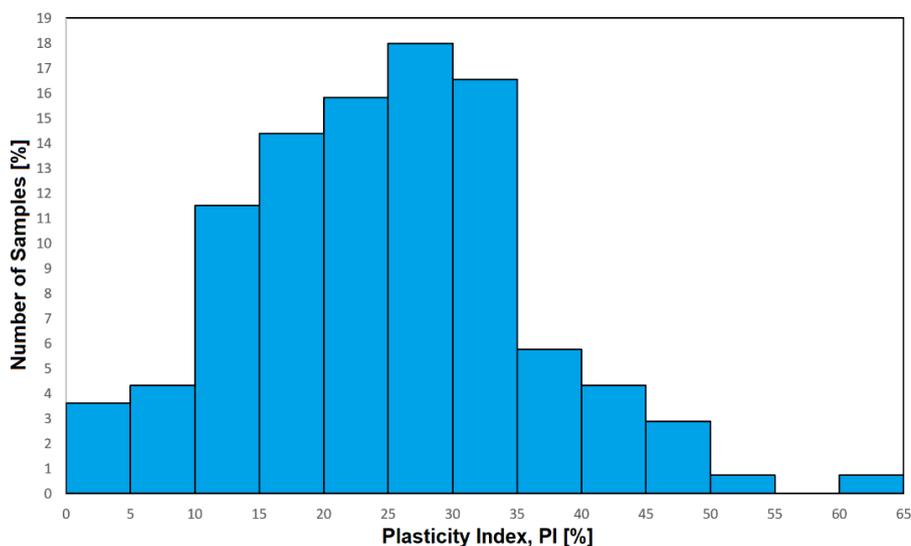


FIGURA 3.5: PERCENTUALE DI CAMPIONI PER INDICE DI PLASTICITÀ DEI TERRENI IN MATERIALE FINE

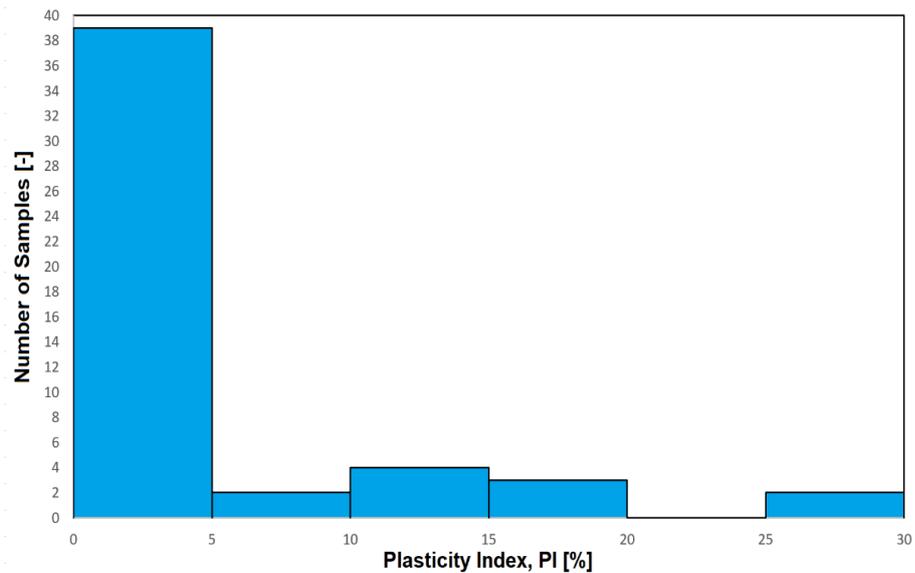


FIGURA 3.6: NUMERO DI CAMPIONI PER INDICE DI PLASTICITÀ DEI TERRENI A GRANA GROSSA

Un metodo per classificare le terre coesive è quello di Casagrande che parte dal presupposto che nelle argille esiste una legge lineare tra il limite di liquidità e l'indice di plasticità e, a seconda che  $w_L$  sia maggiore o minore del 50%, si distinguono i terreni in molto o poco plastici (FIGURA 3.7).

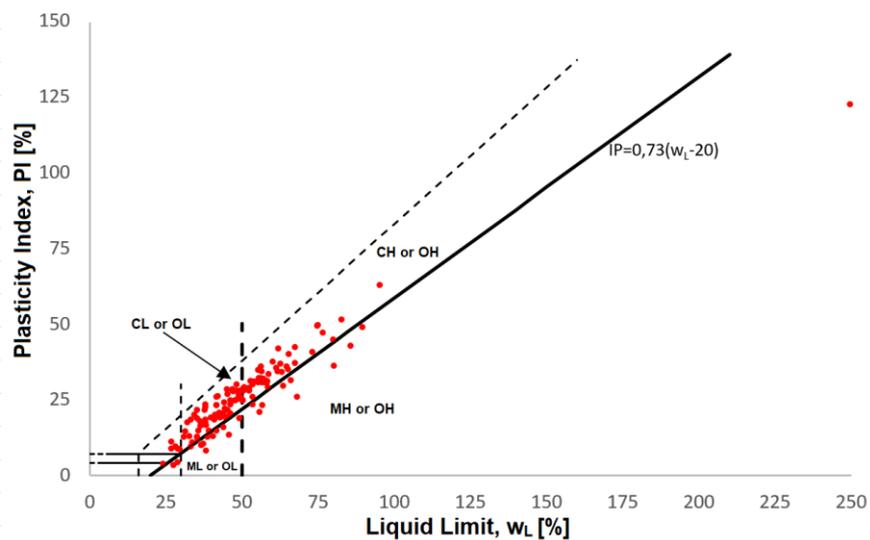


FIGURA 3.7: CARTA DI PLASTICITÀ DI CASAGRANDE PER LA CLASSIFICAZIONE DEI TERRENI CON PREVALENZA DI MATERIALE FINE

I materiali vengono identificati da due lettere di cui la prima stabilisce il tipo di terreno (C per le argille, M per i limi e O per terreni organici) e la seconda attribuisce la plasticità, H per le terre con alta plasticità e L per i materiali con bassa plasticità.

Questa suddivisione evidenzia la presenza preponderante di terreni con un'elevata frazione argillosa e con una medio/bassa plasticità.

La quasi totalità dei campioni inseriti nel database ricade tra la U-line, limite massimo superato il quale i limiti di Atterberg non sono attendibili e andrebbero ripetuti, e la A-line che segna il confine tra argille e limi.

I valori dei limiti di Atterberg sono influenzati sia dalla percentuale che dalla mineralogia della componente argillosa. Per capire il tipo di influenza esercitato dalla componente argillosa conviene rifarsi, in accordo con l'USCS, Unified Soil Classification System, all'activity chart in cui si riporta in ascissa la percentuale di argilla del terreno e in ordinata l'indice di plasticità (vedi FIGURA 3.8).

I campioni analizzati sono prevalentemente classificabili come argille di bassa e media attività (Ciancimino et al.,2019).

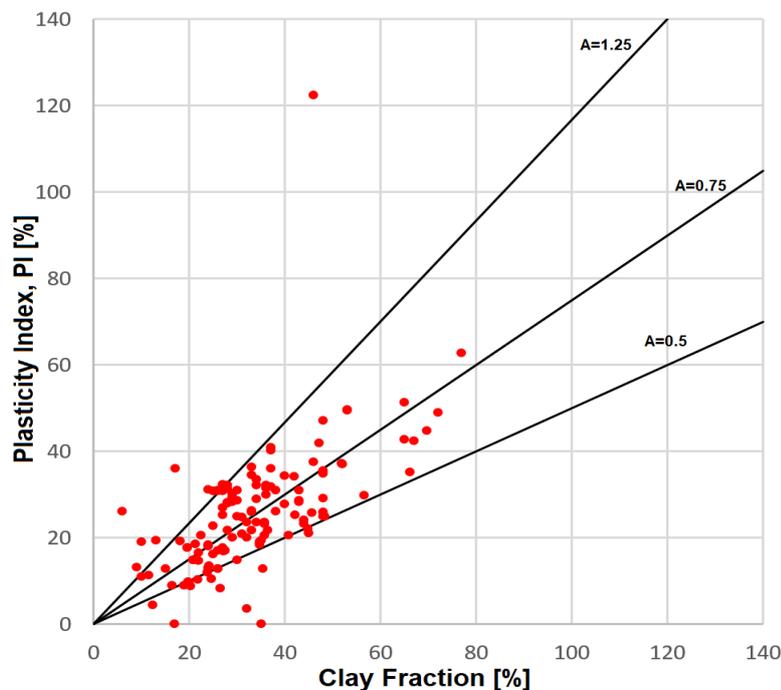


FIGURA 3.8: CLASSIFICAZIONE DEI CAMPIONI INSERITI ALL'INTERNO DEL DATABASE PER I MATERIALI A GRANA FINE SECONDO ACTIVITY CHART

## Capitolo 4 : Analisi dei risultati

Il comportamento dei terreni sottoposti ad una tensione tangenziale variabile nel tempo è descritto, in maniera semplificata, dal modulo di rigidezza a taglio e dal fattore di smorzamento. Il primo indica l'inclinazione della secante al legame non lineare tra sforzi e deformazioni, che diminuisce all'aumentare della deformazione, mentre il secondo corrisponde al rapporto tra l'energia che viene dissipata in un singolo ciclo di carico e la massima energia accumulata. A differenza del modulo  $G$ , all'aumentare del livello deformativo si ha un incremento della dissipazione. Oltre alle curve di variazione, all'interno del Database, sono stati inseriti i valori che queste grandezze assumono per bassi livelli deformativi,  $G_0$  e  $D_0$ . Come valore del modulo a piccole deformazioni si è scelto il valore massimo della curva di decadimento e la distribuzione di tali valori, per i campioni inseriti nei due diversi database, è mostrata in FIGURA 4.1 e FIGURA 4.2, risultanti dalle prove di colonna risonante e, in mancanza, dalle prove di taglio semplice ciclico con doppio provino.

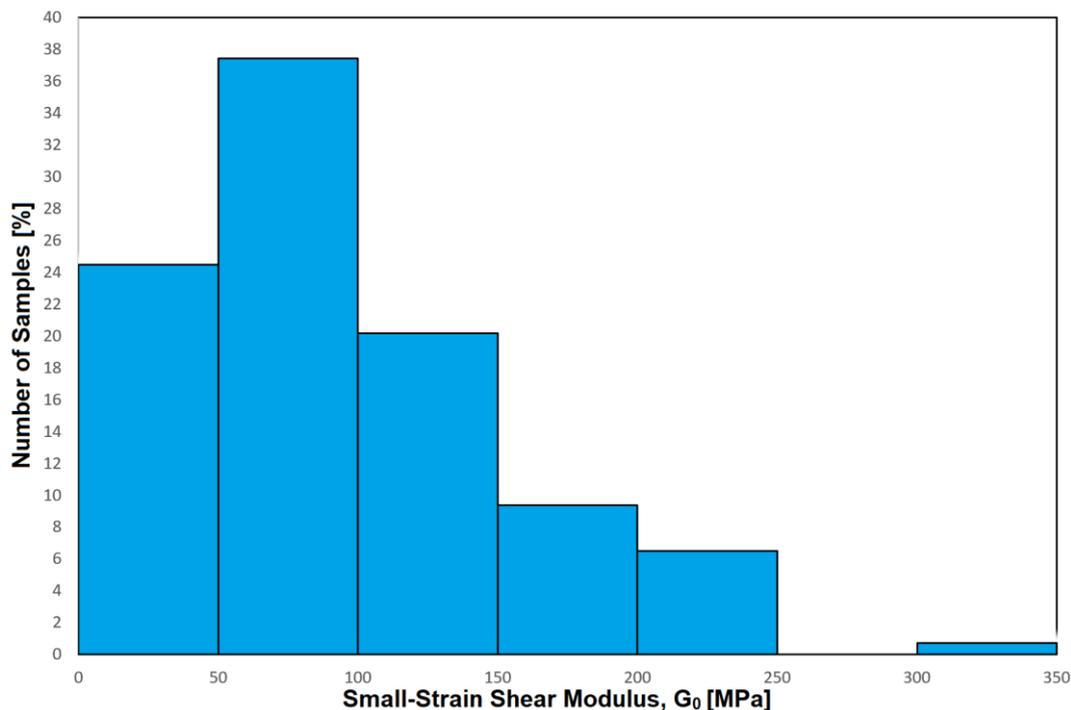


FIGURA 4.1: PERCENTUALE DI CAMPIONI PER RIGIDEZZA A TAGLIO A PICCOLISSIME DEFORMAZIONI DEI TERRENI IN MATERIALE FINE

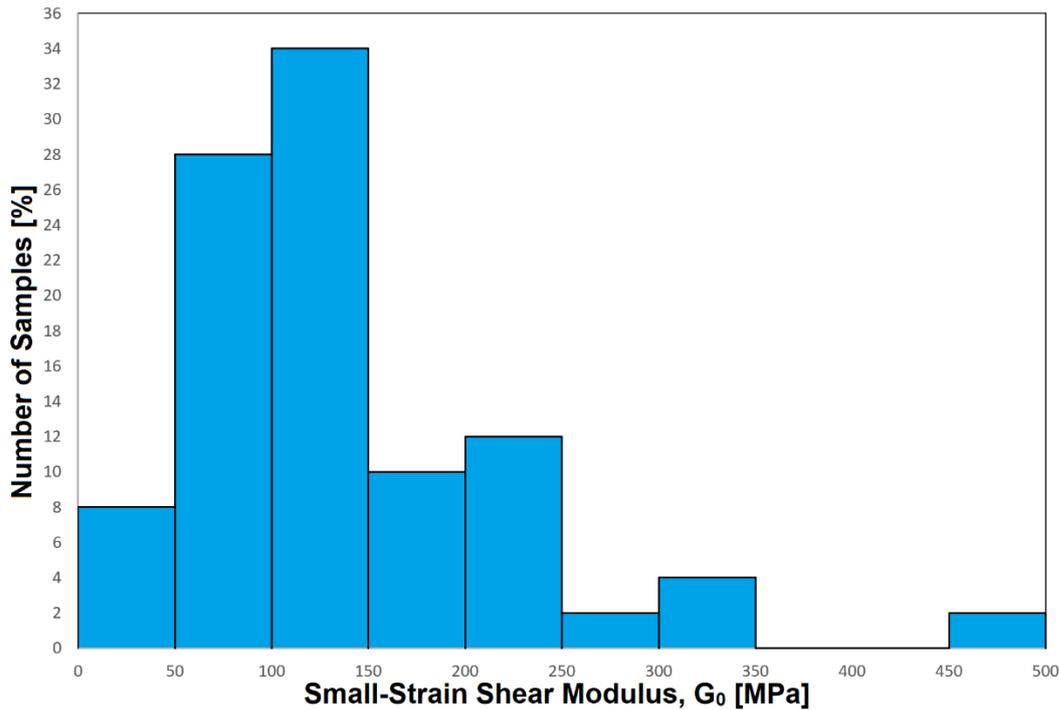
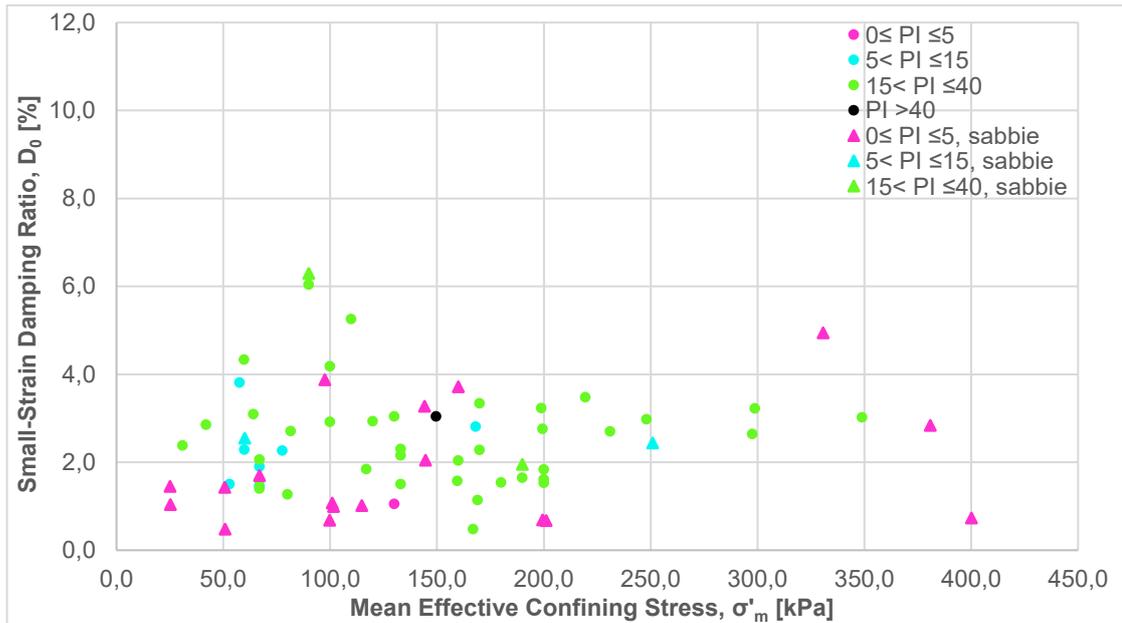


FIGURA 4.2: PERCENTUALI DI CAMPIONI PER RIGIDEZZA A TAGLIO A PICCOLISSIME DEFORMAZIONI DEI TERRENI A GRANA GROSSA

Per la determinazione dello smorzamento a piccolissime deformazioni è stato considerato il valore del damping in corrispondenza del livello deformativo per cui si ha  $G/G_0=1$ .

Questo valore è influenzato sia dallo stato tensionale che dalla tipologia di materiale. Rappresentando i dati fattore di smorzamento  $D_0$ -tensione effettiva  $\sigma'_m$ , presenti nella variabile 'Data', in funzione dell'indice di plasticità, si nota come non vi sia un andamento ben marcato, forse perché non vi è una buona distribuzione dei campioni nei diversi range dell'indice di plasticità, infatti la maggior parte dei campioni ricade nel range di plasticità 15-40 %. Analogamente, la dipendenza del fattore di smorzamento  $D_0$  con lo stato tensionale risulta poco visibile, anche se si riscontra per le sabbie un comportamento simile a quello descritto in FIGURA 1.1 (vedi FIGURA 4.3).



I valori di smorzamento utilizzati per la costruzione del grafico sopra riportato, scaturiscono dall'applicazione del metodo delle oscillazioni libere e dalla prova di taglio semplice ciclico con doppio provino.

Le distribuzioni dei valori di  $D_0$  sono riportate in FIGURA 4.4 e FIGURA 4.5, rispettivamente per i campioni inseriti nel database per terreni a grana fine e nel database per terreni grossolani. I valori di smorzamento derivano dalle prove di colonna risonante, di cui si sono considerati solo quelli calcolati con l'applicazione del metodo delle oscillazioni libere, e dal taglio semplice ciclico per quei campioni che non presentavano la prova di colonna risonante (Coppetta I.,2019).

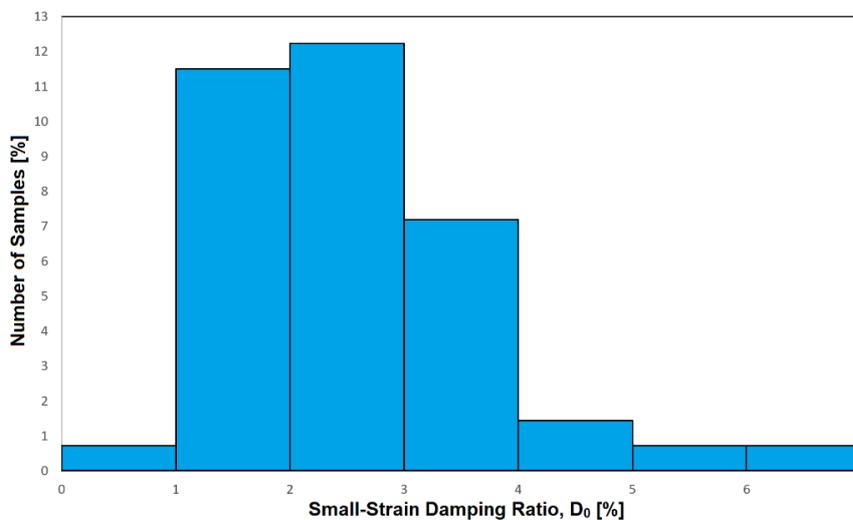


FIGURA 4.4: DISTRIBUZIONE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO  $D_0$  PER I CAMPIONI A GRANA FINE IN BASE ALLE PROVE DI COLONNA RISONANTE O TAGLIO SEMPLICE CICLICO

Dei 139 campioni inseriti all'interno del database per i materiali a grana fine, solamente 48 campioni sono conformi a quanto detto sopra. Per i rimanenti campioni lo smorzamento è stato valutato con il metodo "half-power bandwidth", qui non riportato.

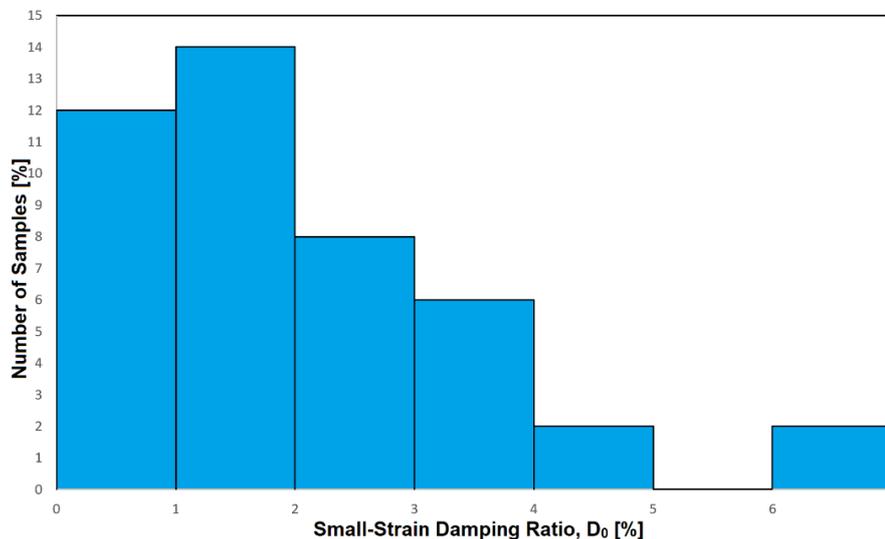


FIGURA 4.5: DISTRIBUZIONE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO  $D_0$  PER I CAMPIONI A GRANA GROSSA IN BASE ALLE PROVE DI COLONNA RISONANTE O TAGLIO SEMPLICE CICLICO

Analogamente, per i terreni a grana grossa, il criterio sopra esposto ha determinato solamente 22 su 50 campioni totali inseriti all'interno del database dedicato. Per i rimanenti lo smorzamento è stato valutato con il metodo "half-power bandwidth".

Sia il valore che le curve associate al variare della deformazione del modulo di taglio e del fattore di smorzamento dipendono dalle caratteristiche fisiche e dai parametri di stato del terreno. Questa interdipendenza è più evidente se si fa riferimento alle variazioni di indice di plasticità e di stato tensionale, mentre è meno condizionata dal grado di sovraconsolidazione, dalla frequenza di carico e dal numero di cicli (Darendeli, 2001).

#### 4.1 Valori di smorzamento a piccolissime deformazioni da RC e TTC a confronto

A seconda delle prove di laboratorio che si utilizzano, i valori dello smorzamento a piccolissime deformazioni ( $D_0$ ) sono differenti se messi a confronto la prova di colonna risonante con quella di taglio torsionale ciclico.

Se si utilizza la prova di colonna risonante possiamo valutare lo smorzamento attraverso due modi diversi: o per mezzo del fattore di amplificazione – "Half-power bandwidth" – o per mezzo del decremento logaritmico. Il primo sistema si fonda sulla

condizione di terreno lineare visco-elastico, che è lecita solamente entro certi limiti di deformazione, quindi non è sempre possibile applicarlo, in quanto comporterebbe una sovrastima dello smorzamento a livelli deformativi crescenti.

Il secondo sistema valuta l'andamento delle oscillazioni alla testa del campione allorquando si interrompe la sollecitazione, in modo tale che non si risenta dei rumori dovuti all'apparecchiatura.

Per la valutazione dello smorzamento  $D_0$  la prova di taglio torsionale ciclico è sicuramente più affidabile della prova di colonna risonante, perché viene eseguita una valutazione diretta tra tensioni-deformazioni ed anche perché le frequenze adoperate in questa prova sono più simili a quelle dei terremoti. Nel taglio torsionale ciclico, ogni step è caratterizzato da un determinato numero di cicli di carico-scarico, così, ad ogni ciclo si attribuisce un valore medio di fattore di smorzamento che, a mano a mano che cresce la deformazione, subisce un decadimento all'interno del medesimo step. Per la determinazione di  $D$  si considererà il valor medio del fattore di smorzamento dei diversi step.

Si è effettuato, quindi, un primo confronto tra i valori di smorzamento a piccole deformazioni valutati con la prova di taglio torsionale ciclico e con la prova di colonna risonante, utilizzando il metodo delle oscillazioni libere, considerando tutti i campioni di cui si avevano a disposizione entrambe le prove. Questi risultano essere 30 e i valori sono rappresentati in FIGURA 4.6.

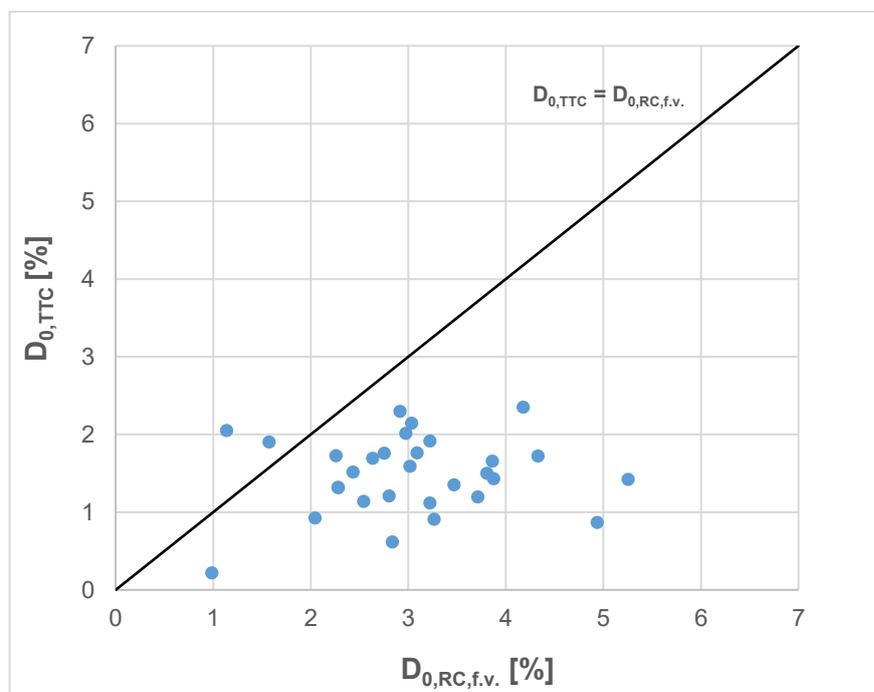


FIGURA 4.6: CONFRONTO TRA  $D_0$  VALUTATO CON IL METODO DELLE OSCILLAZIONI LIBERE E QUELLO VALUTATO CON IL TAGLIO TORSIONALE CICLICO

Non avendo tenuto in conto dei livelli deformativi associati ai diversi valori di damping, questo primo confronto non ha una forte valenza scientifica, ma, almeno, permette di constatare, qualitativamente, come lo smorzamento valutato con la prova di colonna risonante sia più elevato di quello determinato con il taglio torsionale ciclico. Per avere piena validità si dovrebbero confrontare i valori di smorzamento di quelle prove che presentano livelli deformativi che differiscano al massimo dello 0,0001%. Non avendo a disposizione molte prove conformi a quanto detto, si è cercato di rendere la stima più robusta andando a considerare solo quelle prove in cui i livelli deformativi associati ai valori di  $D_0$  ricadessero all'interno della soglia di linearità. Questo ha restituito 13 valori di smorzamento (vedi FIGURA 4.7). L'esiguo numero di valori non permette di ricavare una distribuzione che presenti un trend affidabile (Coppetta I., 2019).

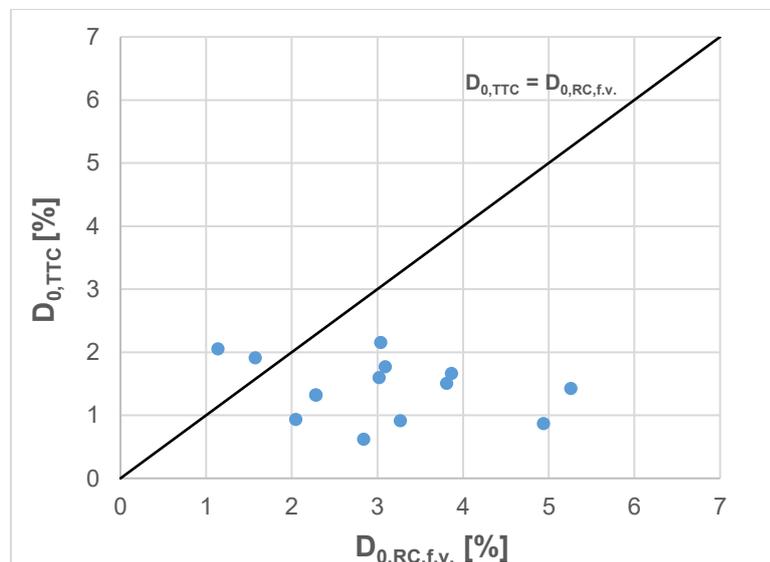


FIGURA 4.7: CONFRONTO DI  $D_0$  DELLA COLONNA RISONANTE (FREE VIBRATIONS) E DEL TAGLIO TORSIONALE PER I CAMPIONI IL CUI LIVELLO DEFORMATIVO ASSOCIATO SIA INFERIORE ALLA SOGLIA DI LINEARITÀ

È stato, allora, considerato il damping valutato con il metodo “half-power bandwidth”, questo ha permesso di avere a disposizione 55 campioni e, quindi, di avere un confronto più robusto (vedi FIGURA 4.8).

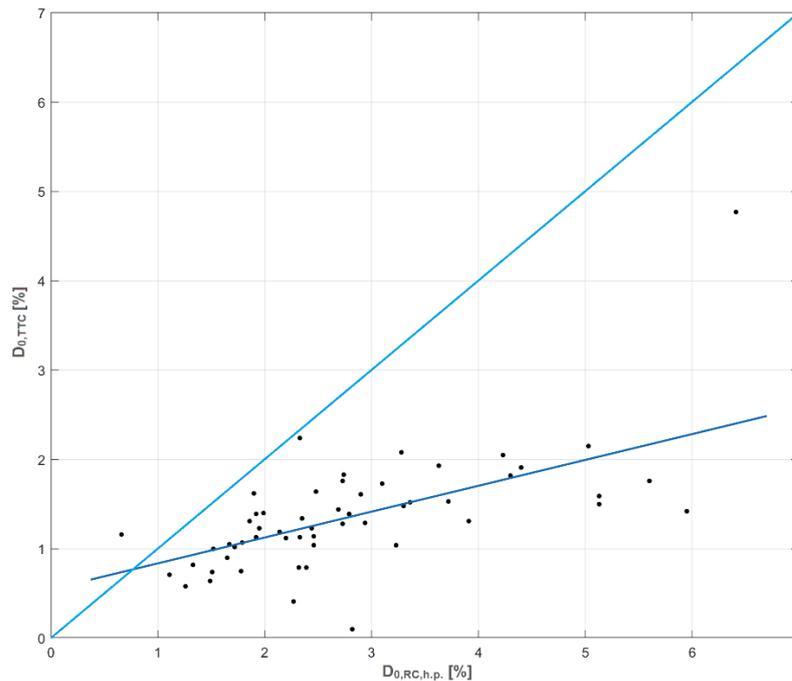


FIGURA 4.8: CONFRONTO TRA I VALORI DI SMORZAMENTO DERIVANTI DALLE PROVE DI TAGLIO TORSIONALE CICLICO E COLONNA RISONANTE, CON IL METODO "HALF-POWER BANDWIDTH", LE CUI DEFORMAZIONI RISULTANO MINORI DELLE RISPETTIVE SOGLIE DI LINEARITÀ

Su questi dati è stata effettuata un'interpolazione lineare con Matlab, tramite il Curve Fitting, che ha portato ad una retta di equazione:

$$D_{0,TTC} = 0.2895 \cdot D_{0,RC,h.p.} + 0.5472 \quad (12)$$

Da cui si evince come la colonna risonante, almeno secondo il "metodo half-power bandwidth", fornisca dei valori del fattore di smorzamento a piccole deformazioni maggiori di quelli che si ottengono dal taglio torsionale ciclico.

A queste valutazioni è seguita un'analisi sui valori dello smorzamento a piccole deformazioni, delle prove di colonna risonante eseguite dal Laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino, su come, nel corso degli anni, si siano ottenuti valori di damping sempre più elevati con il metodo "half-power bandwidth". L'analisi è stata effettuata tenendo conto dei valori dello smorzamento a piccole deformazioni, ottenuti con il metodo del fattore di amplificazione, rapportati ai valori di smorzamento calcolati con la relazione di Darendeli (2001), andando a considerare dei parametri settati per il territorio italiano riportati in TABELLA 4.1 (Ciancimino et al., 2019)

TABELLA 4.1: PARAMETRI DI DARENDELI TARATI PER IL TERRITORIO ITALIANO

$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$	$\phi_4$
1,2808	0,0361	-0,2740	0,1340

Da cui, tramite la relazione seguente, è stato calcolato il fattore di smorzamento:

$$D_{\text{cal}} = (\varphi_1 + \varphi_2 \cdot \text{PI}) \cdot \sigma'_m{}^{\varphi_3} \cdot [1 + \varphi_4 \cdot \ln(f)] \quad (13)$$

Rispetto alla relazione di Darendeli (2001), si è trascurata l'influenza del grado di sovraconsolidazione e del numero di cicli. I parametri che entrano in gioco nella determinazione del fattore di smorzamento sono: l'indice di plasticità (PI), la tensione di consolidazione ( $\sigma'_m$ ) e la frequenza di risonanza (f) (Ciancimino et al., 2019).

Per ogni prova di cui si aveva a disposizione il valore di smorzamento si è effettuato il calcolo del fattore di smorzamento tramite la relazione (13) e si è effettuato il rapporto tra le due quantità, che è stato poi inserito in un grafico in funzione dell'anno in cui è stata eseguita la prova (vedi FIGURA 4.9)

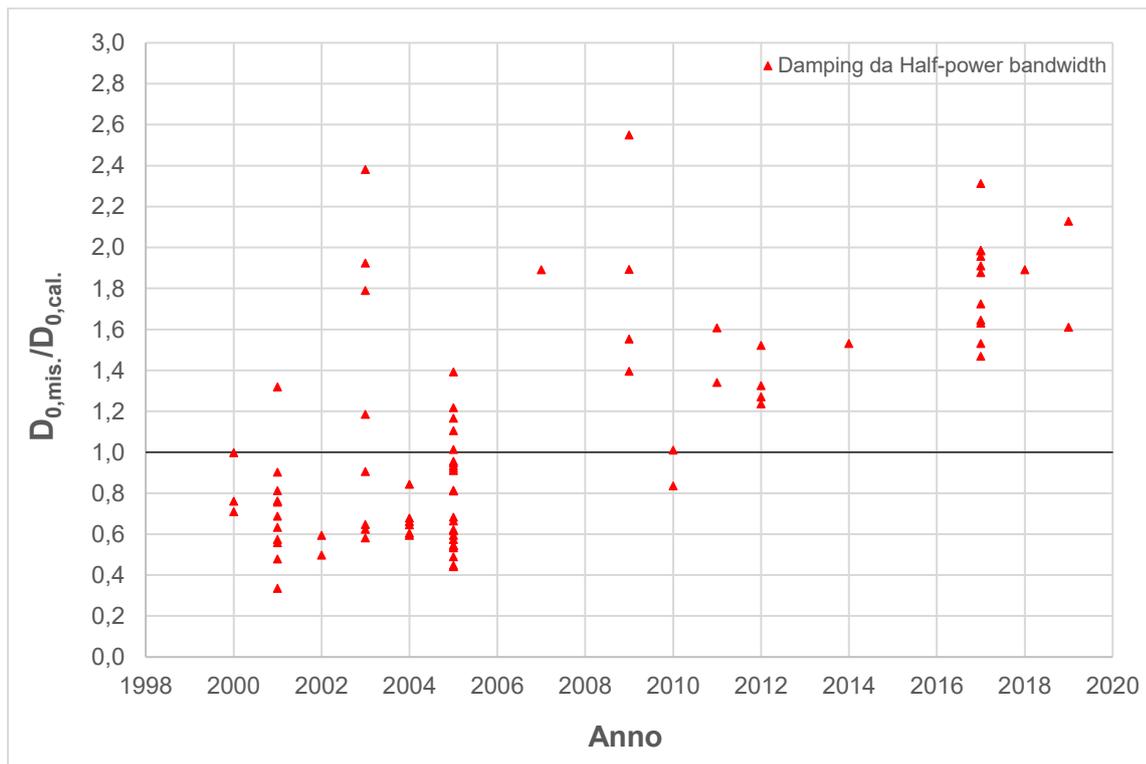


FIGURA 4.9: VALUTAZIONE DEL RAPPORTO TRA SMORZAMENTO MISURATO E SMORZAMENTO CALCOLATO A PICCOLE DEFORMAZIONI IN FUNZIONE DEGLI ANNI

La figura mostra come dal 2006 in poi i valori del damping misurato presentano una netta differenza con i valori calcolati. La nascita delle correnti parassite, cioè delle correnti che si instaurano per via della variazione del campo magnetico che attraversa il materiale e che generano a loro volta un campo magnetico in direzione opposta a

quello applicato per sollecitare il campione, va a modificare le frequenze di risonanza portando alla sovrastima del damping (si veda ad esempio, Kim (1991); d'Onofrio et al. (1999); Cascante et al. (2003); Wang et al. (2003)). Questo, insieme alle modifiche dei componenti elettronici, col trascorrere degli anni, porta ad avere una forte sovrastima dello smorzamento valutato con il metodo half-power bandwidth.

In ultimo, si è analizzato il comportamento del damping a piccole deformazioni quando si considerano tutti i cicli della sollecitazione e quando, invece, si considerano solo 10 cicli a risonanza. Si è proceduto alla rielaborazione delle prove di cui si avevano a disposizione i raw data tramite lo script Matlab (vedi Appendice 2) in cui si è andato a modificare il file di elaborazione alla voce del numero di transient-cycles andando a selezionare 1 (FIGURA 4.10a), per tenere in conto di tutti i cicli, e 11 per considerare solo 10 cicli a risonanza (FIGURA 4.10b). Nella figura vengono riportati due esempi delle prove analizzate, scelti in base all'indice di plasticità (rispettivamente minimo e massimo). In FIGURA 4.11 vengono riportate le rispettive curve di amplificazione. Tale confronto è stato effettuato al fine di valutare l'influenza dei primi cicli di carico, nei quali generalmente non è ancora stata raggiunta la condizione di risonanza, sui risultati della prova.

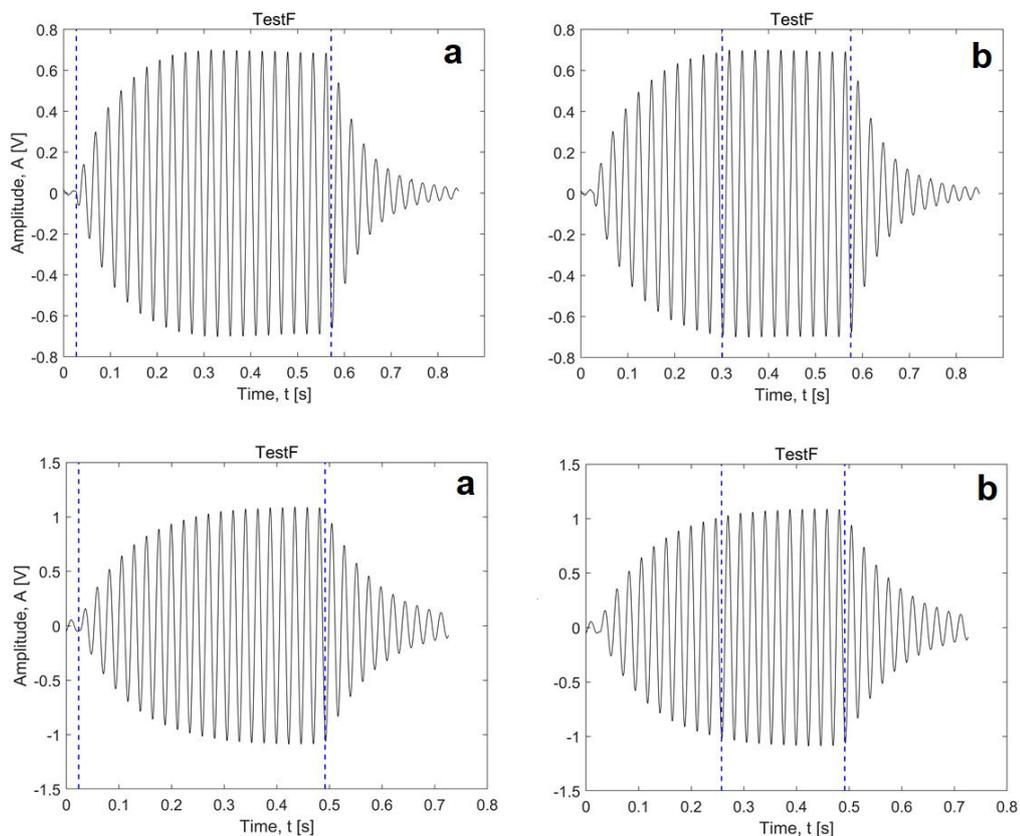


FIGURA 4.10: SITUAZIONE IN CUI VENGONO TENUTI IN CONTO TUTTI I CICLI (A), CONDIZIONE IN CUI VENGONO CONSIDERATI SOLTANTO 10 CICLI (B) (IN ALTO IL CAMPIONE CON PI MINIMO E IN BASSO IL CAMPIONE CON PI MASSIMO)

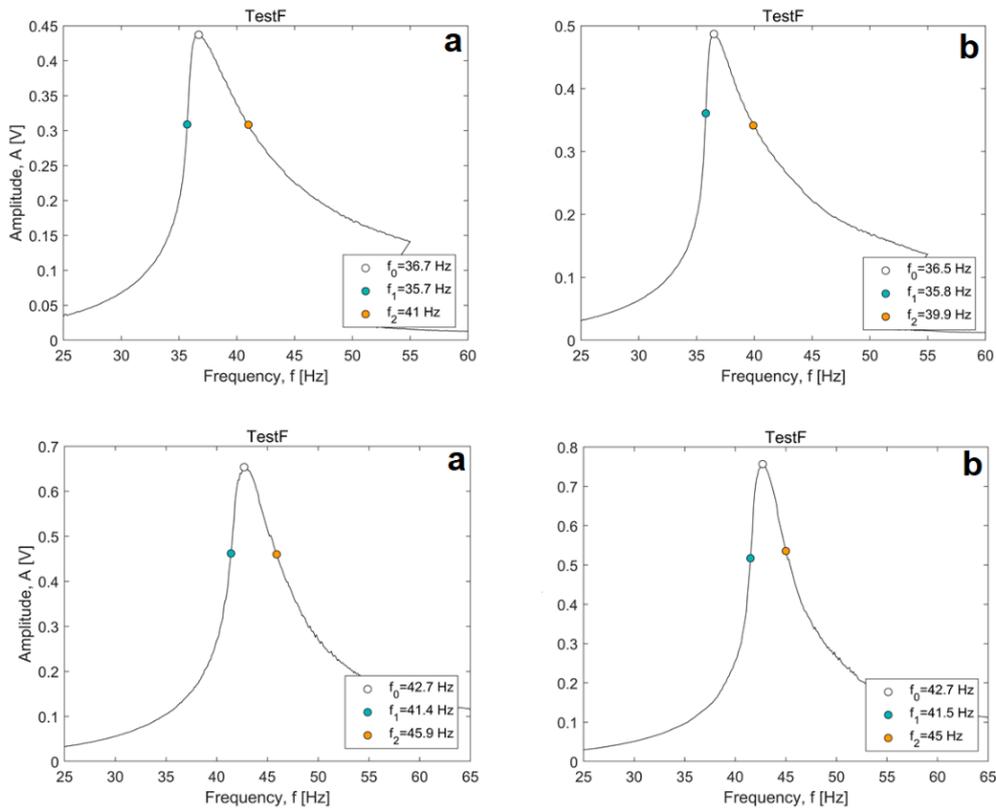


FIGURA 4.11: CURVE DI AMPLIFICAZIONE DEI DUE CAMPIONI A SECONDA DEI CICLI CONSIDERATI

Le curve di amplificazione ottenute considerando 10 cicli mostrano valori maggiori di amplificazione e tendono a presentare una campana leggermente più schiacciata. Si è effettuato un confronto tra i risultati ottenuti nelle due diverse configurazioni in modo da analizzare il comportamento delle grandezze dinamiche del terreno.

Un primo confronto è stato fatto sul modulo di rigidezza a taglio (vedi FIGURA 4.12 e FIGURA 4.13). I valori ottenuti nelle due configurazioni non differiscono di molto (<0,5-1 MPa), ma i risultati della configurazione con 10 cicli tendono a spostarsi a deformazioni maggiori. Questo era prevedibile in quanto, come mostrato dalla FIGURA 4.11, le curve ottenute in questa configurazione presentano delle ampiezze maggiori che sono strettamente correlate con i valori di deformazione.

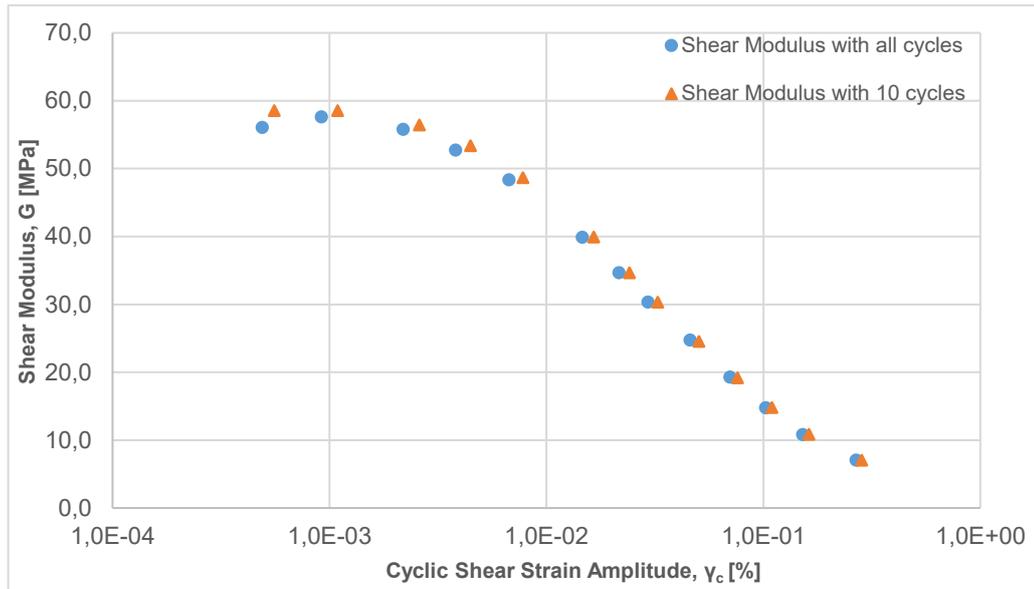


FIGURA 4.12: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DELLE DUE CONFIGURAZIONI PER IL CAMPIONE CON PI=8.79% (MINIMO)

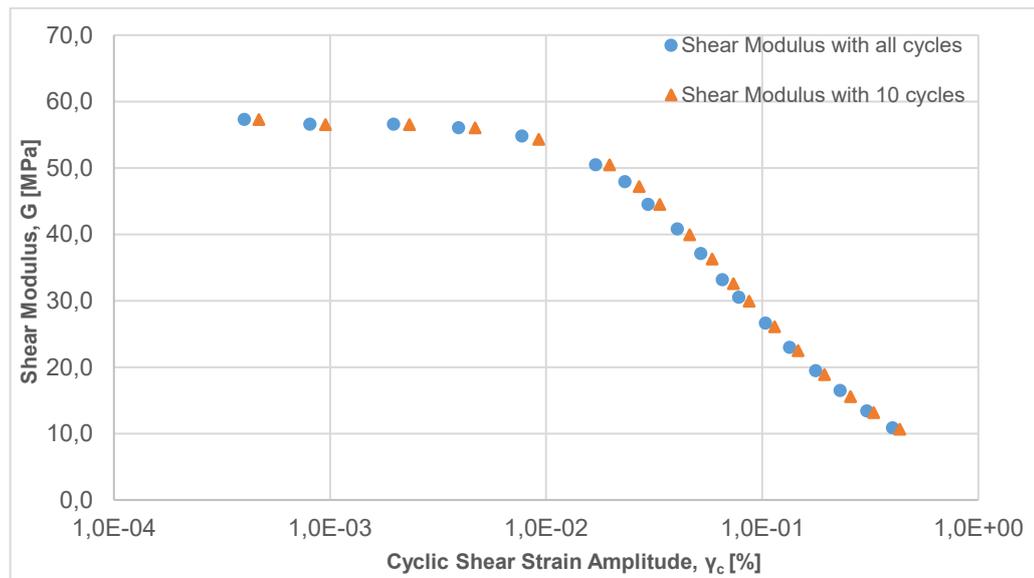


FIGURA 4.13: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DELLE DUE CONFIGURAZIONI PER IL CAMPIONE CON PI=36.6% (MASSIMO)

Successivamente si è analizzato il fattore di smorzamento, mettendo a confronto le due configurazioni (vedi FIGURA 4.14 e FIGURA 4.15).

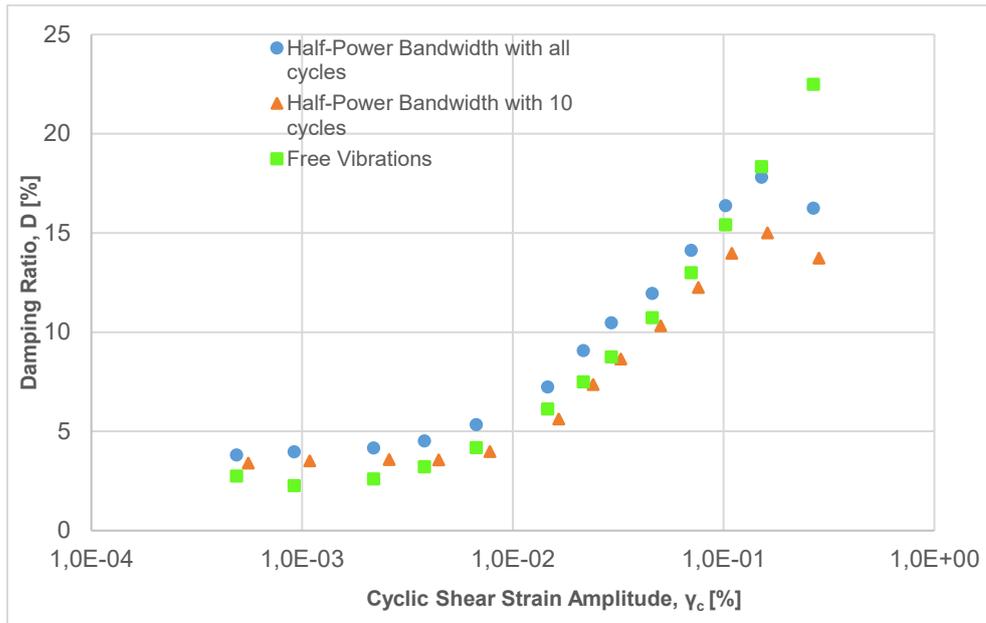


FIGURA 4.14: CONFRONTO TRA I VALORI DEL DAMPING DELLE DUE CONFIGURAZIONI PER IL CAMPIONE CON PI=8.79%

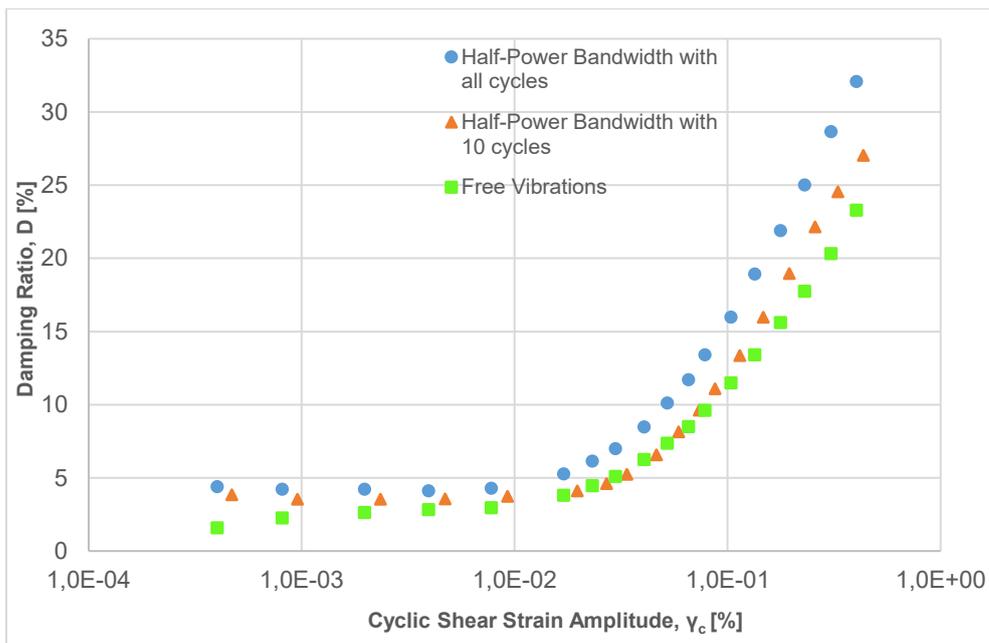


FIGURA 4.15: CONFRONTO TRA I VALORI DEL DAMPING DELLE DUE CONFIGURAZIONI PER IL CAMPIONE CON PI=36.6%

L'andamento delle curve mostra come il valore dello smorzamento, ottenuto con il metodo half-power bandwidth e valutato considerando solo 10 cicli, tenda a presentare valori sensibilmente inferiori rispetto a quello ricavato considerando tutti i cicli, e, inoltre, i valori che si ottengono non si discostano molto da quelli calcolati con il metodo delle oscillazioni libere. Questo è visibile soprattutto in FIGURA 4.16, dove sono state inserite tutte le prove che è stato possibile rielaborare. In figura è riportata la differenza

tra lo smorzamento a piccole deformazioni ottenuto con il fattore di amplificazione e quello ottenuto con le oscillazioni libere, per le due diverse configurazioni, in funzione del livello deformativo.

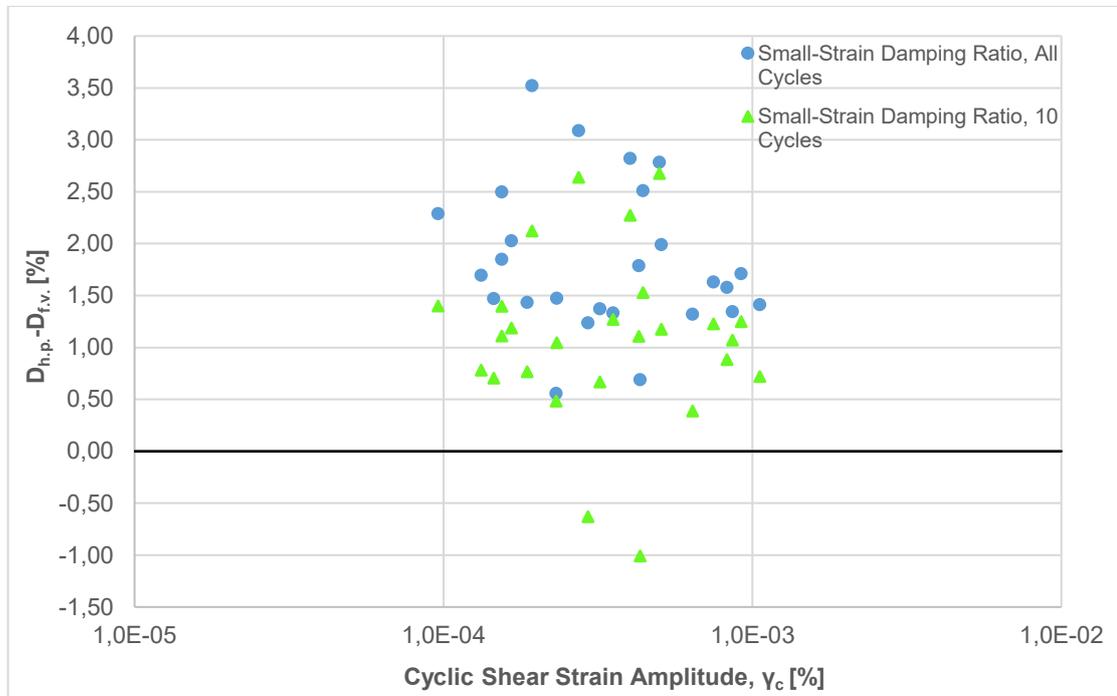


FIGURA 4.16: DIFFERENZA TRA I VALORI DI  $D_0$ , DI TUTTE LE PROVE RIELABORATE, VALUTATI CON IL METODO HALF-POWER BANDWIDTH E CON LE OSCILLAZIONI LIBERE PER LE DUE DIVERSE CONFIGURAZIONI

Risulta chiaramente visibile come l'aver considerato solamente 10 cicli a risonanza porti ad avere dei valori del fattore di smorzamento più simili a quelli che si ottengono con le oscillazioni libere.

#### 4.2 Analisi delle soglie di deformazione ciclica

In questo paragrafo vengono analizzate le soglie di deformazione ciclica dei terreni presenti nel database. In particolare, si definisce soglia lineare la deformazione in cui avviene il passaggio da comportamento lineare a non lineare e soglia volumetrica il punto di passaggio tra la deformazione non lineare, dove ancora non si ha un forte accumulo di deformazione plastica, e la zona a deformazioni plastiche importanti.

Secondo quanto riportato da Vucetic in "Cyclic threshold shear strains in soils" (1994), è possibile determinare i valori di deformazione a taglio corrispondenti alle due soglie sulla base del rapporto adimensionale del modulo di rigidità a taglio  $G/G_0$  ( $G_0$

corrisponde al massimo dei valori che si ricavano dalle prove di laboratorio). Precisamente, la soglia lineare corrisponde a quella deformazione che si ha quando il rapporto adimensionale del modulo risulta  $\frac{G}{G_0} = 0.99$ , mentre la soglia volumetrica si ha in corrispondenza del rapporto  $\frac{G}{G_0} = 0.65$ , che corrisponde ad un decadimento di  $G$  del 35%, indipendentemente dalla tipologia del terreno.

Dallo studio di Vucetic (1994) si constata come entrambe le soglie presentino un andamento crescente all'aumentare dell'indice di plasticità e come questi siano tra loro paralleli e distanziati all'incirca di 1.5 cicli in scala logaritmica (FIGURA 4.17)

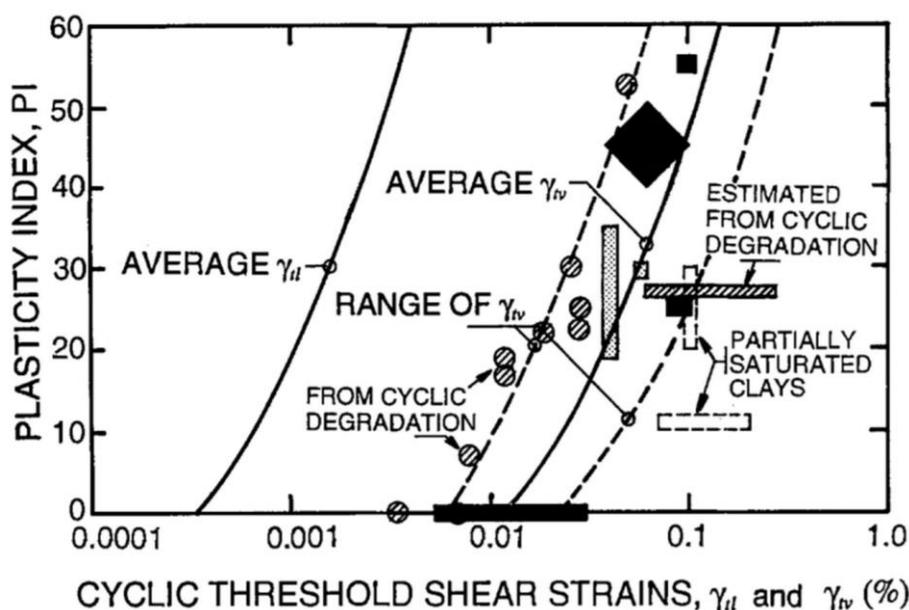


FIGURA 4.17: EFFETTO DELL'INDICE DI PLASTICITÀ SULLA SOGLIA LINEARE E SULLA SOGLIA VOLUMETRICA (DA VUCETIC, 1994, SIMBOLOGIA IN APPENDICE 4)

L'indice di plasticità consente di descrivere qualitativamente il tipo di argilla, infatti, i terreni che hanno un PI basso tendono a comportarsi come le sabbie ( $PI=0$ ), mostrando un comportamento poco deformabile e fortemente non lineare, ciò comporta che le soglie, lineare e volumetrica, abbiano dei valori alquanto contenuti. Al contrario, i terreni che presentano un valore di indice di plasticità elevato hanno bisogno di sviluppare deformazioni più elevate prima di passare da un comportamento pseudo-lineare a uno non lineare. Per questo, il decadimento del modulo di taglio e la nascita delle sovrappressioni interstiziali (in terreni saturi), in terreni con elevata plasticità iniziano a verificarsi dopo rispetto a quanto avviene per quelli con bassa plasticità. In definitiva, si assisterà a un decadimento del modulo più repentino nei terreni a bassa plasticità piuttosto che in quelli ad alta plasticità, a parità di livello deformativo (FIGURA 4.18, Darendeli, 2001).

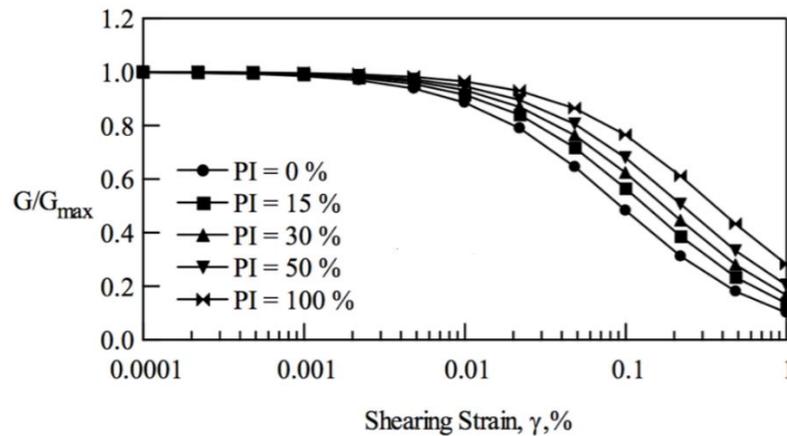


FIGURA 4.18: ANDAMENTI DEL VALORE ADIMENSIONALE  $G/G_0$  AL VARIARE DELL'INDICE DI PLASTICITÀ (DA DARENDELI, 2001)

Seguendo lo stesso criterio adoperato da Vucetic, si è determinata la soglia lineare e la soglia volumetrica dei campioni inseriti all'interno del database relativo ai terreni con alto contenuto di fine. Per determinare i valori delle deformazioni corrispondenti a  $G/G_0=0.99$  e  $G/G_0=0.65$  (rispettivamente  $\gamma_l$  e  $\gamma_v$ ) si è effettuata un'interpolazione delle curve risultanti dalla colonna risonante o dal taglio semplice ciclico con doppio provino, in assenza della prima. I valori così ottenuti sono stati diagrammati insieme alle curve ricavate da Vucetic e Dobry (1991) in modo da poter effettuare un confronto visivo dei valori (vedi FIGURA 4.19).

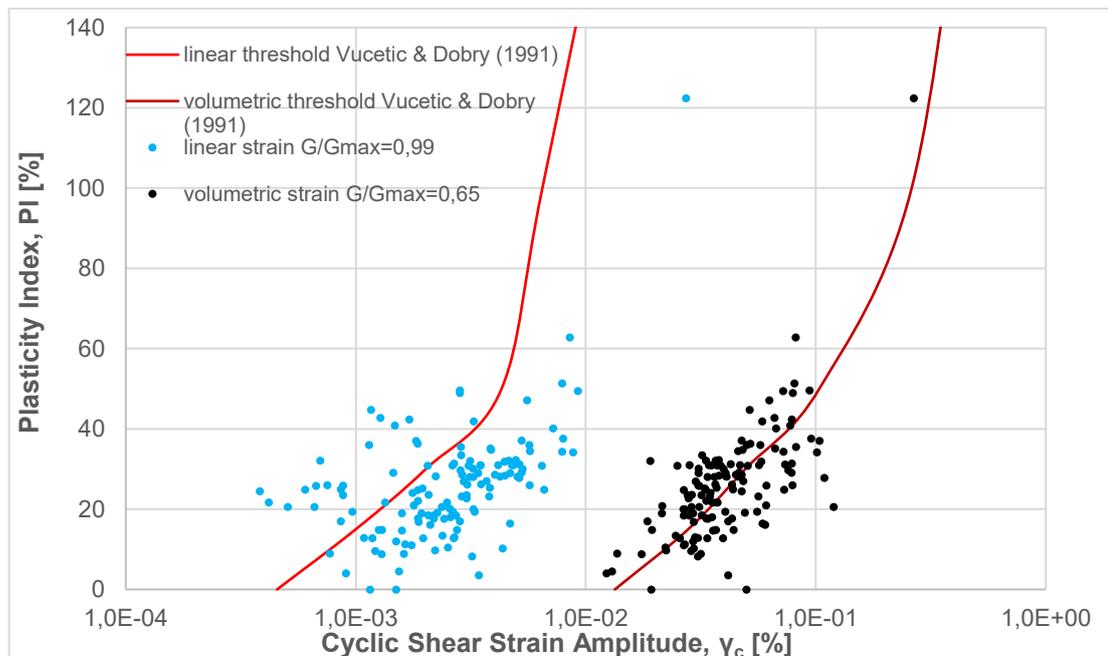


FIGURA 4.19: CONFRONTO TRA I VALORI DELLE SOGLIE DEFORMATIVE DEI CAMPIONI INSERITI DENTRO IL DATABASE E LE CURVE DEL LAVORO DI VUCETIC E DOBRY (1991)

Le soglie volumetriche dei campioni tendono a seguire, non discostandosi molto, l'andamento della curva di Vucetic e Dobry (1991), al contrario, le soglie lineari evidenziano una gran dispersione, mostrando tendenzialmente una sovrastima, anche se comunque la maggior parte è fedele all'andamento generale, in quanto aumentano all'aumentare dell'indice di plasticità.

Sono state confrontate le curve di decadimento dei diversi campioni con le curve di Vucetic e Dobry (1991) in modo da evidenziare quanto detto sopra. I campioni sono stati suddivisi in base a tre diversi range dell'indice di plasticità, che ricoprono circa il 95% dei campioni inseriti (vedi FIGURA 3.5), e la loro rappresentazione è riportata nelle figure seguenti.

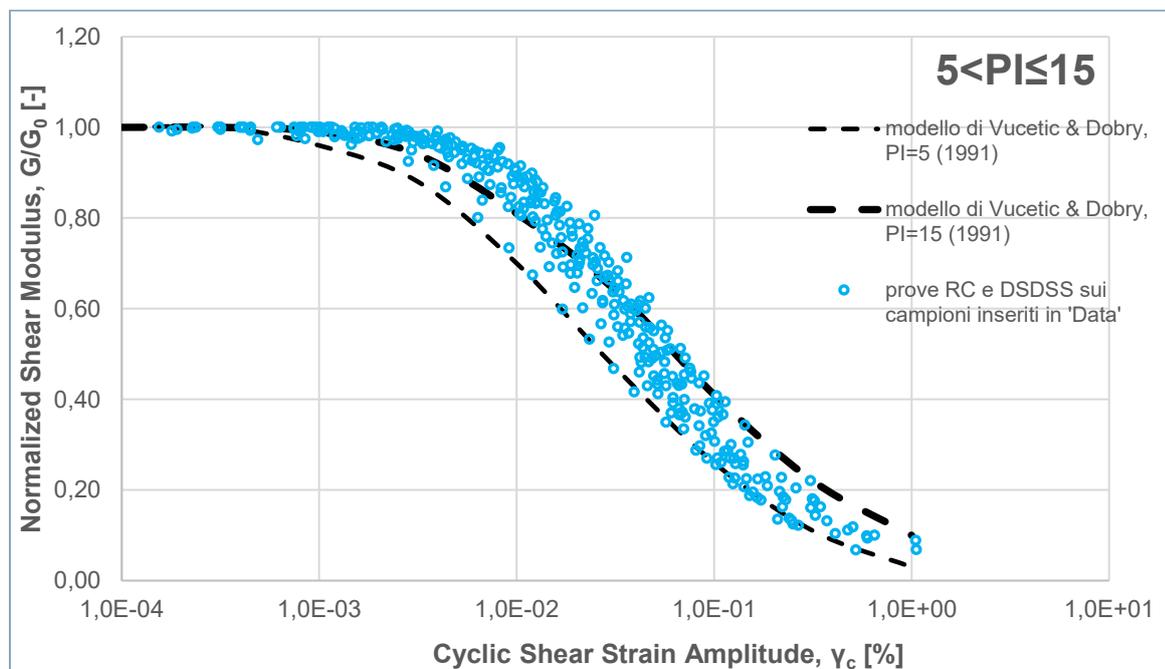


FIGURA 4.20: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DEI CAMPIONI INSERITI NEL DATABASE E LE CURVE DI VUCETIC E DOBRY (1991), CON PLASTICITÀ INTERNA AL RANGE  $5 < PI \leq 15$

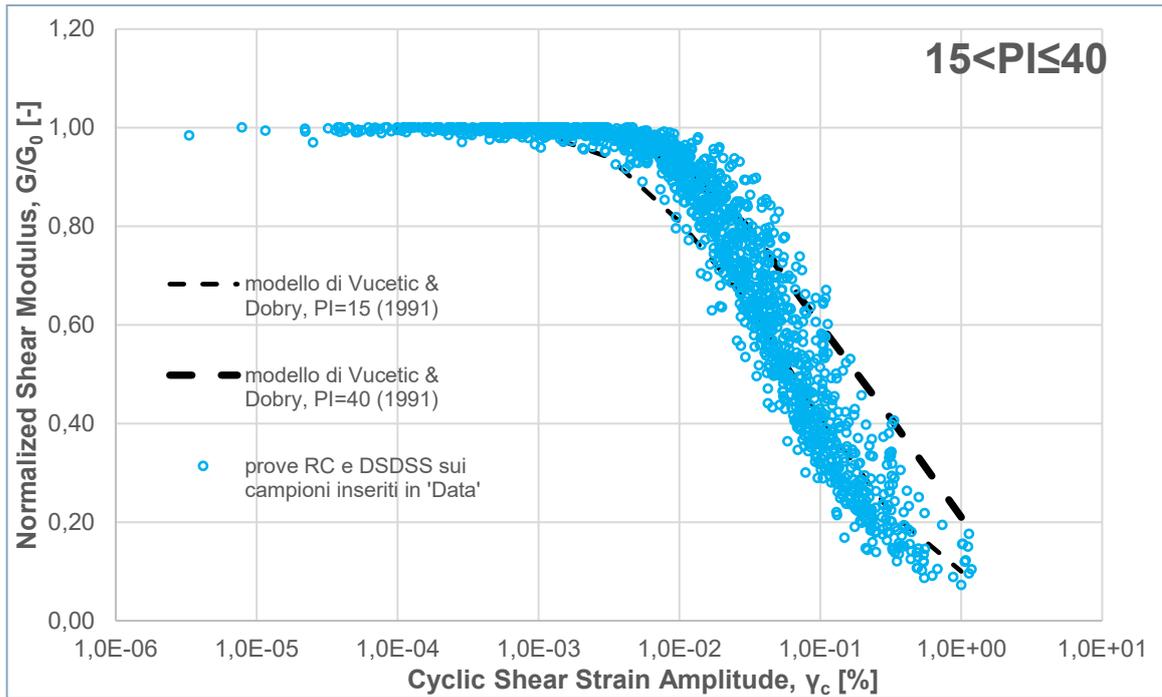


FIGURA 4.21: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DEI CAMPIONI INSERITI NEL DATABASE E LE CURVE DI VUCETIC E DOBRY (1991), CON PLASTICITÀ INTERNA AL RANGE  $15 < PI \leq 40$

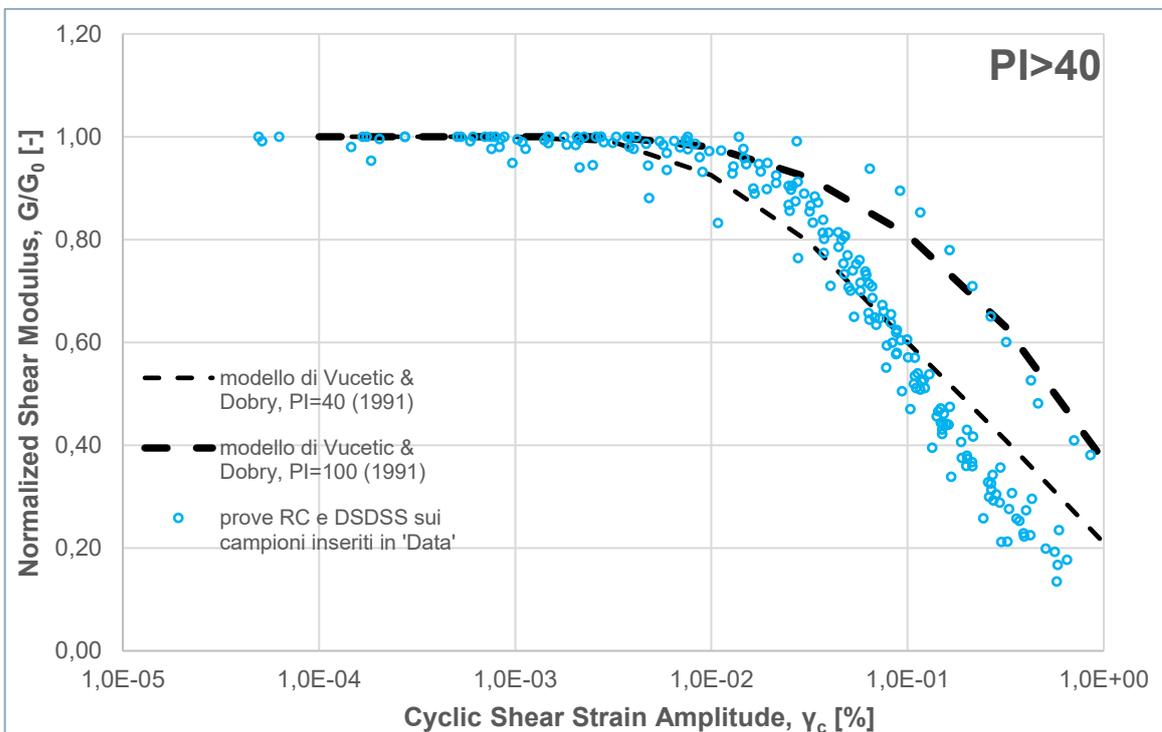


FIGURA 4.22: CONFRONTO TRA LE CURVE DI DECADIMENTO DEI CAMPIONI INSERITI NEL DATABASE E LE CURVE DI VUCETIC E DOBRY (1991), CON PLASTICITÀ  $PI > 40$

La soglia volumetrica, per come è stata definita nel paragrafo 1.1, è stata valutata anche considerando l'insorgere delle sovrappressioni interstiziali. Sebbene in un'argilla le pressioni interstiziali possono assumere valori sia negativi che positivi in base al valore dell'OCR, è possibile ritenere che la soglia volumetrica sia unica indipendentemente dal grado di sovraconsolidazione (Vucetic M., 1994).

Si definisce un criterio differente per la determinazione della soglia volumetrica in base al quale  $\gamma_v$  corrisponde a quella deformazione tale per cui il valore  $\frac{\Delta u}{\sigma'_m}$  sia pari a 0.01, 0.005, 0.02 e 0.03. Interpolando i valori di  $\frac{\Delta u}{\sigma'_m}$  si determina la deformazione in corrispondenza dei valori precedentemente riportati.

Sono stati considerati tutti quei campioni all'interno del database di cui erano state misurate le sovrappressioni, e, inoltre, poiché lo strumento di misura delle sovrappressioni ha una sensibilità di 1 kPa, sono stati presi solamente quelle prove condotte a una tensione di confinamento di 200 kPa. Confrontando questi valori delle soglie volumetriche con quelli ottenuti applicando il criterio di Vucetic (1994), si nota come i due metodi non si discostino molto tra loro nella determinazione dei valori di soglia volumetrica (FIGURA 4.23) (Coppetta I., 2019).

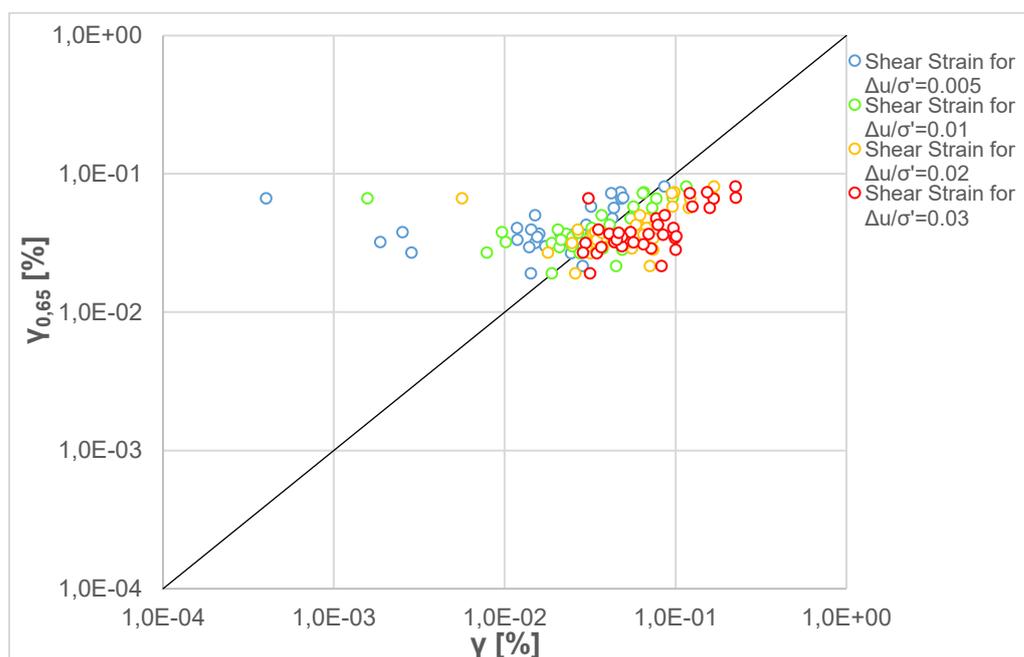


FIGURA 4.23: CONFRONTO TRA LE SOGLIE VOLUMETRICHE VALUTATE SECONDO DIVERSI CRITERI, CON IN ASCISSA LE SOGLIE RICAVATE CONSIDERANDO LA NASCITA DELLE SOVRAPPRESSIONI INTERSTIZIALI E IN ORDINATE LE SOGLIE RICAVATE APPLICANDO IL CRITERIO DI VUCETIC (1994)

Per i diversi valori del rapporto  $\frac{\Delta u}{\sigma'_m}$ , per cui è stata determinata la soglia volumetrica, si è valutato, per ciascun campione, lo scarto rispetto a quella ricavata considerando

la curva di decadimento del modulo, in modo da tener conto quel rapporto che meno si discosta dal criterio di Vucetic (Coppetta I., 2019). I risultati sono riassunti nella TABELLA 4.2:

TABELLA 4.2: SCARTI TRA LE SOGLIE VOLUMETRICHE VALUTATE COL CRITERIO DI VUCETIC E QUELLE RICAVATE CONSIDERANDO DIVERSE PERCENTUALI DEL RAPPORTO TRA SOVRAPPRESSIONI E TENSIONE DI CONFINAMENTO

Sigla prova	PI [%]	$\Delta\gamma_{\Delta u/\sigma'=0,005}$ [%]	$\Delta\gamma_{\Delta u/\sigma'=0,01}$ [%]	$\Delta\gamma_{\Delta u/\sigma'=0,02}$ [%]	$\Delta\gamma_{\Delta u/\sigma'=0,03}$ [%]
003_MCS_02	42,73	1,80E-02	-1,10E-02	-5,56E-02	-1,01E-01
004_MCS_03	30,97	1,31E-02	-1,62E-02	-6,28E-02	-1,02E-01
008_LA_03	14,87	2,08E-02	1,38E-02	3,92E-03	-4,17E-03
009_BR_01	8,87	1,66E-02	1,27E-02	6,81E-03	1,87E-03
010_BR_02	19,26	3,63E-03	-8,65E-03	-2,67E-02	-4,33E-02
011_BR_03	31,86	2,60E-02	1,21E-03	-3,80E-02	-6,74E-02
013_MD_03	51,38	-5,26E-03	-3,49E-02	-8,73E-02	-1,44E-01
014_MD_04	20,80	-7,05E-03	-2,33E-02	-4,94E-02	-6,12E-02
015_MD_06	24,47	5,12E-03	-7,00E-03	-2,00E-02	-2,97E-02
016_PP_CT	31,14	2,59E-02	8,37E-03	-2,48E-02	-7,93E-02
017_HA	40,13	1,77E-02	-2,91E-02	-9,96E-02	-1,58E-01
019_SG_02	28,98	2,87E-02	8,24E-03	-2,73E-02	-5,68E-02
025_SA_02	32,06	4,86E-03	2,09E-04	-6,79E-03	-1,25E-02
026_SA_03	33,49	3,02E-02	2,19E-02	-5,96E-04	-1,19E-02
031_RM_02	34,36	3,03E-02	8,04E-03	-2,25E-02	-4,87E-02
035_KR_02	32,07	1,11E-02	6,50E-04	-1,61E-02	-3,29E-02
037_KR_04	28,03	4,22E-03	-8,84E-03	-2,88E-02	-4,84E-02
041_KR_08	31,26	1,26E-02	1,61E-03	-1,61E-02	-3,63E-02
042_KR_09	28,34	3,54E-02	2,83E-02	3,99E-03	-1,68E-02
044_KR_11	29,01	5,92E-03	-3,77E-03	-1,96E-02	-3,39E-02
046_KR_13	31,02	-7,72E-03	-1,86E-02	-3,99E-02	-6,53E-02
052_KR_19	31,03	-7,57E-03	-2,06E-02	-4,58E-02	-7,20E-02
054_GI_03	26,94	1,27E-02	5,06E-03	-7,32E-03	-1,87E-02
060_106_MOD	12,76	2,52E-02	1,90E-02	1,27E-02	4,15E-03
062_108_MOD	35,10	6,61E-02	6,49E-02	6,08E-02	3,55E-02
074_155_MSC	36,00	3,50E-02	1,31E-02	-1,19E-02	-3,65E-02
075_156_MSC	18,40	2,22E-03	-8,77E-04	-5,06E-03	-7,93E-03
076_157_MSC	24,10	1,93E-02	9,93E-03	-3,48E-03	-1,36E-02
077_158_MSC	16,80	1,56E-02	8,56E-03	-6,71E-04	-7,30E-03
078_159_MSC	22,10	2,15E-02	1,19E-02	-1,20E-03	-1,20E-02
079_160_MSC	21,70	1,63E-02	1,04E-02	2,90E-04	-9,23E-03
080_161_MSC	23,51	1,06E-02	2,02E-03	-1,21E-02	-2,49E-02
095_MSC	11,24	2,41E-02	1,91E-02	9,04E-03	-1,82E-03
101_MSC	18,00	1,07E-02	3,35E-03	-1,07E-02	-6,57E-02
<b>SOMMA SCARTI</b>		<b>0,541842</b>	<b>0,089446</b>	<b>-0,642677</b>	<b>-1,380599</b>

Dalla sommatoria degli scarti si trova che il rapporto tra la sovrappressione interstiziale e la tensione di confinamento che meglio segue i valori della soglia valutati con il criterio di Vucetic è quello del 1%. Nella FIGURA 4.24 vengono messi a confronto i valori della soglia volumetrica calcolati con i due diversi criteri, insieme alla curva di Vucetic e Dobry (1991).

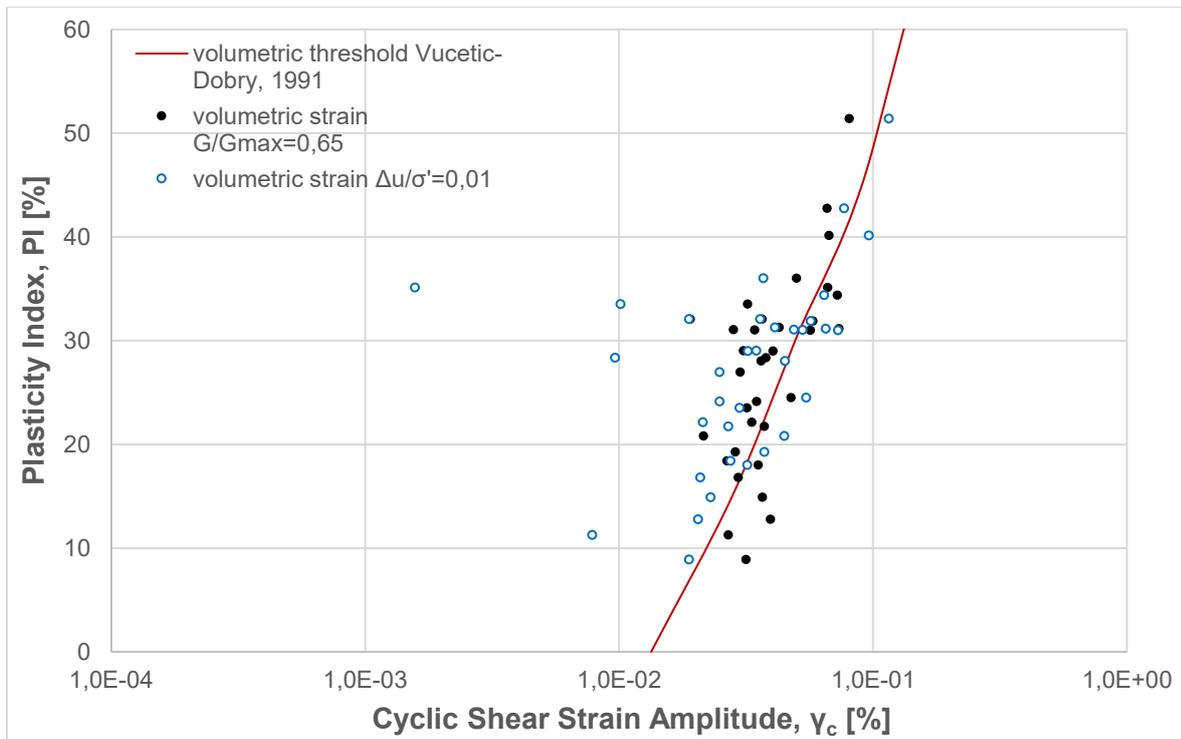


FIGURA 4.24: DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI SOGLIA VOLUMETRICA PER DUE DIVERSI CRITERI E CONFRONTO CON LA CURVA DI VUCETIC E DOBRY (1991)

Ad esclusione di pochi valori, che sottostimano sensibilmente la soglia volumetrica, i valori della soglia calcolati tenendo conto dell'insorgere delle sovrappressioni neutre non si discostano molto dall'andamento sia delle soglie valutate con la curva di decadimento del modulo che dalla curva delle soglie di Vucetic e Dobry (1991).

### 4.3 Curve di variazione del modulo di rigidezza a taglio e del rapporto di smorzamento

Le curve di decadimento del modulo di taglio e di dissipazione dipendono dalla tipologia di terreno e presentano differenti valori per le soglie.

Per i materiali argillosi, un ruolo importante è assunto dall'indice di plasticità, mentre per i materiali sabbiosi, il ruolo principale è assunto dalla tensione di confinamento. In questo paragrafo saranno analizzati i comportamenti dei terreni a grana fine e dei terreni grossolani inseriti all'interno del database, andando a confrontare i risultati, rispettivamente, con le curve del modello di Darendeli (2001) e con le curve del modello di Menq.

#### 4.3.1 Terreni a grana fine

Le curve empiriche che descrivono l'andamento del modulo di rigidezza a taglio e dello smorzamento al variare della deformazione costituiscono un importante riferimento per il comportamento dei diversi materiali.

In questo ambito, ci si pone l'obiettivo di valutare il grado di approssimazione delle curve di letteratura proposte da Darendeli (2001), in relazione alle curve ricavate dalle prove di laboratorio per i campioni di materiale fine inseriti all'interno del database.

Il modello di Darendeli si basa sul modello iperbolico del terreno descritto da Hardin e Drnevich (1972), ma presenta una miglioria della relazione sforzi-deformazioni che lo rende più adatto per i risultati delle prove sperimentali. Partendo dalla relazione di un modello iperbolico del modulo di rigidezza a taglio normalizzato:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (14)$$

in cui  $\gamma_r$  indica la deformazione a taglio di riferimento, che corrisponde alla deformazione per cui si ha  $\frac{G}{G_{\max}} = 0.5$ , Darendeli introduce un coefficiente di curvatura "a", che permette di modificare la curva di decadimento. La relazione adoperata nella realizzazione del modello di Darendeli (2001) è:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{Y}{Y_r}\right)^a} \quad (15)$$

Per quanto concerne la curva del rapporto di smorzamento, il modello di Darendeli considera l'influenza di due fattori, uno legato alla dissipazione di energia dovuta all'attrito tra le particelle (questo è indipendente dal livello deformativo raggiunto) e l'altro riferito all'intervallo di deformazione coincidente con quello che si ha in presenza di un terremoto, che è decisamente non lineare. Quest'ultimo viene ricavato considerando la curva di decadimento del modulo ed i criteri di Masing. Tali criteri sono validi per un coefficiente di curvatura unitario, quindi, nella loro formulazioni non sono applicabili e, per poterli adoperare, si introducono tre coefficienti correttivi ( $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$ ). Il damping secondo Masing varrà:

$$D_{\text{Masing},a=1} = \frac{100}{\pi} \left[ 4 \frac{Y - Y_r \ln \left( \frac{Y + Y_r}{Y_r} \right)}{\frac{Y_r}{Y - Y_r}} - 2 \right] \quad (16)$$

Introducendo i coefficienti correttivi, si avrà:

$$D_{\text{Masing}} = c_1 D_{\text{Masing},a=1} + c_2 D_{\text{Masing},a=1}^2 + c_3 D_{\text{Masing},a=1}^3 \quad (17)$$

I valori dei tre coefficienti sono calibrati considerando 60 curve dello smorzamento a differenti valori di "a".

Questo modo di valutare lo smorzamento porta ad ottenere dei valori, ad alti livelli deformativi, più elevati rispetto a quelli presenti in altre curve di letteratura. Questo, ovviamente, va a sfavore di sicurezza in quanto uno smorzamento maggiore produce una maggiore deamplificazione del moto sismico. Per far fronte a questa sovrastima Darendeli introduce una funzione correttiva:

$$F = b \left( \frac{G}{G_{\max}} \right)^p \quad (18)$$

In cui introduce un coefficiente di scala ( $b$ ) che esprime il rapporto tra il fattore di smorzamento misurato e lo smorzamento di Masing a medie deformazioni e dipende dal numero di cicli di carico, e un parametro  $p$  fissato a 0.1.

In ultimo, introduce un valore di smorzamento a bassi livelli deformativi,  $D_{min}$ , che produce una traslazione verso l'alto della curva. Questo valore dipende dalla tipologia del terreno (PI, OCR e  $\sigma'_0$ ) e dalla frequenza di carico (frq). Il rapporto di smorzamento, secondo il modello di Darendeli, varrà:

$$D = b \left( \frac{G}{G_{max}} \right)^p D_{Masing} + D_{min} \quad (19)$$

In questo modo, la curva del damping viene definita da 4 parametri: la deformazione di riferimento ( $\gamma_r$ ), il coefficiente di curvatura (a), il coefficiente di scala (b) e lo smorzamento a piccole deformazioni ( $D_{min}$ ).

Nella parametrizzazione del modello, ognuno di questi parametri viene definito tramite dei coefficienti  $\varphi_i$  che Darendeli ha calibrato in funzione delle sperimentazioni effettuate. I parametri saranno ricavati dalle relazioni seguenti:

$$\gamma_r = (\varphi_1 + \varphi_2 \cdot PI \cdot OCR^{\varphi_3}) \cdot \sigma'_0{}^{\varphi_4} \quad (20)$$

$$a = \varphi_5 \quad (21)$$

$$D_{min} = (\varphi_6 + \varphi_7 \cdot PI \cdot OCR^{\varphi_8}) \cdot \sigma'_0{}^{\varphi_9} \cdot [1 + \varphi_{10} \cdot \ln(frq)] \quad (22)$$

$$b = \varphi_{11} + \varphi_{12} \cdot \ln(N) \quad (23)$$

I valori dei parametri di Darendeli sono riportati in TABELLA 4.3 e sono stati usati per questo lavoro (Darendeli, 2001).

TABELLA 4.3: VALORI DEI PARAMETRI DEL MODELLO (DA DARENDELI, 2001)

$\varphi_1$ [-]	0,0352	$\varphi_5$ [-]	0,9190	$\varphi_9$ [-]	-0,2889
$\varphi_2$ [-]	0,0010	$\varphi_6$ [-]	0,8005	$\varphi_{10}$ [-]	0,2919
$\varphi_3$ [-]	0,3246	$\varphi_7$ [-]	0,0129	$\varphi_{11}$ [-]	0,6329
$\varphi_4$ [-]	0,3483	$\varphi_8$ [-]	-0,1069	$\varphi_{12}$ [-]	-0,0057

Affinché sia possibile fare un confronto dei dati del database con il modello di Darendeli, è necessario scegliere dei valori dell'indice di plasticità, del grado di sovraconsolidazione e della tensione di confinamento in sito  $\sigma'_0$  che siano in accordo con quelli delle prove all'interno del database.

Poiché il grado di sovraconsolidazione e la tensione di confinamento in sito non erano noti, per i campioni considerati, si è deciso di ipotizzare che i terreni fossero tutti

normalconsolidati ( $OCR=1$ ) e di adoperare la tensione di confinamento di prova ( $\sigma'_m$ ) al posto di quella in sito.

Il confronto è stato realizzato considerando i tre range dell'indice di plasticità in cui ricadono circa il 95% delle prove presenti nel database. Per ogni intervallo di PI considerato, sono state rappresentate le curve di variazione del modulo e del fattore di smorzamento (FIGURA 4.25÷FIGURA 4.30), differenziandole in base a quali prove di laboratorio fornivano quei risultati.

L'analisi è stata eseguita attribuendo al modello di Darendeli il valore medio dell'indice di plasticità, per i tre diversi intervalli, e una tensione di confinamento media dei campioni che ricadevano nei diversi intervalli. Quindi si avrà:

1.  $5 \leq PI \leq 15$ , adoperando  $\underline{PI}=10\%$  e  $\underline{\sigma}'_m=1.76$  atm;
2.  $15 < PI \leq 40$ , adoperando  $\underline{PI}=27.5\%$  e  $\underline{\sigma}'_m=2.39$  atm;
3.  $PI > 40$ , adoperando  $\underline{PI}=45\%$  e  $\underline{\sigma}'_m=1.53$  atm.

Infine, come frequenza di carico e numero di cicli sono stati utilizzati, rispettivamente, i valori di 1 Hz e 10 (valori generalmente più adoperati).

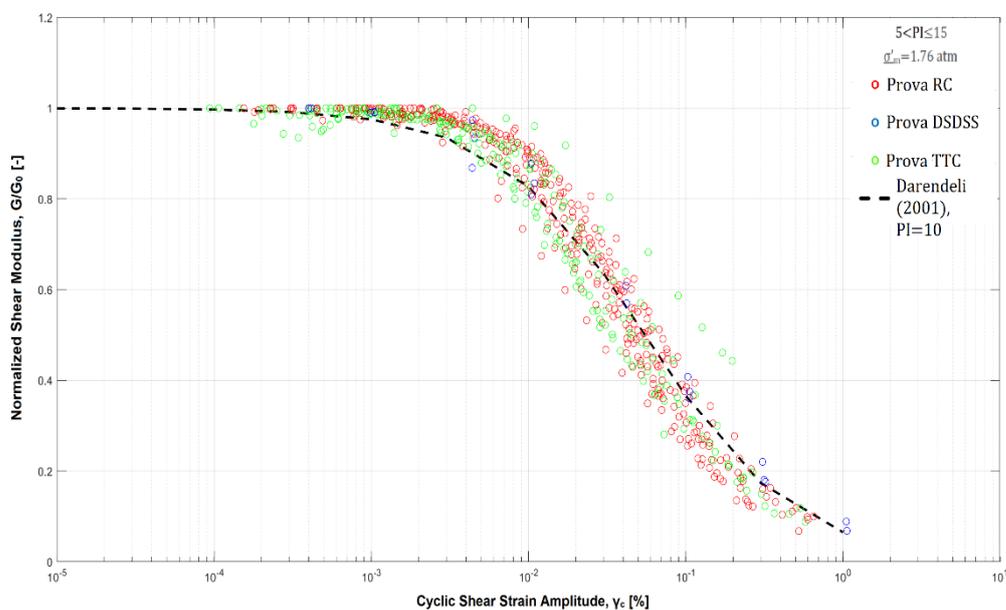


FIGURA 4.25: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=10$ ) CON LE CURVE DI DECADIMENTO DEL MODULO PER I CAMPIONI CON  $PI$  INTERNO AL RANGE  $5 < PI \leq 15$

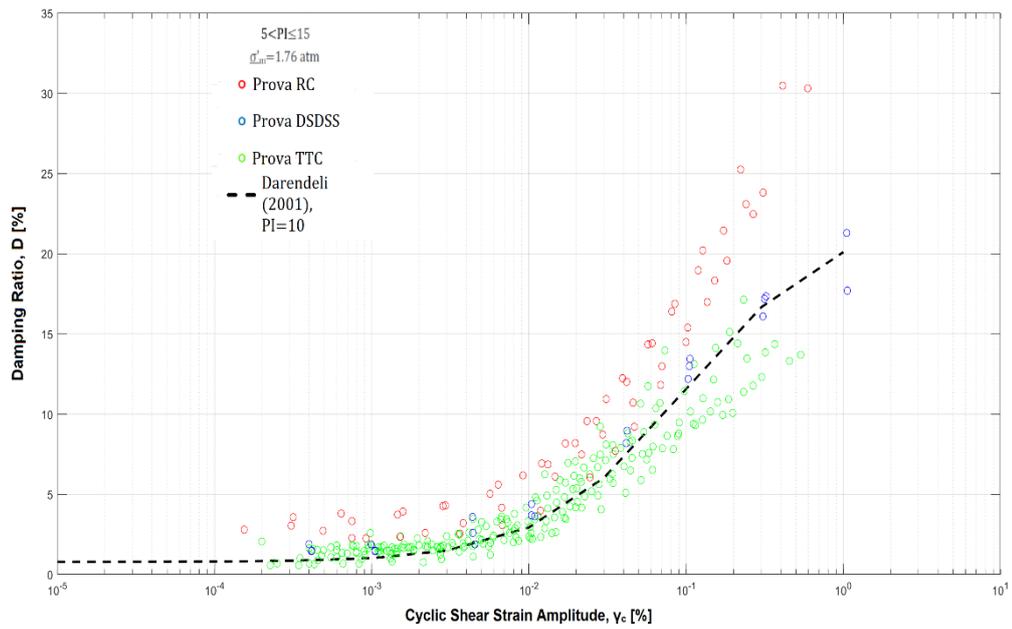


FIGURA 4.26: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=10$ ) CON LE CURVE DI VARIAZIONE DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO PER I CAMPIONI CON  $PI$  INTERNO AL RANGE  $5 < PI \leq 15$

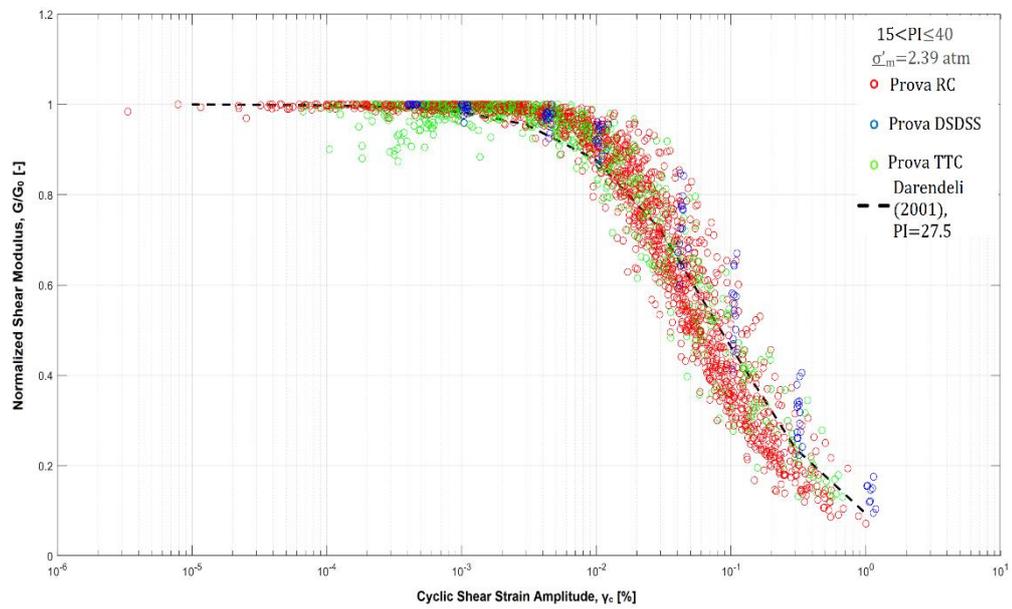


FIGURA 4.27: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=27.5$ ) CON LE CURVE DI DECADIMENTO DEL MODULO PER I CAMPIONI CON  $PI$  INTERNO AL RANGE  $15 < PI \leq 40$

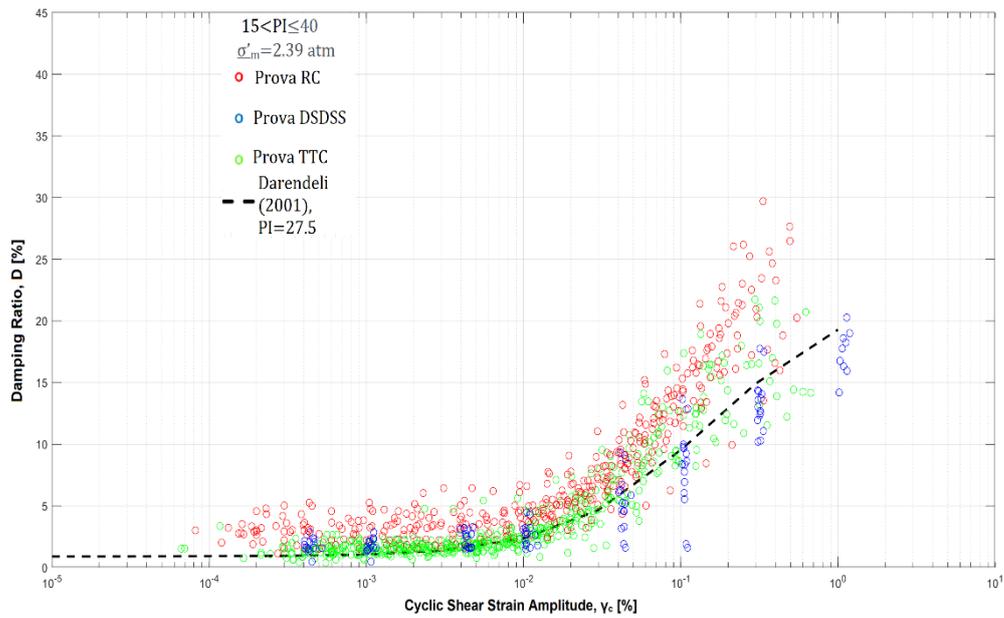


FIGURA 4.28: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=27.5$ ) CON LE CURVE DI VARIAZIONE DEL FATTORE DI SMORZAMENTO PER I CAMPIONI CON  $PI$  INTERNO AL RANGE  $15 < PI \leq 40$

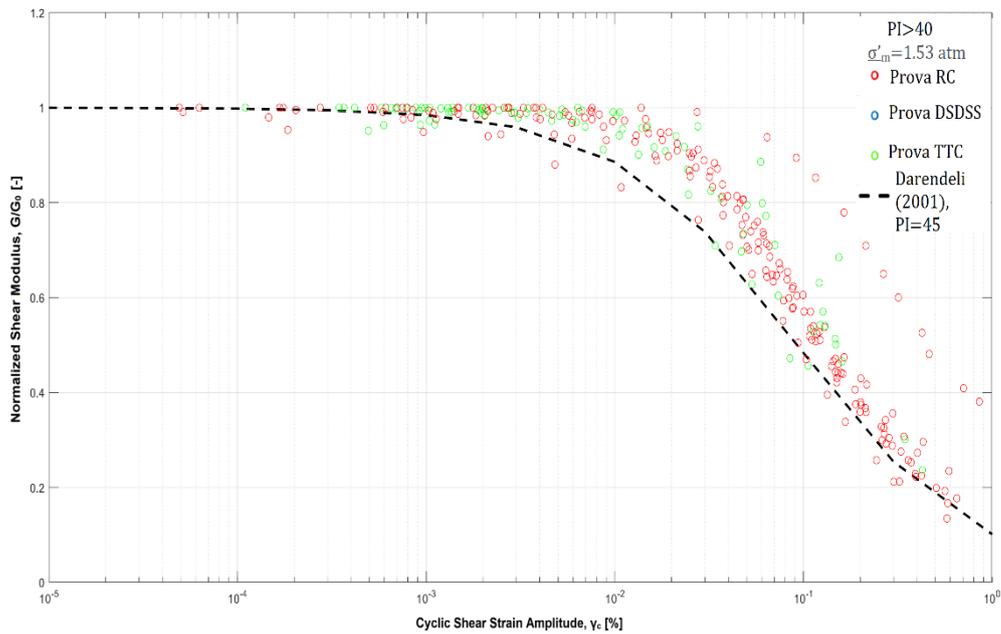


FIGURA 4.29: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI ( $PI=45$ ) CON LE CURVE DI DECADIMENTO DEL MODULO PER I CAMPIONI CON  $PI > 40$

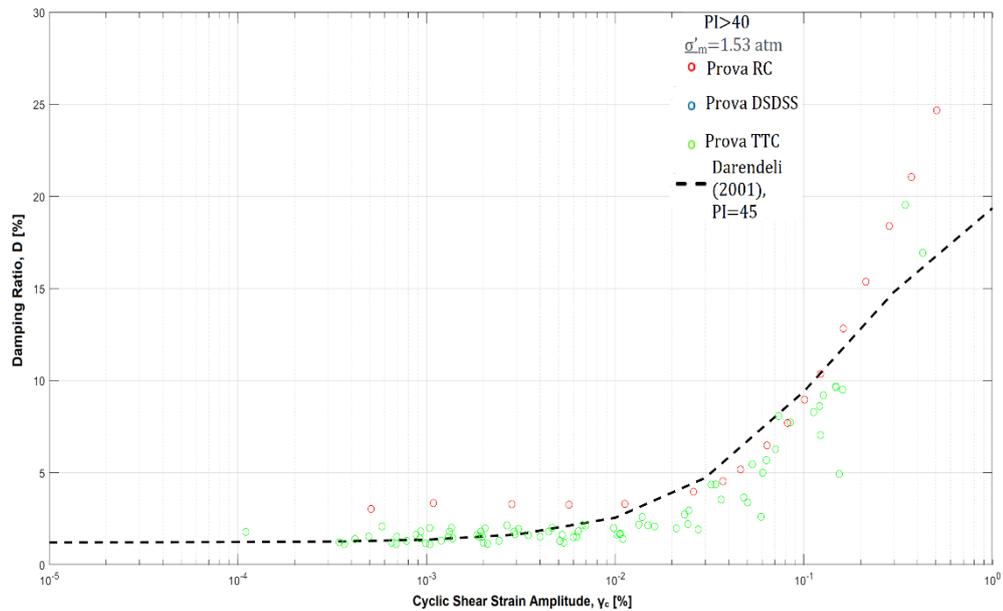


FIGURA 4.30: CONFRONTO DEL MODELLO DI DARENDELI (45) CON LE CURVE DI VARIAZIONE DEL RAPPORTO DI SMORZAMENTO PER CAMPIONI CON  $PI > 40$

Dai confronti tra i dati sperimentali e la curva di Darendeli, si vede una marcata differenza nei valori del modulo normalizzato e del fattore di smorzamento per bassi livelli deformativi, che si era già vista nel confronto con le curve di Vucetic e Dobry (1991). Questo evidenzia come il modello di Darendeli sottostimi la soglia lineare, mentre per medie deformazioni i dati sperimentali sembrano seguire abbastanza fedelmente il modello di Darendeli. Quindi, come visto con Vucetic e Dobry, anche per il modello di Darendeli si ha una miglior stima della soglia volumetrica rispetto alla soglia lineare. Guardando i risultati dello smorzamento a piccole deformazioni ( $D_{min}$ ) della colonna risonante si nota come i dati sperimentali sovrastimino nettamente questo valore, ciò è più evidente crescendo l'indice di plasticità. Questo accade perché si è ipotizzata una frequenza di carico di 1 Hz per determinare le curve di Darendeli, che si discosta fortemente dalle frequenze a cui vengono eseguite le prove di colonna risonante (decisamente più elevate). Per questo motivo i risultati delle colonne risonanti mostrano dei valori sensibilmente più alti dello smorzamento a bassi livelli deformativi, una stima di tale sovrastima può essere fatta andando a calcolare il  $D_{min}$  del modello di Darendeli andando a sostituire la frequenza di carico di 1 Hz con una frequenza di 40-80 Hz. A parità delle altre grandezze ciò porta ad avere un valore  $D_{min}$  che è circa 2-2.5 volte quello valutato con 1 Hz (Coppetta I., 2019).

Differenziando i risultati in base alle prove che li hanno prodotti, si può notare come le prove di taglio torsionale ciclico e il taglio semplice ciclico su doppio campione

restituiscano dei valori di smorzamento a piccole deformazioni molto simili a quelle che si ricavano con il modello di Darendeli.

### 4.3.2 Sabbie

Nelle sabbie le grandezze dinamiche, modulo di rigidezza a taglio e fattore di smorzamento a piccole deformazioni, risentono dell'influenza dell'indice dei vuoti e della pressione di confinamento effettiva. Il modulo  $G_0$  presenta valori maggiori nelle sabbie più dense e con tensione di confinamento effettiva maggiore (Hardin e Richart, 1963). Lo smorzamento a piccole deformazioni  $D_0$ , invece, diminuisce all'aumentare di  $\sigma'_m$ , ma aumenta al crescere del coefficiente di uniformità  $C_u$  (Menq, 2003).

Lo smorzamento a piccole deformazioni è anche influenzato dalla frequenza di carico. Per basse frequenze, inferiori a 0.1 Hz, il valore del fattore di smorzamento tende a decrescere con l'aumentare delle frequenze; per medie frequenze di carico, 0.1-10 Hz, il valore di  $D_0$  si mantiene pressoché costante, mentre ad alte frequenze lo smorzamento a piccole deformazioni cresce con la frequenza per via dell'instaurarsi degli effetti viscosi. Ciò accade indipendentemente dal livello deformativo, ma assume un ruolo meno rilevante ad alte deformazioni, in corrispondenza delle quali aumenta la componente di smorzamento isteretico (Shibuya et al., 1995).

I risultati sperimentali delle curve di decadimento del modulo di taglio, inseriti all'interno del database delle sabbie, sono stati confrontati con le curve di Menq (2003).

Per la costruzione della curva di decadimento del modulo di rigidezza a taglio, Menq è partito dal modello iperbolico di Darendeli (2001):

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (24)$$

La differenza tra i modelli sta nei parametri che influenzano i valori di  $\gamma_r$  e  $a$ . Secondo Menq, questi parametri devono tenere in conto dell'influenza della tensione di confinamento ( $\sigma'_m$ ), dell'indice dei vuoti ( $e$ ) e delle caratteristiche granulometriche del terreno attraverso il valore  $D_{50}$ , che indica il diametro in corrispondenza del 50% del passante in peso.

Attraverso una serie di studi su sabbie asciutte, Menq ha analizzato come le grandezze, prima descritte, influenzino i parametri che caratterizzano il modello. Inizialmente ha analizzato l'influenza dell'indice dei vuoti, della granulometria e del coefficiente di uniformità sulla deformazione di riferimento (FIGURA 4.31)

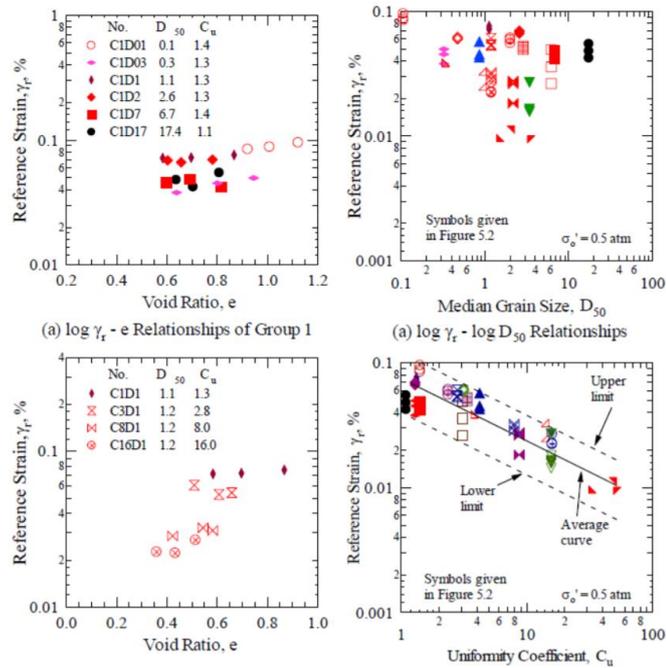


FIGURA 4.31: EFFETTO DEI PARAMETRI ( $D_{50}$ ,  $e$ ,  $C_u$ ) SULLA DEFORMAZIONE DI RIFERIMENTO  $\gamma_r$  (DA MENQ, 2003)

Da queste prime analisi, Menq ha evidenziato come, dei tre parametri analizzati ( $D_{50}$ ,  $e$ ,  $C_u$ ), solamente il coefficiente di uniformità  $C_u$  mostra un'influenza ben definita nei confronti della deformazione di riferimento. Allo stesso modo, ha valutato la dipendenza del coefficiente di curvatura dai suddetti parametri, constatandone la scarsa influenza (FIGURA 4.32).

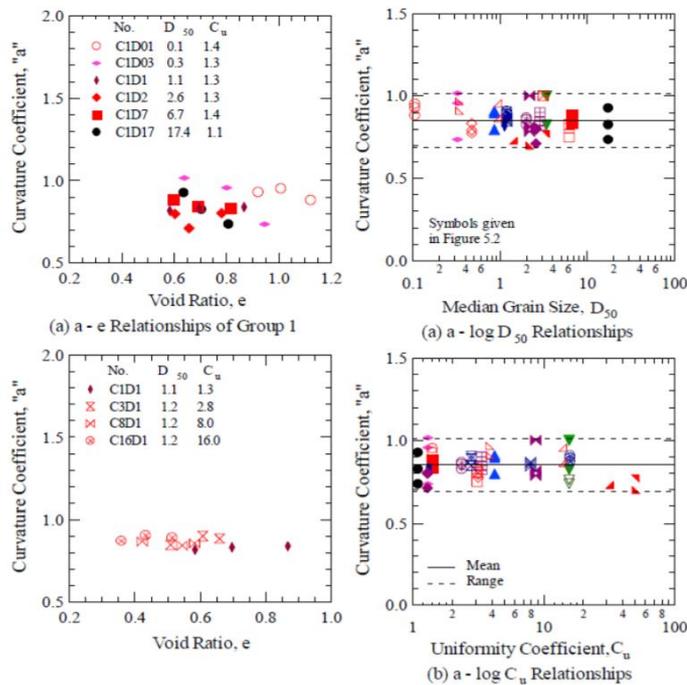


FIGURA 4.32: EFFETTO DEI PARAMETRI ( $D_{50}$ ,  $e$ ,  $C_u$ ) SUL COEFFICIENTE DI CURVATURA "a" (DA MENQ, 2003)

Infine, la FIGURA 4.33 mostra come la tensione di confinamento influenzi sensibilmente entrambi i parametri del modello.

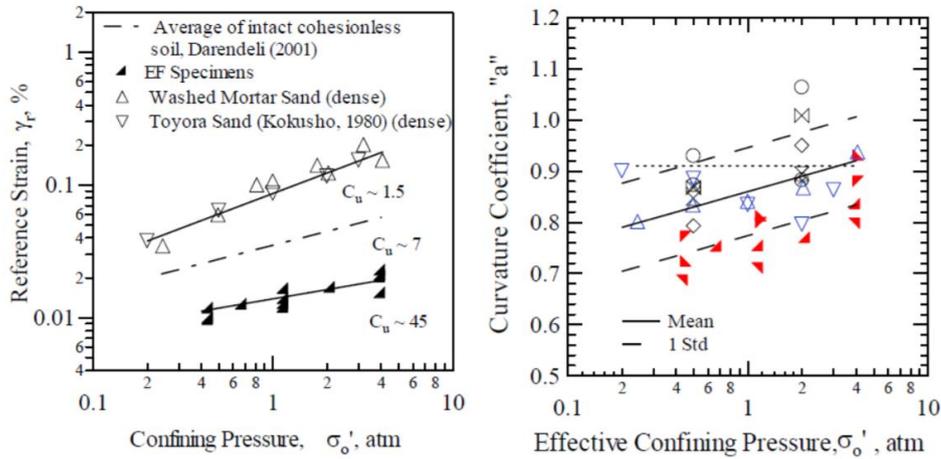


FIGURA 4.33: EFFETTO DELLA TENSIONE DI CONFINAMENTO SUI PARAMETRI DEL MODELLO,  $\gamma_r$  ED  $a$  (DA MENQ, 2003)

In base a queste analisi, Menq ha determinato due relazioni empiriche per i parametri del modello che, quindi, risultano influenzati solamente dal coefficiente di uniformità e dalla tensione di confinamento:

$$\gamma_r = 0.12 C_u^{-0.6} \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{0.5 C_u^{-0.15}} \quad (25)$$

$$a = 0.86 + 0.1 \log \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right) \quad (26)$$

Dove  $p_a$  è la pressione atmosferica (1 atm).

Per un primo confronto sono state determinate le curve del modello di Menq variando il coefficiente di uniformità da 1 a 200 e considerando una tensione di confinamento pari a 100 kPa e 200 kPa (valori in cui ricadono il maggior numero delle prove inserite nel database delle sabbie, FIGURA 4.34). Nella FIGURA 4.35 e FIGURA 4.36 sono riportate le curve di decadimento che rispettano le condizioni sopra dette.

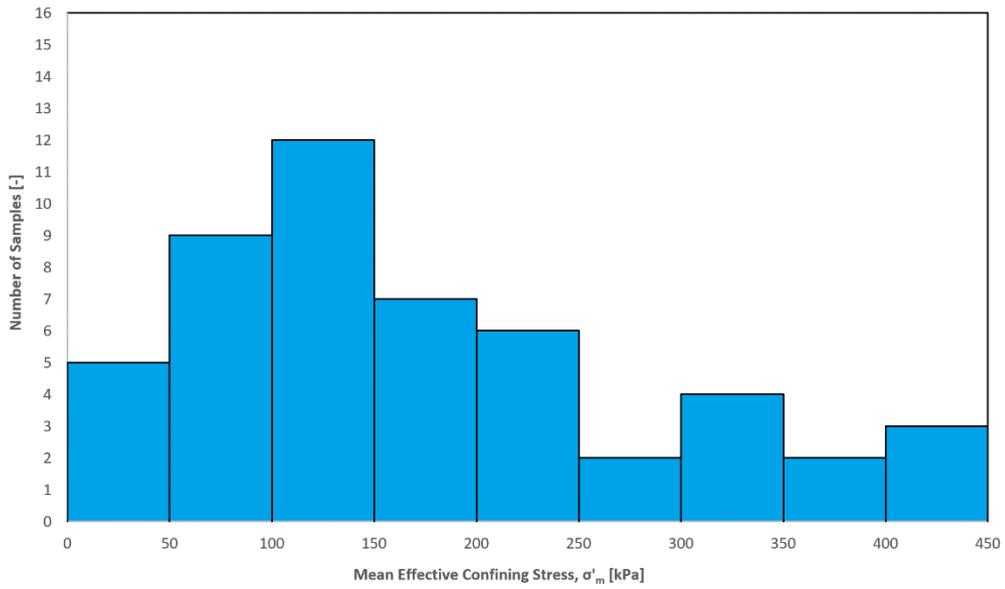


FIGURA 4.34: NUMERO DI CAMPIONI PER TENSIONE DI CONFINAMENTO DELLE PROVE INSERITE ALL'INTERNO DEL DATABASE DEI TERRENI GROSSOLANI

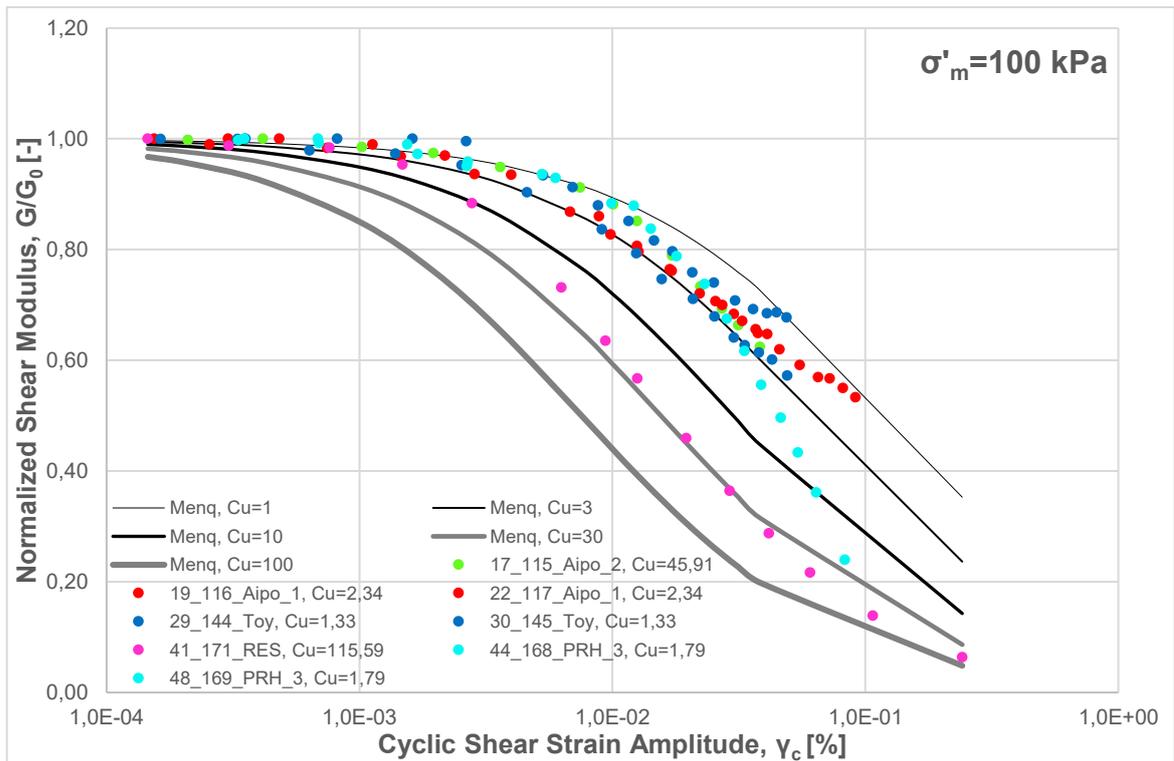


FIGURA 4.35: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI CON LE CURVE DEL MODELLO DI MENQ (2003) PER  $\sigma'_m = 100 \text{ kPa}$

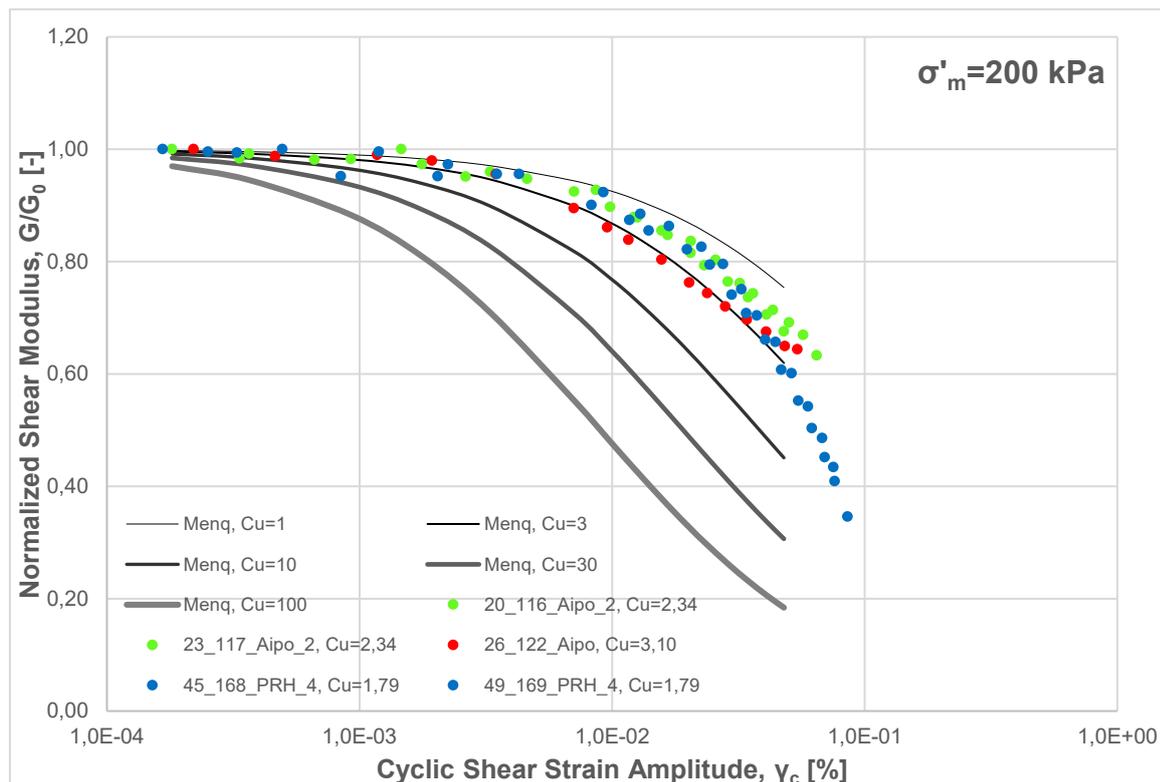


FIGURA 4.36: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI CON LE CURVE DEL MODELLO DI MENQ (2003) PER  $\sigma'_m = 200$  kPa

I campioni che presentano un coefficiente di uniformità compreso tra 1 e 3 mostrano degli andamenti della curva di decadimento abbastanza fedeli alle curve del modello di Menq, ad eccezione dei campioni di Perth (168\_PRH\_4, 169\_PRH\_3, 169\_PRH\_4) che, essendo stati saturati, una volta che si raggiunge la soglia volumetrica e, quindi, nascono le sovrappressioni neutre, mostrano una riduzione più repentina del modulo a taglio, in quanto si troveranno ad una tensione efficace effettiva che sarà minore di quella di partenza. Nell'analisi effettuata sui campioni inseriti nel database si è notato che solamente quei campioni con Cu compreso tra 1 e 3 seguivano il modello di Menq, mentre per valori di Cu più elevati i dati sperimentali mostravano un comportamento che si differenzia da quello descritto da Menq. Per questo si è scelto di eseguire un'ulteriore analisi considerando solamente quei campioni con Cu compreso tra 1 e 3. Questa nuova analisi è stata eseguita considerando un valore di Cu pari a 2 per la costruzione delle curve di Menq, facendo variare la tensione di confinamento. Il confronto è riportato in FIGURA 4.37.

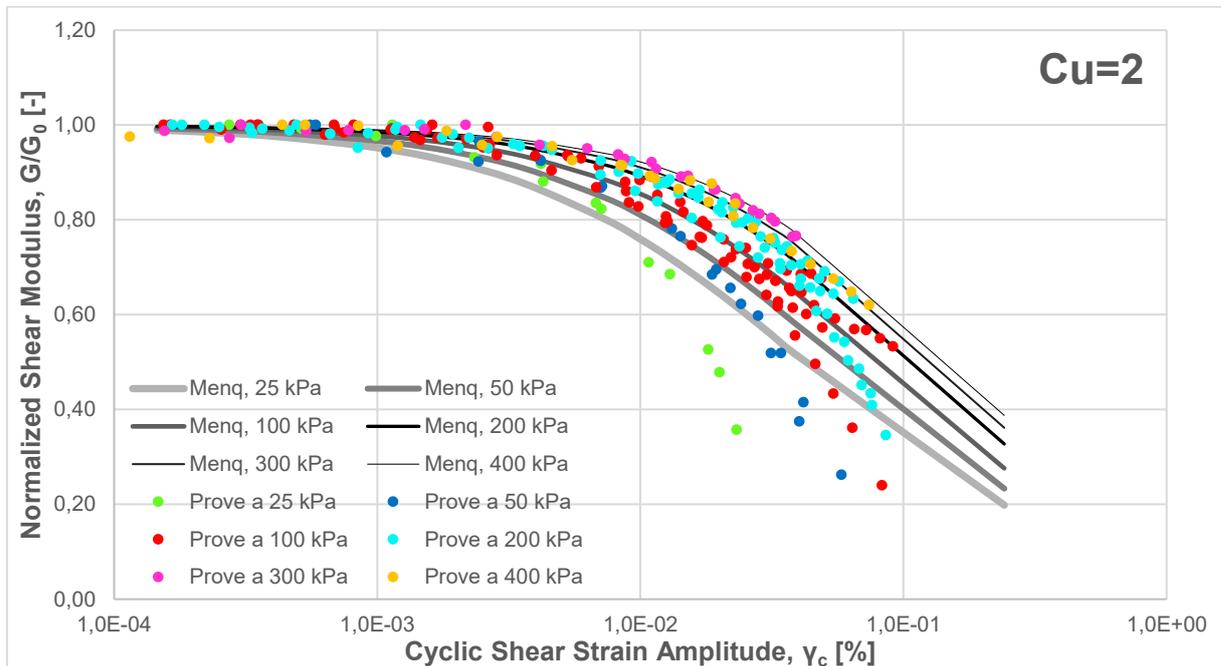


FIGURA 4.37: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI CON LE CURVE DEL MODELLO DI MENQ (2003) PER  $Cu=2$

Dalla figura si nota come i dati sperimentali seguano abbastanza fedelmente i valori ottenuti con il modello di Menq, anche se alcuni mostrano un decadimento più repentino una volta raggiunta la soglia volumetrica. Per differenziare meglio i comportamenti, nella FIGURA 4.38 e FIGURA 4.39 vengono rappresentate, rispettivamente, le curve sperimentali ottenute dalle prove di colonna risonante eseguite su campioni asciutti, in cui per il modello di Menq è stato utilizzato un  $Cu=2.34$ , e quelle su campioni saturi, in cui si è usato un  $Cu=1.79$  per il modello di Menq.

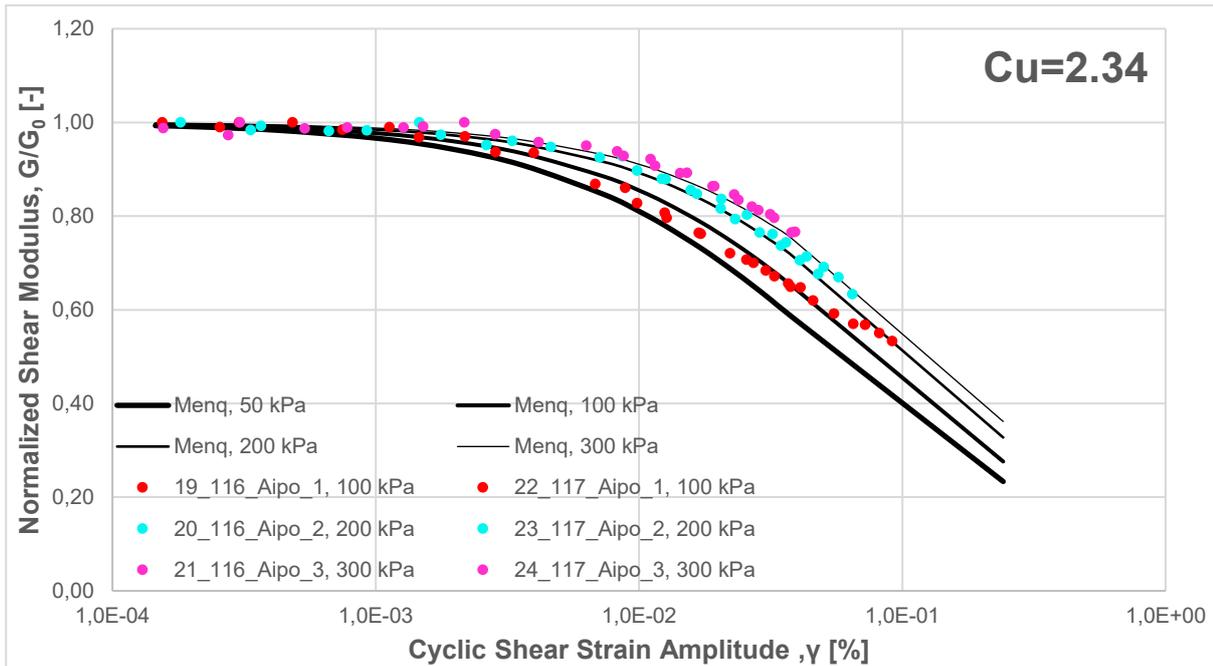


FIGURA 4.38: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI, PER CAMPIONI ASCIUTTI, CON LE CURVE DI MENQ (2003) PER  $Cu=2.34$

I campioni asciutti, che presentano un  $Cu=2.34$ , seguono il comportamento delle curve di Menq al variare della tensione di confinamento, mostrando una leggerissima sovrastima dei valori del modulo di rigidezza.

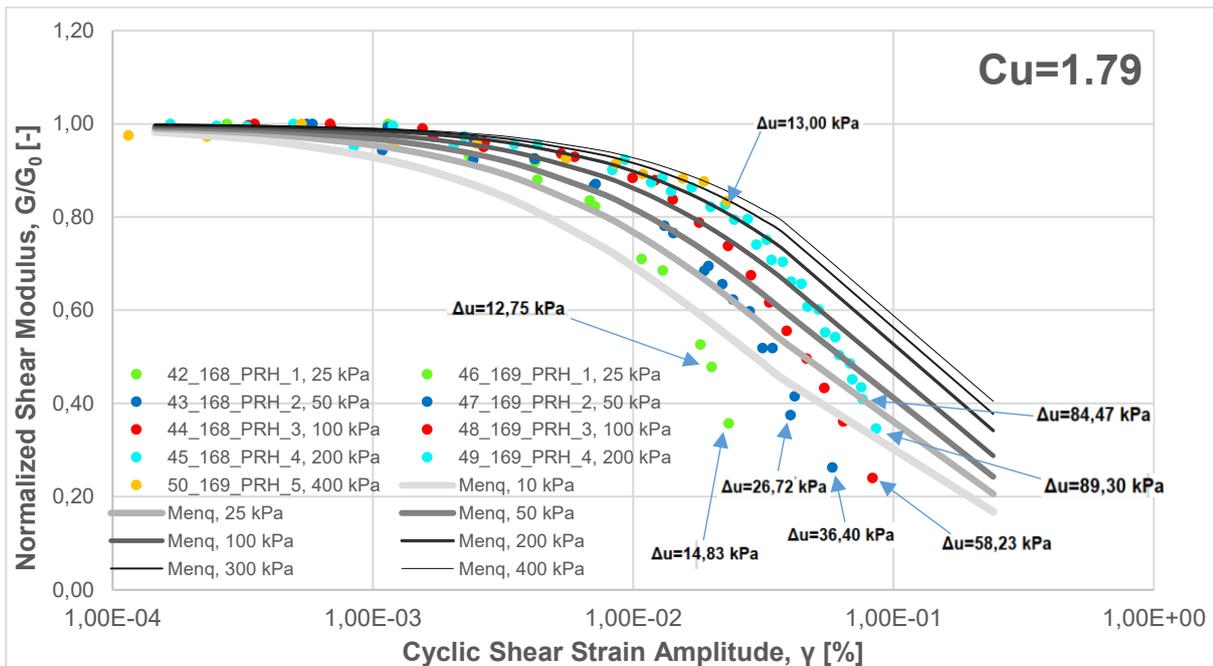


FIGURA 4.39: CONFRONTO DELLE CURVE DI DECADIMENTO SPERIMENTALI, PER CAMPIONI SATURI, CON LE CURVE DI MENQ (2003) PER  $Cu=1.79$

In questo caso sono stati riportati i valori che assume la sovrappressione interstiziale in corrispondenza dell'ultimo punto di ogni curva per evidenziare come la tensione di confinamento effettiva non sia più quella iniziale della prova di colonna risonante ma risulta minore per via dell'insorgere delle sovrappressioni neutre. Infatti, si nota come la curva tenda ad allontanarsi da quella di Menq una volta raggiunta la soglia volumetrica.

## CONCLUSIONI

Questo lavoro ha avuto lo scopo di studiare il comportamento ciclico dei terreni, analizzando una mole elevata di dati accumulati negli anni mediante prove dinamiche di laboratorio.

A tal proposito è stato necessario innanzitutto omogeneizzare e unificare i risultati delle prove di laboratorio effettuate nell'arco di vent'anni dal Politecnico di Torino a cui sono stati aggiunti i risultati delle prove effettuate in centro Italia dopo l'evento sismico del 2016, al fine di costruire una banca dati delle caratteristiche fisiche e dinamiche dei terreni del territorio italiano. Tale banca dati è stata quindi arricchita inserendo i risultati di una serie di prove sperimentali condotte, nell'ambito di questa tesi, sia su terreni a grana fine sia su sabbie.

Una volta raccolti i dati è stato creato un Database, come variabile strutturata del software Matlab, che racchiude tutti i risultati, considerati attendibili, delle prove analizzate. L'analisi ha riguardato 209 prove, ma di queste ne sono state scartate 20 in quanto mancavano dei dati importanti per la caratterizzazione fisica e meccanica dei campioni (PI, curva granulometrica,  $G_s$ ).

Uno dei vantaggi della creazione del Database è stato quello di permettere un confronto dei risultati sperimentali con i modelli di Vucetic e Dobry (1991), per quanto concerne la valutazione delle soglie, lineare e volumetrica, di Darendeli (2001), per la valutazione degli andamenti delle curve di decadimento del modulo e di variazione del fattore di smorzamento nei terreni costituiti prevalentemente da materiale fine, e di Menq (2003) per analizzare le curve di decadimento del modulo per i campioni in materiale grossolano.

Nel confronto dei risultati delle prove di laboratorio con il modello di Vucetic e Dobry (1991) (FIGURA 4.19÷FIGURA 4.22), si è evidenziata un'importante differenza nei valori della soglia lineare con una marcata dispersione dei dati, anche se il trend di crescita con l'aumentare dell'indice di plasticità è rispettato. Queste analisi hanno mostrato come le curve di letteratura tendano a sottostimare i valori della soglia lineare rispetto a quelli ricavati dai dati sperimentali, fatto che si è riscontrato anche nel confronto con le curve di decadimento del modello di Darendeli. Ciò lascia pensare a possibili sviluppi dei modelli presenti in letteratura, attraverso la taratura dei parametri, in modo che si adattino al meglio ai campioni del territorio italiano.

Al contrario, i risultati sperimentali mostrano dei valori di soglia volumetrica abbastanza fedeli a quelli ottenuti sia con il modello di Vucetic e Dobry (1991) che con quello di Darendeli (2001). Si è visto, durante il lavoro, che la determinazione delle soglie volumetriche può essere eseguita tramite due criteri: uno, introdotto da Vucetic (1994), che considera la curva di decadimento del modulo e l'altro che si basa sull'insorgere delle sovrappressioni neutre. Sebbene i due criteri portino a risultati alquanto simili (FIGURA 4.24), è preferibile adoperare il criterio che tiene conto della nascita delle sovrappressioni interstiziali, qualora siano valutate, in quanto ritenuto più attendibile, anche considerando la definizione di soglia volumetrica (vista nel paragrafo 1.1).

Dal confronto con il modello di Darendeli (2001), è risultato chiaro come le prove di colonna risonante, elaborate mediante il metodo half-power bandwidth, tendano a sovrastimare il valore del fattore di smorzamento a piccole deformazioni, cosa che, invece, non avviene analizzando le oscillazioni libere del campione o mediante le prove di taglio torsionale ciclico. Queste presentano, infatti, dei risultati molto vicini ai valori del modello. Da ciò, quindi, risulta più attendibile il valore di smorzamento a piccole deformazioni ottenuto con il metodo delle oscillazioni libero o mediante prove di taglio torsionale ciclico. Il risultato che scaturisce dalla prova di colonna risonante può essere visto come una sovrastima di tale parametro dovuta sia alle alte frequenze di carico a cui viene eseguita la prova (40-80 Hz) e sia all'insorgere di correnti parassite durante l'esecuzione della prova.

Come annunciato in precedenza, per un miglior adattamento dei dati sperimentali ai modelli di letteratura, in questo caso a quello di Darendeli (2001), sarebbe utile calibrare nuovamente i diversi parametri che entrano in gioco nel modello in modo da ottenere delle curve di decadimento e dello smorzamento più vicine al reale comportamento dei terreni del territorio italiano.

Un'ultima analisi è stata eseguita sui dati sperimentali delle sabbie. Per queste è stato considerato il modello di Menq (2003) che ha fornito dei risultati ragionevoli per quei campioni con un basso coefficiente di uniformità, compreso tra 1 e 3, mentre ha mostrato come per valori elevati del coefficiente di uniformità il comportamento che presentano i risultati sperimentali inseriti nel Database è decisamente lontano da quello ipotizzato dal modello.

Rispetto al Database dei campioni di materiale fine (139), quello dei campioni in sabbia presenta un numero decisamente più ristretto di prove (50), quindi, in futuro sarà opportuno ampliare questo numero in modo da ottenere una banca dati che dia

indicazioni più robuste e significative sul comportamento dei campioni in materiale grossolano.

Nonostante si sia effettuata solo parte delle elaborazioni che è possibile fare con questo strumento, risulta evidente come questo rivesta una grande importanza nell'analisi del comportamento dei terreni italiani.

Riuscendo a cogliere tutte le principali caratteristiche dei suoli italiani è possibile avere una robusta base di partenza per qualsiasi intervento o progettazione futura.

Attraverso il Database sarà possibile ricalibrare i modelli presenti in letteratura e trovare dei parametri specifici per il territorio italiano.

## BIBLIOGRAFIA

Armandi M., Lancellotta R., Lo Presti D.C.F., Maniscalco R., Pallara O. (1993), *Monotonic and cyclic loading behaviour of two sands and small strains*. Geotechnical Testing Journal, vol.16

ASTM International (2014) ASTM D854-14, *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM International (2015) ASTM D4015-15, *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*. ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM International (2016) ASTM D4254-16, *Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*. ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM International (2017) ASTM D2487-17, *Standard practice for classification of soils for engineering purpose (Unified Soil Classification System)*. ASTM International, West Conshohocken, PA

Cascante G., Vanderkooy J., CUnivershung W. (2003), *Difference between current and voltage measurements in resonant-column testing*. Can Geotech J. 40:806-820

Ciancimino A., Jones L., Sakellariadis L., Anastasopoulos I., Foti S. (submitted), *Experimental assessment of the performance of a bridge pier subjected to flood-induced scour*. Journal Geotechnique

Ciancimino A., Lanzo G., Alleanza G.A., Amoroso S., Bardotti R., Biondi G., Cascone E., Castelli F., Di Giulio A., d'Onofrio A., Foti S., Lentini V., Madaia C., Vessia G. (2019), *Dynamic characterization of fine-grained soils in Central Italy by laboratory testing*. Bulletin of Earthquake Engineering:29 doi: <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00611-6>

Coppetta I. (2019), *Analisi aggregata delle prove eseguite per la microzonazione sismica dei comuni del centro Italia colpiti dagli eventi sismici del 2016*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino

Cruciata S. (2019), *Calcolo dei cedimenti di Fondazioni Superficiali su sabbie: Confronto fra Metodi Empirici e Modelli Numerici*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino

D'Elia B., Lanzo G., Pagliaroli A. (2003), *Small-strain stiffness and damping of soils in a direct simple shear device*. In: Engineering NZSfE (ed) Pacific conference on earthquake engineering, Christchurch, New Zealand

Darendeli M.B. (2001), *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin

Dobry R., Vucetic M., (1987), *Dynamic properties and response of soft clay deposits*. In: Proc. Int. Symp. On Geotechnical engineering of soft soils, vol.2, pp 51-87

Doroudian M., Vucetic M., (1995), *A Direct Simple Shear Device for Measuring Small-Strain Behaviour*. Geotech. Test Journal 18:69-85

d'Onofrio A., Silvestri F., Vinale F., (1999), *Strain Rate Dependent Behaviour of a Natural Stiff Clay*. Soil Found. 39:69-85

Foti S. (2015-2016), *Dispense del corso di Geotecnica Sismica*. Corso di Ingegneria Civile, Politecnico di Torino

Hardin B.O. e Richart F.E. Jr., (1963), *Elastic wave velocities in granular soils*. Journal Soil Mech. And Found. Div., ASCE, 89(1):33-65

Hardin B.O. e Drnevich V.P., (1972), *Shear Modulus and Damping in soils: design equations and curves*. Journal Soil Mech. Found. Div. 98:667-692

Kim D.S., (1991), *Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Test*. Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin

Lancellotta R. (2012), *Geotecnica*, Quarta edizione, Zanichelli

Lanzo G. (2012), *Caratterizzazione geotecnica dei terreni sotto azioni dinamiche con prove in sito ed in laboratorio, Fondamenti di Dinamica dei Terreni*. Piacenza Expo, Geofluid Drilling & Foundations

Lo Presti D.C. (1989), *Proprietà dinamiche dei terreni*. In: XIV CGT, Politecnico di Torino, pp 1-62

Lo Presti D.C., Jamiolkowski M., Pallara O., Cavallaro A., Pedroni S. (1997), *Shear modulus and damping of soils*. Geotechnique 47:603-617

Menq Farn-Yuh, B.S., M.S. (2003), *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*. Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin

Pallara O. (1995), *Comportamento sforzi-deformazioni di due sabbie soggette a sollecitazioni monotone e cicliche*. Tesi di dottorato, Politecnico di Torino

Seed et al. (1986), *Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils*. Journal Geotech. Engrg. 112(11):1016-1032

Senetakis K., Anastasiadis A., Ptilakis K. (2015), *A comparison of material damping measurements in resonant column using the steady-state and free-vibration decay methods*. Soil Dyn in Earthq Eng 74:10-13

Shibuya et al. (1995), *Strain rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clay*. Geotech. Test Journal 18:365-375

Simoni G. (2004), *Prove dinamiche di laboratorio colonna risonante e taglio torsionale ciclico*. Università degli Studi di Firenze

Vinale F., Mancuso C., Silvestri F. (1996), *Dinamica dei terreni*. Manuale di Ingegneria Civile, Vol.1. Ed. Scientifiche A. Cremonese

Vucetic M. (1994), *Cyclic threshold shear strains in soils*. Journal of Geotechn Engineering Div 103:1174-1178

Vucetic M., Dobry R. (1991), *Effect of soil plasticity on cyclic response*. Journal of Geotechn Engineering, ASCE, vol.117

Wang Y-H., Cascante G., Santamarina J.C., (2003), *Resonant Column Testing: The Inherent Counter emf Effect*. Geotech. Test Journal 26:342-352

Zhang J., Andrus R.D., Juang C.H. (2005), *Normalized shear modulus and material damping ratio relationships*. J. Geoenviron Engineering 131:453-464

## APPENDICE 1

Risultati delle prove di colonna risonante eseguiti sui campioni del progetto RESBA e sui due campioni ricostituiti in laboratorio

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE DI NIELLA TANARO S1-C1

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D <sub>free vibrations</sub> [%]	D <sub>half-power bandwidth</sub> [%]	$f_0$ [Hz]
3,17E-04	50,50	50,73	1,00	3,58	5,26	42,9
6,40E-04	50,73		1,00	3,81	5,13	42,9
1,58E-03	50,03		0,99	3,93	5,28	42,5
2,94E-03	48,17		0,95	4,31	5,98	41,7
5,66E-03	44,99		0,89	5,04	6,44	40,4
1,32E-02	37,32		0,74	6,87	8,29	36,7
1,97E-02	32,80		0,65	8,20	9,71	34,5
2,68E-02	28,75		0,57	9,57	11,61	32,3
4,18E-02	23,34		0,46	12,02	14,09	29,2
6,08E-02	18,78		0,37	14,42	18,01	26,1
8,48E-02	15,10		0,30	16,88	21,37	23,4
1,28E-01	11,48		0,23	20,22	21,81	20,4
2,22E-01	8,26		0,16	25,26	18,21	17,3
4,12E-01	5,27		0,10	30,48	14,86	13,7

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE DI NIELLA TANARO S1-C2

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D <sub>free vibrations</sub> [%]	D <sub>half-power bandwidth</sub> [%]	$f_0$ [Hz]
1,55E-04	124,05	124,05	1,00	2,81	4,65	68,1
3,08E-04	124,04		1,00	3,06	4,65	67,7
7,49E-04	123,68		1,00	3,34	4,88	67,6
1,46E-03	119,33		0,96	3,74	5,12	67
2,84E-03	114,70		0,92	4,28	5,76	65,2
6,38E-03	99,39		0,80	5,61	7,10	60,5
9,17E-03	91,04		0,73	6,19	8,10	57,7
1,21E-02	83,66		0,67	6,93	9,26	55,6
1,71E-02	74,31		0,60	8,18	10,59	52,4
2,34E-02	66,05		0,53	9,57	12,25	49,2
3,10E-02	58,02		0,47	10,95	13,61	46,3
3,94E-02	51,69		0,42	12,24	14,87	43,6
5,72E-02	43,31		0,35	14,35	16,25	40
8,11E-02	35,67		0,29	16,40	17,63	36,3
1,19E-01	28,26		0,23	18,97	18,89	32,3
1,73E-01	22,01		0,18	21,45	19,65	28,5
2,41E-01	17,09		0,14	23,09	21,51	25,1

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE DI NIELLA TANARO S1-C3

$\gamma$ [%]	G [MPa]	G <sub>0</sub> [MPa]	G/G <sub>0</sub> [-]	D <sub>free vibrations</sub> [%]	D <sub>half-power bandwidth</sub> [%]	f <sub>0</sub> [Hz]
1,14E-04	224,55	225,10	1,00	2,59	4,10	81,8
2,33E-04	225,10		1,00	2,43	3,91	82,1
5,95E-04	222,91		0,99	2,47	3,99	81,5
1,15E-03	222,36		0,99	2,59	3,99	81,4
2,23E-03	212,63		0,94	2,94	4,27	79,3
4,99E-03	192,31		0,85	3,88	5,15	75,8
7,08E-03	179,82		0,80	4,52	5,67	73,1
9,11E-03	169,65		0,75	5,07	6,54	71
1,28E-02	153,81		0,68	6,12	7,16	67,8
1,66E-02	140,92		0,63	7,20	8,49	64,6
2,14E-02	126,52		0,56	8,17	9,04	61,4
2,67E-02	114,09		0,51	8,91	9,69	58
3,73E-02	97,17		0,43	10,27	10,22	53,8
5,17E-02	79,96		0,36	11,92	11,27	48,8
7,32E-02	62,97		0,28	14,14	12,82	43,3
1,06E-01	47,25		0,21	16,72	14,27	37,7
1,54E-01	33,99		0,15	19,56	14,78	31,8
2,45E-01	21,83		0,10	23,72	14,12	25,5

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE DI ENVIE-LA GRENGIA S1-C2

$\gamma$ [%]	G [MPa]	G <sub>0</sub> [MPa]	G/G <sub>0</sub> [-]	D <sub>free vibrations</sub> [%]	D <sub>half-power bandwidth</sub> [%]	f <sub>0</sub> [Hz]
9,61E-05	148,90	148,90	1,00	3,72	6,00	73,3
1,94E-04	148,09		0,99	4,37	5,75	72,7
5,07E-04	143,27		0,96	4,65	6,12	72
9,96E-04	138,92		0,93	5,04	6,43	71
1,86E-03	131,94		0,89	5,86	7,46	68,8
4,23E-03	113,52		0,76	7,70	9,92	64
6,21E-03	103,13		0,69	8,76	11,64	61
8,30E-03	94,85		0,64	9,51	12,65	58,7
1,25E-02	83,85		0,56	10,89	14,36	55
1,72E-02	74,96		0,50	12,05	15,48	51,6
2,26E-02	67,12		0,45	13,14	16,57	49,2
2,92E-02	59,19		0,40	14,55	17,75	46,2
4,18E-02	50,11		0,34	16,38	19,65	42,5
5,91E-02	40,92		0,27	18,44	21,88	38,4
9,02E-02	31,71		0,21	21,38	22,63	33,8
1,42E-01	22,24		0,15	25,13	25,97	28,3

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE DI ENVIE-CASCINA RUBIULO S1-C2

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	$D_{\text{free vibrations}}$ [%]	$D_{\text{half-power bandwidth}}$ [%]	$f_0$ [Hz]
1,46E-04	114,40	114,40	1,00	3,88	5,35	63,6
3,04E-04	112,97		0,99	3,99	5,30	63,5
7,62E-04	112,61		0,98	4,10	5,15	63,1
1,48E-03	109,07		0,95	4,50	5,64	62,2
2,79E-03	101,14		0,88	5,21	6,61	59,6
6,30E-03	83,69		0,73	7,00	8,55	54,4
9,40E-03	72,70		0,64	8,30	10,36	50,8
1,26E-02	64,89		0,57	9,47	11,69	47,9
1,96E-02	52,54		0,46	11,78	14,15	43,2
2,91E-02	41,70		0,36	13,97	16,67	38,4
4,17E-02	32,88		0,29	16,35	19,06	34,1
6,05E-02	24,77		0,22	19,03	21,96	29,6
1,07E-01	15,88		0,14	23,01	26,16	23,7
2,42E-01	7,32		0,06	30,82	37,58	16,1

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE C1 DI PERTH, CON  $\sigma'_m=25$  kPa

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	$D_{\text{free vibrations}}$ [%]	$D_{\text{half-power bandwidth}}$ [%]	$f_0$ [Hz]
1,14E-03	56,81	56,81	1,00	1,45	1,78	47,70
4,20E-03	52,15		0,92	2,02	2,95	44,40
6,80E-03	47,46		0,84	2,84	3,21	42,40
1,08E-02	40,34		0,71	3,99	4,23	38,90
2,00E-02	27,18		0,48	7,06	5,91	32,30

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE C1 DI PERTH, CON  $\sigma'_m=50$  kPa

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	$D_{\text{free vibrations}}$ [%]	$D_{\text{half-power bandwidth}}$ [%]	$f_0$ [Hz]
5,56E-04	84,79	84,79	1,00	1,43	2,66	56,50
1,09E-03	79,92		0,94	0,74	2,65	56,20
2,43E-03	78,23		0,92	1,28	2,59	55,50
4,17E-03	78,51		0,93	1,74	2,85	54,30
7,16E-03	73,83		0,87	2,21	3,31	52,50
1,42E-02	64,89		0,77	3,43	4,12	49,40
1,95E-02	58,92		0,69	4,28	5,45	46,20
2,42E-02	52,79		0,62	5,18	6,52	43,20
3,14E-02	44,00		0,52	6,81	8,21	39,70
4,02E-02	31,79		0,37	9,12	10,22	34,50

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE C1 DI PERTH, CON  $\sigma'_m=100$  kPa

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D <sub>free vibrations</sub> [%]	D <sub>half-power bandwidth</sub> [%]	f <sub>0</sub> [Hz]
3,32E-04	129,90	130,26	1,00	0,90	2,84	75,20
6,86E-04	130,26		1,00	1,07	2,77	74,70
1,70E-03	126,68		0,97	1,20	2,81	73,30
2,68E-03	124,91		0,96	1,31	3,53	71,50
5,96E-03	121,06		0,93	1,58	3,08	69,00
1,21E-02	114,55		0,88	2,28	3,32	64,30

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE C1 DI PERTH, CON  $\sigma'_m=200$  kPa

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D <sub>free vibrations</sub> [%]	D <sub>half-power bandwidth</sub> [%]	f <sub>0</sub> [Hz]
2,51E-04	221,10	222,04	1,00	0,81	2,39	94,20
4,95E-04	222,04		1,00	0,69	2,65	94,40
1,19E-03	221,10		1,00	0,68	2,81	94,20
2,24E-03	215,97		0,97	0,79	0,38	93,10
4,29E-03	212,27		0,96	0,96	1,95	92,30
9,25E-03	204,98		0,92	1,33	2,70	90,70
1,29E-02	196,48		0,88	1,58	3,04	88,80
1,68E-02	191,64		0,86	1,77	3,42	87,70
2,26E-02	183,43		0,83	2,14	3,21	85,80
2,75E-02	176,65		0,80	2,40	3,68	84,20
3,26E-02	166,72		0,75	2,79	3,91	81,80
3,75E-02	156,29		0,70	3,21	4,23	79,20
4,43E-02	145,82		0,657	3,90	5,16	76,50
5,14E-02	133,52		0,60	4,70	5,81	73,20
5,97E-02	120,36		0,54	5,76	6,98	69,50
6,80E-02	107,89		0,49	7,02	8,74	65,80
7,53E-02	96,41		0,43	8,32	10,45	62,20
8,57E-02	76,77		0,35	9,96	12,07	55,50

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE C2 DI PERTH, CON  $\sigma'_m=25$  kPa

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D <sub>free vibrations</sub> [%]	D <sub>half-power bandwidth</sub> [%]	f <sub>0</sub> [Hz]
2,75E-04	62,90	62,90	1,00	1,04	3,00	51,70
5,15E-04	62,42		0,99	1,01	3,11	51,50
9,90E-04	61,45		0,98	1,52	3,23	51,10
2,34E-03	58,60		0,93	1,99	3,21	49,90
4,28E-03	55,36		0,88	2,49	3,40	48,50
7,13E-03	51,77		0,82	3,22	3,94	46,90
1,30E-02	43,11		0,69	5,00	5,14	42,80
1,81E-02	33,09		0,53	7,06	7,60	37,50
2,33E-02	22,46		0,36	10,26	12,94	30,90

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE C2 DI PERTH, CON  $\sigma'_m=50$  kPa

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D <sub>free vibrations</sub> [%]	D <sub>half-power bandwidth</sub> [%]	$f_0$ [Hz]
5,85E-04	76,00	76,00	1,00	0,48	2,02	56,80
1,14E-03	75,47		0,99	1,13	1,24	56,60
2,45E-03	73,35		0,97	1,70	2,69	55,80
4,20E-03	70,23		0,92	1,93	2,75	54,60
7,07E-03	65,92		0,87	2,53	3,31	52,90
1,32E-02	59,36		0,78	3,68	4,58	50,20
1,88E-02	52,04		0,68	4,77	7,02	47,00
2,20E-02	49,85		0,66	5,56	8,26	46,00
2,80E-02	45,41		0,60	6,92	10,25	43,90
3,42E-02	39,42		0,52	8,50	13,57	40,90
4,17E-02	31,57		0,42	10,63	19,67	36,60
5,83E-02	19,96		0,26	14,40	29,38	29,10

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE C2 DI PERTH, CON  $\sigma'_m=100$  kPa

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D <sub>free vibrations</sub> [%]	D <sub>half-power bandwidth</sub> [%]	$f_0$ [Hz]
3,51E-04	151,41	151,41	1,00	0,68	2,50	80,10
6,92E-04	150,27		0,99	0,75	2,51	79,80
1,55E-03	149,90		0,99	0,84	2,70	79,70
2,66E-03	143,94		0,95	0,88	2,18	78,10
5,28E-03	141,73		0,94	1,35	2,84	77,50
9,95E-03	133,81		0,88	1,94	3,05	75,30
1,42E-02	126,80		0,84	2,33	3,55	73,30
1,79E-02	119,30		0,79	2,73	3,73	71,10
2,31E-02	111,71		0,74	3,40	4,51	68,80
2,84E-02	102,19		0,67	4,20	5,40	65,80
3,33E-02	93,38		0,62	4,99	6,52	62,90
3,88E-02	84,14		0,56	5,83	7,71	59,70
4,64E-02	75,11		0,50	7,02	9,49	56,40
5,42E-02	65,60		0,43	8,49	12,71	52,70
6,41E-02	54,67		0,36	10,37	18,40	48,10
8,30E-02	36,32		0,24	13,82	22,70	39,20

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE C2 DI PERTH, CON  $\sigma'_m=200$  kPa

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	$D_{\text{free vibrations}}$ [%]	$D_{\text{half-power bandwidth}}$ [%]	$f_0$ [Hz]
1,66E-04	229,14	229,14	1,00	0,67	2,79	98,40
3,27E-04	227,75		0,99	0,73	2,96	98,10
8,45E-04	218,10		0,95	0,56	3,18	96,00
2,04E-03	218,10		0,95	0,78	2,40	96,00
3,50E-03	219,01		0,96	0,89	2,70	96,20
8,30E-03	206,44		0,90	1,34	2,78	93,40
1,17E-02	200,30		0,87	1,57	2,83	92,00
1,40E-02	195,97		0,86	1,73	3,24	91,00
1,98E-02	188,29		0,82	2,09	3,36	89,20
2,44E-02	182,01		0,79	2,31	3,65	87,70
2,97E-02	169,78		0,74	2,83	3,96	84,70
3,40E-02	162,26		0,71	3,16	4,23	82,80
4,04E-02	151,48		0,66	3,81	5,25	80,00
4,68E-02	139,25		0,61	4,68	5,67	76,70
5,47E-02	126,49		0,55	5,78	6,98	73,10
6,18E-02	115,35		0,50	6,66	8,52	69,80
6,95E-02	103,48		0,45	8,12	10,59	66,10
7,61E-02	93,73		0,41	9,40	12,72	62,90

RISULTATI DELLA COLONNA RISONANTE SUL CAMPIONE C2 DI PERTH, CON  $\sigma'_m=400$  kPa

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	$D_{\text{free vibrations}}$ [%]	$D_{\text{half-power bandwidth}}$ [%]	$f_0$ [Hz]
1,15E-04	336,83	345,37	0,98	0,46	3,02	119,20
2,31E-04	335,72		0,97	0,73	3,03	119,00
5,32E-04	345,37		1,00	0,73	3,44	120,70
1,20E-03	330,11		0,96	0,74	2,97	118,00
2,50E-03	330,67		0,96	0,83	2,71	118,10
5,52E-03	319,57		0,93	1,01	3,32	116,10
8,57E-03	315,77		0,91	1,16	2,99	115,40
1,09E-02	308,12		0,89	1,20	3,07	114,00
1,55E-02	304,89		0,88	1,50	3,22	113,40
1,87E-02	302,75		0,88	1,65	3,50	113,00
2,30E-02	287,94		0,83	1,93	3,27	110,20

## Risultati delle prove di taglio torsionale ciclico sui campioni del progetto RESBA

RISULTATI DEL TAGLIO TORSIONALE CICLICO SUL CAMPIONE DI NIELLA TANARO S1-C1

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D [%]	$f_{prova}$ [Hz]
4,21E-04	48,69	50,76	0,96	1,60	0,10
7,64E-04	50,56		1,00	1,80	
1,13E-03	50,76		1,00	1,50	
2,26E-03	50,30		0,99	1,73	
6,26E-03	45,22		0,89	3,31	
1,58E-02	35,93		0,71	5,89	
5,13E-02	22,12		0,44	10,66	
1,54E-01	12,30		0,24	14,14	

RISULTATI DEL TAGLIO TORSIONALE CICLICO SUL CAMPIONE DI NIELLA TANARO S1-C2

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D [%]	f [Hz]
3,43E-04	119,79	128,14	0,93	0,58	0,10
4,81E-04	121,58		0,95	1,19	
8,98E-04	128,14		1,00	1,21	
2,27E-03	125,06		0,98	2,07	
5,01E-03	112,72		0,88	3,28	
1,26E-02	89,48		0,70	6,26	
2,84E-02	66,25		0,52	9,24	

RISULTATI DEL TAGLIO TORSIONALE CICLICO SUL CAMPIONE DI NIELLA TANARO S1-C3

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D [%]	f [Hz]
2,50E-04	198,54	217,45	0,91	1,46	0,10
3,40E-04	207,12		0,95	1,68	
6,18E-04	217,45		1,00	1,52	
1,53E-03	216,30		0,99	1,49	
3,18E-03	206,33		0,95	2,25	
7,15E-03	183,80		0,85	3,81	
1,40E-02	156,45		0,72	5,60	

RISULTATI DEL TAGLIO TORSIONALE CICLICO SUL CAMPIONE DI ENVIE-LA GRENGIA S1-C2

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D [%]	f [Hz]
3,21E-04	127,95	133,01	0,96	0,56	0,10
4,57E-04	131,93		0,99	0,82	
8,77E-04	133,01		1,00	1,20	
2,23E-03	129,32		0,97	2,13	
5,04E-03	114,11		0,86	3,81	
1,27E-02	90,36		0,68	6,84	
2,77E-02	69,27		0,52	9,84	

RISULTATI DEL TAGLIO TORSIONALE CICLICO SUL CAMPIONE DI ENVIE-CASCINA RUBIOLO S1-C2

$\gamma$ [%]	G [MPa]	$G_0$ [MPa]	G/ $G_0$ [-]	D [%]	f [Hz]
3,66E-04	113,16	117,64	0,96	1,23	0,10
5,29E-04	114,70		0,98	0,68	
1,00E-03	117,64		1,00	1,43	
2,65E-03	109,96		0,93	2,47	
6,33E-03	91,58		0,78	4,81	
1,89E-02	61,56		0,52	9,56	
5,15E-02	37,29		0,32	13,85	

## APPENDICE 2

Script di Matlab per la lettura dei file in formato tdms e per le elaborazioni delle prove di colonna risonante e taglio torsionale ciclico (Ciancimino A.)

### **RC\_Storing:**

```
TEST_NAME_f = 'RC_167_RES.mat';
MY_TEST_FILE_PATH = 'D:\Documenti\TESI SPECIALISTICA\Prove di colonna
risonante\167_RES';
nsamplespercycle=200;
sweep_f=0.1;
files = dir(MY_TEST_FILE_PATH);
% Get a logical vector that tells which is a directory.
dirFlags = [files.isdir];
% Extract only those that are directories.
subFolders = files(dirFlags);
for iDir=3:length(subFolders)
testDirectory = strcat(subFolders(iDir).folder,'\',subFolders(iDir).name);
folder = dir(fullfile(testDirectory, '*.tdms'));
fileStruct = dir(fullfile(testDirectory, '*.tdms'));
fileNames = {fileStruct.name};
nFiles = length(fileNames);
for iFile = 1:nFiles
Struct = TDMS_readTDMSFile(fullfile(testDirectory,fileNames{iFile}));
%% Filtering and storing
if iFile==1
    Test_f(iFile).Frequency_Hz=round(1/(Struct.propValues{1,4}{1,3}*nsamplespercycle),0);
    else
    Test_f(iFile).Frequency_Hz=Test_f(1).Frequency_Hz+sweep_f*(iFile-1);
end
% Design of the filter
Fn = Test_f(iFile).Frequency_Hz*nsamplespercycle/(2); % Nyquist Frequency (Hz)
Fco = 500; % Cutoff Frequency (Hz)
Wp = Fco/Fn; % Normalised Cutoff Frequency (rad)
Ws = 1.2*Wp; % Stopband Frequency (rad)
Rp = 5; % Passband Ripple (dB)
Rs = 20; % Stopband Ripple (dB)
[n,Wn] = buttord(Wp,Ws,Rp,Rs); % Calculate Filter Order
[b,a] = butter(n,Wn); % Calculate Filter Coefficients
[sos,g] = tf2sos(b,a); % Convert To Second Order Section Representation
Test_f(iFile).Time=(Struct.data{1,3}-Struct.data{1,3}(1,1))*60*60*24;
```

```

Test_f(iFile).Accelerometer_V=filfilt(sos,g,Struct.data{1,4})-
mean(filtfilt(sos,g,Struct.data{1,4}));
Test_f(iFile).Moment_Nm=filfilt(sos,g,Struct.data{1,5})-mean(filtfilt(sos,g,Struct.data{1,5}));
Test_f(iFile).Rotation1_mm=filfilt(sos,g,Struct.data{1,6});
Test_f(iFile).Rotation1_mm=Test_f(iFile).Rotation1_mm-Test_f(iFile).Rotation1_mm(1,1);
Test_f(iFile).Rotation2_mm=filfilt(sos,g,Struct.data{1,7});
Test_f(iFile).Rotation2_mm=Test_f(iFile).Rotation2_mm-Test_f(iFile).Rotation2_mm(1,1);
Test_f(iFile).Height_mm=Struct.data{1,8};
Test_f(iFile).Radial_disp_1_mm=Struct.data{1,9};
Test_f(iFile).Radial_disp_2_mm=Struct.data{1,10};
Test_f(iFile).Cellpressure_kPa=Struct.data{1,11};
Test_f(iFile).Backpressure_kPa=Struct.data{1,12};
Test_f(iFile).Volume_cm3=Struct.data{1,13};
end
% eval([subFolders(iDir).name ']=Test;'])
% eval([strcat(subFolders(iDir).name,'_f')]=Test_f;'])
eval([subFolders(iDir).name ']=Test_f;'])
% filename=subFolders(iDir).name;
% filename_f=strcat(subFolders(iDir).name,'_f');
filename_f=subFolders(iDir).name;
if iDir==3
% save(TEST_NAME,filename)
save(TEST_NAME_f,filename_f)
else
% save(TEST_NAME,filename,'-append')
save(TEST_NAME_f,filename_f,'-append')
end
end
end

```

### ***RC\_Elaboration:***

```

load RC_167_RES.mat
varname = who;

%% Basic information
TEST_NAME = 'RC_167_RES';
D_i=50;           %initial Diamter in mm
H_i=100;         %initial Height in mm
Weight_sample=394.5; %total weight of the sample in gr
Inertia_top=39.25; %inertia of the top part in g*cm*s2
n_cycles=20;

```

```

n_samples_percycle=200;
n_initial_cycles=1;
n_transient_cycles=1;
mkdir Plot
dir = what('Plot');

%% Amplitude vs frequency curves
for ii=1:length(varname)
    eval(['data = ',char(varname(ii)),';']);
    for kk=1:length(data)
A(kk,ii)=rms(data(kk).Accelerometer_V(1,n_samples_percycle*n_transient_cycles:n_sampl
s_percycle*(n_initial_cycles+n_cycles)));
        F(kk,ii)=data(kk).Frequency_Hz;
    end
end
for ii=1:length(varname)
    eval(['data = ',char(varname(ii)),';']);
    Results(ii).ID=varname(ii);
    Results(ii).ForcedVibrations.ampl_V=A(:,ii);
    Results(ii).ForcedVibrations.freq_Hz=F(:,ii);
    Results(ii).ForcedVibrations.A_max_V=max(A(:,ii));
    ind=find(A(:,ii)==max(A(:,ii)));
    Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz=F(ind,ii);
    Results(ii).ForcedVibrations.f1_Hz=F(find(abs(max(A(:,ii))/(2^0.5)-(A(1:ind,ii)))==
min(abs(max(A(:,ii))/(2^0.5)-(A(1:ind,ii))))),ii);
    Results(ii).ForcedVibrations.f2_Hz=F(find(abs(max(A(ind:end,ii))/(2^0.5)-(A(ind:end,ii)))==
min(abs(max(A(ind:end,ii))/(2^0.5)-(A(ind:end,ii)))))+ind-1,ii);

    %plot
    figure
    title(strcat('Test ',extractAfter(Results(ii).ID,"Test_")), 'FontWeight','normal')
    hold on
    box on
    a=plot(Results(ii).ForcedVibrations.freq_Hz,Results(ii).ForcedVibrations.ampl_V,'-
k','LineWidth',0.5);
    b=scatter(Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz,Results(ii).ForcedVibrations.A_max_V,'Mar
kerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','w');
    c=scatter(Results(ii).ForcedVibrations.f1_Hz,A(find(abs(max(A(:,ii))/(2^0.5)-(A(1:ind,ii)))==
min(abs(max(A(:,ii))/(2^0.5)-(A(1:ind,ii))))),ii), 'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',[0 .7
.7]);

```

```

    d=scatter(Results(ii).ForcedVibrations.f2_Hz,A(find(abs(max(A(ind:end,ii))/(2^0.5)-
(A(ind:end,ii)))== min(abs(max(A(ind:end,ii))/(2^0.5)-(A(ind:end,ii)))))+ind-
1,ii),'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',[1 .6 0]);
    xlabel('Frequency, f [Hz]')
    ylabel('Amplitude, A [V]')
    legend([b c d],strcat('f_0= ',num2str(round(Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz,1)),
'Hz'),strcat('f_1= ',num2str(round(Results(ii).ForcedVibrations.f1_Hz,1)), ' Hz'),strcat('f_2=
',num2str(round(Results(ii).ForcedVibrations.f2_Hz,1)), ' Hz'),'Location','southeast')
    set(gca, 'FontSize', 12)
    set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
    print(strcat(dir.path, '\',char(Results(ii).ID),'_AvsF'),'-dtiff','-r600')
figure
title(strcat('Test ',extractAfter(Results(ii).ID, "Test_")), 'FontWeight','normal')
hold on
box on
a=plot(data(ind).Time,data(ind).Accelerometer_V,'-k','LineWidth',0.5);
ylim(max(abs(ylim)).*[-1 1])
xlim(xlim)
plot([data(ind).Time(n_samples_percycle*n_transient_cycles)
data(ind).Time(n_samples_percycle*n_transient_cycles)],ylim,'--b','LineWidth',1)
plot([data(ind).Time(n_samples_percycle*(n_initial_cycles+n_cycles))
data(ind).Time(n_samples_percycle*(n_initial_cycles+n_cycles))],ylim,'--b','LineWidth',1)
xlabel('Time, t [s]')
ylabel('Amplitude, A [V]')
if max(abs(data(ind).Accelerometer_V))>9.9
plot(xlim,[10 10],'-r','LineWidth',1.5)
plot(xlim,[-10 -10],'-r','LineWidth',1.5)
text(max(xlim)/3,9,'Limit value reached','Color','r', 'FontSize', 12)
else
end
set(gca, 'FontSize', 12)
set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
print(strcat(dir.path, '\',char(Results(ii).ID),'_TimeHistory'),'-dtiff','-r600')
end

%% Evaluation of G
for ii=1:length(varname)
    eval(['data = ',char(varname(ii)),';']);
    ind=find([data.Frequency_Hz]==Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz);
    Results(ii).Diameter_mm=D_i-mean(data(ind).Radial_disp_1_mm)-
mean(data(ind).Radial_disp_2_mm);

```

```

Results(ii).Height_mm=H_i-mean(data(ind).Height_mm);
Results(ii).Volume_mm3=pi()*Results(ii).Diameter_mm^2*Results(ii).Height_mm/4;
Results(ii).pwp_kPa=mean(data(ind).Backpressure_kPa);
Inertia_sample=(Weight_sample/980.665)*(Results(ii).Diameter_mm/10)^2/8;
In_ratio=Inertia_sample/Inertia_top;
Beta1=ln_ratio^0.4893*0.9347;
fun = @(Beta) ln_ratio-Beta*tan(Beta);
Beta = fzero(fun,Beta1);
Results(ii).G_MPa=(Weight_sample*(2*pi()*Results(ii).Height_mm/Beta)^2*(Results(ii).Force
dVibrations.f_max_Hz^2))/(Results(ii).Volume_mm3*1000000);
Results(ii).gamma_perc=(2*2^0.5*980.665*Results(ii).ForcedVibrations.A_max_V)*(Results(i
i).Diameter_mm/2)*1000000/(3*Results(ii).Height_mm*(2*pi()*Results(ii).ForcedVibrations.f_
max_Hz)^2*50*2500);
Results(ii).Dhp_perc=(Results(ii).ForcedVibrations.f2_Hz-
Results(ii).ForcedVibrations.f1_Hz)*100/(2*Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz);
end

```

#### %% Free vibrations

```

modelfun = @(b,x) b(1) .* exp(-b(2).*x);
beta0 = [0.1, 0.01];
for ii=1:length(varname)
    eval(['data = ',char(varname(ii)), ';']);
    ind=find([data.Frequency_Hz]==Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz);
Results(ii).FreeVibrations.A_V=data(ind).Accelerometer_V(1,n_samples_percycle*(n_initial_
cycles+n_cycles):end);
Results(ii).FreeVibrations.Time_s=0:1/(Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz*n_samples_p
ercycle):(length(Results(ii).FreeVibrations.A_V)-
1)/(Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz*n_samples_percycle);

```

#### %Exponential fitting

```

[pks,locs_p,vals,locs_v] =
getpeaks(Results(ii).FreeVibrations.Time_s,Results(ii).FreeVibrations.A_V,n_samples_percy
cle);
tbl = table(locs_p',pks');
mdl = fitnlm(tbl, modelfun, beta0);
coefficients_pks = mdl.Coefficients{:, 'Estimate'};
tbl = table(locs_v',vals');
mdl = fitnlm(tbl, modelfun, beta0);
coefficients_vals = mdl.Coefficients{:, 'Estimate'};
Results(ii).FreeVibrations.D_peaks=coefficients_pks(2)*100/(2*pi()*Results(ii).ForcedVibratio
ns.f_max_Hz);

```

```

Results(ii).FreeVibrations.D_vals=coefficients_vals(2)*100/(2*pi()*Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz);
Results(ii).Dfv_perc=mean([Results(ii).FreeVibrations.D_peaks,Results(ii).FreeVibrations.D_vals]);

%plot
figure
title(strcat('Test ',extractAfter(Results(ii).ID,"Test_"),' - D=
',num2str(round(Results(ii).Dfv_perc,1)), ' %'),'FontWeight','normal')
hold on
box on
a=plot(Results(ii).FreeVibrations.Time_s,Results(ii).FreeVibrations.A_V,'-
k','LineWidth',0.5);
b=scatter(locs_p,pks,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',[0 .7 .7]);
c=scatter(locs_v,vals,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',[1 .6 0]);
d=plot(locs_p(1):1/(Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz*n_samples_percycle):locs_p(end),coefficients_pks(1)*exp(-coefficients_pks(2)*[locs_p(1):1/(Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz*n_samples_percycle):locs_p(end)]),'LineWidth',1,'Color',[0 .7 .7]);
e=plot(locs_v(1):1/(Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz*n_samples_percycle):locs_v(end),(coefficients_vals(1)*exp(-coefficients_vals(2)*[locs_v(1):1/(Results(ii).ForcedVibrations.f_max_Hz*n_samples_percycle):locs_v(end)]),'LineWidth',1,'Color',[1 .6 0]);
xlabel('Time, t [s]')
ylabel('Amplitude, A [V]')
ylim(max(abs(ylim)).*[-1 1])
legend([b c],strcat('D_{peaks}=',num2str(round(Results(ii).FreeVibrations.D_peaks,1)),'%'),strcat('D_{valleys}=',num2str(round(Results(ii).FreeVibrations.D_vals,1)),'%'),'Location','southeast')
set(gca, 'FontSize', 12)
set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
print(strcat(dir.path, '\',char(Results(ii).ID),'_Damping'),'-dtiff','-r600')
end
figure
set(gcf,'units','points','position',[200,200,800,300])
subplot(1,2,1)
box on
hold on
scatter([Results.gamma_perc],[Results.G_MPa],50,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',[0 .7 .7]);
set(gca,'xscale','log')

```

```

xlabel('Cyclic Shear Strain Amplitude, \gamma_c [%]', 'FontWeight', 'normal', 'FontSize', 12)
ylabel('Secant Shear Modulus, G [MPa]', 'FontWeight', 'normal', 'FontSize', 12)
grid on
set(gca, 'FontSize', 12)
set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
subplot(1,2,2)
box on
hold on
scatter([Results.gamma_perc],[Results.Dfv_perc],50,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',
,[0 .7 .7]);
scatter([Results.gamma_perc],[Results.Dhp_perc],50,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',
,[1 .6 0]);
set(gca,'xscale','log')
xlabel('Cyclic Shear Strain Amplitude, \gamma_c [%]', 'FontWeight', 'normal', 'FontSize', 12)
ylabel('Damping Ratio, D [%]', 'FontWeight', 'normal', 'FontSize', 12)
grid on
legend('Free Vibrations', 'Half-Power Bandwidth', 'Location', 'southeast')
set(gca, 'FontSize', 12)
set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
print(strcat(dir.path, 'Results'), '-dtiff', '-r600')

save(strcat(TEST_NAME, '_Results.mat'), 'Results');

```

### ***TTC\_Storing:***

```

%% Basic information
TEST_NAME = 'TTC_168_50_PRH.mat';
MY_TEST_FILE_PATH = 'C:\Users\ciaandre\Desktop\TTC_168_PRH_50\TTC';
nsamplespercycle=200;
files = dir(MY_TEST_FILE_PATH);
% Get a logical vector that tells which is a directory.
dirFlags = [files.isdir];
% Extract only those that are directories.
subFolders = files(dirFlags);
Kaman_Res=0.0003;

index=1;
for iDir=3:length(subFolders)
testDirectory = strcat(subFolders(iDir).folder, '\', subFolders(iDir).name);
folder = dir(fullfile(testDirectory, '*.tdms'));
fileStruct = dir(fullfile(testDirectory, '*.tdms'));
fileNames = {fileStruct.name};

```

```

Struct = TDMS_readTDMSFile(fullfile(testDirectory,fileNames{1}));

%% Filtering and storing
Test.Frequency_Hz=round(1/(Struct.propValues{1,4}{1,3}*nsamplespercycle),1);
% Design of the filter
Fn = Test.Frequency_Hz*nsamplespercycle/(2); % Nyquist Frequency (Hz)
Fco = 2; % Cutoff Frequency (Hz)
Wp = Fco/Fn; % Normalised Cutoff Frequency (rad)
Ws = 1.2*Wp; % Stopband Frequency (rad)
Rp = 5; % Passband Ripple (dB)
Rs = 20; % Stopband Ripple (dB)
[n,Wn] = buttord(Wp,Ws,Rp,Rs); % Calculate Filter Order
[b,a] = butter(n,Wn); % Calculate Filter Coefficients
[sos,g] = tf2sos(b,a); % Convert To Second Order Section Representation

Test.Time=(Struct.data{1,3}-Struct.data{1,3}(1,1))*60*60*24;
Test.Accelerometer_V=filtfilt(sos,g,Struct.data{1,4})-mean(filtfilt(sos,g,Struct.data{1,4}));
Test.Moment_Nm=filtfilt(sos,g,Struct.data{1,5})-mean(filtfilt(sos,g,Struct.data{1,5}));
Test.Rotation1_mm=filtfilt(sos,g,Struct.data{1,6})-mean(filtfilt(sos,g,Struct.data{1,6}));
Test.Rotation2_mm=filtfilt(sos,g,Struct.data{1,7})-mean(filtfilt(sos,g,Struct.data{1,7}));

Test.Height_mm=Struct.data{1,8};
Test.Radial_disp_1_mm=Struct.data{1,9};
Test.Radial_disp_2_mm=Struct.data{1,10};
Test.Cellpressure_kPa=Struct.data{1,11};
Test.Backpressure_kPa=Struct.data{1,12};
Test.Volume_cm3=Struct.data{1,13};

figure
set(gcf,'units','points','position',[200,200,800,550])
subplot(2,2,1)
plot(Test.Time,Struct.data{1,4}-mean(Struct.data{1,4}))
hold on
plot(Test.Time,Test.Accelerometer_V)
xlabel('Time, t [s]')
ylabel('Amplitude, A [V]')
set(gca, 'FontSize', 12)
set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
subplot(2,2,2)
plot(Test.Time,Struct.data{1,5}-mean(Struct.data{1,5}))
hold on

```

```

plot(Test.Time,Test.Moment_Nm)
    xlabel('Time, t [s]')
    ylabel('Moment,M [Nm]')
    set(gca, 'FontSize', 12)
    set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
subplot(2,2,3)
plot(Test.Time,Struct.data{1,6}-mean(Struct.data{1,6}))
hold on
plot(Test.Time,Test.Rotation1_mm)
plot(Test.Time,ones(length(Test.Time),1)*Kaman_Res,'--k','LineWidth',2)
plot(Test.Time,-ones(length(Test.Time),1)*Kaman_Res,'--k','LineWidth',2)
    xlabel('Time, t [s]')
    ylabel('Rotation_1, [mm]')
    set(gca, 'FontSize', 12)
    set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
subplot(2,2,4)
plot(Test.Time,Struct.data{1,7}-mean(Struct.data{1,7}))
hold on
plot(Test.Time,Test.Rotation2_mm)
plot(Test.Time,ones(length(Test.Time),1)*Kaman_Res,'--k','LineWidth',2)
plot(Test.Time,-ones(length(Test.Time),1)*Kaman_Res,'--k','LineWidth',2)
    xlabel('Time, t [s]')
    ylabel('Rotation_2, [mm]')
    set(gca, 'FontSize', 12)
    set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
print(strcat(subFolders(iDir).name,'_TimeHistories'),'-dtiff','-r300');

RMS=(rms(Test.Rotation1_mm)+rms(Test.Rotation2_mm))/2;

eval([subFolders(iDir).name '=Test;'])
filename=subFolders(iDir).name;

if index==1
    if RMS>Kaman_Res
        save(TEST_NAME,filename)
        index=2;
    else
        strcat(subFolders(iDir).name,': Average measured value lower than the resolution of the
Kaman')
    end
else

```

```

if RMS>Kaman_Res
save(TEST_NAME,filename,'-append')
else
strcat(subFolders(iDir).name,': Average measured value lower than the resolution of the
Kaman')
end
end
end
end

```

### **TTC\_Elaboration:**

```

load TTC_154_MSC.mat
varname = who;

%% Basic information
TEST_NAME = 'TTC_154_MSC';
D_i=50; %initial Diamter in mm
H_i=100; %initial Height in mm
Weight_sample=399.80; %total weight of the sample in gr
Ref_1=14; %Distance of the Kaman sensors from the ref point in mm
Ref_2=14;

n_cycles=25;
n_samples_percycle=200;

mkdir Plot
dir = what('Plot');

%% G and D for each cycle
for ii=1:length(varname)
eval(['data = ',char(varname(ii)),'];');
Results(ii).ID=varname(ii);

figure
set(gcf,'units','points','position',[200,-200,200*5,200*n_cycles/5])
title(strcat('Test ',extractAfter(Results(ii).ID, "Test_")), 'FontWeight','normal')

for kk=1:n_cycles
if kk==1
Rot_1=data.Rotation1_mm((kk-1)*n_samples_percycle+3:(kk)*n_samples_percycle);
Rot_1=[data.Rotation1_mm((kk-1)*n_samples_percycle+3) data.Rotation1_mm((kk-
1)*n_samples_percycle+3) Rot_1 data.Rotation1_mm((kk-1)*n_samples_percycle+3)];
Rot_2=data.Rotation2_mm((kk-1)*n_samples_percycle+3:(kk)*n_samples_percycle);

```

```

Rot_2=[data.Rotation2_mm((kk-1)*n_samples_percycle+3) data.Rotation2_mm((kk-
1)*n_samples_percycle+3) Rot_2 data.Rotation2_mm((kk-1)*n_samples_percycle+3)];
Moment=data.Moment_Nm((kk-1)*n_samples_percycle+3:(kk)*n_samples_percycle);
Moment=[data.Moment_Nm((kk-1)*n_samples_percycle+3) data.Moment_Nm((kk-
1)*n_samples_percycle+3) Moment data.Moment_Nm((kk-1)*n_samples_percycle+3)];
else
Rot_1=data.Rotation1_mm((kk-1)*n_samples_percycle+1:(kk)*n_samples_percycle);
Rot_1=[Rot_1 data.Rotation1_mm((kk-1)*n_samples_percycle+1)];
Rot_2=data.Rotation2_mm((kk-1)*n_samples_percycle+1:(kk)*n_samples_percycle);
Rot_2=[Rot_2 data.Rotation2_mm((kk-1)*n_samples_percycle+1)];
Moment=data.Moment_Nm((kk-1)*n_samples_percycle+1:(kk)*n_samples_percycle);
Moment=[Moment data.Moment_Nm((kk-1)*n_samples_percycle+1)];
end

Teta=atan((Rot_1/(15+Ref_1)+Rot_2/(15+Ref_2))/2);
Results(ii).Cycles.Diameter_mm(1,kk)=D_i-mean(data.Radial_disp_1_mm((kk-
1)*n_samples_percycle+1:(kk)*n_samples_percycle))-mean(data.Radial_disp_2_mm((kk-
1)*n_samples_percycle+1:(kk)*n_samples_percycle));
Results(ii).Cycles.Height_mm(1,kk)=H_i-mean(data.Height_mm((kk-
1)*n_samples_percycle+1:(kk)*n_samples_percycle));

Results(ii).Cycles.pwp_kPa(1,kk)=mean(data.Backpressure_kPa((kk-
1)*n_samples_percycle+1:(kk)*n_samples_percycle));

Results(ii).Cycles.Tau_kPa(:,kk)=(4/(3*pi()))*Moment/((Results(ii).Cycles.Diameter_mm(1,kk)
/2)^3)*1000000;

Results(ii).Cycles.gamma_perc(:,kk)=2/3*Teta/Results(ii).Cycles.Height_mm(1,kk)*Results(ii)
.Cycles.Diameter_mm(1,kk)/2*100;

Area=trapz(Results(ii).Cycles.gamma_perc(:,kk),Results(ii).Cycles.Tau_kPa(:,kk));

ind_1_A=find(Results(ii).Cycles.Tau_kPa(:,kk)==max(Results(ii).Cycles.Tau_kPa(:,kk)),1);

ind_1_B=find(Results(ii).Cycles.Tau_kPa(:,kk)==min(Results(ii).Cycles.Tau_kPa(:,kk)),1);
G1=(Results(ii).Cycles.Tau_kPa(ind_1_A,kk)-
Results(ii).Cycles.Tau_kPa(ind_1_B,kk))/(10*(Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_1_A,kk)-
Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_1_B,kk)));
D1=Area*100/(4*pi()*((Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_1_A,kk)-
Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_1_B,kk))/2)*((Results(ii).Cycles.Tau_kPa(ind_1_A,kk)-
Results(ii).Cycles.Tau_kPa(ind_1_B,kk))/4));

```

```

ind_2_A=find(Results(ii).Cycles.gamma_perc(:,kk)==max(Results(ii).Cycles.gamma_perc(:,k
k)),1);

ind_2_B=find(Results(ii).Cycles.gamma_perc(:,kk)==min(Results(ii).Cycles.gamma_perc(:,kk
)),1);
    G2=(Results(ii).Cycles.Tau_kPa(ind_2_A,kk)-
Results(ii).Cycles.Tau_kPa(ind_2_B,kk))/(10*(Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_A,kk)-
Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_B,kk)));
    D2=Area*100/(4*pi)*((Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_A,kk)-
Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_B,kk))/2)*((Results(ii).Cycles.Tau_kPa(ind_2_A,kk)-
Results(ii).Cycles.Tau_kPa(ind_2_B,kk))/4));

    Results(ii).Cycles.G_MPa(1,kk)=mean([G1 G2]);
    Results(ii).Cycles.D_perc(1,kk)=mean([D1 D2]);
    Results(ii).Cycles.gammac_perc(1,kk)=(Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_A,kk)-
Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_B,kk))/2;

    subplot(n_cycles/5,5,kk)
    plot(Results(ii).Cycles.gamma_perc(:,kk),Results(ii).Cycles.Tau_kPa(:,kk))
    box on
    hold on
    xlabel('\gamma [%]', 'FontWeight', 'normal', 'FontSize', 12)
    ylabel('\tau [kPa]', 'FontWeight', 'normal', 'FontSize', 12)
    plot(max(abs([Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_A,kk)
Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_B,kk)]))*[-1
1],max(abs([Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_A,kk)
Results(ii).Cycles.gamma_perc(ind_2_B,kk)]))*[-Results(ii).Cycles.G_MPa(1,kk)*10
Results(ii).Cycles.G_MPa(1,kk)*10], '--r', 'LineWidth', 1.5)
    end

print(strcat(dir.path, '\Cycles', char(varname(ii))), '-dtiff', '-r300')

Results(ii).Diameter_mm=mean(Results(ii).Cycles.Diameter_mm(2:end-1));
Results(ii).Height_mm=mean(Results(ii).Cycles.Height_mm(2:end-1));
Results(ii).pwp_kPa=mean(Results(ii).Cycles.pwp_kPa(2:end-1));
Results(ii).G_MPa=mean(Results(ii).Cycles.G_MPa(2:end-1));
Results(ii).D_perc=mean(Results(ii).Cycles.D_perc(2:end-1));
Results(ii).gammac_perc=mean(Results(ii).Cycles.gammac_perc(2:end-1));

figure
title(strcat('Test ', extractAfter(Results(ii).ID, "Test_")), 'FontWeight', 'normal')
set(gcf, 'units', 'points', 'position', [200,200,800,300])

```

```

subplot(1,2,1)
box on
hold on
scatter(2:1:n_cycles,Results(ii).Cycles.G_MPa(2:end),50,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',[0 .7 .7]);
a=plot([1 n_cycles],[Results(ii).G_MPa Results(ii).G_MPa],'--r','LineWidth',1.5);
legend([a],strcat('G = ',num2str(round(Results(ii).G_MPa,1)),' MPa'),'Location','southeast')
xlabel('Nr. Cycle, [-]','FontWeight','normal','FontSize',12)
ylabel('Secant Shear Modulus, G [MPa]','FontWeight','normal','FontSize',12)
grid on
set(gca, 'FontSize', 12)
set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
subplot(1,2,2)
box on
hold on
scatter(2:1:n_cycles,Results(ii).Cycles.D_perc(2:end),50,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',[0 .7 .7]);
a=plot([1 n_cycles],[Results(ii).D_perc Results(ii).D_perc],'--r','LineWidth',1.5);
legend([a],strcat('D = ',num2str(round(Results(ii).D_perc,1)),' %'),'Location','southeast')
xlabel('Nr. Cycle, [-]','FontWeight','normal','FontSize',12)
ylabel('Damping Ratio, D [%]','FontWeight','normal','FontSize',12)
grid on
set(gca, 'FontSize', 12)
set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
print(strcat(dir.path, '\Res',char(varname(ii))),'-dtiff','-r300')
end

figure
set(gcf,'units','points','position',[200,200,800,300])
subplot(1,2,1)
box on
hold on
scatter([Results.gammac_perc],[Results.G_MPa],50,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',[0 .7 .7]);
set(gca,'xscale','log')
xlabel('Cyclic Shear Strain Amplitude, \gamma_c [%]','FontWeight','normal','FontSize',12)
ylabel('Secant Shear Modulus, G [MPa]','FontWeight','normal','FontSize',12)
grid on
set(gca, 'FontSize', 12)
set(gca, 'FontName', 'Helvetica')
subplot(1,2,2)

```

```
box on
hold on
scatter([Results.gammac_perc],[Results.D_perc],50,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor',
[0 .7 .7]);
set(gca,'xscale','log')
xlabel('Cyclic Shear Strain Amplitude, \gamma_c [%]','FontWeight','normal','FontSize',12)
ylabel('Damping Ratio, D [%]','FontWeight','normal','FontSize',12)
grid on
set(gca, 'FontSize', 12)
set(gca, 'FontName', 'Helvetica')

print(strcat(dir.path,'Results'),'-dtiff','-r300')

save('Results.mat','Results');
```

## APPENDICE 3

Script di Matlab per la realizzazione della variabile 'Data' (modificato da Coppetta I., 2019)

### **Campioni:**

%% lettura dei dati dei campioni dai file Excel

```
Lista=dir('*.*xlsx');
```

```
for ii=1:size(Lista,1)
```

```
    C(ii).ID = Lista(ii).name;
```

```
    [~,C(ii).PROGETTO] = xlsread (Lista(ii).name,'1','B2');
```

```
    [~,C(ii).LABORATORIO] = xlsread (Lista(ii).name,'1','B4');
```

```
    [~,C(ii).COMUNE] = xlsread (Lista(ii).name,'1','A2');
```

```
    [~,C(ii).LATITUDINE] = xlsread (Lista(ii).name,'1','A5');
```

```
    [~,C(ii).LONGITUDINE] = xlsread (Lista(ii).name,'1','A8');
```

```
    [~,C(ii).DATA] = xlsread (Lista(ii).name,'1','A11');
```

```
    [~,C(ii).NOTE] = xlsread (Lista(ii).name,'1','B22');
```

```
    C(ii).Z = xlsread (Lista(ii).name,'1','A20');
```

```
    [~,C(ii).GRANULOMETRIA.descrizione] = xlsread (Lista(ii).name,'1','C3');
```

```
    C(ii).GRANULOMETRIA.percentuali.d = xlsread (Lista(ii).name,'1','AG3:AG40');
```

```
    C(ii).GRANULOMETRIA.percentuali.passante = xlsread (Lista(ii).name,'1','AH3:AH40');
```

```
    C(ii).GRANULOMETRIA.percentuali.ghiaia = xlsread (Lista(ii).name,'1','D4');
```

```
    C(ii).GRANULOMETRIA.percentuali.sabbia = xlsread (Lista(ii).name,'1','E4');
```

```
    C(ii).GRANULOMETRIA.percentuali.limo = xlsread (Lista(ii).name,'1','F4');
```

```
    C(ii).GRANULOMETRIA.percentuali.argilla = xlsread (Lista(ii).name,'1','G4');
```

```
    C(ii).GRANULOMETRIA.percentuali.d60 = xlsread (Lista(ii).name,'1','E6');
```

```
    C(ii).GRANULOMETRIA.percentuali.d10 = xlsread (Lista(ii).name,'1','F6');
```

```
    C(ii).PS = xlsread (Lista(ii).name,'1','H2');
```

```
    C(ii).IP = xlsread (Lista(ii).name,'1','I2');
```

```
    C(ii).WL = xlsread (Lista(ii).name,'1','J2');
```

```
    C(ii).WN = xlsread (Lista(ii).name,'1','Y2');
```

```
    C(ii).SIGMA = xlsread (Lista(ii).name,'1','K2');
```

```
    C(ii).einiziale = xlsread (Lista(ii).name,'1','L2');
```

```
    C(ii).econs = xlsread (Lista(ii).name,'1','Z2');
```

```
    C(ii).Gs = xlsread (Lista(ii).name,'1','AA2');
```

```
    C(ii).RC.gamma = xlsread (Lista(ii).name,'1','M3:M40');
```

```
    C(ii).RC.G = xlsread (Lista(ii).name,'1','N3:N40');
```

```
    C(ii).RC.G0 = xlsread (Lista(ii).name,'1','O3');
```

```
    C(ii).RC.G_G0 = xlsread (Lista(ii).name,'1','P3:P40');
```

```
    C(ii).RC.gammaD = xlsread (Lista(ii).name,'1','L5:L42');
```

```
    C(ii).RC.Dfv = xlsread (Lista(ii).name,'1','Q3:Q40');
```

```

C(ii).RC.Dhp = xlsread (Lista(ii).name,'1','R3:R40');
C(ii).RC.DELTAU = xlsread (Lista(ii).name,'1','AB2:AB40');
C(ii).RC.f = xlsread (Lista(ii).name,'1','A12:A140');
C(ii).RC.D0 = xlsread (Lista(ii).name,'1','Z5');
C(ii).RC.D0hp = xlsread (Lista(ii).name,'1','Y7');
C(ii).TTC.gamma = xlsread (Lista(ii).name,'1','S3:S40');
C(ii).TTC.G = xlsread (Lista(ii).name,'1','T3:T40');
C(ii).TTC.G0 = xlsread (Lista(ii).name,'1','U3');
C(ii).TTC.G_G0 = xlsread (Lista(ii).name,'1','V3:V40');
C(ii).TTC.gammaD= xlsread (Lista(ii).name,'1','AA5:AA60');
C(ii).TTC.D = xlsread (Lista(ii).name,'1','W3:W40');
C(ii).TTC.DELTAU = xlsread (Lista(ii).name,'1','AC2:AC40');
C(ii).TTC.f = xlsread (Lista(ii).name,'1','X3');
C(ii).TTC.D0 = xlsread (Lista(ii).name,'1','Y5');
C(ii).DSDSS.gamma = xlsread (Lista(ii).name,'1','AJ3:AJ43');
C(ii).DSDSS.G = xlsread (Lista(ii).name,'1','AK3:AK43');
C(ii).DSDSS.G0 = xlsread (Lista(ii).name,'1','AL3');
C(ii).DSDSS.G_G0 = xlsread (Lista(ii).name,'1','AM3:AM43');
C(ii).DSDSS.D = xlsread (Lista(ii).name,'1','AN3:AN43');
C(ii).DSDSS.D0 = xlsread (Lista(ii).name,'1','Z7');
C(ii).DSDSS.f = xlsread (Lista(ii).name,'1','AO3');
C(ii).DSDSS.DELTAU = xlsread (Lista(ii).name,'1','AP3');

```

end

%% correzione delle colonne di D

```

for i=1:length(C)
    for ii=1:length(C(i).RC.Dfv)
        if C(i).RC.Dfv(ii) == 0
            disp (C(i).ID)
            C(i).RC.Dfv(ii) = NaN;
        end
    end
end
end

```

```

for i=1:length(C)
    for ii=1:length(C(i).RC.Dhp)
        if C(i).RC.Dhp(ii) == 0
            disp (C(i).ID)
            C(i).RC.Dhp(ii) = NaN;
        end
    end
end

```

```
end  
end
```

```
for i=1:length(C)  
    for ii=1:length(C(i).TTC.D)  
        if C(i).TTC.D(ii) == 0  
            disp (C(i).ID)  
            C(i).TTC.D(ii) = NaN;  
        end  
    end  
end  
end
```

```
for i=1:length(C)  
    for ii=1:length(C(i).DSDSS.D)  
        if C(i).DSDSS.D(ii) == 0  
            disp (C(i).ID)  
            C(i).DSDSS.D(ii) = NaN;  
        end  
    end  
end  
end
```

```
Data=C;
```

```
% salvataggio della variabile 'Data'  
save('Data','Data')
```

## APPENDICE 4

SINTESI DEGLI STUDI CHE CONTENGONO INFORMAZIONI SULLA SOGLIA VOLUMETRICA E SULL'INDICE DI PLASTICITÀ FIGURA 4.17  
(DA VUCETIC, 1994)

References	Type of Test	Type of Soil	Plasticity Index, $PI$	Volumetric Threshold Shear Strain $\gamma_v$ (%)	Comment	Symbol in Fig. 4.17
1	2	3	4	5	6	7
Silver and Seed (1971)	Drained cyclic simple shear	Uniform clean air dry sand	0	0.020-0.030	$D_r = 45\% - 80\%$	
Youd (1972)	Drained cyclic simple shear	Fully saturated clean sand	0	0.010-0.020	$D_r = 77\%$	
Pyke (1973); Pyke et al. (1975)	Drained cyclic simple shear	Partially saturated clayey sand	Estimated 20-30	0.100	Two different $\gamma_{sv}$	
Andreasson (1979, 1981)	Resonant column on solid and hollow cylinder specimens	Fully saturated clay	Approx. 40-50	0.040-0.100	OCR = ?; $\gamma_v$ evaluated from axial settlements and pore pressures	
Matsui et al. (1980)	Undrained cyclic triaxial	Fully saturated clay	55	$\approx 0.100$	NC	
Dobry et al. (1981)	Undrained cyclic triaxial	Fully saturated clean sand	0	0.012-0.028	$D_r = 60\%$ ; OCR=1-8	
Dobry et al. (1982); Ladd et al. (1989)	Undrained cyclic triaxial	Three different fully saturated clean sands	0	0.010-0.015	$D_r = 45\% - 80\%$ ; NC	
Andersen (1983)	Constant volume equivalent undrained cyclic simple shear	Fully saturated marine clay	27	$\approx 0.060 - 0.270$	OCR = 1-10; $\gamma_v$ estimated indirectly from modulus reduction curves	
Mackey and Saada (1984)	Undrained cyclic triaxial torsional hollow cylinder	Three different fully saturated clays	19-35	0.040	OCR = ?	
Dyvik et al. (1984)	Undrained cyclic triaxial	Two different fully saturated clean sands	0	0.007-0.015	$D_r = 20\% - 60\%$ ; NC; $K_r = 0.40 - 1.00$	
NRC (1985), data compiled by Dobry	Undrained cyclic triaxial	Eight different fully saturated clean and silty sands	0	0.01-0.015	Loose to dense; Different specimen preparation methods	
Hynes-Griffin (1988)	Undrained cyclic triaxial	Gravel	0	$\approx 0.005 - 0.020$	$D_r = 25\% - 45\%$ ; OCR=1-2; $K_r = 0.50 - 2.00$	
Ohara and Matsuda (1988)	Truly undrained and drained cyclic simple shear	Fully saturated kaolinite clay	25	0.080-0.100	OCR = 1-6; $\gamma_v$ evaluated from pore pressures and associated consolidation settlements	
Georgiannou et al. (1991)	Resonant column torsional shear on solid cylinder specimens	Fully saturated clay	30	$\approx 0.050 - 0.060$	OCR = ?	
Kim et al. (1991)	Resonant column torsional shear	Clean sand, silty sand and eight natural clays	0-53	0.035-0.050	OCR=?; $\gamma_v$ evaluated from modulus reduction	
Chu and Vucetic (1992)	Drained cyclic simple shear	Partially saturated compacted clay	11	0.070-0.200	Three different $\gamma_{sv}$ and $w$	

NC = normally consolidated; OC = overconsolidated;  $K_r = \bar{\sigma}_v / \bar{\sigma}_v'$ ;  $\gamma_{sv}$  = dry unit weight;  $w$  = water content