



*Anna Maria Pellegrino*

STUDIO TEORICO SPERIMENTALE DEL  
COMPORTAMENTO REOLOGICO DEI TERRENI  
COINVOLTI NELLE COLATE RAPIDE

Tesi di Dottorato  
*XXIII ciclo*

*Il Coordinatore*  
*Prof. Ing. Luciano ROSATI*

*Il Tutore*  
*Prof. Ing. Aldo EVANGELISTA*

*Il co-Tutore*  
*Dott. Ing. Anna SCOTTO di SANTOLO*



---

## Riassunto

Le colate rapide di fango sono fenomeni franosi a carattere catastrofico e parossistico che interessano frequentemente i versanti della regione Campania. Lo studio di due problematiche di fondamentale rilievo quali l'innescò e la propagazione della massa risulta di fondamentale importanza per la stima dell'intensità del rischio e la determinazione di appropriate misure di protezione. Nel presente lavoro vengono approfondite le incognite legate alla propagazione, ossia alla fase di scorrimento e di arresto della massa in frana. Per lo studio della propagazione del corpo di frana sono stati implementati modelli tridimensionali basati sulle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, integrate lungo la profondità del flusso, nei quali di fondamentale importanza è l'assegnazione di un'opportuna legge costitutiva ai terreni del corpo di colata. Alcuni modelli considerano la massa franante come composta da due fasi separate e interagenti tra di loro, la fase liquida e quella solida, mentre altri schematizzano il corpo di frana come un unico corpo continuo omogeneo, detto "fluido equivalente", le cui proprietà riflettono adeguatamente quelle del materiale coinvolto. Il metodo più semplice è quello di assimilare il fango a un flusso continuo viscoso. La presente tesi rimane legata a questo approccio e cerca di migliorare le conoscenze teorico-sperimentali sulla reologia del materiale viscoso cui il fango viene ricondotto. L'obiettivo della ricerca è stata la determinazione del comportamento reologico dei terreni piroclastici campani interessati da fenomeni di colata rapida di fango considerando il completo assortimento granulometrico dei materiali. Nello sviluppo dello studio, alcuni terreni piroclastici campani, campionati nelle zone di alimentazione di colate di fango occorse e rappresentativi dei differenti contesti nei quali si sono verificati gli eventi,

sono stati sottoposti ad una fitta campagna di prove di laboratorio mediante sistemi di misura tradizionali e mediante un'apparecchiatura innovativa progettata e messa a punto nel Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica e Ambientale dell'Università degli studi di Napoli "Federico II", ossia il reometro a trascinamento di sfera SDR (Sphere Drag Rheometer). I sistemi reometrici tradizionali (reometri rotazionali, piano inclinato e penetrometro a cono) sono stati impiegati per analizzare miscele acqua-sedimento a granulometria fine (ossia considerando il parziale assortimento granulometrico dei materiali considerati) a causa delle ridotte dimensioni di tali strumenti. La sperimentazione suddetta ha mostrato che il comportamento reologico di tali sospensioni è quello tipico dei fluidi non Newtoniani dotati di tensione di soglia. Le miscele acqua-sedimento esaminate si comportano come fluidi omogenei in un intervallo molto modesto di concentrazione solida volumetrica tipicamente non maggiore del 10%, dato che la frazione argillosa è solitamente molto ridotta (e talora addirittura assente). È stato osservato che il flusso dei materiali esaminati è solitamente instabile: una volta che il valore dello sforzo imposto supera quello della tensione di soglia statica, le miscele cominciano a fluire "bruscamente", raggiungendo subito elevati valori della velocità di deformazione. Inoltre si è visto che il contenuto di solido condiziona enormemente il comportamento reologico dei materiali: nel ristretto intervallo di concentrazione solida volumetrica considerato la tensione di soglia cresce molto rapidamente al crescere della frazione solida. I materiali analizzati nel presente lavoro presentano un vasto assortimento granulometrico e quindi si è posta la necessità di analizzare anche miscele a granulometria grossolana ( $d_{max} > 1\text{mm}$ ) ed a tal fine è stata progettata e messa a punto l'apparecchiatura reometrica innovativa (il reometro SDR). La sperimentazione condotta con il reometro SDR ha mostrato che il comportamento reologico di tali sospensioni è quello tipico dei fluidi non Newtoniani dotati di tensione di soglia e che i parametri reologici delle miscele crescono al crescere del contenuto in solido della miscela. Inoltre è stato osservato che l'aggiunta di particelle di grandi dimensioni provoca un decremento dei parametri reologici delle miscele. I dati sperimentali ricavati attraverso la sperimentazione in laboratorio sono stati opportunamente interpretati con il modello di Bingham. Quest'ultimo è stato poi utilizzato per condurre alcune simulazioni numeriche di un caso storico di colata rapida di

---

fango occorso in Campania (Pozzano, Penisola Sorrentina, 1997) ben documentato in letteratura. Le analisi numeriche sono state condotte con il codice di calcolo DAN-W, un modello per l'analisi delle colate rapide basato su una soluzione lagrangiana delle equazioni del moto. Il modello di Bingham che ha meglio stimato le caratteristiche dinamiche dell'evento è stato quello nel quale la tensione di soglia è stata calcolata a partire dalle grandezze geometriche dell'evento e la viscosità plastica è stata calcolata a partire dall'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro. Infatti mentre la viscosità è una caratteristica intrinseca del corpo di frana e può, quindi, essere stimata sottoponendo a prove in reometro miscele ricostituite con il terreno coinvolto, la tensione di soglia dipende non solo dalle condizioni della massa franante ma anche dalla storia tensionale del terreno in sito e deve, quindi, essere stimata sia attraverso l'osservazione delle caratteristiche dei depositi sia attraverso i risultati di prove di laboratorio quali quelle condotte nel presente lavoro. I risultati sperimentali conseguiti attraverso la presente sperimentazione potrebbero essere utili strumenti per la comprensione dei processi alla base del comportamento dei terreni coinvolti in fenomeni di colata rapida di fango. Le condizioni di moto incipiente delle masse frananti potrebbero essere interpretate attraverso la definizione della tensione di soglia statica. Le caratteristiche della fase di propagazione del corpo di frana potrebbero essere interpretate dall'andamento dello sforzo di taglio nel ramo decrescente della curva di flusso mentre le condizioni di arresto potrebbero essere spiegate attraverso la stima della tensione di soglia dinamica



---

## Abstract

Debris flows are landslides of a catastrophic and paroxysmal nature, which frequently affects the slopes of the Campania region (in southern Italy). The study of two fundamental issues such as the initiation and propagation of the mass is indispensable to estimate the risk and determine appropriate protection measures. The present work is focused on the unknowns related to the propagation, *i.e.* the phases of flow and stop of the mass. Several three-dimensional models – based on the equations of mass and momentum conservation, integrated along the depth of flow – have been implemented to study the propagation of the mass. In such models the assignment of an appropriate constitutive law to the involved soil is very important. Some models consider the mass as composed of two separate phases, the liquid phase and the solid phase, while others consider the mass as a homogeneous continuous body, known as “equivalent fluid”. The simplest method is to treat the mud as a continuous viscous fluid. This thesis is linked to this approach and seeks to improve the theoretical and experimental knowledge on the rheology of mud. The aim of the research is the determination of the rheological behaviour of the pyroclastic Campanian soils affected by debris flow phenomena considering the complete grain size distribution. In developing the study, some pyroclastic Campanian soils – sampled in the source area of debris flow and representative of the different contexts in which the events occurred – were analyzed using traditional rheometrical apparatus and using an innovative rheometer designed and developed in the Department of Hydraulic, Geotechnical and Environmental Engineering, University of Naples “Federico II”: the Sphere Drag Rheometer (SDR). The traditional rheometrical apparatus (rotational rheometers, penetrometer and inclined

plane) were used to analyze mixtures of water-fine-grained sediment (*i.e.*, considering the partial grain size distribution) due to the small size of these instruments. The experimental results have shown the same rheological behaviour of fine-grained mixtures and Yield Stress fluids. The examined water-sediment mixtures behave as a homogeneous fluid within a very small solid volumetric concentration range – typically no greater than 10% – since the clay fraction is very small (or absent). It was observed that the flow of analyzed materials is usually unstable when the imposed stress value exceeds the static yield stress. In addition, the solid content greatly affects the rheological behaviour of materials: the yield stress increases very rapidly with increasing solid fraction. The grain size distribution of the materials analyzed in this paper is very wide, thus a new rheometer (the SDR) has been designed and developed to analyze coarse-grained mixtures ( $d_{\max} > 1$  mm). The experimental results conducted with the rheometer SDR have shown that also the rheological behaviour of coarse-grained mixtures is the same as Yield Stress fluids and that the yield stress increases with solid content. It was also observed that the addition of large particles causes a decrease in rheological parameters of the mixtures. The experimental data have been fitted with the Bingham model. The Bingham model obtained has been used in a numerical simulation of a case history of Campanian debris flow (the Pozzano landslide, Peninsula Sorrentina, 1997). The numerical analysis has been done with the DAN-W code, a model based on a lagrangian solution of the movement equations. The following conditions for the Bingham model have led to the best estimate of dynamical characteristics: i) the yield stress has been calculated based on field observations and ii) the plastic viscosity has been extrapolated from the experimental data obtained by the rheometer. Actually, while the viscosity is a mass property, the yield stress depends not only on the condition of the mass but also on the condition of the *in situ* soil. The experimental results obtained in the present work could be useful tools to understand the behaviour of the soils involved in a debris flow. This consistency also implies that in the field the conditions for incipient flow over steep slopes can be well described from the knowledge of the static yield stress; the flow characteristics can be well described with the decreasing stress flow curve and in particular the flow stoppage conditions can be described by the dynamical yield stress.

---

## Ringraziamenti

Affrontare un lavoro di ricerca multidisciplinare e riguardante un argomento così complesso come le colate rapide di fango non è stato semplice. Data la mia formazione universitaria, è stata per me una sfida dura ma affascinante che ho affrontato con entusiasmo e forse anche con un po' d'incoscienza. Durante il mio percorso, molte sono state le persone che, seppur in maniera differente, hanno contribuito al completamento del presente lavoro ed alle quali vanno i miei più sinceri ringraziamenti.

Ritengo doveroso ringraziare, il prof. Aldo Evangelista, che ha seguito il mio lavoro sin dai tempi della tesi di laurea, per avermi dato l'opportunità di fare ricerca e per avermi introdotto nell'affascinante campo dell'ingegneria ambientale. Le sue indicazioni sono state fondamentali per affrontare molte rilevanti problematiche del presente studio.

Esprimo un sincero ringraziamento al mio supervisore e correlatore della tesi, il dott. ing. Anna Scotto di Santolo, con la quale ho condiviso non solo questa ricerca ma anche la mia tesi di laurea, per avermi "accompagnato" durante questi anni e per avermi insegnato ad avere un punto di vista critico rispetto al mio stesso lavoro ed a non essere mai superficiale di fronte ai risultati conseguiti. La "reologia" e "pallina" sono stati incubi ricorrenti delle mie giornate e delle mie notti da dottoranda ma anche un incontro/scontro stimolante ed avvincente.

Ringrazio infinitamente il prof. Philippe Coussot per l'accoglienza offertami nella sua struttura, il Laboratoire des Matériaux et d'Identification

(Istitut Navier), durante i periodi in cui ho svolto la mia ricerca a Parigi. Lo ringrazio per essersi interessato al mio lavoro, per avermi insegnato la corretta esecuzione delle prove in reometro ed il miglior modo di poter interpretare i risultati ottenuti e per la pazienza e la buona disposizione dimostrata nei miei confronti ogni qual volta ho avuto bisogno di un suo consiglio o di un suo aiuto fattivo. Le sue “lezioni” ed i suoi suggerimenti sono stati di fondamentale importanza per lo svolgimento di questa ricerca.

Esprimo la mia gratitudine al prof. Claudio Scavia ed al dott. Ing. Marina Pirulli del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell’Università di Torino, per la disponibilità dimostrata nel revisionare la stesura finale di questo lavoro.

Ringrazio il prof. Nino Grizzuti ed il dott. Ing. Rossana Pasquino del Dipartimento di Ingegneria Chimica dell’Università di Napoli “Federico II”, per avermi dato la possibilità di svolgere alcune prove in reometro tradizionale con le apparecchiature in dotazione alla loro struttura.

Ringrazio la ditta Megaris S.r.l., nelle persone di Adolfo Cavallari e di Carlo Adami, per l’indispensabile contributo tecnico apportato alla progettazione, alla realizzazione ed alla messa a punto del reometro SDR.

Ringrazio Alfredo Ponzo (Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale dell’Università di Napoli “Federico II”) e L. Tocquer (LMSGC, Cité Descartes, Parigi) per quanto attiene il contributo tecnico all’attività di laboratorio e l’ing. Aldo Calore per il supporto di tipo informatico.

Ringrazio il Consorzio inter-Universitario per la previsione e prevenzione dei Grandi Rischi, C.U.G.R.I. (Università di Salerno - Università di Napoli “Federico II”), che ha finanziato la realizzazione del reometro sperimentale SDR.

Esprimo la mia stima e la mia gratitudine per il dott. Ing. Raffaele Papa per aver messo a disposizione la sua esperienza, la sua amicizia ed anche i

numerosi “secchi” di terreno con il quale è stata eseguita la sperimentazione.

Ringrazio in maniera speciale la dott. Ing. Antonella Giammarino, compagna di studi e di vita durante gli anni del dottorato, per le piacevoli e rasserenanti chiacchierate avute insieme, per l’affetto e la comprensione dimostratami e, soprattutto, per l’amicizia che ci ha unito in questi anni e quanto di bello ne è scaturito.

Ringrazio tutti i giovani ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale dell’Università degli studi di Napoli “Federico II” con i quali ho condiviso momenti piacevoli: Giovanni Lanzano (carissimo amico e compagno di lamentazioni); Marianna Pirone e Carmine Iorio (piacevolissimi ed insostituibili compagni di stanza); Guido Rianna (per la sua pungente ironia e per la gran quantità di terreno fornitami); Juan Carlos Rojas Vidovic (per la simpatia ed il buonumore contagioso); Luisa Alterio (per avermi scortato nei labirinti dell’università).

Ringrazio di cuore la mia famiglia, sostegno e punto fermo della mia vita ed in modo speciale voglio dire grazie a mia madre per l’infinito amore, l’instancabile aiuto e la continua vicinanza di questi anni per noi due così meravigliosamente “difficili”.

Infine voglio ringraziare Paolo per il suo supporto concreto e per aver condiviso con me quanto di più straordinario la nostra vita insieme abbia potuto concederci: la nascita di nostra figlia “Lisi”. Questa tesi è dedicata a Lisi e a Paolo.



# Indice

<b>INDICE DELLE TABELLE .....</b>	<b>XVII</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE.....</b>	<b>XIX</b>
<b>INDICE DEI SIMBOLI.....</b>	<b>XXXIII</b>
<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>XXXIX</b>
<b>CAPITOLO I. STUDIO DELLA LETTERATURA .....</b>	<b>1</b>
I.1  INTRODUZIONE .....	1
I.2  MODELLI ELEMENTARI .....	3
I.2.1  Il solido elastico.....	5
I.2.2  Il corpo plastico .....	6
I.2.3  Il fluido viscoso .....	8
I.2.4  Il corpo viscoelastico .....	10
I.3  ASPETTI PRINCIPALI DEL COMPORTAMENTO REOLOGICO DEI FLUIDI.....	11
I.3.1  Fluidi Newtoniani .....	12
I.3.2  Fluidi non Newtoniani .....	13
I.4  COMPORTAMENTO REOLOGICO DELLE MISCELE .....	17
I.4.1  Interazioni tra particelle e regimi di scorrimento.....	18
I.4.2  La tensione di soglia (yield stress).....	24
I.4.3  La viscosità.....	25
I.4.4  Equazioni costitutive .....	27
I.5  REOMETRIA .....	29
I.5.1  Reometri convenzionali.....	29
I.5.2  Reometri sperimentali per lo studio del comportamento di miscele a granulometria grossolana.....	38

---

<b>CAPITOLO II. PROPRIETÀ FISICHE DEI MATERIALI PIROCLASTICI</b>	
<b>CAMPANI</b> .....	<b>49</b>
II.1 INTRODUZIONE .....	49
II.2 ORIGINI DELLE COLTRI PIROCLASTICHE CAMPANE.....	50
II.3 CARATTERISTICHE FISICHE DELLE AREE SOGGETTE A FENOMENI DI INSTABILITÀ	54
II.3.1 Monti di Avella settentrionali e Monti del Partenio .....	55
II.3.2 Monti di Avella meridionali e Monti di Sarno.....	60
II.3.3 Monti Lattari.....	63
II.3.4 Campi Flegrei .....	66
<b>CAPITOLO III. SPERIMENTAZIONE ESEGUITA CON APPARECCHIATURE</b>	
<b>REOMETRICHE TRADIZIONALI</b> .....	<b>71</b>
III.1 INTRODUZIONE .....	71
III.2 APPARECCHIATURE UTILIZZATE.....	72
III.2.1 Reometri rotazionali .....	72
III.2.2 Piano inclinato .....	75
III.2.3 Penetrometro a cono .....	76
III.3 MATERIALI ANALIZZATI.....	79
III.4 PROGRAMMA SPERIMENTALE.....	80
III.4.1 Preparazione dei campioni.....	80
III.4.2 Protocolli sperimentali.....	82
III.5 SCELTA DELLA GEOMETRIA DI PROVA PIÙ IDONEA .....	86
<b>CAPITOLO IV. COMPORTAMENTO REOLOGICO DELLE MISCELE A</b>	
<b>GRANULOMETRIA FINE (RISULTATI SPERIMENTALI)</b> .....	<b>93</b>
IV.1 INTRODUZIONE.....	93
IV.2 RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE IN REOMETRO ROTAZIONALE	94
IV.2.1 Comportamento in funzione del contenuto di solido .....	94
IV.2.2 Influenza della sedimentazione.....	97
IV.2.3 Curve di flusso.....	99
IV.2.4 Tixotropia .....	102
IV.2.5 Prove di creep .....	104
IV.2.6 Influenza della concentrazione solida volumetrica.....	106
IV.2.7 Modellazione dei dati sperimentali .....	107

IV.3	RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE SU PIANO INCLINATO.....	109
IV.4	RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE CON IL PENETROMETRO A CONO	110
IV.5	CONFRONTO TRA I RISULTATI SPERIMENTALI OTTENUTI CON I DIFFERENTI SISTEMI DI MISURA .....	112
<b>CAPITOLO V. PROGETTAZIONE, REALIZZAZIONE E COLLAUDO DI UN REOMETRO INNOVATIVO PER FANGHI A GRANA GROSSA .....117</b>		
V.1	INTRODUZIONE.....	117
V.2	CARATTERISTICHE DELL' APPARECCHIATURA .....	119
V.3	PROCEDURE DI PROVA.....	123
V.4	TEORIA DI CONVERSIONE DEI DATI MISURATI IN PARAMETRI REOLOGICI.....	126
V.4.1	Forze di trascinamento e di galleggiamento .....	128
V.4.2	Spostamento di un oggetto compatto di forma qualsiasi .....	130
V.4.3	Alcune osservazioni sulla teoria proposta .....	134
V.5	APPLICAZIONE DELLA TEORIA AI DATI SPERIMENTALI.....	136
V.6	TARATURA DEL REOMETRO CON MATERIALI NEWTONIANI.....	137
V.7	TARATURA DEL REOMETRO CON MATERIALI NON NEWTONIANI .....	145
<b>CAPITOLO VI. RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE IN REOMETRO INNOVATIVO.....153</b>		
VI.1	INTRODUZIONE .....	153
VI.2	PROGRAMMA SPERIMENTALE.....	154
VI.3	RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE SULLE MISCELE A GRANULOMETRIA FINE .....	157
VI.3.1	Prove di flusso .....	157
VI.3.2	Comportamento in funzione della concentrazione solida volumetrica ....	159
VI.3.3	Interpretazione dei dati sperimentali .....	161
VI.3.4	Conversione dei dati misurati in parametri reologici.....	163
VI.4	RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE SU MISCELE A GRANULOMETRIA GROSSOLANA .....	167
VI.4.1	Risultati preliminari di prove eseguite mediante apparecchiature convenzionali.....	167
VI.4.2	Prove di flusso .....	172
VI.4.3	Comportamento in funzione della concentrazione solida volumetrica ....	174
VI.4.4	Interpretazione dei risultati sperimentali .....	177

VI.4.5	Conversione dei dati misurati in parametri reologici.....	178
VI.5	OSSERVAZIONI SUI RISULTATI SPERIMENTALI .....	181
<b>CAPITOLO VII. MODELLAZIONE NUMERICA DI UN EVENTO DI COLATA</b>		
<b>RAPIDA DI FANGO AVVENUTO IN CAMPANIA .....</b>		<b>183</b>
VII.1	INTRODUZIONE .....	183
VII.2	ALCUNI ASPETTI TEORICI ALLA BASE DEL CODICE DAN-W .....	184
VII.3	CASO OGGETTO DI STUDIO: LA COLATA DI POZZANO BIVIO (NA) .....	187
VII.3.1	Modelli reologici utilizzati per le simulazioni numeriche .....	188
VII.3.2	Parametri reologici dei modelli utilizzati .....	190
VII.4	RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE .....	193
<b>CONCLUSIONI .....</b>		<b>197</b>
<b>APPENDICE A. CARATTERISTICHE FISICHE DEI TERRENI ANALIZZATI</b>		
<b>.....</b>		<b>205</b>
A.1	TERRENO I (NOCERA, SALERNO) .....	205
A.2	TERRENO II (MONTEFORTE IRPINO, AVELLINO).....	208
A.3	TERRENO III (ASTRONI, NAPOLI) .....	212
A.4	TERRENO IV (POSILLIPO, NAPOLI) .....	216
A.5	TERRENO V (FRANA MARINO, POTENZA).....	219
<b>APPENDICE B. CURVE SPERIMENTALI RELATIVI ALLE PROVE</b>		
<b>ESEGUITE IN REOMETRO TRADIZIONALE .....</b>		<b>223</b>
B.1	CURVE DI FLUSSO.....	223
B.2	CURVE DI CREEP .....	225
B.3	INTERPRETAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI CON IL MODELLO DI	
HERSCHEL&BULKLEY .....		227
<b>APPENDICE C. SCHEMI DI PROGETTAZIONE E MONTAGGIO DEL</b>		
<b>REOMETRO SDR .....</b>		<b>231</b>
C.1	SCHEMI DI PROGETTAZIONE .....	231
C.3	SCHEMI DI MONTAGGIO.....	234
<b>APPENDICE D. STABILITÀ DELLE MISURE E MODIFICHE APPORTATE</b>		
<b>AL REOMETRO SDR .....</b>		<b>237</b>
D.1	STABILITÀ DELLE MISURE.....	237

---

D.2	INFLUENZA DELLA DIMENSIONE DELLA SFERA SUI RISULTATI SPERIMENTALI ...	238
D.3	MODIFICHE APPORTATE AL REOMETRO SDR.....	240
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	.....	<b>247</b>



---

## Indice delle tabelle

Tabella II-1 Proprietà fisiche dei terreni dei Monti di Avella settentrionali e Monti del Paternio (Modificato da Damiano, 2004).....	60
Tabella II-2 Proprietà fisiche dei terreni dei Monti di Avella meridionali e dei Monti di Sarno (Modificato da Bilotta & Foresta, 2002).....	63
Tabella II-3 Proprietà fisiche dei terreni piroclastici della Penisola Sorrentina (da Calcaterra et al., 2003). ....	65
Tabella III-1 Valori della costante K nella prova del penetrometro a cono.....	78
Tabella III-2 Programma sperimentale eseguito con sistemi di misura convenzionali (RR= reometro rotazionale; PI= piano inclinato; PT= penetrometro a cono) .....	85
Tabella V-1 Legame tra il coefficiente di attrito ed il numero di Reynolds. ....	141
Tabella V-2 Viscosità misurata con il reometro SDR per gli oli di silicone analizzati ....	142
Tabella VI-1 Programma sperimentale eseguito con reometro innovativo a trascinamento di sfera (SDR) e con il piano inclinato (PI).....	155
Tabella VI-2 Valori dei parametri $k_c$ e $l$ attraverso i quali è stato possibile ottenere una buona corrispondenza tra curve di flusso teoriche e curve sperimentali .....	167
Tabella VI-3 Valori dei parametri $k_c$ e $l$ attraverso i quali è stato possibile ottenere una buona corrispondenza tra curve di flusso teoriche e curve sperimentali .....	180

Tabella VII-1 Risultati delle analisi numeriche.....	195
Tabella B-1 Parametri del modello di Herschel&Bulkley utilizzati per l'interpretazione dei dati sperimentali.....	229

---

## Indice delle figure

Figura I.1 Campo di velocità per fluido viscoso tra due superfici parallele (velocità relativa $U$ ). .....	4
Figura I.2 Schema di Hooke per un mezzo elastico .....	5
Figura I.3 Comportamento elastico lineare (a) e non lineare (b).....	6
Figura I.4 Schema di Coulomb per un mezzo plastico .....	7
Figura I.5 Andamento tensioni-deformazioni per un mezzo plastico perfetto (a), incrudente positivamente (b) e negativamente (c). .....	8
Figura I.6 Deformazione permanente per un mezzo plastico. ....	8
Figura I.7 Schema di Newton per un mezzo viscoso.....	9
Figura I.8 Comportamento di un mezzo viscoso (a) e di un mezzo viscoso perfetto (b)....	10
Figura I.9 Modello di Maxwell (sinistra) e modello di Voigt–Kelvin (destra).....	11
Figura I.10 Comportamento reologico dei fluidi Newtoniani. ....	13
Figura I.11 Comportamento reologico dei fluidi non Newtoniani tempo-indipendenti. ....	15
Figura I.12 Schematizzazione dei principali tipi di interazioni tra le particelle di una sospensione (modificato da Cyr, 1999).....	19

---

Figura I.13 Classificazione dei diversi regimi di scorrimento di una sospensione (da Coussot e Ancey, 1999) .....	22
Figura I.14 Rappresentazione della viscosità ( $\eta$ ) di una sospensione in funzione della velocità di deformazione ( $\dot{\gamma}$ ) al variare del contenuto di solido. (da Mewis, 1976). .....	26
Figura I.15 Curve velocità di deformazione – sforzo di taglio per materiali viscoplastici (Horrobin 1999). .....	27
Figura I.16 Sistema geometrico a cilindri coassiali. ....	30
Figura I.17 Sistema geometrico a piatto e cono. ....	32
Figura I.18 Sistema geometrico a piatti paralleli. ....	33
Figura I.19 a) Schema di funzionamento di un viscosimetro a capillare;. b) Geometria di un elemento cilindrico di fluido in un capillare. ....	35
Figura I.20 Apparecchiatura di Bagnold (da Schatzmann, 2005). ....	40
Figura I.21 Flusso secondario nell'apparecchiatura di Bagnold secondo Hunt et. al (2002) (da Schatzmann, 2005). ....	42
Figura I.22 Reometro a cilindri coassiali di grandi dimensioni sviluppato da Coussot & Piau (1995) (Modificato da Schatzmann, 2005). ....	44
Figura I.23 Ball Measuring System (Schatzmann, 2005). ....	46
Figura II.1 a) Carta strutturale della caldera dei Campi Flegrei (Rolandi et al., 2003). b ) Aree investite dalle nubi di ceneri piroclastiche durante le eruzioni del complesso vulcanico Somma-Vesuvio (Papa, 2007). ....	52
Figura II.2 Distribuzione delle frane di colata rapida e dei depositi piroclastici da caduta: 1) lave; 2) flussi piroclastici; 3) depositi detritico-alluvionali e piroclastiti da caduta; 4) flysch miocenici della Penisola Sorrentina; 5) depositi terrigeni mio-pliocenici; 6) rocce carbonatiche mesozoiche; 7) frane singole; 8) gruppi di frane (Di Crescenzo e Santo, 2005). ....	56

---

Figura II.3 Cervinara: sequenza stratigrafica dei depositi piroclastici in sede (da Damiano, 2004).....	58
Figura II.4 Cervinara: fusi granulometrici dei terreni di copertura (Damiano, 2004). .....	59
Figura II.5 Tipiche sequenze stratigrafiche dei depositi piroclastici in quota in alcune località circostanti Pizzo d'Alvano (modificato da Cascini e Sorbino, 2003).....	62
Figura II.6 Fusi granulometrici dei terreni cineritici e pumicei di Pizzo d'Alvano (da Cascini e Sorbino, 2003).....	62
Figura II.7 Sequenze stratigrafiche dei depositi piroclastici nella Penisola Sorrentina (da Di Crescenzo & Santo, 1999).....	64
Figura II.8 Monti Lattari: fusi granulometrici dei terreni di copertura confrontati con quelli di Pizzo d'Alvano (da Calcaterra et al., 2003). .....	66
Figura II.9 Sequenze stratigrafiche dei depositi piroclastici osservate nella zona di monte della Collina di Camaldoli (modificato da Calcaterra et al., 2003). .....	68
Figura II.10 Principali proprietà fisiche dei terreni piroclastici recenti del napoletano (da Picarelli et al., 2006). .....	69
Figura II.11 Fusi granulometrici dei terreni piroclastici recenti del napoletano (da Picarelli et al., 2006). .....	70
Figura III.1 a) Reometro rotazionale AR 2000ex (TA Instruments) fornito della geometria dei piatti paralleli e di quella di rotore vane; b) reometro rotazionale CVOR (Bohlin Instruments), fornito della configurazione geometrica di rotore vane; c) Rotovisco RT10 (Haake Fisions) dotato della configurazione di piatti paralleli e del cono e piatto.....	73
Figura III.2c) piano inclinato utilizzato; d) schema di esecuzione di una prova su piano inclinato.....	75
Figura III.3 Schema della prova eseguita con il penetrometro a cono.....	76
Figura III.4 Punte coniche in dotazione utilizzabili nella prova con il penetrometro a cono. ....	78

Figura III.5 Curve granulometriche dei Terreni analizzati: Terreno I, linea nera; Terreno II-3, linea grigi; Terreno II-4 linea rossa; Terreno II-8 linea verde; Terreno III linea blu; Terreno IV(D1ALTO) linea beige; Terreno IV(D1MEDIO) linea gialla; Terreno IV(D2BASSO) linea glicine; Terreno IV(D3ALTO) linea marrone; Terreno V linea azzurra; Terreno VI linea viola. ....	80
Figura III.6 Miscelazione ed omogeneizzazione dei campioni.....	82
Figura III.7 Modalità di applicazione di una rampa crescente di velocità di deformazione .....	83
Figura III.8 Modalità di applicazione di una rampa crescente e decrescente di tensione di taglio .....	83
Figura III.9 Risultato tipico di una prova di creep. La linea tratteggiata rappresenta l'inizio del regime di flusso. ....	85
Figura III.10 Paraffina liquida commercialmente in uso: confronto tra i risultati ottenuti utilizzando due configurazioni geometriche diverse in termini di a) tensione di taglio e b) viscosità.....	88
Figura III.11 Miscela composta con il Terreno I ad una concentrazione solida volumetrica pari al 20%: a)confronto tra i risultati ottenuti utilizzando due configurazioni geometriche diverse in termini di tensione di taglio. b) particolare che evidenzia la presenza di un minimo nella curva di flusso ottenuta utilizzando il sistema di rotore vane .....	90
Figura IV.1 Interfaccia acqua pura - sospensione concentrata per i Terreni II-4 (a destra) e III (a sinistra).....	98
Figura IV.2 Sedimentazione nel materiale II-4 (rettangoli) e III (stelle): profondità di interfaccia tra l'acqua pura e la sospensione concentrata in funzione del tempo. ....	99
Figura IV.3 Prove di flusso condotte sul Terreno I [ $\Phi=38\%$ (cerchi) e $\Phi=42\%$ (rettangoli)]. ....	100
Figura IV.4 Prove di flusso condotte Terreno II-4 [ $\Phi=32\%$ (cerchi) e $\Phi=38\%$ (rettangoli)]. .....	101

Figura IV.5 Curve flusso apparenti per il materiale C ottenute considerando differenti tempi di rispo a seguito dell'applicazione di una pre-tensione: 5s (cerchi), 300s (stelle), 1200s (rettangoli). .....	103
Figura IV.6 Prove di creep relative al Terreno III ( $\Phi=40\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 1, 3, 5, 7, 8, 10, 15, 20, 30, 40 Pa. ....	105
Figura IV.7 Caratteristiche reologiche del Terreno I (rettangoli), del Terreno II-4 (rombi) e del Terreno III (cerchi) in funzione della concentrazione solida volumetrica: tensione di soglia statica (simboli vuoti), tensione di soglia dinamica (simboli pieni) velocità di deformazione critica (simboil semipieni). La linea retta funge da guida. ....	107
Figura IV.8 Viscosità di Bingham in funzione del rapporto tra la concentrazione solida volumetrica e il limite inferiore dell'intervallo di concentrazioni solide nel quale le miscele si comportano come dei fluidi: Terreno I (rettangoli),Terreno II-4 (rombi) e Terreno III (cerchi). ....	109
Figura IV.9 Caratteristiche reologiche del Terreno I in funzione della concentrazione solida volumetrica: tensione di soglia statica (simboli pieni) e tensione di soglia dinamica (simboli vuoti).....	110
Figura IV.10 Curve di flusso di tutti i Terreni analizzati a parità di concentrazione solida volumetrica ( $\Phi=35\%$ ). ....	112
Figura IV.11 Curve di flusso di soli Terreni piroclastici analizzati a parità di concentrazione solida volumetrica ( $\Phi=35\%$ ). ....	113
Figura IV.12 Resistenze di soglia ottenute con la prove effettuate con il penetrometro a cono in funzione dei corrispondenti valori misurati attraverso le prove in reometro per il Terreno II-4 $\Phi=32\%$ (rombi), il Terreno III $\Phi=40\%$ ( triangoli), il Terreno IV(D3ALTO) $\Phi=35\%$ (cerchi) ed il Terreno VI $\Phi=35\%$ ( rettangoli). ....	115
Figura IV.13 Tensione di soglia statica (simboli vuoti) e dinamica (simboli pieni) ottenute con la prove su piano inclinato in funzione dei corrispondenti valori misurati attraverso le prove in reometro per il Terreno I (rettangoli) ed il Terreno II-4 (cerchi). ....	115

---

Figura V.1 Schema semplificato del funzionamento del reometro SDR (da Scahtzmann, 2005) .....	118
Figura V.2 Componenti principali del reometro a trascinamento di sfera SDR. ....	119
Figura V.3 Schematizzazione geometrica del reometro a trascinamento di sfera SDR (Sphere Drag Rheometer).....	120
Figura V.4 Principali componenti e configurazioni del reometro a trascinamento di sfera SDR.....	121
Figura V.5 Rappresentazione schematica dei punti in corrispondenza dei quali viene misurata la Forza di trascinamento $F_D$ quando la sfera compie una rotazione completa all'interno del contenitore ad una specifica velocità di rotazione $\Omega$ assegnata (modificato da Schatzmann, 2005).....	123
Figura V.6 Olio di silicone di viscosità 60Pa·s. a) Misura della Forza di trascinamento $F_D$ durante una rotazione completa della sfera ( $D=18\text{mm}$ ) per differenti valori di velocità di rotazione imposta $\Omega$ (rombi, 1,24rad/s; quadrati, 2,27rad/s; triangoli, 3,28rad/s; cerchi, 4,194rad/s; asterischi, 5,15rad/s; croci, 6,93rad/s; trattini piccoli, 7,83rad/s; trattini, 8,63rad/s). b) Curva di flusso $F_D-\Omega$ .....	124
Figura V.7 Caolino ( $\Phi=35\%$ ): curva di flusso.....	126
Figura V.8 Superficie critica attorno ad un oggetto compatto oltre la quale il fluido rimane rigido (da Coussot, 2005).....	131
Figura V.9 Vista della superficie critica che circonda la sfera e lungo la quale lo yielding criterion è raggiunto (involuppo nella regione di color grigio), in accordo con la teoria delle linee di scorrimento di Ansley & Smith, 1967 (da Coussot, 2005).....	133
Figura V.10 Olio di silicone di viscosità pari a 100 Pa·s: curve di flusso al variare del diametro della sfera utilizzato ( $D=8\text{mm}$ simboli pieni; $D=12\text{mm}$ simboli semipieni; $D=18\text{mm}$ simboli vuoti). Le linee continue seguono l'andamento lineare dei dati. ....	138

Figura V.11 Olio di silicone di viscosità pari a 60 Pa·s: curve di flusso al variare del diametro della sfera utilizzato (D=12mm simboli pieni; D=18mm simboli vuoti). Le linee continue seguono l'andamento lineare dei dati. ....	138
Figura V.12 Olio di silicone di viscosità pari a 1 Pa·s: curva di flusso la sfera di diametro D=18mm (simboli pieni). La linea continua segue l'andamento lineare dei dati.....	139
Figura V.13 Sfera di diametro D investita da un fluido.....	139
Figura V.14 Abaco per la correlazione tra il numero di Reynolds Re ed il coefficiente di trascinamento $c_D$ .....	141
Figura V.15 Distribuzione dei valori di viscosità calcolati (funzione di frequenza cumulata)in funzione del rapporto tra la viscosità calcolata e quella nota. ....	144
Figura V.16 Gel per capelli: curva di flusso ottenuta in reometro tradizionale. ....	146
Figura V.17 Gel per capelli: curva di flusso ottenuta in reometro SDR. ....	147
Figura V.18 Gel per capelli. Confronto tra la curva teorica (linea continua) derivata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (simboli pieni).....	147
Figura V.19 Gel per capelli Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) derivata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (simboli pieni) con valori differenti dei parametri $k_c$ e $l$ . ....	148
Figura V.20 Miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ ): curva di flusso ottenuta in reometro tradizionale.....	149
Figura V.21 Miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ ): curva di flusso ottenuta in reometro SDR.....	150
Figura V.22 Miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ ). Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) derivata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale(simboli pieni).....	151

- Figura V.23 Miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ ). Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) derivata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (simboli pieni) con valori differenti dei parametri  $k_c$  e  $l$ . .....151
- Figura VI.1 Terreno A  $\Phi=38\%$ : curva di flusso ottenuta mediante l'applicazione di una rampa di velocità di rotazione crescente e di una decrescente .....158
- Figura VI.2 Terreno II-8  $\Phi = 38\%$ : curva di flusso ottenuta mediante l'applicazione di una rampa di velocità di rotazione crescente e di una decrescente .....158
- Figura VI.3 Terreno I: comportamento reologico al variare della concentrazione solida volumetrica (asterischi  $\Phi=42\%$ ; cerchi  $\Phi=40\%$ ; triangoli  $\Phi=38\%$ ; quadrati  $\Phi=35\%$ ; rombi  $\Phi=32\%$ ).....160
- Figura VI.4 Terreno II-8: comportamento reologico al variare della concentrazione solida volumetrica (cerchi  $\Phi=38\%$ ; triangoli  $\Phi=35\%$ ; quadrati  $\Phi=30\%$ ). .....160
- Figura VI.5 Terreno I, Terreno II-8, Terreno IV: Forza di trascinamento di soglia  $F_{D0}$  in funzione della concentrazione solida volumetrica. Legge esponenziale (linea continua). .....161
- Figura VI.6 Terreno I  $\Phi=40\%$ : punti sperimentali (simboli pieni) e curva interpolatrice di potenza (linea continua) .....162
- Figura VI.7 Terreno IV(D3ALTO)  $\Phi=40\%$ : punti sperimentali (simboli pieni) e curva interpolatrice di potenza (linea continua) .....163
- Figura VI.8 Terreno I  $\Phi=38\%$ . Confronto tra la curva teorica misurata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale. ....165
- Figura VI.9 Terreno I  $\Phi=38\%$ . Confronto tra la curva teorica misurata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale con valori differenti dei parametri  $k_c$  e  $l$ . .....166
- Figura VI.10 Terreno II-4 ( $\Phi_f=30\%$ ). Curve di flusso di una miscela a granulometria fine ( $\Phi_f= \Phi_f=30\%$ ) (simboli pieni) ed un'altra a granulometria grossolana ( $\Phi_f=20\%$  e  $\Phi_g=10\%$ ) (simboli vuoti).....169

Figura VI.11 Terreno II-4 ( $\Phi_T = \text{costante} = 30\%$ e $32\%$ ). Tensione di soglia statica (simboli vuoti) e tensione di soglia dinamica (simboli pieni) in funzione del rapporto tra la concentrazione solida totale e quella di particelle fini. ....	170
Figura VI.12 Terreno II-4 ( $\Phi_T = \text{costante} = 25\%$ ). Tensione di soglia statica (simboli pieni) e tensione di soglia dinamica (simboli vuoti) in funzione del rapporto tra la concentrazione solida totale e quella di particelle fini. ....	171
Figura VI.13 Terreno IV(D3ALTO) $\Phi = 35\%$ $d_{\max} = 10\text{mm}$ . ....	172
Figura VI.14 Terreno II-8 $\Phi = 35\%$ . $d_{\max} = 10\text{mm}$ . ....	173
Figura VI.15 Terreno II-8 ( $\Phi_T = 38\%$ ). Confronto tra le curve di flusso della miscela a granulometria fine (simboli pieni) e della miscela a granulometria grossolana ( $d_{\max} < 5\text{mm}$ , simboli vuoti). ....	174
Figura VI.16 Terreno I. Comportamento al variare della concentrazione solida volumetrica (cerchi $\Phi = 40\%$ ; rombi $\Phi = 38\%$ ; triangoli $\Phi = 35\%$ ). ....	175
Figura VI.17 Terreno II-3. Comportamento al variare della concentrazione solida volumetrica Terreno I. Comportamento al variare della concentrazione solida volumetrica (croci $\Phi = 100\%$ ; rombi $\Phi = 40\%$ ; trattini $\Phi = 38\%$ ; asterischi $\Phi = 35\%$ ). ....	176
Figura VI.18 Terreno I (rettangoli) e Terreno II-3 (cerchi): $F_{D0}$ in funzione della concentrazione solida volumetrica. Legge esponenziale (Terreno I linea continua e Terreno II-3 linea tratteggiata). ....	176
Figura VI.19 Terreno II-8 $\Phi = 38\%$ : punti sperimentali (asterischi) e curva interpolatrice di potenza (linea continua) ....	177
Figura VI.20 Terreno II-3 $\Phi = 38\%$ . Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) misurata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (trattini). ....	179
Figura VI.21 Terreno II-3 $\Phi = 38\%$ . Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) misurata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (trattini) con valori differenti dei parametri $k_c$ e $l$ . ....	180

---

Figura VI.22 Curve di flusso di tutti i Terreni analizzati a parità di concentrazione solida volumetrica ( $\Phi=35\%$ ).....	182
Figura VI.23 Curve di flusso dei soli Terreni piroclastici analizzati a parità di concentrazione solida volumetrica ( $\Phi=35\%$ ).....	182
Figura VII.1 Illustrazione di un modello di colata basato sulla meccanica del continuo. La massa in scorrimento è riprodotta da un fluido equivalente omogeneo (modificato da Hungr, 1995). .....	184
Figura VII.2 Schematizzazione del flusso di una colata rapida secondo il concetto di valore medio del De Saint Venant (da Pirulli, 2007). .....	185
Figura VII.3 Discretizzazione lagrangiana in coordinate curvilinee. I boundary blocks sono numerati con $i=1,2,\dots,n$ mentre i mass blocks con $j=1,2,\dots,n-1$ (da Hungr, 1995).....	186
Figura VII.4 Colata rapida di fango avvenuta a Pozzano (NA) NEL 1997: morfologia dell'evento (a sinistra) e profilo altimetrico (a destra)(da Scotto di Santolo, 2000).....	188
Figura VII.5 Schema semplificato della distribuzione della tensione di taglio e della velocità in una colata rapida di fango durante la fase di propagazione e distinzione della zona di colmo e di quella sottoposta a taglio (modificato da Schatzmann, 2005). .....	191
Figura VII.6 Profilo geometrico della colata di Pozzano ricostruito con il codice di calcolo DAN-W.....	194
Figura VII.7 Profilo di velocità calcolato con il codice di calcolo DAN-W utilizzando i tre modelli considerati. ....	194
Figura A.1 Zona pedemontana lambita dal tratto autostradale della A3 nei km 35-50 (da Zingariello, 2006).....	205
Figura A.2 Colata rapida del 4 marzo 2005 (Nocera) (da Zingariello, 2006).....	206
Figura A.3 Frana di Nocera. a) schema geometrico del versante; b) profilo altimetrico del versante (da Zingariello, 2006) .....	207

---

Figura A.4 Frana di Nocera. Fuso granulometrico dei terreni interessati (da Zingariello, 2006).....	207
Figura A.5 Indicazione delle frane censite (da Di Crescenzo et al., 2007).....	208
Figura A.6 Colonna stratigrafica (completa) ricostruita nella zona pedemontana del versante (da Di Crescenzo et al., 2007).....	209
Figura A.7 Colonna stratigrafica semplificata (da Papa, 2007).....	210
Figura A.8 Granulometria dei diversi terreni (da Papa, 2007).....	211
Figura A.9 Carta morfostrutturale della piana di Agnano (da Isaia et al., 2004).....	212
Figura A.10 Carta-Inventario dei fenomeni franosi nel cratere degli Astroni (da Calcaterra et al., 2009). .....	214
Figura A.11 Frana verificatasi il 17 dicembre 2005. In evidenza, la superficie di scorrimento vista dal piede della frana (da Calcaterra et al., 2009) .....	214
Figura A.12 Curva granulometrica media del materiale campionato (da Calcaterra et al., 2009).....	215
Figura A.13 Stralcio della pianta delle indagini del campo di prelievo dei campioni. ....	217
Figura A.14 Terreno IV: fusi granulometrici dei diversi campioni analizzati .....	218
Figura A.15 Masseria Marino: planimetria e strumentazione installata (da Giammarino, 2010). .....	220
Figura A.16 Sezione geologica colata Masseria Marino (da Giammarino, 2010).....	220
Figura A.17 Risultati delle analisi granulometriche :a)corpo di frana; b)zona di taglio (da Comegna, 2005).....	221
Figura B.1 Terreno I: curve di flusso al variare della concentrazione solida volumetrica $\Phi$ . .....	223

---

Figura B.2 Terreno II-4: curve di flusso al variare della concentrazione solida volumetrica $\Phi$ .....	224
Figura B.3 Terreno III: curve di flusso al variare della concentrazione solida volumetrica $\Phi$ .....	224
Figura B.4 Terreno V: curve di flusso al variare della concentrazione solida volumetrica $\Phi$ .....	225
Figura B.5 Prove di creep relative al Terreno I ( $\Phi=38\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 10, 20, 23, 25, 28, 30, 35, 40, 50, 60, 70 Pa.....	225
Figura B.6 Prove di creep relative al Terreno I ( $\Phi=40\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 40, 50, 60, 65, 70, 80, 90, 100, 120, 140 Pa.....	226
Figura B.7 Prove di creep relative al Terreno II-4 ( $\Phi=32\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 1, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 25, 30 Pa.....	226
Figura B.8 Prove di creep relative al Terreno II-4 ( $\Phi=38\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 240, 250, 260, 280, 285, 290, 295, 300 Pa.....	227
Figura B.9 Terreno I: curve di flusso sperimentali (simboli) e curve teoriche (linee continue) al variare della concentrazione solida volumetrica $\Phi$ .....	227
Figura B.10 Terreno II-4: curve di flusso sperimentali (simboli) e curve teoriche (linee continue) al variare della concentrazione solida volumetrica $\Phi$ .....	228
Figura B.11 Terreno III: curve di flusso sperimentali (simboli) e curve teoriche (linee continue) al variare della concentrazione solida volumetrica $\Phi$ .....	228
Figura C.1 Sezione: configurazione principale del reometro SDR.....	231
Figura C.2 Sezione: configurazione geometrica del reometro SDR, cella di carico, motoriduttori. ....	232

Figura C.3 Sezione: cella di carico e sfere in dotazione al reometro SDR. ....	233
Figura C.4 Schema di montaggio cella di carico: supporto asta. ....	234
Figura C.5 Schema di montaggio cella di carico: perno. ....	235
Figura D.1 Valore minimo e massimo della forza di trascinamento FD misurata in un giro completo della sfera all'interno del campione per differenti valori di velocità di rotazione imposta. a)gel per capelli; b)miscela acqua-sedimento a granulometria fine (Terreno I, $\Phi=32%$ , $d_{max}<0,5mm$ ). ....	238
Figura D.2 Curve di flusso al variare della dimensione caratteristica D della sfera. a) gel per capelli: rombi, D=8mm; cerchi, D=12mm; triangoli, D=15mm quadrati, D=18mm; b)Terreno I ( $\Phi=32%$ , $d_{max}=0,5mm$ ) : cerchi, D=8mm; rombi, D=12mm; rombi, triangoli, D=15mm quadrati, D=18mm. ....	240
Figura D.3 Concentrazione di sedimenti lungo la profondità del contenitore per le miscele analizzate con il reometro SDR. ....	241
Figura D.4 Reometro SDR. a)circolazione di aria compressa al bordo del fondo del contenitore; b) circolazione di aria compressa su tutto il fondo del contenitore. ....	243
Figura D.5 Terreno I, $\Phi=35%$ , $d_{max}<5mm$ . Curve di flusso con il reometro modificato (simboli vuoti):a)presenza di agitatore ed aria compressa al bordo del fondo del contenitore; b) ) presenza della sola aria compressa al bordo del fondo del contenitore; c) presenza della sola aria compressa su tutto il fondo del contenitore. Curve di flusso in assenza di modifiche del reometro SDR (simboli pieni). ....	244
Figura D.6 Terreno VI, $\Phi=35%$ . Curve di flusso con il reometro modificato con la circolazione della sola aria compressa su tutto il fondo del contenitore (simboli grigi) e in assenza di modifiche del reometro SDR (simboli neri). ....	245
Figura D.7 Terreno II-8, $\Phi=35%$ , $d_{max}<10mm$ . Curve di flusso con il reometro modificato con la circolazione della sola aria compressa su tutto il fondo del contenitore (simboli vuoti) e in assenza di modifiche del reometro SDR (simboli pieni). ....	246



## Indice dei simboli

A	superficie (m <sup>2</sup> )
a	raggio tipico della particella (mm)
B	forza di galleggiamento (N)
Ba	numero di Bagnold (-)
C	momento torcente (Nm)
C <sub>1</sub>	numero di sistema corretto (-)
c <sub>D</sub>	coefficiente di trascinamento (-)
c <sub>u</sub>	resistenza al taglio del terreno (Pa)
d	diametro grani (mm)
d <sub>c</sub>	diametro contenitore del reometro SDR (mm)
d <sub>max</sub>	diametro massimo dei grani (mm)
d <sub>p</sub>	affondamento della punta nel penetrometro a cono (mm)
D	tensore delle velocità di deformazione
D <sub>II</sub>	secondo invariante del tensore delle velocità di deformazione
D <sub>PP</sub>	diametro piatto superiore nella geometria dei piatti paralleli (mm)
D <sub>sfera</sub>	diametro sfera (mm)
D <sub>P</sub>	distanza percorsa da una colata D <sub>P</sub> (m)
Δ <sub>P</sub>	caduta di pressione (Pa)
e <sub>0</sub>	indice dei pori (-)
e <sub>max</sub>	indice dei pori massimo (-)
E	modulo elastico (N/mm <sup>2</sup> )
f <sub>s</sub>	fattore di scala (-)
FS	fondo scala cella di carico (-)
F	forza (N)
F <sub>a</sub>	forza di attrito viscosa (N)

$b_{\text{Browniane}}$	forze di tipo Browniano (N)
$F_c$	forza che il fluido esercita su una sfera (N)
$F_D$	forza di trascinamento (N)
$F_{D1}$	forza di trascinamento di soglia statica (N)
$F_{D2}$	forza di trascinamento di soglia dinamica (N)
$F_{D0}$	forza di trascinamento critica (N)
$F_{\text{gravità}}$	forza di gravità (N)
$F_n$	forza netta che agisce su un oggetto sommerso (N)
$F^*$	valore limite della forza (N)
$F_R$	forza resistente alla base del flusso (N)
$g$	accelerazione di gravità ( $\text{m/s}^2$ )
$G$	modulo di elasticità tangenziale ( $\text{N/mm}^2$ )
$G_s$	peso specifico del terreno ( $\text{kN/m}^3$ )
$H_i$	coefficiente di incrudimento (-)
$H_D$	quota zona di distacco di una colata (m)
$H$	altezza campione nella geometria dei cilindri coassiali (mm)
$h$	gap (mm)
$h_0$	spessore campione all'istante iniziale nel piano inclinato (mm)
$h_c$	altezza contenitore del reometro SDR (mm)
$h_f$	spessore campione all'istante finale nel piano inclinato (mm)
$h_D$	altezza del deposito di una colata (m)
$h_{\text{flusso}}$	altezza del flusso di una colata (m)
$h_{\text{plug}}$	altezza zona di colmo di una colata (m)
$h_{\text{shear}}$	altezza zona di taglio di una colata (m)
$h_s$	spessore campione nella prova del piano inclinato (mm)
$i_c$	inclinazione critica nella prova del piano inclinato ( $^\circ$ )
$i_D$	inclinazione piano di deposito di una colata ( $^\circ$ )
$i_L$	inclinazione letto del canale di una colata ( $^\circ$ )
$i$	inclinazione nella prova del piano inclinato ( $^\circ$ )
$I_p$	indice di plasticità (-)
$I$	matrice identità
$k_m$	modulo elastico della molla ( $\text{N/mm}^2$ )
$k_a$	coefficiente della Forza di attrito (-)
$K$	costante sperimentale nel penetrometro a cono (-)
$k$	fattore di forma (-)

---

$k_c$	valore critico di $k$ (-)
$k_B$	costante di Boltzmann (J/K)
$l$	parametro sperimentale (mm)
$L$	lunghezza capillare (mm)
$Le$	numero di Leighton (-)
$L_O$	dimensione caratteristica di un oggetto (mm)
$L_P$	altezza palette nella geometria di rotore vane (mm)
$M$	massa del cono (g)
$m$	indice di consistenza ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^{n_P}$ )
$n$	porosità del terreno (%)
$n_P$	indice di pseudoplasticità (-)
$Ne$	numero di Newton (-)
$p$	pressione (Pa)
$P$	potenza caratteristica di un sistema di misura (Nmrad/s)
$Pe$	numero di Peclet (-)
$Pe_c$	numero di Peclet critico (-)
$Q$	flusso volumetrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Re$	numero di Reynolds (-)
$Re_c$	numero di Reynolds critico (-)
$Re_P$	numero di Reynolds delle particelle (-)
$R_1$	raggio cilindro interno geometria cilindri coassiali (mm)
$R_2$	raggio cilindro esterno geometria cilindri coassiali (mm)
$R_i$	raggio cilindro interno del reometro di Coussot & Piau (mm)
$R_o$	raggio cilindro esterno del reometro di Coussot & Piau (mm)
$R_P$	raggio palette nella geometria di rotore vane (mm)
$R_C$	raggio del contenitore nella geometria di rotore vane (mm)
$r_P$	distanza dall'asse nella geometria di piatti paralleli (mm)
$R_{PC}$	raggio del piatto nella geometria del piatto e cono (mm)
$R_{PP}$	raggio del piatto superiore nella geometria dei piatti paralleli (mm)
$R$	raggio della sfera (mm)
$r_c$	raggio del capillare (mm)
$r$	distanza tra l'asse del motore ed il centro della sfera (mm)
$s$	spostamento (mm)
$\dot{s}$	velocità di spostamento
$s_p$	spostamento plastico (mm)

---

S	superficie esterna di un oggetto ( $m^2$ )
S*	superficie esterna che ingloba un oggetto ( $m^2$ )
S <sub>c</sub>	superficie critica attorno ad un oggetto ( $m^2$ )
S <sub>r</sub>	grado di saturazione (-)
t <sub>exp</sub>	tempo sperimentale di caduta di una singola particella (s)
T <sub>a</sub>	temperatura assoluta (K)
T	parte deviatorica del tensore delle tensioni
T <sub>II</sub>	secondo invariante di T
U	velocità di scorrimento ( $s^{-1}$ )
U <sub>max</sub>	massima velocità di scorrimento ( $s^{-1}$ )
V	velocità di un oggetto (m/s)
v	velocità della particella (m/s)
v <sub>sfera</sub>	velocità di caduta di una sfera in un fluido (m/s)
v <sub>∞</sub>	velocità di un fluido lontano da un oggetto sommerso (m/s)
V <sub>f</sub>	volume del fluido ( $m^3$ )
V <sub>o</sub>	volume di un oggetto ( $m^3$ )
V <sub>s</sub>	volume del solido ( $m^3$ )
V <sub>w</sub>	volume dell'acqua ( $m^3$ )
V <sub>T</sub>	volume totale ( $m^3$ )
V <sub>sf</sub>	volume delle particelle fini ( $m^3$ )
V <sub>sg</sub>	volume delle particelle grossolane ( $m^3$ )
w	contenuto d'acqua (%)
w <sub>L</sub>	limite liquido (-)
w <sub>P</sub>	limite plastico (-)
Y	numero adimensionale di Chhabra&Richardson (-)
α	angolo al vertice del penetrometro a cono (°)
α <sub>1</sub>	pendenza del versante (°)
α <sub>2</sub>	pendenza zona di arresto di una colata (°)
α <sub>c</sub>	angolo del cono nella geometria del piatto e cono (°)
α <sub>D</sub>	angolo di attrito dinamico (°)
δ <sub>0</sub>	attrito punta-terreno (-)
Δρ	differenza tra densità fase continua e fase dispersa ( $kg/m^3$ )
ε	deformazione assiale (mm)
η	viscosità dinamica (Pa·s)
η'	viscosità corretta (Pa·s)

---

$\eta_0$	viscosità zero (Pa·s)
$\eta_c$	viscosità fase continua (Pa·s)
$\eta_{PP}$	viscosità misurata con la geometria dei piatti paralleli (Pa·s)
$\eta_{VR}$	viscosità misurata con la geometria di rotore vane (Pa·s)
$\eta_s$	viscosità di una sospensione (Pa·s)
$\eta_\infty$	viscosità infinita (Pas)
$\Phi$	concentrazione solida volumetrica (%)
$\Phi_0$	concentrazione solida massima per grani di uguale diametro (%)
$\Phi_1$	limite inferiore dell'intervallo di concentrazione solida (%)
$\Phi_2$	limite superiore dell'intervallo di concentrazione solida (%)
$\Phi_c$	valore critico della concentrazione solida volumetrica (%)
$\Phi_f$	concentrazione solida volumetrica di particelle fini (%)
$\Phi_g$	concentrazione solida volumetrica di particelle grossolane (%)
$\Phi_m$	concentrazione solida di massimo impacchettamento (%)
$\Phi_T$	concentrazione solida volumetrica totale (%)
$\gamma$	peso dell'unità di volume del terreno (kN/m <sup>3</sup> )
$\gamma_a$	deformazione angolare (rad)
$\gamma_d$	peso dell'unità di volume asciutto del terreno (kN/m <sup>3</sup> )
$\dot{\gamma}$	velocità di deformazione (s <sup>-1</sup> )
$\dot{\gamma}_{app}$	velocità di deformazione apparente (s <sup>-1</sup> )
$\dot{\gamma}_c$	velocità di deformazione critica (s <sup>-1</sup> )
$\dot{\gamma}_w$	velocità di deformazione alla parete (s <sup>-1</sup> )
$\lambda$	costante di tempo (s)
$\lambda_B$	concentrazione lineare tra i grani (%)
$\mu_B$	viscosità plastica alla Bingham (Pa·s)
$\nu$	viscosità cinematica (P)
$\Omega$	velocità angolare (rad/s)
$\Omega_O$	volume di un oggetto (m <sup>3</sup> )
$\rho$	densità di un fluido (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_c$	densità fase continua (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_d$	densità fase dispersa (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	densità dei grani (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_m$	densità della miscela (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_s$	densità della sfera (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_t$	densità del terreno (kg/m <sup>3</sup> )

$\sigma$	sforzo (Pa)
$\Sigma$	tensore delle tensioni
$\tau$	tensione di taglio (Pa)
$\tau_c$	tensione di soglia (Pa)
$\tau_{c1}$	tensione di soglia statica (Pa)
$\tau_{c2}$	tensione di soglia dinamica (Pa)
$\tau_{PP}$	tensione di taglio misurata con la geometria dei piatti paralleli (Pa)
$\tau_{VR}$	tensione di taglio misurata con la geometria di rotore vane (Pa)
$\tau_w$	tensione di taglio alla parete (Pa)

---

## Introduzione

Negli ultimi decenni in Italia è notevolmente cresciuta la consapevolezza dell'elevato rischio di frana a cui sono esposte molte parti del territorio, la cui vulnerabilità, già nota agli esperti del settore, è stata drammaticamente colta anche dall'opinione pubblica a causa di eventi catastrofici sempre più frequenti. Il problema è particolarmente avvertito in Campania che può considerarsi una delle regioni italiane maggiormente esposte al rischio frane. Quest'area è ricoperta da depositi di materiali sciolti parzialmente saturi, prodotti dalle eruzioni dei centri vulcanici che sono stati attivi nelle ultime decine di migliaia di anni. Tali depositi ammantano rilievi collinari e montuosi, che sono soggetti ad abituali processi d'instabilità dei versanti. Tra questi, sono frequenti le colate rapide di fango, tipiche per la loro elevatissima velocità e capacità di propagazione anche in aree a bassissima pendenza. Tali caratteristiche rendono le colate di fango un rischio permanente per la vita delle popolazioni e l'integrità di costruzioni, infrastrutture e reti di servizio.

A causa dell'elevata concentrazione di centri abitati e infrastrutture nelle zone interessate da tali eventi, è sempre più sentita l'esigenza di definire le aree di rischio potenziale e di pianificare interventi per la difesa e la sicurezza del territorio. Un'approfondita conoscenza delle cause predisponenti tali fenomeni e la previsione delle caratteristiche dinamiche di tali eventi, quali i volumi coinvolti, le velocità di propagazione e le distanze percorse dalle masse frananti, sono fondamentali per la determinazione di efficienti sistemi preventivi e per la progettazione di adeguati interventi strutturali.

Le modalità di evoluzione delle colate rapide di fango sono solo parzialmente note e la complessità dei processi che sottendono al moto di tali fenomeni

rende la loro comprensione ancora lontana da un livello che possa ritenersi soddisfacente. Esistono molti modelli di previsione che, secondo i contesti territoriali e le tipologie di frana, coprono una vasta gamma di approcci al problema. Alcuni criteri applicati per la valutazione del rischio potenziale sono basati su correlazioni empiriche tra le grandezze geometriche dei versanti, desunte dall'interpretazione dei dissesti precedenti (Scheidegger 1973; Cannon, 1992; Corominas, 1996; Scotto di Santolo, 2000; Fannin & Wise, 2001). Altri, che scaturiscono da considerazioni di carattere teorico, hanno una valenza più generale e si basano su espressioni analitiche dedotte assumendo particolari schemi di moto per la massa franante. In passato, il modello maggiormente usato era quello del blocco rigido che scorre su di un piano inclinato (Voellmy, 1955) ma negli ultimi anni tale modello è stato accantonato a favore di modellazioni di tipo numerico, nuove e sempre più affinate, basate sulla meccanica del continuo (Savage and Hutter, 1989; Hungr, 1995; Chen & Lee, 2000).

In particolare, per lo studio della propagazione del corpo di frana sono stati implementati modelli tridimensionali basati sulle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, integrate lungo la profondità del flusso (Pastor, 2002; Pudasaini, 2003). In tali modelli numerici, di fondamentale importanza è l'assegnazione di un'opportuna legge costitutiva ai terreni del corpo di colata, la cui scelta dipende sia dalle caratteristiche del materiale in sé ma anche dal processo tensio-deformativo cui il materiale è sottoposto. Poiché una colata di fango è assimilabile a una miscela di acqua e particelle solide di differente granulometria (Takahashi, 1991), alcuni modelli considerano la massa franante come composta da due fasi separate e interagenti tra di loro, la fase liquida e quella solida (Iverson, 1997), mentre altri schematizzano il corpo di frana come un unico corpo continuo omogeneo, detto "fluido equivalente", le cui proprietà riflettono adeguatamente quelle del materiale coinvolto (Hungr, 1995). I primi sono molto complessi e necessitano della conoscenza di un numero elevato di parametri, alcuni dei quali non hanno un chiaro significato fisico, mentre i secondi, più semplici, sono caratterizzati da un numero ridotto di grandezze, che vengono definite attraverso opportune prove di laboratorio.

Diverse sperimentazioni sono state eseguite su campioni di terreni naturali coinvolti in fenomeni di colata di fango allo scopo di definire i parametri delle

leggi costitutive. Alcune di esse sono state condotte con usuali apparecchiature geotecniche e modelli in scala ridotta (Takahashi, 1991; Iverson, 1997; Major, 1996, 1997; Derlinger & Iverson, 2001; Armanini et al., 2005). Altri autori hanno applicato tecniche mutate dalla reologia utilizzando sistemi di misura reometrici convenzionali e/o innovativi (O'Brien & Julien, 1988; Major & Pierson, 1992; Coussot & Piau, 1995; Coussot, 1997, 2005; Coussot et al., 1998; Coussot et al., 2003; Bordou et al., 2003; Schatzmann, 2005; Scotto di Santolo et al., 2010, 2011), dal momento che il comportamento reologico del materiale è solitamente assimilabile a quello esibito da fluidi non-Newtoniani.

L'obiettivo del presente lavoro è lo studio del comportamento reologico di alcuni terreni campani coinvolti in colate di fango sulla base di un'analisi teorico-sperimentale. Il presente studio conserva l'ipotesi di massa continua e viscosa in moto (Hunrg, 1995) e si propone di caratterizzare con apparecchiature reometriche innovative (ossia il reometro a trascinamento di sfera SDR) le leggi reologiche di fanghi permettendo di considerare miscugli con frazione solida di maggiore dimensione rispetto a quanto fatto finora. Si è visto, infatti, che l'analisi della propagazione delle masse di fango non può essere facilmente condotta facendo riferimento al mezzo bifase o trifase (aria, acqua, solido) né in termini di continui equivalenti interagenti e neppure adottando un procedimento micromeccanico che studia il solido come costituito da un elevatissimo numero di particelle solide a contatto reciproco. Il metodo più semplice è quello di assimilare il fango a un flusso continuo viscoso. La presente tesi rimane legata a questo approccio e cerca di migliorare le conoscenze teorico-sperimentali sulla reologia del materiale viscoso cui il fango viene ricondotto.

La tesi è costituita da VII capitoli, i cui contenuti vengono appresso riportati sinteticamente.

Nel capitolo I viene affrontato lo studio della letteratura per la definizione del comportamento reologico dei materiali. In particolare, vengono passati in rassegna i modelli elementari di corpo elastico, di corpo viscoso, di corpo plastico e di corpo viscoelastico. Successivamente vengono trattati i principali aspetti del comportamento reologico dei fluidi e viene approfondito il

comportamento reologico delle miscele, che costituisce l'oggetto del presente lavoro. Vengono infine descritte le principali apparecchiature reometriche, standard e sperimentali, adoperate nell'analisi del comportamento reologico sia dei fluidi sia delle miscele.

Nel capitolo II vengono illustrate le proprietà fisiche dei materiali piroclastici campani coinvolti in fenomeni di colata rapida di fango. Vengono forniti alcuni brevi cenni circa le origini e i meccanismi di deposizione delle coltri piroclastiche campane. In considerazione del fatto che i materiali interessati da tali fenomeni ricoprono i versanti di quasi tutta la regione Campania, le caratteristiche fisiche dei terreni vengono descritte suddividendo le aree interessate dai fenomeni di instabilità in quattro macro-settori caratterizzati da sequenze stratigrafiche simili: l'area dei Monti di Avella settentrionali, l'area dei monti di Avella Meridionali, l'area dei Monti Lattari (Penisola Sorrentina) e l'area dei Campi Flegrei.

Nel capitolo III viene descritta la sperimentazione eseguita nel presente lavoro con sistemi reometrici convenzionali sulle miscele acqua-sedimento. Tale sperimentazione è stata condotta adoperando tre differenti sistemi di misura: reometri rotazionali, un piano inclinato ed un penetrometro a cono. I terreni campionati per il presente studio sono stati analizzati prima considerando la sola frazione fine di terreno (grani di dimensione massima pari a 0,5 mm) e poi anche la frazione grossolana (grani di dimensione massima pari a 10 mm). Nel capitolo vengono descritti le apparecchiature adoperate, i terreni analizzati, il programma sperimentale eseguito con ciascun sistema di misura, la procedura di preparazione delle miscele ed i protocolli sperimentali di prova seguiti. Infine viene illustrata la metodologia utilizzata al fine di scegliere la configurazione geometrica da impiegare con i reometri rotazionali, dal momento che queste apparecchiature sono fornite di differenti sistemi geometrici la cui utilizzazione dipende dal tipo di materiale da analizzare.

Nel capitolo IV vengono discussi i risultati sperimentali relativi alla sperimentazione eseguita con sistemi reometrici convenzionali sulle miscele acqua-sedimento a granulometria fine. Vengono in primo luogo mostrati i risultati relativi alla sperimentazione eseguita con reometro rotazionale.

Attraverso queste prove è stato innanzitutto analizzato il comportamento di tali miscele in funzione del contenuto di solido e l'influenza della sedimentazione sui risultati sperimentali. Poi vengono mostrati i risultati relativi alle prove di flusso e di creep eseguite. In questo capitolo vengono mostrati i risultati sperimentali relativi alle prove eseguite su piano inclinato e con il penetrometro a cono. Tali risultati sono poi stati confrontati con quelli ottenuti dalle prove in reometro rotazionale.

Nel capitolo V viene descritta l'apparecchiatura reometrica innovativa progettata e messa a punto nel presente lavoro, ossia il reometro a trascinamento di sfera SDR (Sphere Drag Rheometer). In primo luogo vengono descritte le caratteristiche generali dell'apparecchiatura ed i principi di misura. Viene poi spiegata la fase di messa a punto dell'apparecchiatura che è stata eseguita adoperando fluidi a comportamento Newtoniano e non Newtoniano di caratteristiche reologiche note. Viene poi spiegato l'approccio teorico utilizzato per la conversione dei dati misurati in parametri reologici e illustrata la procedura di applicazione della teoria di conversione ai dati acquisiti.

Nel capitolo VI vengono presentati i risultati sperimentali relativi alla sperimentazione eseguita con il reometro innovativo SDR sia per le miscele a granulometria fine che per quelle a granulometria grossolana.

Nel capitolo VII vengono presentati i risultati relativi ad alcune analisi numeriche condotte attraverso il codice di calcolo DAN-W con riferimento ad un caso storico di colata rapida di fango occorso a Pozzano (Penisola Sorrentina) nel 1997. Tali simulazioni sono state condotte utilizzando sia un modello reologico i cui parametri sono stati determinati attraverso le prove di laboratorio sia un modello reologico i cui parametri sono stati calcolati attraverso un metodo semplificato basato sulle grandezze geometriche dell'evento, misurate in sito.



---

## *Capitolo I*

# Studio della letteratura

### **I.1 INTRODUZIONE**

Una colata rapida di fango è un movimento di versante in cui la massa franante si muove come un fluido viscoso (Cruden & Varnes, 1996). Infatti, i miscugli solido-liquido che compongono il corpo di frana possono essere considerati, a tutti gli effetti, sospensioni concentrate di particelle variamente assortite (Takahashi, 1991). I modelli costitutivi proposti dalla letteratura per la caratterizzazione delle masse frananti coinvolte in fenomeni di colata rapida di fango fanno uso o delle formule di resistenza dei mezzi granulari o delle formule di resistenza dei fluidi omogenei Newtoniani e Non-Newtoniani. Secondo alcuni autori (Takahashi, 1991; Hungr, 1995; Iverson, 1997) i parametri costitutivi del corpo di colata possono essere ricavati a ritroso dallo studio degli eventi passati o attraverso modelli di previsione che consentono l'osservazione diretta del flusso e delle caratteristiche dei depositi. Altri studi sperimentali, invece, (O'Brien & Julien, 1985; Phillips & Davies, 1991; Major & Pierson, 1992; Coussot & Piau, 1994) hanno evidenziato che il comportamento di tali materiali può essere interpretato utilizzando tecniche mutuata dalla reologia. Nell'ambito del presente lavoro, la scrivente ha approfondito, in particolar modo, l'applicazione di sistemi di misura reometrici allo studio dei terreni piroclastici campani coinvolti in fenomeni di colata rapida di fango.

La reologia è una delle poche branche della scienza alla quale si possa attribuire una ben precisa data di nascita, il 29 aprile 1929, giorno in cui, a

Columbus in Ohio, fu fondata la Società di Reologia, per iniziativa di un gruppo di scienziati che annoverava nomi come quelli di Eugene C. Bingham, Wolfgang Ostwald, Ludwig Prandtl e Markus Reiner. Fu proprio in quell'occasione che Bingham e Reiner coniarono la parola reologia, dal verbo greco  $\rho\epsilon\omega$ , scorrere, per descrivere la scienza che studia il flusso e la deformazione dei corpi. Secondo la reologia tutti i corpi reali possiedono proprietà che sono intermedie tra due comportamenti ideali estremi, da una parte quello del solido perfettamente elastico e dall'altra quello del fluido perfettamente viscoso.

La definizione di reologia riportata potrebbe apparire alquanto generica e rendere i confini del mondo reologico assolutamente vaghi ma ben si adatta al carattere decisamente trasversale di questa materia. Il moto di liquidi come l'acqua è generalmente oggetto della meccanica dei fluidi. Sospensioni di particelle solide in acqua, tuttavia, hanno proprietà di flusso ben più complesse e costituiscono uno degli oggetti della reologia. Analogamente, la meccanica dei solidi è il dominio classico nel quale si inquadra il comportamento sotto deformazione dei materiali solidi. Il campo di azione della reologia riguarda soprattutto i liquidi, o comunque quelle sostanze che, in opportune condizioni, possono fluire. Il solido elastico ed il fluido viscoso, sono caratterizzati da relazioni lineari fra sforzo e deformazione e fra sforzo e velocità di deformazione: i coefficienti di proporzionalità (modulo elastico e viscosità) sono indipendenti sia dallo sforzo che dalla deformazione/velocità di deformazione. Una vasta gamma di materiali, detti viscoelastici, presenta un comportamento intermedio fra quello dei solidi elastici e quello dei fluidi viscosi Newtoniani, tra i quali le miscele acqua-sedimento oggetto di studio.

La misura delle proprietà e delle costanti reologiche dei fluidi viene effettuata attraverso apparecchiature dette "reometri" o viscosimetri. Con tali strumenti si determinano le caratteristiche dei materiali in regime di taglio (tipicamente la viscosità). Diversi metodi sono stati concepiti per la misura della viscosità, ed esiste un gran numero di strumenti commerciali, in grado di coprire ampi campi di valori di viscosità. Il comportamento reologico delle sospensioni concentrate, però, risulta particolarmente complesso e non ancora del tutto ben definito. Nonostante i numerosi studi effettuati ad oggi non esistono delle equazioni costitutive di validità generale a differenza di quanto accade per sistemi più diluiti di cui esistono in letteratura ampi riferimenti

(Batchelor 1970, 1977; Batchelor & Green, 1972). Uno dei maggiori problemi che sono stati incontrati nella definizione del comportamento delle sospensioni concentrate è in parte rappresentato dalla difficoltà nel reperire strumenti di indagine appropriati. Gli apparecchi di misura convenzionali (viscosimetri) non sono infatti adatti allo studio di tali sistemi a causa dell'insorgere durante i test di vari fenomeni quali wall slip, frattura, sedimentazione, migrazione etc, che possono condurre ad una errata interpretazione dei risultati sperimentali. Inoltre, in relazione alla variabilità delle dimensioni delle particelle che, solitamente, sono disperse nelle sospensioni concentrate, si rende necessario l'uso di particolari reometri in grado di eseguire prove su fluidi contenenti particelle grossolane (ossia particelle aventi diametro massimo maggiore di 1 mm).

Nel presente capitolo vengono affrontati gli aspetti principali del campo di studio della reologia. Dopo brevi cenni sui modelli elementari di corpo elastico, corpo viscoso, corpo plastico e corpo viscoelastico, viene trattato il comportamento reologico dei fluidi e vengono descritte le caratteristiche dei fluidi Newtoniani e non Newtoniani. Viene successivamente approfondito il comportamento reologico delle miscele, che costituisce l'oggetto del presente lavoro; vengono descritte le principali tipologie di interazione tra le particelle che compongono le sospensioni concentrate ed i regimi di scorrimento che ne conseguono; vengono illustrate le proprietà reologiche fondamentali delle miscele, ossia la tensione di soglia e la viscosità e vengono presentate le equazioni costitutive utilizzate per descrivere il comportamento reologico delle sospensioni concentrate. Infine vengono descritte le apparecchiature reometriche commercialmente disponibili e quelle sperimentali sviluppate per analizzare miscele contenenti particelle grossolane. Vengono forniti i principi generali di funzionamento, descritte le equazioni che permettono di ricavare la viscosità a partire dalle grandezze sperimentali misurate, discussi i campi di applicazione delle singole apparecchiature e presentati alcuni problemi pratici di misura.

## **I.2 MODELLI ELEMENTARI**

Robert Hooke nel 1678 formulò la legge (*ut tensio sic vis*) secondo cui in un corpo elastico la deformazione  $\varepsilon$  è proporzionale allo sforzo  $\sigma$  impartito:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{I.1})$$

La legge di Hooke definisce il comportamento del corpo elastico ideale. La costante di proporzionalità  $E$  è solitamente detta *modulo elastico del materiale*.

All'estremo opposto di comportamento cadono i fluidi perfettamente viscosi. L'applicazione di una sollecitazione su un fluido viscoso produce generalmente un moto che si mantiene finché la sollecitazione non viene rimossa. Si considerino dunque due superfici parallele, ciascuna di area  $A$ , poste a una piccola distanza  $h$ , tra le quali è interposto un fluido, così come mostrato in Figura I.1. Si eserciti sulla superficie superiore una tensione di taglio  $\tau = F/A$ , che le permetta di muoversi con velocità costante  $U$ . Se la seconda superficie è ferma, passando dalla prima alla seconda superficie la velocità varia da  $U$  a zero.

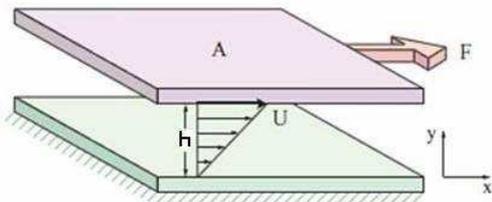


Figura I.1 Campo di velocità per fluido viscoso tra due superfici parallele (velocità relativa  $U$ ).

Isaac Newton nel 1687 stabilì che esiste una relazione di proporzionalità tra  $\tau$ , che viene detta *tensione di taglio*, e il gradiente di velocità  $U/h$ . Quest'ultimo viene solitamente indicato con  $\dot{\gamma}$  ed è anche detto *velocità di deformazione di taglio*. La relazione che caratterizza i fluidi newtoniani è la seguente:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{I.2})$$

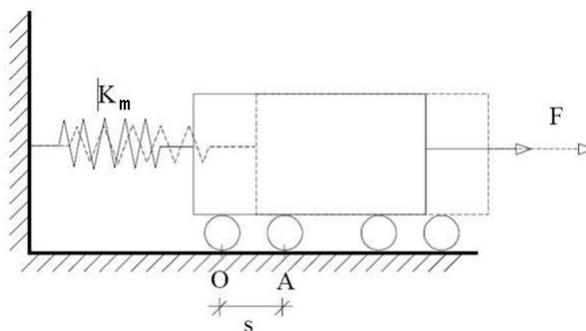
dove  $\eta$  è solitamente detta viscosità, termine a cui viene talvolta aggiunto l'aggettivo dinamica, per distinguerla dalla viscosità cinematica  $\nu$ , che è definita dal rapporto  $\eta/\rho$ , dove  $\rho$  è la densità del fluido.

Le equazioni lineari che caratterizzano i solidi elastici e i fluidi newtoniani risultano dalla modellazione matematica di casi ideali estremi, descrivono relazioni sforzo/deformazione/tempo e costituiscono esempi di equazioni costitutive.

Una vasta gamma di materiali, detti viscoelastici, presenta un comportamento intermedio fra quello dei solidi elastici e quello dei fluidi viscosi Newtoniani. Il fenomeno principale che distingue il comportamento dei materiali viscoelastici da quello dei fluidi viscosi è la loro capacità di recuperare parte della deformazione una volta rimossa la sollecitazione, fenomeno detto di rilassamento (recoil) e di fluire (creep). Non sembra più possibile definire in modo univoco i coefficienti di proporzionalità fra sforzo e deformazione; il loro valore dipende infatti dal tempo di osservazione. Il comportamento osservabile dipende dalla storia meccanica; esso infatti è differente a seconda che si imponga una forza costante (esperimento di creep) o una deformazione costante (esperimento di rilassamento).

### ***1.2.1 Il solido elastico***

Il comportamento di un corpo è definito elastico se le deformazioni prodotte da un sistema di sollecitazioni scompaiono una volta rimosse tali sollecitazioni. La relazione sforzi deformazioni è biunivoca e indipendente dal tempo: una stessa sollecitazione produce sempre la stessa deformazione anche se applicata ripetutamente. Il simbolo comunemente usato per rappresentare l'elasticità di un mezzo è una molla, e lo schema monodimensionale semplificato è quello rappresentato in Figura I.2 (schema di Hooke).



*Figura I.2 Schema di Hooke per un mezzo elastico*

Se si immagina di applicare una forza  $F$  all'estremità libera del carrello e di registrarne lo spostamento  $s$ , la relazione tra  $F$  ed  $s$ , rappresentata in Figura I.2, assume la seguente forma:

$$F = f(s) \quad (\text{I.3})$$

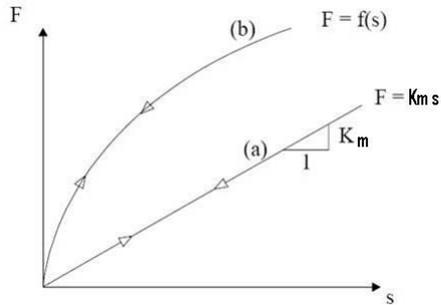


Figura I.3 Comportamento elastico lineare (a) e non lineare (b)

Se  $f(s)$  è una funzione lineare (linea (a) di Figura I.3), ovvero:

$$F = K_m \cdot s \quad (\text{I.4})$$

con  $K_m$  costante, si parla di comportamento elastico-lineare, con  $K$  *modulo elastico della molla*. Se dipende dal livello di sforzo (o di deformazione) raggiunto (curva (b) di Figura I.3), si parla di legame elastico non lineare. La funzione che rappresenta un legame elastico non lineare può essere approssimata con una funzione lineare a tratti, su intervalli opportunamente piccoli dello spostamento.

### I.2.2 Il corpo plastico

Il comportamento di un corpo è definito plastico se, raggiunta una determinata soglia di sollecitazione, si manifestano deformazioni permanenti (ossia che si conservano anche una volta rimosse le sollecitazioni) e indipendenti dalla durata delle sollecitazioni applicate. La relazione sforzi-deformazioni è quindi indipendente dal tempo e non biunivoca: ad uno stesso valore della deformazione possono corrispondere valori diversi della

sollecitazione,  $F$ . La plasticità di un mezzo può essere rappresentata mediante un pattino ad attrito, secondo lo schema monodimensionale semplificato rappresentato in Figura I.4 (schema di Coulomb). Se si immagina di applicare una forza  $F$  all'estremità libera del carrello collegato al pattino, si osserva che non si hanno spostamenti fino a che la sollecitazione non raggiunge un valore limite  $F^*$ . In corrispondenza di tale valore lo spostamento plastico può avvenire a forza applicata costante (mezzo plastico perfetto) (linea (a) di Figura I.5) oppure progredire con aumento della forza applicata (linea (b) di Figura I.5) o diminuzione della forza applicata (linea (c) di Figura I.5). In questi casi si parla, rispettivamente, di mezzo incrudente positivamente o negativamente.

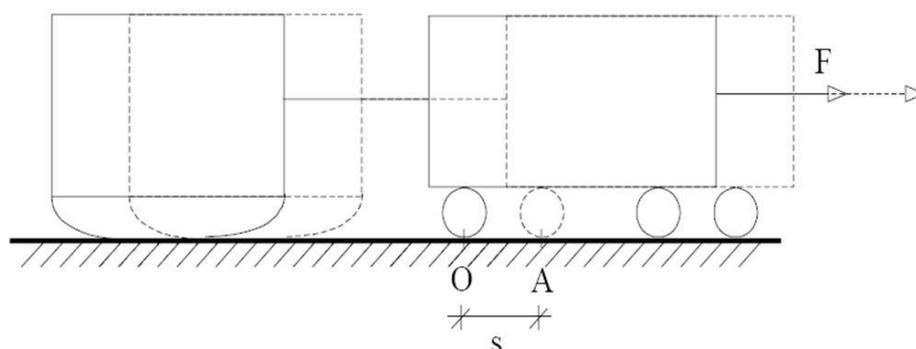


Figura I.4 Schema di Coulomb per un mezzo plastico

Annullando la forza  $F$  non si ha alcun recupero dello spostamento accumulato, come è possibile osservare in Figura I.6. Incrementando nuovamente la forza  $F$  il pattino rimarrà fermo nella posizione assunta sotto il carico precedente, fino a che l'intensità della forza applicata non raggiunge il nuovo valore limite  $F^*$ , che sarà uguale al precedente per mezzo plastico perfetto, maggiore per mezzo incrudente positivamente, minore per mezzo incrudente negativamente. La relazione tra lo spostamento plastico,  $ds^p$ , e l'aliquota di forza che eccede  $F^*$ ,  $dF^*$ , è del tipo:

$$ds^p = \frac{1}{H_i} dF^* \quad (I.5)$$

dove  $H_i$ , detto coefficiente di incrudimento, sarà uguale a zero per mezzo plastico perfetto, positivo per mezzo incrudente positivamente, negativo per mezzo incrudente negativamente.

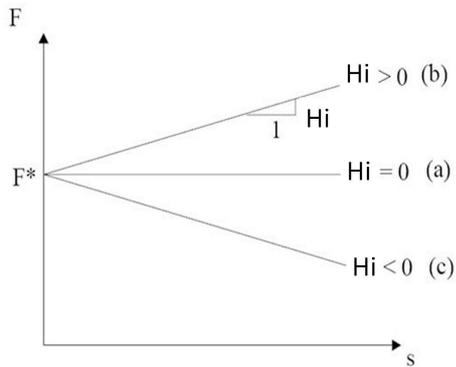


Figura I.5 Andamento tensioni-deformazioni per un mezzo plastico perfetto (a), incrudente positivamente (b) e negativamente (c).

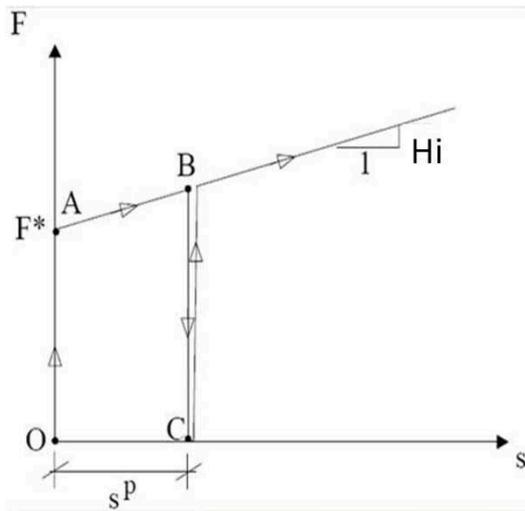


Figura I.6 Deformazione permanente per un mezzo plastico.

### 1.2.3 Il fluido viscoso

Il mezzo viscoso è caratterizzato da deformazioni permanenti che si sviluppano con una velocità legata alla sollecitazione applicata. La velocità di

deformazione si annulla all'annullarsi della sollecitazione. Il simbolo con cui si rappresenta la viscosità di un mezzo è lo smorzatore viscoso (o ammortizzatore idraulico) costituito da un pistone forato che scorre in un cilindro pieno di liquido. Lo schema monodimensionale semplificato del modello è rappresentato in Figura I.7 (schema di Newton).

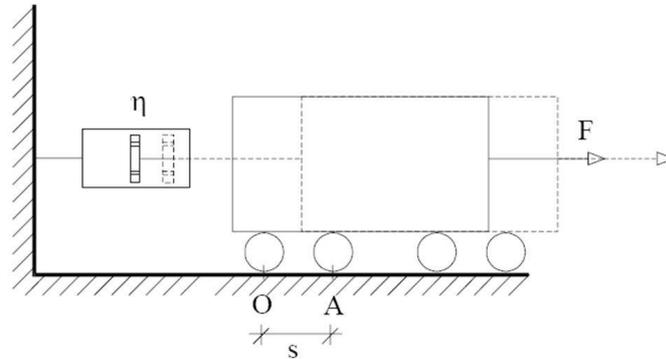


Figura I.7 Schema di Newton per un mezzo viscoso

Se si immagina di applicare una forza  $F$  all'estremità libera del carrello e di registrarne lo spostamento  $s$ , si osserva una relazione tra  $F$  e la velocità di spostamento  $\dot{s} = \frac{ds}{dt}$ , ossia (linea (a) di Figura I.8):

$$F = f(\dot{s}) \quad (\text{I.6})$$

Se  $f(\dot{s})$  è una funzione lineare (linea (b) di Figura I.8), ovvero:

$$F = \eta \cdot \dot{s} \quad (\text{I.7})$$

con  $\eta = \text{costante}$ , si parla di *mezzo viscoso perfetto o newtoniano*, con  $\eta$  viscosità del mezzo.

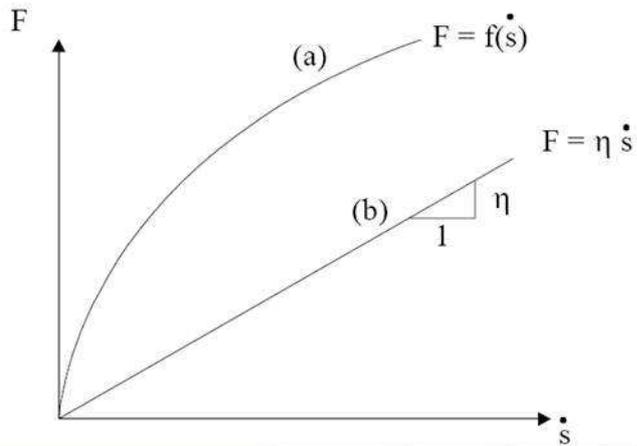


Figura 1.8 Comportamento di un mezzo viscoso (a) e di un mezzo viscoso perfetto (b)

#### 1.2.4 Il corpo viscoelastico

La nozione di viscoelasticità lineare nasce con Maxwell, che, nel 1867, propone una relazione fra tensione  $\tau$  e deformazione  $\varepsilon$ , per un stato di sollecitazione monoassiale:

$$\frac{d\tau}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\tau}{\lambda} \quad (I.8)$$

dove  $E$  è il modulo di elasticità normale e  $\lambda$  è una costante di tempo che misura la scala temporale del processo di rilassamento caratteristico dei materiali viscoelastici. Per  $\lambda \rightarrow 0$  e  $E \rightarrow \infty$  con  $2\eta = \lambda E = \text{costante}$ , l'equazione I.8 si riduce alla componente deviatorica del legame Newtoniano:

$$\tau = 2\eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (I.9)$$

Viceversa, Per  $\lambda \rightarrow \infty$ , l'equazione I.8, integrata rispetto al tempo, conduce al legame di Hooke.

Successivamente è stato proposto un legame fra tensione tangenziale  $\tau$  e deformazione angolare  $\gamma_a$  per uno stato di sollecitazione di puro taglio:

$$\tau = \mu \frac{d\gamma_a}{dt} + G\gamma_a \quad (\text{I.10})$$

dove  $G$  è il modulo di elasticità tangenziale e  $\eta$  è la viscosità dinamica. La I.10 definisce quello che è oggi noto come corpo di Kelvin-Voigt.

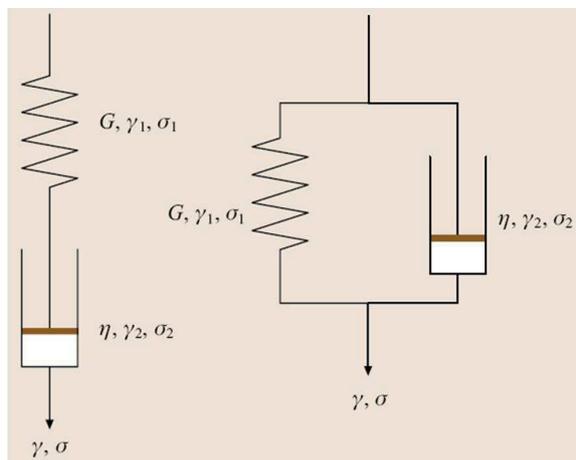


Figura I.9 Modello di Maxwell (sinistra) e modello di Voigt–Kelvin (destra).

Nel modello di Maxwell, il modello di molla del corpo elastico e quello di smorzatore del liquido viscoso sono in serie mentre nel modello formulato da Voigt–Kelvin essi sono in parallelo (Figura I.9). Il modello di Maxwell è adatto a descrivere il rilassamento del materiale mentre quello di Voigt–Kelvin descrive il fenomeno del creep.

### I.3 ASPETTI PRINCIPALI DEL COMPORTAMENTO REOLOGICO DEI FLUIDI

La reologia, come spiegato precedentemente, studia il comportamento sforzo-deformazione dei fluidi. La grandezza che caratterizza il fenomeno è la viscosità, ossia la resistenza opposta dal materiale a fluire sotto l'azione dello sforzo. Da un punto di vista intuitivo la viscosità è la resistenza al moto di un fluido. Da un punto di vista più quantitativo si può dire che la viscosità misura la capacità di scorrimento di un fluido sotto l'azione di forze di taglio.

Maggiore è la viscosità, a parità di forza applicata, minore è il gradiente di scorrimento che si sviluppa nel fluido e viceversa.

La viscosità viene espressa quantitativamente mediante due parametri fondamentali: la tensione di taglio applicata e la velocità di deformazione. Facendo riferimento all'esperienza ideale di un fluido posto tra due piastre parallele, descritto precedentemente (§ I.2, Figura I.1), la tensione di taglio  $\tau = F/A$  provoca uno scorrimento nel liquido. Raggiunte le condizioni di moto stazionario, nel fluido si istaura un profilo di velocità triangolare. La massima velocità di scorrimento  $U_{\max}$  si avrà nello strato superiore. La velocità decresce lungo la sezione fino al valore  $U_{\min}$  pari a 0 dello strato limite a contatto con la superficie stazionaria. Si dovrà inoltre ipotizzare che si lavori in un regime laminare, il che significa che gli strati liquidi infinitamente sottili scivolano uno sull'altro come le carte di un mazzo da gioco. Uno strato laminare risulta allora spostato rispetto allo strato adiacente di una frazione dello spostamento totale che si ha nel liquido tra le superfici. La tensione di taglio a cui viene sottoposto il fluido in questo semplice flusso di scorrimento, determina il gradiente di scorrimento o velocità di deformazione  $\dot{\gamma}$ :

$$\dot{\gamma} = \frac{dU}{dy} = \frac{U_{\max}}{h} \quad (\text{I.11})$$

La viscosità del fluido è allora definita come il rapporto tra la tensione tangenziale applicata ed il gradiente di scorrimento:

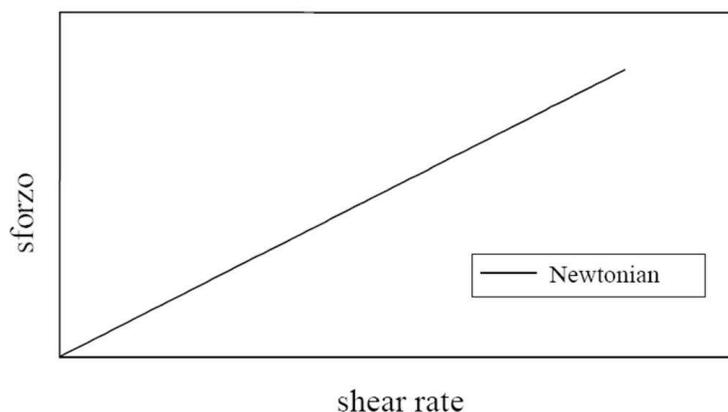
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{I.12})$$

La viscosità, quindi, è un fattore di resistenza legato fundamentalmente alla natura del corpo sottoposto a taglio.

### ***1.3.1 Fluidi Newtoniani***

La definizione di viscosità data precedentemente (§ I.3, Equazione I.12) rappresenta una equazione costitutiva, cioè un legame tra la tensione applicata e le condizioni di flusso che si generano nel fluido. La rappresentazione

grafica di tale equazione costitutiva, ossia il diagramma della tensione in funzione della velocità di scorrimento, prende il nome di curva di flusso. Nel caso in cui la curva di flusso sia costituita da una retta (Figura I.10) il fluido viene detto Newtoniano. In questo caso la viscosità (ovviamente a temperatura controllata) è costante, nel senso che non dipende dalle condizioni di flusso applicate. Sono liquidi Newtoniani l'acqua e la maggior parte dei solventi organici.



*Figura I.10 Comportamento reologico dei fluidi Newtoniani.*

Il comportamento Newtoniano è quello reologicamente più semplice. Da un lato, ciò permette di descrivere con grande accuratezza il comportamento in flusso di tali liquidi. Dall'altro, il fluido Newtoniano costituisce il punto di riferimento a cui paragonare tutti i comportamenti reologicamente più complessi, e proprio per questo detti non Newtoniani.

### ***1.3.2 Fluidi non Newtoniani***

Il comportamento di un fluido Newtoniano è dunque descritto dall'equazione costitutiva I.2 (§ I.3) nella quale la viscosità  $\eta$  è costante. Quando ciò non si verifica, il fluido viene detto non Newtoniano. Questo accade quando il legame tra la tensione di taglio e la velocità di deformazione non è più lineare, per cui il legame costitutivo per un fluido non Newtoniano viene generalmente descritto come  $\tau = f(\dot{\gamma})$  o in maniera equivalente  $\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$ . In altri termini nella relazione costitutiva per fluido non

Newtoniano, la viscosità non è più costante ma varia in funzione della velocità di deformazione. La complessità del comportamento reologico dei fluidi non Newtoniani si traduce in una viscosità variabile con le condizioni di flusso.

Sebbene si perda la diretta proporzionalità tra la tensione di taglio e la velocità di deformazione, tuttavia, la relazione costitutiva generale per fluidi non Newtoniani mantiene due aspetti caratteristici di quella per fluidi Newtoniani:

- ~ si tratta di una relazione biunivoca;
- ~ esiste una condizione di flusso a riposo per cui  $\tau = f(\dot{\gamma}) = 0$  per  $\dot{\gamma} = 0$ .

Mentre la prima condizione è sempre praticamente soddisfatta e costituisce un vincolo necessario affinché un flusso sia stabile, vi sono fluidi per i quali la seconda condizione non è rispettata. I fluidi non Newtoniani per i quali sono soddisfatte entrambe le condizioni descritte, possono essere suddivisi in due categorie, prendendo sempre come riferimento il comportamento del fluido non Newtoniano:

- ~ i *fluidi pseudoplastici* (shear thinning) nei quali la tensione di taglio è una funzione crescente in modo meno che lineare della velocità di deformazione;
- ~ i *fluidi dilatanti* (shear thickening) nei quali la tensione di taglio è una funzione crescente in modo più che lineare della velocità di deformazione.

I fluidi per i quali non sono soddisfatte entrambe le condizioni descritte sono fluidi non Newtoniani definiti *fluidi viscoplastici* o *fluidi alla Bingham*. Similmente ai materiali definiti plastici, che si deformano solo quando viene superato un valore di soglia della tensione, questi fluidi cominciano a fluire solo quando la tensione di taglio eccede un valore critico e la risposta al di sopra di tale valore critico è di tipo viscoso.

I fluidi non Newtoniani descritti fino ad ora vengono anche definiti fluidi tempo-indipendenti perché vi sono anche molti fluidi non Newtoniani caratterizzati dal fatto che le proprietà reologiche variano in funzione del tempo. Tali fluidi non Newtoniani si dividono in *fluidi tixotropici* e *fluidi reopettici*. Un fluido che presenta una diminuzione graduale della viscosità sotto l'azione di un flusso di taglio, seguito da un graduale incremento quando l'intensità del flusso viene diminuita è chiamato tixotropico. Il comportamento opposto a quello tixotropico, cioè un aumento della viscosità del fluido sottoposto a flusso seguito da un graduale decremento quando lo sforzo

applicato viene ribassato, è tipico invece dei fluidi reopettici. I comportamenti tempo-dipendenti descritti sono spesso conseguenza dell'interazione tra il flusso e la microstruttura del fluido. Classico è il caso di molte sospensioni concentrate che in condizioni quiescenti possono dare origine a fenomeni di aggregazione che comportano, a loro volta, elevati valori di viscosità. Quando viene applicato il flusso, gli aggregati si destrutturano portando alla diminuzione della viscosità. Una successiva diminuzione della velocità di deformazione comporta una parziale re-strutturazione e quindi una risposta del fluido di tipo tixotropico.

In Figura I.11 sono riportate le curve di flusso dei principali tipi di fluidi non Newtoniani tempo-indipendenti e, per riferimento, anche quella del fluido Newtoniano.

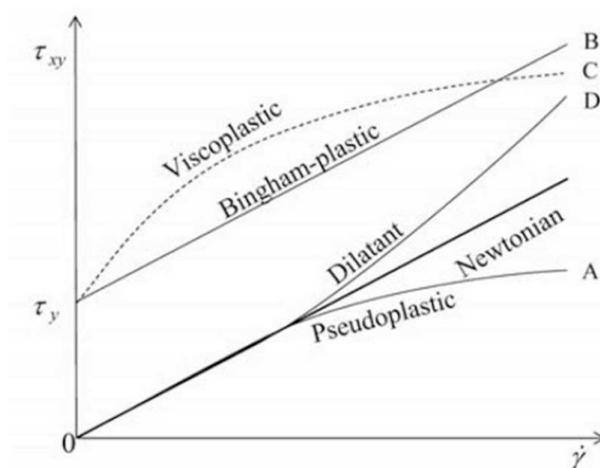


Figura I.11 Comportamento reologico dei fluidi non Newtoniani tempo-indipendenti.

#### A. Fluidi pseudoplastici (*shear thinning*)

I fluidi pseudo plastici, il cui comportamento reologico è rappresentato dalla curva A di Figura I.11, sono caratterizzati da una pendenza decrescente della curva di flusso e la viscosità di tali fluidi diminuisce al crescere della velocità di deformazione. Per questi fluidi si ha che la viscosità è costante per valori molto bassi e molto alti della velocità di deformazione. La curva di flusso dei fluidi pseudoplastici è quindi caratterizzata dalla presenza di due

rami lineari, chiamate regioni o plateaus Newtoniani, in corrispondenza dei quali la viscosità viene definita come viscosità zero  $\eta_0$  (ossia viscosità per bassi valori della velocità di deformazione) e viscosità infinita  $\eta_\infty$  (ossia viscosità per alti valori della velocità di deformazione).

Esistono molte relazioni empiriche che descrivono il comportamento reologico dei fluidi pseudoplastici. Tra queste la più semplice è la legge di potenza (Power Law) definita da Ostwald (1925):

$$\tau = m |\dot{\gamma}|^{n_p-1} \dot{\gamma} \quad (\text{I.13})$$

Nella quale  $m$  e  $n_p$  sono due costanti il cui valore dipende dalle caratteristiche del fluido ( $m$  è chiamato indice di consistenza ed  $n_p$  è detto indice di pseudo plasticità). I fluidi il cui comportamento è ben descritto dalla equazione sono generalmente chiamati Fluidi power law. In particolare, quando  $n_p < 1$ , i fluidi si comportano come fluidi pseudoplastici mentre quando  $n_p = 1$  e  $m = \eta$  essi esibiscono un comportamento Newtoniano.

*B e C. Fluidi alla Bingham e fluidi viscoplastici*

Il comportamento reologico dei fluidi viscoplastici, rappresentato dalla curva C di Figura I.11, viene descritto dal modello di Bingham generalizzato:

$$\tau = \tau_c + m |\dot{\gamma}|^{n_p-1} \dot{\gamma} \quad (\text{I.14})$$

Dove  $\tau_c$  è chiamata tensione di soglia (yield stress). La tensione di soglia rappresenta quel valore critico di tensione superato il quale il materiale comincia a fluire e rappresenta il valore di  $\tau_c$  per  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ .

Il comportamento dei fluidi alla Bingham è rappresentato dalla curva B di Figura I.11. La relazione costitutiva che interpreta il comportamento di un fluido siffatto è detta appunto formula di Bingham e si ricava dal modello di Bingham generalizzante (equazione I.14) per  $n_p=1$  e  $m=\mu_B$  :

$$\tau = \tau_c + \mu_B \dot{\gamma} \quad (\text{I.15})$$

Nella quale  $\eta_B$  viene chiamata viscosità plastica alla Bingham.

*D. Fluidi dilatanti (shear thickening)*

I fluidi dilatanti, il cui comportamento reologico è rappresentato dalla curva D di Figura I.11 è simile a quello esibito dai fluidi pseudoplastici ma con la differenza che la pendenza della curva di flusso diminuisce al crescere della velocità di deformazione e, quindi, la viscosità cresce al crescere del gradiente di scorrimento. Il comportamento di questi fluidi viene descritto attraverso il modello di legge di potenza (Power Law) di Ostwald. Questo tipo di fluidi non Newtoniani vengono detti dilatanti in quanto mostrano la tendenza a dilatarsi volumetricamente durante il flusso.

#### I.4 COMPORTAMENTO REOLOGICO DELLE MISCELE

Le miscele (o sospensioni) sono sistemi bifasici in cui una fase solida è finemente dispersa in una fase liquida (o mezzo sospeso) o, più precisamente, le miscele sono definite come sistemi eterogenei bifasici in cui una fase solida costituita da particelle risulta distribuita in una fase liquida continua (Mewis, 1976). Le sospensioni rappresentano una classe di fluidi complessi il cui comportamento reologico si differenzia in base alla natura fisico-chimica delle particelle sospese o del fluido sospeso. Le proprietà reologiche di una sospensione dipendono da più fattori quali la forma e la distribuzione delle dimensioni delle particelle, la presenza di cariche superficiali e dal tipo di flusso oltre che dalla frazione volumetrica in solido (o concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ ). Tutti questi fattori determinano il prevalere di un tipo di interazioni sulle altre condizionando così il comportamento macroscopico non Newtoniano della miscela (Jeffrey & Acrivos, 1976). Particolare interesse, nell'ambiente scientifico, è da sempre suscitato dalle sospensioni concentrate, di cui sono state date varie definizioni (Stickel & Powell, 2005):

- ~ Sistemi in cui la distanza media di separazione tra le particelle è uguale o minore alla dimensione delle particelle stesse;
  - ~ Sistemi in cui le interazioni tra le particelle contribuiscono significativamente alla reologia della sospensione;
  - ~ Sistemi il cui comportamento reologico è quello dei fluidi non newtoniani.
- L'interesse è giustificato dal fatto che numerosi sono i materiali reali che rientrano in questa ampia categoria. Gli esempi di tali materiali, cui si fa spesso riferimento con il termine di fluidi strutturati, "soft solids" o paste, a

seconda della minore o maggiore consistenza, sono molteplici: prodotti dell'industria alimentare (maionese, salse, cioccolata), prodotti farmaceutici e della cura del corpo (creme, schiume unguenti), ma anche vernici, inchiostri, paste di argilla, paste ceramiche, materiali ingegneristici come le paste di cemento, i calcestruzzi o come i miscugli acqua-sedimento coinvolti nei fenomeni di colata rapida. Infatti le miscele acqua-sedimento possono essere considerate a ragione delle sospensioni concentrate. Esse sono, infatti, sistemi a più componenti in cui particelle solide, gli aggregati di dimensioni e forma diverse, sono disperse in un liquido viscoso, composto da acqua e particelle fini, che a sua volta è una sospensione concentrata (Ferraris, 1999).

In breve si può dire che le sospensioni concentrate, per effetto delle mutue interazioni tra particelle, sono caratterizzate dall'esistenza di un network continuo tridimensionale di particelle tra loro in contatto. In tali condizioni, il flusso della sospensione è possibile solo una volta che la struttura tridimensionale sia stata distrutta. Ciò comporta l'esistenza di un valore minimo della sollecitazione esterna da applicare in corrispondenza del quale si assiste alla transizione da un comportamento di tipo solido ad un comportamento di tipo liquido. Per la maggior parte di questi materiali, infatti, si ha scorrimento quando, sottoposti ad un regime di taglio, la tensione di taglio applicata  $\tau$  non eccede una tensione di soglia, chiamata *yield stress*,  $\tau_c$ . Sull'effettiva esistenza di una tensione di soglia è stato sviluppato un ampio dibattito (Barnes, 1999), la cui conclusione può forse riassumersi affermando che, ancorché lo *yield stress* possa essere solo la testimonianza di una rapida variazione della tensione per valori molto bassi della velocità di deformazione, tuttavia un modello siffatto può considerarsi un utile schema per l'interpretazione di una vasta gamma di fenomeni relativi a molti materiali reali, tra i quali le miscele acqua-sedimento oggetto di studio.

#### ***1.4.1 Interazioni tra particelle e regimi di scorrimento***

Una classificazione dei diversi tipi di interazione tra particelle che possono verificarsi in una miscela, sulla base delle dimensioni caratteristiche delle particelle, è stata proposta da Cyr nel 1999 (Figura I.12). Nel seguito vengono esaminati in dettaglio i vari tipi di interazione tra particelle che si possono avere in una miscela.

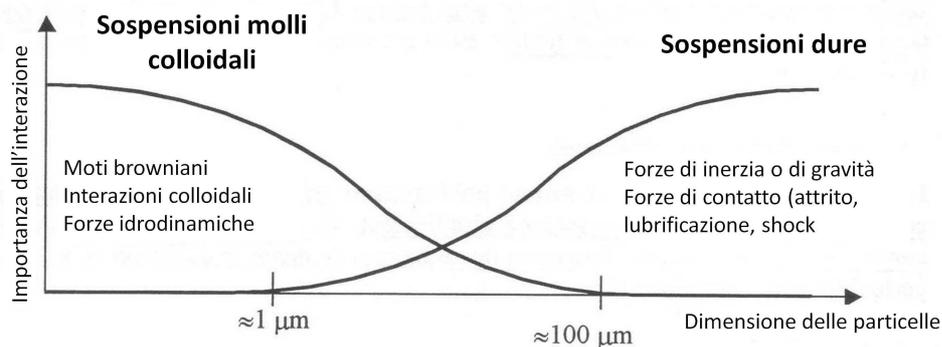


Figura I.12 Schematizzazione dei principali tipi di interazioni tra le particelle di una sospensione (modificato da Cyr, 1999)

#### *Movimenti browniani*

I movimenti browniani sono dovuti al moto delle particelle solide presenti in sospensione, causati dai moti termici delle molecole del mezzo disperdente che urtano contro le particelle solide. Tali movimenti, rotazionali e traslazionali sono statistici e tendono ad allontanare le singole particelle dalla loro posizione iniziale. Questo tipo di interazione, che determina una dissipazione di energia, si verifica generalmente nel caso di particelle solide di taglia submicronica ( $<1 \mu\text{m}$ ).

#### *Interazioni colloidali*

Questo tipo di interazioni interessa sistemi bifasici in cui le particelle solide sono caratterizzate da dimensioni molto ridotte, comprese tra 1 e 100 nm. Le interazioni tra particelle in sospensione sono dovute a forze attrattive (Van der Waals), forze repulsive (generate dalla presenza di cariche elettriche superficiali) e forze dovute agli effetti sterici. Le forze attrattive di Van der Waals sono dovute all'effetto di debole attrazione intermolecolare causata da dipoli molecolari indotti. Le forze attrattive dipendono dalla geometria delle particelle, dalle specie adsorbite sulla loro superficie e dalla natura del mezzo disperdente. E' importante notare che le forze di interazione sono sensibili solo a piccole distanze tanto che vengono indicate anche come forze a corto raggio. Le forze repulsive sono invece forze elettrostatiche a lungo raggio generate dalla presenza di cariche elettrostatiche sulla superficie delle particelle in sospensione. In tali condizioni, sulla superficie della particella

solida, all'interfaccia con il liquido, si forma un doppio strato costituito essenzialmente da ioni di segno opposto alla carica della particella. In prima approssimazione lo strato più interno, detto anche strato di Stern, è formato quasi esclusivamente da ioni di segno opposto ed è intimamente legato alla particella. Lo strato di Stern è poi circondato da uno strato diffuso di ioni liberi di muoversi. Quando infatti una singola particella si sposta all'interno della sospensione, lo strato di Stern rimane immobile e si sposta solidalmente alla particella mentre lo strato diffuso si deforma. La superficie di separazione tra i due strati definisce un piano di taglio. Anche in tal caso l'interazione dipende da vari fattori quali la forma delle particelle, la costante dielettrica del mezzo disperdente e la concentrazione dell'elettrolita.

#### *Forze idrodinamiche*

Gli effetti idrodinamici sono il risultato della presenza nel mezzo fluido di particelle solide che ne perturbano il campo di velocità con conseguente dissipazione di energia. Una particella solida in movimento in un fluido di viscosità  $\eta$ , in condizioni stazionarie, è infatti soggetta ad una forza di attrito viscoso data da  $F_a = -k_a \eta v$ , dove  $v$  è la velocità della particella relativa al volume di fluido che la circonda e  $k_a$  un coefficiente dipendente da forma, dimensioni e orientamento della particella stessa. Nel caso delle miscele bisogna tenere conto della presenza di più particelle nel fluido; ne deriva che il moto di ogni singola particella perturba il campo di velocità delle particelle ad essa vicine, aspetto che non è considerato nella precedente espressione della forza di attrito viscoso in cui compare la viscosità del solo fluido. Si suppone pertanto che se la particella si sposta su distanze ridotte rispetto alla distanza che la separa dalle particelle vicine, essa vede attorno a se solo il fluido interstiziale; in questo caso è lecito considerare la viscosità del solo fluido interstiziale. Se la particella si sposta invece su distanze maggiori della distanza che la separa dalle particelle adiacenti, si può supporre che il suo moto avvenga in un fluido omogeneo, le cui proprietà coincidono con quelle della sospensione; nell'espressione della forza di attrito  $F_a$  si considera allora la viscosità  $\eta_s$  della sospensione.

#### *Forze di contatto*

Le forze di contatto entrano in gioco quando la frazione di solido in sospensione è molto elevata, tanto da poter supporre l'esistenza di un vero e proprio "network" continuo di particelle in contatto tra loro (Coussot &

Anczyk, 1999). Il contatto tra le particelle di una sospensione può essere di diversi tipi: lubrificato, diretto o con attrito e per collisione. Se le interazioni colloidali sono trascurabili il contatto diretto tra particelle si manifesta quando si possono vincere le forze viscosse derivanti dal flusso tra le particelle stesse. Quando la distanza di separazione tra le particelle è molto piccola la forza predominante è la forza normale dovuta alla compressione del fluido interstiziale. Tale forza tende ad un valore infinito quando la distanza  $h$  tra le particelle tende a zero. Dal punto di fisico ciò non è accettabile per cui si suppone che il contatto diretto avvenga quando la distanza tra le particelle è dell'ordine della rugosità superficiale. Il contatto diretto tra le particelle è ostacolato dalle elevate forze di repulsione che si sviluppano quando le particelle si avvicinano l'una all'altra. Più precisamente, per effetto dell'applicazione di una sollecitazione a taglio e in assenza di azioni esterne, le forze di repulsione sono molto maggiori delle forze dovute al flusso; di conseguenza le particelle rimangono circondate da uno strato di fluido ed il contatto è di tipo lubrificato. Il contatto diretto può avvenire se sulle particelle agiscono forze esterne sufficientemente elevate quali la pressione o la gravità. Se gli effetti legati alla compressione del fluido interstiziale sono dominanti, il moto relativo di strati di particelle, indotto dall'applicazione di una sollecitazione a taglio, determina la comparsa di sforzi normali. Tale fenomeno è in relazione con l'effetto di addensamento (crowding) responsabile della dilatazione della fase granulare ed è pertanto indicato come dilatazione. Il regime lubrificato avviene solo per valori sufficientemente elevati della deformazione a taglio. Se il sistema è libero di dilatarsi il contatto diretto tra le particelle è praticamente trascurabile poiché le forze repulsive aumentano con la velocità di deformazione. Se però al sistema è applicata una sollecitazione normale, ad esempio la forza di gravità, il contatto diretto può avvenire per bassi valori della velocità di deformazione in corrispondenza dei quali le forze repulsive sono trascurabili. All'aumentare della deformazione a taglio, le forze repulsive legate alla compressione del fluido interstiziale possono diventare sufficientemente elevate tanto da impedire il contatto diretto tra particelle. Il contatto tra particelle per collisione può verificarsi per velocità di taglio sufficientemente elevate e a concentrazioni elevate in solido, nel così detto regime di inerzia. La probabilità di collisione tra particelle è estremamente bassa a meno che non si abbiano frazioni volumetriche di solido

elevate e bassa viscosità del fluido interstiziale. Le forze repulsive viscosive, infatti, smorzano notevolmente gli effetti di inerzia.

Coussot & Ancey (1999) hanno proposto una classificazione dei diversi regimi di scorrimento che si verificano a livello macroscopico in sospensioni concentrate, in funzione dei diversi possibili tipi di interazione tra le particelle. Nel diagramma di Figura I.13 sono esemplificati i diversi regimi di scorrimento che si instaurano in una sospensione concentrata, sottoposta all'azione di una tensione di taglio, in funzione della velocità di deformazione,  $\dot{\gamma}$ , e della frazione volumetrica in solido,  $\Phi$ . Tali regimi sono individuati sulla base di numeri adimensionali che mettono in relazione i differenti tipi di interazioni tra particelle, senza tenere conto di caratteristiche quali dimensioni e forma delle particelle, temperatura, geometria di flusso, coefficiente di attrito, densità del fluido e delle particelle, viscosità del fluido interstiziale, forza esterna applicata e condizioni al contorno, che sono ritenuti costanti.

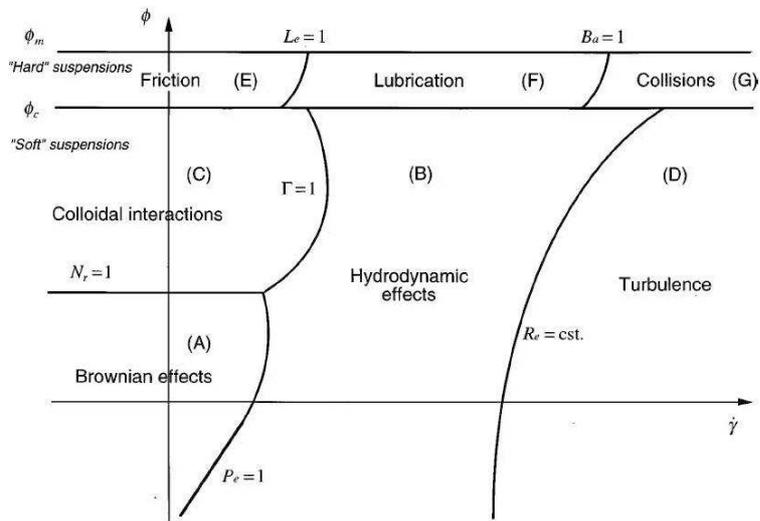


Figura I.13 Classificazione dei diversi regimi di scorrimento di una sospensione (da Coussot e Ancey, 1999)

I numeri adimensionali in Figura I.13 sono:

- ~ Numero di Peclet,  $Pe$ , che esprime il rapporto tra gli effetti idrodinamici e i moti browniani delle particelle in sospensione. Un numero di Peclet critico,  $Pe_c$ , è inoltre definito come il rapporto tra l'energia necessaria per

estrarre una particella dal suo ambiente e l'energia media di agitazione termica;

- ~ Numero di Leighton,  $Le$ , dato dal rapporto tra l'energia di dissipazione viscosa e l'energia dissipata per attrito;
- ~ Numero di Bagnold,  $Ba$ , definito come rapporto tra l'energia dissipata per effetto del contatto per collisione e l'energia di dissipazione viscosa;
- ~ Numero di Reynolds,  $Re$ , definito come rapporto tra gli effetti cinetici e gli effetti viscosi. A seconda del suo valore si può individuare un regime di scorrimento laminare, caratterizzato dal prevalere degli effetti viscosi, e un regime turbolento, con predominanza degli effetti cinetici, che si verifica per valori elevati della velocità di deformazione. Il valore critico del numero di Reynolds,  $Re_c$ , che segna la transizione dal regime laminare al regime turbolento è ben definito per fluidi newtoniani a differenza di quanto accade per i fluidi viscoplastici.

Nel grafico la transizione da un regime di scorrimento all'altro è rappresentata dalle curve in corrispondenza delle quali i numeri adimensionali sopra definiti assumono valore unitario. Le informazioni deducibili dall'esame di tale grafico sono molteplici. Nel caso specifico delle miscele acqua-sedimento, nostro oggetto di studio, l'interesse è rivolto alle sospensioni ad elevata concentrazione in solido, caratterizzate da un contenuto solido compreso tra un valore critico,  $\Phi_c$ , e la frazione di impacchettamento massima,  $\Phi_m$ , che dipende dalla distribuzione granulometrica, dalla forma e dalla deformabilità delle particelle. Tali condizioni presuppongono l'esistenza di un network continuo di particelle tra le quali le interazioni avvengono per contatto (lubrificato o diretto) e si verificano quando la frazione di solido supera il valore critico,  $\Phi_c$ . Per quanto riguarda quindi il dominio delle sospensioni granulari ( $\Phi > \Phi_c$ ), si possono individuare i differenti regimi al variare del valore relativo dei due numeri dimensionali  $Le$  e  $Ba$ :

- ~ Regime di scorrimento con attrito (E), per bassi valori della velocità  $\dot{\gamma}$ ; sia il numero di Leighton che il numero di Bagnold sono molto minori di 1. Il tipo di interazione prevalente tra le particelle è il contatto con attrito. Il comportamento della sospensione è di tipo Coulomb, dipendente pertanto dalla pressione e dalla storia passata del materiale.
- ~ Regime di scorrimento lubrificato (F), per valori di  $\dot{\gamma}$  più elevati. In tali condizioni il numero  $Le$  diviene maggiore di 1 mentre quello di  $Ba$  rimane

inferiore all'unità. Il contatto tra le particelle è di tipo lubrificato per effetto del fluido sospendente ed il comportamento della sospensione è approssimativamente viscoso.

- ~ Regime di scorrimento collisionale (G) per valori elevati della velocità di deformazione. I numeri di  $Le$  e  $Ba$  sono entrambi molto maggiori dell'unità. Le particelle interagiscono tra loro tramite forze di collisione; il comportamento della sospensione è descritto da un modello di tipo Bagnold.

Le curve che individuano la transizione da un tipo di regime all'altro corrispondono al caso in cui i due tipi di interazione hanno lo stesso peso nella dissipazione di energia. Nella realtà le transizioni sono sempre progressive. Nel caso delle sospensioni granulari concentrate può accadere che due tipi diversi di interazione siano entrambi predominanti. Si può pertanto distinguere un regime attrito-collisionale (caso dei mezzi granulari secchi), un regime attrito-idrodinamico (caso delle paste granulari) e un regime idrodinamico-collisionale (caso delle colate rapide). Questi regimi intermedi descrivono meglio il comportamento a scorrimento che si verifica nella pratica; purtroppo le leggi che regolano tali regimi sono tutt'altro che ben definite.

#### ***1.4.2 La tensione di soglia (yield stress)***

Lo *yield stress* (o tensione di soglia) è generalmente definito come il valore minimo della tensione di taglio per indurre fenomeni di scorrimento del materiale (Petra & Boger, 1996). Il concetto di *yield stress* rappresenta da lungo tempo l'argomento di un acceso dibattito nel campo della reologia (Barnes, 1999, Nguyen & Boger, 1992, Heymann et al., 2002). L'esistenza della tensione di soglia è ben documentata in letteratura, infatti numerosi esperimenti in reometro condotti su miscele di fango naturale hanno mostrato chiaramente la presenza di una tensione di soglia (O' Brien & Julien, 1988; Coussot & Piau, 1994; Martino, 2003; Scotto di Santolo et al, 2010, 2011). La presenza della tensione di soglia è stata provata analizzando i dati sperimentali relativi al regime stazionario in corrispondenza del quale la curva di flusso tende ad un valore finito quando la velocità di deformazione tende a zero. Numerosi sono gli esempi di materiali o classi intere di materiali (metalli, sospensioni colloidali, fluidi non newtoniani, etc), che mostrano una significativa variazione delle proprietà reologiche in un intervallo di sforzo

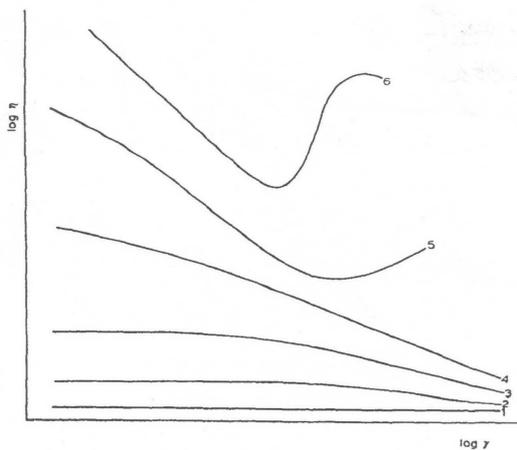
limitato. In tale intervallo il materiale mostra sia un comportamento elastico che viscoso, tanto che si parla di flusso viscoelastico o viscoplastico. Lo *yield stress* rappresenta il valore della tensione di taglio in corrispondenza del quale si registra una variazione significativa nella risposta del materiale. Per valori della tensione inferiori allo *yield stress* il materiale si comporta essenzialmente come un solido, mentre per valori superiori inizia a fluire come un liquido. Il comportamento solido è associato all'elasticità: il materiale si deforma sotto l'applicazione di un carico e la deformazione è completamente recuperata quando la sollecitazione è rimossa. Il comportamento liquido è invece associato alla viscosità: il materiale si deforma in modo continuo quando è soggetto ad un'azione esterna, deformazione che non viene assolutamente recuperata una volta cessata la sollecitazione. Lo *yield stress* rappresenta quindi il valore della tensione di taglio in corrispondenza del quale si verifica la transizione tra il comportamento elastico dei solidi e il comportamento viscoso dei liquidi. Le controversie sono state generate dalla mancanza di strumenti accurati quali i viscosimetri di ultima generazione in grado di svolgere misure più accurate nel campo delle basse velocità di deformazione tipiche del fenomeno di *yield stress*. Un altro fattore causa di equivoci è rappresentato dalla durata del tempo di osservazione sperimentale dei fenomeni che si producono nel materiale al di sotto del valore di *yield stress*. Per una corretta determinazione della tensione di soglia è infatti necessario che l'intervallo di tempo sperimentale di misura sia sufficientemente lungo in modo da poter apprezzare la deformazione elastica e limitare il contributo viscoso.

### ***1.4.3 La viscosità***

La viscosità delle sospensioni concentrate dipende da più fattori quali la viscosità del fluido sospendente, la frazione volumetrica di solido, la massima frazione di impacchettamento e la distribuzione delle dimensioni delle particelle (Chang & Powell, 1993). Le particelle interagendo tra di loro fanno sì che la viscosità della sospensione sia molto maggiore di quella del solo mezzo sospendente. La viscosità di una sospensione di particelle solide è infatti sempre maggiore di quella della sola fase liquida. Quando ad un liquido con caratteristiche newtoniane viene aggiunta una frazione di particelle solide la miscela risultante esibisce un comportamento non Newtoniano. Diverse

sperimentazioni in reometro condotte su sospensioni di fanghi naturali a granulometria fine e grossolana (Ancey & Jorrot, 2001; Ancey, 2003) hanno mostrato che per concentrazioni solide volumetriche di particelle grossolane modeste, la viscosità di una sospensione è indipendente dalla dimensione delle particelle ma aumenta in modo significativo al crescere della frazione grossolana presente nella miscela.

La tipica curva di flusso ( $\eta$ ,  $\dot{\gamma}$ ) di una sospensione concentrata (Figura I.14, curve 1-4) presenta un plateau newtoniano per bassi valori della velocità di deformazione, una zona intermedia caratterizzata dalla diminuzione della viscosità all'aumentare della velocità di deformazione a taglio (shear thinning) seguita da un secondo plateau newtoniano con viscosità inferiore al primo per valori elevati della velocità di deformazione. Per velocità di deformazione a taglio ancora maggiori (Figura I.14, curve 5 e 6) si ha un aumento della viscosità all'aumentare della tensione di taglio applicata (shear thickening). Il comportamento del sistema oltre quest'ultima regione non è ben definito anche se alcuni studi hanno evidenziato fenomeni di shear thinning nel caso non si verifichi prima la frattura. L'aumento della concentrazione di solido ha l'effetto di accentuare tali caratteristiche (Figura I.14, la concentrazione aumenta passando dalla curva 1 alla 6).



*Figura I.14 Rappresentazione della viscosità ( $\eta$ ) di una sospensione in funzione della velocità di deformazione ( $\dot{\gamma}$ ) al variare del contenuto di solido. (da Mewis, 1976).*

#### 1.4.4 Equazioni costitutive

Esistono numerosi modelli reologici empirici per descrivere le relazioni sperimentali tra la tensione di taglio e la velocità di deformazione di materiali viscoplastici quali le sospensioni concentrate. Tuttavia, ad oggi non esistono equazioni costitutive che abbiano validità generale per l'intera classe di tali materiali. La validità di tali modelli, inoltre, è ristretta ad un intervallo non ampio della velocità di deformazione, aspetto evidente della complessità reologica di tali sistemi (Stickel & Powell 2005). Nel caso specifico di sistemi polidispersi come le miscele acqua-sedimento la situazione è ancora più complessa in quanto il comportamento reologico del materiale dipende non solo dalla sua composizione ma anche dalle caratteristiche dell'apparato di misura e da fenomeni di strutturazione e destrutturazione che si verificano nel materiale durante prove reometriche (Coussot, 2005). Per valori della tensione di taglio inferiori allo *yield stress* si assume che il materiale si comporti come un corpo rigido. Una volta superato il valore dello *yield stress*, quando il materiale inizia a deformarsi, il comportamento può essere descritto tramite modelli diversi a seconda della forma della corrispondente curva di flusso  $\tau$ - $\dot{\gamma}$  (Figura I.15).

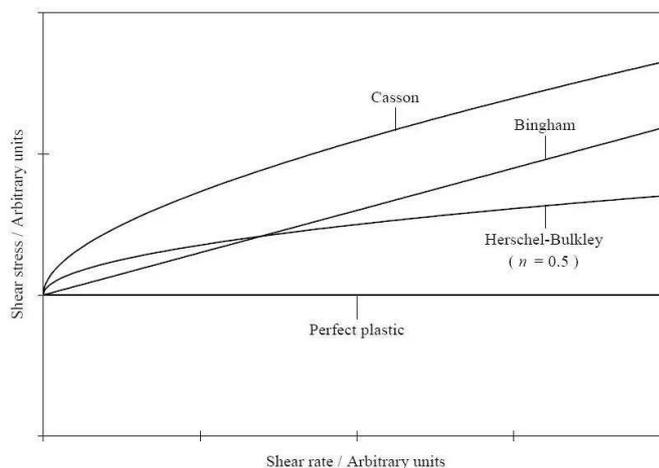


Figura I.15 Curve velocità di deformazione – sforzo di taglio per materiali viscoplastici (Horrobin 1999).

Benché esistano numerosi modelli reologici, più o meno complessi, utili per la descrizione del comportamento reologico di sospensioni concentrate, consideriamo nel seguito i modelli maggiormente utilizzati per descrivere il comportamento di miscele acqua-sedimento (O'Brien & Julien, 1988; Coussot & Piau, 1995; Coussot, 1997; Scotto di Santolo et al., 2010, 2011).

Il modello più semplice per la caratterizzazione reologica di sospensioni concentrate, particolarmente adatto per la caratterizzazione di miscele acqua-sedimento, è il Modello di Bingham:

$$\tau = \tau_c + \mu_B \dot{\gamma} \quad (\text{I.16})$$

L'equazione esprime una relazione lineare tra la tensione di taglio  $\tau$  e la velocità di deformazione a taglio  $\dot{\gamma}$ . Il parametro  $\tau_c$  è la tensione di soglia (*yield stress*) cioè la tensione di taglio minima che deve essere applicata per l'inizio dello scorrimento (per  $\tau < \tau_c$  il materiale si suppone si comporta come un corpo rigido);  $\mu_B$  è invece la viscosità plastica alla Bingham, costante. Per  $\tau_c = 0$  si ottiene l'equazione valida per fluidi newtoniani  $\tau = \eta \dot{\gamma}$ . Un altro modello che trova ampia corrispondenza è il modello di Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_c + m \dot{\gamma}^{n_p} \quad (\text{I.17})$$

In tal caso la relazione che lega  $\tau$  e  $\dot{\gamma}$  segue una legge di potenza secondo l'indice di pseudoplasticità  $n_p$  che non ha un significato fisico vero e proprio. Per  $n_p = 1$  il modello si riduce all'equazione di Bingham, mentre descrive fenomeni di shear thinning per  $n_p < 1$  e shear thickening per  $n_p > 1$ . Anche il modello di Casson prevede una relazione non lineare tra  $\tau$  e  $\dot{\gamma}$ :

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + \sqrt{\eta_\infty \dot{\gamma}^{n_p}} \quad (\text{I.18})$$

Dove  $\eta_\infty$  rappresenta la viscosità per valori elevati di velocità di deformazione.

## I.5 REOMETRIA

I comportamenti reologici finora discussi sono stati presentati facendo riferimento all'esperimento ideale di flusso tra due piastre parallele rappresentato in Figura I.1. Nella pratica la misura della viscosità e delle altre proprietà reologiche avviene mediante apparecchiature più o meno complesse, chiamate viscosimetri o reometri.

Un reometro è un'apparecchiatura che permette la determinazione della viscosità (o di altri parametri reologici) di un materiale. Un esperimento reometrico consiste generalmente nella misurazione simultanea di due grandezze: una grandezza dinamica (una forza, una coppia o una pressione) e di una grandezza cinematica (una velocità, una portata, un tempo). Le grandezze misurate vengono espresse attraverso una relazione matematica nella quale, oltre a parametri geometrici del reometro e eventualmente altri parametri fisici del fluido, compare anche la grandezza reologica che deve essere misurata, il cui valore viene, quindi, determinato dai risultati della misura.

### I.5.1 Reometri convenzionali

#### *Reometri rotazionali*

Il motivo principale che rende praticamente inutilizzabile il "reometro ideale" costituito dalle due piastre parallele di Figura I.1 risiede nelle condizioni cinematiche di funzionamento. Le due piastre traslano l'una rispetto all'altra: ciò significa che, dopo un certo tempo, le piastre si separano completamente rendendo impossibile la misura. Inoltre, sempre a causa della traslazione, la superficie di applicazione della forza diminuisce progressivamente, portando una continua variazione della tensione applicata.

Il modo più semplice di eliminare questi effetti indesiderati è quello di permettere al fluido di muoversi secondo traiettorie chiuse, cioè ripetute infinitamente nel tempo. Questo principio è appunto messo in pratica nei reometri rotazionali, il cui funzionamento si basa sul moto relativo rotatorio di due superfici. I reometri rotazionali sono costituiti da due elementi, uno fisso e l'altro in movimento, tra i quali è interposto il fluido. Un motore permette di imporre un'assegnata velocità di rotazione all'elemento mobile, che determina un flusso di scorrimento all'interno del fluido in esame. Un secondo

dispositivo (trasduttore) provvede a misurare la coppia necessaria a mantenere in movimento il piatto. Dalla misura della coppia è possibile risalire alla tensione applicata al fluido, mentre da quella della velocità di rotazione è possibile risalire alla velocità di deformazione.

I reometri rotazionali appartengono a due categorie concettualmente diverse. In quelli a tensione controllata, il trasduttore di coppia è lo stesso motore che impone il moto di rotazione del piatto. La velocità di rotazione è, quindi, una grandezza derivata e viene determinata attraverso la misura dello spostamento angolare dell'asse del reometro in funzione del tempo. Nei reometri a velocità di deformazione controllata, la coppia viene misurata attraverso un trasduttore posto in corrispondenza dell'elemento fisso del reometro. Quale che sia il tipo di reometro rotazionale impiegato, sono generalmente disponibili varie geometrie, ognuna delle quali va scelta in funzione delle caratteristiche del fluido e dell'intervallo di velocità di deformazione (o di tensione) di interesse. Di seguito sono illustrate le principali geometrie d'uso corrente

La geometria a cilindri coassiali (Couette) è costituita da una tazza cilindrica contenente un secondo cilindro coassiale secondo la rappresentazione in sezione di Figura I.16. Uno dei due cilindri è posto in rotazione con velocità angolare  $\Omega$  (generalmente il cilindro interno) mentre l'altro viene mantenuto fermo. In questo caso il fluido viene sottoposto a moto di scorrimento nella intercapedine tra le superfici laterali dei due cilindri, chiamata *gap*.

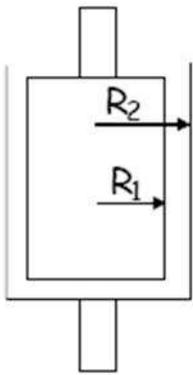


Figura I.16 Sistema geometrico a cilindri coassiali.

Nel caso in cui lo spessore dell'intercapedine  $h = R_2 - R_1$  sia piccolo rispetto al raggio dei cilindri, il gradiente di scorrimento risulta essere lo stesso in tutti i punti del fluido e si ottiene un cosiddetto flusso viscosimetrico uniforme. In queste condizioni la velocità di deformazione è dalla seguente relazione:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega(R_2 - R_1)}{h} \quad (\text{I.19})$$

Mentre la tensione è legata alla coppia  $C$  dalla relazione:

$$C = 2\pi(R_2 - R_1)^2 H\tau \quad (\text{I.20})$$

Nella quale  $H$  è l'altezza del fluido contenuto tra i due cilindri. Per cui la viscosità si ottiene:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{C \cdot h}{2\pi\Omega(R_2 - R_1)^3 H} \quad (\text{I.21})$$

Esistono anche reometri rotazionali a cilindri coassiali con intercapedine larga. In questo caso la velocità di deformazione non è uniforme e la viscosità viene data dalla seguente relazione:

$$\eta = \frac{C(R_2^2 - R_1^2)}{4\pi\Omega HR_1^2 R_2^2} \quad (\text{I.22})$$

Nel caso di fluidi non Newtoniani questa espressione però non è valida. In questo caso la velocità di deformazione viene ricavata utilizzando una espressione approssimata che calcola la velocità di deformazione massima:

$$\dot{\gamma} = 2\Omega \frac{R_1^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \quad (\text{I.23})$$

La configurazione geometrica alternativa alla Couette è quella cono e piatto, illustrata in Figura I.17. In questo caso il liquido è compreso tra un piatto piano ed un cono, uno dei quali viene messo in rotazione. Le superfici

di scorrimento sono in questo caso delle superfici coniche. Ad ogni raggio, il gradiente di scorrimento è dato dal rapporto tra la velocità del piatto in movimento e la distanza tra i piatti. Nel caso di angoli piccoli, la velocità di deformazione risulta data dalla seguente relazione:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\alpha_c} \quad (\text{I.24})$$

Nella quale  $\alpha_c$  è l'angolo del cono. La tensione, anch'essa uniforme, è data da:

$$\tau = \frac{3C}{2\pi R_{PC}^3} \quad (\text{I.25})$$

Dove  $R_{PC}$  è il raggio del piatto. Per cui, in definitiva, l'equazione del reometro cono e piatto diventa:

$$\eta = \frac{3C\alpha_c}{2\pi R_{PC}^3\Omega} \quad (\text{I.26})$$

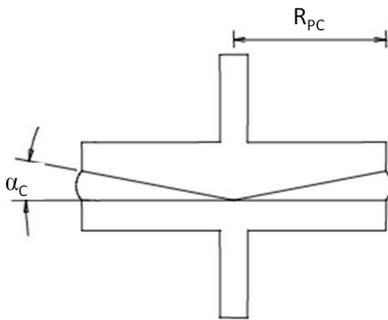


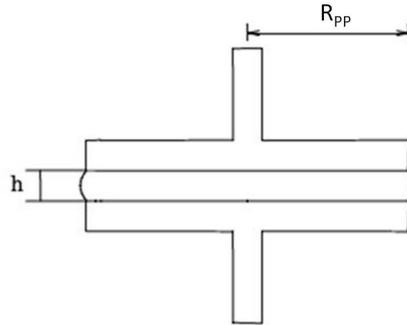
Figura I.17 Sistema geometrico a piatto e cono.

La geometria a piatti paralleli rotanti (Figura I.18) è simile a quella a cono e piatto. Con riferimento a quanto detto per il cono e piatto, la velocità di deformazione si calcola attraverso la seguente relazione:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega R_{pp}}{h} \quad (\text{I.27})$$

Questa relazione ci dice che la velocità di deformazione è funzione del raggio del piatto, ossia  $R_{pp}$ . Per cui, nel caso di fluidi Newtoniani, la viscosità viene è data dalla:

$$\eta = \frac{2Ch}{\pi R_{pp}^4 \Omega} \quad (\text{I.28})$$



*Figura I.18 Sistema geometrico a piatti paralleli.*

La configurazione geometrica a cilindri coassiali viene particolarmente usata per misurare le proprietà reologiche di fluidi avente viscosità relativamente bassa. Infatti l'elevata superficie laterale permette di raggiungere livelli della tensione di taglio anche molto piccoli a parità di coppia e quindi (per un assegnata velocità di deformazione) di determinare con precisione viscosità anche molto basse. Fluidi aventi, invece, viscosità molto elevata sono di difficile analisi con la geometria dei cilindri coassiali, soprattutto per la difficoltà di caricamento del materiale. Particolare attenzione va rivolta al flusso che si determina sul fondo del cilindro. Infatti, se le superfici di base dei due cilindri sono troppo ravvicinate, il flusso di scorrimento che si genera tra queste superfici produce sforzi non trascurabili rispetto quelli che si istaurano sulla superficie laterale, falsando la misura. Inoltre bisogna considerare che nella geometria dei cilindri coassiali viene messo in rotazione un cilindro di massa relativamente elevata (dell'ordine di

qualche centinaio di grammi). Ciò comporta la presenza di effetti di inerzia durante i transitori che possono determinare da un lato imprecisione nella misura delle proprietà reologiche in condizioni non stazionarie e dall'altro la necessità di tempi di prova relativamente lunghi per ottenere misure di viscosità in condizioni stazionarie. Quando, invece, si devono misurare le proprietà reologiche di fluidi aventi viscosità elevate o si dispone di campioni in piccole quantità, la configurazione geometrica maggiormente idonea è quella di cono e piatto. In generale, nelle geometrie a cilindri concentrici e a cono e piatto si genera un gradiente di scorrimento uniforme. Il fluido viene deformato tutto allo stesso gradiente, cosa che corrisponde ad un valore della tensione uguale in tutti i punti. Per questo motivo, una volta assegnate le condizioni di flusso, la viscosità misurata rappresenta l'effettivo valore in corrispondenza della velocità di deformazione imposta. Queste sono praticamente le uniche due geometrie che permettono di raggiungere tali condizioni e per questo sono utilizzate quando si vuole determinare con precisione la curva di flusso di un fluido non Newtoniano. Quando, per ragioni di ordine economico o pratico, queste geometrie non possono essere utilizzate, viene usata la geometria a piatti paralleli. Solitamente viene impiegata per la determinazione delle caratteristiche reologiche di fluidi Newtoniani ma può essere utilizzata anche per ricavare la viscosità di fluidi non Newtoniani a condizione di effettuare un numero elevato di misure e di rielaborare opportunamente i dati. Una procedura di questo tipo è onerosa in quanto richiede l'acquisizione di un certo numero di dati e la loro elaborazione. Inoltre i valori di viscosità così ottenuti vanno considerati sempre affetti dagli errori di approssimazione determinati dalla elaborazione matematica dei dati sperimentali. I vantaggi della geometria a piatti paralleli sono la facilità di caricamento del materiale e la possibilità di variare lo spessore del fluido. Inoltre tale geometria è ideale per misure su fluidi viscoelastici e può quindi costituire una scelta di prima dotazione per un reometro rotazionale quando i costi non permettono l'acquisto di un'altra geometria.

#### *Reometri non rotazionali*

Nei reometri non rotazionali le traiettorie del fluido sono costituite da linee aperte. Ciò vuol dire che il fluido deve per forza di cose fluire attraverso un imbocco e uno sbocco del reometro, transitando al suo interno per un tempo

finito. Esistono differenti tipologie di reometri non rotazionali ma quelle maggiormente usate sono il reometro a capillare e quello a caduta di sfera.

Il reometro a capillare è il viscosimetro di concezione più antica: in esso il fluido viene in qualche modo forzato a scorrere in un tubo capillare, e la viscosità viene determinata misurando la portata di efflusso. Lo schema di funzionamento è illustrato in Figura I.19. Il liquido viene spinto (generalmente mediante un pistone) attraverso un canale di dimensioni trasversali relativamente piccole, appunto un capillare. Viene così misurata la variazione di pressione all'imbocco e all'uscita del condotto (dove generalmente la pressione è quella atmosferica). Nota la portata passante nel condotto (determinata dalla velocità di avanzamento del pistone) è possibile misurare la viscosità del fluido.

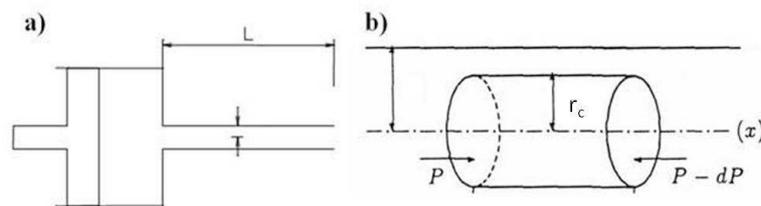


Figura I.19 a) Schema di funzionamento di un viscosimetro a capillare;. b) Geometria di un elemento cilindrico di fluido in un capillare

L'equazione che viene utilizzata è quella di Hagen-Poiseuille (valida nell'ipotesi di flusso stazionario, laminare e isoterma):

$$\eta = \frac{\pi \cdot r_c^4 \cdot t \cdot \Delta P}{8V_f} \quad (\text{I.29})$$

dove  $r_c$  è il raggio del capillare,  $\Delta P$  è la caduta di pressione nel capillare e  $V_f$  è il volume di liquido che fluisce nel capillare durante l'intervallo di tempo  $t$ . Le velocità di deformazione di taglio che si ottengono in uno strumento del genere possono essere molto diverse, a seconda del fluido. Per un fluido newtoniano,  $\dot{\gamma}$  varia da un valore alla parete  $\dot{\gamma}_w$ , pari:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4 \cdot Q \cdot P}{r_c^3} \quad (\text{I.30})$$

dove Q è il flusso volumetrico, di valore nullo al centro del tubo e P è la pressione all'imbocco del capillare.

La tensione alla parete  $\tau_w$  è

$$\tau_w = \frac{r_c \cdot \Delta P}{2L} \quad (\text{I.31})$$

dove L è la lunghezza del capillare. Nel caso di un fluido non newtoniano invece si ricava la seguente espressione:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot r_c^3} \left( \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \log Q}{d \log \tau_w} \right) \quad (\text{I.32})$$

mentre la sollecitazione alla parete  $\tau_w$  non varia rispetto al valore dato nell'equazione I.31. Il termine tra parentesi nell'equazione I.32 si chiama correzione di Rabinowitsch. Quindi finalmente si ricava:

$$\eta(\dot{\gamma}_w) = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} = \frac{\pi \cdot r_c^4 \cdot (\Delta P / L)}{3Q \cdot \left( \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \log Q}{d \log \tau_w} \right)} \quad (\text{I.33})$$

Poiché abitualmente la caduta di pressione è misurata tra un serbatoio a monte del capillare e l'atmosfera a valle, è necessario tenere conto anche della perdita di pressione connessa con l'ingresso al capillare e con l'uscita all'atmosfera. Mentre la seconda è generalmente trascurabile, la prima è spesso importante e deve essere opportunamente presa in considerazione.

Il limite maggiore dei reometri a capillare è legato al fatto che il fluido deve transitare nell'apparecchiatura per un tempo finito e quindi potrebbe non raggiungere le condizioni di flusso stazionario, causando possibili errori nelle misurazioni della viscosità. Uno dei vantaggi maggiori di tali reometri risiede nel fatto che le traiettorie di flusso oltre ad essere aperte sono anche rettilinee e l'assenza di forze centrifughe legate alla rotazione permette di effettuare

misure reologiche a valori della velocità di deformazione estremamente elevati. Inoltre il fluido rimane confinato completamente nel reometro per tutta la durata della prova e questo riduce tutti gli effetti secondari e di bordo (quali frattura, esposizione del fluido all'ambiente esterno, ecc.).

Il reometro a caduta di sfera è un'apparecchiatura utilizzata per la determinazione della viscosità di soluzioni o, in generale, di liquidi trasparenti. È costituito da una sfera che cade all'interno di un cilindro dotato di due traguardi. Si misura il tempo necessario affinché la sfera percorra tale spazio, calcolando così la velocità della sfera nel fluido. Nel caso di flusso laminare, considerando gli effetti di inerzia trascurabili, il moto relativo del fluido intorno alla sfera è caratterizzato da componenti sia di scorrimento che estensionali. È ovvio infatti che una particella di fluido che si muove intorno alla sfera venga deformata a taglio. Allo stesso tempo, tuttavia, nelle fasi di avvicinamento e rallentamento della sfera, il fluido viene decelerato lungo la direzione del moto originando componenti di flusso estensionale. L'analisi del moto risulta complessa ma, nel caso di fluidi Newtoniani e flussi lenti, vale la cosiddetta legge di Stokes:

$$F_c = 3\pi\eta D_{sfera} v_{sfera} \quad (I.34)$$

Nella quale  $F_c$  è la forza che il fluido esercita sulla sfera di diametro  $D_{sfera}$  e  $v_{sfera}$  è la velocità di caduta della sfera. In condizioni stazionarie, la forza di attrito  $F_a$  è controbilanciata dal peso della sfera, che va corretto per tenere conto della spinta di Archimede esercitata dal fluido. Tale forza è data:

$$F_a = \frac{(\rho_s - \rho)\pi D_{sfera}^3 g}{6} \quad (I.35)$$

Dove  $\rho_s$  e  $\rho$  le densità della sfera e del fluido rispettivamente e  $g$  è l'accelerazione di gravità. Uguagliando l'equazione I.34 e l'equazione I.35 si ottiene la viscosità, che vale:

$$\eta = \frac{(\rho_s - \rho) D_{sfera}^2 g}{18 v_{sfera}} \quad (I.36)$$

L'equazione I.36 vale solo nel caso di fluido Newtoniano. Inoltre va verificato che le forze di inerzia siano effettivamente trascurabili. Ciò è possibile calcolando il numero di Reynolds del flusso, ossia

$$Re = \frac{\rho v_{sfera} D_{sfera}}{\eta},$$

e verificando che esso sia molto minore dell'unità. Nel caso di fluidi non Newtoniani, l'equazione I.36 ha solo una validità indicativa. In ogni caso richiede una correzione per tenere in conto l'effetto del flusso sulle pareti del recipiente. Tale correzione può effettuarsi per via teorica o per taratura diretta dell'apparecchiatura con un fluido di viscosità nota.

### ***1.5.2 Reometri sperimentali per lo studio del comportamento di miscele a granulometria grossolana***

Negli ultimi venti anni sono stati fatti diversi tentativi sperimentali per stimare le proprietà reologiche di miscele contenenti particelle grossolane. Le apparecchiature reometriche convenzionali però sono in grado di analizzare solo miscele contenenti particelle fini (ossia con diametri minori o al più uguali ad 1 millimetro circa), mentre alcuni materiali, quali le miscele acqua-sedimento, presentano un vasto assortimento granulometrico (particelle delle dimensioni del millimetro fino ad alcune decine di centimetri) e talora sono del tutto mancanti di frazioni fini. Al fine, quindi, di poter modellare le caratteristiche del flusso di tali miscele e di poterne determinare il comportamento reologico sono stati creati diversi sistemi reometrici che consentono di sottoporre a prova miscele contenenti particelle di dimensioni maggiori di 1 millimetro. Purtroppo però, i sistemi reometrici che permettono la determinazione delle caratteristiche di materiali siffatti sono pochi e commercialmente non disponibili e hanno attualmente i seguenti limiti:

- ~ per la sperimentazione sono necessari campioni di grande volume (a volte anche alcune centinaia di litri);
- ~ la preparazione di campioni di grande volume richiede tempo ed ha costi elevati;
- ~ dovendo utilizzare campioni di così grandi volumi, durante la preparazione delle prove e la fase sperimentale è difficile tenere sotto controllo con un'adeguata tecnica di miscelazione la concentrazione solida volumetrica dei campioni;

- ~ il campo di misura della velocità di rotazione  $\Omega$  e della coppia torcente  $C$  è spesso limitato, la qual cosa restringe l'intervallo di velocità di deformazione all'interno del quale viene determinata la curva di flusso;
- ~ in questi reometri, che solitamente hanno dimensione delle configurazioni geometriche molto maggiori rispetto quelle degli usuali viscosimetri, il materiale non è in regime di flusso laminare e talora non risulta omogeneamente sottoposto a taglio negli usuali intervalli di misura tipici di un esperimento reometrico.

Nel seguito vengono presentati e descritti i reometri sperimentali che consentono di determinare il comportamento reologico di miscele contenenti particelle grossolane.

La prima apparecchiatura reometrica di grandi dimensioni è stata sviluppata da Bagnold (1954). Egli ha analizzato sospensioni aventi particelle grossolane in una apparecchiatura di taglio composta da due cilindri verticali concentrici, illustrata in Figura I.20. Il raggio del cilindro interno è pari a 46,2mm, l'intercapedine tra i due cilindri è pari 10,8mm, l'altezza del cilindro interno è pari a 50mm ed il volume del campione è pari a 0.18l. In tale apparato, il cilindro interno è stazionario mentre il cilindro esterno ruota a differenti velocità angolari  $\Omega$ . La tensione di taglio  $\tau$  viene determinata sulle misure della coppia torcente  $C$  imposta al cilindro interno e sulla base delle caratteristiche della configurazione geometrica. L'autore ha misurato anche lo sforzo normale  $\sigma$  della miscela sottoposta a taglio basandosi sulla differenza di pressione misurata tra le seguenti camere: la prima è dentro al cilindro interno riempito con acqua mentre la seconda camera è rappresentata dallo spazio tra il cilindro interno e quello esterno riempito con le dispersioni. Per poter calcolare le proprietà reologiche delle sospensioni, Bagnold introduce il parametro  $\lambda_B$ , ossia la concentrazione lineare dei grani all'interno della dispersione, calcolato come segue:

$$\lambda_B = \frac{1}{\left(\frac{\Phi_0}{\Phi}\right)^{\frac{1}{3}} - 1} \quad (\text{I.37})$$

dove  $\Phi_0$  è la concentrazione solida volumetrica massima possibile per grani di uguale diametro. Bagnold ha poi definito il seguente numero adimensionale

Ba, che esprime il rapporto tra gli sforzi inerziali (indotti dalle collisioni tra i grani) e gli sforzi viscosi (indotti dalla viscosità del liquido) e viene calcolato mediante l'espressione seguente:

$$Ba = \frac{\lambda_B^2 \cdot \rho_g \cdot d^2 \cdot \dot{\gamma}^2}{\lambda_B^{1.5} \cdot \eta \cdot \dot{\gamma}} = \frac{\lambda_B^{0.5} \cdot \rho_g \cdot d^2}{\eta} \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{I.38})$$

nella quale  $\eta$  rappresenta la viscosità,  $\rho_s$  è la densità dei grani e  $d$  il diametro dei grani. È importante sottolineare che la velocità di deformazione è apparente in quanto, essendo l'intercapedine tra i due cilindri piuttosto grande, la distribuzione di velocità al suo interno non è lineare.

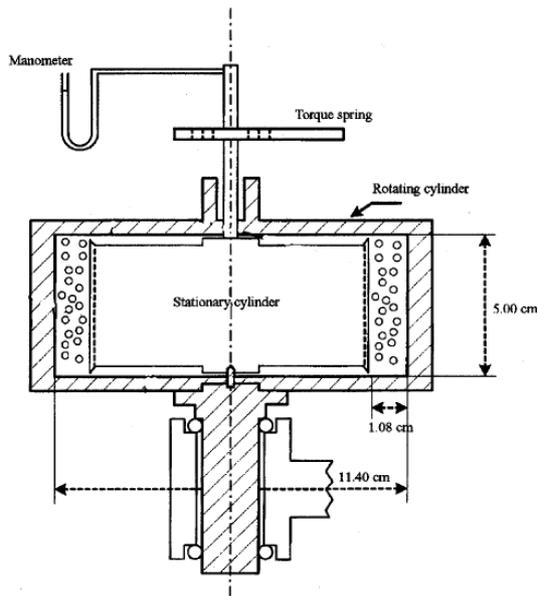


Figura I.20 Apparecchiatura di Bagnold (da Schatzmann, 2005).

Basandosi sui risultati sperimentali, l'autore mostra la presenza di due principali e distinti regimi, ad ognuno dei quali corrispondono precisi intervalli di valori del numero di Bagnold. Il regime "grano-inerziale", con  $Ba \geq 450$ , nel quale la tensione di taglio e lo sforzo normale dipendono dal quadrato della velocità di deformazione. Per  $\lambda_B < 12$  l'autore ha trovato che:

$$\tau = a \cdot \operatorname{sen} \alpha_D \cdot \rho_g \cdot \lambda_B^2 \cdot d^2 \cdot \dot{\gamma}^2$$

$$\sigma = \frac{\tau}{\tan \alpha_D} \quad (\text{I.39})$$

dove  $\alpha_D$  è l'angolo di attrito dinamico. Nel regime “macro-viscoso”, con  $Ba \leq 40$ , invece, la tensione di taglio e lo sforzo normale dipendono linearmente dalla velocità di deformazione apparente. In tutto l'intervallo di valori di  $\lambda_B$  l'autore ha trovato che:

$$\tau = b \cdot \lambda_B^{1.5} \cdot \eta \cdot \dot{\gamma}$$

$$\sigma = \frac{\tau}{\tan \alpha_D} \quad (\text{I.40})$$

Quando si ha  $40 < Ba < 450$  (regime transizionale), la dipendenza della tensione di taglio e dello sforzo normale dalla velocità di deformazione apparente cresce progressivamente da lineare a quadratica. Hunt et al. (2002) hanno analizzato le prove condotte da Bagnold, studiando i dati sperimentali grezzi ed hanno osservato che la tensione di taglio non dipende dal quadrato della velocità di deformazione ma varia secondo una funzione di potenza di esponente pari a 1,5 nel regime di flusso “grano-inerziale”. Inoltre hanno dimostrato che i risultati di Bagnold sono influenzati da diversi problemi legati alla tipologia di apparecchiatura utilizzata. Infatti nel reometro di Bagnold il rapporto tra l'altezza del cilindro e l'intercapedine tra i cilindri è modesto (4,6) ed in corrispondenza di alti valori di velocità di deformazione si generano forti flussi secondari perpendicolari al flusso di taglio. Di conseguenza la dipendenza della tensione di taglio dalla velocità di deformazione attraverso la potenza di 1,5 non è più dovuta alle collisioni tra i grani ma dipende dal flusso secondario (Figura I.21). Gli autori concludono, quindi, che in assenza di flussi secondari, si avrebbe un regime “macro-viscoso”, ossia una dipendenza lineare della tensione di taglio dalla velocità di deformazione e propongono perciò di determinare la tensione di taglio considerando per la dispersione un fluido newtoniano di viscosità corretta  $\eta'$ . Tale valore di viscosità dipende dalla concentrazione solida volumetrica  $\Phi$  e viene espressa attraverso la relazione di Krieger-Doughrty:

$$\eta' = \frac{\eta}{\left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_0}\right)^{\eta\Phi_0}} \quad (\text{I.41})$$

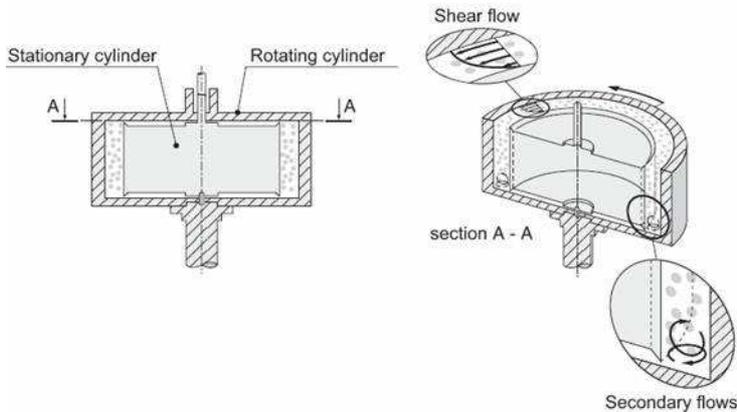


Figura I.21 Flusso secondario nell'apparecchiatura di Bagnold secondo Hunt et. al (2002) (da Schatzmann, 2005).

Phillips & Daves (1991) hanno costruito due reometri di grandi dimensioni entrambi muniti di geometria di piatto e cono (con angolo del cono pari a  $30^\circ$ ). In entrambe le apparecchiature il cono è posto alla base del piatto, invertito rispetto alla configurazione standard e lateralmente chiuso per evitare che il fluido sottoposto a prova fuoriesca. La prima geometria ha un raggio del piatto pari a 200mm e richiede un volume di materiale di 8l. Con tale configurazione geometrica gli autori hanno analizzato miscele contenenti particelle di diametro minore a 35mm per valori della velocità di deformazione minori di  $16\text{s}^{-1}$ . La seconda geometria ha un raggio del piatto pari a 1000mm e richiede un volume di materiale di 100l. Con questa apparecchiatura sono state analizzate miscele contenenti particelle con diametro massimo minore di 120mm e per velocità di deformazione minori di  $4\text{s}^{-1}$ . Utilizzando la prima geometria gli autori hanno ricavato curve di flusso chiare, mentre non è stato possibile identificare un chiaro comportamento reologico usando la seconda geometria poiché le tensioni di taglio misurate sono state molto variabili a confronto del modesto intervallo di valori della velocità di deformazione imposto. In uno studio successivo Contreras & Davies (2000) hanno

sottoposto a prova con la prima geometria miscela contenenti grani di diametro massimo minore di 20mm. Tale sperimentazione ha mostrato una forte variazione di tensione di taglio per velocità di deformazione minori di  $7s^{-1}$  e quindi in corrispondenza di tali valori non è stato possibile ottenere curve di flusso chiare. Tuttavia essi hanno identificato un'isteresi tra la tensione di soglia ottenuta con le prove di carico (inizio del flusso) e scarico tensionale (arresto del flusso) ed hanno osservato un comportamento tempo dipendente della coppia torcente  $C$  misurata alle diverse velocità di rotazione.

Major & Pierson (1992) hanno sviluppato un reometro a cilindri coassiali di grandi dimensioni avente raggio del cilindro interno pari a 359mm, intercapedine tra i cilindri pari a 31mm, altezza del cilindro pari a 62mm e volume del campione pari a 10l. Con tale strumentazione hanno analizzato miscele composte da particelle di diametro massimo minore di 2mm. A causa dell'ampia intercapedine tra i cilindri e della presenza della tensione di soglia in questo tipo di miscele, gli autori non hanno potuto calcolare la velocità di deformazione con le relazioni di conversione dei dati relative alle geometrie convenzionali dei cilindri concentrici ed hanno quindi utilizzato il metodo di Nguyen & Boger (1987). Per velocità di deformazione minori di  $5s^{-1}$ , le curve di flusso non sono chiare e negli esperimenti sulle miscele molto ricche in particelle grossolane si osservano fluttuazioni della coppia torcente  $C$ , comportamenti tempo-dipendenti (variazioni di  $C$  con il tempo) ed effetti di tipo isteretico. Inoltre la riproducibilità dei risultati non è ottimale. Questi fenomeni sono probabilmente dovuti al forte attrito tra le particelle, alla riorganizzazione delle particelle e alla loro aggregazione all'interno delle miscele che risultano densamente impacchettate alle basse velocità di deformazione.

Coussot & Piau (1995) hanno sviluppato un reometro mobile a cilindri coassiali di grandi dimensioni, illustrato in Figura I.22. Il reometro è composto da una piattaforma con un asse perpendicolare che l'attraversa e ruota a differenti velocità. Il cilindro interno è collegato all'asse centrale da una barra di acciaio. Il contatto tra la piattaforma ed il cilindro è ottenuto attraverso una guarnizione di gomma. Dal momento che, teoricamente, la velocità di deformazione attraverso l'intercapedine tra i due cilindri dovrebbe essere sempre più omogenea all'approssimarsi del rapporto tra i diametri dei cilindri all'unità, gli autori hanno scelto uno strumento di dimensioni notevoli.

Infatti il raggio del cilindro interno è pari a 385mm, il raggio del cilindro esterno è pari a 585mm, l'altezza del cilindro esterno pari a 720mm, ossia a circa quattro volte la misura dell'intercapedine al fine di poter considerare trascurabili gli effetti di bordo. Il volume del campione necessario è pari a  $0,5\text{m}^3$ . Le pareti interne dei cilindri sono state dotate di un'opportuna rigidità al fine di evitare il fenomeno di scivolamento alla parete del materiale (wall slip). Un motore idraulico fa muovere l'asse centrale. La velocità di rotazione varia tra 0,05 e 20rpm (gli effetti provocati dalle vibrazioni dell'apparecchiatura vengono considerate influenti sui risultati a partire da una velocità di rotazione pari a 14rpm). La massima coppia torcente applicabile all'asse centrale è pari a 6kN/m.

La coppia torcente applicata all'asse centrale del cilindro interno viene misurata registrando l'inflessione indotta alla barra di trasmissione, strumentata con celle di carico connesse ad un sistema elettronico, e la velocità di rotazione del cilindro interno viene misurata attraverso un tachimetro (Figura I.22).

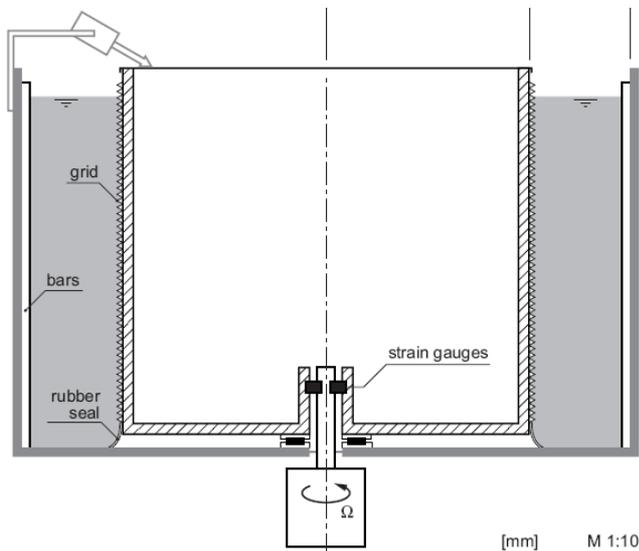


Figura I.22 Reometro a cilindri coassiali di grandi dimensioni sviluppato da Coussot & Piau (1995) (Modificato da Scatzmann, 2005).

Hanno utilizzato la seguente espressione per calcolare la velocità di deformazione, assumendo che, in regime di taglio semplice, vi è una relazione

biunivoca tra lo sforzo e la velocità di deformazione, come ad esempio  $\dot{\gamma} = \psi(\tau)$ :

$$\psi(S_i) = \sum_{n=0}^{\infty} Y(\beta^n S_i) \quad (\text{I.42})$$

$$Y(S_i) = 2C \frac{\partial \Omega}{\partial C}(S_i, S_e) \quad (\text{I.43})$$

$$S_i = \frac{C}{2\pi R_i^2} S_e = \frac{C}{2\pi R_o^2} \beta = \left( \frac{R_i}{R_o} \right)^2 \quad (\text{I.44})$$

Nella quale  $R_i$  e  $R_o$  sono rispettivamente il raggio del cilindro interno e del cilindro esterno,  $\Omega$  è la velocità di rotazione del cilindro interno e  $C$  è la coppia torcente applicata al cilindro interno. L'espressione fornita per calcolare la velocità di deformazione in funzione della tensione di taglio  $\tau$  può essere ottenuta applicando vari livelli di  $C$ . In questo modo la pendenza della curva  $\Omega$ - $C$  può essere usata per calcolare i punti della curva di flusso. Il calcolo della velocità di deformazione con la precedente relazione è valido solo nel caso in cui vengono analizzati fluidi le cui proprietà reologiche non dipendono dal tempo. Nell'apparecchiatura di Cuossot & Piau è possibile che si verifichino diversi effetti di disturbo durante l'esecuzione delle prove (quali effetti di bordo, flussi secondari, eterogeneità del fluido e effetti inerziali) che dipendono dalle caratteristiche stesse del sistema di misura. L'influenza di questi effetti sui dati sperimentali deve essere attentamente valutata a seconda della tipologia di fluido che si vuole sottoporre a prova e dell'intervallo di velocità di deformazione all'interno del quale si vuole studiare il comportamento reologico del materiale.

L'apparecchiatura reometrica sviluppata più recentemente è la "Ball Measuring System" di Schatzmann (2005). La "Ball Measuring System" (BML) è una configurazione reometrica idonea a misurare il comportamento reologico di fluidi contenenti particelle con diametro massimo maggiore di 5 mm. Tale sistema è stato sviluppato da Müller (Müller et al., 1999) per determinare il comportamento reologico dei materiali da costruzione, come il

cemento, e è stato poi adattato ai reometri rotazionali convenzionali. Tale geometria, illustrata in Figura I.23, consiste in un contenitore cilindrico, avente raggio pari a 57,5 mm ed altezza pari a 48mm, nel quale viene messo il campione di materiale da sottoporre a prova. Una sfera di diametro variabile (l'apparecchiatura è dotata di tre sfere di diametro pari a 8, 12 e 15mm) che ruota eccentricamente è fissata ad un'asta sottile spessa 0.6mm e viene trascinata all'interno del campione con una velocità angolare  $\Omega$  assegnata. Una prova tipica consiste nel misurare la velocità angolare  $\Omega$  e la coppia torcente  $C$  mentre la sfera effettua una rotazione completa.

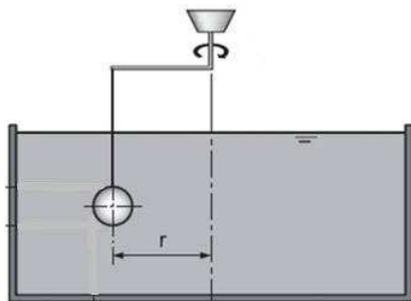


Figura I.23 Ball Measuring System (Schatzmann, 2005).

La curva di flusso è composta da 40 punti di misura, ad ognuno dei quali corrisponde un diverso valore di velocità di rotazione imposta. Al fine di raggiungere una determinata velocità di rotazione la sfera deve essere accelerata e tale accelerazione richiede una coppia torcente aggiuntiva. Ai bassi valori della velocità di deformazione ( $\dot{\gamma} < 1\text{s}^{-1}$ ), si ha una leggera sottostima della tensione. Per valori maggiori si hanno delle forze addizionali non trascurabili indotte da un'accelerazione che influenza la coppia torcente necessaria a muovere la sfera. L'effetto di questa accelerazione è una sovrastima della tensione nella fase iniziale della prova ed il fenomeno è molto più marcato per valori alti della velocità di deformazione ( $\dot{\gamma} > 50\text{s}^{-1}$ ). Alle modeste velocità di rotazione ( $\Omega \leq 33,77\text{rpm}$ ) l'aliquota di coppia torcente dovuta all'accelerazione della sfera è piccola ed influenza solo i punti di misura iniziali (sottostima dei valori sperimentali). Per velocità di rotazione maggiori di 33,77rpm, l'aliquota di coppia torcente dovuta all'accelerazione della sfera è più rilevante ma influenza anche in questo caso i soli punti di

misura iniziali (sovrastima dei valori sperimentali). In considerazione di questo fenomeno, i dati sperimentali da considerarsi per la determinazione della curva di flusso del materiale sono quelli misurati successivamente i regimi di sottostima e sovrastima. I dati sperimentali ottenuti con le prove effettuate utilizzando il BML vengono convertiti in parametri reologici, ovvero tensione di taglio e viscosità, attraverso un approccio basato sulla teoria di Metzner & Otto (1957), idonea sia per regimi di flusso laminare ( $Re < 1$ ) sia per regimi di flusso di transizione ( $1 < Re < 300$ , regimi di passaggio dal flusso laminare a quello turbolento). La procedura di conversione dei dati sperimentali si articola in tre momenti di calcolo. Calcolo del parametro potenza caratteristica del sistema di misura P:

$$P = 2\pi\Omega C \quad (I.45)$$

Dove C è la coppia torcente ed  $\Omega$  la velocità di rotazione. Calcolo del numero adimensionale di Newton Ne (Windhab, 2001):

$$Ne = \frac{P}{\Omega^3 D^5 \rho} = \frac{2\pi C}{\Omega^2 D^5 \rho} \quad (I.46)$$

Dove D è il diametro della sfera e  $\rho$  la densità del fluido. Successivamente viene calcolato il numero di sistema corretto  $C_1$ :

$$C_1 = Ne \cdot Re = 4\pi^2 \frac{C}{\Omega} \frac{r}{D^4} \frac{1}{\eta} \quad (I.47)$$

Dove  $\eta$  è la viscosità del fluido e r la distanza tra l'asse di motore del reometro e la sfera. Il numero di sistema corretto  $C_1$  è costante in regime di flusso laminare mentre nel regime transizionale cresce e la sua crescita viene espressa mediante una funzione polinomiale. La viscosità e la velocità di deformazione vengono calcolate attraverso le seguenti espressioni basate sul parametro potenza caratteristica del sistema di misura P:

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n_p} \quad (I.48)$$

$$\eta = 4\pi^2 \frac{C}{\Omega} \frac{r}{D^4} \frac{1}{C_1} \quad (\text{I.49})$$

$$\dot{\gamma} = \left( 4\pi^2 \frac{C}{\Omega} \frac{r}{D^4} \frac{1}{C_1} \frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{n_p-1}} \quad (\text{I.50})$$

In prima approssimazione è stato usato il numero di Reynolds  $Re$  calcolato per i fluidi Power Law (Atapattu et al., 1995) per stimare il numero di sistema  $C_1$ . Il calcolo della velocità di deformazione e della viscosità avviene attraverso un procedimento iterativo. I dati vengono poi diagrammati con quelli della velocità angolare  $\Omega$  ( $0,03 < \Omega < 2,53 \text{rpm}$  e  $Re < 1$ ). La tensione di taglio  $\tau$  viene misurata a partire dalle misure della coppia torcente  $C$  in regime di flusso

Il reometro dotato di BMS è idoneo alla caratterizzazione del comportamento reologico di fluidi contenenti particelle di diametro massimo pari a 1 mm e in un intervallo di velocità di deformazione compreso tra  $0,15$ - $100 \text{s}^{-1}$ . Con tale strumento è possibile analizzare anche sospensioni molto concentrate.

---

## *Capitolo II*

# Proprietà fisiche dei materiali piroclastici campani

## II.1 INTRODUZIONE

La maggior parte delle frane avvenute nei terreni piroclastici della regione Campania si sviluppa su pendii piuttosto ripidi con caratteristiche stratigrafiche analoghe ma non del tutto simili. Le cause naturali del movimento di questi materiali sono da ricercarsi in due essenziali fattori di rischio. Il primo è legato alla geomorfologia della zona e in particolare alla copertura piroclastica, il secondo all'importante ruolo svolto dall'acqua nel sottosuolo. I materiali piroclastici, com'è noto, hanno sempre manifestato segni d'instabilità in concomitanza di piogge prolungate anche se non particolarmente intense. Questi terreni, generalmente non saturi, assorbendo acqua, mostrano un collasso strutturale (Scotto di Santolo, 2000). Anche se non si raggiungono le condizioni di saturazione, a seguito della riduzione della suzione si determina una riduzione della resistenza al taglio e quindi l'innescò della frana.

In gran parte della regione Campania, laddove si sono verificate colate di fango a caratteri catastrofici, la formazione di base è costituita da calcari o dolomie fratturati, ma in vaste aree la roccia di base è costituita da tufo o da materiali fliscioidi ed argillitici. Le coperture piroclastiche sono invece costituite da alternanze, di spessori variabili da decimetri a metri, di ceneri vulcaniche e di pomici. Alla loro base è spesso presente uno strato ceneritico leggermente argillificato. Questi litotipi furono originati dai centri eruttivi

campani, alcune migliaia di anni fa, per cui sono caratterizzati da composizione granulometrica e spessori che dipendono dalle caratteristiche delle singole eruzioni, dalla distanza dei centri eruttivi e dalla posizione dei versanti. Alle quote maggiori la successione è in sede, non avendo subito grandi spostamenti a partire dal momento della deposizione. Essa può comunque presentare interruzioni ed assenza locale di strati dovute ad antichi fenomeni di frana che hanno asportato la parte oggi mancante. Alle quote inferiori i terreni in sede sono ricoperti da accumuli di materiali ridepositati (a seguito di erosione e trasporto) o franati. Gli spessori sono significativi e raggiungono anche varie decine di metri. Tali coperture rimaneggiate sono costituite da una matrice cineritica mescolata a pomici ovvero ad elementi lapidei costituenti il detrito di antiche frane.

Molte centinaia di frane sono state censite lungo le dorsali carbonatiche che delimitano la piana campana e la dorsale della penisola sorrentina e le coltri piroclastiche a tetto del Tufo Giallo Napoletano dell'area flegrea. La localizzazione degli eventi di frana, che dal 1580 si sono susseguiti fino ai nostri giorni, testimonia che ne sono interessati soprattutto i rilievi posti a minore distanza dal complesso vulcanico del Somma-Vesuvio e dei Campi Flegrei.

Sulla base di tali indicazioni, nel presente capitolo, dopo alcuni brevi cenni circa le origini delle coltri, vengono illustrate le caratteristiche fisiche dei materiali piroclastici campani suddividendo le aree interessate dai fenomeni di instabilità in quattro macro-settori caratterizzati da sequenze stratigrafiche simili costituite da terreni provenienti dai medesimi episodi eruttivi e pertanto potenzialmente omogenei: l'area dei Monti di Avella settentrionali, l'area dei monti di Avella Meridionali, l'area dei Monti Lattari (Penisola Sorrentina) e l'area dei Campi Flegrei.

## **II.2 ORIGINI DELLE COLTRI PIROCLASTICHE CAMPANE**

I rilievi montuosi della regione Campania (Italia meridionale), al centro della quale sorge la città di Napoli, sono ricoperti in buona parte da una successione di materiali piroclastici che si sono prodotti nel passato a seguito di un'attività vulcanica molto diffusa (Rolandi et al., 1998). Le proprietà indice, di stato, idrauliche e meccaniche di questi materiali dipendono

notevolmente sia dalla distanza dal centro di eruzione che dal meccanismo di deposizione. In accordo con le caratteristiche e la storia delle eruzioni, questi depositi possono essere stratificati o non stratificati, a grana grossa o fine, cementati o sciolti, fratturati o intatti. La loro struttura, quindi, è estremamente variabile da deposito a deposito e, nello stesso deposito, lungo direzioni verticali ed orizzontali. All'interno della regione Campania sono presenti diversi distretti vulcanici tra i quali i più famosi sono quelli dei Campi Flegrei (Figura II.1a) e del Somma Vesuvio (Figura II.1b). Tali distretti sono ancora attivi all'interno dell'area denominata Zona Vulcanica Campana. Localmente questi materiali pongono importanti problemi di tipo ingegneristico quali erosione, instabilità dei pendii, cedimenti delle costruzioni e collasso di cavità sotterranee.

L'attività vulcanica dei Campi Flegrei ha avuto inizio circa 150ka fa, mentre le ultime manifestazioni si sono avute nel 1301 (ad Ischia) e nel 1538 con la formazione del Monte Nuovo. La depressione dei Campi Flegrei è una struttura calderica all'interno della quale sono stati attivi più di settanta centri eruttivi (Budetta et al., 1993; Orsi et al., 1996; Rolandi et al., 2003 ). Tale struttura deriva dalla sovrapposizione di due principali episodi di sprofondamento connessi all'eruzione dell'Ignimbrite Campana e del Tufo Giallo Napoletano. Attualmente alcuni autori distinguono, in questo lungo lasso di tempo, quattro cicli di vulcanismo:

- ~ I Ciclo (superiore a 35.000 anni da oggi). Attività di tipo esplosivo nel settore occidentale dei Campi Flegrei. I prodotti di tale attività sono poco diffusi sulla terra ferma;
- ~ II Ciclo (35.000÷30.000 anni da oggi). I prodotti principali delle eruzioni sono il Piperno, Breccia Museo e l'Ignimbrite Campana (Tufo Grigio Campano). L'eruzione del tufo grigio campano è stato un evento di portata notevolissima. Il meccanismo di messa in posto è stato del tipo flusso piroclastico con alta velocità del magma accompagnata dalla caduta di ceneri molto sottili. Tale formazione attualmente raggiunge in alcune zone (Piana Campana) spessori di 50-60m;
- ~ III Ciclo (18.000÷10.000 anni da oggi). A tale ciclo sono da riferire la formazione dei Tufi Biancastri stratificati (Soccavo) e del Tufo Giallo Napoletano. Quest'ultimo è una piroclastite a matrice prevalente, formata da pomici, di dimensioni talora notevoli, e frammenti litici dispersi in una

matrice cineritica. Dopo l'eruzione del Tufo Giallo Napoletano si ebbe lo sprofondamento dell'edificio vulcanico, con conseguente formazione della caldera ed individuazione delle colline dei Camaldoli, di Posillipo e del Rione Terra.

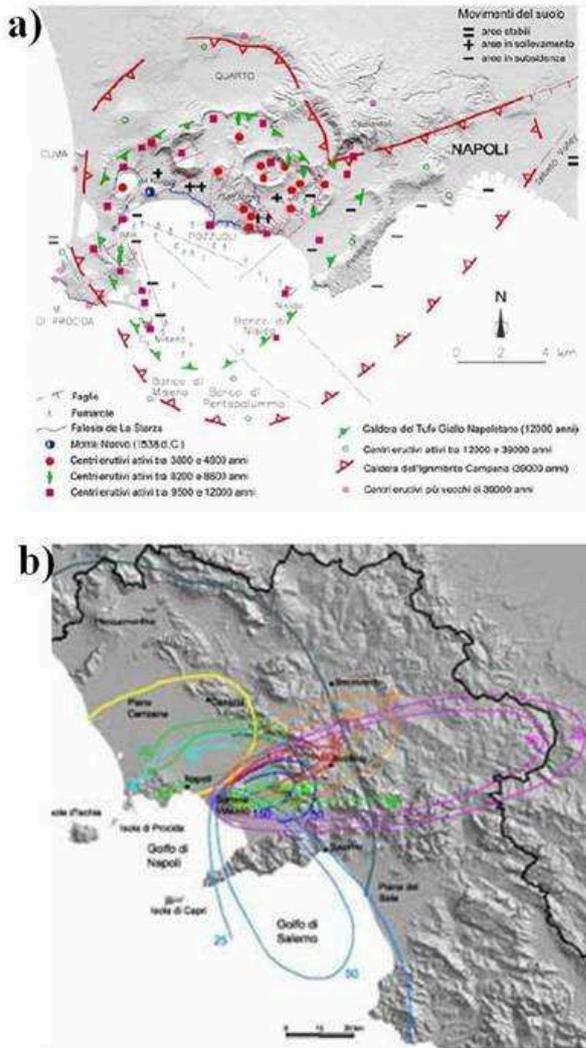


Figura II.1 a) Carta strutturale della caldera dei Campi Flegrei (Rolandi et al., 2003). b) Aree investite dalle nubi di ceneri piroclastiche durante le eruzioni del complesso vulcanico Somma-Vesuvio (Papa, 2007).

Per quanto riguarda invece il Somma Vesuvio, il vulcano è costituito dal più antico edificio del Somma, nel quale la formazione della caldera ha determinato il ribassamento del fianco meridionale, la migrazione verso sud-ovest delle successive manifestazioni e la formazione nel tempo del cono del Vesuvio (Rolandi et al., 1998). Dati ottenuti da fori di sondaggio eseguiti in località Trecase (Torre Annunziata) rivelano una antica attività vulcanica datata circa 400ka fa. Circa 25ka fa l'attività del vulcano è poi cambiata drammaticamente in una successione di eventi esplosivi. Infatti, fino a 17ka fa l'attività è proseguita con fasi alterne effusive ed esplosive, per divenire, queste ultime, quasi prevalenti fino al 1631. Da tale anno all'ultima eruzione (1944), le manifestazioni eruttive, pure con alternanza di fasi, hanno assunto più spesso il carattere di flussi lavici (Rolandi et al., 1998). In estrema sintesi i materiali emessi dal vulcano possono riunirsi nelle seguenti unità: piroclastiti e scorie del cono vesuviano, colate laviche vesuviane cui sono spesso interposti livelli piroclastici discontinui e di varia potenza e lave basali del Somma.

Pertanto i depositi piroclastici sono il risultato di attività vulcaniche di tipo esplosivo. In accordo con le modalità di trasporto e di deposizione, essi possono essere classificati come:

- ~ depositi di materiali piroclastici da caduta, per i quali è possibile definire tre tipi di depositi in funzione delle dimensioni delle particelle. In particolare si hanno: frammenti di notevoli dimensioni (particelle con diametro superiore ai dieci cm) come bombe e scorie nere; frammenti di dimensioni minori (particelle con diametro compreso tra uno e dieci cm) che includono lapilli, piccole bombe e blocchi; frammenti piccolissimi (particelle con diametro inferiore ad un cm) che includono lapilli fini e ceneri. La velocità finale di caduta dipende sia dalla dimensione delle particelle che dalla densità. Questi depositi sono, quindi, costituiti da particelle di uguale dimensione;
- ~ depositi di materiali piroclastici da flusso, in genere costituiti da più di un'unità. All'interno di una unità è usuale trovare una struttura non graduata, anche se frammenti di pomici più grandi possono essere, talora, graduati. Ne consegue che in genere tali depositi sono poco assortiti;
- ~ depositi di materiali piroclastici da corrente (surges), i quali sono il risultato del trasporto di materiale. Il meccanismo di deposizione è molto

simile a quello osservato nel trasporto di sedimenti ad opera dell'acqua e del vento. Pertanto si generano correnti di materiale con densità e viscosità molto diversa che creano forme di accumulo molto complesse. Tali depositi sono caratterizzati da un elevato grado di frammentazione e dalla capacità della corrente di trasportare particelle di una data dimensione.

### **II.3 CARATTERISTICHE FISICHE DELLE AREE SOGGETTE A FENOMENI DI INSTABILITÀ**

I fenomeni di colata rapida interessano principalmente i terreni piroclastici depositati sulla grande unità geomorfologia dei massicci carbonatici. La localizzazione degli eventi di frana che dal 1580 si sono susseguiti fino ai nostri giorni, illustrata in Figura II.2, testimonia che ne sono interessati soprattutto i rilievi posti a minore distanza dal complesso vulcanico del Somma-Vesuvio e dei Campi Flegrei. Essenzialmente le zone coinvolte sono costituite dai Monti di Avella e del Partenio, dai Monti di Sarno, e dai Monti Lattari nella Penisola Sorrentina.

I depositi piroclastici, principalmente derivanti dall'attività esplosiva del Somma-Vesuvio sono distribuiti nella zona vulcanica campana in maniera disomogenea in accordo agli assi di dispersione di ciascuna eruzione, raggiungendo una spessore variabile tra i quattro ed i sette metri sui Monti di Sarno e attorno ai due metri sui Monti Lattari (Rolandi et al., 2000; Di Crescenzo & Santo, 2005). Dopo la deposizione sui versanti carbonatici, i depositi piroclastici sono stati soggetti a fenomeni denudazionali, perlopiù rappresentati da movimenti di massa, generalmente controllati dall'angolo di pendio e dall'occorrenza di piogge di forte intensità. Ciò si riflette attualmente nella presenza, lungo i versanti, di serie vulcanoclastiche incomplete (De Vita & Celico, 2006). Pertanto sui versanti carbonatici sono presenti, solo parzialmente ed in maniera fortemente discontinua, i termini più recenti della successione vulcanoclastica prodotta dalle eruzioni del Somma Vesuvio. Tale successione si ritrova, invece, in maniera completa e continua nell'ambito della Piana Campana, sebbene con variabilità laterali a grande scala indotte dalla differente distanza dal centro eruttivo, dal diverso orientamento degli assi di dispersione di ciascuna eruzione e dall'azione erosiva e deposizionale esercitata dalla rete idrografica. Le coperture così formatesi, a seconda della

loro localizzazione, sono caratterizzate da stratigrafie più o meno complesse di differente spessore che, a partire dal metro (estremo nord dei Monti del Partenio), possono raggiungere i 5-7m nella parte meridionale dei Monti di Sarno. Alcune aree dei rilievi carbonatici sono state raggiunte anche dai prodotti piroclastici associati all'attività del distretto vulcanico dei Campi-Flegrei. In particolare, i versanti dei monti del Partenio e di Avella hanno visto depositarsi anche 40cm di prodotti piroclastici ascrivibili all'eruzione denominata di Agnano Monte Spina avvenuta circa 4.1ka fa.

Una differente situazione si ritrova nell'area del distretto vulcanico dei Campi-Flegrei. I Campi Flegrei sono un campo vulcanico all'interno del quale, negli ultimi 39ka, sono stati attivi più di settanta centri eruttivi differenti. La depressione dei Campi Flegrei viene generalmente interpretata come una struttura calderica. Questa deriva dalla sovrapposizione di due episodi di sprofondamento (Orsi et al., 1996) connessi con le eruzioni dell'Ignimbrite Campana (De Vivo et al., 2001) e di quella più recente del Tufo Giallo Napoletano.

### ***II.3.1 Monti di Avella settentrionali e Monti del Partenio***

I rilievi dei Monti di Avella e del Partenio fanno parte della catena sud appenninica che ha subito complesse vicende tettoniche prima di tipo compressivo e poi un graduale sollevamento secondo una gradinata di faglie la cui massima elevazione è rappresentata proprio dai monti di Avella (1600m s.l.m.). L'assetto geomorfologico è caratterizzato da versanti di faglia in genere ad elevata acclività (35°-40°), spesso incisi da corsi d'acqua che, nelle zone di raccordo con le piane, hanno costruito più generazioni di conoidi. Le più antiche risultano sospese di pochi metri sugli attuali fondovalle, mentre quelle recenti ed ancora attive interessano spesso centri abitati. I depositi di raccordo tra i versanti e la pianura vera e propria sono costituiti da detrito di versante di natura calcarea e materiale piroclastico rimaneggiato proveniente da processi di erosione delle coperture in quota.

Nella zona più settentrionale della dorsale manca una coltre piroclastica continua; lungo i versanti meridionali, la copertura piroclastica è molto più continua con estese aree caratterizzate da spessori di 0,5-2m e 2-5m sia su versante aperto che all'interno delle aree di bacino idrografico (AA.VV., 2002). I depositi piroclastici, possono trovarsi in posizione primaria, cioè nella

stessa posizione in cui sono stati depositati nel corso degli anni, ovvero essere stati trasportati verso valle dalla gravità e poi ridepositati, a seguito di fenomeni di frana o dell'azione dell'acqua (materiali di deposizione secondaria).

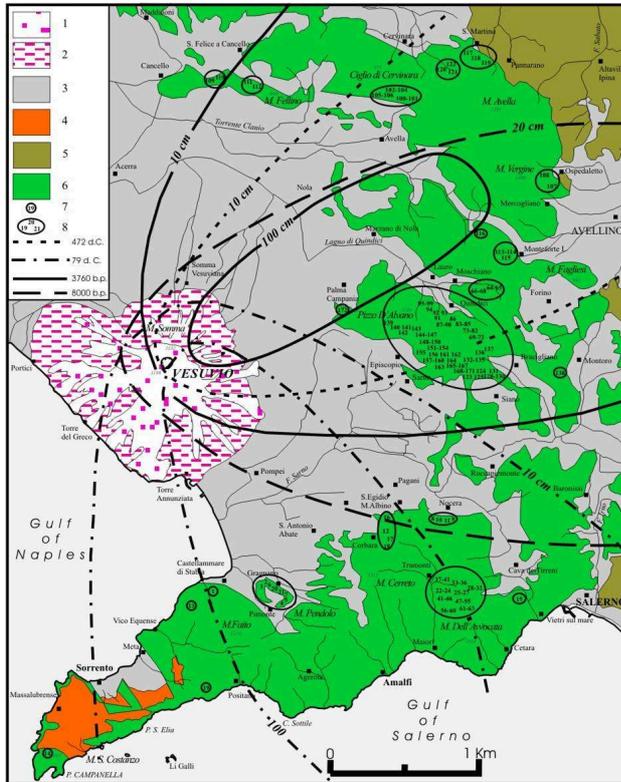


Figura II.2 Distribuzione delle frane di colata rapida e dei depositi piroclastici da caduta: 1) lave; 2) flussi piroclastici; 3) depositi detritico-alluvionali e piroclastiti da caduta; 4) flysch miocenici della Penisola Sorrentina; 5) depositi terrigeni mio-pleiocenici; 6) rocce carbonatiche mesozoiche; 7) frane singole; 8) gruppi di frane (Di Crescenzo e Santo, 2005).

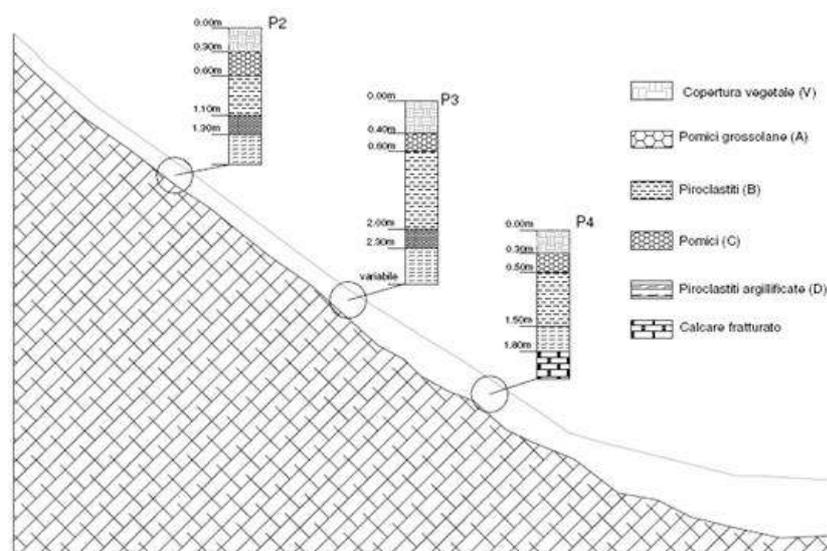
I terreni in posizione primaria hanno una struttura stratigrafica semplice e regolare mentre nelle zone di rideposizione, la struttura dei depositi sciolti è più complessa e dipendente dalla successione degli eventi avvenuti nel passato. L'assetto stratigrafico dell'area dei Monti di Avella settentrionali e

Monti del Partenio è stato caratterizzato attraverso numerose campagne di indagini relative ai siti di Cervinara, S. Felice a Canello, Forchia e Baiano (AA.VV, 2002). Nel territorio comunale di Baiano sono stati individuati i seguenti litotipi, ritenuti geotecnicamente omogenei, alcuni dei quali si rinvengono anche nelle altre aree indagate:

- ~ terreno A: pomice grossolane di colore grigio in posizione primaria, con grani a spigoli vivi o subangolari e dimensioni comprese fra 1 e 3 cm, nella parte alta dello strato, e tra qualche millimetro ed 1 cm nella parte bassa;
- ~ terreno B: cineriti in posizione primaria, costituite essenzialmente da ceneri vulcaniche sabbiose con modesta percentuale di limo e pomice;
- ~ terreno C: pomice fini in posizione primaria, con grani a spigoli subangolari e dimensione massima dell'ordine del centimetro;
- ~ terreno D: cineriti sabbio-limose argillificate;
- ~ terreno E: cineriti in posizione secondaria a granulometria prevalentemente sabbiosa, caratterizzate dalla presenza di piccoli elementi calcarei;
- ~ terreno F: pomice in matrice cineritica, in posizione secondaria;
- ~ terreno G: copertura vegetale costituita da terreni sciolti humificati di natura piroclastica;
- ~ terreno H: substrato calcareo fratturato.

Da alcune indagini effettuate nel sito di Cervinara (Avellino) è stato visto che, all'interno dei depositi, oltre ad una copertura vegetale di origine piroclastica, si alternano livelli di ceneri e pomice. In particolare si distinguono dall'alto verso il basso (Figura II.3): una copertura vegetale di origine piroclastica humificata dello spessore di circa 50cm (terreno G); uno strato di 20-30cm di pomice di grosse dimensioni ( $d_{max}=5\div 6cm$ ), di colore grigio chiaro (terreno A), un livello di cineriti sabbio-limose con spessore variabile da 50 a 140cm (terreno B); un deposito da caduta avente spessore di circa 30cm, a granulometria sabbio-ghiaiosa, costituito da alternanze di piccoli strati cineritici e di pomice ( $d_{max}=2\div 3mm$ ) (terreno C); cineriti di colore marrone, alterate e parzialmente argillificate, dello spessore variabile tra 30 e 50cm (terreno D). Tutto il pacchetto piroclastico poggia su un substrato calcareo intensamente fratturato.

L'individuazione delle proprietà dei terreni costituenti le coperture piroclastiche nelle aree indagate è stata effettuata in maniera approfondita con riferimento ai soli terreni cineritici (litotipi G, B e D), gli unici campionabili in maniera indisturbata grazie alla suzione dovuta alle condizioni di parziale saturazione. Per i terreni pumicei (terreni tipo A e C) sono disponibili solamente le determinazioni granulometriche (Olivares & Picarelli, 2001; Lampitiello, 2004).



*Figura II.3 Cervinara: sequenza stratigrafica dei depositi piroclastici in sede (da Damiano, 2004)*

Per quanto riguarda le dimensioni dei grani, i terreni presentano diametri delle particelle variabili dal campo delle ghiaie a quello delle argille, così come evidenziato in Figura II.4, dove sono rappresentati i risultati di più determinazioni granulometriche relative a ciascuno dei terreni costituenti il pacchetto piroclastico (Damiano, 2004). Ovviamente esiste una certa variabilità nella distribuzione granulometrica anche all'interno di uno stesso materiale, ma una sostanziale differenza si può notare tra gli strati cineritici (terreni B e D), classificabili da sabbie ghiaiose debolmente limose a sabbie limose debolmente argillose, e quelli pumicei (terreni A e C), classificabili da ghiaia con sabbia a sabbia con ghiaia debolmente limosa. I terreni

appartenenti agli strati G, A, B e C sono del tutto sciolti mentre il terreno appartenente allo strato D presenta una certa plasticità (Olivares et al., 2002; Picarelli et al., 2006).

Per quello che riguarda le proprietà fisiche e di stato, sia le cineriti in sede appartenenti al litotipo B sia i terreni cineritici (terreno F), sono caratterizzate da una porosità sempre molto elevata, con valori tipici dell'ordine del 70%, ma con punte anche superiori. Ovviamente, per il basso grado di saturazione e l'elevata porosità che li caratterizza, questi terreni sono molto leggeri, con peso dell'unità di volume dell'ordine di  $12\div 13 \text{ kN/m}^3$  (Olivares e Picarelli, 2001).

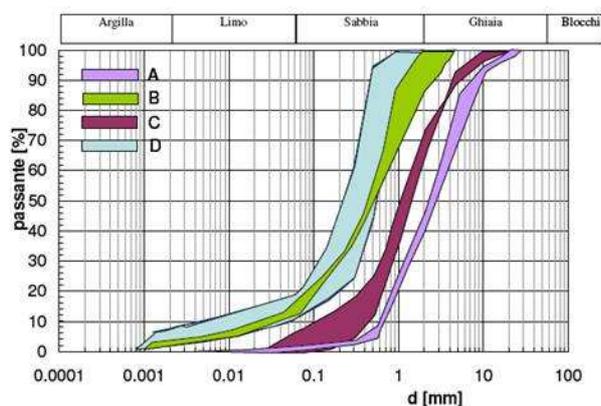


Figura II.4 Cervinara: fusi granulometrici dei terreni di copertura (Damiano, 2004).

Le pomice dello strato A sono materiali alquanto uniformi e molto leggeri a causa della loro porosità intrinseca. Le pomice C possiedono, invece, un peso dell'unità di volume analogo a quello delle cineriti B; anche le dimensioni massime delle particelle ed il contenuto di fino è lo stesso per i due materiali, tuttavia, le pomice presentano un maggior assortimento granulometrico rispetto alle ceneri vulcaniche. Le cineriti argillificate (terreno D) sono i materiali con il più alto contenuto di fino e minore porosità, dell'ordine del 55%, per cui presentano anche il maggiore peso dell'unità di volume. In Tabella II-1 sono riassunte le principali proprietà fisiche dei terreni Dei Monti di Avella settentrionali e Monti del Paterino (Cervinara).

*Tabella II-1 Proprietà fisiche dei terreni dei Monti di Avella settentrionali e Monti del Paternio (Modificato da Damiano, 2004).*

Strato	Materiale	Data prelievo	$G_s$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	n (%)	w	$S_r$ (%)
B	cineriti	28/05/02	25,9	14,2	74	0,8	71
D	piroclastiti alterate	28/05/02	27,0	15,9	54	0,3	75
B	cineriti	16/10/02	-	12,4	70	0,6	69
D	piroclastiti alterate	21/01/03	27,0	16,0	55	0,4	95
B	cineriti	26/02/03	26,4	12,5	71	0,6	63

### **II.3.2 Monti di Avella meridionali e Monti di Sarno**

L'area dei Monti di Avella meridionali, Pizzo D'Alvano e Monti di Lauro comprende potenti monoclinali calcaree (Brancaccio et al., 1979). L'assetto geomorfologico dell'area è caratterizzato da versanti di faglia in genere ad elevata acclività (30-35°) talora incisi da corsi d'acqua, mentre le zone di raccordo pedemontane sono caratterizzate dalla presenza di una fascia di accumulo di origine alluvio-colluviale prodotta da processi denudazionali che hanno coinvolto i depositi della coltre piroclastica. Sui versanti calcarei si rinvencono depositi piroclastici da caduta riferibili a cineriti e livelli di pomici di provenienza prevalentemente vesuviana, con spessori dipendenti dalle condizioni morfologiche locali. Lungo i versanti si ritrovano stratigrafie complesse, caratterizzate da spessori elevati in particolar modo lungo i versanti della dorsale di Pizzo D'Alvano e dei Monti di Lauro.

Le tipologie di fenomeni franosi che interessano questi territori sono rappresentate da colate rapide di fango del tipo incanalato o su versante aperto. Le indagini di natura geotecnica che hanno consentito di caratterizzare l'area sono relative ai siti di Monteforte Irpino, di Lauro e dei Comuni ricadenti nelle competenze del Commissariato di Governo per l'Emergenza Idrogeologica in Campania. La stratigrafia riscontrata nell'area di Monteforte Irpino presenta molte analogie con quelle studiate nei vicini rilievi di Pizzo d'Alvano e dei Monti di Avella (Di Crescenzo et al., 2007). Gli spessori delle coperture in quota variano da 2 a 5 m. La stratigrafia semplificata del sito risulta costituita dai seguenti strati a partire da quello più superficiale fino ai calcari di base (Nicotera & Papa, 2007): terreno 1: piroclastite humificata e pedogenizzata superficiale; terreno 2: piroclastite humificata e pedogenizzata

bruno-rossastra; terreno 3: livello pumiceo attribuibile all'eruzione di Avellino; terreno 4: cineriti pedogenizzate (paleosuolo) dell'eruzione di Ottaviano; terreno 5: livello pomiceo riferibile all'eruzione di Ottaviano; terreno 6: cineriti pedogenizzate (paleosuolo); terreno 7: sabbia vulcanica; terreno 8: piroclastite argillificata.

Più complesse risultano le situazioni geomorfologiche nell'area dei Monti di Sarno visto anche il numero elevato di indagini effettuate in tale area in seguito agli eventi del 1998 che coinvolsero i Comuni situati alle pendici del massiccio di Pizzo d'Alvano. In quest'area le pendenze medie dei versanti in quota risultano piuttosto elevate ( $35^{\circ}$ - $41^{\circ}$ ) e le coperture piroclastiche raggiungono spessori di 5m e sono perlopiù costituite da più livelli di pomici separati da paleosuoli. Lo spessori degli strati pumicei varia tra gli 80-100cm dei prodotti più antichi (situati ad una maggiore profondità dal piano campagna) e i 10-50cm di quelli più recenti (Calcaterra et al., 2003). Tipiche condizioni stratigrafiche osservate nelle zone d'innescio dei fenomeni franosi all'interno dei territori di Quindici, Sarno e Siano sono riportati in Figura II.5 (Cascini & Sorbino, 2003): si distingue una certa variabilità delle sequenza stratigrafiche che risultano meno complesse a Bracigliano ed invece più eterogenee negli altri siti dove si ritrovano diversi livelli pumicei, intercalati da strati cineritici, a differenti profondità.

Le proprietà dei terreni piroclastici presenti all'interno dell'area sono state indagate con riferimento ai terreni cineritici. Relativamente al sito di Monteforte Irpino, i terreni più superficiali costituenti la coltre vegetale (1 e 2) hanno caratteristiche granulometriche tra loro molto simili e con il terreno appartenente allo strato 4. Si tratta mediamente di sabbie con limi. Gli strati 6 ed 8 sono decisamente più fini degli altri terreni analizzati. Infine i terreni 3, 5 e 7, costituenti i differenti livelli di pomici, sono da considerarsi come materiali a "grana grossa" abbastanza uniformi: in particolare, mentre il terreno 7 è una sabbia media con una frazione significativa di limo, il terreno 5 ed il terreno 3 sono rispettivamente una sabbia grossa ed una ghiaia (Nicotera & Papa, 2007). In Figura II.6 sono riportati i fusi granulometrici dei terreni di Pizzo d'Alvano. Anche in questo caso si nota chiaramente che i terreni cineritici sono composti in prevalenza da sabbie e limi con presenza di frazioni di ghiaie (pomici) la cui percentuale in peso non supera il 22%, mentre le pomici, risultano sempre costituite da materiali a grana grossa con

una percentuale di ghiaia che può raggiungere anche il 90% (Cascini & Sorbino, 2003).

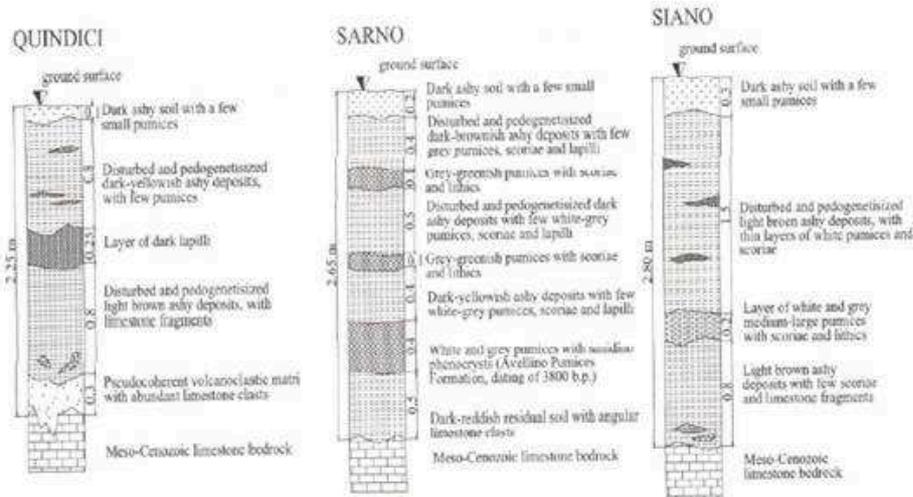


Figura II.5 Tipiche sequenze stratigrafiche dei depositi piroclastici in quota in alcune località circostanti Pizzo d'Alvano (modificato da Cascini e Sorbino, 2003).

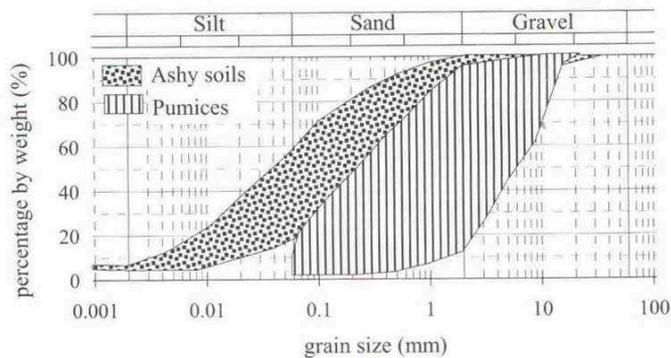


Figura II.6 Fusi granulometrici dei terreni cineritici e pumicei di Pizzo d'Alvano (da Cascini e Sorbino, 2003).

Le principali proprietà fisiche dei terreni campionati nei diversi siti sono riportate in Tabella II-2. Anche in questo caso si nota la notevole omogeneità

dei dati ed in particolare l'elevata porosità dei terreni (variabile tra il 50% ed il 70%), il modesto peso dell'unità di volume e un grado di saturazione sempre inferiore all'unità.

*Tabella II-2 Proprietà fisiche dei terreni dei Monti di Avella meridionali e dei Monti di Sarno (Modificato da Bilotta & Foresta, 2002).*

Materiale	$G_s$	n	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$S_r$ (%)
Cineriti	2,5	0,66	12	8,3	46	57
Pomici	2,3	0,69	9	7,2	25	26

### **II.3.3 Monti Lattari**

La Penisola Sorrentina corrisponde ad un alto strutturale allungato trasversalmente alla Catena Appenninica, delimitato dalle profonde depressioni della Piana Campana a nord e del Fiume Sele a sud. L'ossatura della dorsale è costituita da una successione calcareo dolomitica mesozoica, caratterizzata dall'affioramento di calcari dolomitici triassici e giurassici sul versante meridionale, e da calcari cretacici, localmente ricoperti da flysch, sul versante settentrionale. I flysch sono largamente affioranti nei comuni di Massa Lubrense, Nerano, e sono caratterizzati da calcareniti e calcari marnosi alla base, che evolvono a successioni arenaceo-argillose verso l'alto stratigrafico (Civita et al., 1975). I terreni più recenti sono rappresentati da depositi alluvionali con intercalazioni di cineriti, materiali piroclastici ("tufo grigio campano" e prodotti sciolti o scarsamente coerenti) e quindi, detriti di frana e di falda, alluvioni recenti e depositi di spiaggia attuali (Civita et al., 1975). In particolare, i materiali piroclastici sciolti, spesso rimaneggiati ed humificati, sono collegati a prodotti da caduta provenienti dagli apparati vulcanici dei Campi Flegrei e del Somma-Vesuvio.

L'assetto geomorfologico generale della Penisola è caratterizzato quindi da versanti spesso caratterizzati da forte acclività (maggiore di 30°) alla cui base si riscontrano falde di detrito derivanti dalla degradazione dei calcari stessi e della coltre piroclastica che è quasi sempre presente con spessori più o meno sensibili. Tali depositi solo raramente risultano estesi (Civita et al., 1975). I dissesti della zona sono distinguibili in scorrimenti superficiali della coltre piroclastica e del flysch arenaceo, colate rapide di fango interessanti le

coperture piroclastiche dei massicci calcarei e crolli in roccia. Sono altresì presenti movimenti profondi e colate nei terreni del flysch arenaceo inglobanti lingue di argille varicolori a scaglie (de Riso et al., 2004). Tra tali tipologie di frane le più diffuse in periodi recenti sono quelle da colata rapida su versanti aperti (Mitigliano 1973; San Pantaleone 1960, 1972, 1997; Piemonte 1997; Gragnano Hotel La Selva 1972 e Nocera 2005) e incanalate (Pozzano 1997; Scraio 1966) nonché frane da crollo.

Con riferimento ai fenomeni franosi che hanno interessato le coltri piroclastiche, numerose sezioni stratigrafiche sono state eseguite in prossimità della aree di innesco: una sintesi dei dati stratigrafici è riportata in figura II.7.

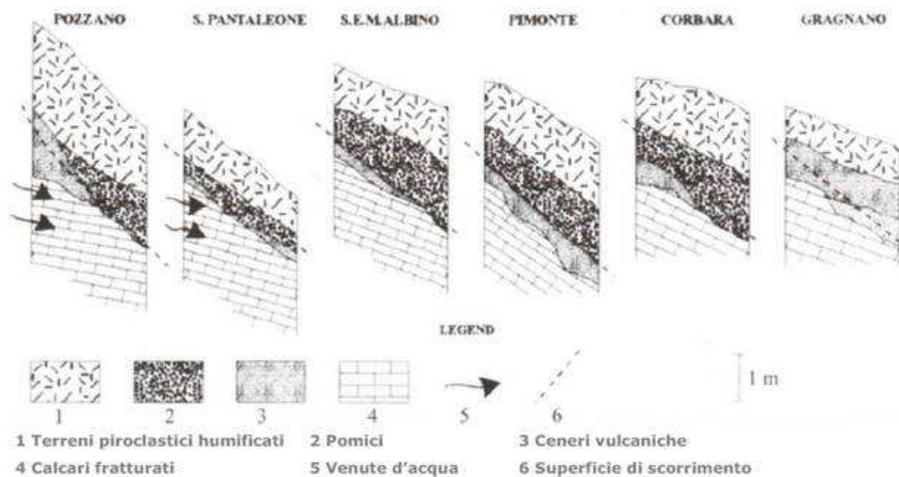


Figura II.7 Sequenze stratigrafiche dei depositi piroclastici nella Penisola Sorrentina (da Di Crescenzo & Santo, 1999).

Si può evincere la notevole omogeneità delle sequenze stratigrafiche che risultano essenzialmente caratterizzate da un livello di pomici dello spessore di 40-80cm interposto tra un livello superiore di ceneri rimaneggiate (il cui spessore varia tra 1,5m e 2m) ed un livello inferiore di ceneri più sottili talora argillificate dello spessore di 10-30cm. Le analisi stratigrafiche hanno anche evidenziato che in tale contesto le superfici di rottura si localizzano per lo più alla base o all'interno delle pomici immediatamente sopra lo strato di cinerite pedogenizzata posto a contatto con il substrato carbonatico (Di Crescenzo & Santo, 1999; 2005).

Scotto di Santolo (2000) e Scotto di Santolo et al. (2000) hanno caratterizzato i depositi piroclastici presenti nell'area dei Monti Lattari. Sono stati individuati alcuni siti (Gragnano - Hotel La Selva, Gragnano - Monte Pendolo, Pimonte - Monte Pendolo, Nocera - S. Pantaleone, Castellammare di Stabia - Pozzano, Vico Equense - Scraio, Massa Lubrense - Monte S. Costanzo), interessati in un recente passato da fenomeni di instabilità e ritenuti rappresentativi di situazioni geomorfologiche diffuse all'interno del contesto carbonatico della Penisola Sorrentina. I terreni del pacchetto stratigrafico sono stati distinti in quattro tipologie e, procedendo dal substrato calcareo verso il piano campagna, sono stati individuati i seguenti litotipi: terreno A: ceneri vulcaniche in sede; terreno B: pomici in posizione primaria o lievemente rimaneggiate; terreni C e D: ceneri pedogenizzate (il terreno D si presenta più ricco in radici e macropori). In Figura II.8 sono riportati i fusi granulometrici dei terreni campionati nella Penisola Sorrentina messi a confronto con quello relativo ai terreni cineritici di Pizzo d'Alvano. Si nota una sostanziale omogeneità delle curve di distribuzione granulometrica dei terreni cineritici provenienti dai differenti siti e da Pizzo d'Alvano che lasciano prevedere una equivalente omogeneità in termini di caratteristiche fisico-meccaniche tra i terreni della macroarea C e quelli delle altre macroaree. Le proprietà fisiche dei terreni della Penisola Sorrentina, riportate in Tabella II-3, sono in sostanziale accordo con le caratteristiche dei terreni campionati nelle altre aree. I terreni cineritici sono caratterizzati da valori dell'indice dei pori elevati, corrispondenti a porosità variabili tra il 63% ed il 74%: valori più bassi della porosità (58%-63%) caratterizzano i terreni appartenenti allo strato più superficiale della coltre vegetale (terreno D).

*Tabella II-3 Proprietà fisiche dei terreni piroclastici della Penisola Sorrentina (da Calcaterra et al., 2003).*

Strato	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$	w	$S_r$
A	8,61-9,54	1,70-1,98	0,11-0,20	0,16-0,26
	8,10-8,27	2,12-2,17	0,20-0,22	0,24-0,27
	8,59-10,22	1,72-2,00	0,53-0,78	0,82-1,00
B	3,91-4,67	3,87-4,42	0,19-0,28	0,11-0,16
	4,68-4,83	4,10-4,26	0,28-0,32	0,17-0,18
C	6,75-7,17	2,69-2,92	0,22-0,44	0,21-0,42

	7,14-7,83	2,38-2,70	0,73-0,88	0,77-0,97
D	9,29-10,89	1,37-1,76	0,18-0,23	0,27-0,41
	9,91-10,29	1,49-1,59	0,53-0,59	0,90-0,97

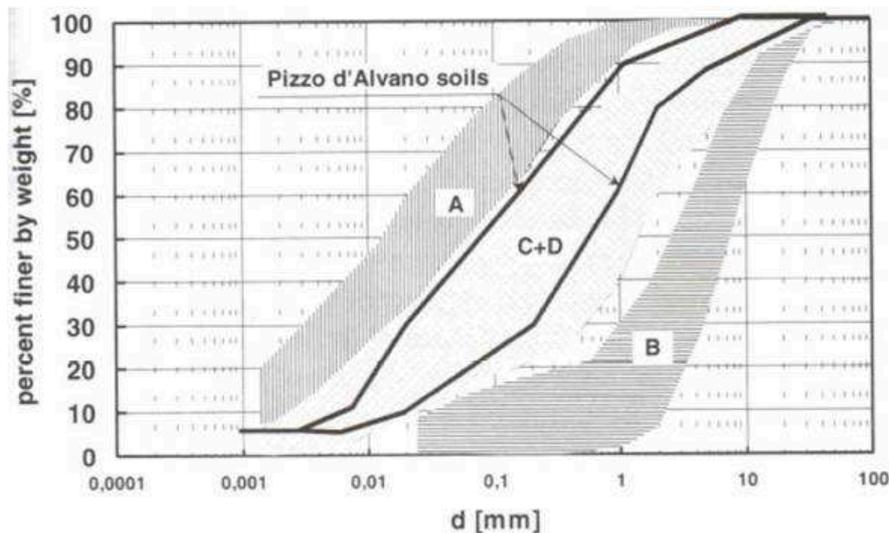


Figura II.8 Monti Lattari: fusi granulometrici dei terreni di copertura confrontati con quelli di Pizzo d'Alvano (da Calcaterra et al., 2003).

### II.3.4 Campi Flegrei

I Campi Flegrei sono un'area vulcanica complessa che comprende il territorio ad occidente della città di Napoli, i territori dei comuni di Pozzuoli, Bacoli, Monte di Procida, le isole vulcaniche di Ischia e Procida con il litorale domizio fino al Lago Patria. Il territorio continentale è caratterizzato dalla presenza di depositi prevalentemente vulcanici e solo in piccola parte di depositi continentali (colluvio-alluvionali) e marini. I depositi vulcanici sono nella quasi totalità prodotti dall'attività del sistema magmatico flegreo. Dal punto di vista strutturale, l'elemento più importante è quello della caldera dei Campi Flegrei. Essa costituisce una struttura complessa, risultante da due fasi principali di collasso, connesse alle eruzioni della Ignimbrite Campana e del Tufo Giallo Napoletano. L'aspetto di rilevante interesse morfologico è dato dalla presenza di versanti da moderatamente a fortemente acclivi di origine

strutturale, connessi appunto al verificarsi di fenomeni di collasso vulcano-tettonico. I fenomeni franosi riconosciuti nel territorio dei Campi Flegrei sono ascrivibili prevalentemente a scorrimenti traslativi, colate e crolli. Con riguardo ai fenomeni di scorrimento e colata rapida è importante sottolineare che i volumi singoli mobilizzati sono quasi sempre dell'ordine delle decine o di alcune centinaia di m<sup>3</sup> e che tali fenomeni sono dotati di una ridotta mobilità in quanto di solito si arrestano al piede del versante (de Riso et al., 1999). Ciò consente di ribadire la sostanziale differenza esistente fra le fenomenologie in atto in tale macroarea rispetto a quelle delle dorsali carbonatiche.

L'area napoletana è composta da una grande varietà di depositi piroclastici che presentano notevoli differenze in termini di grado e tipologia di alterazione. In particolare, facendo riferimento ai depositi relativi alla formazione del Tufo Giallo si possono distinguere due facies: a) depositi alterati e litificati denominati Tufo Giallo Napoletano (TGN); b) prodotti piroclastici non alterati e non cementati denominati Pozzolana (P). In seguito alla formazione del Tufo Giallo nuovi episodi eruttivi (attività esplosiva intracalderica degli ultimi 15000 anni) si sono susseguiti dando origine a più recenti depositi che si ritrovano al di sopra della formazione di base costituita dal Tufo Giallo nel seguito indicati con la sigla TPR (terreni piroclastici recenti). In un tale contesto è lecito aspettarsi una maggiore complessità delle sequenze stratigrafiche (originatesi dalla sovrapposizione dei diversi episodi eruttivi di ciascuno degli edifici vulcanici presenti) rispetto alle aree del contesto carbonatico ed anche una certa variabilità delle caratteristiche dei materiali presenti.

La complessità delle sequenze di origine vulcanica risulta ben evidente dalla Figura II.9 dove sono schematicamente illustrate le sequenze dei depositi piroclastici recenti, sovrastanti la formazione del Tufo Giallo Napoletano, riscontrate nella zona di monte della collina di Camaldoli. I depositi sono irregolarmente stratificati e sono costituiti da alternanze di paleosuoli, cineriti sciolte (ceneri, pomici e scorie), e talora depositi alluvionali: lo spessore complessivo di tali depositi può raggiungere valori di 20-30m. Tuttavia, solitamente i movimenti di versante interessano porzioni molto sottili di tali depositi coincidenti con lo strato più superficiale (Calcaterra et al., 2003). Data l'estrema variabilità delle sequenze stratigrafiche già all'interno di

un'area di modeste estensioni quale quella della collina di Camaldoli, non è possibile approntare un'unica sequenza stratigrafica rappresentativa dell'area in oggetto. La caratterizzazione dei depositi piroclastici affioranti nell'area flegrea risulta assai complessa stante le differenze che intercorrono tra i terreni che, pur essendo della stessa natura, si sono depositati in maniera diversificata e possono pertanto aver subito o meno processi di alterazione che ne hanno influenzato le caratteristiche meccaniche.

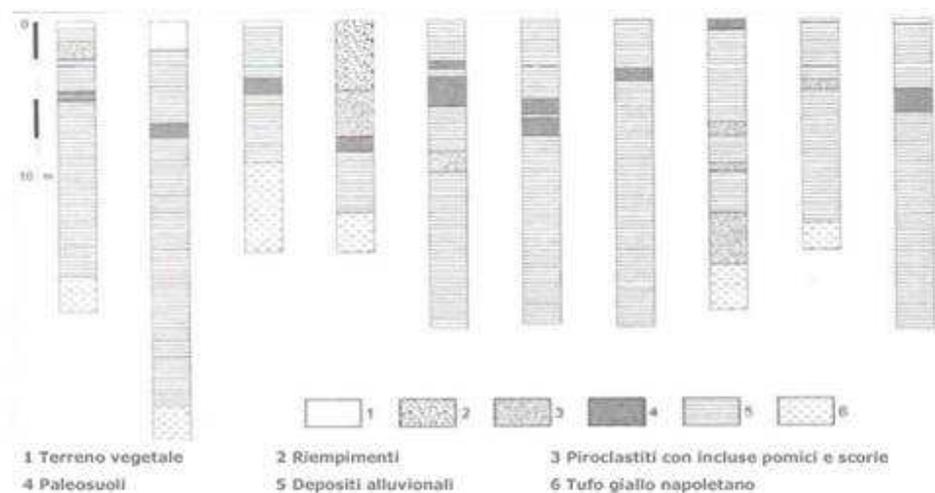


Figura II.9 Sequenze stratigrafiche dei depositi piroclastici osservate nella zona di monte della Collina di Camaldoli (modificato da Calcaterra et al., 2003).

Nel seguito vengono riportati i dati relativi ai terreni piroclastici recenti (TPR) che costituiscono la parte più superficiale dei depositi piroclastici e quella maggiormente interessata da fenomeni di instabilità. Scotto di Santolo, (2000) e Evangelista & Scotto di Santolo (2001) hanno effettuato una vasta campagna di indagine su terreni campionati nell'area della collina di Camaldoli, della collina di Posillipo e della conca di Agnano. In linea generale i depositi piroclastici recenti sono costituiti da livelli di ceneri parzialmente sature da fini a grosse intercalate da strati di pomici. La sperimentazione effettuata ha ovviamente interessato solo gli strati cineritici. In Figura II.11 sono riportati i fusi granulometrici dei terreni campionati: i materiali variano da limi sabbiosi (terreno A) a sabbie limose fino a ghiaie sabbiosae (terreno

D). Tale variabilità è legata alle origini dei materiali costituiti sia da depositi da caduta, che da flusso e da surge (Picarelli et al., 2006).

Le principali proprietà fisiche dei sono riportate in Figura II.10 in funzione della profondità di prelievo dei campioni dal piano campagna. Le porosità dei terreni risultano mediamente più basse rispetto a quelle dei terreni presenti nei contesti carbonatici: infatti, il massimo indice dei pori riscontrato risulta pari a 1.8 (corrisponde ad una porosità del 64%) mentre il valore più frequente risulta pari a circa 1.26 (corrisponde ad una porosità del 56%) ma si riscontrano anche valori decisamente più bassi dell'ordine di 0.9 ( $n = 47\%$ ). Anche in questo caso i terreni risultano parzialmente saturi con un grado di saturazione che più frequentemente oscilla intorno al 30%.

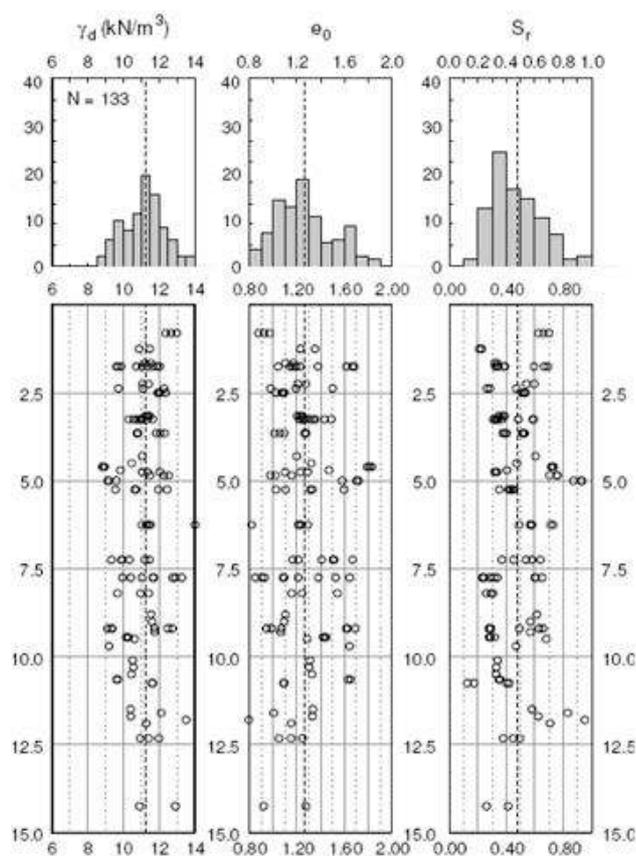


Figura II.10 Principali proprietà fisiche dei terreni piroclastici recenti del napoletano (da Picarelli et al., 2006).

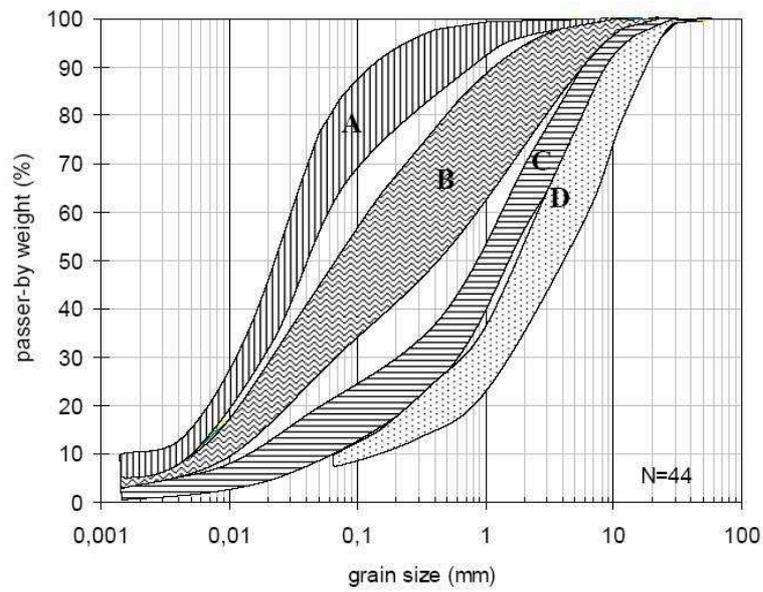


Figura II.11 Fusi granulometrici dei terreni piroclastici recenti del napoletano (da Picarelli et al., 2006).

---

### *Capitolo III*

## Sperimentazione eseguita con apparecchiature reometriche tradizionali

### III.1 INTRODUZIONE

La scrivente ha condotto un'attività sperimentale di laboratorio mediante differenti apparecchiature reometriche tradizionali su miscele acqua-sedimento utilizzando alcuni terreni campionati nelle zone di alimentazione e di deposito di colate di fango avvenute in Campania.

La prima parte della succitata attività sperimentale, di carattere del tutto preliminare, è stata svolta presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche e dei Biosistemi dell'Università degli Studi di Siena e presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II". In questa fase preliminare, sono state eseguite prove in reometro rotazionale su miscele acqua-sedimento a granulometria fine e a differenti concentrazioni solide volumetriche. Il reometro utilizzato è stato dotato di due configurazioni geometriche differenti, quella dei piatti paralleli e quella del rotore vane.

Le miscele acqua-sedimento analizzate nella suddetta attività preliminare sono state sottoposte ad un'ulteriore campagna di prove sperimentali con differenti sistemi di misura: reometri rotazionali, un piano inclinato e un penetrometro a cono. Tale lavoro è stato condotto nell'ambito di un progetto di mobilità Erasmus presso il "Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil" e presso l'Institut Navier (Università Paris Est, Francia) sotto la

direzione del Prof. Philippe Coussot e successivamente presso il Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti dell'Università di Napoli "Federico II".

Nei paragrafi successivi vengono trattate nel dettaglio le apparecchiature reometriche utilizzate, elencati e descritti brevemente i materiali analizzati e vengono illustrati il programma sperimentale eseguito, le modalità di preparazione dei campioni ed i protocolli di prova adottati. Infine viene descritto il metodo sperimentale adoperato per la scelta della configurazione geometrica da utilizzare con il reometro rotazionale per l'esecuzione delle prove sulle miscele acqua-sedimento.

## **III.2 APPARECCHIATURE UTILIZZATE**

I sistemi di misura usati per il presente studio sono tre reometri rotazionali, l'AR 2000ex (TA Instruments), il CVOR (Bohlin Instruments) ed il Rotovisco RT10 (Haake Fisons), un piano inclinato e un penetrometro a cono.

### **III.2.1 Reometri rotazionali**

Il reometro rotazionale AR 2000ex (TA Instruments) è stato utilizzato per condurre la sperimentazione preliminare. Tale reometro è stato fornito di due configurazioni geometriche: la geometria dei piatti paralleli e quella di rotore vane (Figura III.1a). Per quanto riguarda il sistema geometrico dei piatti paralleli è stato usato un piatto superiore liscio di raggio  $R_{PP}$  pari a 20mm mentre con la configurazione geometrica di rotore vane, costituita da uno strumento avente quattro palette sistemate in modo simmetrico attorno ad una sottile asta cilindrica, sono state usate palette di raggio  $R_P$  pari a 14mm ed un contenitore metallico di raggio  $R_C$  pari a 15mm.

I reometri rotazionali CVOR (Bohlin Instruments) e Rotovisco RT10 (Haake Fisons) sono stati utilizzati per l'attività sperimentale successiva. Il primo è stato equipaggiato della sola configurazione di rotore vane, con raggio delle palette  $R_P$  pari a 13mm, altezza delle palette  $L_P$  pari a 48mm e contenitore cilindrico di raggio  $R_C$  pari a 18.5mm (Figura III.1b). Il secondo è stato dotato di due geometrie, una a piatti paralleli zigrinati di raggio 35mm e l'altra a piatto e cono con angolo del cono pari a  $4^\circ$  (Figura III.1c).

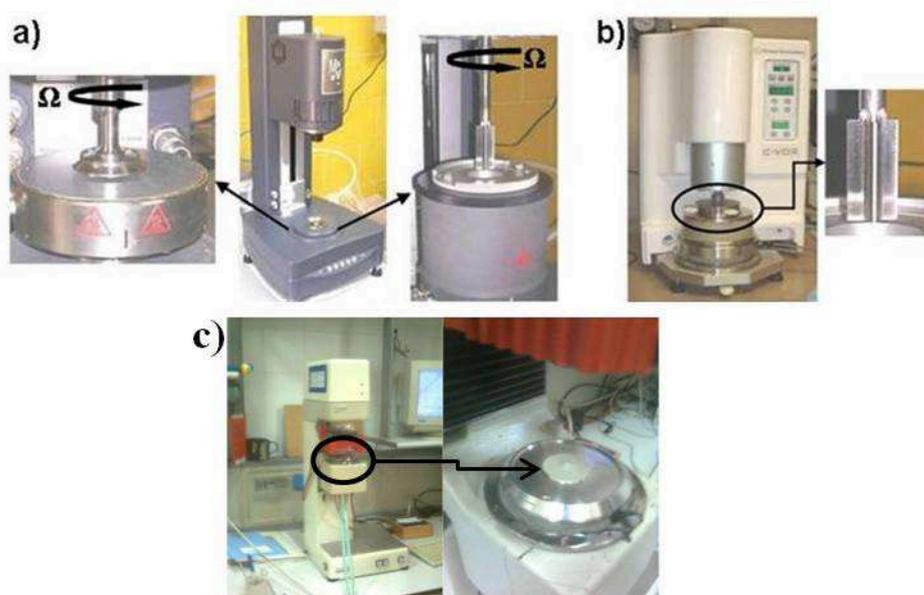


Figura III.1 a) Reometro rotazionale AR 2000ex (TA Instruments) fornito della geometria dei piatti paralleli e di quella di rotore vane; b) reometro rotazionale CVOR (Bohlin Instruments), fornito della configurazione geometrica di rotore vane; c) Rotovisco RT10 (Haake Fisions) dotato della configurazione di piatti paralleli e del cono e piatto.

Il rotore vane viene immerso nel campione contenuto nel contenitore metallico e, durante la prova, una parte del materiale viene intrappolato tra le palette di modo che, in prima approssimazione, le caratteristiche del flusso risultano simili a quelle che si sviluppano tra due cilindri coassiali (§ I.5.1), di cui il cilindro interno ha raggio uguale a quello delle palette (Nguyen & Boger, 1985).

Nella configurazione geometrica dei piatti paralleli ed in quella del cono e piatto si impone una rotazione al disco superiore attraverso l'applicazione di un momento torcente  $C$  e viene misurata la velocità angolare  $\Omega$ . Data la geometria del problema, la tensione di taglio  $\tau$  e la velocità di deformazione  $\dot{\gamma}$  vengono calcolati mediante le seguenti relazioni:

$$\dot{\gamma} = \frac{R_p \cdot \Omega}{h} \quad (\text{III.1})$$

$$\tau = \frac{2C}{\pi R_p^3} \quad (\text{III.2})$$

Dove  $h$  è l'altezza del campione e  $R_p$  è il raggio del piatto superiore.

Nella configurazione geometrica di rotore vane la coppia torcente  $C$  applicata fa ruotare le palette ad una velocità angolare  $\Omega$  assegnata. In questo caso (sotto le usuali ipotesi di assenza di effetti di inerzia ed assenza di differenza tra le tensioni normali) è possibile stimare la velocità di deformazione  $\dot{\gamma}$  e la tensione di taglio  $\tau$  attraverso le seguenti formule:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega \cdot R_p}{R_c - R_p} \quad (\text{III.3})$$

$$\tau = \frac{C}{2\pi \cdot R_p^2 \cdot L_p} \quad (\text{III.4})$$

Utilizzando le equazioni III.3 e III.4 viene trascurata l'eterogeneità tensionale che di solito si sviluppa all'interno del "gap"  $h$  tra i due cilindri e che provoca una non-omogeneità della velocità di deformazione, ossia la tensione decresce al crescere della distanza dal centro del cilindro interno. Usando, quindi, l'equazione III.3 per la determinazione della velocità di deformazione, vi è una certa incertezza sul calcolo del valore esatto, la qual cosa risulta critica specialmente per bassi valori della velocità di deformazione. Tuttavia tale approssimazione non influisce in maniera significativa sull'andamento qualitativo della curva di flusso e non altera i valori di tensione di soglia (yielding criterion) associati ai plateau tensionali (§ I.4.3). Tali semplificazioni risultano accettabili per la tipologia di sperimentazione condotta nel presente lavoro, infatti la possibile correzione dei dati che generalmente si applica per i fluidi dotati di tensione di soglia influisce in maniera trascurabile sull'andamento della curva di flusso (Coussot, 1997). La deformazione subita dal materiale ad un dato tempo  $t$  può anche essere definita come segue:

$$\gamma = \int_0^t \dot{\gamma} dt \quad (\text{III.5})$$

### III.2.2 Piano inclinato

La prova condotta con il piano inclinato consiste nel valutare lo spessore del materiale che viene fatto scivolare su un piano. Il piano inclinato utilizzato è una semplice tavola di compensato di piccole dimensioni dotata di una superficie scabra e munito di un inclinometro (Figura III.2c). Nella prova condotta con il piano inclinato (Figura III.2d) il materiale viene prima posato sul piano posto in posizione orizzontale in modo da ottenere un ampio strato di materiale. Successivamente viene inserita nel materiale, ortogonalmente alla superficie di appoggio, una riga graduata molto sottile in differenti punti della porzione centrale dello strato. Lo spessore iniziale dello strato ( $h_0$ ) viene calcolato come il valore medio di circa una decina di misurazioni. Poi il piano viene progressivamente inclinato fino al raggiungimento di un angolo critico ( $i_c$ ) in corrispondenza del quale è possibile osservare un movimento significativo dello strato anteriore del materiale. Una volta che il materiale si è arrestato si misura lo spessore finale dello strato ( $h_f$ ) utilizzando la stessa procedura descritta per la misura dello spessore iniziale.

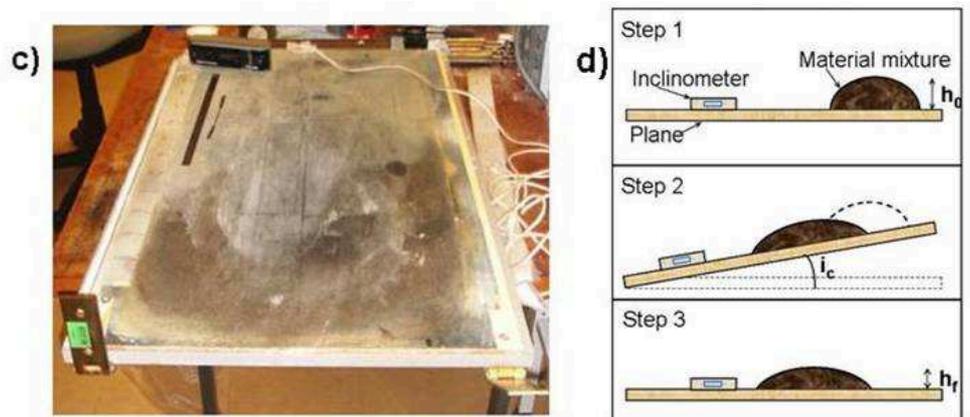


Figura III.2c) piano inclinato utilizzato; d) schema di esecuzione di una prova su piano inclinato.

Considerando valida la cosiddetta “lubrication assumption”, ossia che lo spessore del materiale ( $h_s$ ) sia molto minore della sua estensione longitudinale (Coussot, 2005), di modo che le componenti di velocità parallele al piano siano quelle dominanti e in assenza di effetti inerziali, un semplice bilancio del momento fornisce la distribuzione della tensione di taglio all’interno del materiale da analizzare. In particolare, ne consegue che la tensione di taglio alla parete è data dalla  $\tau = \rho_m \cdot g \cdot h_s \cdot \sin i$ . Dove  $\rho_m$  è la densità della miscela,  $i$  è l’inclinazione del piano e  $g$  è l’accelerazione di gravità. L’inizio del flusso ( $h_0$ ) avviene in corrispondenza di un’inclinazione critica  $i_c$  del piano e quindi la tensione di soglia statica può essere calcolata come  $\tau_{c1} = \rho_m \cdot g \cdot h_0 \cdot \sin i_c$ . L’arresto del flusso del materiale sul piano inclinato può essere interpretato attraverso la misura della tensione di soglia dinamica, ossia  $\tau_{c2} = \rho_m \cdot g \cdot h_f \cdot \sin i_c$ .

### III.2.3 Penetrometro a cono

Il penetrometro a cono è uno strumento generalmente usato nei laboratori geotecnici per calcolare la resistenza al taglio dei terreni coesivi teneri, terreni per i quali i valori di resistenza risultano particolarmente bassi. In Figura III.3 vengono schematizzati i principi della prova che si esegue utilizzando un penetrometro a cono. Il cono, che presenta angolo  $\alpha$  al vertice e massa  $M$ , viene posizionato a contatto della superficie del campione e lasciato cadere liberamente per un tempo standard di 5 secondi.

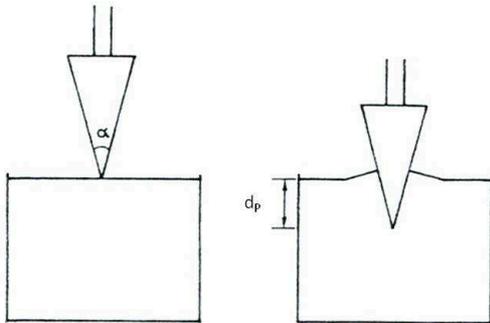


Figura III.3 Schema della prova eseguita con il penetrometro a cono.

L'affondamento della punta  $d_p$  all'interno del terreno dipende sia del peso del cono che dalla resistenza al taglio del terreno (indicata con  $c_u$  sebbene non si tratti per le miscele analizzate di una resistenza non drenata in senso stretto). Alcune analisi teorico-sperimentali condotte da differenti autori hanno permesso di definire la seguente correlazione:

$$\frac{c_u \cdot d_p^2}{M} = F(\alpha, \delta_0) \quad (\text{III.6})$$

Dove  $\delta_0$  rappresenta la misura dell'attrito punta-terreno e dipende sostanzialmente dai seguenti fattori:

- ~ scabrosità della superficie della punta;
- ~ contenuto d'acqua del terreno.

Di questi fattori il primo risulta particolarmente influente. L'utilizzo di punte in acciaio inossidabile perfettamente levigate ha permesso di limitare i fattori di influenza al solo angolo al vertice della punta. Per cui, l'espressione che permette di calcolare la resistenza al taglio è la seguente:

$$c_u = K \cdot \frac{M}{d_p^2} \quad (\text{III.7})$$

Dove  $K$  è una costante sperimentale che dipende dall'angolo al vertice del cono (Tabella III-1). Esistono naturalmente correlazioni empiriche che permettono di definire il valore di  $k$  al variare di  $\alpha$ . Inoltre il penetrometro è corredato di una serie di tre punte coniche di diverso peso e geometria rappresentate in Figura III.4. La prova viene eseguita su un campione posizionato in un contenitore. Lo spessore minimo del campione deve essere di 25 mm. Il campione viene sistemato sulla base del penetrometro ed in base ai valori previsti di resistenza al taglio, viene scelto il cono più adatto alla prova. Si porta la punta del cono a contatto con la superficie del campione e, dopo aver preso nota della misura dello zero, si lascia ricadere il cono per un tempo di 5 secondi e viene annotata la misura finale, la quale rappresenta la penetrazione (espressa in mm).

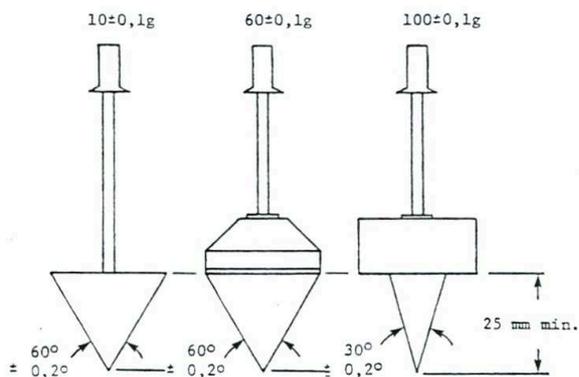


Figura III.4 Punte coniche in dotazione utilizzabili nella prova con il penetrometro a cono.

Per ogni valore di penetrazione ottenuto la resistenza al taglio  $c_u$  si calcola nel modo seguente:

$$c_u = \frac{9,8 \cdot K \cdot M}{d_p^2} \quad (\text{III.8})$$

Dove:

$d_p$  = penetrazione misurata (mm)

$K$  = costante funzione della geometria del cono (Tabella III-1)

$M$  = massa del cono (g)

$c_u$  = resistenza al taglio (kPa)

Tabella III-1 Valori della costante  $K$  nella prova del penetrometro a cono.

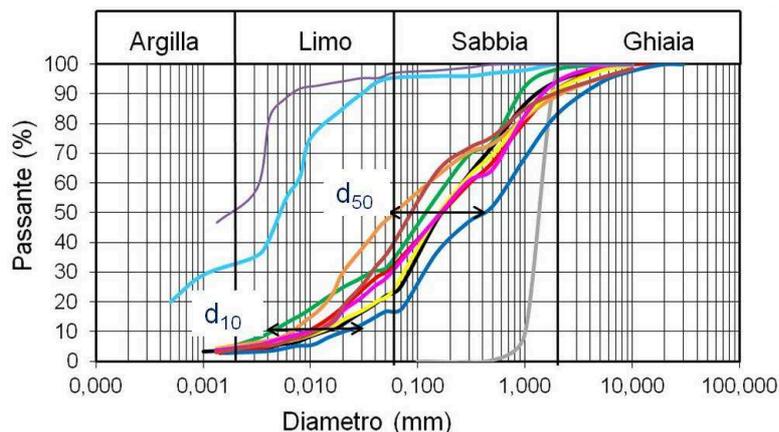
Massa del cono (g)	Angolo del cono $\alpha$ (°)	Costante $K$
10	60	0,3
60	60	0,3
100	30	1,5 - 20

### III.3 MATERIALI ANALIZZATI

I terreni analizzati sono stati campionati nelle zone di alimentazione di alcune colate rapide avvenute sui versanti dell'Appennino Campano:

- ~ il Terreno I è stato campionato nella zona di alimentazione della colata avvenuta a Nocera, Salerno, nel Marzo 2005;
- ~ i Terreni II-3, II-4 e II-8 sono stati campionati nella zona di alimentazione della colata avvenuta a Monteforte Irpino, Avellino, nel Maggio 1998;
- ~ il Terreno III è stato campionato nella zona di alimentazione della colata avvenuta nel cratere degli Astroni, Napoli, nel Dicembre 2005;
- ~ il Terreno IV è stato campionato nella zona di alimentazione di alcune colate avvenute a Posillipo (Napoli);
- ~ il materiale V è stato campionato nella zona di alimentazione della colata avvenuta a Frana Marino (Pz);
- ~ Il terreno VI è, invece, un caolino naturale.

I terreni campionati (per spessori di alcuni metri) sono depositi di materiali piroclastici derivanti dalle più recenti attività vulcaniche del Somma Vesuvio per quanto riguarda i Terreni I e II e dei Campi flegrei per i Terreni III e IV. Il substrato dei Terreni I e II è di natura carbonatica mentre quello dei Terreni III e IV è una roccia piroclastica. Il Terreno V è un'argilla vari colore costituita da banchi argillitici compatti e consistenti con intercalazioni di calcari in blocchi ed in strati di piccolo spessore. In Figura III.5 sono riportate le curve granulometriche dei terreni considerati. I Terreni I e II vanno dai limi sabbiosi debolmente argillosi alle sabbie limose ad eccezione del Terreno II-3 che è un materiale a grana grossa abbastanza uniforme. I Terreni III e IV sono sabbie con limo debolmente ghiaiose. Il diametro medio ( $d_{50}$ ) delle particelle che compongono i terreni analizzati ricade nel campo delle sabbie mentre la frazione fine ( $d_{10}$ ) è essenzialmente costituita da limo. Il Terreno VI è un caolino naturale monogranulare ed il Terreno V è un'argilla. Gli eventi di colata considerati così come i materiali coinvolti sono stati oggetto di diversi e dettagliati lavori precedenti dei quali si riporta una sintesi in Appendice A (Scotto di Santolo, 2000; Zingariello, 2006; Papa, 2007; Calcaterra et al., 2009; Giammarino, 2011).



*Figura III.5 Curve granulometriche dei Terreni analizzati: Terreno I, linea nera; Terreno II-3, linea grigi; Terreno II-4 linea rossa; Terreno II-8 linea verde; Terreno III linea blu; Terreno IV(D1ALTO) linea beige; Terreno IV(D1MEDIO) linea gialla; Terreno IV(D2BASSO) linea glicine; Terreno IV(D3ALTO) linea marrone; Terreno V linea azzurra; Terreno VI linea viola.*

### III.4 PROGRAMMA SPERIMENTALE

#### III.4.1 Preparazione dei campioni

A causa delle ridotte dimensioni dei sistemi geometrici di misura disponibili per i reometri di tipo tradizionale (le dimensioni degli strumenti sono fissate in funzione del diametro caratteristico delle particelle che compongono i materiali che vengono testati), sono stati usati campioni di dimensioni molto piccole (volumi dell'ordine di 2,5ml con la geometria dei piatti paralleli e volumi dell'ordine di 27ml con la geometria di rotore vane). Le ridotte dimensioni delle configurazioni geometriche condizionano l'analisi di materiali composti da particelle aventi diametri superiori al millimetro. Infatti, affinché sia possibile sottoporre a taglio l'intero campione è necessario che la distanza tra gli elementi del reometro, ossia il "gap"  $h$ , non superi di dieci volte la dimensione massima delle particelle caratteristiche del materiale (Makosko, 1994).

Al fine di rispettare al meglio l'ipotesi del continuo è necessario avere a disposizione per le prove reometriche campioni aventi dimensione caratteristica (ossia spessore) molto maggiore rispetto alla dimensione tipica delle particelle che compongono il materiale. Poiché la dimensione caratteristica del campione è maggiore di 5mm, le prove sono state condotte considerando la frazione di terreno contenente particelle con diametro massimo minore di 0,5mm. Il rapporto tra la dimensione caratteristica del campione ed il diametro massimo delle particelle è maggiore di 10 ma diventa circa 100 se si considera il diametro tipico delle particelle contenute in questa frazione (circa pari a 0,06mm). In tal modo l'ipotesi del continuo è ancora valida e le prove vengono condotte utilizzando quasi il 50-70% dell'intera distribuzione granulometrica. Dato che le restanti frazioni solide dei materiali campionati non mostrano una natura colloidale, è possibile affermare che, una volta aggiunte alle miscele acqua-sedimento contenenti la sola frazione fine, il loro contributo sia solo quello di incrementare il valore dei parametri reologici ma non di alterare qualitativamente la tipologia di comportamento delle miscele.

In entrambe le sperimentazioni, quella preliminare condotta con il reometro AR 2000ex (TA Instruments) e quella successiva condotta con il reometro CVOR (Bohlin Instruments) e con il reometro Rotovisco RT10 (Haake Fisons), i campioni testati sono stati ottenuti preparando miscele di acqua-sedimento a differente contenuto d'acqua, ossia a differente concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ . La concentrazione solida volumetrica  $\Phi$  è definita come il rapporto tra il volume del solido presente nella miscela  $V_S$  ed il volume totale della miscela stessa  $V_T$  (volume dell'acqua  $V_W$  più volume del solido  $V_S$ ):

$$\Phi = \frac{V_S}{V_T} \quad (\text{III.9})$$

Al fine di considerare un intervallo significativo di concentrazione solida volumetrica per i materiali analizzati, si è scelto di preparare miscele con concentrazione solida volumetrica variabile tra il 20% ed il 40%, in accordo con le corrispondenti variazioni di porosità in sito (60÷80%). Per ogni materiale testato, sono stati preparati campioni di volume pari a circa 500ml,

miscelando il terreno con acqua distillata con l'ausilio di un agitatore elettronico (ad una velocità di circa 30rpm) per 15 minuti (Figura III.6). Per le prove effettuate con il reometro rotazionale, sono stati utilizzati campioni di volume pari a circa 30ml, mentre per le prove effettuate con il piano inclinato sono stati usati campioni di volume pari a 500 ml.



*Figura III.6 Miscelazione ed omogeneizzazione dei campioni*

### **III.4.2    *Protocolli sperimentali***

Nella fase sperimentale preliminare condotta con il reometro AR 2000ex (TA Instruments), le miscele acqua-sedimento ottenute sono state testate a velocità di deformazione e temperatura controllata (20°) e le curve di flusso sono state ottenute mediante una sola prova condotta applicando una rampa crescente di velocità di deformazione nell'intervallo  $0,14\text{--}1400\text{s}^{-1}$  (Figura III.7).

Nella fase sperimentale successiva condotta con il reometro Rotovisco RT10 (Haake Fisons), ogni prova è stata condotta a temperatura controllata e costante (20°C) imponendo una rampa crescente di velocità di deformazione nell'intervallo  $0,1\text{--}1000\text{s}^{-1}$  (Figura III.7).

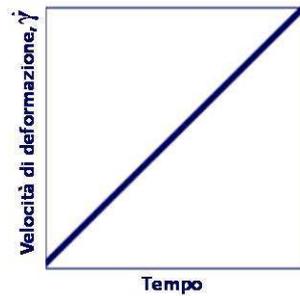


Figura III.7 Modalità di applicazione di una rampa crescente di velocità di deformazione

Nella fase sperimentale successiva condotta con il reometro CVOR (Bohlin Instruments), ogni prova è stata condotta a temperatura controllata e costante (20°C). In questo caso sono state eseguite due tipologie di prove: prove di flusso e prove di Creep. Le prove di flusso eseguite consistono nel determinare la curva di flusso apparente attraverso l'applicazione di una rampa crescente e decrescente di tensione di taglio (Figura III.8). La tensione di taglio è stata incrementata in maniera continua e seguendo una scala logaritmica da un valore di partenza pari a 0,1 Pa fino al valore massimo di tensione sopportabile dal campione e sono stati calcolati i corrispondenti valori della velocità di deformazione.

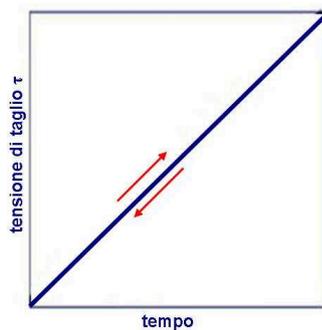


Figura III.8 Modalità di applicazione di una rampa crescente e decrescente di tensione di taglio

Il valore massimo di tensione sopportabile dal campione da analizzare è stato determinato, per ogni miscela, attraverso prove reometriche preliminari effettuate nelle medesime condizioni di quelle specificate per le prove di flusso, che consistono nell'applicare al campione un campo di flusso istantaneo e nell'incrementarlo fino a quando il campione non si trova nel suo regime liquido e non si ha l'espulsione del campione dalla geometria di prova. Successivamente la tensione di taglio è stata ridotta seguendo esattamente il medesimo percorso tensionale.

Ogni prova di flusso ha avuto una durata totale di 120s. Il protocollo di prova completo consiste nell'inserire il campione nella configurazione geometrica prescelta e nell'imporre immediatamente una pre-tensione (preshear) di valore pari al valore massimo di tensione misurato come descritto sopra. Tale tensione è stata applicata per un tempo pari a 30 secondi, dopo di che è stata condotta la prova di flusso. Il campione è stato sottoposto a questo stato tensionale aggiuntivo al fine di garantirne un'omogeneità maggiore. In alcuni casi il materiale è stato lasciato a riposo per un certo tempo (time of rest) prima che la prova di flusso cominciasse. Ciò per indagare la possibilità che i materiali selezionati potessero avere un comportamento di tipo tixotropico.

Le prove di creep consistono, invece, nell'imporre al campione una tensione di valore costante e quindi misurare nel tempo la deformazione indotta da tale valore di tensione. I risultati vengono rappresentati con curve in cui la deformazione subita dai provini è posta in funzione del tempo (Figura III.9). La deformazione è espressa in termini di angolo di rotazione del cilindro interno dal momento in cui viene applicata la tensione. Una prova completa consiste nell'imporre al provino diversi valori di tensione di taglio, ma ogni valore di tensione deve essere assegnato durante una singola prova perché è necessario che il campione si trovi nel medesimo stato iniziale ogni volta che viene sottoposto ad una stato tensionale differente.

Il programma sperimentale eseguito è riassunto in Tabella III-2.

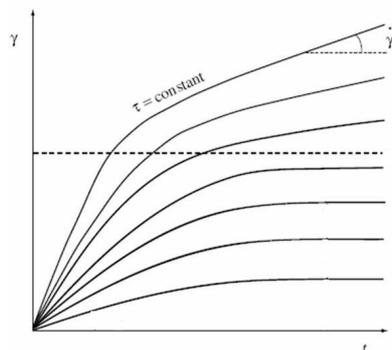


Figura III.9 Risultato tipico di una prova di creep. La linea tratteggiata rappresenta l'inizio del regime di flusso.

Tabella III-2 Programma sperimentale eseguito con sistemi di misura convenzionali (RR= reometro rotazionale; PI= piano inclinato; PT= penetrometro a cono)

#	Terreno	$\Phi$ (%)	$d_{\max}$ (mm)	RR	PI	PT
1	I	20	0,1	x	-	-
2	I	30	0,1	x	-	-
3	I	32	0,5	x	x	-
4	I	35	0,5	x	x	-
5	I	38	0,5	x	x	-
6	I	40	0,1	x	-	-
7	I	40	0,5	x	x	-
8	I	42	0,5	x	x	-
1	II-4	20	0,1	x	-	-
2	II-4	30	0,1	x	-	-
3	II-4	30	0,5	x	x	-
4	II-4	32	0,5	x	x	x
5	II-4	35	0,5	x	x	-
6	II-4	38	0,5	x	x	-
7	II-4	40	0,1	x	-	-
1	II-8	30	0,5	x	x	-
2	II-8	32	0,5	x	x	-

3	II-8	35	0,5	x	x	-
4	II-8	38	0,5	x	x	-
1	III	20	0,1	x	-	-
2	III	30	0,1	x	-	-
3	III	35	0,5	x	x	-
4	III	38	0,5	x	x	-
5	III	40	0,1	x	-	-
6	III	40	0,5	x	x	x
7	III	42	0,5	x	x	-
1	IV(D1ALTO)	35	0,5	x	-	-
2	IV(D1MEDIO)	35	0,5	x	-	-
3	IV(D2BASSO)	35	0,5	x	-	-
4	IV(D3ALTO)	35	0,5	x	-	-
5	IV(D3ALTO)	38	0,5	x	-	x
1	V	25	0,4	x	-	-
2	V	28	0,4	x	-	-
3	V	30	0,4	x	-	-
4	V	35	0,4	x	-	-
5	V	40	0,4	x	-	-
1	VI	35	0,4	x	-	x

### III.5 SCELTA DELLA GEOMETRIS DI PROVA PIÙ IDONEA

La valutazione di quale fosse la configurazione geometrica maggiormente adatta per l'analisi delle miscele acqua-sedimento è stata oggetto della fase preliminare della sperimentazione in reometro tradizionale condotta nel presente lavoro. In generale, la scelta del sistema geometrico maggiormente idoneo allo svolgimento di una prova in reometro dipende fortemente dalle proprietà reologiche del materiale che si intende analizzare. Dato che le proprietà reologiche non sono caratteristiche note a priori, sono assolutamente necessarie alcune misurazioni di carattere preliminare. Infatti, la presenza di diversi effetti di disturbo dovuti sia alle proprietà del materiale che alle configurazioni geometriche potrebbero condurre a un'interpretazione erronea dei dati sperimentali (Major & Pierson, 1992; Coussot & Piau, 1995; Coussot,

1997; Kaitna et al., 2007). Le condizioni del regime di taglio imposto al campione (correlate al volume) e gli effetti di disturbo (correlati alle geometrie scelte ed alle caratteristiche dei materiali) cambiano significativamente in funzione dei sistemi geometrici di prova usati. I dati sperimentali ottenuti mediante l'impiego di differenti sistemi reometrici possono essere in accordo soltanto se il materiale testato viene sottoposto in maniera omogenea al regime di taglio così come esso viene descritto teoricamente (Major & Pierson, 1992; Coussot, 1997).

Al fine di comprendere come la scelta di un sistema geometrico piuttosto che un altro influenzi i risultati sperimentali, sono state condotte prove preliminari utilizzando sia la geometria dei piatti paralleli che quella di rotore vane su un tipico fluido a comportamento Newtoniano ( $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$  dove  $\eta$  è la viscosità), ossia della paraffina liquida commercialmente in uso con viscosità nota, fornita dal produttore, pari a 0,01Pa s. Le prove sono state effettuate a velocità di deformazione e temperatura controllate (20°), imponendo una rampa di velocità di deformazione crescente. In Figura III.10a è riportato il confronto tra le curve di flusso della paraffina liquida ottenute mediante il sistema dei piatti paralleli e la geometria di rotore vane. È possibile osservare una differenza di tipo quantitativo tra i risultati sperimentali ottenuti mediante i due diversi sistemi geometrici. Confrontando le curve di flusso ottenute mediante l'impiego delle due geometrie in termini di viscosità (Figura III.10b), si nota che usando la geometria dei piatti paralleli si ha una sovrastima della viscosità rispetto quella fornita dal produttore (0,01Pa s). Essendo che la paraffina liquida è un materiale a comportamento Newtoniano e che i dati misurati possono essere modellati attraverso la seguente equazione  $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$  (dove  $\eta$  è la viscosità, costante) è stato determinato un fattore di scala  $f_s$  che consente di correggere i dati ricavati attraverso le prove condotte con il sistema di piatti paralleli sulla base dei dati sperimentali ottenuti con la configurazione di rotore vane. La procedura per calcolare tale fatto di scala  $f_s$  è la seguente:

$$\begin{aligned} \tau_{PP} &= \eta_{PP} \cdot \dot{\gamma}, \tau_{VR} = \eta_{VR} \cdot \dot{\gamma} \\ \tau_{PP} &= \tau_{VR} \cdot \frac{\eta_{PP}}{\eta_{VR}} \Rightarrow f_s = \frac{\eta_{PP}}{\eta_{VR}} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

Dove  $\tau_{PP}$  è lo sforzo di taglio misurato con il sistema dei piatti paralleli,  $\tau_{VR}$  è lo sforzo misurato con il rotore vane,  $\eta_{PP}$  è la viscosità misurata con il sistema dei piatti paralleli e  $\eta_{VR}$  è la viscosità misurata con la geometria di rotore vane.

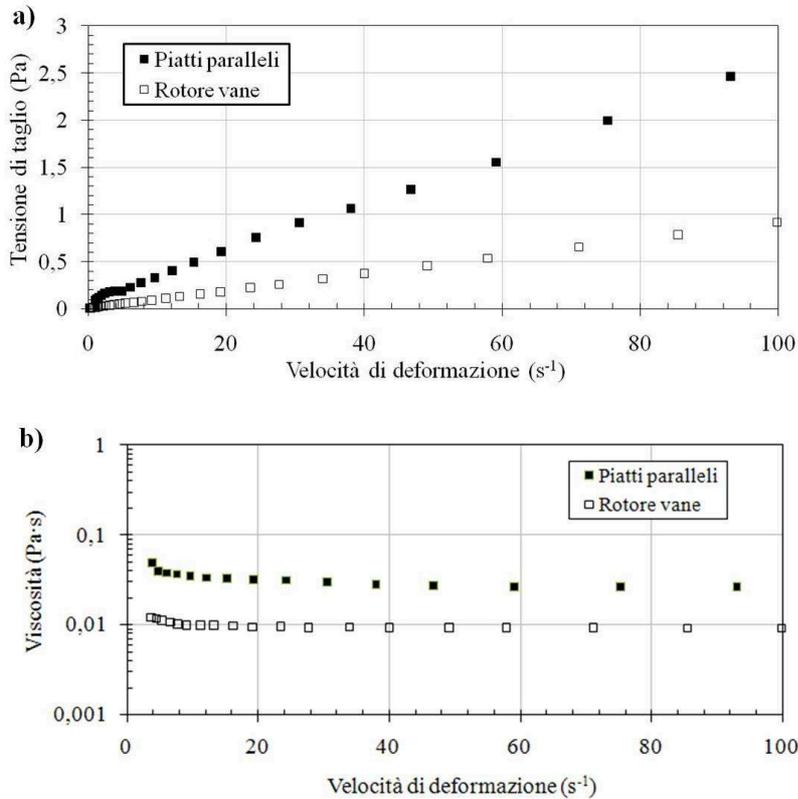


Figura III.10 Paraffina liquida commercialmente in uso: confronto tra i risultati ottenuti utilizzando due configurazioni geometriche diverse in termini di a) tensione di taglio e b) viscosità

Lo stesso tipo di esperimento è stato condotto su una miscela acqua-sedimento composta con uno dei materiali selezionati per il presente lavoro (il Terreno I ad una concentrazione solida volumetrica pari al 20% e usando le sole particelle di diametro massimo pari a 0,1mm), il cui comportamento è quello di un fluido non Newtoniano. In tal caso sono state notate differenze sia quantitative che qualitative tra le curve di flusso ottenute usando i due sistemi

geometrici differenti (Figura III.11a). Infatti valori dei dati sperimentali differiscono e l'andamento delle curve di flusso non è identico nell'intervallo di velocità di deformazione indagato. Si osserva che, per bassi valori della velocità di deformazione, si ha un minimo nella curva di flusso ottenuta usando il rotore vane (Figura III.11b): la tensione di taglio inizialmente decresce poi, per valori maggiori della velocità di deformazione, comincia ad avere un andamento crescente. Un comportamento simile, ossia un andamento della curva di flusso con un minimo per bassi valori della velocità di deformazione, è stato già riscontrato da diversi autori nello studio di sospensioni concentrate (Nguyen & Boger, 1985; Alderman et al., 1991; Major & Pierson, 1992; Pignon et al., 1996; Coussot, 1997; Ancey & Jorrot, 2001; Kaitna et al., 2007). I lavori precedenti concordano sul fatto che, quando si ha a che fare con materiali che presentano curve di flusso con un minimo, il comportamento reologico è descritto dal solo ramo crescente della curva.

Nel presente lavoro, la curva di flusso del Terreno I ottenuta con l'impiego del rotore vane è maggiore di quella ottenuta utilizzando la geometria dei piatti paralleli in corrispondenza di un valore di velocità di deformazione  $\dot{\gamma}$  che si può definire, impropriamente, un valore critico, pari a  $50\text{s}^{-1}$ . Con riguardo alla miscela considerata, si osserva chiaramente che, dopo questo valore critico di velocità di deformazione, il materiale ha un comportamento tipo fluido non Newtoniano con la presenza di una tensione di soglia che corrisponde, in questo caso, al valore massimo di tensione che è possibile ottenere prima che i dati relativi alla curva di flusso comincino a decrescere (Coussot, 1997). Probabilmente, durante l'esecuzione delle prove con la geometria dei piatti paralleli, si sono verificati diversi effetti di disturbo come il cambiamento della superficie libera del campione, diversi effetti di bordo e di rottura, eterogeneità nella distribuzione delle particelle (sedimentazione e migrazione della particelle dovute all'inerzia e alla formazione di un flusso di tipo secondario) e scivolamento alla parete. Tali effetti di disturbo hanno influenzato in maniera significativa i dati sperimentali solo da un punto di vista quantitativo nel caso dei materiali Newtoniani e da un punto di vista sia quantitativo che qualitativo nel caso delle miscele acqua-sedimento analizzate. Nel presente lavoro, quindi, è apparso necessario approfondire questo aspetto attraverso una sorta di verifica "matematica" della presenza di questi effetti di

disturbo durante lo svolgimento delle prove utilizzando formulazioni tipicamente adoperate nello studio della meccanica dei fluidi.

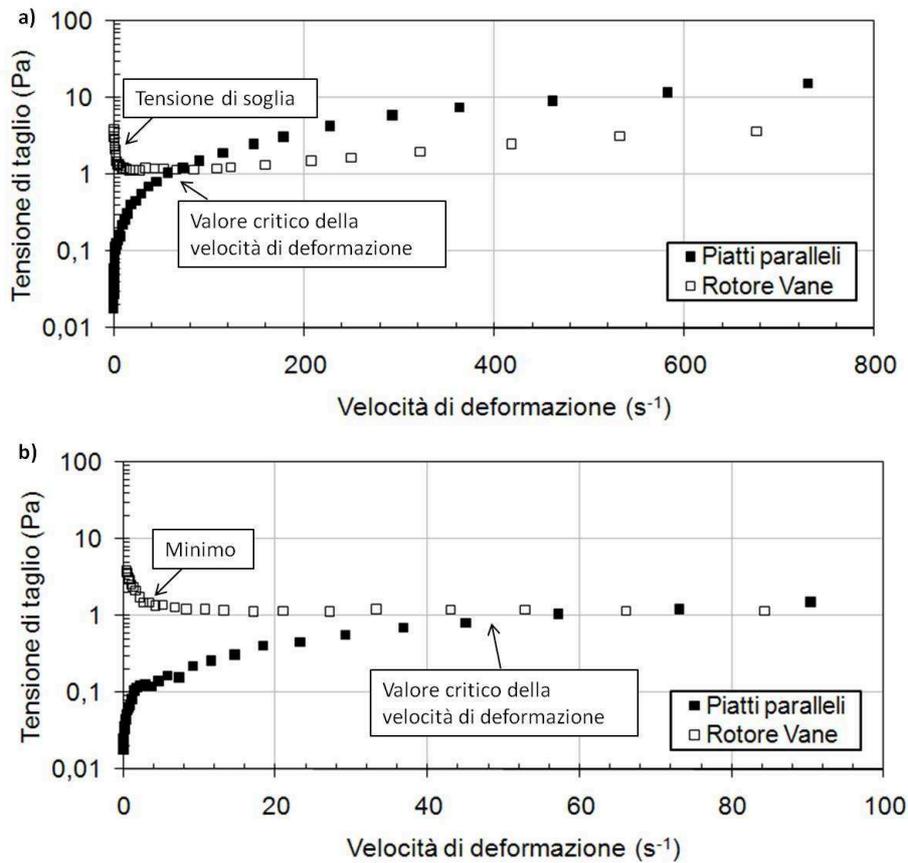


Figura III.11 Miscela composta con il Terreno I ad una concentrazione solida volumetrica pari al 20%: a) confronto tra i risultati ottenuti utilizzando due configurazioni geometriche diverse in termini di tensione di taglio. b) particolare che evidenzia la presenza di un minimo nella curva di flusso ottenuta utilizzando il sistema di rotore vane

In esperimenti di tipo statico le forze di gravità sono in competizione con le forze browniane (con il termine di moto browniano si fa riferimento al moto disordinato delle particelle in fluidi o sospensioni fluide). Per stimare la sedimentazione di un campione nel quale siano presenti particelle sferiche, il

rapporto tra le forze di gravità e quelle Browniane dovrebbe essere maggiore di 1 (Macosko, 1994), ossia:

$$\frac{F_{gravità}}{F_{Browniane}} = \frac{(\rho_d - \rho_c) \cdot g \cdot a^3}{k_B \cdot \frac{T_a}{a}} > 1 \quad (\text{III.11})$$

In cui  $\rho_d$  e  $\rho_c$  sono la densità della fase dispersa e la densità della fase continua,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $a$  è il raggio tipico delle particelle,  $k_B$  è la costante di Boltzmann e  $T_a$  è la temperatura assoluta. Secondo Larson (1999) il fenomeno della sedimentazione si verifica sicuramente per sospensioni concentrate in cui la differenza  $\Delta\rho$  tra la densità della fase dispersa  $\rho_d$  e quella della fase continua  $\rho_c$  è maggiore di  $10^3 \text{kgm}^{-3}$  e le particelle, o gli aggregati presenti, hanno raggio maggiore di  $1\mu\text{m}$ . Per le miscele analizzate nel presente lavoro la differenza  $\Delta\rho$  è pari a  $1600 \text{kgm}^{-3}$ , per cui, di certo, il fenomeno della sedimentazione condiziona i dati sperimentali.

È possibile lavorare sulle condizioni di flusso, ricercando la modalità per cui la sedimentazione non influisca considerevolmente sui risultati durante la durata di esecuzione di una prova. Infatti è possibile stimare il tempo sperimentale,  $t_{\text{exp}}$ , necessario ad una singola sfera di raggio  $a$  per muoversi lungo una distanza  $h$  (ossia il gap) come descritto nella seguente espressione:

$$t_{\text{exp}} = \frac{9}{2} \cdot \frac{\eta_c \cdot h}{\Delta\rho \cdot g \cdot a^2} \quad (\text{III.12})$$

dove  $\eta_c$  è la viscosità della fase continua (per l'acqua si ha  $\eta$  pari a  $10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ ),  $\Delta\rho$  è la differenza tra la densità della fase dispersa  $\rho_d$  e quella della fase continua  $\rho_c$ ,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $a$  è il raggio delle particelle presenti nella miscela aventi diametro massimo (Macosko, 1994). Per le miscele analizzate nel presente lavoro  $t_{\text{exp}}$  è risultato pari a  $0,005\text{s}$ . Il che significa che, al fine di evitare che la sedimentazione del materiale disperso influenzi sensibilmente i dati sperimentali, è necessario svolgere delle prove di durata più breve possibile. Anche l'inerzia delle particelle può influenzare i risultati sperimentali. Con il numero di Reynolds riferito alle particelle  $Re_p$  (particle Reynolds number) è possibile stimare gli effetti di tale contributo utilizzando la seguente espressione:

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_c \dot{\gamma} a^2}{\eta_c} \quad (\text{III.13})$$

nella quale  $\dot{\gamma}$  ed  $\eta_c$  sono la velocità di deformazione e la viscosità della fase continua, rispettivamente. Per le dimensioni delle particelle utilizzate nel presente studio (raggio pari a 0,25mm) e per velocità di deformazione pari a  $50\text{s}^{-1}$ , l'inezia delle particelle si verifica dato che  $\text{Re}_p$  è pari a 0,125 e risulta maggiore di  $10^{-1}$  (Macosko, 1994).

---

## *Capitolo IV*

# Comportamento reologico delle miscele a granulometria fine (Risultati sperimentali)

## IV.1 INTRODUZIONE

Nel presente capitolo vengono illustrati i risultati sperimentali relativi alle prove eseguite con sistemi di misura convenzionali sulle miscele acqua-sedimento a granulometria fine. Come spiegato nel capitolo III, sono stati usati tre reometri rotazionali dotati di differenti configurazioni geometriche, un piano inclinato ed un penetrometro a cono. Gli obiettivi di tale sperimentazioni sono stati i seguenti:

- ~ la definizione di un intervallo di concentrazione solida volumetrica  $\Phi$  all'interno del quale il comportamento reologico delle miscele è riconducibile a quello di fluidi non Newtoniani e, quindi, analizzabile con le usuali tecniche reometriche;
- ~ la determinazione della relazione tra sforzo di taglio e velocità di deformazione (curva di flusso  $\tau$ - $\dot{\gamma}$ );
- ~ l'interpretazione dei dati sperimentali attraverso i modelli reologici disponibili in letteratura al fine di definire una opportuna equazione costituiva da assegnare alle miscele acqua-sedimento;
- ~ lo studio dell'influenza della variazione di contenuto solido sui valori dei parametri reologici, quali la tensione di taglio e la viscosità.

I risultati sperimentali conseguiti hanno mostrato che le miscele acqua-sedimento analizzate si comportano come fluidi non Newtoniani dotati di soglia  $\tau_c$  e che la tensione di soglia statica  $\tau_{c1}$  è sempre maggiore di quella

dinamica  $\tau_{c2}$  (la tensione di soglia statica è quel valore di sforzo di taglio in corrispondenza del quale il materiale comincia a fluire mentre la tensione di soglia dinamica è quel valore dello sforzo di taglio in corrispondenza del quale si arresta il flusso del materiale).

Differenti tipi di prove sono state condotte sulle miscele acqua-sedimento oggetto di studio. Data la natura delle miscele analizzate (si ricorda che esse sono sospensioni concentrate di particelle variamente assortite) sono stati condotti alcuni esperimenti preliminari per studiare l'influenza della sedimentazione sui risultati sperimentali in rapporto alla durata caratteristica dei test reometrici eseguiti. Le miscele acqua-sedimento sono state sottoposte a prove di flusso, prove di creep e prove di rilassamento in reometro rotazionale; a prove di scorrimento su piano inclinato e a prove di resistenza con il penetrometro a cono. Attraverso le prove di flusso sono state determinate le curve caratteristiche  $\tau-\dot{\gamma}$  in un ampio intervallo di velocità di deformazione. Mediante le prove di creep è stato studiato il meccanismo di transizione delle miscele da un comportamento tipo solido a quello tipo fluido. Le prove di rilassamento sono state condotte per analizzare l'influenza del tempo di riposo sul comportamento delle miscele. Attraverso le prove di scorrimento su piano inclinato e di resistenza con il penetrometro a cono sono stati ulteriormente indagate le tensioni di soglia statica e dinamica delle miscele. I dati sperimentali sono stati descritti con un opportuno modello reologico ed i parametri di tale modello sono stati ulteriormente interpretati al fine di determinare l'influenza della concentrazione solida volumetrica sul comportamento reologico delle miscele.

I risultati conseguiti con i tre differenti sistemi di misura sono stati opportunamente confrontati al fine di poter stabilire l'affidabilità delle misurazioni e poter trarre alcune osservazioni circa il comportamento reologico delle miscele in funzione della tipologia di Terreno coinvolto.

## **IV.2 RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE IN REOMETRO ROTAZIONALE**

### ***IV.2.1 Comportamento in funzione del contenuto di solido***

Il primo obiettivo della sperimentazione in reometro tradizionale è stato quello di studiare il comportamento dei materiali campionati al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$  delle miscele, prendendo spunto dalle osservazioni e dai risultati conseguiti da ricerche precedenti svolte su terreni aventi caratteristiche simili (Scotto di Santolo, 2000; Martino, 2003). L'osservazione critica della relazione esistente tra le caratteristiche reologiche dei materiali e la concentrazione solida volumetrica è di fondamentale importanza in quanto permette di definire un intervallo di contenuto solido all'interno del quale le miscele ottenute con i terreni selezionati possano essere considerate come fluidi e quindi studiate con gli strumenti reometrici tradizionali.

Per ognuno dei materiali analizzati, sono stati identificati tre differenti stati del materiale al variare della concentrazione solida volumetrica:

- ~ per concentrazioni solide volumetriche molto basse ( $\Phi < \Phi_1$ , i valori di  $\Phi_1$  sono riportati in seguito) le particelle sedimentano rapidamente (ossia in pochi secondi) e tale sedimentazione conduce ad un'apparente separazione delle fasi, liquida e solida, all'interno delle miscele preparate. Nelle condizioni di flusso che si sviluppano in corrispondenza di concentrazioni solide molto basse, le particelle in sospensione, che hanno densità maggiore dell'acqua, non interagiscono a distanza attraverso interazioni di tipo colloidale (o le interazioni di tipo colloidale risultano trascurabili ad una certa distanza). Non è presente una forza che controbilancia l'azione della forza di gravità, evitando che le particelle si "impacchettino" l'una all'altra sul fondo del contenitore in cui è posta la miscela. Quindi, nell'istante immediatamente successivo alla preparazione del campione, ossia quando le particelle sono ancora disperse nell'acqua e la concentrazione solida della miscela può considerarsi più o meno eterogenea, il materiale così preparato esibisce un apparente comportamento Newtoniano come quello descritto dalle classiche teorie sviluppate per le sospensioni di particelle non colloidali (Coussot, 2005). Ovviamente, nella presente sperimentazione, non è stato possibile condurre prove reometriche su miscele a concentrazioni solide volumetriche così basse poiché, secondo le succitate teorie, la viscosità di questi materiali per tali valori di contenuto solido è di poco maggiore di quella dell'acqua pura. Infatti, quando le particelle sono completamente

sedimentate diventa impossibile analizzare un materiale omogeneo e ricavare informazioni corrette sulla sua viscosità;

- ~ per concentrazioni solide volumetriche molto alte ( $\Phi < \Phi_2$ , i valori di  $\Phi_2$  sono riportati in seguito), le miscele ottenute sono simili ad una sorta di materiale pastoso ad alta resistenza, la cui rottura avviene con caratteristiche pressoché uguali a quelle di un corpo solido sottoposto ad un campo deformativo. Materiali di questo tipo non possono essere considerati “fluidi” proprio perché non sono in grado di sopportare grandi deformazioni senza che le proprie proprietà di base ne risultino modificate. Ovviamente, nella presente sperimentazione, non è stato possibile condurre prove reometriche su miscele a concentrazioni solide volumetriche così alte;
- ~ per concentrazioni solide volumetriche intermedie tra i due estremi succitati ( $\Phi_1 < \Phi < \Phi_2$ ), si osserva che l’effetto della sedimentazione diventa pressoché insignificante dopo un tempo di riposo delle miscele molto lungo (rapportato alle tempistiche tipiche di una prova reometrica), solitamente nell’ordine di 10 minuti. I campioni rimangono omogenei per un tempo di osservazione ragionevolmente grande e fluiscono come materiali liquidi. Il comportamento reologico dei materiali campionati è stato, quindi, studiato in questi intervalli di concentrazione solida volumetrica intermedi [ $\Phi_1$ - $\Phi_2$ ], definiti come intervalli in cui il materiale si comporta come un fluido (“fluid-like”).

Nel paragrafo successivo verrà discussa con maggiore dettaglio la possibile influenza della sedimentazione sulle misure sperimentali eseguite.

Il limite inferiore  $\Phi_1$  dell’intervallo di concentrazione solida volumetrica considerato è pari al 32% per il Terreno I, al 30% per il Terreno II-4 e II-8, al 35% per i Terreni III e IV e al 25 % per il Terreno V. In generale, per particelle non-colloidalì la cui densità è maggiore di quella dell’acqua, il fenomeno della sedimentazione si verifica rapidamente fino a quando la frazione solida del campione è minore della concentrazione di massimo impacchettamento. Nel caso dei materiali analizzati nel presente lavoro, i valori di  $\Phi_1$  sono molto inferiori a quelli tipici delle concentrazioni di massimo impacchettamento di miscele composte da particelle non-colloidalì (solitamente dell’ordine del 60% per sfere uniformi e anche maggiori se la distribuzione granulometrica è variamente assortita). Questo sottintende che

per i materiali analizzati probabilmente ci sono alcune lievi interazioni colloidali, che agiscono a breve distanza tra alcune delle particelle solide che compongono le miscele e che controbilanciano la tendenza alla sedimentazione, riducendo l'apparente concentrazione di massimo impacchettamento che il materiale possiede prima di diventare un solido.

Il limite superiore  $\Phi_2$  dell'intervallo di concentrazione solida volumetrica considerato è pari al 42% per il Terreno I, al 38% per i Terreni II-4 e II-8, al 42% per il Terreno III, al 35% per il Terreno IV e al 40% per il Terreno V. Sicuramente sorprende il fatto che l'intervallo di concentrazione solida volumetrica nel quale le miscele composte con i materiali selezionati possano comportarsi come fluidi è piuttosto ristretto (infatti per le miscele di acqua e argilla, ad esempio, si hanno miscele omogenee in un intervallo di concentrazioni solide volumetriche che va dall'1% fino a diverse decine).

#### ***IV.2.2 Influenza della sedimentazione***

Al fine di valutare l'influenza della sedimentazione sui risultati sperimentali ottenuti mediante le prove reometriche condotte nel presente lavoro, è stato eseguito un semplice esperimento con l'aiuto del quale è stato possibile stimare il tempo di sedimentazione caratteristico dei terreni analizzati.

L'esperimento succitato consiste nell'immettere alcuni campioni di materiali differenti all'interno di un contenitore cilindrico graduato e trasparente (di volume pari a 250ml) e nell'osservare lo stato dei campioni nel tempo (Figura IV.1). Come spesso accade per le sospensioni concentrate, la sedimentazione porta alla formazione di una regione di acqua trasparente sulla superficie libera del campione al di sotto della quale si forma una regione non trasparente di materiale che contiene tutte, o quasi, le particelle solide. Generalmente si considera che in questo processo, le particelle solide sedimentino più o meno in massa attraverso il liquido indipendentemente dalla loro dimensione (effetto collettivo). Seguendo lo spostamento dell'interfaccia acqua pura-sospensione concentrata nel tempo si ottiene, quindi, un'indicazione dell'aumento della concentrazione solida nella regione del campione che si trova al fondo del contenitore. Nel presente lavoro è stato possibile osservare, quindi, il verificarsi della sedimentazione cosiddetta "macroscopica".



*Figura IV.1 Interfaccia acqua pura - sospensione concentrata per i Terreni II-4 (a destra) e III (a sinistra)*

In Figura IV.2, che diagramma i risultati dell'esperimento condotto sul Terreno II-4 e sul Terreno III, si vede come il processo di sedimentazione all'interno del Terreno II-4 comincia ad essere significativo soltanto dopo circa tre minuti dall'inizio della prova, ossia l'interfaccia rimane prossima alla superficie libera del campione durante questo tempo dopo di che comincia a spostarsi significativamente verso il basso. Sfortunatamente non è stato possibile condurre questo tipo di esperimento sul Terreno I, sul Terreno II-8 e sul Terreno IV ma da osservazioni di tipo qualitativo fatte durante la preparazione delle miscele si può affermare che sicuramente il di tali materiali è prossimo a quello del Terreno II-4 per i Terreni I e II-8 e a quello del Terreno III per il Terreno IV. Dato che la durata sia delle prove in reometro che di quelle su piano inclinato è minore di tre minuti, i risultati sperimentali relativi Terreno II-4 (e di conseguenza quelli relativi ai Terreni I e II-8) non sono influenzati da effetti dovuti alla sedimentazione di tipo macroscopico. Il Terreno III, invece, mostra un comportamento differente: la sedimentazione di tipo macroscopico comincia prima che la miscela venga versata all'interno del contenitore (Figura IV.2). È possibile stimare la concentrazione solida

volumetrica del campione assumendo che essa si riduca di un'aliquota pari allo spostamento del fronte solido rispetto all'altezza del contenitore. Dopo tre minuti la variazione di concentrazione solida volumetrica all'interno del materiale al di sotto dell'interfaccia è cresciuta di un fattore dell'ordine di 1,1, il che costituisce una variazione molto significativa all'interno dell'intervallo di concentrazione solida volumetrica  $[\Phi_1-\Phi_2]$  considerato nel presente lavoro.

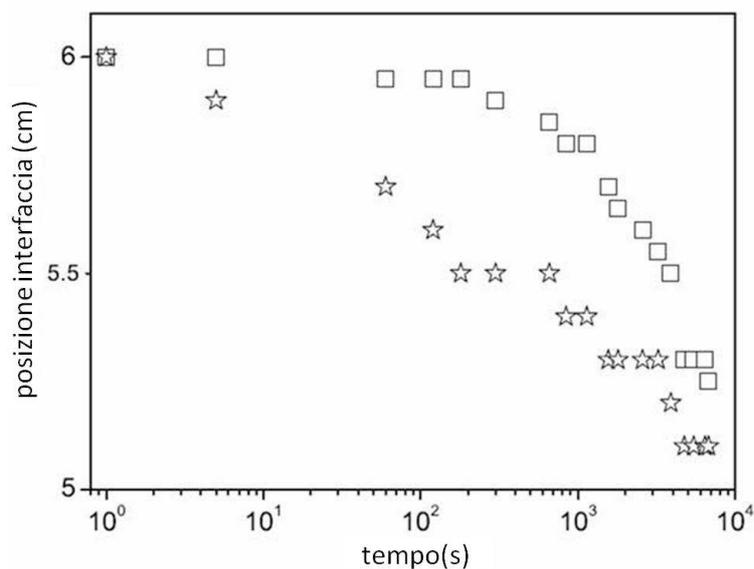


Figura IV.2 Sedimentazione nel materiale II-4 (rettangoli) e III (stelle): profondità di interfaccia tra l'acqua pura e la sospensione concentrata in funzione del tempo.

### IV.2.3 Curve di flusso

I risultati che tipicamente sono stati ricavati da una prova di flusso sui materiali analizzati sono mostrati in Figura IV.3. La curva di flusso è stata depurata dai punti relativi ai quei dati corrispondenti a basse velocità di deformazione al fine di evitare grandi incertezze sulle misure sperimentali. Durante l'applicazione della rampa crescente di tensione di taglio, si assiste alla definizione di un primo ramo della curva di flusso apparente, la cui inclinazione cresce rapidamente al crescere della velocità di deformazione, con una pendenza pari ad 1 circa (la parte di curva sul fondo sinistro di Figura

IV.3). Questa parte della curva di flusso non è rappresentativa del flusso del materiale nel suo regime liquido e la sua estensione varia in funzione della durata della rampa crescente di tensione: in queste condizioni la deformazione totale indotta nel materiale è molto bassa.

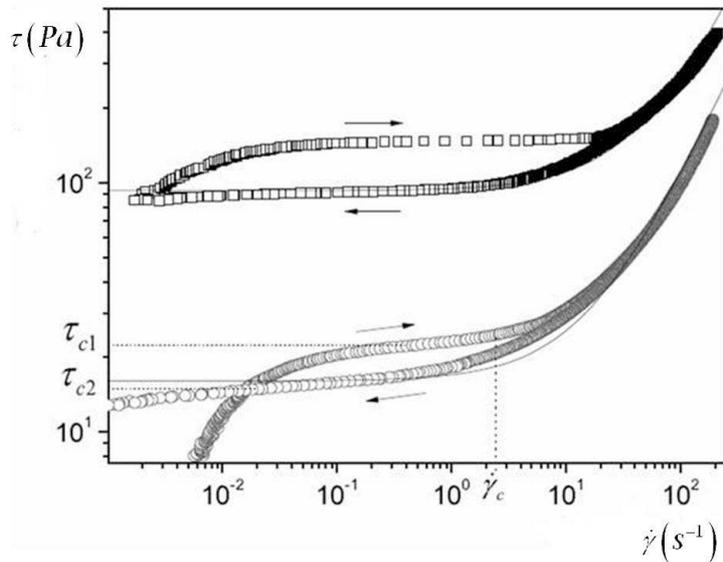


Figura IV.3 Prove di flusso condotte sul Terreno I [ $\Phi=38\%$  (cerchi) e  $\Phi=42\%$  (rettangoli)].

La parte restante della curva di flusso corrisponde al comportamento del materiale nel regime liquido: la transizione al regime liquido è associata con il rapido aumento della velocità di deformazione in corrispondenza di alcuni valori critici della tensione di taglio (che formano il cosiddetto “plateau” tensionale). Per alti valori tensionali, la pendenza della curva cresce (in scala logaritmica) e sembra approssimarsi ad una linea retta di pendenza pari ad 1. Il plateau così ottenuto in corrispondenza dell’aumento di tensione è associato alla cosiddetta tensione di soglia statica ( $\tau_{c1}$ ) del materiale. L’applicazione della rampa decrescente di tensione di taglio definisce un secondo ramo della curva di flusso che segue l’andamento di quello associato alla rampa di tensione crescente fino ad un certo valore della velocità di deformazione, ossia la velocità di deformazione critica  $\dot{\gamma}_c$ . Poi il ramo della curva di flusso associato alla rampa di tensione decrescente si sposta inferiormente al ramo

associato alla rampa di tensione crescente e segue approssimativamente un plateau tensionale fino all'arresto di flusso. Il ramo decrescente della curva di flusso, quindi, differisce significativamente dal ramo crescente: si verifica una isteresi. Questo andamento è maggiormente marcato per le concentrazioni volumetriche solide maggiori (Figura IV.4): la parte iniziale del plateau tensionale associato alla transizione solido-liquido è perfettamente orizzontale ed i rami crescente e decrescente della curva di flusso sono coincidenti solo in un intervallo di velocità di deformazione che ha come limite inferiore la fine del plateau.

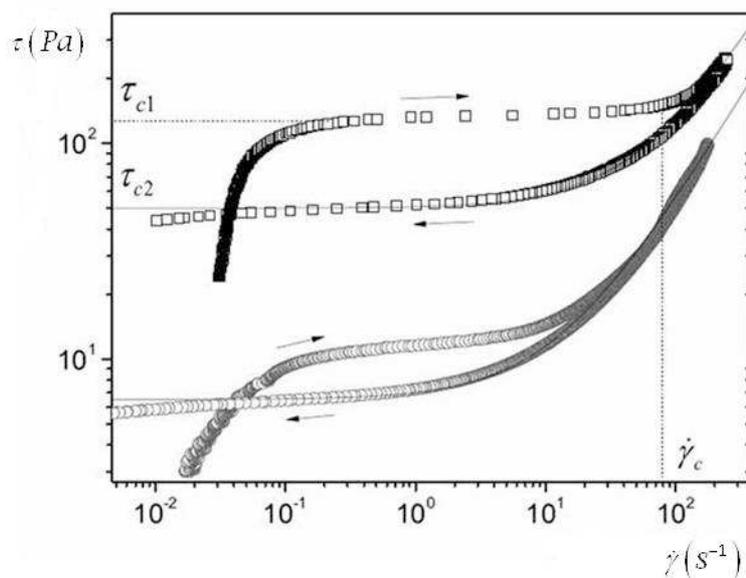


Figura IV.4 Prove di flusso condotte Terreno II-4 [ $\Phi=32\%$  (cerchi) e  $\Phi=38\%$  (rettangoli)].

Per concentrazioni solide volumetriche minori questa isteresi è meno evidente: i “plateaus” tensionali non sono orizzontali e il ramo crescente e decrescente della curva di flusso non si sovrappongono in maniera esatta nell'intervallo di valori di velocità di deformazione che corrispondono alla transizione al regime liquido del materiale. Ovviamente la stima della tensione statica di soglia ( $\tau_{c1}$ ) e di quella dinamica ( $\tau_{c2}$ ) risulta, in questo caso, più approssimata rispetto al caso di miscele aventi maggiori concentrazioni solide

volumetriche. Il metodo per stimare i valori della tensione di soglia statica, della tensione di soglia dinamica e della velocità di deformazione critica risulta quindi il seguente: la tensione di soglia statica è associata con il punto di inflessione nel ramo della curva di flusso associato alla rampa di tensione crescente; la tensione di taglio dinamica è calcolata nel punto dove il ramo della curva di flusso associato alla rampa di tensione decrescente tende al plateau prima di diminuire velocemente verso valori della velocità di deformazione molto piccoli. Le curve di flusso relative ad ogni Terreno analizzato sono riportate in Appendice B.

#### **IV.2.4 Tixotropia**

L'isteresi riscontrata nelle prove di flusso ricorda gli effetti tixotropici delle sospensioni colloidali: il materiale inizialmente è in uno stato "strutturato" associato ad un'apparente tensione di soglia ( $\tau_{c1}$ ); dopo il flusso, ad alte velocità, il materiale viene "destrutturato" e la sua tensione di soglia apparente in corrispondenza dell'arresto del flusso ( $\tau_{c2}$ ) è minore della tensione di soglia statica. Ipoteticamente, per le prove eseguite nel presente lavoro, anche in assenza di un tempo di riposo, dopo l'applicazione della pre-tensione, il tempo necessario all'aumento della tensione da 0,1Pa al valore della tensione di soglia statica (tra i 30 ed i 60 secondi a seconda del materiale) consentirebbe la re-strutturazione del materiale nel suo regime solido.

Al fine di chiarire questo aspetto sono state condotte alcune prove di flusso sui materiali selezionati a differenti tempi di riposo (intendendo per tempo di riposo il tempo intercorrente tra la fine della pre-tensione applicata al provino e l'inizio della prova di flusso). L'impatto sulla tensione di soglia statica di un tempo di riposo superiore ai 300 secondi per i Terreni I e II-4 è trascurabile: considerando l'incertezza sulle misure (tipicamente del 10%) non si ha un apprezzabile cambiamento della tensione di soglia statica al variare del tempo di riposo. Questo risultato è, ovviamente, in contraddizione con l'usuale carattere tixotropico, il quale, di base, implica un incremento della tensione di soglia statica all'aumentare del tempo di riposo. Per i Terreni I e II-4 l'isteresi osservata durante le prove di flusso non è, dunque, legata ad effetti di tipo tixotropico.

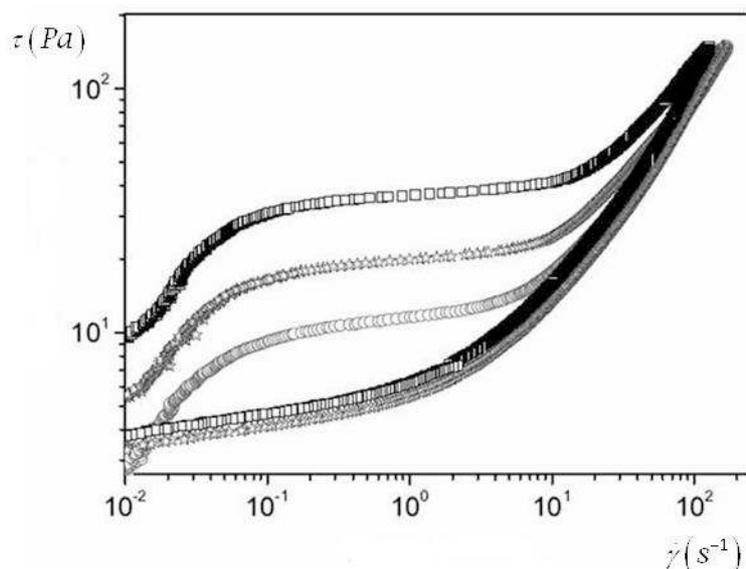


Figura IV.5 Curve flusso apparenti per il materiale C ottenute considerando differenti tempi di riposo a seguito dell'applicazione di una pre-tensione: 5s (cerchi), 300s (stelle), 1200s (rettangoli).

Il Terreno III, invece, per ogni concentrazione solida volumetrica testata nell'intervallo  $[\Phi_1-\Phi_2]$ , presenta una variazione significativa della tensione di soglia statica al variare del tempo di riposo (Figura IV.5), mentre il ramo della curva di flusso associato alla rampa di tensione decrescente è indipendente dal tempo di riposo. Questo andamento è pienamente coerente con un comportamento di tipo tixotropico: andamenti qualitativamente simili sono stati osservati, ad esempio, con materiali tixotropici ben noti come le sospensioni di bentonite (Coussot, 2005). Tuttavia, considerando il fatto che per questo materiale la sedimentazione è significativa in un tempo di pochi minuti, si ritiene che questo comportamento sia dovuto alla presenza della sedimentazione di tipo macroscopico: all'aumentare del tempo di riposo il materiale diventa più concentrato sul fondo del contenitore e esibisce una resistenza globale maggiore; durante il flusso ad alti valori di velocità di deformazione, il materiale depositatosi sul fondo viene riportato in sospensione (ossia le particelle solide sono disperse nuovamente in maniera omogenea).

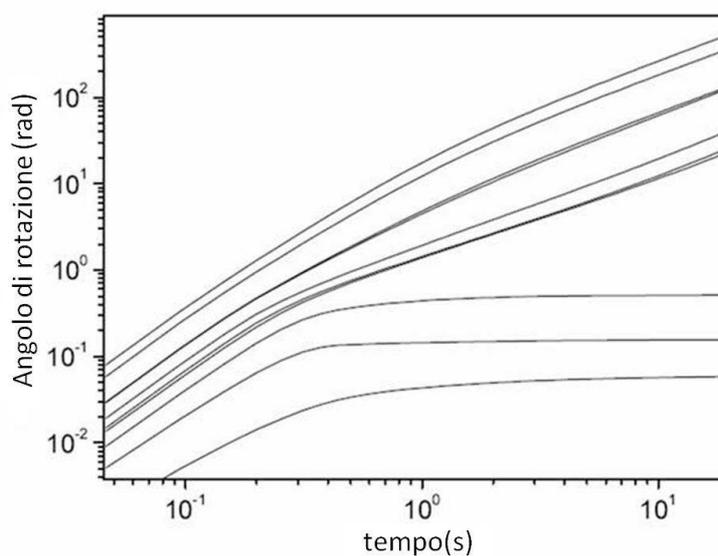
### IV.2.5 Prove di creep

Gli effetti isteretici osservati per i Terreni I e II nel contesto delle prove effettuate per il presente lavoro sono in qualche modo relazionabili con le caratteristiche particellari delle miscele analizzate, le quali contribuiscono al verificarsi della sedimentazione di tipo macroscopico.

Il recente lavoro di Fall et al (2009) sul comportamento di un modello di sospensione granulare concentrata, che esibisce caratteristiche simili a quelle riscontrate con i materiali analizzati, sostiene che potrebbero verificarsi degli effetti dovuti ad una “sedimentazione locale” che si verifica in breve tempo e che, diversamente da quanto accade per la sedimentazione di tipo macroscopico, non provoca eterogeneità di densità. Infatti, a causa della forza di gravità, le particelle più dense del liquido interstiziale possono entrare in contatto e anche “serrarsi” (jam) localmente dopo brevi spostamenti dell’ordine della dimensione delle particelle stesse. Gli autori, studiando le caratteristiche del flusso all’interno del campione, mostrano che queste sospensioni esibiscono una velocità di deformazione critica al di sotto della quale non sono in grado di fluire in maniera stabile e, di conseguenza, nei campioni si verifica una localizzazione dello sforzo di taglio (shear-banding) allorché viene imposta una velocità di deformazione apparente minore di quella critica  $\dot{\gamma}_c$  (Ovarlez et al., 2009).

I materiali analizzati nel presente lavoro hanno un comportamento simile a quello descritto sopra: la tensione di soglia statica corrisponde alla tensione di taglio necessaria a “distruggere” la struttura che è sedimentata localmente, dopo di che la sospensione dispersa comincia a fluire più facilmente. Coerentemente con questa spiegazione, lungo il plateau tensionale associato alla tensione di soglia statica, il materiale viene sottoposto localmente ad uno sforzo di taglio e comincia a fluire in maniera omogenea solamente al di sopra di un valore critico di velocità di deformazione che coincide con il punto finale del plateau stesso. La suddetta trattazione del problema risulta maggiormente approssimata per le miscele aventi concentrazioni solide volumetriche basse, per le quali la presenza dei plateaus è meno marcata. La spiegazione fornita da Fall et al. (2009) risulta coerente con i dati sperimentali ricavati attraverso le prove di creep eseguite sui materiali selezionati. Per valori tensionali minori di quelli critici le curve deformazione-tempo rimangono concave, con una pendenza che decresce in maniera continua nel

tempo in scala logaritmica e mostrano un apparente asintoto orizzontale. La deformazione è limitata, la velocità di deformazione istantanea decresce con continuità e non viene raggiunto uno stato di equilibrio. Infine, il materiale apparentemente si arresta. Questo corrisponderebbe al regime solido per i materiali analizzati. Per valori tensionali maggiori dei valori critici, invece, la pendenza iniziale delle curve è simile a quella osservata per valori di tensione minori ma, dopo un certo tempo, vi è un punto d'inflexione e le curve tendono ad una linea retta inclinata con pendenza pari ad 1. La deformazione cresce costantemente, la velocità di deformazione apparente è costante e viene raggiunto lo stato di equilibrio. Questo corrisponderebbe al regime liquido dei materiali analizzati così come tipicamente osservato per i fluidi dotati di tensione di soglia (Coussot et al., 2006). La transizione dal regime solido a quello liquido è brusca (Figura IV.6): per tensioni di taglio appena superiori alla tensione di soglia, il materiale attinge rapidamente un alto livello di velocità di deformazione (tipicamente maggiore di  $1\text{s}^{-1}$ ).



*Figura IV.6 Prove di creep relative al Terreno III ( $\Phi=40\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 1, 3, 5, 7, 8, 10, 15, 20, 30, 40 Pa.*

Probabilmente alcuni di questi effetti sono dovuti a quella che viene chiamata “biforcazione della viscosità” associata ancora una volta a quel valore critico della velocità di deformazione al di sotto del quale non è possibile osservare un flusso stazionario, così come già riscontrato per i materiali colloidali tixotropici (Coussot et al., 2002). La velocità di deformazione critica potrebbe dipendere dalla storia di flusso a cui è stato sottoposto il materiale, che potrebbe spiegare la lieve differenza tra il valore dedotto tramite la curva di Figura IV.6 e quello misurato attraverso le prove di flusso condotte. Il flusso dei materiali analizzati è, quindi, instabile: imprimendo una tensione di taglio quando i campioni sono a riposo, non si ha flusso fino a quando non viene raggiunta la tensione di soglia statica e valori di velocità di deformazione maggiori di quello critico. Al decrescere progressivo della tensione di taglio, i materiali analizzati continuano ancora a fluire fino a quando viene raggiunta la tensione di soglia dinamica. Questo tipologia di comportamento è in contrasto con quella esibita dai fluidi dotati di tensione di soglia (la tensione di soglia statica e quella dinamica coincidono solitamente) per i quali si ha un regolare incremento della velocità di deformazione al crescere del livello tensionale al di sopra della tensione di soglia ed un arresto del flusso non appena la tensione applicata è minore della tensione di soglia stessa. I risultati delle prove di creep relative ad ogni Terreno analizzato sono riportati in Appendice B.

#### ***IV.2.6 Influenza della concentrazione solida volumetrica***

Uno degli aspetti più interessanti relativi alla presente sperimentazione è stato la variazione del comportamento dei materiali analizzati al variare della concentrazione solida volumetrica. In Figura IV.7 viene mostrata l'evoluzione della tensione di soglia statica e di quella dinamica in funzione della concentrazione solida volumetrica. Indipendentemente dal materiale considerato, la tensione di soglia statica e quella dinamica crescono, con un andamento del tutto simile, al crescere della concentrazione solida: i due gruppi di dati sono identici se scalati di un fattore costante (variabile tra 1,4 e 2). La linea retta in Figura IV.7, che segue approssimativamente l'incremento dei diversi parametri con la concentrazione solida è pressoché identica. La tensione di soglia cresce di due ordini di grandezza studiando il ristretto intervallo di concentrazioni solide volumetriche considerato (minore del

10%), all'interno del quale le miscele acqua-sedimento analizzate si comportano come fluidi omogenei. Questo aspetto garantisce definitivamente la continuità di comportamento nell'intervallo di concentrazioni solide volumetriche (al di sotto di  $\Phi_1$ ) in cui i materiali si comportano apparentemente come fluidi semplici (subito dopo l'omogeneizzazione) e nell'intervallo di concentrazioni solide volumetriche (al di sopra di  $\Phi_2$ ) nel quale le miscele acqua-sedimento analizzate si comportano come solidi.

La velocità di deformazione critica cresce in maniera simile alla tensione di soglia: all'aumentare della concentrazione solida volumetrica, la resistenza del materiale cresce e la sua velocità apparente, quando il materiale comincia a fluire, cresce in maniera proporzionale.

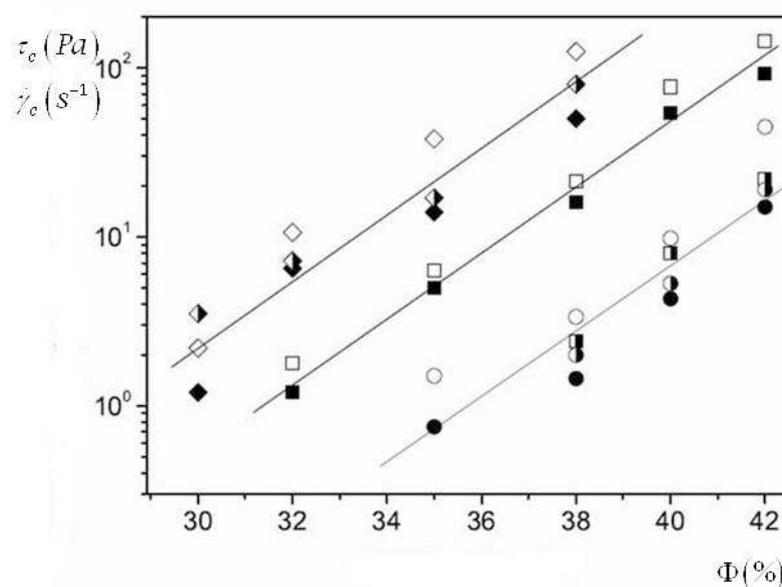


Figura IV.7 Caratteristiche reologiche del Terreno I (rettangoli), del Terreno II-4 (rombi) e del Terreno III (cerchi) in funzione della concentrazione solida volumetrica: tensione di soglia statica (simboli vuoti), tensione di soglia dinamica (simboli pieni) velocità di deformazione critica (simboli semipieni). La linea retta funge da guida.

#### IV.2.7 Modellazione dei dati sperimentali

Solitamente per i fluidi dotati di tensione di soglia il modello teorico di Herschel & Bulkley risulta quello più appropriato a descrivere la curva di flusso sperimentale nel ramo associato alla rampa crescente di tensione. Sebbene nel presente lavoro questo modello sia stato applicato con successo ai dati sperimentali (in Appendice B sono riportati i parametri del modello per ogni Terreno e ad ogni concentrazione solida volumetrica considerata), tuttavia, dato che le curve di flusso ottenute per alti valori di velocità di deformazione sembrano tendere ad una linea retta di pendenza pari ad 1 (comportamento tipo quello di un fluido Newtoniano), è parso interessante, e anche appropriato, semplificare il problema di modellazione dei dati sperimentali applicando il modello di Bingham al ramo decrescente delle curve di flusso. Anche se, talvolta, l'applicazione del modello di Bingham ai dati sperimentali non è stata perfetta, si è preferito utilizzarla in quanto questa modellazione ha il grande pregio di avere un solo parametro reologico nuovo (la viscosità di Bingham  $\mu_B$ ).

Per tutti i materiali analizzati, la viscosità di Bingham cresce al crescere della concentrazione solida volumetrica all'interno dell'intervallo di frazione solida in cui le miscele acqua-sedimento analizzate si comportano come fluidi: i dati si dispongono lungo una linea retta se la viscosità di Bingham viene diagrammata in funzione della concentrazione solida volumetrica scalata dal valore inferiore dell'intervallo di concentrazioni solide volumetriche considerate (Figura IV.8).

La tensione è il risultato di un termine legato alla presenza della soglia e di un termine semplicemente dato dalla viscosità: vi è, dunque, una sorta di liquefazione del materiale al di sopra della tensione di soglia, così che il termine viscoso risulta essenzialmente dal flusso di taglio della sospensione Newtoniana concentrata. Allo stato attuale della ricerca, non è possibile fornire una spiegazione precisa circa la variazione della viscosità di Bingham in funzione della concentrazione solida volumetrica. Tale variazione, infatti, dipende fortemente dalla configurazione delle particelle all'interno della sospensione granulare in scorrimento.

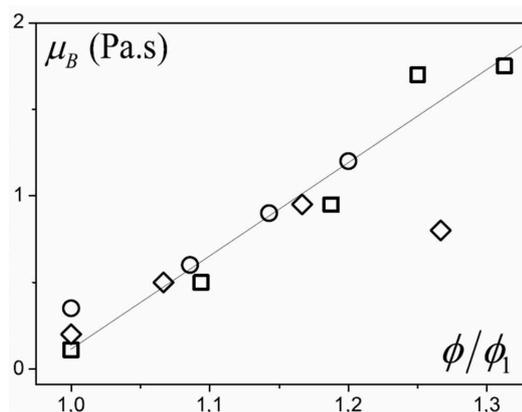


Figura IV.8 Viscosità di Bingham in funzione del rapporto tra la concentrazione solida volumetrica e il limite inferiore dell'intervallo di concentrazioni solide nel quale le miscele si comportano come dei fluidi: Terreno I (rettangoli), Terreno II-4 (rombi) e Terreno III (cerchi).

### IV.3 RISULTATI SPRIIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE SU PIANO INCLINATO

Per il Terreno III durante le prove si è verificata una sedimentazione significativa e quindi i dati corrispondenti alle prove effettuate con questo materiale vengono omessi in quanto, nelle condizioni sperimentali considerate, il materiale è apparentemente incapace di fluire come un liquido sul piano inclinato.

In Figura IV.9 viene mostrata l'evoluzione della tensione di soglia statica e di quella dinamica in funzione della concentrazione solida volumetrica. Indipendentemente dal materiale considerato, la tensione di soglia statica e quella dinamica crescono, con un andamento del tutto simile, al crescere della concentrazione solida. La linea retta in Figura IV.9, che segue approssimativamente l'incremento dei diversi parametri con la concentrazione solida, è pressoché identica. La tensione di soglia cresce di due ordini di grandezza studiando il ristretto intervallo di concentrazioni solide volumetriche considerato (minore del 10%) all'interno del quale le miscele acqua-sedimento analizzate si comportano come fluidi omogenei. Inoltre si osserva che la tensione di soglia statica è sempre maggiore della tensione di

soglia dinamica e che tale differenza è più marcata per le miscele aventi concentrazione solida volumetrica maggiore. Quest'aspetto garantisce ancora una volta la continuità di comportamento nell'intervallo di concentrazioni solide volumetriche (di sotto a  $\Phi_1$ ) in cui i materiali si comportano apparentemente come fluidi semplici (subito dopo l'omogeneizzazione) e nell'intervallo di concentrazioni solide volumetriche (sopra  $\Phi_2$ ) nel quale le miscele acqua-sedimento analizzate si comportano come solidi.

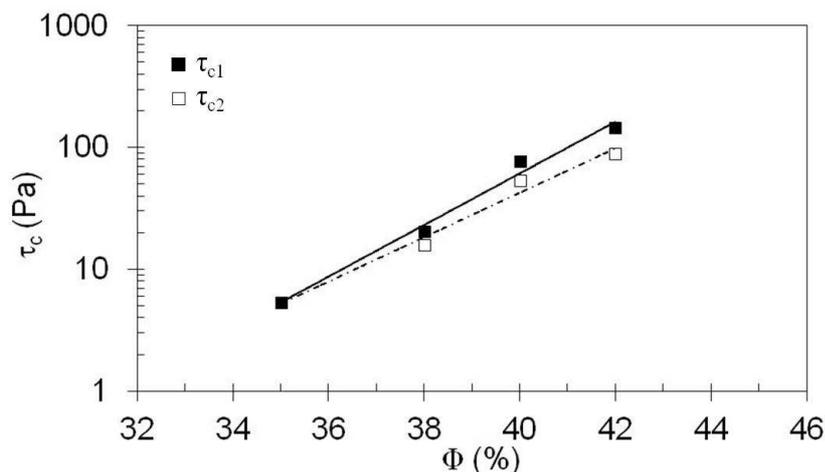


Figura IV.9 Caratteristiche reologiche del Terreno I in funzione della concentrazione solida volumetrica: tensione di soglia statica (simboli pieni) e tensione di soglia dinamica (simboli vuoti).

#### IV.4 RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE CON IL PENETROMETRO A CONO

Le prove mediante penetrometro a cono sono state eseguite sul Terreno II-4 ( $\Phi=32\%$ ), sul Terreno III ( $\Phi=40\%$ ), sul Terreno IV(D3ALTO) ( $\Phi=38\%$  e  $49\%$ ) e sul Terreno V ( $\Phi=35\%$ ), con contenuto di solido pari al  $35\%$ . Dato che le resistenze di soglia attese per i due materiali hanno valore inferiore a  $0,07-1,2\text{kPa}$  è stato usato il cono da  $10\text{g}$ .

Per il Terreno II-4 ( $\Phi=32\%$ ) sono stati ottenuti valori piuttosto bassi della tensione di soglia, infatti in tutte le prove si è avuto un affondamento del cono di 21mm da cui:

$$c_u \leq \frac{9,8 \cdot k \cdot M}{d^2} = \frac{9,8 \cdot 0,3 \cdot 10}{21^2} = 0,067kPa = 67Pa$$

Anche per il Terreno III ( $\Phi=40\%$ ) sono stati ottenuti valori piuttosto bassi della tensione di soglia, infatti in tutte le prove si è avuto un affondamento del cono di 17 mm da cui:

$$c_u \leq \frac{9,8 \cdot k \cdot M}{d^2} = \frac{9,8 \cdot 0,3 \cdot 10}{17^2} = 0,102kPa = 102Pa$$

Per il Terreno IV(D3ALTO) ( $\Phi=35\%$ ) sono stati ottenuti valori piuttosto bassi della tensione di soglia, infatti in tutte le prove si è avuto un affondamento del cono di 20mm da cui:

$$c_u \leq \frac{9,8 \cdot k \cdot M}{d^2} = \frac{9,8 \cdot 0,3 \cdot 10}{20^2} = 0,0735kPa = 73,5Pa$$

Per il Terreno IV(D3ALTO) alla concentrazione solida volumetrica  $\Phi$  pari a 49% si è ottenuto un valore della penetrazione media di 17mm da cui:

$$c_u = \frac{9,8 \cdot k \cdot M}{d^2} = \frac{9,8 \cdot 0,3 \cdot 10}{17^2} = 0,102kPa = 102Pa$$

Per questi terreni, il penetrometro non dà una misura precisa della forza resistente di soglia. Probabilmente la prova è fortemente influenzata dalla rapida separazione della fase solida da quella liquida rispetto ai tempi di esecuzione delle prove. Per il caolino la prova con penetrometro ha dato risultati più attendibili, avendo a disposizione una miscela omogenea che non risente particolarmente del problema della sedimentazione. La prova è stata ripetuta dieci volte in modo da ottenere una serie di misure della penetrazione che fossero statisticamente significativa, ottenendo un valore medio della penetrazione di circa 13 mm. La resistenza di soglia del caolino vale:

$$c_u = \frac{9,8 \cdot k \cdot M}{d^2} = \frac{9,8 \cdot 0,3 \cdot 10}{12,65^2} = 0,174 \text{ kPa} = 174 \text{ Pa}.$$

#### IV.5 CONFRONTO TRA I RISULTATI SPERIMENTALI OTTENUTI CON I DIFFERENTI SISTEMI DI MISURA

I terreni analizzati nel presente lavoro, sebbene provengano tutti dai rilievi dell'Appennino campano, presentano caratteristiche differenti in quanto a composizione granulometrica, natura delle particelle e substrato. A tal fine sembra interessante mettere a confronto le curve di flusso della totalità dei materiali campionati, a parità di concentrazione solida volumetrica.

In Figura IV.10 è riportato tale confronto per le miscele avente concentrazione solida volumetrica totale pari a 35% e contenenti la frazione solida con particelle di diametro inferiore a 0,5mm.

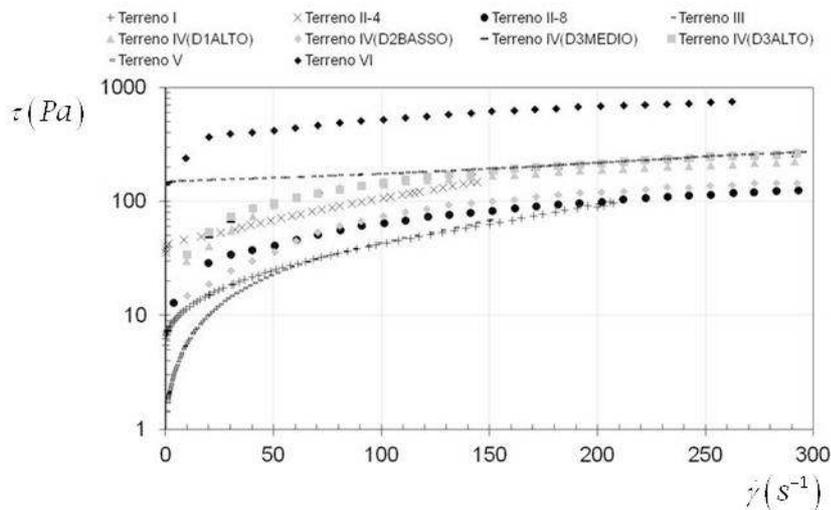


Figura IV.10 Curve di flusso di tutti i Terreni analizzati a parità di concentrazione solida volumetrica ( $\Phi=35\%$ ).

In tale diagramma si nota una netta differenza quantitativa tra le curve di flusso dei Terreni V e VI e quelle dei rimanenti materiali. Tali Terreni, il caolino e l'argilla vari colore, sono molto ricco in argilla rispetto ai rimanenti terreni piroclastici, i quali presentano una porzione argillosa solitamente molto

ridotta e talvolta addirittura del tutto assente. Si nota, infatti, che i Terreni V e VI presentano valori della tensione di soglia notevolmente superiori a tutti gli altri materiali. La tensione di soglia dei Terreni V e VI è di circa un ordine di grandezza maggiore di quella misurata per gli altri terreni analizzati.

In Figura IV.11, invece, è riportato il confronto tra le curve di flusso dei soli terreni piroclastici, a parità di concentrazione solida volumetrica totale pari a 35% e contenenti la frazione solida con particelle di diametro inferiore a 0,5mm. Si osserva che le miscele acqua-sedimento analizzate presentano curve di flusso molto prossime tra di loro, con valori della tensione di soglia piuttosto bassi (1-70Pa) e un comportamento identico da un punto di vista qualitativo: ogni miscela analizzata si comporta come un fluido non Newtoniano dotato di soglia.

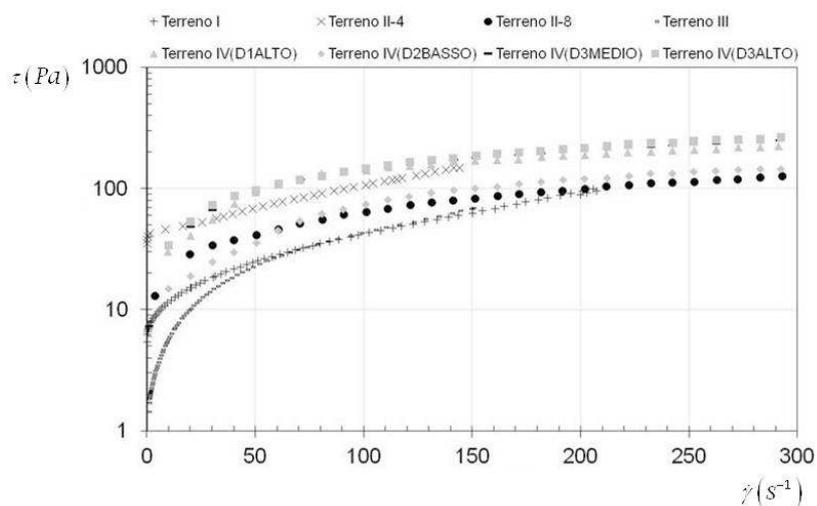


Figura IV.11 Curve di flusso di soli Terreni piroclastici analizzati a parità di concentrazione solida volumetrica ( $\Phi=35\%$ ).

Le miscele acqua-sedimento analizzate nel presente lavoro, come già ampiamente detto, sono fluidi dotati di una certa tensione di soglia. Tale valore dello sforzo di taglio, che si ha in corrispondenza di bassi valori della velocità di deformazione, è molto importante perché determina il passaggio del materiale da un comportamento tipicamente da solido verso un comportamento da fluido in determinate condizioni e viceversa. La sperimentazione eseguita in reometro rotazionale ha evidenziato che i Terreni

piroclastici campani presentano valori della tensione di soglia molto piccoli, a volte addirittura inferiori all'unità (ad esempio il Terreno III). Dal momento che è molto difficile studiare il comportamento reologico di tali miscele alle basse velocità di rotazione con i reometri utilizzati, le prove condotte su piano inclinato e con il penetrometro a cono sono stati degli utili strumenti per verificare la reale esistenza della tensione di soglia e darne una stima quantitativa. Purtroppo non è stato possibile effettuare misure con il penetrometro su tutti i materiali analizzati in quanto i tempi di esecuzione della prova influiscono in maniera significativa sui risultati a causa di effetti dovuti alla sedimentazione osservata nei campioni. Sebbene in numero ridotto, le prove condotte mediante il penetrometro a cono confermano sostanzialmente quanto evidenziato con le analisi reometriche, ossia che le miscele acqua-sedimento analizzate sono dotate di un valore critico di tensione superato il quale il materiale comincia a fluire. Inoltre dalle prove eseguite con il Terreno IV(D3ALTO) per due valori della concentrazione solida volumetrica, si osserva una crescita della resistenza al crescere della concentrazione solida volumetrica ( $c_u=73,5\text{Pa}$  per  $\Phi=35\%$  e  $c_u=102\text{Pa}$  per  $\Phi=49\%$ ). In Figura IV.12 viene riportato il confronto tra i dati sperimentali ottenuti dalle prove con il penetrometro a cono con i dati sperimentali ottenuti attraverso le prove di flusso in reometro in termini di tensione di soglia statica. Si evince che il i valori misurati mediante il penetrometro a cono sono maggiori di quelli calcolati con il reometro e che tale differenza è più marcata per i Terreni piroclastici rispetto al Terreno VI.

In Figura IV.13 viene riportato il confronto tra i dati sperimentali ottenuti dalle prove su piano inclinato con i dati sperimentali ottenuti attraverso le prove di flusso in reometro in termini di tensione di soglia statica e dinamica. In prima approssimazione, i dati ottenuti con le due tecniche sono in accordo: i valori misurati si trovano globalmente sulla medesima linea. Tuttavia i dati ottenuti attraverso le prove su piano inclinato si trovano mediamente al di sopra dei dati ottenuti attraverso le prove in reometro di un fattore di circa 1,4. Le prove effettuate sul piano inclinato sovrastimano i valori di tensione di soglia, che, comunque variano sempre allo stesso modo al variare della concentrazione solida volumetrica.

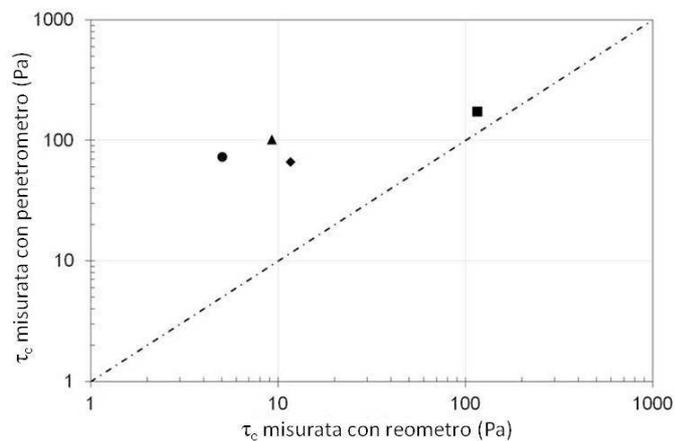


Figura IV.12 Resistenze di soglia ottenute con la prove effettuate con il penetrometro a cono in funzione dei corrispondenti valori misurati attraverso le prove in reometro per il Terreno II-4  $\Phi=32\%$  (rombi), il Terreno III  $\Phi=40\%$  ( triangoli), il Terreno IV(D3ALTO)  $\Phi=35\%$  (cerchi) ed il Terreno VI  $\Phi=35\%$  ( rettangoli).

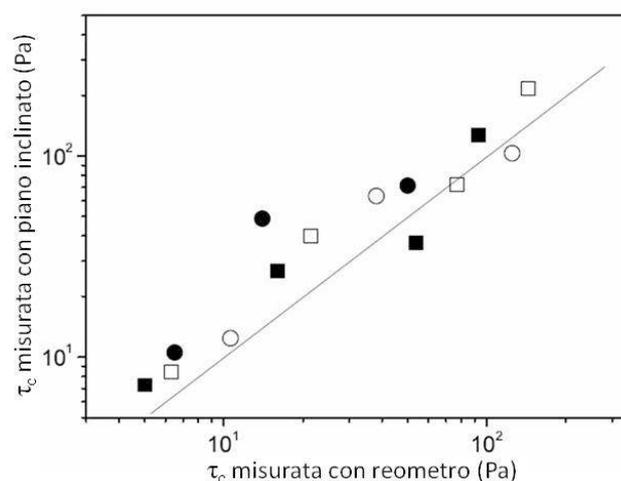


Figura IV.13 Tensione di soglia statica (simboli vuoti) e dinamica (simboli pieni) ottenute con la prove su piano inclinato in funzione dei corrispondenti valori misurati attraverso le prove in reometro per il Terreno I (rettangoli) ed il Terreno II-4 (cerchi).



---

## *Capitolo V*

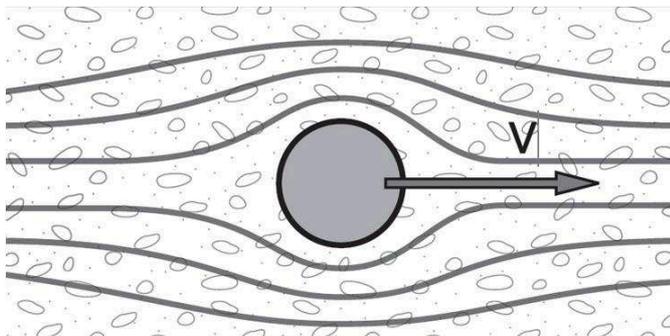
# Progettazione, realizzazione e collaudo di un reometro innovativo per fanghi a grana grossa

## **V.1 INTRODUZIONE**

Il comportamento reologico delle miscele acqua-sedimento è fortemente condizionato dal contenuto in argilla del terreno (e quindi dalla concentrazione solida volumetrica della miscela) e dall'assortimento granulometrico. L'effetto della variazione del contenuto solido sui parametri reologici di miscele a granulometria fine viene facilmente valutato attraverso prove in reometro convenzionale. Lo studio dell'influenza dell'assortimento granulometrico necessita, invece, di apparecchiature appositamente costruite e dotate di configurazioni geometriche di grandi dimensioni. I materiali piroclastici campani utilizzati nel presente lavoro presentano una granulometria variamente assortita ed un contenuto di particelle fini molto ridotto e talvolta addirittura assente. Per la definizione, quindi, del comportamento reologico di tali materiali diventa di fondamentale importanza la disponibilità di sistemi di misura non tradizionali che consentano di analizzare anche miscele a granulometria grossolana. Al fine, quindi, di poter stimare le proprietà reologiche dei terreni considerando l'intera curva granulometrica, obiettivo dell'attività di ricerca della scrivente è stata la progettazione, la realizzazione ed il collaudo di un reometro innovativo per fanghi a grana grossa, ossia il reometro a trascinamento di sfera SDR (Sphere Drag Rheometer). L'attività di progettazione e realizzazione del reometro si è

avvalsa della collaborazione di una ditta altamente qualificata e specializzata in sistemi elettronici ed elettromeccanici, la Megaris S.r.l..

Il reometro a trascinamento di sfera SDR (Sphere Drag Rheometer) è un'apparecchiatura del tutto innovativa che consente di effettuare prove di flusso su miscele acqua-terreno di volumi e concentrazioni solide diverse da quelle solitamente utilizzabili con le classiche macchine reometriche. I principi di progettazione del reometro SDR sono stati ispirati dalla modifica di un reometro tradizione attraverso l'impiego di una configurazione geometrica sviluppata da Müller (Müller et al., 1999) e messa a punto da Schatzmann (2005). L'originalità del reometro in oggetto riguarda sia il telaio di base (ovvero l'apparato di trascinamento) che la parte elettronica (ovvero il sistema di misura della resistenza al moto). Tale sistema di misura è composto da una sfera, solidale ad un supporto, che viene fatta muovere, ad una specifica velocità, all'interno di un campione di materiale (Figura V.1). Assegnata la velocità di rotazione, viene quindi misurata la forza di trascinamento necessaria affinché la sfera si muova attraverso il fluido.



*Figura V.1 Schema semplificato del funzionamento del reometro SDR (da Schatzmann, 2005)*

La differenza principale tra il reometro SDR ed i reometri convenzionali e non (§§ I.5.1, I.5.2) è che il sistema di misura adottato non si basa più sul classico flusso di taglio tra due superfici (§ I.2) ma sul regime di flusso che si instaura attorno alla sfera durante il suo movimento. Per questo motivo è molto importante la definizione di una appropriata teoria di conversione che consenta di mettere in relazione i due regimi di flusso.

Nel presente capitolo vengono descritte le caratteristiche del reometro a trascinamento di sfera SDR, illustrate le procedure di prova e presentata la teoria di conversione usata per esprimere i dati misurati come parametri reologici. Infine viene illustrata la fase di messa a punto del reometro innovativo SDR con materiali Newtoniani e non Newtoniani.

## V.2 CARATTERISTICHE DELL'APPARECCHIATURA

Il reometro a trascinamento di sfera SDR (Figura V.2) consta di una parte meccanica che comprende i componenti essenziali per il funzionamento dell'apparecchiatura, di un telemetro per la trasmissione del segnale della cella di carico rotante, di un box contenente l'elettronica di controllo della velocità, della ricezione e dell'acquisizione dei segnali, collegato ad un computer per mezzo di un'interfaccia elettrica standard RS232 e di un software di acquisizione e controllo della prova.



*Figura V.2 Componenti principali del reometro a trascinamento di sfera SDR.*

La configurazione geometrica del reometro SDR, schematicamente illustrata in Figura V.3, è composta da un contenitore cilindrico all'interno del quale viene posto il materiale da sottoporre a prova, di diametro pari a 130mm

e altezza pari a 60mm (di capacità pari a circa 0,5litri) e da una sfera rotante eccentrica di diametro noto fissata ad un'astina metallica molto sottile, che si muove all'interno del fluido ad un'assegnata velocità di rotazione.

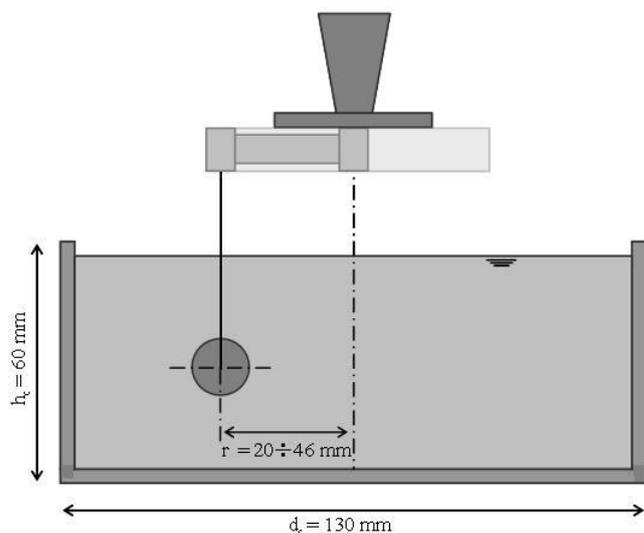
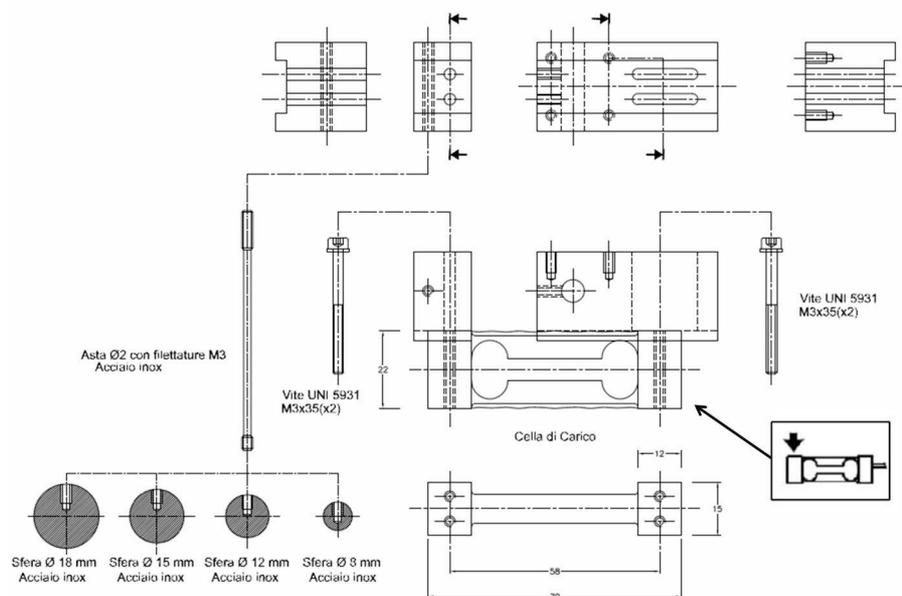


Figura V.3 Schematizzazione geometrica del reometro a trascinamento di sfera SDR (Sphere Drag Rheometer)

La parte meccanica del sistema, alimentata per mezzo di un motoriduttore veloce, è stata progettata in modo tale da consentire l'esecuzione delle prove in diverse configurazioni (Figura V.4), ossia variando l'eccentricità del corpo rotante rispetto all'asse del motore fra 20 e 46mm, cambiando le dimensioni del corpo rotante (infatti l'apparecchiatura è dotata di sfere aventi differenti diametri e nello specifico di quattro sfere di diametro pari rispettivamente a 8, 12, 15 e 18 mm) e variando la sensibilità del sensore di forza a seconda che venga usata la cella di carico con fondo scala (FS) da 250g o quella con FS da 1000g. I sensori di forza (celle di carico Laumas) adoperati (Figura V.4) sono trasduttori di forza di classe 0,03% con alimentazione massima di 10Vdc, sensibilità nominale di mV/V (1mV/V per la cella da 250g), sovraccarico massimo del 150% e sovraccarico statico massimo del 200%. L'apparecchiatura dispone, inoltre, di un sensore magnetico (reed) che indica, durante l'esecuzione delle prove, la posizione del motore e, quindi, del corpo rotante all'interno del materiale investigato.



*Figura V.4 Principali componenti e configurazioni del reometro a trascinamento di sfera SDR*

La parte elettronica del reometro SDR è contenuta all'interno di un telemetro posizionato posteriormente al sensore di forza (Figura V.2.2). Il telemetro utilizzato è costituito da un piccolo box plastico con batteria ricaricabile. Esso è in grado di condizionare la cella di carico e inviare telemetricamente ed in tempo reale il segnale di carico rilevato dalla cella. Il telemetro opera con un'alimentazione primaria a 2,4Volt della batteria che viene convertita in una tensione di alimentazione interna di 12Volt ed in una tensione di riferimento per la cella di carico di 4,9Volt. Il segnale a basso livello della cella di carico viene poi amplificato di cinquecento volte e presentato ad un VCO che opera nell'intervallo fra 1 e 3kHz. Il segnale così modulato in FM pilota il trasmettitore a 320MHz.

Il box di controllo e acquisizione dei dati (Figura V.2.2) incorpora le schede principali di progettazione e produzione e, nello specifico, un'unità di alimentazione modello PS1, una scheda di controllo e acquisizione DSB modificata, un ricevitore telemetrico custom RX08, un regolatore della velocità del motore ed un telemetro TX08. Il box è incluso in una console con

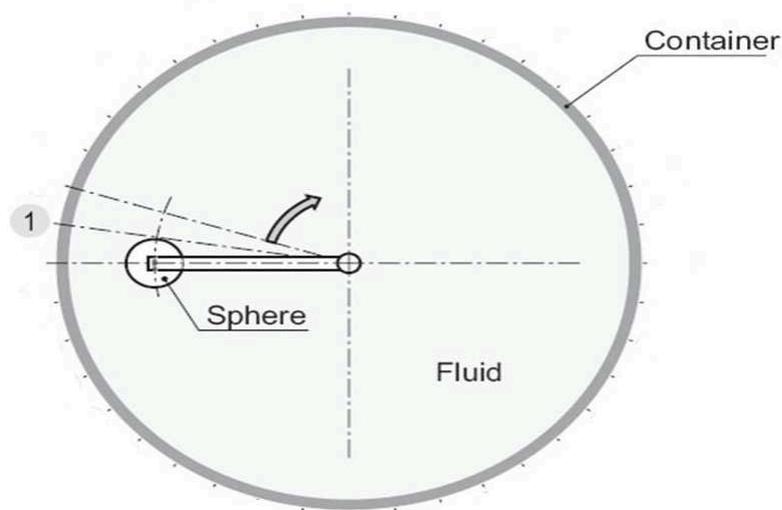
pannello metallico e consente il comando dei motori e la lettura dei sensori con connessione diretta al computer. Nel box sono inclusi un alimentatore da rete, una scheda di acquisizione e controllo a microprocessore, una scheda di ricezione dal telemetro ed una scheda di comando del motore. Sul pannello principale del box sono presenti un interruttore luminoso di alimentazione generale da rete, un led verde di indicazione della presenza dell'alimentazione a 5Volt, un led rosso di segnalazione della comunicazione in atto con il computer ed un potenziometro multigiro con indicatore cinquantiesimale per la regolazione della velocità del motore. Mentre sul retro del box sono presenti un passacavo per la rete a 230Vac (assorbimento massimo 30VA), un connettore a otto poli per il collegamento del motore, un connettore ausiliario a cinque poli ed un connettore D9 per il collegamento al PC.

L'ambiente software utilizzato per lo sviluppo dell'applicazione di controllo della macchina è LabWindows CVI (National Instruments). Il software, chiamato SMV\_V1, è stato adattato secondo le esigenze specifiche delle misurazioni e permette l'esecuzione delle prove, la gestione del sistema e l'acquisizione dei segnali. I dati acquisiti sono disponibili per una visualizzazione immediata e memorizzati per ulteriori elaborazioni. Con il software sviluppato è possibile gestire l'intera prova controllando l'attivazione del motore, indicare il valore della velocità e del periodo di rotazione da imprimere al campione, di acquisire il segnale telemetrico diagrammandolo in funzione del tempo, di salvare a diverse frequenze di campionamento i files di prova in formato ASCII separato da tabulazione e importabile in Excel. Il software SMV\_V1 visualizza all'avvio un pannello principale attraverso il quale è possibile configurare in maniera completa le prove, indicando i parametri che caratterizzano l'analisi e gli indicatori delle grandezze rilevate fra cui la velocità di rotazione in rps ed in radianti al secondo, il periodo di rotazione in secondi, la tensione letta sulla cella di carico in volt ed il carico calibrato in grammi sulla specifica cella prescelta.

In Appendice C sono riportanti, in dettaglio, gli schemi di progettazione e montaggio del reometro a trascinamento di sfera SDR con le relative configurazioni ed i principali componenti della parte meccanica.

### V.3 PROCEDURE DI PROVA

Un esperimento base con il reometro a trascinamento di sfera SDR consiste nel misurare la tensione (in termini di forza di trascinamento  $F_D$ ) necessaria affinché la sfera compia una rotazione completa all'interno del materiale contenuto nel cilindro, in corrispondenza di un'assegnata velocità di rotazione (in termini di velocità angolare  $\Omega$ ). Con il reometro SDR, durante una rotazione completa della sfera, è possibile ottenere un numero variabile di punti di misura della Forza di trascinamento  $F_D$  in funzione della frequenza di campionamento assegnata così come illustrato in Figura V.5.



*Figura V.5 Rappresentazione schematica dei punti in corrispondenza dei quali viene misurata la Forza di trascinamento  $F_D$  quando la sfera compie una rotazione completa all'interno del contenitore ad una specifica velocità di rotazione  $\Omega$  assegnata (modificato da Schatzmann, 2005).*

A titolo di esempio, in Figura V.6a sono riportati i punti di misura ottenuti mediante prove a differenti valori di velocità di rotazione su un olio di silicone ad alta viscosità: il valore della Forza di trascinamento necessaria affinché la sfera si muova attraverso il fluido, per un assegnata velocità, è dato dalla media delle misurazioni nel giro, come mostrato in Figura V.6b.

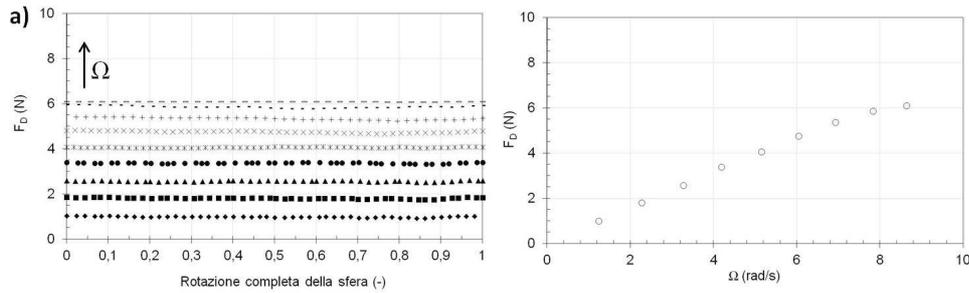


Figura V.6 Olio di silicone di viscosità  $60\text{Pa}\cdot\text{s}$ . a) Misura della Forza di trascinamento  $F_D$  durante una rotazione completa della sfera ( $D=18\text{mm}$ ) per differenti valori di velocità di rotazione imposta  $\Omega$  (rombi,  $1,24\text{rad/s}$ ; quadrati,  $2,27\text{rad/s}$ ; triangoli,  $3,28\text{rad/s}$ ; cerchi,  $4,19\text{rad/s}$ ; asterischi,  $5,15\text{rad/s}$ ; croci,  $6,93\text{rad/s}$ ; trattini piccoli,  $7,83\text{rad/s}$ ; trattini,  $8,63\text{rad/s}$ ). b) Curva di flusso  $F_D$ - $\Omega$ .

Per ottenere la curva di flusso del materiale in un intervallo abbastanza ampio di velocità di rotazione è, quindi, necessario eseguire un certo numero di prove a differenti valori di velocità. I risultati ottenuti per ciascuna prova vengono rappresentati con curve di flusso nelle quali la Forza di trascinamento  $F_D$ , espressa in Newton, è posta in funzione della velocità angolare  $\Omega$ , espressa in rad/s (Figura V.6b).

Nel reometro SDR (Sphere Drag Rheometer), la velocità di rotazione viene imposta attraverso un potenziometro multigiro graduato e nel riquadro di comando è disponibile l'indicazione della velocità di rotazione assegnata sia in termini di giri al secondo (rps) che in termini di radianti al secondo. La prova di flusso viene effettuata secondo il protocollo sperimentale riportato schematicamente nel seguito:

- ~ selezione, nel riquadro di comando, del tipo di cella di carico da utilizzare (#2 o #3);
- ~ selezione, nel riquadro di comando, della frequenza di campionamento delle misure (frequenza consigliata:  $50\text{Hz}$ );
- ~ assegnazione, nel riquadro di comando, del tempo, in secondi, di durata della prova;
- ~ regolazione, nel box di controllo, del potenziometro multigiro secondo la velocità alla quale si desidera effettuare la prova;

- ~ inserimento della sfera nel campione sistemato nel contenitore cilindrico;
- ~ inizio prova;

Una volta terminata la prova alla velocità di rotazione assegnata, il potenziometro multigioco deve essere nuovamente regolato a seconda del nuovo valore di velocità da assegnare e vanno ripetute le operazioni precedenti.

Il reometro SDR permette l'esecuzione di prove di flusso a velocità di rotazione controllata. Nel presente lavoro, ogni prova di flusso è stata eseguita attraverso l'applicazione di rampe ascendenti e discendenti di velocità di rotazione. Ogni velocità è stata imposta al campione per un tempo pari a 30 secondi, in modo da poter assicurare una misura stabile nel tempo ed un numero sufficiente di rotazioni complete del corpo immerso all'interno del campione. In tal modo ogni curva di flusso è composta da 22 punti di misura, sia nel ramo ascendente che in quello discendente, ottenuti considerando, per ciascuna velocità angolare assegnata, il valore medio della Forza di trascinamento desunta dalle misurazioni relative ad una rotazione completa della sfera all'interno del materiale da analizzare.

La scelta di condurre prove di flusso attraverso l'imposizione di una rampa ascendente e una discendente di velocità è dettata dal fatto che, come osservato dai risultati sperimentali ottenuti con apparecchiature reometriche tradizionali (Capitolo IV), da una parte con l'applicazione di una rampa crescente di velocità angolare  $\Omega$  si ottiene il valore di quella che possiamo chiamare la Forza di trascinamento statica di soglia  $F_{D1}$ . La Forza di trascinamento statica di soglia rappresenta il valore critico di Forza in corrispondenza del quale il materiale passa da un comportamento simile a quello di un solido ideale ad un comportamento simile a quello di un liquido ideale per valori di velocità di rotazione relativamente bassi. Dall'altra parte, con l'applicazione di una rampa decrescente di velocità angolare  $\Omega$  si ottiene, invece, a partire dallo stato di flusso del materiale ad alti valori della velocità, il valore di quella che possiamo chiamare la Forza di trascinamento dinamica di soglia  $F_{D2}$ . La Forza di trascinamento dinamica di soglia rappresenta il valore critico di Forza in corrispondenza del quale il materiale passa da un comportamento simile a quello di un liquido ideale ad un comportamento simile a quello di un solido ideale. I risultati tipici di una prova eseguita con velocità di rotazione ascendente e discendente sono riportati in Figura V.7.

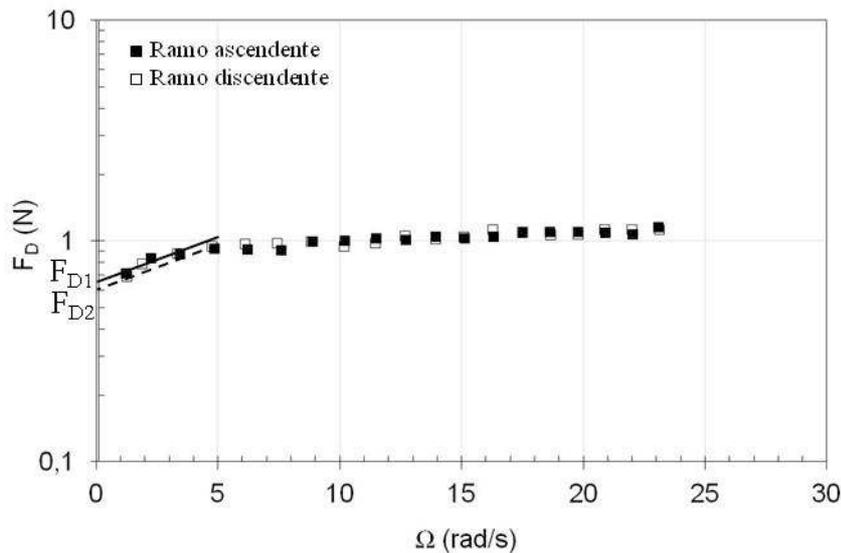


Figura V.7 Caolino ( $\Phi=35\%$ ): curva di flusso.

#### V.4 TEORIA DI CONVERSIONE DEI DATI MISURATI IN PARAMETRI ROELOGICI

Sottoporre ad un flusso viscosimetrico un materiale e dedurre appropriate misurazioni è impossibile nel caso che non si disponga di apparecchiature sperimentali sofisticate come i reometri. In pratica, però, qualora si abbia a che fare con fluidi dotati di tensione di soglia, risulta più semplice condurre differenti esperimenti come lo spremere il materiale tra due superfici solide, oppure il versarlo su un piano o, ancora, lo spostare un oggetto attraverso di esso e cercare di ottenere alcune informazioni sul comportamento reologico del materiale dal rapporto tra la forza a cui il fluido viene sottoposto ed il moto specifico che ne deriva. Un vantaggio di questo tipo di prove è che alcune problematiche, come la migrazione delle particelle, l'evaporazione del liquido interstiziale, lo scivolamento alla parete, la localizzazione del taglio (shear banding) e la frattura si sviluppano meno frequentemente che durante i convenzionali test in reometro. In generale, dato che si tratta di complessi flussi non viscosimetrici, in assenza di ipotesi riguardanti l'equazione costitutiva dei fluidi, i dati sperimentali ottenuti possono essere utilizzati, a

rigore, solo per confrontare la viscosità apparente di materiali diversi; ma, una volta che viene raggiunta una ragionevole ipotesi per quanto riguarda il comportamento reologico del fluido, è possibile trovare semplici soluzioni approssimate e mettere, quindi, in relazione alcune caratteristiche reologiche fondamentali con le misure dirette delle quantità macroscopiche.

In questo paragrafo vengono descritte le condizioni tensionali cui sono sottoposti i fluidi newtoniani ed i fluidi dotati di tensione di soglia (fluidi cosiddetti non Newtoniani). Per questi ultimi, si assume che il fluido rimanga perfettamente rigido nel suo regime solido, e segua, nel suo regime liquido, una equazione costitutiva come:

$$\sqrt{-T_{II}} > \tau_c \Rightarrow \Sigma = -pI + \tau_c \frac{D}{\sqrt{-D_{II}}} + F(D_{II})D \quad (V.1)$$

nella quale  $\Sigma$  è il tensore delle tensioni,  $T$  la sua parte deviatorica e  $T_{II}$  il secondo invariante di quest'ultima.  $D$  è il tensore delle velocità di deformazione e  $D_{II}$  è il secondo invariante di  $D$ .  $F$  è una funzione positiva crescente che tende a zero quando la velocità di deformazione (o  $D_{II}$ ) tende a zero. Questo corrisponde appunto al comportamento di un fluido dotato di soglia per il quale il tasso di flusso aumenta progressivamente all'aumentare della differenza tra la tensione applicata e la tensione di soglia. Per esempio, per il modello di Bingham si ha  $F = 2\mu_B$  ( $\mu_B$  è costante) mentre per il modello di Herschel&Bulkley si ha che

$$F(D_{II}) = 2^{n_p} m / (\sqrt{-D_{II}})^{1-n_p} \quad (V.2)$$

Inoltre, concentrando principalmente l'attenzione sul moto incipiente, non è più necessaria una forma rigorosa dell'equazione costitutiva, ma diventano fondamentali soltanto l'ipotesi dell'esistenza della soglia (yield criterion) ed il valore della tensione di soglia stessa.

Considerando il moto relativo di un oggetto e di un volume di fluido, si vuole stimare la forza viscosa (resistente) che agisce sull'oggetto come risultato del suo movimento. E' possibile esprimere la velocità costante relativa dell'oggetto come  $V=V \cdot x$ . Il fluido è globalmente a riposo rispetto al piano di riferimento, il che vuol dire che i suoi contorni non si muovono.

Tuttavia, i contorni del fluido sono lontani dall'oggetto e quindi hanno effetto trascurabile sulle caratteristiche del flusso del fluido attorno all'oggetto.

Per una sfera che si muova attraverso un fluido Newtoniano sotto determinate condizioni (ossia per la configurazione geometrica adottata nel presente lavoro), esiste una completa soluzione di tipo analitico. Per un oggetto di forma articolata, il problema è molto più complicato e richiede un trattamento di tipo numerico. Con un fluido dotato di tensione di soglia, anche nel caso della sfera, non è ancora stata trovata una soluzione semplice ma studi condotti attraverso diverse simulazioni numeriche forniscono alcune informazioni chiave per il trattamento approssimato del problema.

#### V.4.1 Forze di trascinamento e di galleggiamento

Considerando un oggetto compatto di superficie esterna  $S$ , che si muove a velocità costante  $V$  attraverso un fluido macroscopicamente a riposo, si ha che, a causa della viscosità del fluido, l'oggetto è sottoposto ad una forza  $F$  uguale ed opposta alla forza che l'oggetto stesso esercita sul fluido. Tale forza risulta dalla somma delle tensioni esercitate su ogni punto dell'interfaccia  $S$  solido-liquido. Quindi, la forza netta  $F$  che agisce sull'oggetto può essere espressa come somma di due componenti, rispettivamente la forza di trascinamento e quella di galleggiamento:

$$F_n = \int_S \Sigma S \cdot ds = \int_S p \cdot n \cdot ds + \int_S T \cdot n \cdot ds \quad (V.3)$$

$\Sigma$  è il tensore delle tensioni,  $p$  la pressione,  $T$  la parte deviatorica di  $\Sigma$  ed  $n$  è il vettore esterno unitario normale alla superficie dell'oggetto. Il primo termine di questa equazione, che risulta dalla pressione, è la forza di galleggiamento  $B$ , che, usando il teorema integrale, può essere riscritta come:

$$B = - \int_{V_o} \nabla p \cdot dv \quad (V.4)$$

dove  $V_o$  è il volume dell'oggetto.

Nell'equazione del momento è possibile assumere che la pressione e gli effetti della gravità contribuiscano separatamente all'equilibrio (distribuzione idrostatica della pressione) ed, in particolare, si ha che:

$$-\nabla p - \rho g z = 0 \quad (\text{V.5})$$

dove  $z$  è l'asse verticale (orientato verso l'alto). Sotto queste condizioni l'espressione per  $B$  diventa:

$$B = \rho g V_o z \quad (\text{V.6})$$

Quanto descritto per la forza di galleggiamento corrisponde al ben noto principio di Archimede, secondo il quale un oggetto immerso in un liquido è soggetto, a causa dell'esistenza del gradiente verticale di pressione, ad una forza netta corrispondente (sebbene in direzione opposta) al peso del liquido spostato. Ovviamente quando la densità dei grani uguaglia quella del fluido ( $\rho_g = \rho$ ), la forza di galleggiamento è bilanciata dal peso dell'oggetto ( $-\rho_p g V_o z$ ), il quale rimane in sospensione all'interno del fluido. Affinché l'assunzione relativa alla pressione idrostatica rimanga valida, il secondo termine dell'equazione dipende esclusivamente dagli effetti viscosi dovuti al moto relativo tra la superficie solida ed il fluido. Questa è la forza di trascinamento  $F_D$ , che corrisponde alla forza resistente al moto ed è quindi orientata in direzione opposta:  $F_D = -F_D \cdot x$  ( $F_D$  è, dunque, positiva).

Si considera la forza di trascinamento nel caso di fluidi sottoposti a regimi di flusso laminare. Si cerca di applicare il bilancio del momento al volume di fluido situato tra  $S$  ed  $S^*$ , la superficie esterna di volume maggiore che ingloba l'oggetto. Sotto l'assunzione di distribuzione idrostatica della pressione, gli effetti di gravità sono bilanciati dagli effetti della spinta di Archimede e dalla forza viscosa e, in assenza di effetti inerziali, finalmente si ottiene:

$$-F_D + \int_{S^*} T \cdot n ds = 0 \quad (\text{V.7})$$

Si deduce che per ogni tipo di superficie  $S^*$ , la tensione media sulla superficie, espressa come  $1/S^*$ , è uguale a  $F_D/S^*$  e quindi tende a zero quando

$S^*$  tende ad infinito. La validità di questa equazione per superfici di ogni dimensione e forma  $S^*$  implica che in ogni direzione il tensore locale della tensione  $T$  tende a zero tanto più quanto la distanza dall'oggetto tende ad infinito. Il moto dell'oggetto attraverso il fluido può quindi essere visto attraverso la perturbazione della tensione e del campo di deformazione che esso induce nel fluido attorno all'oggetto e che svanisce all'aumentare della distanza dall'oggetto.

#### ***V.4.2 Spostamento di un oggetto compatto di forma qualsiasi***

##### *Fluidi Newtoniani e fluidi non dotati di tensione di soglia*

La perturbazione del campo di flusso indotta dal moto della sfera si estende ad una distanza infinita dall'oggetto dato che la velocità del fluido tende a zero a grandi distanze. Il corrispondente secondo invariante del tensore del grado di deformazione (equivalente alla velocità di deformazione nel taglio semplice) decresce e questo dà un'idea della variazione nello spazio della perturbazione tensionale. Nei fluidi semplici a comportamento dilatante (shear thinning non dotati di tensione di soglia) la viscosità decresce con il secondo invariante così che la velocità decresce molto più rapidamente ma la perturbazione teoricamente ancora si estende ad una distanza infinita. In parallelo, in assenza di effetti inerziali, è possibile mostrare che nel caso Newtoniano la velocità del fluido  $v$ , di conseguenza, il secondo invariante del tensore del grado di deformazione, sono proporzionali alla velocità dell'oggetto. Sia per i fluidi Newtoniani sia per i fluidi dilatanti non dotati di tensione di soglia, questo invariante tende a zero al tendere a zero della velocità dell'oggetto, il che implica che la forza di trascinamento tende a zero. Più precisamente, per un oggetto che si muove attraverso un fluido Newtoniano di viscosità  $\eta$ , è possibile mostrare da semplici considerazioni dimensionali che, nell'ipotesi che forma ed orientazione dell'oggetto siano costanti, la forza di trascinamento è proporzionale a  $V$ ,  $\eta$  ed  $L_o$ , (dove  $L_o$  è la lunghezza caratteristica dell'oggetto):

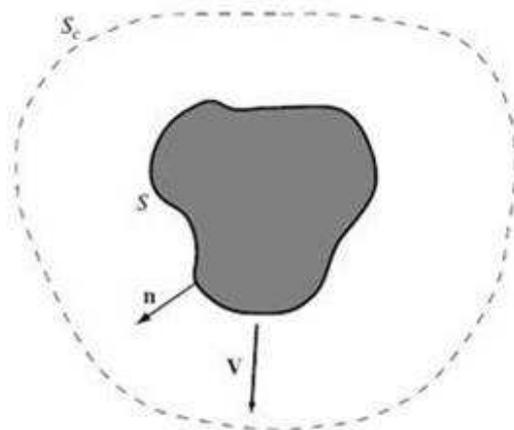
$$F_D = -k \cdot L_o \cdot \eta \cdot V \quad (V.8)$$

In cui  $k$  è un fattore di forma che dipende dalla forma dell'oggetto e dalla sua orientazione relativamente alla direzione del moto. Per esempio, per una sfera di raggio  $R$ , si ha:

$$k \cdot L_o = 6 \cdot \pi \cdot R \quad (\text{V.9})$$

#### *Fluidi dotati di tensione di soglia*

Con riguardo ad un fluido dotato di tensione di soglia inizialmente a riposo, dalle considerazioni preliminari riguardo al fatto che il tensore delle tensioni tende a zero quando la distanza dall'oggetto tende ad infinito, risulta che in ogni data direzione, al di sotto di una certa distanza critica, l'ipotesi dell'esistenza della soglia (yield criterion) è soddisfatta, così che il fluido rimane rigido nonostante il moto dell'oggetto. Quindi, diversamente dai fluidi Newtoniani e dai fluidi dilatanti non dotati di tensione di soglia, un fluido dotato di tensione di soglia attraverso il quale un oggetto si muove rimane imperturbato al di sopra di una distanza finita dall'oggetto. Infatti, questa è probabilmente una approssimazione in quanto la corrispondente collocazione della predetta regione rigida potrebbe spostarsi e quindi deformarsi con il moto dell'oggetto.



*Figura V.8 Superficie critica attorno ad un oggetto compatto oltre la quale il fluido rimane rigido (da Coussot, 2005).*

Sulla base dell'approssimazione di regione rigida, l'insieme delle posizioni critiche oltre il quale l'ipotesi dell'esistenza della soglia (yield criterion) non è soddisfatta, ad un dato tempo ed in direzioni differenti, forma una superficie  $S_c$  attorno all'oggetto (Figura V.8) e l'ampiezza della forza di trascinamento esercitata sull'oggetto in moto nella direzione del vettore unitario  $x$  può essere scritta come:

$$F_D = - \int_{S_c} (T \cdot n) \cdot x ds \quad (V.10)$$

Sul contorno di  $S_c$ , la velocità tende a zero così che l'ampiezza del tensore delle deformazioni tende a zero, il che implica che la parte deviatorica del tensore delle tensioni è proporzionale a  $\tau_c$ . Scalando l'integrale precedente con la superficie dell'oggetto, ne consegue che la forza di trascinamento  $F_D$  può essere semplicemente espressa come:

$$F_D = k \cdot \tau_c \cdot S \quad (V.11)$$

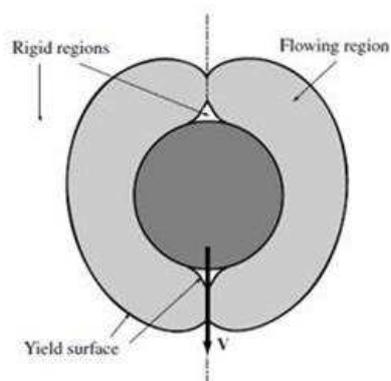
In cui  $k$  è funzione crescente, positiva e adimensionale dell'estensione di  $S_c$  relativa alla superficie dell'oggetto. È da aspettarsi ovviamente che, per un dato oggetto, la superficie  $S_c$  cresca al crescere della velocità dell'oggetto, così che anche la forza di trascinamento cresce. Al contrario, quando la velocità tende a zero,  $S_c$  potrebbe tendere alla superficie  $S$  e  $k$  potrebbe decrescere fino ad un valore minimo, critico  $k_c$ , da cui è possibile dedurre l'espressione per la forza di trascinamento critica  $F_{D0}$  per moto incipiente o arresto dell'oggetto:

$$F_{D0} = k_c \cdot \tau_c \cdot S \quad (V.12)$$

Non esiste ancora un approccio teorico generale per ottenere il valore di  $k$  o  $k_c$  in funzione della forma e della velocità dell'oggetto, ma esistono in letteratura dati numerici e sperimentali per la stima di questi parametri.

Innanzitutto si considera il moto incipiente o l'arresto di una sfera in un fluido dotato di tensione di soglia. Il metodo più semplice consiste nell'assumere che, immediatamente all'inizio del flusso o alla sua fine, la forza esercitata dal fluido corrisponda al vettore della tensione di taglio (sulla superficie dell'oggetto) di ampiezza uguale alla tensione di soglia e diretto

tangenzialmente alla superficie dell'oggetto nella direzione più vicina a  $-x$ . Dopo l'integrazione si ha:  $k_c = \pi/4$ . Questo schema è senza dubbio molto semplificato in quanto, per esempio, sul fronte e sul retro della sfera (nella direzione del moto) la velocità del fluido è simmetricamente diretta verso  $x$ , il che implica che il principale flusso di taglio attorno all'asse centrale non è tangenziale alla superficie dell'oggetto. Assumendo che sotto condizioni statiche un fluido dotato di tensione di soglia possa essere considerato come un corpo solido ideale che soddisfa l'ipotesi dell'esistenza della soglia (yield criterion), sono state condotte analisi più sofisticate con l'ausilio della teoria della plasticità. Il campo tensionale nel fluido a riposo è stimato attraverso i massimi principi dell'energia ed, in particolare, vengono trattate le superfici lungo le quali si ha la rottura in un corpo solido, ovvero il raggiungimento della tensione di soglia per un fluido dotato di tensione di soglia. Tuttavia, il problema tridimensionale rimane di difficile soluzione. Prendendo in prestito alcune idee dalla teoria delle linee di scorrimento bi-dimensionali in una regione plastica rigida, ossia approssimando la superficie di soglia ad una sorta di toroide troncato con la sua sezione centrata sulla superficie della sfera, Ansley e Smith (1967) hanno ottenuto il valore di  $k_c$  pari a  $7\pi/8$ . E' da notare che in questo caso si hanno due regioni rigide nella parte anteriore e nella parte posteriore della sfera (Figura V.9).



*Figura V.9 Vista della superficie critica che circonda la sfera e lungo la quale lo yielding criterion è raggiunto (inviluppo nella regione di color grigio), in accordo con la teoria delle linee di scorrimento di Ansley & Smith, 1967 (da Coussot, 2005).*

Le simulazioni di Beris et al. (1985), che combinano disequazioni variabili con approssimazioni numeriche agli elementi finiti e tecniche di minimizzazione effettiva per determinare la distribuzione di velocità e la forza di trascinamento attorno alla sfera, sono ragionevolmente in accordo con i risultati di Ansley & Smith (1967) e attualmente costituiscono un lavoro di riferimento. In particolare, Beris et al. (1985), hanno trovato una forma della superficie critica simile a quella assunta da Ansley & Smith (1967) ed un valore  $k_c$  pari a 3,5.

#### ***V.4.3 Alcune osservazioni sulla teoria proposta***

Attraverso sperimentazioni e simulazioni di vario tipo, sono state proposte diverse espressioni analitiche per la forza di trascinamento esercitata da una sfera che si muove attraverso un fluido dotato di tensione di soglia (Beris et al., 1985, Adachi & Yoshioka, 1973, Atapattu et al., 1995, Beaulne & Mitsoulis, 1997, Blackery & Mitsoulis, 1997). Tutti i lavori teorici, che assumono un semplice comportamento che soddisfa l'ipotesi dell'esistenza di una soglia (yileding), affermano che la velocità delle particelle tende progressivamente a zero come la forza applicata tende al valore critico per moto incipiente. I risultati sperimentali presenti in letteratura sono in accordo con questa previsione, ossia, che l'oggetto può muoversi attraverso il fluido solo quando la forza ad esso applicata diventa più grande di quella critica. Questi dati sono stati ottenuti attraverso prove di sedimentazione, nelle quali una sfera viene lasciata cadere attraverso un fluido sotto l'azione della forza di gravità. Tuttavia, non è stato ancora trovato un accordo chiaro tra le predizioni numeriche o analitiche ed i dati sperimentali, che rimangono piuttosto approssimativi e contraddittori (Chhabra & Uhlherr, 1988). Per esempio, i dati esistenti (in termini di coefficiente critico di trascinamento  $k_c$ ) per moto incipiente sono in generale significativamente minori delle predizioni teoriche (Ansley & Smith, 1967, Atapattu et al., 1995). Questo è dovuto sia alla generale incertezza riguardo la determinazione sperimentale del moto incipiente sia alla sovrastima dell'effettiva tensione di soglia con prove reometriche attraverso l'estrapolazione per basse velocità di deformazione di dati ottenuti ad alte velocità di deformazione.

Un'ulteriore analisi dei dati alla luce della maggiore comprensione del comportamento dei materiali dotati di tensione di soglia mostra che la teoria

presentata potrebbe differire in modo significativo dalla realtà. Innanzitutto, i dati per velocità di sedimentazione minori di 10cm/s sono scarsamente riproducibili (Valentik & Whitmore, 1965). Altri autori (Atapattu et al., 1995) hanno sottolineato che la riproducibilità dei risultati potrebbe essere ottenuta solo dopo il rilascio di 4-10 sfere nel fluido. Un'altra osservazione critica è che tutti i dati in letteratura corrispondono a velocità di sedimentazione relativamente alte (Valentik & Whitmore, 1965; Machac et al., 1995) rispetto quelle caratteristiche per questo tipo di moto.

Osservazioni con ultrasuoni in sospensioni di bentonite mostrano che la velocità cresce mano a mano che l'oggetto si immerge nel fluido: la velocità finale è cinque volte il valore iniziale (Briscoe et al., 1992). Prove sistematiche con sospensioni di laponite hanno fatto osservare che esistono diversi regimi di caduta di una sfera in un fluido a differenti stati iniziali della struttura: una caduta rapida ad un ritmo quasi costante, una caduta più lenta con progressiva diminuzione della velocità e una caduta lenta con velocità di deformazione rapidamente decrescente, fino ad indurre un arresto apparente (Ferroir et al., 2004). Problemi come questi non si verificano per i fluidi semplici. Adeguate spiegazioni a problemi come la diminuzione della densità di un solido o la crescita della tensione di soglia fino a valori critici non possono essere trovate nel comportamento viscoplastico. I suddetti problemi derivano quindi da alcune proprietà meccaniche del fluido che sono necessariamente flussodipendenti e/o tempo-dipendenti (Ferroir et al., 2004).

La caduta di un oggetto in un materiale dotato di tensione di soglia sembra fondamentalmente seguire un processo duale: per forze applicate sull'oggetto sufficientemente grandi, il suo moto rapido tende a liquefare sufficientemente il fluido attorno ad esso così che il suo moto successivo sia molto più rapido e così via fino a raggiungere una velocità costante. Al contrario, se la forza applicata all'oggetto non è sufficientemente grande, il fluido circostante ha abbastanza tempo per ricostruirsi, la qual cosa rallenta il moto dell'oggetto e così via fino all'arresto completo dell'oggetto stesso.

## V.5 APPLICAZIONE DELLA TEORIA AI DATI SPERIMENTALI

L'applicazione della teoria descritta è possibile soltanto con i fluidi dotati di tensione di soglia per i quali sia possibile descriverne il comportamento reologico utilizzando il modello di Herschel&Bulkley (§ I.4.4), ossia:

$$\frac{\tau}{\tau_c} = 1 + \left( \frac{m}{\tau_c} \right) \dot{\gamma}^{n_p} \quad (\text{V.13})$$

se  $\tau$  è maggiore di  $\tau_c$ , tensione di soglia. Considerando la geometria del problema in oggetto, ossia il passaggio di una sfera all'interno di un fluido dotato di tensione di soglia, è possibile esprimere la forza di trascinamento  $F$  utilizzando il modello di Herschel&Bulkley nella forma precedente:

$$\frac{F}{F_{D0}} = 1 + \left( \frac{m}{\tau_c} \right) \dot{\gamma}_{app}^{n_p} \quad (\text{V.14})$$

dove  $F_c$  è la forza di trascinamento critica (Beris et al., 1985) pari a:

$$F_{D0} = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \tau_c \cdot k_c \quad (\text{V.15})$$

Nella espressione precedente,  $R$  è il raggio della sfera e  $k_c$  è pari a 3,5 (Beris et al., 1985). Mentre la velocità di deformazione apparente si calcola come (Beaulne & Mitsoulis, 1997):

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{v_{sfera}}{l} \quad (\text{V.16})$$

dove  $v_{sfera}$  è la velocità della sfera espressa in m/s ed  $l$  è pari a 1.35 volte il raggio della sfera.

## V.6 TARATURA DEL REOMETRO CON MATERIALI NEWTONIANI

Il reometro sperimentale SRD è stato sottoposto ad una prima fase di taratura attraverso l'uso di materiali a comportamento Newtoniano commercialmente disponibili. Sono state eseguite prove a deformazione controllata (velocità di rotazione controllata) applicando una successione crescente di velocità di rotazione (rampa di carico). Si è deciso di sottoporre a prova tre oli di silicone a differente viscosità (1, 60, 100Pa·s) e di ripetere le prove con ognuna delle sfere in dotazione al reometro allo scopo di studiare l'influenza delle dimensioni del corpo rotante sui dati sperimentali e i limiti di misura dell'apparecchiatura in relazione alle caratteristiche dei fluidi da analizzare (ossia con riguardo alla viscosità).

Nelle Figure V.10, V.11 e V.12 sono riportate le curve di flusso ottenute al variare della dimensione della sfera utilizzata per i tre oli di silicone. Si nota che l'andamento dei dati misurati (simboli nelle Figure V.10, V.11 e V.12) è lineare (linee continue nelle Figure V.10, V.11 e V.12) indipendentemente dal corpo campione impiegato. Questo risultato è coerente con il comportamento tipico di un fluido Newtoniano, per il quale la Forza di trascinamento e la velocità di rotazione sono legati da una relazione proporzionale attraverso la viscosità (§ I.3.1).

Il buon funzionamento dello strumento reometrico è stato testato attraverso un confronto tra la misura teorica ed il dato commerciale riguardante la viscosità dei materiali sottoposti a prova. Il valore certificato di viscosità viene fornito come  $\tau/\dot{\gamma}$ . Il risultato della misura è in  $F_D/\Omega$ . Per il passaggio di variabili, bisogna effettuare un calcolo teorico. Il valore teorico di viscosità è stato calcolato utilizzando la teoria sviluppata per il moto intorno ad oggetti sommersi (Stokes, 1843), nella quale viene studiato il problema del calcolo delle forze esercitate da un fluido su un oggetto "sommerso", ossia su di un corpo che viene investito da un fluido in movimento. Tale approccio di tipo prettamente empirico-ingegneristico, è basato su un metodo di fondamentale importanza nell'ingegneria chimica, quello dell'analisi dimensionale, imperniato sul cosiddetto teorema di Buckingham (o teorema II) che afferma che dato un problema descritto da un certo numero di equazioni in cui siano presenti  $n$  variabili fisiche, se le dimensioni fondamentali (le grandezze

primarie) di queste  $n$  variabili sono  $x$  (equivalendo in pratica a unità di misura come il chilogrammo, il metro, il secondo, ecc.), allora il problema può essere completamente descritto, in genere, da  $n-x$  variabili adimensionali.

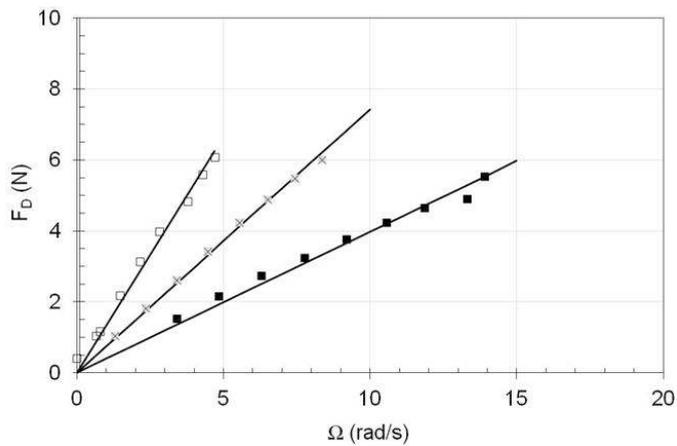


Figura V.10 Olio di silicone di viscosità pari a  $100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ : curve di flusso al variare del diametro della sfera utilizzato ( $D=8\text{mm}$  simboli pieni;  $D=12\text{mm}$  simboli semipieni;  $D=18\text{mm}$  simboli vuoti). Le linee continue seguono l'andamento lineare dei dati.

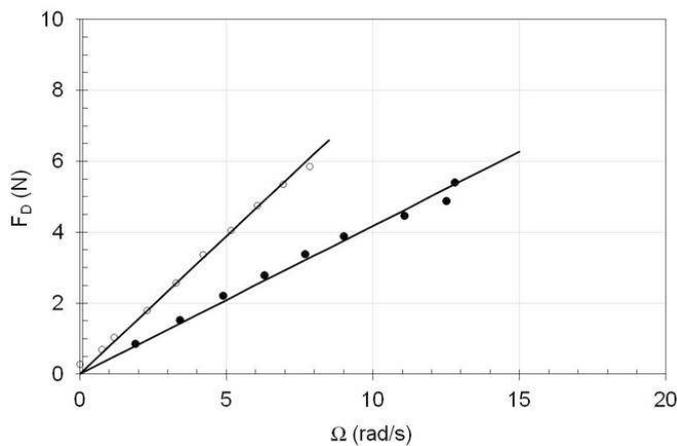


Figura V.11 Olio di silicone di viscosità pari a  $60 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ : curve di flusso al variare del diametro della sfera utilizzato ( $D=12\text{mm}$  simboli pieni;  $D=18\text{mm}$  simboli vuoti). Le linee continue seguono l'andamento lineare dei dati.

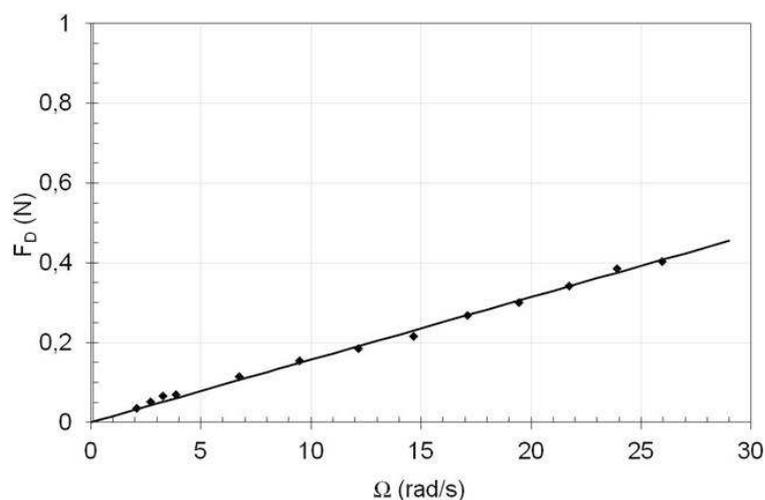


Figura V.12 Olio di silicone di viscosità pari a  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ : curva di flusso la sfera di diametro  $D=18\text{mm}$  (simboli pieni). La linea continua segue l'andamento lineare dei dati.

Cioè è possibile studiare il medesimo problema usando un numero inferiore di variabili purché le grandezze secondarie siano state adimensionalizzate. In questo modo è possibile studiare il fenomeno della caduta della sfera all'interno di un corpo recettore con un solo grafico avente come ascissa ed ordinata due grandezze numeriche (rispettivamente i così detti numero di Reynolds e il coefficiente di trascinamento).

Per studiare il problema della relazione tra moto del fluido esercitato intorno ad una sfera, si considera (Figura V.13) una sfera di diametro  $D$  investita da un fluido che si muove di moto rettilineo, dove  $v_\infty$  è la velocità (uniforme) del fluido lontano dalla sfera.

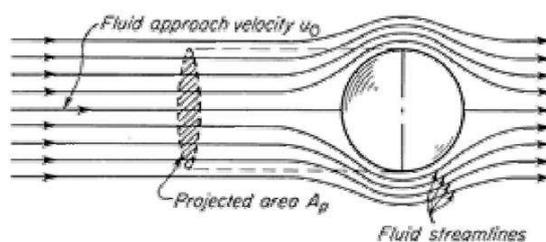


Figura V.13 Sfera di diametro  $D$  investita da un fluido.

In queste condizioni il fluido trasmette una forza  $F$  nella direzione del flusso stesso ed è necessario determinare la relazione quantitativa tra questa forza e le altre grandezze caratteristiche. Il metodo dell'analisi dimensionale parte dall'elencazione delle grandezze significative del problema. Nel caso del moto intorno ad una sfera, la forza esercitata dal fluido sulla sfera dipende dalla velocità indisturbata (cioè lontano dalla sfera) del fluido,  $v_\infty$ , dalle proprietà del fluido significative ai fini del flusso, cioè densità  $\rho$  e viscosità  $\eta$  e dall'unica dimensione geometrica caratteristica del problema, il diametro  $D$  della sfera. Il legame tra la forza trasmessa dal fluido è esprimibile genericamente come  $F = F(v_\infty, D, \rho, \eta)$ , o più in generale,  $f(F, v_\infty, D, \rho, \eta) = 0$ . Il problema è quindi descritto da cinque grandezze, tutte esprimibili in termini delle tre dimensioni fondamentali: massa, lunghezza, tempo. Il teorema di Buckingham ci informa quindi che devono esistere  $5-3=2$  gruppi adimensionali indipendenti,  $\Pi_1$  e  $\Pi_2$ , che permettono di descrivere il problema nella forma equivalente:  $g(\Pi_1, \Pi_2) = 0$ . Con le cinque grandezze a disposizione si possono costruire più gruppi adimensionali. Tra questi, tuttavia quelli storicamente utilizzati (anche per il loro significato fisico) sono il numero di Reynolds,  $Re = \rho v_\infty D / \eta$ , ed il coefficiente di trascinamento,  $c_D = 8F_D / \pi \rho v_\infty^2 D$ . Per quanto detto, allora, risulta essere:  $g(Re; c_D) = 0$  o in alternativa  $c_D = c_D(Re)$ , cioè il coefficiente di trascinamento è una funzione biunivoca e universale del numero di Reynolds. Ovviamente quest'ultima espressione non fornisce esplicitamente la relazione tra i due gruppi dimensionali, ma afferma che, qualunque fluido che investe qualunque sfera ad una qualunque velocità purché tali da determinare lo stesso numero di Reynolds, produrrà lo stesso coefficiente di trascinamento. Il legame quantitativo tra  $Re$  e  $c_D$  viene riportato in un diagramma in doppia scala logaritmica (Figura V.14) nel quale il coefficiente di trascinamento è espresso in funzione del numero di Reynolds per il moto intorno ad una sfera. Tale diagramma rappresenta, graficamente, la forma esplicita della relazione tra il numero di Reynolds e il coefficiente di attrito. La sua più semplice ed immediata applicazione permette direttamente il calcolo della forza che il fluido esercita sulla sfera mediante il seguente procedimento: assegnata la velocità del fluido, la sua densità e viscosità, nonché il diametro della sfera

viene calcolato il numero di Reynolds; entrando nel grafico sull'asse delle ascisse con tale valore si interseca la curva e si legge sulle ordinate il corrispondente valore del coefficiente di attrito; la forza esercitata viene poi calcolata attraverso la seguente relazione:  $F_D = c_D \pi \rho v_\infty^2 D^2 / 8$ .

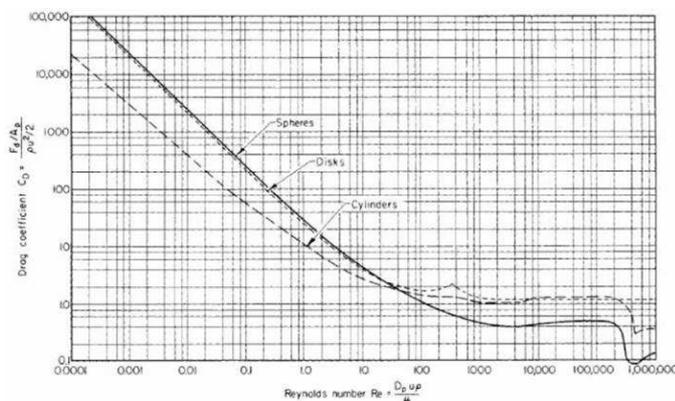


Figura V.14 Abaco per la correlazione tra il numero di Reynolds  $Re$  ed il coefficiente di trascinamento  $c_D$ .

Sono disponibili, tuttavia, anche delle relazioni analitiche riassunte nella Tabella V-1, che forniscono in maniera esplicita il legame tra fattore di attrito e numero di Reynolds.

Tabella V-1 Legame tra il coefficiente di attrito ed il numero di Reynolds.

$Re < 1$	$c_D = 24/Re$
$1 < Re < 1000$	$c_D = 18,5 Re^{-3/5}$
$Re > 1000$	$c_D = 0,4$

In Tabella V-2 vengono riportati i valori di viscosità calcolati con la teoria descritta in base ai dati misurati con il reometro SDR ed i valori forniti dal produttore. Si fa presente che, pochissime prove hanno avuto un andamento del tutto irrealistico, di queste non se ne è tenuto.

*Tabella V-2 Viscosità misurata con il reometro SDR per gli oli di silicone analizzati*

#	Materiale	D <sub>sfera</sub> (mm)	Viscosità nota (Pa·s)	Viscosità misurata (Pa·s)
1	Olio di silicone	18	1	2,22
2	Olio di silicone	18	1	2,51
3	Olio di silicone	18	1	2,64
4	Olio di silicone	18	1	3,12
5	Olio di silicone	18	1	1,84
6	Olio di silicone	18	1	1,37
7	Olio di silicone	18	1	0,77
8	Olio di silicone	18	1	0,87
9	Olio di silicone	18	1	0,86
10	Olio di silicone	18	1	0,77
11	Olio di silicone	18	1	0,74
12	Olio di silicone	18	1	0,72
13	Olio di silicone	18	1	0,64
1	Olio di silicone	18	60	121,58
2	Olio di silicone	18	60	145,93
3	Olio di silicone	18	60	115,39
4	Olio di silicone	18	60	102,24
5	Olio di silicone	18	60	102,18
6	Olio di silicone	18	60	100,58
7	Olio di silicone	18	60	103,35
8	Olio di silicone	18	60	101,34
9	Olio di silicone	18	60	101,03
10	Olio di silicone	18	60	99,24
11	Olio di silicone	18	60	96,13
12	Olio di silicone	18	60	90,54
13	Olio di silicone	18	60	82,80
1	Olio di silicone	18	100	43,83
2	Olio di silicone	18	100	59,96
3	Olio di silicone	18	100	204,07
4	Olio di silicone	18	100	187,62
5	Olio di silicone	18	100	191,00

6	Olio di silicone	18	100	187,90
7	Olio di silicone	18	100	182,18
8	Olio di silicone	18	100	164,24
9	Olio di silicone	18	100	167,62
10	Olio di silicone	18	100	165,84
11	Olio di silicone	18	100	111,48
12	Olio di silicone	18	100	133,63
13	Olio di silicone	18	100	123,79
1	Olio di silicone	12	60	87,06
2	Olio di silicone	12	60	87,28
3	Olio di silicone	12	60	87,69
4	Olio di silicone	12	60	85,42
5	Olio di silicone	12	60	85,12
6	Olio di silicone	12	60	83,44
7	Olio di silicone	12	60	73,33
8	Olio di silicone	12	60	69,36
9	Olio di silicone	12	60	81,34
10	Olio di silicone	12	60	80,60
1	Olio di silicone	12	100	155,12
2	Olio di silicone	12	100	149,76
3	Olio di silicone	12	100	148,22
4	Olio di silicone	12	100	147,13
5	Olio di silicone	12	100	147,10
6	Olio di silicone	12	100	144,57
7	Olio di silicone	12	100	141,84
8	Olio di silicone	12	100	138,24
9	Olio di silicone	12	100	125,05
10	Olio di silicone	12	100	115,62
1	Olio di silicone	8	100	129,83
2	Olio di silicone	8	100	128,63
3	Olio di silicone	8	100	125,66
4	Olio di silicone	8	100	120,58
5	Olio di silicone	8	100	118,61
6	Olio di silicone	8	100	115,76

7	Olio di silicone	8	100	113,42
8	Olio di silicone	8	100	106,55
9	Olio di silicone	8	100	114,85

Nel tentativo di trarre una valutazione conclusiva e sintetica dell'affidabilità delle misure, i risultati ottenuti sugli oli di silicone sono stati raggruppati nel diagramma di Figura V.15 in cui i dati calcolati sono riportati in funzioni di frequenza cumulata e la loro evoluzione è posta in funzione del rapporto fra la viscosità misurata e quella teorica fornita dal produttore.

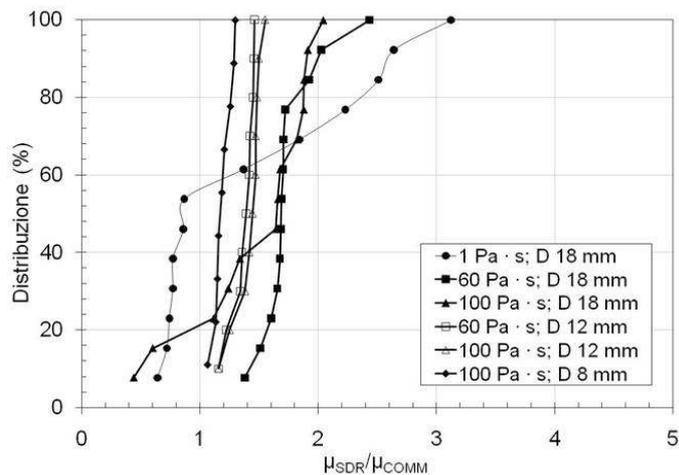


Figura V.15 Distribuzione dei valori di viscosità calcolati (funzione di frequenza cumulata) in funzione del rapporto tra la viscosità calcolata e quella nota.

Si nota che i maggiori errori di misura si hanno per l'olio di silicone a bassa densità, a causa della insufficiente sensibilità dell'apparecchiatura. Normalmente i dati misurati sovrastimano il valore effettivo della viscosità di circa 1-1,5 volte. Le misure più accurate si ottengono sottoponendo a prova oli ad alta viscosità mediante la sfera di diametro maggiore ( $D=18\text{mm}$ ). Tenuto conto della intrinseca delicatezza delle prove, lo scostamento fra dati misurati e valori teorici si ritiene accettabile.

I risultati sperimentali presentati nel seguito fanno riferimento alle prove effettuate con la sfera di diametro 18mm, poiché quella con la quale è

possibile ottenere misure il più possibile stabili. In Appendice D è riportato il procedimento sperimentale adottato per studiare l'influenza della dimensione della sfera sui dati sperimentali.

## V.7 TARATURA DEL REOMETRO CON MATERIALI NON NEWTONIANI

Il reometro SDR è stato sottoposto a una seconda fase di taratura utilizzando fluidi non Newtoniani il cui comportamento è quello tipico di fluidi dotati di tensione di soglia: un gel per capelli commercialmente in uso e una miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ ). I materiali suddetti sono stati dapprima sottoposti a prova con l'ausilio di un reometro rotazionale e poi sono stati analizzati con il reometro SDR. Con entrambe le apparecchiature sono state effettuate prove di flusso assegnando una rampa crescente di velocità. I dati sperimentali ottenuti dalle prove in reometro tradizionale sono stati interpretati con il modello di Herschel-Bulkley al fine di poter convertire i dati misurati con il reometro SDR (forza di trascinamento e velocità di rotazione) in parametri reologici (tensione di soglia e velocità di deformazione) attraverso l'applicazione della teoria descritta precedentemente (§ V.5).

### *Taratura con il gel per capelli*

Le prove di flusso effettuate sul gel per capelli con il reometro tradizionale sono prove a gradiente di deformazione controllato eseguite con la geometria di piatto e cono (§ I.5.1). La curva di flusso ottenuta viene riportata in Figura V.16. Come ci si attendeva, il materiale esibisce il tipico comportamento di un fluido viscoplastico dotato di tensione di soglia. Il modello di Herschel-Bulkley che ha ben descritto i dati sperimentali è quello con i seguenti parametri: la tensione di soglia  $\tau_c$  pari 10 Pa; indice  $n_p$  pari a 0,07831 e indice  $m$  pari a  $104 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ .

Le prove di flusso sul gel per capelli con il reometro SDR sono state effettuate utilizzando la sfera di diametro 18mm attraverso l'applicazione di una rampa ascendente di velocità di rotazione. La curva di flusso ottenuta viene riportata in Figura V.17.

Una volta ricavate le curve di flusso con le due apparecchiature è stata applicata la teoria di conversione ai dati misurati con il reometro SDR. Per

ogni punto di misura che compone la curva di flusso, la velocità di deformazione apparente,  $\dot{\gamma}_{app}$ , è stata ricavata a partire dal valore della velocità di rotazione angolare  $\Omega$  misurata con il reometro SDR, attraverso l'equazione V.16 (Beaulne and Mitsoulis, 1997). Una volta convertita la velocità angolare in velocità di deformazione apparente, è possibile costruire una curva sperimentale nella quale la forza di trascinamento  $F_D$  misurata con il reometro SDR, viene espressa in funzione della velocità di deformazione apparente calcolata a partire dalle misure sperimentali.

Al fine di poter confrontare la curva sperimentale ottenuta a partire dai dati misurati con il reometro SDR è necessario costruire una curva teorica utilizzando la teoria di Herschel&Bulkley. Per i fluidi ed i materiali dotati di soglia si utilizzano le relazioni V.13, V.14 e V.15 (§ V.5). In tal modo si ottengono due curve di flusso, una teorica e una sperimentale, in termini di Forza di trascinamento e velocità di deformazione apparente il cui confronto viene riportato in Figura V.18.

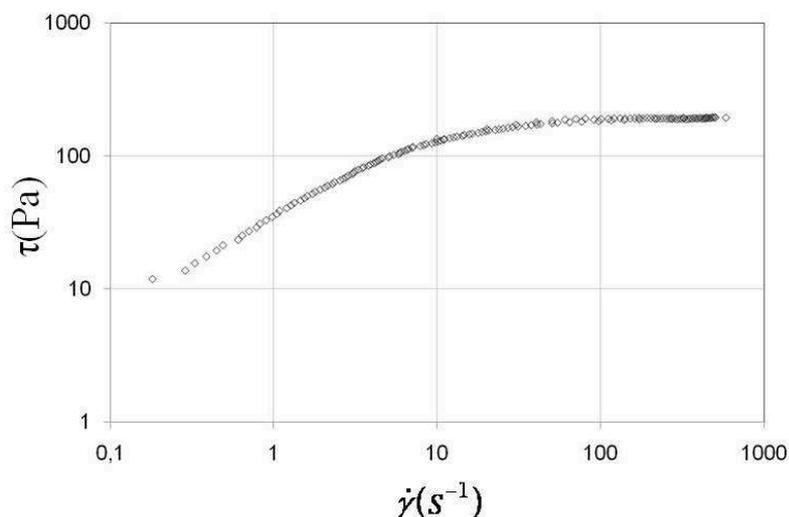


Figura V.16 Gel per capelli: curva di flusso ottenuta in reometro tradizionale.

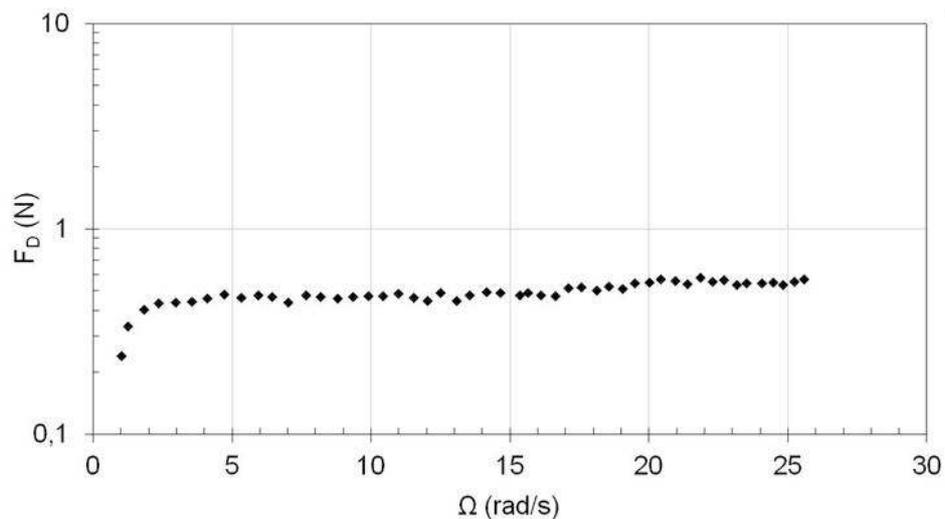


Figura V.17 Gel per capelli: curva di flusso ottenuta in reometro SDR.

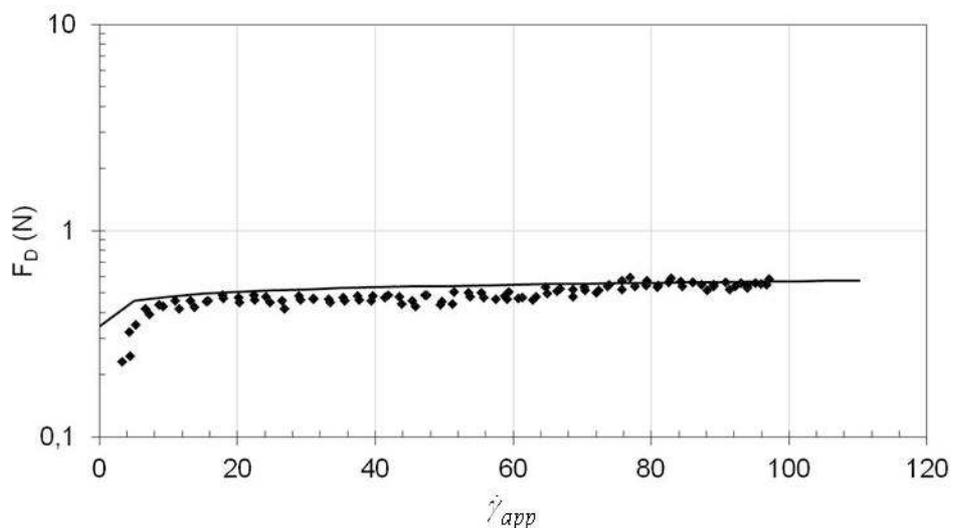


Figura V.18 Gel per capelli. Confronto tra la curva teorica (linea continua) derivata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (simboli pieni).

Si osserva che il reometro SDR sottostima i valori di Forza di trascinamento teorici (§ V.5), le espressioni teoriche utilizzate per la conversione dei dati (Equazioni V.15 e V.16) sono corredate di due parametri,  $k_c$  e  $l$  che dipendono essenzialmente da considerazioni di tipo numerico. Al fine, quindi, di rendere confrontabili le due curve è stato effettuato uno studio parametrico su  $k_c$  e  $l$  che ha permesso di definire la coppia di valori migliore. In Figura V.19 viene riportato il confronto tra la curva sperimentale e la curva teorica ottenute. Si vede come vi è una più che buona corrispondenza tra i dati misurati con il reometro SDR, opportunamente convertiti in parametri reologici, e i dati ottenuti attraverso l'applicazione del modello di Herschel-Bulkley alla curva di flusso ricavata dalle prove svolte in reometro tradizionale.

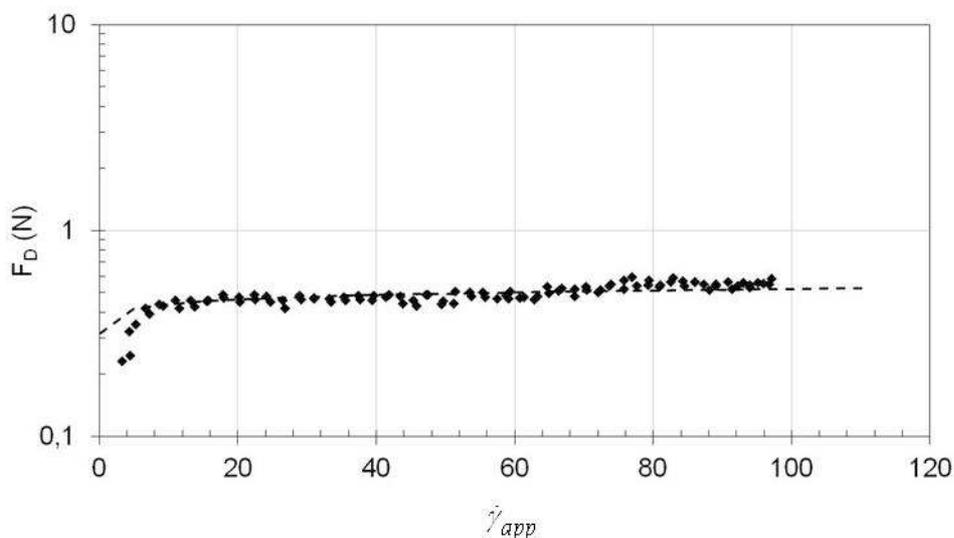


Figura V.19 Gel per capelli Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) derivata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (simboli pieni) con valori differenti dei parametri  $k_c$  e  $l$ .

#### Taratura con la miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ )

Le prove effettuate in reometro tradizionale sulla miscela di acqua e caolino sono prove a gradiente di deformazione controllato eseguite con la geometria di piatto e cono (§ I.5.1). La curva di flusso ottenuta viene riportata in Figura V.20. Come ci si attendeva, il materiale esibisce il tipico

comportamento di un fluido viscoplastico dotato di tensione di soglia. Il modello di Herschel-Bulkley che ha ben descritto i dati sperimentali è quello con i seguenti parametri: la tensione di soglia  $\tau_c$  pari 115,4 Pa; indice  $n_p$  pari a 0,3109 e indice  $m$  pari a 60,41 Pa·s<sup>n</sup>.

Le prove di flusso sulla miscela di acqua e caolino con il reometro SDR sono state effettuate utilizzando la sfera di diametro 18mm attraverso l'applicazione di una rampa ascendente di velocità di rotazione. La curva di flusso ottenuta viene riportata in Figura V.21.

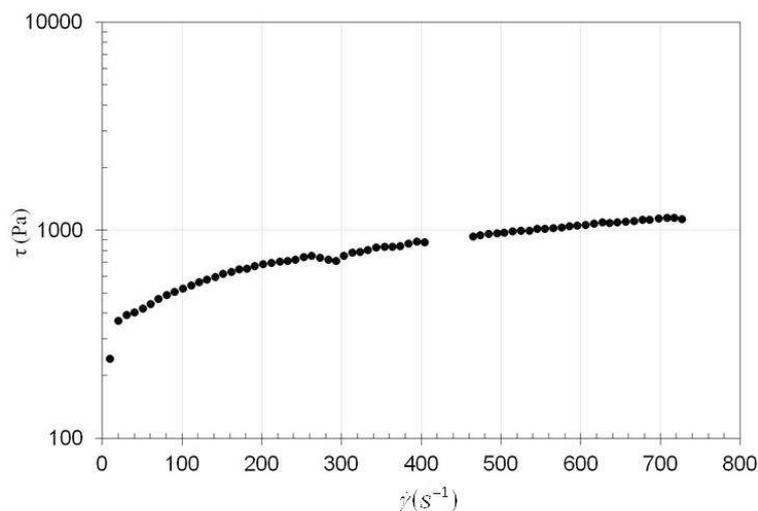


Figura V.20 Miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ ): curva di flusso ottenuta in reometro tradizionale

Una volta ricavate le curve di flusso con le due apparecchiature è stata applicata la teoria di conversione ai dati misurati con il reometro SDR. Per ogni punto di misura che compone la curva di flusso, la velocità di deformazione apparente,  $\dot{\gamma}_{app}$ , è stata ricavata a partire dal valore della velocità di rotazione angolare  $\Omega$  misurata con il reometro SDR, attraverso l'equazione V.16 (Beaulne & Mitsoulis, 1997). Una volta convertita la velocità angolare in velocità di deformazione apparente, è possibile costruire una curva sperimentale nella quale la forza di trascinamento  $F$  misurata con il reometro SDR, viene espressa in funzione della velocità di deformazione apparente calcolata a partire dalle misure sperimentali.

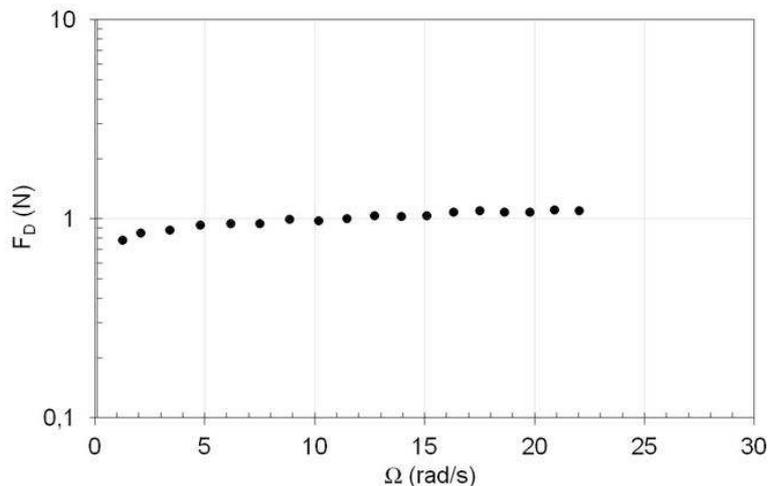


Figura V.21 Miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ ): curva di flusso ottenuta in reometro SDR.

Al fine di poter confrontare la curva sperimentale ottenuta a partire dai dati misurati con il reometro SDR è necessario costruire una curva teorica utilizzando la teoria di Herschel&Bulkley. Per i fluidi ed i materiali dotati di soglia si utilizzano le relazioni V.13, V.14 e V.15 (§ V.5). In tal modo si ottengono due curve di flusso, una teorica e una sperimentale, in termini di Forza di trascinamento e velocità di deformazione apparente il cui confronto viene riportato in Figura V.22.

Si osserva che il reometro SDR sottostima i valori di Forza di trascinamento teorici (§ V.5). Le espressioni teoriche utilizzate per la conversione dei dati (Equazioni V.15 e V.16) sono corredate di due parametri,  $k_c$  e  $l$  che dipendono essenzialmente da considerazioni di tipo numerico. Al fine, quindi, di rendere confrontabili le due curve è stato effettuato uno studio parametrico su  $k_c$  e  $l$  che ha permesso di definire la coppia di valori migliore. In Figura V.23 viene riportato il confronto tra la curva sperimentale e la curva teorica ottenute. Si vede come vi è una più che buona corrispondenza tra i dati misurati con il reometro SDR, opportunamente convertiti in parametri reologici, e i dati ottenuti attraverso l'applicazione del modello di Herschel-Bulkley alla curva di flusso ricavata dalle prove svolte in reometro tradizionale.

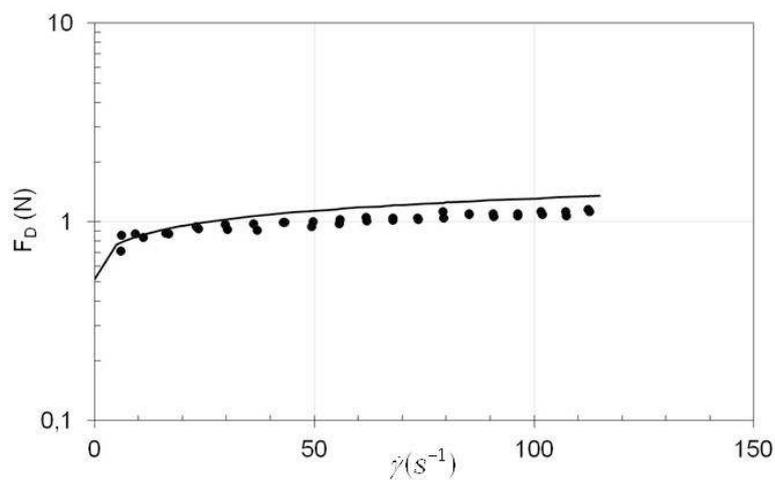


Figura V.22 Miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ ). Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) derivata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (simboli pieni).

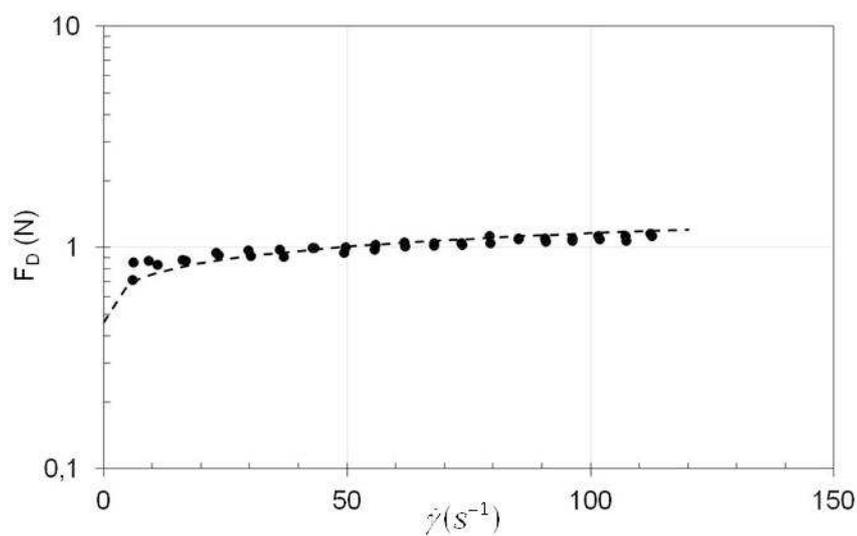


Figura V.23 Miscela di acqua e caolino ( $\Phi=35\%$ ). Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) derivata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (simboli pieni) con valori differenti dei parametri  $k_c$  e  $l$ .



---

## *Capitolo VI*

# Risultati sperimentali delle prove eseguite in reometro innovativo

### VI.1 INTRODUZIONE

Il primo obiettivo della sperimentazione eseguita con il reometro a trascinamento di sfera SDR (Sphere Drag Rheometer) è stato quello di verificare la ripetibilità delle prove effettuate mediante i sistemi reometrici convenzionali sulle miscele acqua-terreno a granulometria fine. A tal fine sono stati sottoposti a prova campioni ricostituiti con alcuni dei terreni campionati nell'intervallo di concentrazioni solide volumetriche all'interno del quale le miscele ottenute possono essere considerate come fluidi. La verifica della rispondenza tra i risultati conseguiti con il reometro SDR e quelli ottenuti per mezzo di prove reometriche standard è stata effettuata attraverso l'applicazione della teoria di conversione dei dati sperimentali in parametri reologici descritta nel capitolo V (§ V.4).

Il secondo (fondamentale) obiettivo della sperimentazione eseguita con il reometro a trascinamento di sfera SDR è stato quello di analizzare miscele acqua-terreno a granulometria grossolana ( $d_{\max} < 10\text{mm}$ ). A tal fine sono stati preparati campioni a differente assortimento granulometrico con alcuni dei materiali selezionati. La bontà dei risultati ottenuti è stata verificata mediante:

- ~ un confronto di tipo qualitativo tra le curve di flusso ricavate con il reometro SDR ed alcuni risultati sperimentali ottenuti mediante prove di flusso in reometro standard e prove di scorrimento su piano inclinato;

~ un confronto di tipo qualitativo tra il comportamento reologico esibito dalle miscele analizzate con il reometro SDR ed alcuni dati reperibili dalla letteratura.

Nell'ambito della presente sperimentazione si è deciso di non analizzare il terreno III dato che gli effetti della sedimentazione di tipo macroscopico sono alquanto significativi per le miscele confezionate con tale materiale rispetto al tempo di esecuzione della prova. Analogamente, il terreno II-4 non è stato analizzato con il reometro SDR in quanto di caratteristiche del tutto simili a quelle del terreno II-8.

## VI.2 PROGRAMMA SPERIMENTALE

I terreni analizzati con il reometro SDR sono gli stessi analizzati in reometro convenzionale, ad esclusione del terreno III (§ III.3). I campioni testati sono stati ottenuti preparando miscele di acqua e terreno a differente contenuto d'acqua. Nella fase sperimentale condotta sulle miscele acqua-terreno a granulometria fine ( $d_{\max} < 0,5\text{mm}$ ), sono state ricostituite miscele a differente concentrazione solida volumetrica di particelle fini, ossia  $\Phi_f$ . La concentrazione solida volumetrica di particelle fini  $\Phi_f$  è definita come il rapporto tra il volume delle particelle di piccole dimensioni presente nella miscela  $V_{Sf}$  ed il volume totale della miscela stessa  $V_T$  (volume dell'acqua  $V_W$  più volume del solido dato dalla somma del volume della frazione fine  $V_{Sf}$  e del volume della frazione grossolana  $V_{Sg}$ ):

$$\Phi_f = \frac{V_{Sf}}{V_W + V_{Sf} + V_{Sg}} \quad (\text{VI.1})$$

Nella fase sperimentale condotta sulle miscele acqua-terreno granulometria grossolana ( $d_{\max} < 10\text{mm}$ ), sono state ricostituite miscele a differente concentrazione solida volumetrica totale, ossia  $\Phi_T$ . La concentrazione solida volumetrica totale  $\Phi_T$  è composta dalla concentrazione solida volumetrica di particelle fini  $\Phi_f$  e dalla concentrazione solida volumetrica di particelle grossolane  $\Phi_g$  ed è definita dalla seguente relazione:

$$\Phi_T = \Phi_f + \Phi_g \quad (\text{VI.2})$$

La concentrazione solida volumetrica di particelle grossolane è definita come il rapporto tra il volume delle particelle di grandi dimensioni presente nella miscela  $V_{Sg}$  ed il volume totale della miscela stessa  $V_T$  (volume dell'acqua  $V_W$  più volume del solido dato dalla somma del volume della frazione fine  $V_{Sf}$  e del volume della frazione grossolana  $V_{Sg}$ ):

$$\Phi_g = \frac{V_{Sg}}{V_W + V_{Sg} + V_{Sf}} \quad (VI.3)$$

Il programma sperimentale eseguito nella fase preliminare è riassunto in Tabella V-1.

*Tabella VI-1 Programma sperimentale eseguito con reometro innovativo a trascinamento di sfera (SDR) e con il piano inclinato (PI).*

#	Terreno	$\Phi_T$ (%)	$\Phi_f$ (%)	$\Phi_g$ (%)	$d_{MAX}$ (mm)	SDR	PI
1	I	32	32	-	0,5	x	x
2	I	35	35	-	0,5	x	x
3	I	38	38	-	0,5	x	x
4	I	40	40	-	0,5	x	x
5	I	42	42	-	0,5	x	x
6	I	35	28	7	5	x	-
7	I	38	31	7	5	x	-
8	I	40	32	8	5	x	-
9	I	35	21	14	10	x	-
10	I	38	24	16	10	x	-
1	II-3	35	-	35	10	x	-
2	II-3	38	-	38	10	x	-
3	II-3	40	-	40	10	x	-
4	II-3	100	-	100	10	x	-
1	II-4	30	14	16	5	-	x
2	II-4	32	15	17	5	-	x
3	II-4	38	38	-	0,5	-	x
4	II-4	38	25	13	1	-	x
1	II-8	32	32	-	0,5	x	-

2	II-8	35	35	-	0,5	x	-
3	II-8	38	38	-	0,5	x	-
4	II-8	30	21	9	5	x	-
5	II-8	32	22	10	5	x	-
6	II-8	35	25	10	5	x	-
7	II-8	38	29	9	5	x	-
1	IV(D1ALTO)	35	35	-	0,5	x	-
2	IV(D1ALTO)	35	18	17	10	x	-
3	IV(D1MEDIO)	35	35	-	0,5	x	-
4	IV (D2BASSO)	35	35	-	0,5	x	-
5	IV (D3ALTO)	35	35	-	0,5	x	-
6	IV (D3ALTO)	38	38	-	0,5	x	-
1	VI	35	35	-	0,5	x	-
2	VI	100	100	-	0,5	x	-

Ogni materiale analizzato nel presente lavoro è stato sottoposto a prove di flusso attraverso l'applicazione di una rampa crescente e una rampa decrescente di velocità di rotazione. I risultati ottenuti per ciascuna prova vengono rappresentati con curve nelle quali la Forza di trascinamento  $F_D$  è posta in funzione della velocità angolare  $\Omega$ . L'applicazione di una rampa crescente di velocità angolare  $\Omega$  permette di misurare il valore di quella che possiamo chiamare la Forza di trascinamento statica di soglia  $F_{D1}$ . La Forza di trascinamento statica di soglia  $F_{D1}$  rappresenta gli stati tensionali in corrispondenza dei quali il materiale passa da un comportamento simile a quello di un solido ideale ad un comportamento simile a quello di un liquido ideale per bassi valori di velocità rotazionale (il materiale comincia a fluire). L'applicazione di una rampa decrescente di velocità angolare  $\Omega$  permette di calcolare, invece, a partire dallo stato di flusso del materiale ad alti valori della velocità, il valore di quella che possiamo chiamare la Forza di trascinamento dinamica di soglia  $F_{D2}$ . La Forza di trascinamento dinamica di soglia  $F_{D2}$  fornisce gli stati tensionali in corrispondenza dei quali il materiale passa da un comportamento simile a quello di un liquido ideale ad un comportamento simile a quello di un solido ideale (il materiale arresta il suo flusso). Ogni prova di flusso (sia con rampa crescente che decrescente) è stata effettuata secondo il protocollo sperimentale riportato nel capitolo V (§ V.3).

## VI.3 RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESGUITE SULLE MISCELE A GRANULOMETRIA FINE

### VI.3.1 *Prove di flusso*

I risultati che tipicamente sono stati ricavati da una prova di flusso eseguita con il reometro a trascinamento di sfera SDR sulle miscele acqua-terreno a granulometria fine ( $d_{\max} < 0,5\text{mm}$ ) sono riportati nelle Figure IV.1 e VI.2. L'applicazione della rampa crescente di velocità di rotazione definisce il primo ramo (ramo crescente) della curva di flusso apparente, la cui inclinazione cresce rapidamente al crescere della velocità. I punti iniziali che compongono la curva nel suo ramo crescente, corrispondenti ad un regime deformativo molto basso, non sono rappresentativi del flusso del materiale nel suo regime liquido. La parte restante della curva di flusso nel suo ramo ascendente corrisponde al comportamento del materiale nel regime liquido: la transizione al regime liquido è associata ad un valore critico della Forza di trascinamento, ossia alla Forza di trascinamento statica di soglia  $F_{D1}$  (linea tratteggiata nelle Figure VI.1 e VI.2). L'applicazione della rampa decrescente di velocità di rotazione definisce un secondo ramo della curva di flusso che segue approssimativamente l'andamento di quello associato alla rampa di velocità crescente fino all'arresto di flusso. La transizione del materiale dal regime liquido è associata ad un valore critico della Forza di trascinamento, ossia alla Forza di trascinamento dinamica di soglia  $F_{D2}$  (linea continua nelle Figure VI.1 e VI.2). Nella quasi totalità delle prove eseguite con il reometro SDR, indipendentemente dal materiale analizzato e dalla concentrazione solida volumetrica considerata, si è osservato che il ramo decrescente della curva di flusso non differisce significativamente dal ramo crescente della curva.

Diversamente da quanto osservato nella campagna di prove eseguita in reometro tradizionale (capitolo IV), nelle curve di flusso ottenute mediante la sperimentazione in reometro SDR non si verifica alcuna isteresi. Come ampiamente discusso nel capitolo IV (§ IV.2.4) l'isteresi, relativamente al tipo di prove e di materiali analizzati, dovrebbe essere legata ad effetti di tipo tixotropico (§ I.3.2). Al fine di indagare il carattere tixotropico delle miscele, durante la sperimentazione in reometro tradizionale, sono state condotte prove di flusso a differenti tempi di rilassamento del materiale.

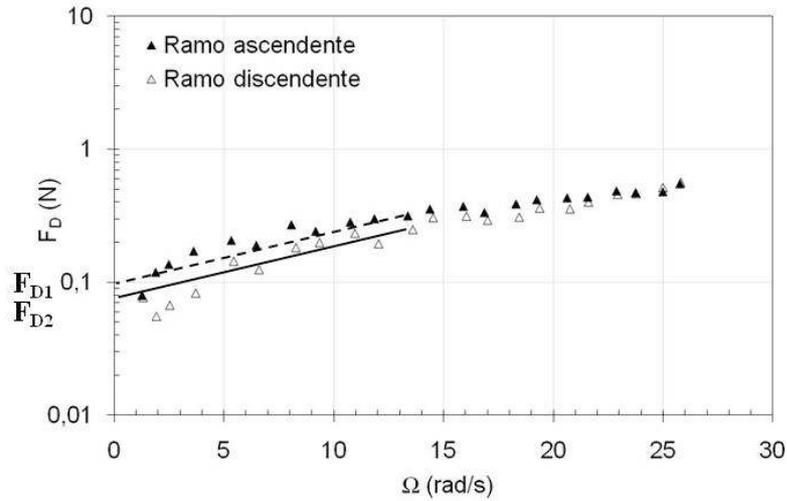


Figura VI.1 Terreno A  $\Phi=38\%$ : curva di flusso ottenuta mediante l'applicazione di una rampa di velocità di rotazione crescente e di una decrescente

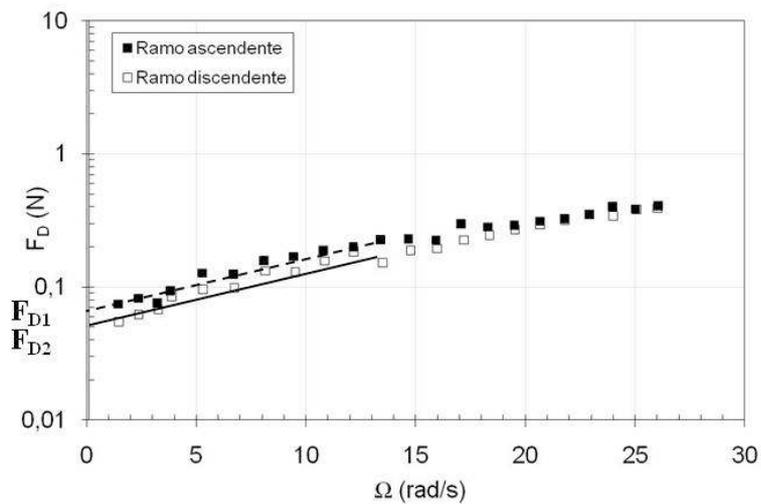


Figura VI.2 Terreno II-8  $\Phi = 38\%$ : curva di flusso ottenuta mediante l'applicazione di una rampa di velocità di rotazione crescente e di una decrescente

Si è visto, però, che le variazioni della tensione di soglia statica al variare del tempo di riposo non sono apprezzabili e questo risultato è in contraddizione con l'usuale caratteristica dei materiali tixotropici. L'isteresi riscontrata nelle prove condotte in reometro standard è, probabilmente, legata alla concomitanza di diversi fattori quali, ad esempio, le modalità di esecuzione delle prove ed il verificarsi di alcuni fenomeni di "sedimentazione locale" tipici di questo tipo di materiali (Fall et al., 2009). L'assenza di un comportamento isteretico osservata nelle curve di flusso ottenute con il reometro SDR è, presumibilmente, legata alle caratteristiche proprie dell'apparecchiatura (dimensioni e modalità di prova) e ottimizza i risultati già conseguiti in considerazione del fatto che, solitamente, i materiali dotati di soglia esibiscono la coincidenza tra tensione di soglia statica e tensione di soglia dinamica. Con riguardo alle curve di flusso ottenute con il reometro SDR è possibile affermare che, indipendentemente dal percorso di carico, il comportamento reologico dei materiali analizzati è rappresentato da una curva singola.

### ***VI.3.2 Comportamento in funzione della concentrazione solida volumetrica***

Uno degli aspetti più interessanti relativi alla sperimentazione in reometro tradizionale (§ IV.2.5) è stato lo studio della variazione del comportamento reologico delle miscele al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ . L'osservazione critica della relazione esistente tra le caratteristiche reologiche dei materiali e la concentrazione solida volumetrica è stata di fondamentale importanza al fine di definire un intervallo di contenuto solido all'interno del quale le miscele ottenute con i terreni selezionati possono essere considerate come fluidi. Per ognuno dei materiali analizzati, è stato identificato un intervallo di concentrazioni solide volumetriche all'interno del quale i campioni rimangono omogenei per un tempo di osservazione ragionevolmente grande e fluiscono come materiali liquidi. Il comportamento reologico dei materiali campionati è stato, quindi, studiato anche con il reometro a trascinamento di sfera SDR in questo intervallo di concentrazione solida volumetrica. Nelle Figure VI.3 e VI.4 viene mostrata l'evoluzione della curva di flusso di alcuni dei materiali analizzati al crescere delle concentrazioni solida volumetrica. Si nota che, indipendentemente dal terreno considerato, la

resistenza del materiale cresce all'aumentare della concentrazione solida volumetrica.

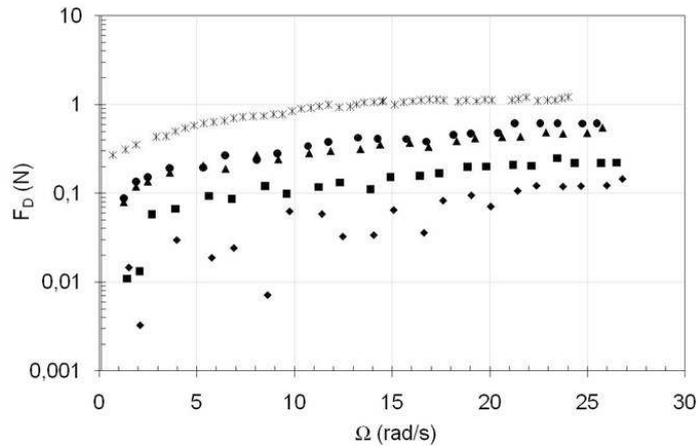


Figura VI.3 Terreno I: comportamento reologico al variare della concentrazione solida volumetrica (asterischi  $\Phi=42\%$ ; cerchi  $\Phi=40\%$ ; triangoli  $\Phi=38\%$ ; quadrati  $\Phi=35\%$ ; rombi  $\Phi=32\%$ )

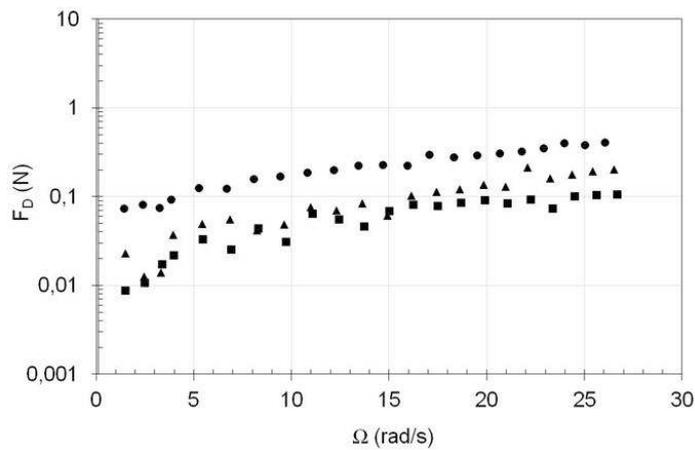
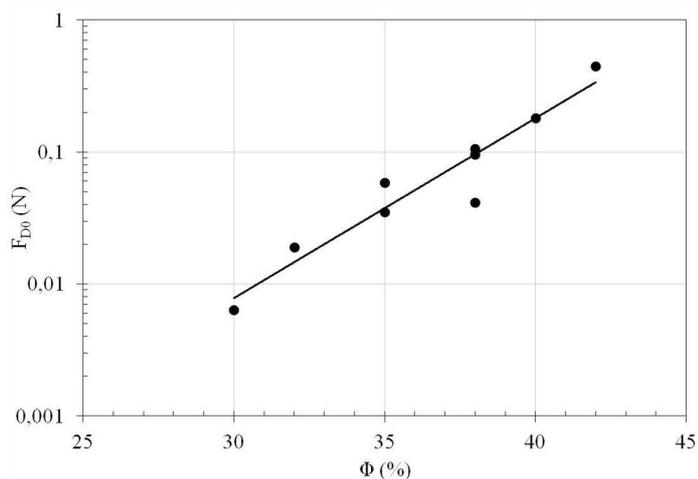


Figura VI.4 Terreno II-8: comportamento reologico al variare della concentrazione solida volumetrica (cerchi  $\Phi=38\%$ ; triangoli  $\Phi=35\%$ ; quadrati  $\Phi=30\%$ ).

La relazione tra la Forza di trascinamento di soglia  $F_{D0}$  e la concentrazione solida volumetrica viene riportata in Figura VI.5. Indipendentemente dal materiale considerato, la Forza di trascinamento di soglia  $F_{D0}$  cresce, con un andamento del tutto simile, al crescere della concentrazione solida secondo una legge di tipo esponenziale. La Forza di trascinamento di soglia  $F_{DC}$  cresce di un ordine di grandezza all'interno del ristretto intervallo di concentrazioni solide volumetriche considerato (minore del 10%), all'interno del quale le miscele acqua-terreno analizzate si comportano come fluidi omogenei.



*Figura VI.5 Terreno I, Terreno II-8, Terreno IV: Forza di trascinamento di soglia  $F_{D0}$  in funzione della concentrazione solida volumetrica. Legge esponenziale (linea continua).*

### **VI.3.3 Interpretazione dei dati sperimentali**

Solitamente per i fluidi dotati di tensione di soglia il modello teorico di Herschel-Bulkley ed il modello di Bingham (§ I.3.2) risultano quelli più appropriati a descrivere la curva di flusso sperimentale nel ramo associato alla rampa crescente di velocità. Nel presente lavoro entrambi i modelli sono stati applicati con successo ai dati sperimentali ottenuti attraverso la sperimentazione in reometro tradizionale (§ IV.2.7 e Appendice B), tuttavia le curve di flusso ottenute attraverso le prove in reometro SDR non consentono l'immediata applicazione dei classici modelli teorici reologici in quanto i dati

sperimentali (Forza di trascinamento e velocità di rotazione) necessitano di un'adeguata conversione in parametri reologici (tensione di taglio e velocità di deformazione). Al fine di ovviare a questo inconveniente e per poter avere una semplice e rapida interpretazione dei dati sperimentali, per ogni materiale analizzato le curve di flusso ottenute dalle prove in reometro SDR sono state interpolate con una legge di potenza e con una legge lineare. Sebbene l'applicazione ai dati sperimentali di una legge di potenza talvolta non abbia dato risultati ottimali, se ne è preferito l'utilizzo rispetto quello di una legge lineare in quanto, in generale, tale legge interpreta meglio l'andamento delle curve di flusso così come mostrato nelle Figure VI.6 e VI.7. Indipendentemente dal materiale analizzato e dalla concentrazione solida volumetrica, dalla modellazione delle curve sperimentali si può affermare che il comportamento reologico delle miscele è riconducibile, nel campo delle velocità indagate, a quello di fluidi Non Newtoniani dotati di tensione di soglia.

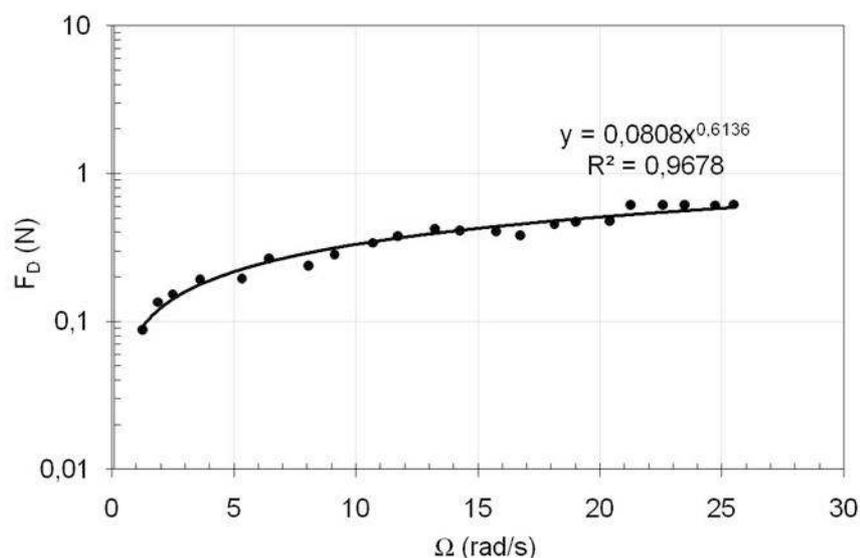


Figura VI.6 Terreno I  $\Phi=40\%$ : punti sperimentali (simboli pieni) e curva interpolatrice di potenza (linea continua)

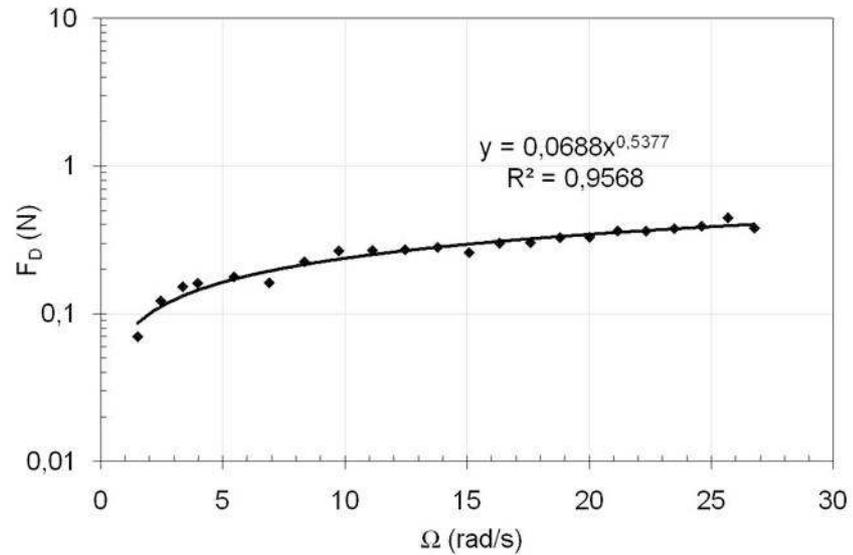


Figura VI.7 Terreno IV(D3ALTO)  $\Phi=40\%$ : punti sperimentali (simboli pieni) e curva interpolatrice di potenza (linea continua)

#### VI.3.4 Conversione dei dati misurati in parametri reologici

I dati sperimentali, forza di trascinamento  $F_D$  (N) e velocità di rotazione  $\Omega$  (rad/s), devono essere convertiti in parametri reologici, tensione di soglia  $\tau$  (Pa) e velocità di deformazione apparente  $\dot{\gamma}_{app}$  ( $s^{-1}$ ), al fine di appurare la bontà del sistema di misura SDR.

E' possibile convertire la velocità di rotazione angolare  $\Omega$  in velocità di deformazione apparente  $\dot{\gamma}_{app}$ . Dai dati sperimentali, la velocità di deformazione apparente può ricavarsi attraverso la seguente relazione (Beaulne & Mitsoulis, 1997):

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{v_{sfera}}{l} \quad (VI.4)$$

Dove  $v_{sfera}$  è la velocità di rotazione espressa in m/s e  $l$  è un parametro legato alla geometria dell'apparecchio ed è pari a 1,35 volte il raggio  $R$  della

sfera utilizzata. Per ricavare la velocità di rotazione  $v$  espressa in m/s dalla velocità di rotazione angolare  $\Omega$  è possibile utilizzare la seguente relazione:

$$v_{sfera} = r \cdot \Omega \quad (VI.5)$$

Dove  $r$  è il raggio della circonferenza descritta dalla sfera durante la rotazione all'interno del materiale ( $d$  è pari a 0,046m).

Una volta convertita la velocità angolare in velocità di deformazione apparente, è possibile costruire una curva sperimentale nella quale la forza di trascinamento  $F_D$ , misurata con il reometro SDR, viene espressa in funzione della velocità di deformazione apparente calcolata a partire dalle misure sperimentali. Al fine di poter confrontare la curva sperimentale ottenuta a partire dai dati misurati con il reometro SDR è necessario costruire una curva teorica utilizzando la teoria di Herschel&Bulkley. Per i fluidi ed i materiali dotati di soglia si ha che:

$$\frac{\tau}{\tau_c} = 1 + \frac{m}{\tau_c} \dot{\gamma}^{n_p} \quad (VI.6)$$

Dove  $\tau$  è maggiore di  $\tau_c$ . Usando questa formulazione in termini di Forza di trascinamento  $F$  si può scrivere che:

$$\frac{F}{F_{D0}} = 1 + \frac{m}{\tau_c} \dot{\gamma}_{app}^{n_p} \quad (VI.7)$$

La forza di trascinamento può, quindi, essere espressa come:

$$F = F_{D0} \left[ 1 + \left( \frac{m}{\tau_c} \right) \dot{\gamma}_{app}^{n_p} \right] \quad (VI.8)$$

Dove  $F_{D0}$  è la forza di trascinamento critica (Beris et al. 1985) che vale:

$$F_{D0} = 4\pi R^2 \tau_c k_c \quad (VI.9)$$

Dove  $R$  è il raggio della sfera utilizzata e  $k_c$  è pari a 3,5 (Beris et al. 1985).

I parametri del modello di Herschel&Bulkley utilizzati per la definizione della curva teorica sono stati ottenuti dalle prove eseguite in reometro tradizionale (Appendice B, § B.3) per ogni materiale analizzato. Al fine di capire l'affidabilità del sistema di misura del reometro SDR, la curva sperimentale è stata confrontata con quella teorica, in termini di Forza di trascinamento e di velocità di deformazione apparente. A titolo di esempio, in Figura VI.8 si riporta il confronto della curva teorica e della curva sperimentale ottenuta per la miscela avente  $\Phi$  pari a 38% ottenuta con il Terreno I. Si osserva che il reometro SDR sovrastima i valori di Forza di trascinamento teorici e questo accade indipendentemente dal materiale testato e dalla concentrazione solida volumetrica considerata.

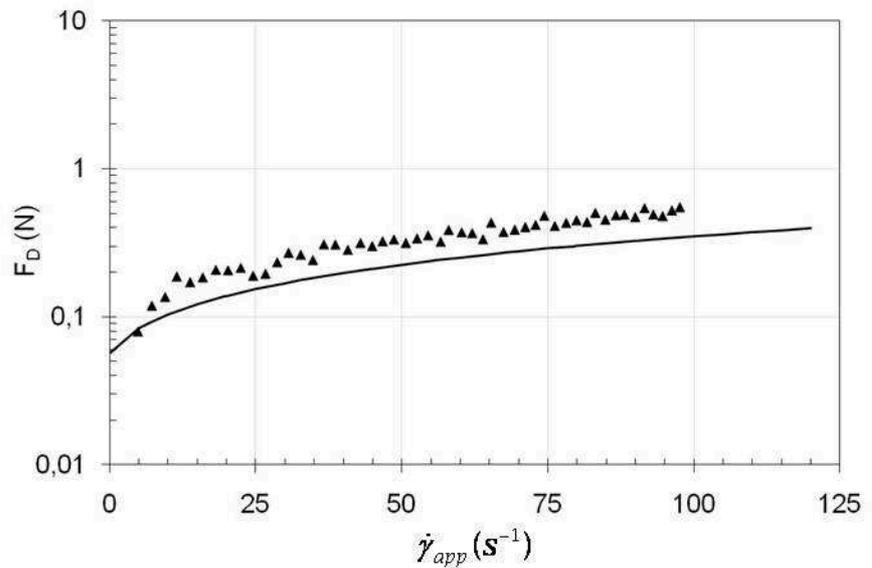


Figura VI.8 Terreno I  $\Phi=38\%$ . Confronto tra la curva teorica misurata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale.

Come illustrato nel capitolo V (§ V.4.2.2), le espressioni teoriche utilizzate per la conversione dei dati (Equazioni VI.4 e VI.9) sono corredate di due parametri,  $k_c$  e  $l$  che dipendono essenzialmente da considerazioni di tipo numerico. Al fine, quindi, di rendere confrontabili le due curve è stato effettuato uno studio parametrico su  $k_c$  e  $l$  che ha permesso di definire la

coppia di valori migliore. In Figura VI.9 viene riportato il confronto tra curva sperimentale e curva teorica per la miscela a concentrazione solida volumetrica pari al 38 % ottenuta con il Terreno I. In tale diagramma la curva sperimentale è stata ricavata cambiando i parametri  $k_c$  e  $l$ ; si vede come vi è una più che buona corrispondenza tra i dati misurati con il reometro SDR, opportunamente convertiti in parametri reologici, e i dati ottenuti attraverso l'applicazione del modello di Herschel&Bulkley alla curva di flusso ricavata dalle prove svolte in reometro tradizionale.

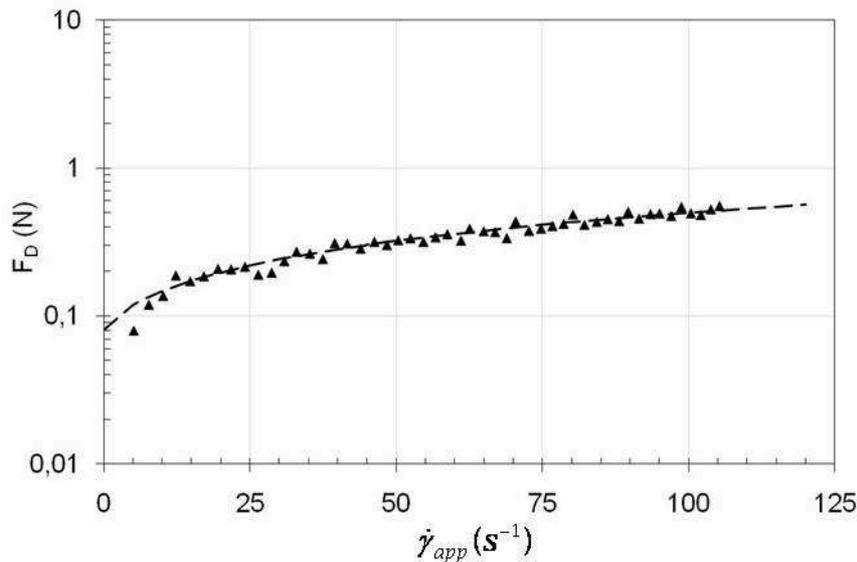


Figura VI.9 Terreno I  $\Phi=38\%$ . Confronto tra la curva teorica misurata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale con valori differenti dei parametri  $k_c$  e  $l$ .

La conversione dei dati sperimentali in parametri reologici è stata eseguita per tutti i Terreni analizzati. In Tabella VI-2 vengono riportati i valori dei parametri  $k_c$  e  $l$  attraverso l'applicazione dei quali è stato possibile trovare una ottimale corrispondenza tra le curve sperimentali e quelle teoriche.

*Tabella VI-2 Valori dei parametri  $k_c$  e  $l$  attraverso i quali è stato possibile ottenere una buona corrispondenza tra curve di flusso teoriche e curve sperimentali*

Terreno	$\Phi$ (%)	$k_c$	$l$
I	32	5,5	1,05
I	35	5	1,05
I	38	5	1,25
I	40	3	1,45
I	42	5,5	1,05
II-8	35	2	1,05
IV(D1ALTO)	35	1	1,05
IV(D1MEDIO)	35	1,7	1,35
IV(D2BASSO)	35	1	1,35
IV(D3ALTO)	35	3	1,35

## **VI.4 RISULTATI SPERIMENTALI DELLE PROVE ESEGUITE SU MISCELE A GRANULOMETRIA GROSSOLANA**

### ***VI.4.1 Risultati preliminari di prove eseguite mediante apparecchiature convenzionali***

Diversi studi sperimentazioni condotti con apparecchiature reometriche tradizionali e non su miscele a granulometria grossolana hanno mostrato che le proprietà reologiche sono influenzate dall'aggiunta di particelle grossolane al fluido interstiziale (Coussot & Piau,1995; Contreras & Davies, 2000; Schatzmann 2005). Quindi, i parametri reologici determinati per miscele a granulometria fine utilizzando reometri convenzionali non rappresentano il comportamento reologico del materiale naturale nella sua totalità. Da qui la necessità di sottoporre a prova miscele che comprendano l'interno assortimento granulometrico o le frazioni più significative di esso. Nella sperimentazione eseguita con sistemi di misura tradizionali sono state effettuate alcune prove su miscele a granulometria grossolana al fine di valutare, in via del tutto preliminare, l'influenza dell'assortimento granulometrico sul comportamento reologico delle miscele acqua-sedimento

analizzate. Sono state ricostituite miscele a differente contenuto solido e a differente assortimento granulometrico utilizzando il Terreno II-4. Tali miscele sono state sottoposte a prova con il reometro rotazionale e con il piano inclinato. Le prove in reometro rotazionale sono state eseguite su due miscele: una a granulometria fine ( $d_{\max}=0,1\text{mm}$ ) ad una concentrazione solida totale uguale a quella delle particelle fini ( $\Phi_T=\Phi_f=30\%$ ) ed un'altra a granulometria grossolana ( $d_{\max}=0,5\text{mm}$ ) avente concentrazione solida totale  $\Phi_T$  pari al 30%, concentrazione solida di particelle fini  $\Phi_f$  pari al 20% e concentrazione solida di particelle grossolane  $\Phi_g$  pari al 10%. Le prove su piano inclinato sono state eseguite su miscele a granulometria grossolana ( $d_{\max}<10\text{mm}$ ) ricostituite a differente concentrazione solida volumetrica di particelle grosse. Mediante il piano inclinato sono state effettuate due tipologie di prova:

- ~ prove di scorrimento su miscele aventi uguale concentrazione solida volumetrica totale  $\Phi_T$  ma concentrazioni solide volumetriche di particelle fini  $\Phi_f$  e concentrazioni solide volumetriche di particelle grossolane  $\Phi_g$  variabile secondo il programma sperimentale illustrato in Tabella V-1. Attraverso tali prove è stata studiata la variazione del comportamento reologico in funzione del decremento della frazione fine all'interno della miscela e della contemporanea aggiunta di materiale grossolano;
- ~ prove di scorrimento su miscele aventi uguale concentrazione solida volumetrica di particelle fini  $\Phi_f$  ma concentrazioni solide volumetriche totali  $\Phi_T$  e concentrazioni solide volumetriche di particelle grossolane  $\Phi_g$  variabile secondo il programma sperimentale illustrato in Tabella VI-21. Attraverso tali prove è stata studiata la variazione del comportamento reologico della miscela in funzione della variazione di particelle grossolane a parità di concentrazione solida volumetrica di particelle fini.

La Figura VI.10 mostra le curve di flusso ricavate attraverso le prove eseguite in reometro rotazionale sulle miscele a granulometria fine e grossolana. Si nota che, sebbene il comportamento reologico sia lo stesso, tuttavia i parametri reologici diminuiscono al crescere dell'assortimento granulometrico. Infatti, a parità di concentrazione solida totale, la curva di flusso della miscela a granulometria grossolana (simboli vuoti in Figura VI.10) si trova al di sotto di quella della miscela a granulometria fine (simboli pieni in Figura VI.10). Tale fenomeno è probabilmente dovuto alla diminuzione del contenuto di materiale fine all'interno della miscela a causa

dell'aggiunta di particelle di dimensioni maggiori. Un comportamento simile è stato già osservato in diverse sperimentazioni condotte con sistemi di misura tradizionali su miscele di argilla fine e particelle grossolane (Ancy & Jorrot 2001). Si è visto che al crescere dell'assortimento granulometrico (e quindi al diminuire della frazione fine) il valore dei parametri reologici diminuisce se la frazione di particelle grossolane è esigua rispetto al contenuto di materiale fine (inferiore o al massimo uguale al 10%).

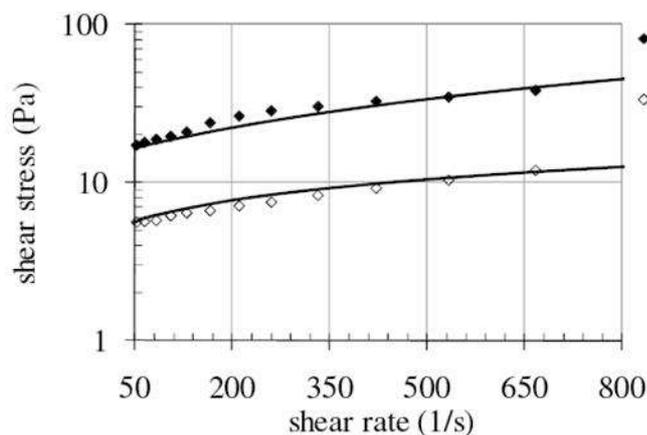


Figura VI.10 Terreno II-4 ( $\Phi_T=30\%$ ). Curve di flusso di una miscela a granulometria fine ( $\Phi_f= \Phi_T=30\%$ ) (simboli pieni) ed un'altra a granulometria grossolana ( $\Phi_f=20\%$  e  $\Phi_g=10\%$ ) (simboli vuoti).

I risultati sperimentali ottenuti mediante le prove di scorrimento su piano inclinato possono aiutare a chiarire tale aspetto. In Figura VI.11 sono riportati i risultati sperimentali relativi alla prove di scorrimento su piano inclinato effettuate su miscele aventi uguale concentrazione solida totale  $\Phi_T$  ma variabile contenuto di particelle fini  $\Phi_f$  e di particelle grossolane  $\Phi_g$ . In tale diagramma i valori misurati della tensione di soglia statica e della tensione di soglia dinamica sono espressi in funzione del rapporto tra la concentrazione solida volumetrica totale della miscela e la concentrazione solida volumetrica di particelle fini. Si nota che, a parità di concentrazione solida totale, il decremento della frazione fine causa una diminuzione del valore dei parametri reologici nonostante la crescente presenza di particelle grossolane all'interno delle miscele. L'andamento dei dati mostra che i valori della tensione di soglia

statica e di quella dinamica si riducono enormemente (alcune decine di Pa) quando la concentrazione solida volumetrica di particelle grossolane è piccola rispetto quella di particelle fini ( $\Phi_f=20-22\%$  e  $\Phi_g=8-10\%$ ). All'aumentare della concentrazione di particelle grossolane nella miscela ( $\Phi_f=14-16\%$  e  $\Phi_g=16-18\%$ ) i parametri reologici diminuiscono ma in maniera molto meno significativa (alcuni Pa).

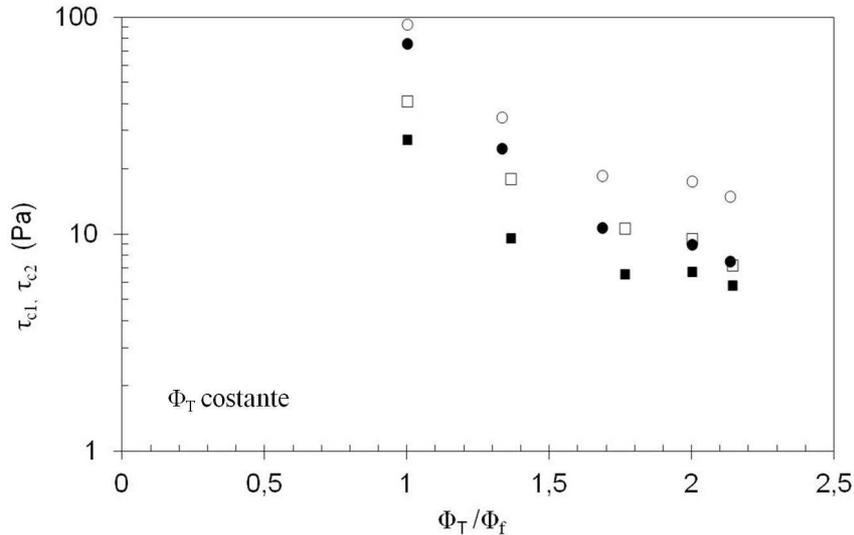


Figura VI.11 Terreno II-4 ( $\Phi_T = \text{costante} = 30\%$  e  $32\%$ ). Tensione di soglia statica (simboli vuoti) e tensione di soglia dinamica (simboli pieni) in funzione del rapporto tra la concentrazione solida totale e quella di particelle fini.

In Figura VI.12 sono riportati i risultati sperimentali relativi alle prove di scorrimento su piano inclinato effettuate su miscele aventi uguale concentrazione solida di particelle fini  $\Phi_f$  ma variabile contenuto di particelle grossolane  $\Phi_g$  e, quindi, differente concentrazione solida totale  $\Phi_T$ . Anche in tale diagramma i valori misurati della tensione di soglia statica e della tensione di soglia dinamica sono espressi in funzione del rapporto tra la concentrazione solida volumetrica totale della miscela e la concentrazione solida volumetrica di particelle fini. Si osserva che, a parità di contenuto di particelle fini, l'incremento della concentrazione solida volumetrica di particelle grossolane (tipicamente 8-20%) causa un aumento significativo del valore dei parametri reologici (alcune decine di Pa). I risultati sperimentali

delle prove eseguite su piano inclinato confermano quanto osservato con le prove in reometro rotazionale e cioè che, a parità di concentrazione solida totale, la presenza di ridotte quantità di particelle grossolane all'interno delle miscele produce un decremento dei valori dei parametri reologici. Tuttavia, si è visto anche che, a parità di concentrazione solida di particelle fini, l'aggiunta delle frazioni di materiale grosso provoca un significativo incremento dei valori dei parametri reologici.

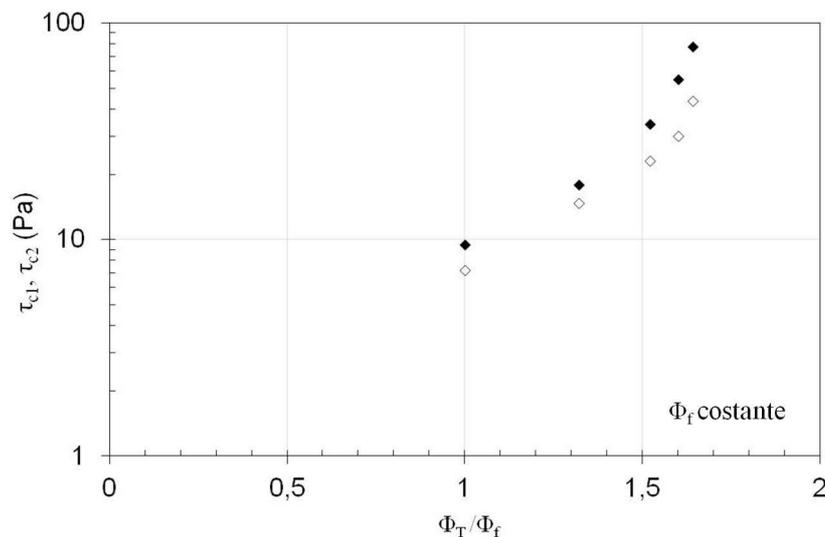


Figura VI.12 Terreno II-4 ( $\Phi_f=costante=25\%$ ). Tensione di soglia statica (simboli pieni) e tensione di soglia dinamica (simboli vuoti) in funzione del rapporto tra la concentrazione solida totale e quella di particelle fini.

Alcuni autori hanno mostrato che il comportamento reologico delle miscele acqua-sedimento è influenzato principalmente dal contenuto in argilla del terreno ma che la concentrazione solida volumetrica e la distribuzione granulometrica influenzano i valori dei parametri reologici. La tensione di soglia varia con la concentrazione volumetrica di particelle grossolane (Coussot & Piau, 1995; Ancey & Jorrot, 2001; Ancey, 2003). Secondo tali autori, anche minime differenze nella distribuzione granulometrica della miscela possono cambiare il comportamento reologico del materiale durante il flusso: aggiungendo una modesta quantità di particelle grossolane ad una dispersione di particelle fini, il volume occupato dalle particelle colloidali diminuisce e la tensione di soglia della sospensione decresce. Al crescere però

della concentrazione solida volumetrica di particelle grossolane la tensione di soglia comincia a crescere (Malet et al., 2003). Al fine di indagare il comportamento reologico delle miscele acqua-sedimento al variare della granulometria dei terreni analizzati, sono state effettuate una serie di prove con il reometro a trascinamento di sfera SDR (Sphere Drag Rheometer) considerando tutta o quasi la curva granulometrica (particelle con diametri massimi fino a 10mm). Sono stati indagati, a parità di miscela, gli effetti della concentrazione solida volumetrica e, a parità di concentrazione, del differente assortimento granulometrico.

#### VI.4.2 Prove di flusso

I risultati che sono stati ricavati da una prova di flusso eseguita con il reometro a trascinamento di sfera SDR sulle miscele acqua-terreno a granulometria grossolana ( $d_{max} < 10mm$ ) sono riportati nelle Figure VI.13 e VI.14. Anche per le miscele a granulometria grossolana l'applicazione della rampa crescente di velocità di rotazione definisce il ramo ascendente della curva di flusso che corrisponde al comportamento del materiale nel regime liquido: la transizione al regime liquido è associata ad un valore critico della Forza di trascinamento, ossia alla Forza di trascinamento statica di soglia  $F_{D1}$ .

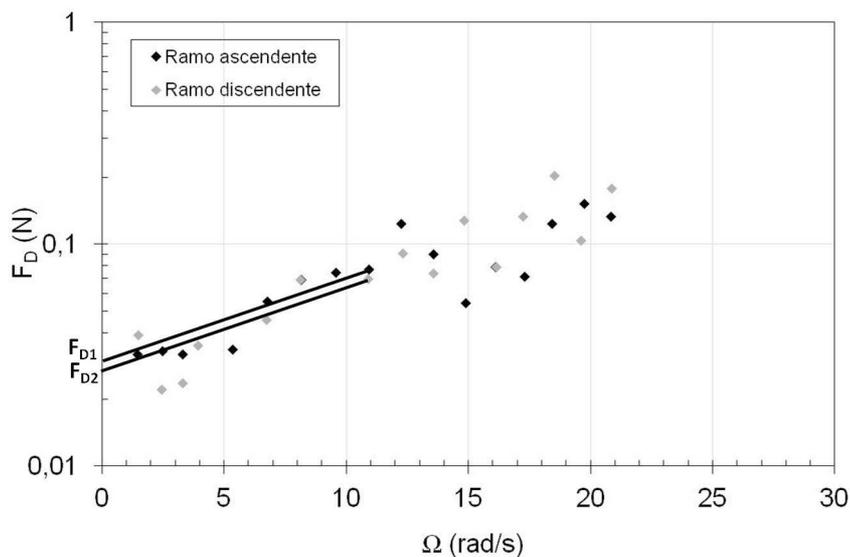


Figura VI.13 Terreno IV(D3ALTO)  $\Phi=35\%$   $d_{max}=10mm$ .

L'applicazione della rampa decrescente di velocità di rotazione definisce il secondo ramo della curva di flusso che segue approssimativamente l'andamento di quello associato alla rampa di velocità crescente fino all'arresto di flusso. La transizione del materiale dal regime liquido è associata ad un valore critico della Forza di trascinamento, ossia alla Forza di trascinamento dinamica di soglia. Nella quasi totalità delle prove eseguite con il reometro SDR, indipendentemente dal materiale analizzato e dalla concentrazione solida volumetrica considerata, si è osservato che il ramo decrescente della curva di flusso non differisce significativamente dal ramo crescente della curva. Tale risultato è in accordo con quanto osservato dai risultati relativi alle prove di flusso condotte sulle miscele a granulometria fine.

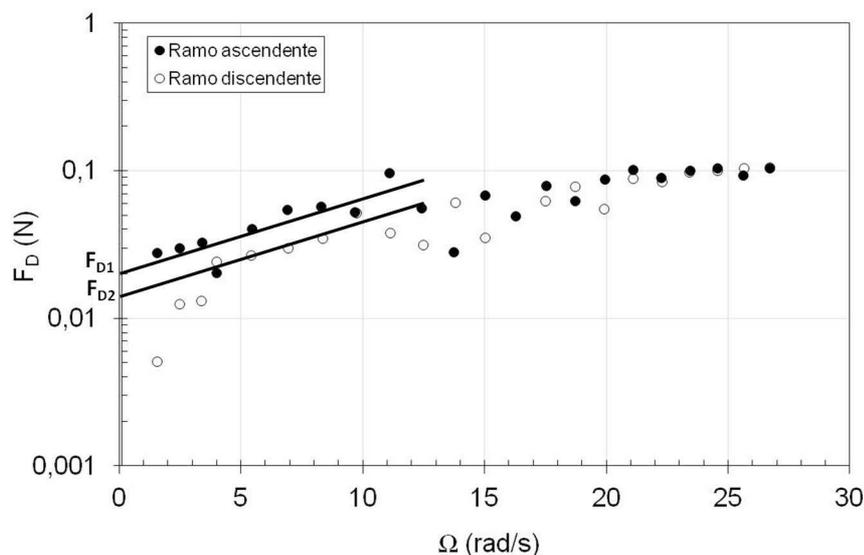


Figura VI.14 Terreno II-8  $\Phi=35\%$ .  $d_{max}=10mm$ .

In Figura VI.15 è riportato il confronto tra le curve di flusso ottenute per le miscele a granulometria fine e le miscele a granulometria grossolana ( $d_{max}<5mm$ ) per il materiale II-8. Si osserva che, a parità di concentrazione solida volumetrica totale, si ha una riduzione della forza di trascinamento al crescere dell'assortimento granulometrico, indipendentemente dal materiale testato e dalla concentrazione solida volumetrica considerata.

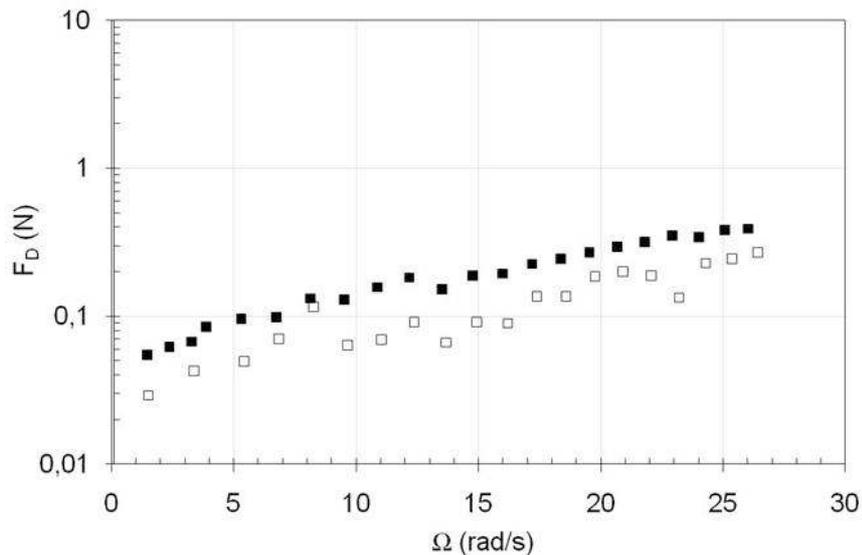


Figura VI.15 Terreno II-8 ( $\Phi_T=38\%$ ). Confronto tra le curve di flusso della miscela a granulometria fine (simboli pieni) e della miscela a granulometria grossolana ( $d_{max}<5mm$ , simboli vuoti).

Se si considera che l'aggiunta della frazione di particelle con diametro minore di 5mm corrisponde ad una concentrazione solida volumetrica di particelle grossolane  $\Phi_g$  pari all'8% circa dell'intera concentrazione solida totale, questo risultato diventa coerente con diverse osservazioni sperimentali pregresse (Wildemuth & Willimas, 1985; Coussot, 1999; Coussot & Piau, 1995; Coussot et al., 1996; Mansoutre, 1999; Ancey & Jorrot, 2001).e con i risultati sperimentali ottenuti nel presente lavoro attraverso prove su miscele a granulometria grossolana con sistemi di misura convenzionali (§ VI.4.1). L'aggiunta di particelle grossolane provoca solitamente un incremento delle caratteristiche reologiche della miscela nel suo insieme ma, per valori relativamente bassi della concentrazione solida volumetrica totale, come per i valori considerati nel presente lavoro, un minimo impoverimento in particelle fini all'interno della miscela non sembra essere sufficiente ad indurre un aumento dei parametri reologici.

#### VI.4.3 *Comportamento in funzione della concentrazione solida volumetrica*

Uno degli aspetti più interessanti relativi alla sperimentazione in reometro tradizionale ed in reometro innovativo su miscele a granulometria fine (§ IV.2.5) è stato lo studio della variazione del comportamento reologico delle miscele al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ . Una volta determinato l'intervallo di contenuto solido all'interno del quale le miscele ottenute con i terreni selezionati possono essere considerate come fluidi (§ VI.2.1) si è visto che i parametri reologici delle miscele granulometria fine crescono al crescere della concentrazione solida volumetrica. Il medesimo andamento è stato riscontrato anche per le miscele a granulometria grossolana. Nelle Figure VI.16 e VI.17 sono riportate le curve di flusso ottenute per il Terreno I e per il Terreno II-3 al variare della concentrazione solida volumetrica. Si osserva nel complesso che le caratteristiche reologiche delle miscele aumentano all'aumentare della concentrazione solida volumetrica.

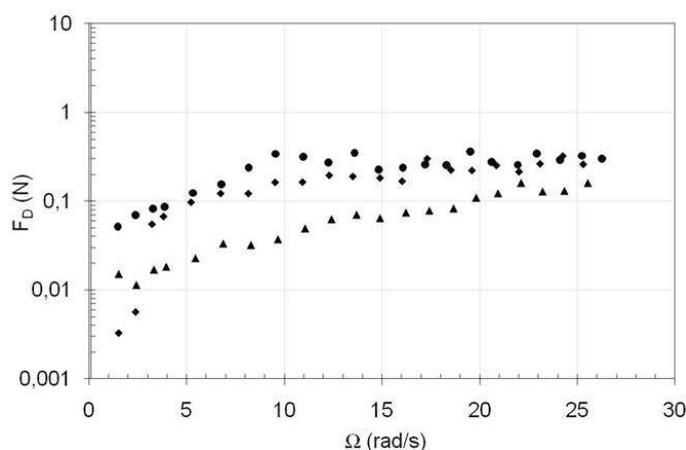


Figura VI.16 Terreno I. Comportamento al variare della concentrazione solida volumetrica (cerchi  $\Phi=40\%$ ; rombi  $\Phi=38\%$ ; triangoli  $\Phi=35\%$ ).

La relazione tra la Forza di trascinamento di soglia  $F_{D0}$  e la concentrazione solida volumetrica viene riportata in Figura VI.18. Indipendentemente dal materiale considerato, la Forza di trascinamento di soglia  $F_{D0}$  cresce, con un andamento del tutto simile, al crescere della concentrazione solida secondo una legge di tipo esponenziale. La Forza di trascinamento di soglia  $F_{D0}$  cresce di quasi un ordine di grandezza all'interno del ristretto intervallo di concentrazioni solide volumetriche considerato (minore del 10%), all'interno

del quale le miscele acqua-terreno analizzate si comportano come fluidi omogenei.

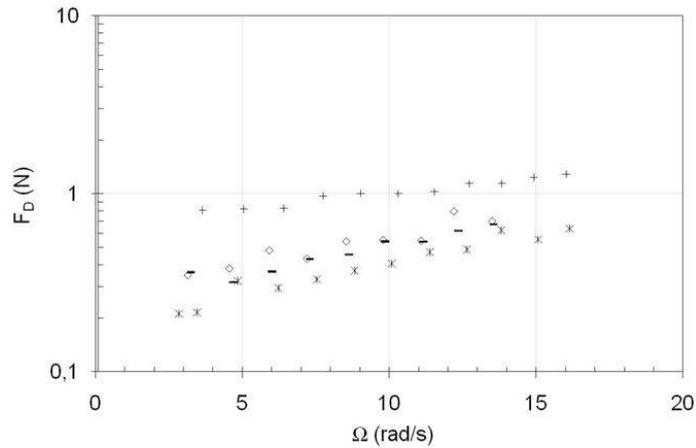


Figura VI.17 Terreno II-3. Comportamento al variare della concentrazione solida volumetrica Terreno I. Comportamento al variare della concentrazione solida volumetrica (croci  $\Phi=100\%$ ; rombi  $\Phi=40\%$ ; trattini  $\Phi=38\%$ ; asterischi  $\Phi=35\%$ ).

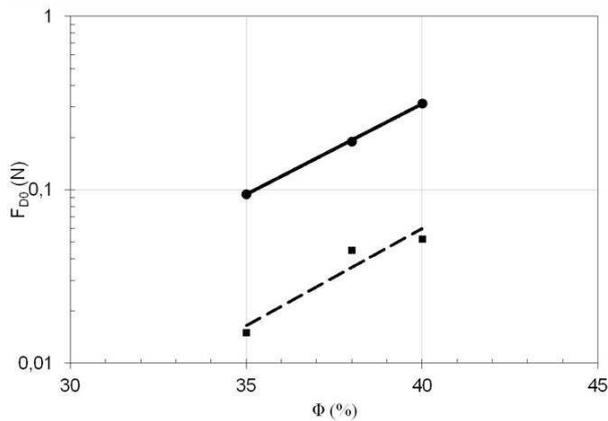


Figura VI.18 Terreno I (rettangoli) e Terreno II-3 (cerchi):  $F_{D0}$  in funzione della concentrazione solida volumetrica. Legge esponenziale (Terreno I linea continua e Terreno II-3 linea tratteggiata).

#### VI.4.4 Interpretazione dei risultati sperimentali

Nel presente lavoro il modello teorico di Herschel-Bulkley ed il modello di Bingham (§ I.3.2) Sono stati applicati con successo ai dati sperimentali ottenuti attraverso la sperimentazione in reometro tradizionale (§ IV.2.7), tuttavia le curve di flusso ottenute attraverso le prove in reometro SDR non consentono l'immediata applicazione dei classici modelli teorici reologici in quanto i dati sperimentali (Forza di trascinamento e velocità di rotazione) necessitano di un'adeguata conversione in parametri reologici (tensione di taglio e velocità di deformazione). Al fine di ovviare a questo inconveniente e per poter avere una semplice e rapida interpretazione dei dati sperimentali, per ogni materiale analizzato le curve di flusso ottenute dalle prove in reometro SDR sono state interpolate con una legge di potenza e con una legge lineare. Sebbene l'applicazione ai dati sperimentali di una legge di potenza talvolta non abbia dato risultati ottimali, se ne è preferito l'utilizzo rispetto quello di una legge lineare in quanto, in generale, tale legge interpreta meglio l'andamento delle curve di flusso.

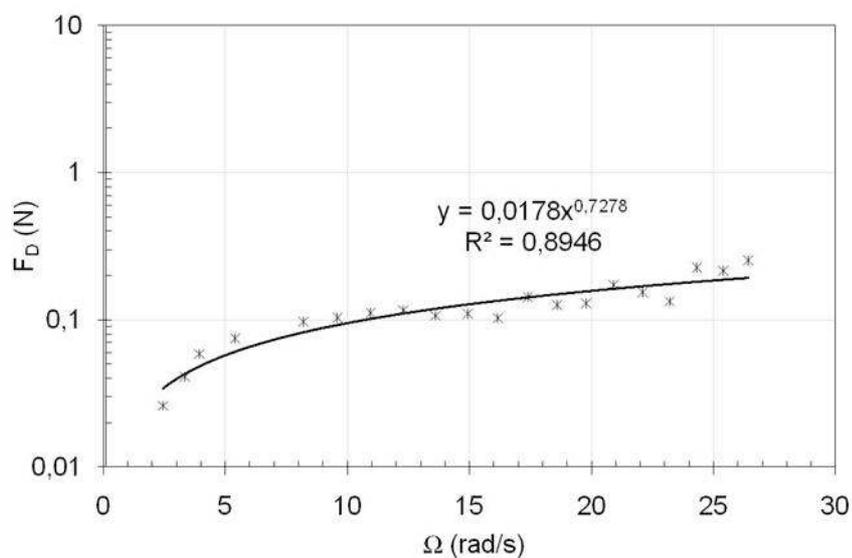


Figura VI.19 Terreno II-8  $\Phi=38\%$ : punti sperimentali (asterischi) e curva interpolatrice di potenza (linea continua)

In Figura VI.19 è riportata la curva di flusso relativa al Terreno II-8 considerando la granulometria con particelle di diametro minore di 5mm e la sola concentrazione solida volumetrica del 38 %. Si nota che il materiale si comporta come un fluido non Newtoniano dotato di tensione di soglia anche nel caso di incremento delle dimensioni delle particelle solide contenute nella miscela e questo comportamento è indipendente dal tipo di terreno e dalla concentrazione solida volumetrica considerata.

#### **VI.4.5 Conversione dei dati misurati in parametri reologici**

I dati sperimentali, forza di trascinamento  $F_D$  (N) e velocità di rotazione  $\Omega$  (rad/s), devono essere convertiti in parametri reologici, tensione di soglia  $\tau$  (Pa) e velocità di deformazione apparente  $\dot{\gamma}_{app}$  ( $s^{-1}$ ), al fine di appurare la bontà del sistema di misura SDR. La procedura di conversione dei dati misurati in parametri reologici è la medesima utilizzata per le miscele a granulometria fine e descritte nei paragrafi precedenti (§ VI.3.4). La velocità di rotazione angolare  $\Omega$  viene convertita in velocità di deformazione apparente  $\dot{\gamma}_{app}$  attraverso la relazione VI.4 (Beaulne & Mitsoulis, 1997). Una volta convertita la velocità angolare in velocità di deformazione apparente, è possibile costruire una curva sperimentale nella quale la forza di trascinamento  $F_D$ , misurata con il reometro SDR, viene espressa in funzione della velocità di deformazione apparente calcolata a partire dalle misure sperimentali. Al fine di poter confrontare la curva sperimentale ottenuta a partire dai dati misurati con il reometro SDR è necessario costruire una curva teorica utilizzando la teoria di Herschel&Bulkley e le equazioni VI.6, VI.7, VI.8 E VI.9. (Beris et al. 1985).

I parametri del modello di Herschel&Bulkley da utilizzati per la definizione della curva teorica devono essere calcolati attraverso prove eseguite in reometro tradizionale. Per le miscele a granulometria grossolana non è stato possibile eseguire delle prove con reometro convenzionale, data la notevole dimensione dei granelli. Tuttavia la conversione dei dati è stata operata tenendo conto dei soli dati sperimentali ottenuti con l'apparecchiatura SDR.

Al fine di capire l'affidabilità del sistema di misura del reometro SDR, la curva sperimentale è stata confrontata con quella teorica, in termini di Forza di

trascinamento e di velocità di deformazione apparente. In Figura VI.20 si riporta il confronto della curva teorica e della curva sperimentale ottenuta per il Terreno II-3 ( $\Phi$  pari a 38%). Si osserva che il reometro SDR sottostima i valori di Forza di trascinamento teorici.

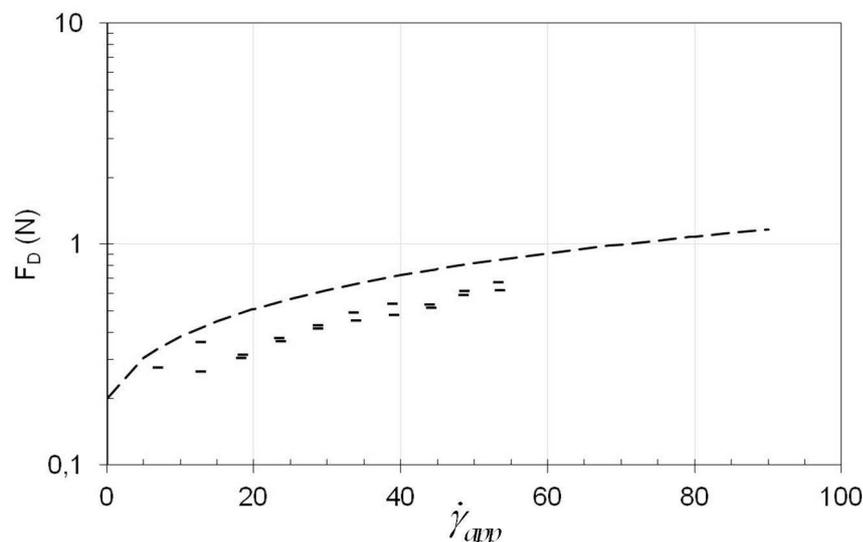


Figura VI.20 Terreno II-3  $\Phi=38\%$ . Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) misurata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (trattini).

Come illustrato nel capitolo V (§ V.4.2.2), le espressioni teoriche utilizzate per la conversione dei dati (Equazioni VI.4 e VI.9) sono corredate di due parametri,  $k_c$  e  $l$  che dipendono essenzialmente da considerazioni di tipo numerico. Al fine, quindi, di rendere confrontabili le due curve è stato effettuato uno studio parametrico su  $k_c$  e  $l$  che ha permesso di definire la coppia di valori migliore. In Figura VI.21 viene riportato il confronto tra curva sperimentale e curva teorica per la miscela a concentrazione solida volumetrica pari al 38 % ottenuta con il Terreno I. In tale diagramma la curva sperimentale è stata ricavata cambiando i parametri  $k_c$  e  $l$ ; si vede come vi è una più che buona corrispondenza tra i dati misurati con il reometro SDR, opportunamente convertiti in parametri reologici ed i dati ottenuti attraverso

l'applicazione del modello di Herschel&Bulkley alla curva di flusso ricavata dalle prove svolte in reometro tradizionale.

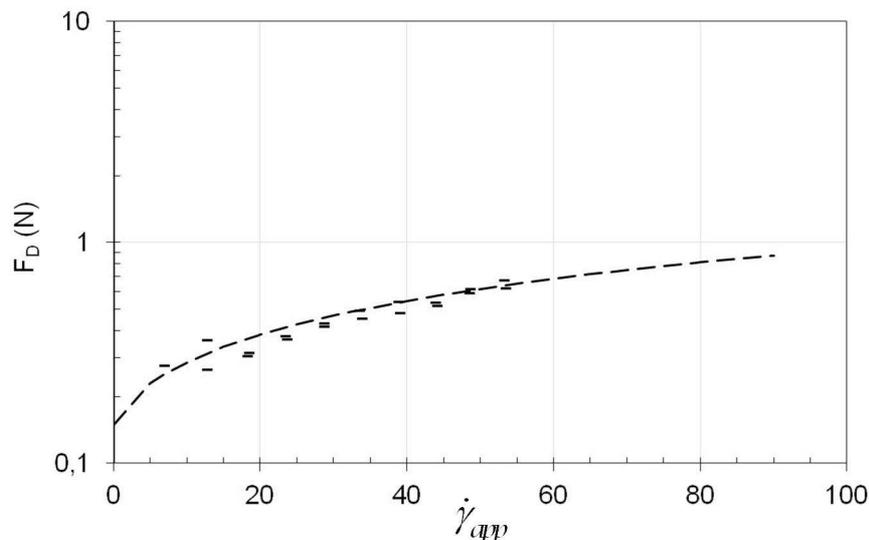


Figura VI.21 Terreno II-3  $\Phi=38\%$ . Confronto tra la curva teorica (linea tratteggiata) misurata tramite la teoria di conversione (Beris et. al., 1985) e la curva sperimentale (trattini) con valori differenti dei parametri  $k_c$  e  $l$ .

In Tabella VI-3 vengono illustrati i valori dei parametri  $k_c$  e  $l$  attraverso l'applicazione dei quali è stato possibile trovare una ottimale corrispondenza tra le curve sperimentali e quelle teoriche.

Tabella VI-3 Valori dei parametri  $k_c$  e  $l$  attraverso i quali è stato possibile ottenere una buona corrispondenza tra curve di flusso teoriche e curve sperimentali

Terreno	$\Phi$ (%)	$k_c$	$l$
II-3	35	2,5	1,15
II-3	38	3	1,30
II-3	40	3,3	1,05

## VI.5 OSSERVAZIONI SUI RISULTATI SPERIMENTALI

I terreni analizzati nel presente lavoro, sebbene provengano tutti dai rilievi dell'Appennino campano, presentano, come già sottolineato, caratteristiche differenti in quanto a composizione granulometrica, natura delle particelle e substrato. A tal fine sembra interessante fare mettere a confronto le curve di flusso della totalità dei materiali campionati, a parità di concentrazione solida volumetrica.

In Figura VI.22 è riportato tale confronto per le miscele a granulometria fine avente concentrazione solida volumetrica totale pari a 35%. In tale diagramma è stata aggiunta anche la curva di flusso ricavata per il caolino al fine di mostrare la differenza tra un materiale molto ricco in argilla ed i terreni piroclastici i quali presentano una porzione argillosa solitamente molto ridotta e talvolta addirittura del tutto assente. Si nota, infatti, che il caolino presenta valori della forza di trascinamento notevolmente superiori a tutti gli altri materiali. I dati sperimentali mostrano che la forza di trascinamento di soglia del caolino è di circa un ordine di grandezza maggiore di quella misurata per i terreni analizzati.

In Figura VI.23, invece, è riportato il confronto tra le curve di flusso dei soli terreni piroclastici, a parità di concentrazione solida volumetrica totale pari a 35% e contenenti la frazione solida con particelle di diametro inferiore a 0,5mm. Si osserva che le miscele acqua-terreno analizzate presentano curve di flusso molto prossime tra di loro, con valori della Forza di trascinamento di soglia piuttosto bassi (non maggiori di 0,09N). La forza di trascinamento, per ciascun campione, è sempre crescente all'aumentare della concentrazione e pertanto i tre terreni piroclastici presentano un comportamento identico da un punto di vista qualitativo. In particolare, si osserva che, a parità di concentrazione solida volumetrica totale, i parametri reologici sono maggiori nei terreni in cui la frazione limo-argillosa è maggiore in accordo con le distribuzioni granulometriche dei campioni analizzati.

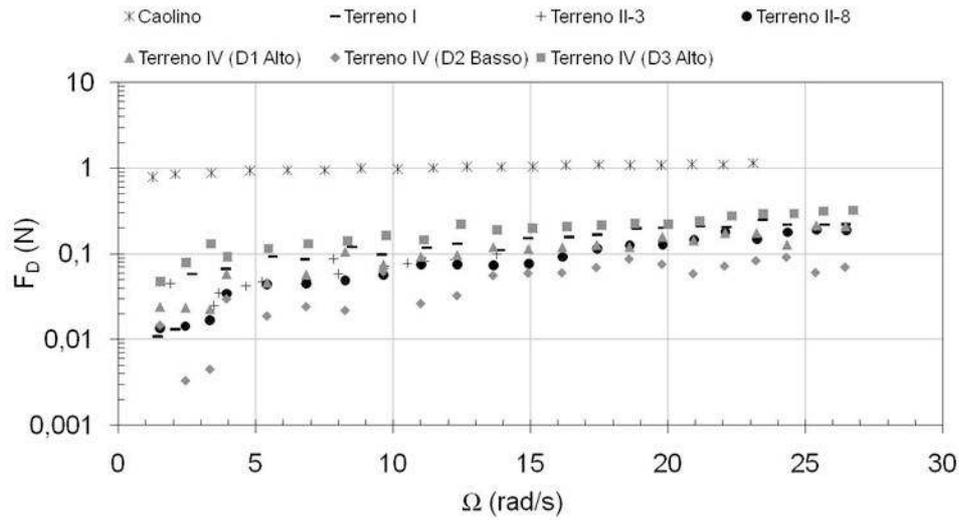


Figura VI.22 Curve di flusso di tutti i Terreni analizzati a parità di concentrazione solida volumetrica ( $\Phi=35\%$ ).

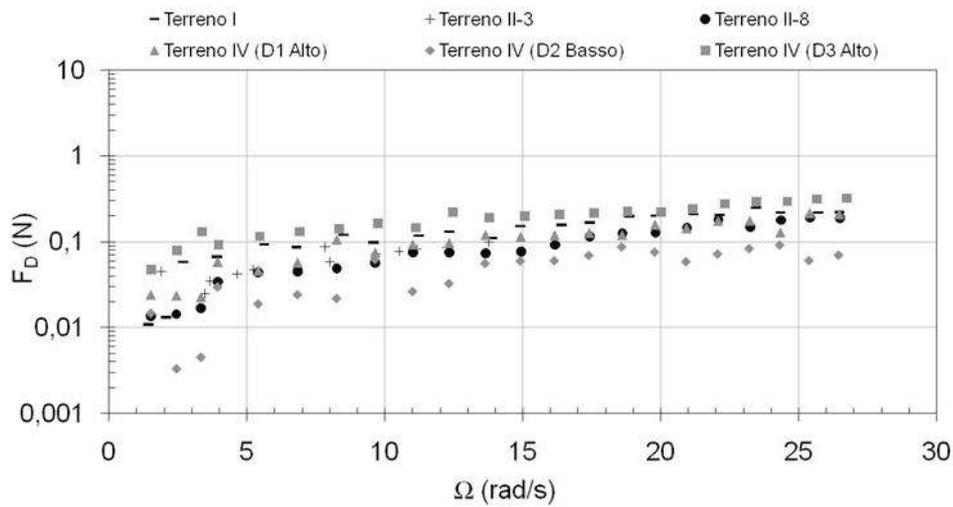


Figura VI.23 Curve di flusso dei soli Terreni piroclastici analizzati a parità di concentrazione solida volumetrica ( $\Phi=35\%$ ).

---

*Capitolo VII*

# Modellazione numerica di un evento di colata rapida di fango avvenuto in Campania

## VII.1 INTRODUZIONE

In passato il modello maggiormente usato per l'analisi di eventi franosi e fenomeni simili è stato quello del blocco rigido su di un piano inclinato (il cosiddetto "lumped mass model"). Negli ultimi anni il modello del "lumped mass" è stato accantonato a favore di modellazioni di tipo numerico, sempre più affinate e basate sulla meccanica del continuo. La prima teoria impostata sul continuo (in grado di descrivere sia l'evoluzione di una massa granulare limitata sia la distribuzione di velocità associata ad una frana in scorrimento su di una superficie inclinata) è stata sviluppata nel 1989 da Savage e Hutter. Gli autori hanno applicato per la prima volta le equazioni del De Saint Venant alle analisi di propagazione di una massa granulare, muovendo i primi passi verso lo sviluppo di numerosi modelli numerici i quali, pur avendo metodi di risoluzione differenti, sono comunque tutti fondati sulla meccanica del continuo e sulle equazioni del Da Saint Venant. Il modello bidimensionale alla base del codice di calcolo DAN-W, usato nel presente lavoro, fa parte di questi modelli. Tale codice, sviluppato dal Oldrich Hungr nel 1995 in Canada, è stato utilizzato per condurre l'analisi a ritroso di un evento di colata rapida di fango avvenuto in Campania, precisamente a Pozzano (NA) nel 1997, un caso storico tristemente noto per le sue caratteristiche catastrofiche (quattro

morti) e ben documentato in letteratura (Di Crescenzo & Santo, 1999; Scotto di Santolo, 2000; Calcaterra & Santo, 2004; Pellegrino, 2007).

## VII.2 ALCUNI ASPETTI TEORICI ALLA BASE DEL CODICE DAN-W

I modelli per l'analisi delle colate rapide basati sulla meccanica del continuo fanno uso di tecniche mutuatae dagli studi idraulici sui flussi dei fluidi non stazionari che si muovono in un canale aperto. Una modellazione tipo è schematicamente rappresentata in Figura VII.1: il materiale granulare viene considerato un corpo continuo, sebbene esso sia un vasto assemblaggio di particelle discrete. Tale assunzione comporta la comparazione della profondità e della lunghezza della massa in scorrimento alle dimensioni di una particella tipica.

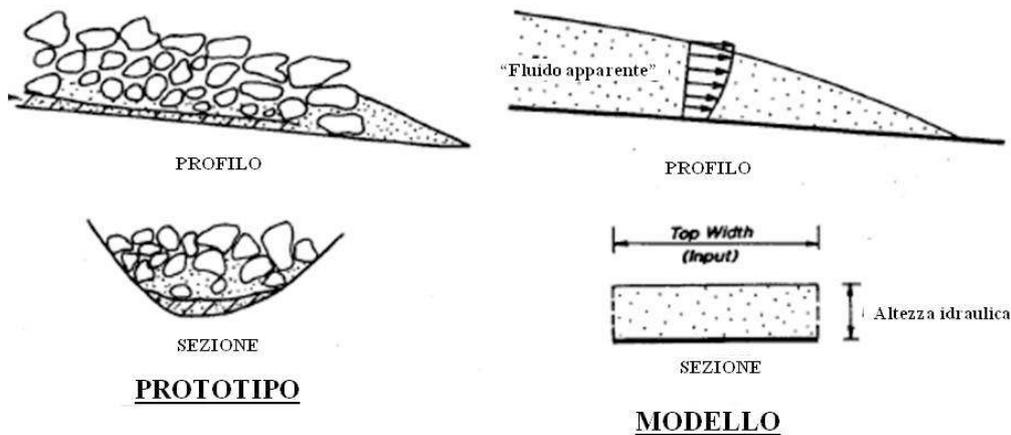


Figura VII.1 Illustrazione di un modello di colata basato sulla meccanica del continuo. La massa in scorrimento è riprodotta da un fluido equivalente omogeneo (modificato da Hungr, 1995).

Le proprietà costitutive del fluido equivalente possono essere valutate o attraverso prove di laboratorio in reometro o possono essere stimate dalle analisi a ritroso condotte su casi storici presenti in letteratura.

Tra i modelli basati sulla meccanica del continuo, un approccio atto a descrivere l'instabilità di un flusso non uniforme su una geometria complicata

(in cui lo spessore della colata,  $h_{\text{flusso}}$ , risulta molto minore rispetto all'estensione totale del canale,  $L_C$ ) è quello che si rifà al concetto di valore medio del de Saint Venant (Figura VII.2). Si assume il materiale incompressibile e il valore medio permette di evitare una descrizione tridimensionale completa del flusso: la complicata reologia del materiale granulare viene inglobata in un unico termine che descrive lo sforzo attritivo che si sviluppa all'interfaccia tra il materiale che scorre e la superficie scabra.

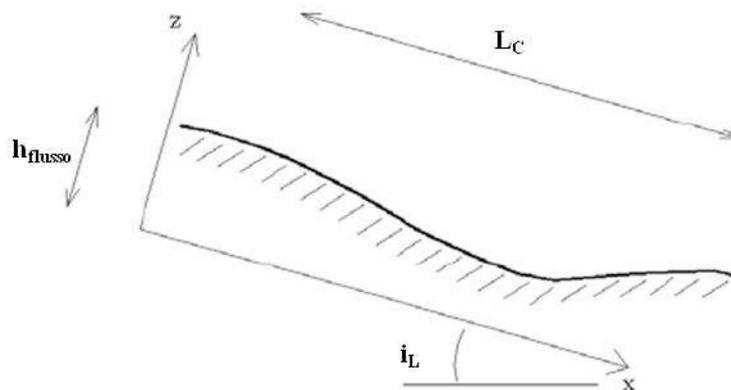


Figura VII.2 Schematizzazione del flusso di una colata rapida secondo il concetto di valore medio del De Saint Venant (da Pirulli, 2007).

Le equazioni relative al valore medio nel contesto dei flussi granulari sono state introdotte da Savage & Hutter (1989). Prendendo spunto dall'approccio di Savage & Hutter, Hungr (1995) sviluppò un modello per l'analisi delle colate rapide basato sulla soluzione lagrangiana delle equazioni del moto. Tale modello costituisce la base del codice di calcolo DAN-W, dell'utilizzo del quale si avvale questo lavoro di tesi. Il codice di calcolo DAN-W nasce inizialmente come estensione del modello del "lumped mass", nel quale la massa in scorrimento veniva rappresentata da una serie di blocchi a contatto gli uni con gli altri, liberi di deformarsi, il cui volume restava costante durante lo scivolamento della massa lungo la superficie di propagazione del moto. L'autore organizza formalmente questo concetto elaborando una soluzione lagrangiana alle differenze finite delle equazioni dell'Idrodinamica di estrema semplicità. La soluzione è referenziata in coordinate curvilinee e l'equazione del momento, integrata in direzione verticale, è applicata agli elementini finiti

(boundary blocks) con cui viene discretizzato il flusso. L'equazione di continuità viene, invece applicata ai blocchi di volume costante (mass blocks) che separano i boundary blocks (Figura VII.3).

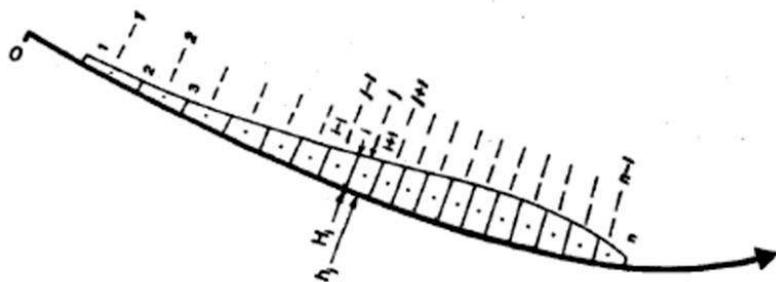


Figura VII.3 Discretizzazione lagrangiana in coordinate curvilinee. I boundary blocks sono numerati con  $i=1,2,\dots,n$  mentre i mass blocks con  $j=1,2,\dots,n-1$  (da Hungr, 1995).

Le incognite del problema sono in numero di  $(2n - 1)$  e comprendono sia lo spostamento longitudinale dei boundary blocks sia l'altezza media dei mass blocks, misurata in direzione normale alla curvatura del profilo. Il problema risulta staticamente determinato in quanto le equazioni del moto disponibili per i boundary blocks e le equazioni di continuità per i mass blocks sono anch'esse in numero di  $(2n - 1)$ . Altri parametri presenti nella formulazione vengono determinati attraverso processi di interpolazione basati sull'ipotesi di assenza di scabrezza sia della superficie del flusso sia di quella del canale. La soluzione è esplicita e viene calcolata per intervalli di tempo successivi a partire dalle condizioni iniziali a riposo della massa.

Il codice è dotato di otto differenti modelli reologici: modello perfettamente plastico, modello attritivo, modello Newtoniano (flusso laminare), modello per flusso turbolento, modello di Bingham, modello di Coulomb, modello di Voellmy e modello di potenza (Power Law). La forza resistente alla base del flusso  $F_R$  dipende dalla reologia del materiale ed è funzione di una serie di parametri caratteristici del flusso stesso. La relazione funzionale tra la forza resistente e tali parametri si basa sull'assunzione che la tensione di taglio su di un piano tangenziale cresce linearmente con la profondità, misurata in direzione normale al piano stesso. Questa relazione funzionale unitamente all'equazione costitutiva alla base della reologia

adottata determina un profilo di distribuzione della velocità in funzione della profondità ed un'equazione caratteristica della forza  $F_R$ .

Il vantaggio nell'uso di suddetto codice è quello che non è necessario disporre di un DEM (Digital Elevation Model) pre-evento della colata da analizzare; infatti è sufficiente la conoscenza delle caratteristiche geometriche dei versanti, della colata e dei canali.

### VII.3 CASO OGGETTO DI STUDIO: LA COLATA DI POZZANO BIVIO (NA)

Nel presente lavoro è stato analizzato l'evento di colata rapida di fango avvenuto a Pozzano Bivio (Penisola Sorrentina, NA) nel 1997. Il colamento ha coinvolto la zona pedemontana della cittadina di Castellammare di Stabia (NA), i cui versanti sono ricoperti da prodotti piroclastici. L'evento si è verificato il 10 gennaio del 1997, alle 20:15 circa, in seguito a un'intensa precipitazione che ha interessato l'area. La frana ha distrutto una casa privata e invaso la Strada Statale 145, provocando quattro morti, ventidue feriti e la chiusura della strada per circa due mesi.

Tale evento è un caso storico di colata di fango in terreni piroclastici ben documentato in letteratura data la disponibilità di informazioni circa le topografie, le posizioni geografiche, i materiali, le geometrie dei pendii, le forma e le estensioni delle aree di distacco, i volumi delle masse mobilitate ed i percorsi di propagazione (Di Crescenzo & Santo, 1999; Scotto di Santolo, 2000; Calcaterra & Santo, 2004; Pellegrino, 2007). La colata è stata di tipo misto, ossia caratterizzata da un innesco ed una fase di scorrimento iniziale lungo un versante planare, seguiti da una canalizzazione in un bacino trasversale più grande. La morfologia ed il profilo altimetrico dell'evento sono riportati in Figura VII.4.

La massa franata si è mobilitata ad una quota di distacco  $Q_D$  pari a 460m (la località considerata si trova a circa 465m s.l.m) ed ha percorso una distanza dalla zona di alimentazione  $L_P$  pari a 1490m circa (con una zona di accumulo di circa 665m). Misurazioni in sito successive l'evento (Di Crescenzo & Santo, 1999) hanno evidenziato che l'altezza del deposito  $h_D$  è pari a 2,5m ed il piano di deposito ha un'inclinazione  $i_D$  pari a  $7^\circ$ . L'altezza del flusso  $h_{flusso}$  è circa pari a 1,2m e l'inclinazione del letto del canale  $i_L$  è di  $35^\circ$ .



I parametri del modello di Bingham, tensione di soglia  $\tau_c$  e viscosità plastica di Bingham  $\mu_B$ , utilizzato per le simulazioni numeriche sono stati definiti secondo due modalità differenti:

- ~ utilizzando un metodo semplificato per che permette di determinare i parametri reologici a partire dalle grandezze geometriche dell'evento da analizzare, misurate in sito;
- ~ utilizzando i dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscele acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare (§ IV.2.7).

Una volta calcolati i parametri reologici del modello secondo le modalità suddette, le analisi numeriche sono state condotte assegnando al corpo di colata tre modelli differenti:

- ~ il modello A, nel quale la tensione di soglia  $\tau_c$  e la viscosità plastica di Bingham  $\mu_B$  sono state calcolate a partire dalle grandezze geometriche dell'evento da analizzare, misurate in sito;
- ~ il modello B, nel quale la tensione di soglia  $\tau_c$  e la viscosità plastica di Bingham  $\mu_B$  sono state calcolate a partire dall'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscele acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare (§ IV.2.7);
- ~ il modello C nel quale la tensione di soglia è stata calcolata a partire dalle grandezze geometriche dell'evento da analizzare, misurate in sito e la viscosità plastica di Bingham  $\mu_B$  è stata calcolata a partire dall'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscele acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare (§ IV.2.7).

La scelta di effettuare le simulazioni numeriche anche con il modello C è stata dettata dal fatto che, mentre la viscosità è una caratteristica intrinseca del corpo di frana, la tensione di soglia dipende non solo dalle condizioni della massa franante ma anche dalla storia tensionale del terreno in sito.

La comparazione tra i risultati ottenuti dalla simulazione numerica e quelli desunti dalla letteratura è stata basata su due criteri di confronto, uno riguardante la precisione delle distanze percorse e l'altro concernente l'attendibilità dei valori di velocità.

### VII.3.2 Parametri reologici dei modelli utilizzati

#### Modello A

I parametri reologici assegnati al modello A sono stati determinati utilizzando un metodo semplificato basato sulle grandezze geometriche dell'evento di colata da analizzare, misurate in sito. Tale metodo stima i parametri del modello di Bingham (tensione di soglia  $\tau_c$  e viscosità plastica alla Bingham  $\mu_B$ ) da assegnare ad un prototipo di colata di fango applicando le teorie sviluppate da Johnson (1970) e da Coussot (1997) circa i processi di propagazione e deposito di un fluido dotato di tensione di soglia. La tensione di soglia  $\tau_c$  viene calcolata attraverso la seguente relazione:

$$\tau_c = \rho_t \cdot g \cdot h_D \cdot \sin(i_D) \quad (\text{VII.1})$$

Dove  $\rho_t$  è la densità del terreno,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $h_D$  è l'altezza del deposito ed  $i_D$  è l'inclinazione del piano di deposito. La viscosità plastica alla Bingham  $\mu_B$  viene determinata sulla base del valore di tensione di soglia calcolato con l'equazione VII.1, dell'altezza del flusso  $h_{\text{flusso}}$  e della velocità superficiale del corpo di frana della colata di fango considerata,  $v_{\text{flusso}}$ .

L'altezza del flusso  $h_{\text{flusso}}$  di un fluido dotato di tensione di soglia è composta da un termine chiamato altezza di colmo,  $h_{\text{plug}}$ , e da un termine chiamato altezza di taglio,  $h_{\text{shear}}$ , schematicamente rappresentati in Figura VII.5. In tale metodo la distribuzione di velocità all'interno della zona sottoposta a taglio è considerata, per semplicità, lineare.

L'altezza della zona di colmo,  $h_{\text{plug}}$ , viene calcolata con la seguente espressione per colate su versante aperto:

$$h_{\text{plug}} = \frac{\tau_c}{\rho_t \cdot g \cdot \sin(i_L)} \quad (\text{VII.2})$$

Dove  $i_L$  è l'inclinazione del letto. Per colate incanalate, invece, si ha che:

$$h_{\text{plug}} = \frac{2\tau_c}{\rho_t \cdot g \cdot \sin(i_L)} \quad (\text{VII.3})$$

Sulla base del valore dell'altezza  $h_{plug}$ , viene calcolata l'altezza della zona sottoposta a taglio  $h_{shear}$  con la seguente espressione:

$$h_{shear} = h_{flusso} - h_{plug} \quad (VII.4)$$

Per una distribuzione lineare di velocità, la velocità di deformazione apparente  $\dot{\gamma}_{app}$  si calcola come segue:

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{v_{flusso}}{h_{shear}} \quad (VII.5)$$

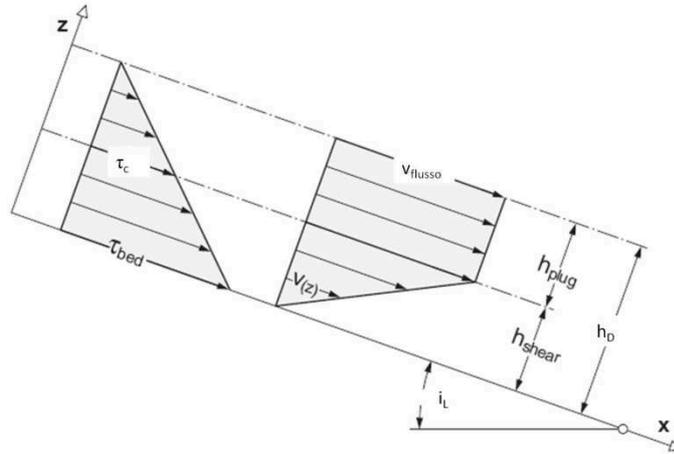


Figura VII.5 Schema semplificato della distribuzione della tensione di taglio e della velocità in una colata rapida di fango durante la fase di propagazione e distinzione della zona di colmo e di quella sottoposta a taglio (modificato da Schatzmann, 2005).

Assumendo che la densità del terreno sia uguale per tutta la profondità del flusso,  $h_{flusso}$ , la tensione di taglio al letto,  $\tau_{bed}$ , si calcola come segue:

$$\tau_{bed} = \rho_t \cdot g \cdot h_{flusso} \cdot \sin(i_L) \quad (VII.6)$$

A questo punto la viscosità plastica alla Bingham  $\mu_B$  viene determinata con la seguente espressione:

$$\mu_B = \frac{\tau_{bed} - \tau_c}{\dot{\gamma}_{app}} \quad (\text{VII.7})$$

La densità del terreno  $\rho_t$  è stata considerata pari a  $2600 \text{ kg/m}^3$ .

Utilizzando la relazione VII.1 è stata calcolata la tensione di soglia  $\tau_c$ :

$$\tau_c = 2600 \cdot 9,81 \cdot 2,5 \cdot \sin(7) = 3112 \text{ Pa}$$

Utilizzando le relazioni VII.2, VII.4, VII.5, VII.6 e VII.7 sono stati calcolati l'altezza della zona di colmo  $h_{plug}$ , l'altezza della zona di taglio  $h_{shear}$ , la velocità di deformazione  $\dot{\gamma}$ , la tensione di taglio al letto  $\tau_{bed}$  e la viscosità plastica alla Bingham  $\mu_B$ :

$$h_{plug} = \frac{3112}{2600 \cdot 9,81 \cdot \sin(35)} = 0,21 \text{ m}$$

$$h_{shear} = 1,2 - 0,21 = 0,987 \text{ m}$$

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{8}{0,98} = 8,10 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau_{bed} = 2600 \cdot 9,81 \cdot 1,2 \cdot \sin(35) = 7029 \text{ Pa}$$

$$\mu_B = \frac{7029 - 3112}{8,10} = 484 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

I parametri del modello A sono, quindi,  $\tau_c=3111 \text{ Pa}$ ,  $\mu_B=483 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

#### *Modello B*

I parametri reologici assegnati al modello B sono stati determinati utilizzando i dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscele acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare (§ IV.2.7). Non avendo a disposizione terreno campionato nella zona di alimentazione della colata di Pozzano, sono stati utilizzati i dati sperimentali relativi al Terreno I, in quanto tale terreno presenta caratteristiche

simili a quello coinvolto nella colata considerata. Sono stati utilizzati i parametri reologici del modello di Bingham impiegato per interpretare i dati sperimentali relativi alla miscela acqua-sedimento avente una concentrazione solida volumetrica  $\Phi$  pari a 42%:  $\tau_c=144\text{Pa}$ ,  $\mu_B=1,8\text{Pa s}$ .

#### *Modello C*

Nel modello C la tensione di soglia è stata calcolata a partire dalle grandezze geometriche dell'evento da analizzare misurate in sito, secondo il medesimo procedimento descritto per il modello A, utilizzando l'equazione VII.1. Il valore assegnato alla tensione di soglia è lo stesso calcolato per il modello A, ossia  $\tau_c=3112\text{Pa}$ . La viscosità plastica di Bingham  $\mu_B$  è stata calcolata a partire dall'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscele acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare (§ IV.2.7). Non avendo a disposizione terreno campionato nella zona di alimentazione della colata di Pozzano, sono stati utilizzati i dati sperimentali relativi al Terreno I, in quanto tale terreno presenta caratteristiche simili a quello coinvolto nella colata considerata. È stata utilizzata la viscosità di Bingham relativa alla miscela acqua-sedimento avente una concentrazione solida volumetrica  $\Phi$  pari a 42%, ossia  $\mu_B=1,8\text{Pa s}$ .

## **VII.4 RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE**

Le simulazioni numeriche eseguite con il codice di calcolo DAN-W sono state effettuate considerando un profilo geometrico della colata considerata ricostruito a partire dalle caratteristiche geometriche dell'evento desunte dalla letteratura (Di Crescenzo & Santo, 1999; Scotto di Santolo, 2000; Calcaterra e Santo, 2004, Pellegrino, 2007), schematicamente rappresentato in Figura VII.6.

I risultati delle analisi numeriche relativi ai tre modelli utilizzati, modello A, modello B e modello C, sono rappresentati in Figura VII.7 e riassunti in Tabella VII-1. In Figura VII.7 i risultati vengono raffigurati in termini di distanza percorsa e di velocità massima raggiunta dal corpo di frana durante la propagazione. In Tabella VII-1 i risultati delle analisi numeriche vengono riportati in termini di distanza percorsa dal corpo di frana, spessore del

deposito, velocità massima raggiunta dal corpo di frana durante la propagazione e angolo di estensione della colata.

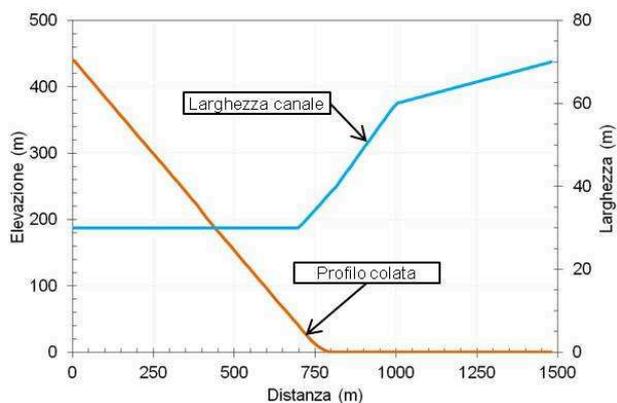


Figura VII.6 Profilo geometrico della colata di Pozzano ricostruito con il codice di calcolo DAN-W.

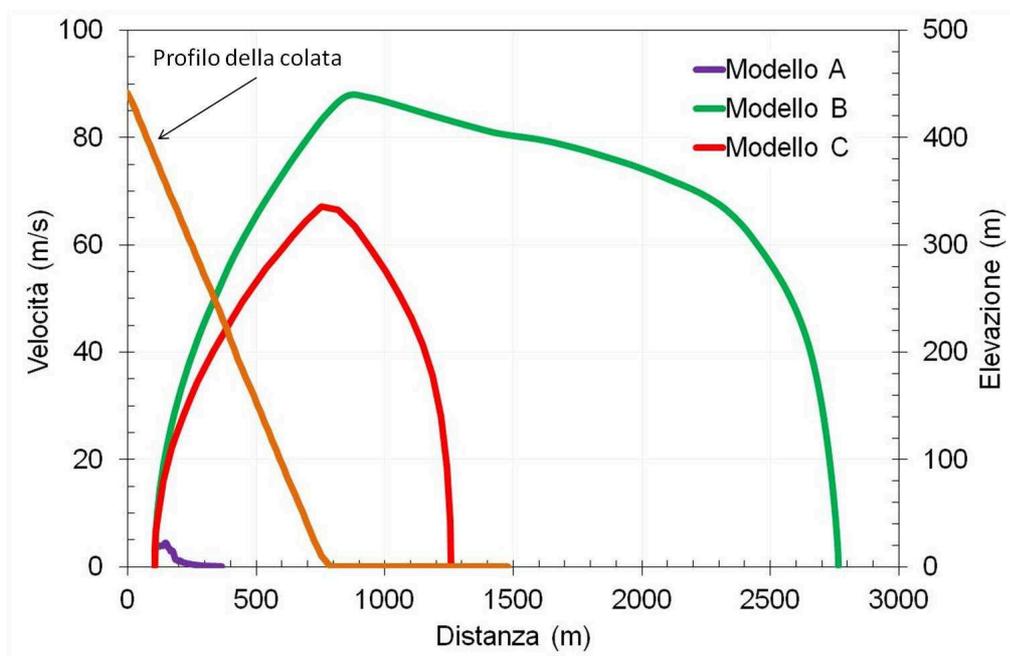


Figura VII.7 Profilo di velocità calcolato con il codice di calcolo DAN-W utilizzando i tre modelli considerati.

*Tabella VII-1 Risultati delle analisi numeriche.*

Modello	Distanza percorsa (m)	Spessore del deposito (m)	Velocità massima (m/s)	Angolo di estensione (°)
A	385	0,3	4,47	29,84
B	2763	0,09	87	13,63
C	1267	0,2	67	24,36

I risultati conseguiti attraverso le analisi numeriche hanno mostrato che:

- ~ utilizzando il modello A, nel quale i parametri reologici assegnati sono stati determinati utilizzando un metodo semplificato basato sulle grandezze geometriche dell'evento di colata da analizzare misurate in sito, si osserva che non si ha una buona corrispondenza in termini di distanza percorsa mentre si riesce ad ottenere una stima ottimale della velocità massima raggiunta dal corpo di colata. Infatti, mentre la distanza percorsa stimata per la colata considerata è di circa 1490m, usando tale modello si ha che la massa percorre una distanza di circa 385m;
- ~ utilizzando il modello B, nel quale i parametri reologici assegnati sono stati determinati utilizzando i dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscela acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare, si osserva che non si ha una buona corrispondenza né in termini di distanza percorsa né in termini di velocità massima raggiunta dal corpo di colata. Infatti, mentre la distanza percorsa stimata per la colata considerata è di circa 1490m, usando tale modello si ha che la massa percorre una distanza di circa 2763m;
- ~ utilizzando il modello C, nel quale la tensione di soglia è stata calcolata a partire dalle grandezze geometriche dell'evento da analizzare misurate in sito, e la viscosità plastica di Bingham è stata calcolata a partire dall'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscela acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare, si osserva che si ha una buona corrispondenza sia in termini di distanza percorsa che in termini di velocità massima raggiunta dal corpo di colata, sebbene quest'ultima risulti un poco sovrastimata.



---

## Conclusioni

I passati eventi di colata rapida di fango occorsi sui versanti della regione Campania hanno dimostrato che per poter stimare l'intensità del rischio legata a tali fenomeni franosi e cercare appropriate misure di protezione è molto importante la comprensione di due problematiche di fondamentale rilievo: la fase di innesco e la fase di propagazione della massa. Sebbene una specifica e approfondita conoscenza delle condizioni iniziali di tali fenomeni sia un problema di primaria rilevanza, in questo lavoro si è scelto di approfondire le incognite legate alla propagazione, ossia alla fase di scorrimento e di arresto della massa in frana. In tal senso si è visto come le simulazioni numeriche, unitamente alla conoscenza del reale contesto geologico e delle caratteristiche dei materiali coinvolti, costituiscano un utile strumento di investigazione delle dinamiche dei flussi.

L'obiettivo della ricerca è stata la determinazione del comportamento reologico dei terreni piroclastici campani interessati da fenomeni di colata rapida di fango considerando il completo assortimento granulometrico dei materiali. Nello sviluppo dello studio, alcuni terreni piroclastici campani, campionati nelle zone di alimentazione di colate di fango occorse e rappresentativi dei differenti contesti nei quali si sono verificati gli eventi, sono stati sottoposti ad una fitta campagna di prove di laboratorio mediante sistemi di misura tradizionali e mediante un'apparecchiatura innovativa progettata e messa a punto nel Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica e Ambientale dell'Università degli studi di Napoli "Federico II", ossia il reometro a trascinamento di sfera SDR (Sphere Drag Rheometer).

I sistemi reometrici tradizionali (reometri rotazionali, piano inclinato e penetrometro a cono) sono stati impiegati per analizzare miscele acqua-sedimento a granulometria fine (ossia considerando il parziale assortimento granulometrico dei materiali considerati) a causa delle ridotte dimensioni di tali strumenti. La sperimentazione suddetta ha mostrato che il comportamento reologico di tali sospensioni è quello tipico dei fluidi non Newtoniani dotati di tensione di soglia in accordo con i risultati ottenuti da diversi autori che hanno condotto sperimentazioni simili (O'Brien & Julien, 1988; Coussot & Piau, 1994; Coussot et al., 1996; Coussot 1997; Schatzmann et al., 2003, 2009; Martino, 2003; Kaitna et al., 2007). A differenza dei terreni analizzati nelle suddette esperienze, i materiali piroclastici campani presentano una frazione argillosa solitamente molto ridotta (e talora addirittura assente). Di conseguenza, le miscele acqua-sedimento esaminate si comportano come fluidi omogenei in un intervallo molto modesto di concentrazione solida volumetrica  $[\Phi_1-\Phi_2]$ , tipicamente non maggiore del 10%. Per concentrazioni solide volumetriche minori del limite inferiore  $\Phi_1$ , lo svolgimento delle prove risulta impossibile in quanto nelle miscele si verifica una rapida sedimentazione del materiale. Per concentrazioni solide volumetriche maggiori del limite superiore  $\Phi_2$ , il comportamento delle miscele è assimilabile a quello di un corpo solido e quindi non può essere più studiato con gli usuali sistemi reometrici. All'interno di tale intervallo, sebbene occorranza ancora alcuni effetti di disturbo legati alla sedimentazione macroscopica del materiale, la durata del singolo esperimento è maggiore del tempo caratteristico in cui si sviluppa tale fenomeno ed i risultati sperimentali non ne risultano affetti in maniera significativa. Le prove di flusso eseguite hanno mostrato che, nel "regime liquido" (fluid-like), le miscele analizzate sono caratterizzate dalla presenza di una tensione di soglia statica, che rappresenta il valore di sforzo superato il quale le miscele cominciano a fluire, la quale risulta maggiore di una tensione di soglia dinamica, che rappresenta il valore di sforzo in corrispondenza del quale si ha l'arresto del flusso. La differenza tra il valore della tensione di soglia statica ed il valore di quella dinamica diventa sempre più marcata al crescere del contenuto solido delle miscele, come conseguenza di effetti dovuti alla "sedimentazione locale" del materiale. Nelle miscele più concentrate, una parte delle particelle si "serra" (jamming) e sedimenta sul fondo del contenitore durante il regime di flusso di

modo che il valore di sforzo che deve essere raggiunto affinché il moto della miscela si arresti (tensione di soglia dinamica) risulta molto minore del valore attinto per dare inizio al flusso (tensione di soglia statica). Inoltre i risultati delle prove di creep hanno evidenziato che il flusso dei materiali esaminati è solitamente instabile: una volta che il valore dello sforzo imposto supera quello della tensione di soglia statica, le miscele cominciano a fluire “bruscamente”, raggiungendo subito elevati valori della velocità di deformazione. Uno degli aspetti più interessanti della suddetta attività sperimentale è stato lo studio dell’influenza della concentrazione solida volumetrica sui parametri reologici delle miscele analizzate. Si è visto che il contenuto di solido condiziona enormemente il comportamento reologico dei materiali: nel ristretto intervallo di concentrazione solida volumetrica considerato la tensione di soglia cresce molto rapidamente al crescere della frazione solida. Le prove eseguite sul piano inclinato hanno confermato questo andamento ed hanno fornito un’accurata approssimazione dei valori delle tensioni di soglia statica e dinamica. Anche attraverso le prove condotte con il penetrometro a cono è stato possibile determinare lo sforzo resistente di alcune delle miscele analizzate. Infatti la scelta di adoperare tali sistemi di misura è stata dettata proprio dalla necessità di valutare l’effettiva “presenza” della tensione di soglia. Dal confronto tra i risultati ottenuti con le tre differenti apparecchiature, è stato osservato che i valori delle tensioni di soglia, statica e dinamica, misurati con il piano inclinato e con il penetrometro risultano maggiori di quelli determinati attraverso le prove in reometro. Questo risultato non è sorprendente perché è stato osservato che la determinazione della tensione di soglia risulta molto più accurata con sistemi di misura quali, appunto, il piano inclinato o lo slump test. Per sospensioni concentrate, come le miscele analizzate nel presente lavoro, prove in reometro forniscono una buona valutazione del reale comportamento reologico del materiale attraverso la definizione della curva di flusso mentre prove di scorrimento su piano inclinato o prove di “abbassamento” con cono di Abrams (slump test) sono maggiormente indicate per la stima dell’effettiva tensione di soglia (Ancy & Jorrot; Coussot et al., 1996; Pashias & Borger, 1996; Malet et al, 2003; Schatzmann, 2005). I bassi valori della tensione di soglia misurati per le miscele a granulometria fine sono anche legati alla carenza e/o mancanza di una rilevante componente argillosa all’interno dei materiali

analizzati. Infatti è stato osservato che la tensione di soglia cresce all'aumentare della porzione di argilla: miscele caratterizzate da ridotti contenuti di argilla (generalmente minori del 40%) presentano esigui valori della tensione di soglia (Malet et al., 2003) in quanto le interazioni tra le particelle di argilla sono più forti delle interazioni idrodinamiche tra i granelli confinanti (Coussot & Piau, 1995).

I materiali analizzati nel presente lavoro presentano un vasto assortimento granulometrico e quindi si è posta la necessità di analizzare anche miscele a granulometria grossolana. Le configurazioni delle apparecchiature reometriche convenzionali non sono adatte a sottoporre a prova sospensioni concentrate variamente assortite per cui è necessario l'uso di particolari reometri in grado di eseguire prove su fluidi contenenti particelle di grandi dimensioni ( $d_{max} > 1\text{mm}$ ). Al fine, quindi, di poter stimare le proprietà reologiche dei terreni piroclastici campani sull'intera curva granulometrica, è stata progettata e messa a punto l'apparecchiatura reometrica innovativa (il reometro SDR). Tale reometro è stato impiegato per analizzare miscele acqua-sedimento a granulometria grossolana (ossia considerando il totale assortimento granulometrico dei materiali). Lo studio dell'influenza dell'assortimento granulometrico sui parametri reologici è un aspetto di fondamentale importanza nella definizione del comportamento reologico dei materiali coinvolti in fenomeni di colata rapida di fango. Diversi lavori presenti in letteratura hanno evidenziato che le proprietà reologiche delle sospensioni concentrate sono fortemente condizionate sia dal contenuto in argilla che dalla presenza di particelle grossolane (Coussot & Piau, 1994; Ancy & Jorrot, 2001; Ancy, 2003; Malet et al., 2003; Schatzmann, 2005). L'influenza del contenuto di particelle di grandi dimensioni è da ascrivere al legame tra le particelle grossolane con la dispersione di particelle fini. Infatti, nelle miscele a granulometria grossolana, la tensione di soglia risulta dalla rottura dei contatti indiretti (lubrificati) tra le particelle. La sperimentazione condotta con il reometro SDR ha mostrato che il comportamento reologico di tali sospensioni è quello tipico dei fluidi non Newtoniani dotati di tensione di soglia e che i parametri reologici delle miscele crescono al crescere del contenuto in solido della miscela. Inoltre è stato osservato che l'aggiunta di particelle di grandi dimensioni provoca un decremento dei parametri reologici

delle miscele. Tuttavia, se si considera che l'aggiunta della frazione di particelle grossolane corrisponde a circa l'otto percento dell'intera concentrazione solida totale, questo risultato diventa coerente con diverse osservazioni sperimentali pregresse (Wildemuth & Willimas, 1985; Banfill, 1999; Coussot, 1999; Coussot & Piau, 1995; Coussot et al., 1996; Mansoutre, 1999; Ancey & Jorrot, 2001) e con i alcuni risultati sperimentali preliminari ottenuti nel presente lavoro attraverso prove su miscele a granulometria grossolana con sistemi di misura convenzionali.

Il reometro innovativo SDR ha permesso di superare alcuni limiti legati all'uso dei sistemi di misura tradizionali per la determinazione del comportamento reologico dei fanghi a grana grossa. Infatti è stato possibile sottoporre a prova miscele acqua-sedimento contenenti particelle aventi diametri pari a 10 mm e, nonostante il grande volume dei campioni considerati, è stato possibile tenere sotto controllo con un'adeguata tecnica di miscelazione la concentrazione solida volumetrica dei campioni. Tuttavia vi sono ancora alcuni aspetti della ricerca che richiedono sviluppi futuri, quali l'ampliamento del campo di misura all'interno del quale viene determinata la curva di flusso e l'affinamento della teoria di conversione dei dati misurati in parametri reologi.

Nel tentativo di trarre una valutazione conclusiva, i dati sperimentali ricavati attraverso la sperimentazione in laboratorio sono stati opportunamente interpretati con alcuni modelli tipicamente usati in reologia. Tra questi modelli, è stato osservato che quelli idonei all'interpretazione delle misure sperimentali sono il modello di Herschel&Bulkley ed il modello di Bingham. Quest'ultimo, in particolare, ha ben modellato i dati misurati in reometro ed è stato poi utilizzato per condurre alcune simulazioni numeriche di un caso storico di colata rapida di fango occorso in Campania (Pozzano, Penisola Sorrentina, 1997) ben documentato in letteratura (Di Crescenzo & Santo, 1999; Scotto di Santolo, 2000; Calcaterra & Santo, 2004; Pellegrino, 2007). Le analisi numeriche sono state condotte con il codice di calcolo DAN-W (Hung, 1995), un modello per l'analisi delle colate rapide basato su una soluzione lagrangiana delle equazioni del moto. I parametri del modello di Bingham, tensione di soglia  $\tau_c$  e viscosità plastica di Bingham  $\mu_B$ , utilizzato per le simulazioni numeriche sono stati definiti secondo due modi differenti:

utilizzando un metodo semplificato che permette di determinare i parametri reologici dalle grandezze geometriche dell'evento da analizzare misurate in sito e utilizzando i dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscele acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare. Una volta calcolati i parametri reologici del modello secondo le modalità suddette, le analisi numeriche sono state condotte assegnando al corpo di colata tre modelli differenti: un modello nel quale la tensione di soglia  $\tau_c$  e la viscosità plastica di Bingham  $\mu_B$  sono state calcolate dalle grandezze geometriche dell'evento da analizzare, misurate in sito; un modello nel quale la tensione di soglia  $\tau_c$  e la viscosità plastica di Bingham  $\mu_B$  sono state calcolate a partire dall'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscele acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare; un modello nel quale la tensione di soglia è stata calcolata a partire dalle grandezze geometriche dell'evento da analizzare, misurate in sito e la viscosità plastica di Bingham  $\mu_B$  è stata calcolata a partire dall'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro eseguite su miscele acqua-sedimento composte con il terreno coinvolto nell'evento da analizzare. I risultati di tali analisi numeriche hanno mostrato che né il modello di Bingham i cui parametri sono stati calcolati dalle grandezze geometriche dell'evento né quello i cui parametri sono stati misurati a partire dall'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro sono in grado di stimare le caratteristiche dinamiche dell'evento di colata considerato, ossia la distanza di propagazione e la velocità massima del corpo di frana. Soltanto il modello di Bingham nel quale la tensione di soglia è stata calcolata a partire dalle grandezze geometriche dell'evento e la viscosità plastica è stata calcolata a partire dall'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove in reometro è stato in grado di fornire una buona stima della distanza percorsa dalla massa franante, sebbene alcune incertezze vi siano ancora sulla misura della velocità massima che risulta leggermente sovrastimata rispetto quella tipica di un evento di colata rapida di fango. Questo risultato ha mostrato che, sebbene la complessità dei processi che sottendono al moto delle colate renda molto difficile la scelta di un'appropriata relazione costitutiva, un modello reologico basato sia sulle misure rilevate in sito che sulle analisi condotte in laboratorio potrebbe essere un valido strumento per la previsione di fenomeni

franosì quali quelli considerati nel presente lavoro. Infatti mentre la viscosità è una caratteristica intrinseca del corpo di frana e può, quindi, essere stimata sottoponendo a prove in reometro miscele ricostituite con il terreno coinvolto, la tensione di soglia dipende non solo dalle condizioni della massa franante ma anche dalla storia tensionale del terreno in sito e deve, quindi, essere stimata sia attraverso l'osservazione delle caratteristiche dei depositi sia attraverso i risultati di prove di laboratorio quali quelle condotte nel presente lavoro.

L'approccio usuale per l'analisi dei fenomeni franosi ha come punto di partenza modelli costruiti su equazioni costitutive predeterminate. La scelta di un'opportuna relazione costitutiva è molto difficile data la complessità dei processi che caratterizzano il moto delle colate. Inoltre la reologia del movimento di tali eventi può modificarsi nel corso della propagazione della massa o addirittura essere diversa da parte a parte della massa stessa.

I risultati sperimentali conseguiti attraverso la presente sperimentazione potrebbero essere utili strumenti per la comprensione dei processi alla base del comportamento dei terreni coinvolti in fenomeni di colata rapida di fango. Le condizioni di moto incipiente delle masse frananti potrebbero essere interpretate attraverso la definizione della tensione di soglia statica. Le caratteristiche della fase di propagazione del corpo di frana potrebbero essere interpretate dall'andamento dello sforzo di taglio nel ramo decrescente della curva di flusso mentre le condizioni di arresto potrebbero essere spiegate attraverso la stima della tensione di soglia dinamica.



## Appendice A

# Caratteristiche fisiche dei terreni analizzati

### A.1 TERRENO I (NOCERA, SALERNO)

Il comune di Nocera (Salerno) si affaccia su un tratto autostradale della A3 (Km 35-50 - località San Pantaleone). Lungo tale percorso l'autostrada attraversa una zona pedemontana i cui versanti sono ricoperti da coltri di materiale piroclastico che più volte in passato hanno dato origine a colamenti (Figura A.1).



*Figura A.1 Zona pedemontana lambita dal tratto autostradale della A3 nei km 35-50 (da Zingariello, 2006)*

L'ultimo fenomeno di colamento che ha interessato la zona pedemontana della cittadina di Nocera si è verificato il 4 marzo del 2005 (Figura A.2), a seguito di forti precipitazioni che hanno interessato l'area per diversi giorni. In concomitanza dell'evento due pluviometri installati in zona hanno rilevato 208mm di pioggia a Cava dei Tirreni e 107mm a Nocera Inferiore in meno di 24 ore, ossia più della metà della pioggia che cade nell'intero mese di marzo.

In questo caso la massa in movimento non ha interessato il tratto autostradale, ma i danni sono stati comunque considerevoli e due persone hanno perso la vita.



Figura A.2 Colata rapida del 4 marzo 2005 (Nocera) (da Zingariello, 2006)

Lo schema geometrico ed il profilo altimetrico del pendio sono riportati rispettivamente in Figura A.3a e A.3b. La pendenza del versante  $\alpha_1$  è di circa  $24^\circ$ , mentre la zona di arresto ha una pendenza  $\alpha_2$  di poco inferiore ai  $5^\circ$ . Complessivamente la distanza di estensione è pari a  $15^\circ$ , valore relativamente basso ma non inusuale per eventi di colata. Sul materiale prelevato nella zona di alimentazione della colata (i campioni di terreno sono stati prelevati a distanza di pochi mesi dall'evento) sono state svolte indagini dettagliate al fine di definire il fuso granulometrico del terreno e effettuare alcune misure dell'indice dei vuoti e del contenuto d'acqua (Zingariello, 2006). Il peso specifico  $G_s$  del terreno è pari a  $2.66\text{g/cm}^3$ , la plasticità del terreno è praticamente assente e è stata riscontrata, inoltre, una discreta presenza di materiale organico (5%). L'indice di densità massimo  $e_{\max}$  è pari a 1.65, a cui corrisponde una porosità del 62% circa. Il materiale franato è risultato essere una sabbia limosa debolmente ghiaiosa. L'ampiezza del fuso granulometrico, riportato in Figura A.4, del materiale intatto (curve a linea continua) evidenzia una forte variazione delle componenti sabbiosa e ghiaiosa. La percentuale di terreno fine, per lo più di tipo limoso, risulta invece, molto contenuta, il che giustifica la plasticità pressoché nulla ( $I_p \approx 0$ ) riscontrata dalla determinazione dei limiti di Atterberg. Il materiale prelevato lungo la zona interessata dalla

frana (curve a linea tratteggiata) è in prevalenza di tipo sabbioso, ad eccezione del terreno più superficiale.

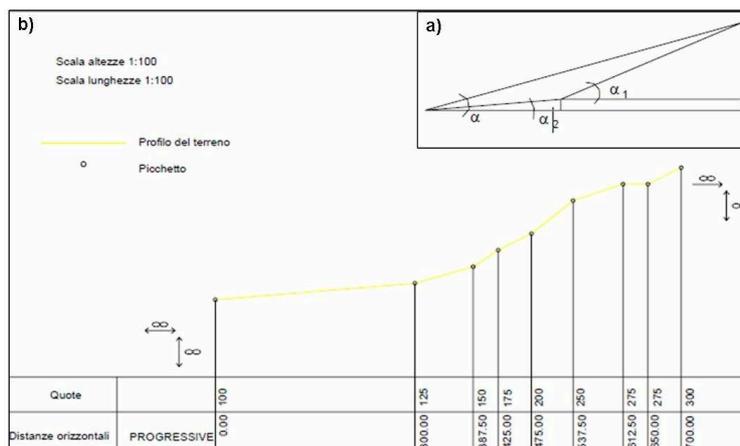


Figura A.3 Frana di Nocera. a) schema geometrico del versante; b) profilo altimetrico del versante (da Zingariello, 2006)

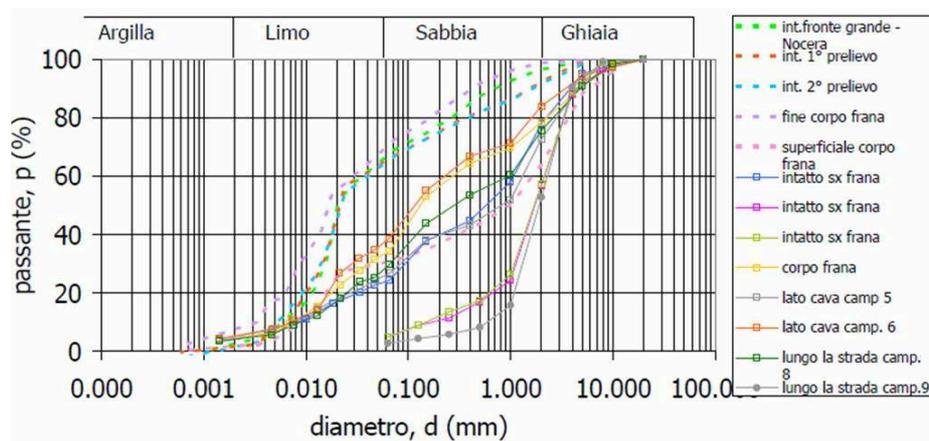


Figura A.4 Frana di Nocera. Fusso granulometrico dei terreni interessati (da Zingariello, 2006)

## A.2 TERRENO II (MONTEFORTE IRPINO, AVELLINO)

L'area che insiste sul territorio comunale di Monteforte Irpino (Av) si trova sul versante ovest di Monte Faggeto, sulla destra idrografica del Vallone del Conte. In questo sito sono stati riscontrati diversi fattori geologici e geomorfologici significativi per l'innescò di frane da colata rapida di fango. Le acclività dei versanti, infatti, raggiungono localmente valori di 30°-35°, ossia valori tipici riscontrati nelle zone d'innescò e transito delle colate (de Riso et al., 1999). Inoltre, nell'area sono state censite almeno cinque frane recenti (Figura A.5) e diversi paleocumululi di colate più antiche a testimonianza della notevole suscettibilità a franare della zona.

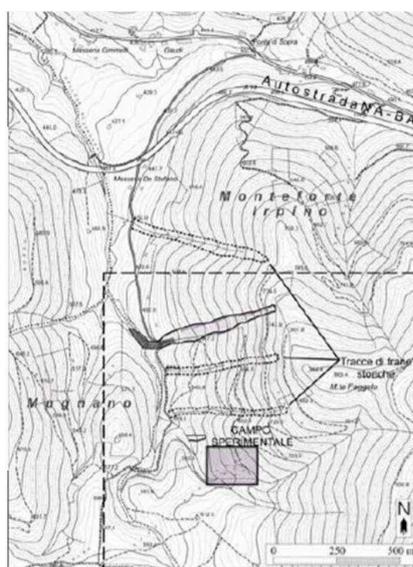


Figura A.5 Indicazione delle frane censite (da Di Crescenzo et al., 2007)

I versanti sono ricoperti da una spessa coltre di depositi piroclastici nella quale sono state distinte diverse eruzioni vulcaniche che si ritrovano, con caratteristiche molto simili, sui vicini rilievi di Pizzo D'Alvano, dei Monti di Avella e del Partenio. L'area di prelievo dei campioni ricade infatti nella zona di distribuzione assiale delle principali eruzioni vulcaniche del Somma Vesuvio ed è vicina al Pizzo D'Alvano. In lavori precedenti, in cui l'area è stata studiata in maniera approfondita attraverso rilevamento geologico di

superficie, è stato possibile ricostruire la successione crono-stratigrafica completa delle varie eruzioni vulcaniche rinvenute. Sono state, infatti, distinte almeno sei diverse eruzioni, le più antiche delle quali riferibili al distretto vulcanico dei Campi Flegrei e le più recenti a quello del Somma-Vesuvio. L'intera successione poggia sui calcari fratturati e carsificati del mesozoico e localmente su lembi di flysch miocenici. In Figura A.6 è riportata la colonna stratigrafica completa dei prodotti vulcanici rinvenuti nell'area di Monteforte Irpino partendo dal basso stratigrafico.

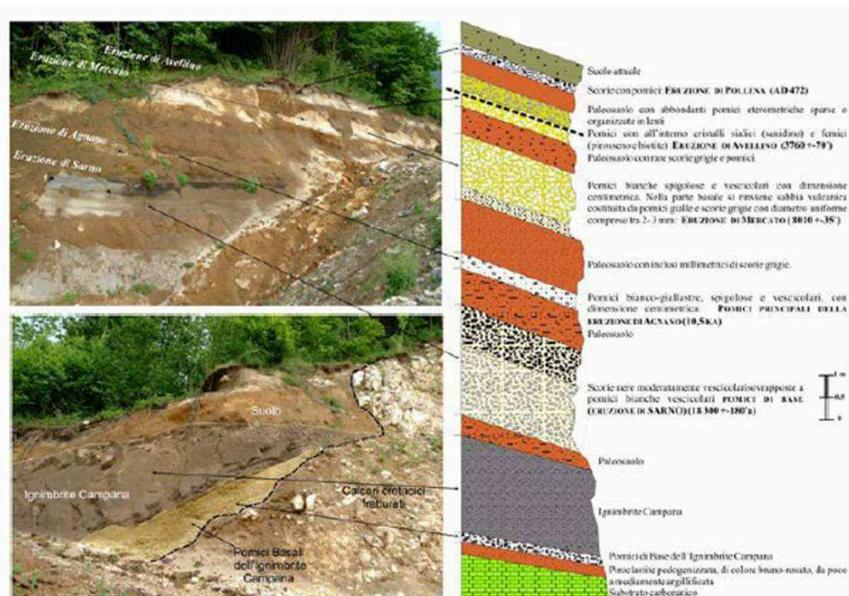


Figura A.6 Colonna stratigrafica (completa) ricostruita nella zona pedemontana del versante (da Di Crescenzo et al., 2007)

La stratigrafia semplificata del sito, derivata dall'indagine geologica è costituita da otto strati che ricoprono i calcari di base ed è riportata in Figura A.7. I terreni analizzati nel presente lavoro sono stati il paleosuolo cineritico di Ottaviano (nel seguito semplicemente indicato come Terreno 8), le pomice di Avellino (Terreno 3) e la piroclastite cineritica pedogenizzata ed argillificata (Terreno 8). Il Terreno 8 è decisamente più fine degli altri terreni costituenti la stratigrafia del sito; il Terreno 3 è un materiale a grana grossa

(ghiaia) abbastanza uniforme mentre il terreno 4 è un limo sabbioso in cui è presente una minima frazione argillosa.



Figura A.7 Colonna stratigrafica semplificata (da Papa, 2007).

In Figura A.8 sono riportati i fusi granulometrici dei diversi terreni. Si osserva che, i terreni più superficiali (1 e 2) hanno caratteristiche granulometriche tra loro molto simili: i rispettivi fusi sono in parte sovrapposti (area in grigio chiaro in Figura A.8). Il terreno 2 presenta una granulometria leggermente più fina (area in grigio scuro in Figura A.8). Lo strato 4 si presenta con una granulometria mediamente più fina dei due precedenti e con un fuso granulometrico più ristretto e “disteso”. Gli strati 6 ed 8 sono decisamente più fini degli altri terreni analizzati. Infine i terreni 3, 5 e 7 sono da considerarsi come materiali a “grana grossa” ed abbastanza uniformi: in particolare, mentre il terreno 7 si presenta come una sabbia media con una frazione significativa di limo, il terreno 5 ed il terreno 3 sono rispettivamente una sabbia grossa ed una ghiaia. I valori medi della porosità dei terreni mostrano come i terreni studiati siano notevolmente porosi. Il grado di saturazione è stato determinato su campioni prelevati in diversi periodi

dell'anno. Si osserva che i terreni più profondi presentano valori del grado di saturazione decisamente più elevati di quelli superficiali

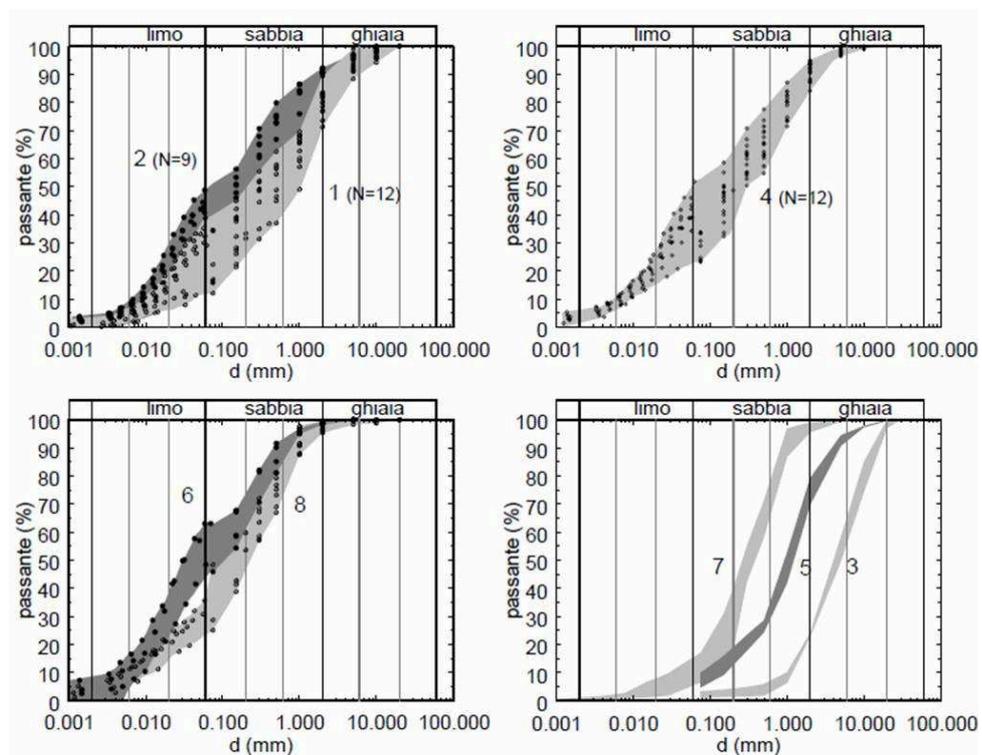


Figura A.8 Granulometria dei diversi terreni (da Papa, 2007).

### A.3 TERRENO III (ASTRONI, NAPOLI)

L'edificio vulcanico degli Astroni è ubicato nel settore nord-occidentale della Piana di Agnano, ampia depressione di origine vulcano-tettonica, che si estende nel territorio dei Comuni di Napoli e Pozzuoli (Figura A.9). La Piana di Agnano è bordata da una cinta di rilievi comprendenti edifici vulcanici talora ancora ben conservati (Astroni e Solfatara), talora riconoscibili come relitti di strutture smembrate da fenomeni di tipo vulcano-tettonico.

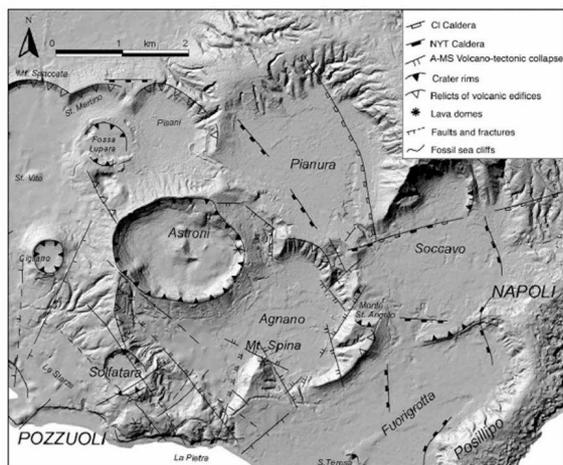
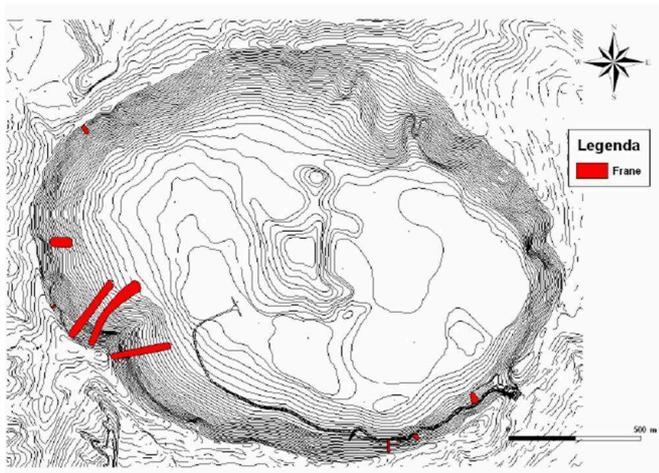


Figura A.9 Carta morfostrutturale della piana di Agnano (da Isaia et al., 2004)

L'assetto attuale della Piana costituisce, infatti, il risultato di più eventi di origine vulcano-tettonica verificatisi nell'intervallo tra 4,8 e 3,8ka (Di Vito et al., 1999). In questo intervallo di tempo, il vulcano degli Astroni è stato attivo, quando la Piana Campana era già abitata dall'uomo. La tipologia eruttiva, i cui prodotti sono riconducibili per lo più a surge piroclastici (Rosi & Sbrana, 1987), nonché l'osservazione dei caratteri morfologici dell'apparato (cratere ampio e svasato con un alto rapporto larghezza-profondità) permettono di classificare quest'ultimo come tuff-ring. Il cratere presenta una forma ellittica ed ha un'estensione di circa 250 ettari, un perimetro di circa 6Km, un diametro variabile tra 1 e 2km, un dislivello massimo di circa 240m (quota massima: 253m s.l.m).

Isaia et al. (2004) hanno individuato sette unità all'interno della successione, riferite ad altrettante fasi eruttive di magnitudo variabile, dominate da esplosioni freatomagmatiche e subordinate fasi magmatiche. La base dell'unità 7 è l'unico deposito da caduta di tipo pliniano dell'intera sequenza degli Astroni. Le unità, identificate sulla base di caratteristiche litologiche, sedimentologiche e petrografiche, sono separate da superfici erosionali o sottili paleosuoli. Le esplosioni di carattere freatomagmatico hanno prodotto depositi cineritici da fini a grossolani, messi in posto principalmente mediante meccanismi di tipo surge piroclastico; le esplosioni magmatiche hanno prodotto depositi da caduta di tipo stromboliano e subpliniano, costituiti da pomice grossolane. Un duomo lavico si è formato tra le fasi esplosive delle unità 5 e 7 e, infine, piccoli coni scoriacei si sono formati all'interno del cratere nel corso dell'ultima fase dell'attività. Il censimento degli eventi franosi presenti all'interno della Riserva è stato effettuato nel marzo 2006, allorché sono stati rilevati 24 fenomeni franosi (Figura A.10), per i quali, in molti casi, è stato possibile accertare la data di attivazione, compresa tra il 1996 ed il 2005. L'elevata acclività dei versanti (generalmente maggiore del 70°) e la presenza di un diffuso quadro fessurativo hanno favorito il verificarsi di frane, che hanno mobilizzato volumi in genere modesti (<10m<sup>3</sup>). I terreni coinvolti (alternanze di livelli cineritici e pomice di spessore variabile) presentano uno stato di addensamento che varia da sciolto a moderatamente addensato. Il gruppo di eventi percentualmente più significativo è rappresentato dagli scorrimenti-colate, che assommano al 50% del totale. Tali dissesti hanno interessato generalmente gli strati superficiali della copertura piroclastica, composta principalmente da alternanze di depositi cineritici e pomice, a granulometria da fine a grossolana, debolmente addensata. Il materiale analizzato nel presente lavoro è quello prelevato dalla zona di alimentazione dell'evento verificatosi nel cratere degli Astroni il 17 dicembre 2005 (Figura A.11), classificato come scorrimento traslativo evoluto in colata, localizzato nel settore meridionale del cratere. Tale evento ha assunto particolare rilievo in quanto ha interessato il versante posto a monte di una strada borbonica, che, proprio a causa di tali dissesti, è stata per lungo tempo inaccessibile.



*Figura A.10 Carta-Inventario dei fenomeni franosi nel cratere degli Astroni (da Calcaterra et al., 2009).*



*Figura A.11 Frana verificatasi il 17 dicembre 2005. In evidenza, la superficie di scorrimento vista dal piede della frana (da Calcaterra et al., 2009)*

Il materiale, appartenente all'unità 7 precedentemente descritta, appare di colore marrone bruno, ricco di elementi radicali di piccola e media dimensione e di sostanze vegetali; le pomici rinvenute nel campione si presentano piccole, con diametro massimo pari a 0.5cm, dalla forma

arrotondata e di colore chiaro. Sul materiale è stato effettuato il test della sostanza organica, con un risultato dell'8,5 %; inoltre, è stata ricavata la curva granulometrica (Figura A.12), ed è stato determinato il peso specifico delle particelle che assume un valore pari a  $2.54\text{gr/cm}^3$ . Relativamente al periodo del prelievo (aprile 2007), il materiale si è presentato parzialmente saturo, con grado di saturazione pari al 24.1% e porosità particolarmente elevata (67%).

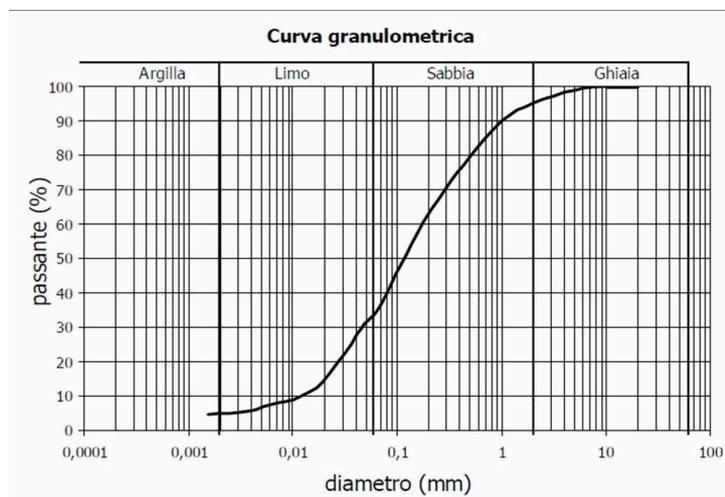


Figura A.12 Curva granulometrica media del materiale campionato (da Calcaterra et al., 2009)

#### A.4 TERRENO IV (POSILLIPO, NAPOLI)

Il terreno IV ricopre i rilievi della zone di Posillipo versante Fuorigrotta (Napoli). Il territorio dei Campi Flegrei continentali è caratterizzato dalla presenza di depositi prevalentemente vulcanici e solo in piccola parte di depositi continentali (colluvio-alluvionali) e marini. I depositi vulcanici sono nella quasi totalità prodotti dall'attività del sistema magmatico flegreo e, subordinatamente, da quello vesuviano. Le piroclastiti includono sia depositi da caduta che depositi di vari tipi di flusso piroclastico, questi ultimi sono talvolta litificati per effetto di processi di trasformazione post-deposizionale.

Depositati di mare basso e di spiaggia ricorrono a varie altezze stratigrafiche e si rinvengono generalmente nel sottosuolo delle piane prossime alla linea di costa e, talora, dislocati a varie altezze per effetto delle deformazioni indotte dall'attività vulcano-tettonica. L'aspetto rilevante d'interesse morfologico nell'area di Posillipo è dato dalla presenza di versanti da moderatamente a fortemente acclivi di origine strutturale, connessi al verificarsi di fenomeni di collasso vulcano-tettonico. Tali versanti s'impostano in rocce litoidi e in terreni piroclastici sciolti; in particolare, le creste tufacee che bordano la collina di Posillipo sono interessate da una intensa fratturazione che contribuisce ad isolare blocchi in precarie condizioni di equilibrio, spesso soggetti a fenomeni di crollo, i cui effetti sono testimoniati da numerosi massi presenti nelle aree pedemontane. I fenomeni franosi riconosciuti nel territorio dei Campi Flegrei sono ascrivibili prevalentemente a scorrimenti traslativi, colate e frane complesse, quest'ultime rappresentate da crolli o scorrimenti traslativi evoluti in colate. Gli scorrimenti, gli scorrimenti- colata e le colate sono in larghissima parte di modesto volume, e si sono attivati lungo versanti ad inclinazione variabile, per lo più compresa tra 40° e 50° circa. Nel complesso, gli eventi di frana sono distribuiti in maniera abbastanza omogenea lungo tutte le aree di versante caratterizzate da elevata acclività ed energia di rilievo spesso concentrati in corrispondenza degli orli di scarpata a controllo strutturale. In corrispondenza delle pareti subverticali impostate in materiali litoidi di natura tufacea e lavica, sono frequenti fenomeni di crollo.

I campioni che sono stati analizzati in questo lavoro sono stati raccolti a mano nella parte più superficiale. Si tratta di piroclastiti (alterate e spesso umificate) presenti alla base del tufo giallo napoletano costituite da cineriti bianche



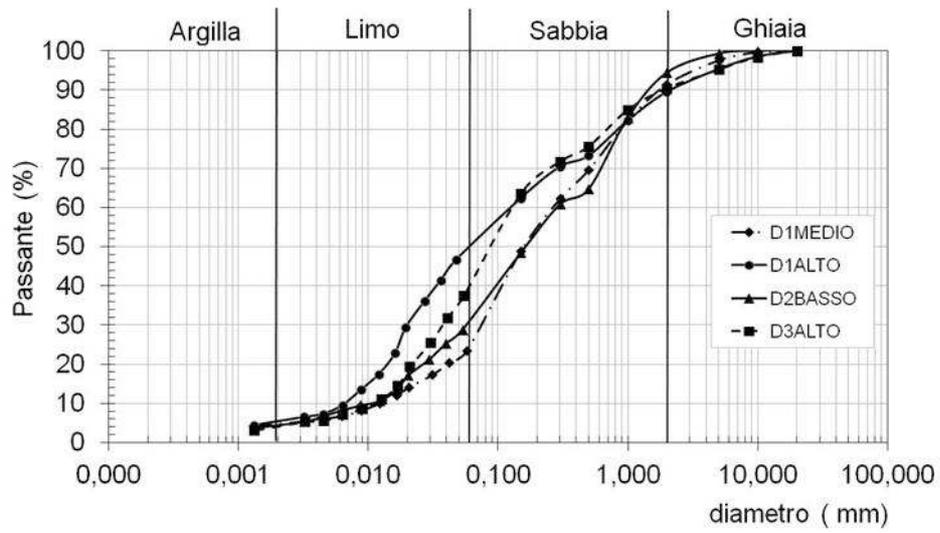


Figura A.14 Terreno IV: fusi granulometrici dei diversi campioni analizzati.

### A.5 TERRENO V (FRANA MARINO, POTENZA)

Il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica dell'Università di Napoli "Federico II" (attuale DIGA) nel 1990 iniziò il monitoraggio di tre siti nell'Alta Valle del Basento (Pz), che si estendono su di un'area di 70Km<sup>2</sup>, nei quali erano avvenute circa 400 frane, di cui il 95% era di tipo colata. Le tre colate poste sotto osservazione (nei siti Masseria Marino, Acqua di Luca e Masseria De Nicola) presentano morfologie e velocità di spostamento piuttosto diverse e dipendenti, evidentemente, dall'estensione e dall'attività dell'area di alimentazione, nonché dalla litologia dei terreni coinvolti. Tutte, però, si sviluppano nella formazione delle Argille Varicolori, costituita da banchi argillitici compatti e consistenti con intercalazioni di calcari in blocchi ed in strati che usualmente non superano i 30cm. La colata di Masseria Marino è situata in destra del fiume Basento, circa 3Km a Nord dell'abitato di Brindisi di Montagna (Pz). Dal 1991 al 2004 il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica dell'Università di Napoli "Federico II", ha studiato i meccanismi d'evoluzione di questa frana attraverso una estesa campagna di indagini geotecniche, sia di laboratorio, tese ad analizzare la natura e il comportamento geotecnico dei materiali, sia in sito, con il monitoraggio di spostamenti superficiali e profondi, livelli piezometrici e precipitazioni meteoriche. Il campo sperimentale, riportato in Figura A.15 è stato allestito con una fitta strumentazione. La colata di Masseria Marino ha forma essenzialmente lobata. Il movimento si sviluppa nella formazione delle Argille Varicolori e la parte attiva insiste sulla copertura della stessa formazione di base. Alla scala della macrostruttura la formazione delle Argille Varicolori è costituita da argilla consistente fratturata e fessurata, con blocchi o strati di calcareniti interposti che non superano lo spessore di 30cm. Il corpo della frana, come già detto, ha la stessa origine geologica, ma si presenta sostanzialmente ammorbidito e destrutturato; si riconosce una matrice argillosa e litorelitti provenienti dal substrato più stabile. Nella Figura A.16 si riporta una sezione longitudinale della colata con i diversi strati di terreno presenti.

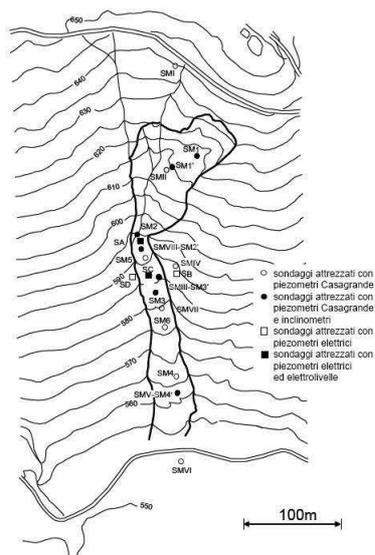


Figura A.15 Masseria Marino: planimetria e strumentazione installata (da Giammarino, 2010).

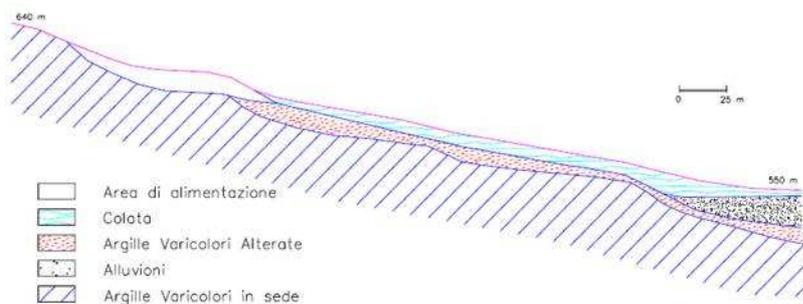


Figura A.16 Sezione geologica colata Masseria Marino (da Giammarino, 2010).

I terreni della formazione di base sono descrivibili come argilliti tettonizzate, costituite da piccole scaglie consistenti di argilla, separate da fessure; ad una scala maggiore il terreno è attraversato da discontinuità di taglio di ordine gerarchico superiore, anch'esse dovute ad azioni tettoniche e a fenomeni deformativi di versante. Le scaglie sono costituite da aggregati di particelle di argilla, talvolta debolmente cementate e hanno dimensioni da

millimetriche a centimetriche. Dispersi all'interno della formazione si rinvenivano elementi lapidei sotto forma di strati distorti, blocchi o frammenti. Le proprietà indice presentano valori che non sembrano dipendere dalla zona di prelievo. Le differenze riscontrate, infatti, rientrano nella normale variabilità delle formazioni interessate, presentando un valore medio del limite liquido pari a  $w_L=0,51$  e del limite plastico pari a  $w_P=0,23$ . L'inserimento di tali valori nella Carta di Plasticità di Casagrande consente di definire tali terreni come argille inorganiche di media-alta plasticità. I fusi granulometrici sono riportati in Figura A.17 e mostrano che la zona di taglio presenta una percentuale di argilla leggermente superiore, mentre il corpo della colata è più eterogeneo, con una percentuale di argilla minore. Per il resto non si riscontrano differenze sostanziali per le diverse zone di provenienza.

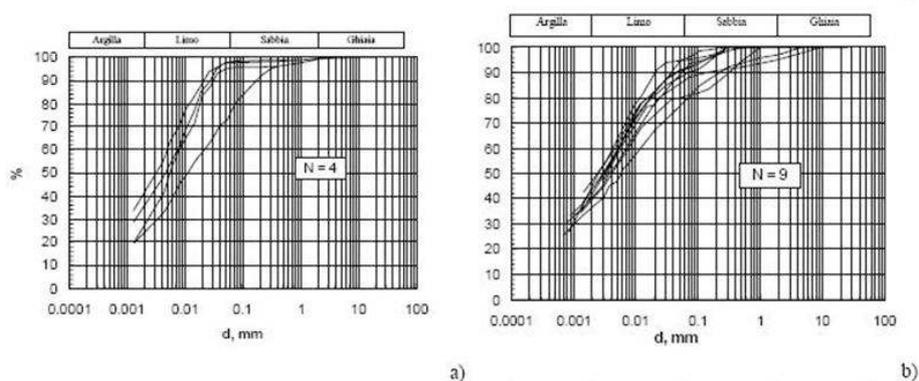


Figura A.17 Risultati delle analisi granulometriche :a)corpo di frana; b)zona di taglio (da Comegna, 2005).



## Appendice B

### Curve sperimentali relativi alle prove eseguite in reometro tradizionale

#### B.1 CURVE DI FLUSSO

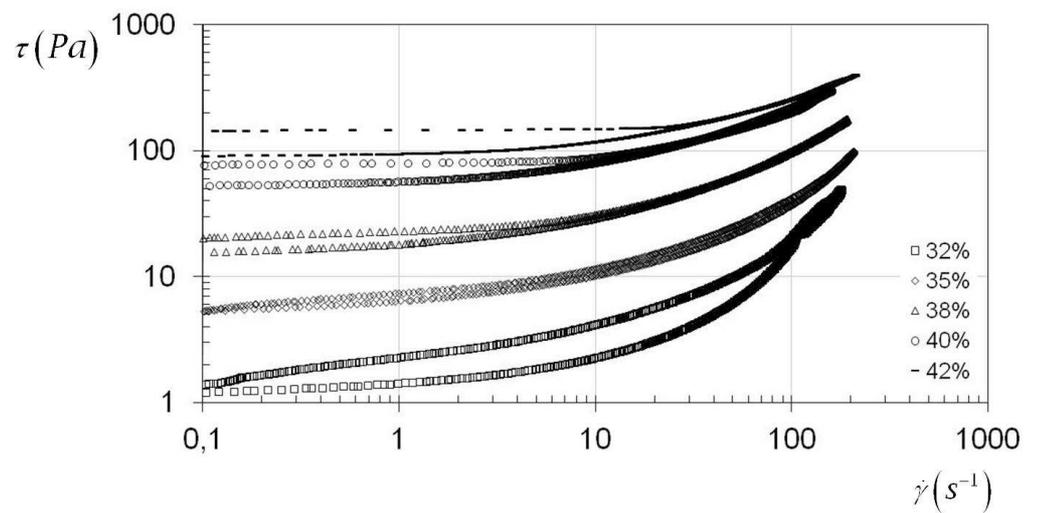


Figura B.1 Terreno I: curve di flusso al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ .

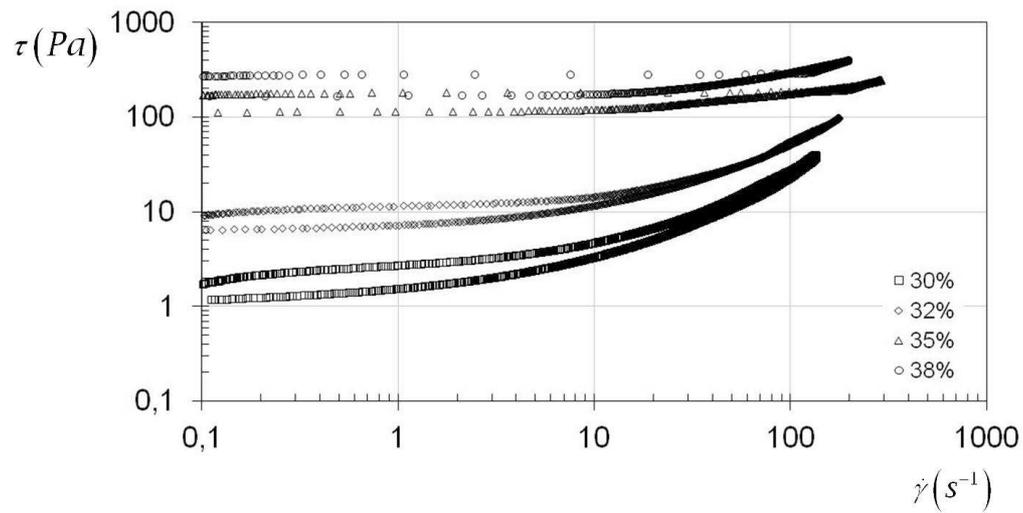


Figura B.2 Terreno II-4: curve di flusso al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ .

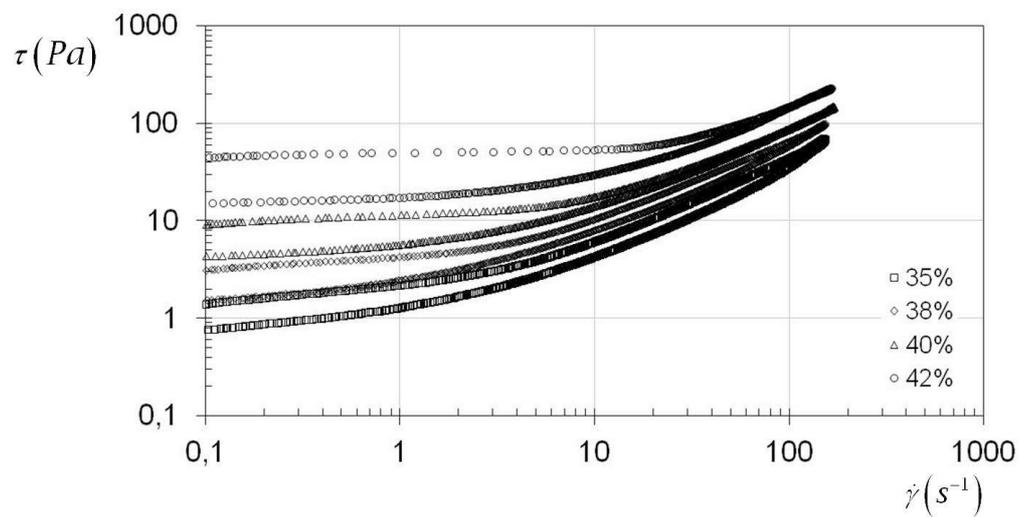


Figura B.3 Terreno III: curve di flusso al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ .

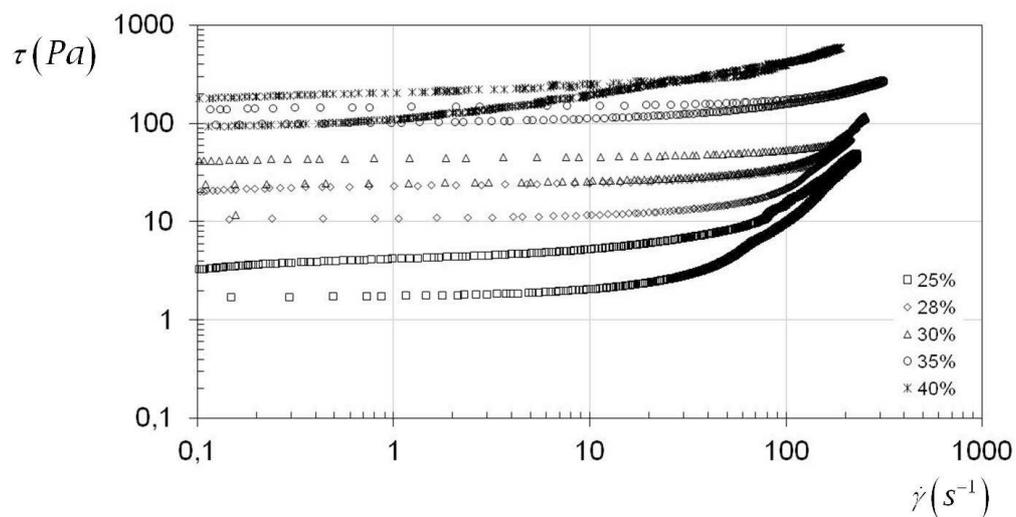


Figura B.4 Terreno V: curve di flusso al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ .

### B.2 CURVE DI CREEP

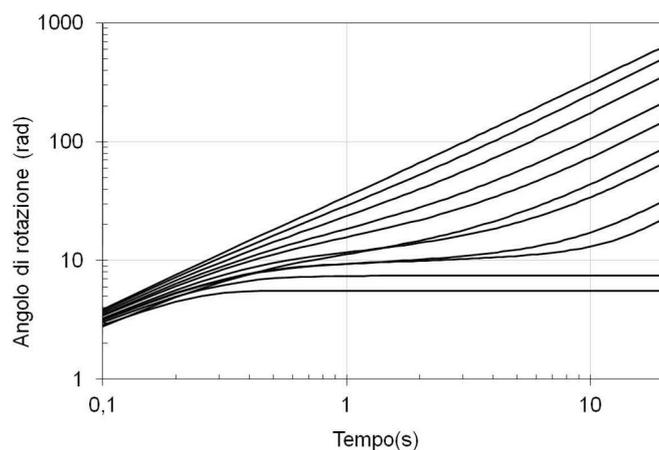


Figura B.5 Prove di creep relative al Terreno I ( $\Phi=38\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 10, 20, 23, 25, 28, 30, 35, 40, 50, 60, 70 Pa.

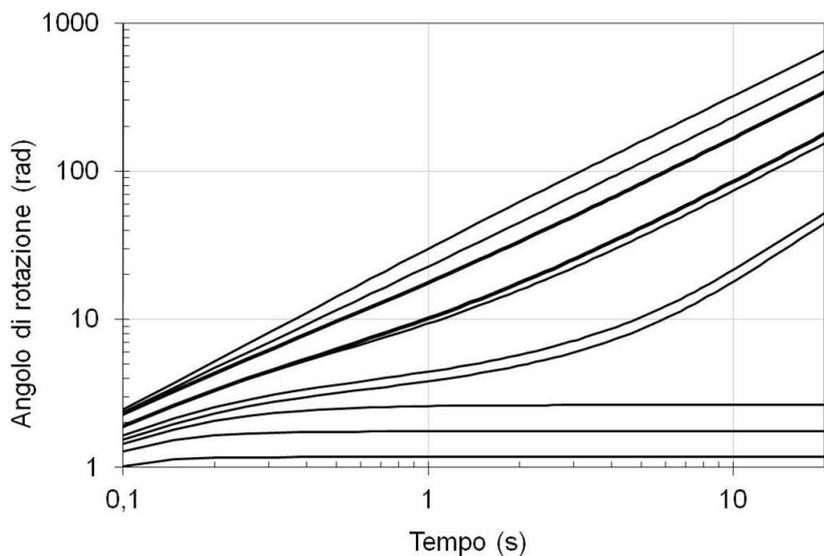


Figura B.6 Prove di creep relative al Terreno I ( $\Phi=40\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 40, 50, 60, 65, 70, 80, 90, 100, 120, 140 Pa.

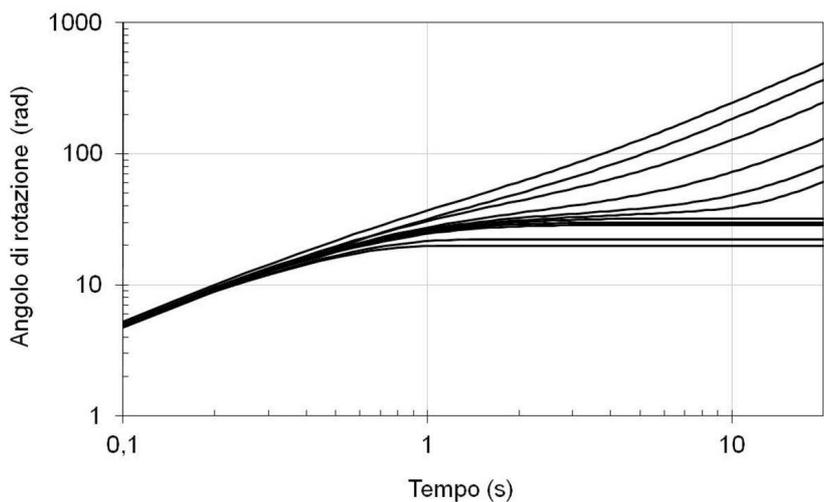


Figura B.7 Prove di creep relative al Terreno II-4 ( $\Phi=32\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 1, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 25, 30 Pa.

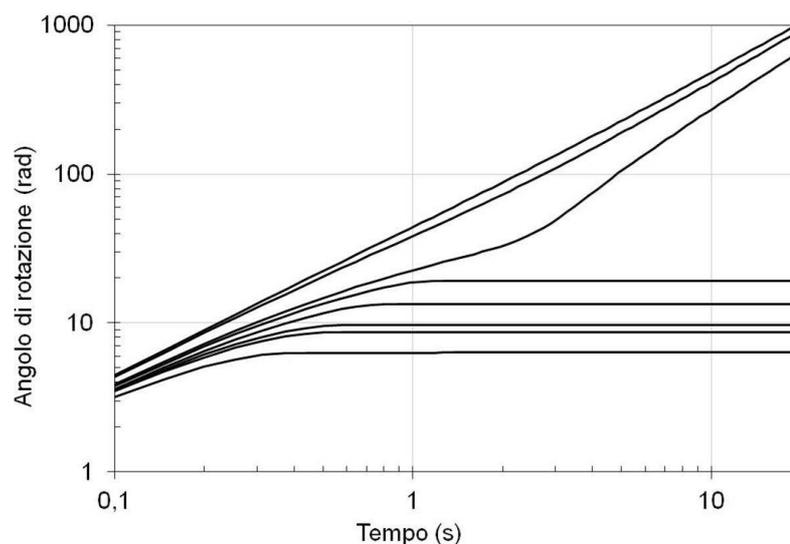


Figura B.8 Prove di creep relative al Terreno II-4 ( $\Phi=38\%$ ). Deformazione in funzione del tempo per differenti livelli tensionali: (dal basso verso l'alto) 240, 250, 260, 280, 285, 290, 295, 300 Pa.

### B.3 INTERPRETAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI CON IL MODELLO DI HERSCHEL&BULKLEY

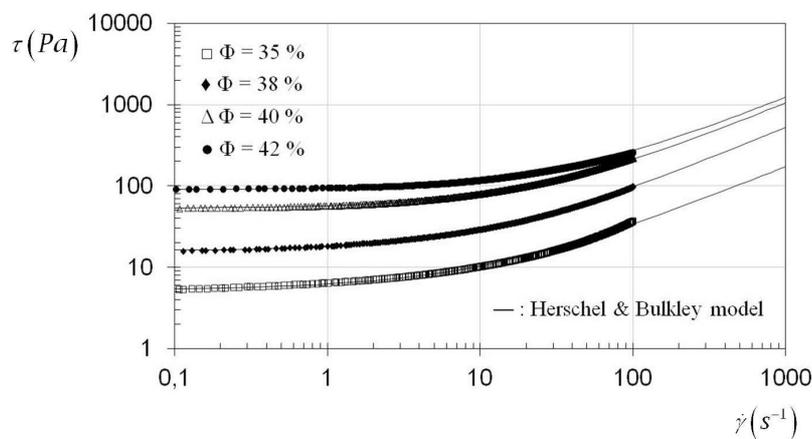


Figura B.9 Terreno I: curve di flusso sperimentali (simboli) e curve teoriche (linee continue) al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ .

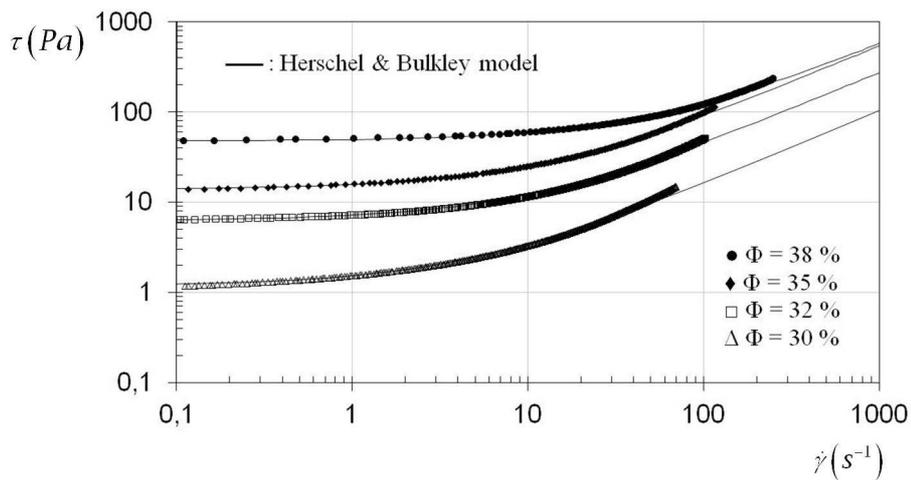


Figura B.10 Terreno II-4: curve di flusso sperimentali (simboli) e curve teoriche (linee continue) al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ .

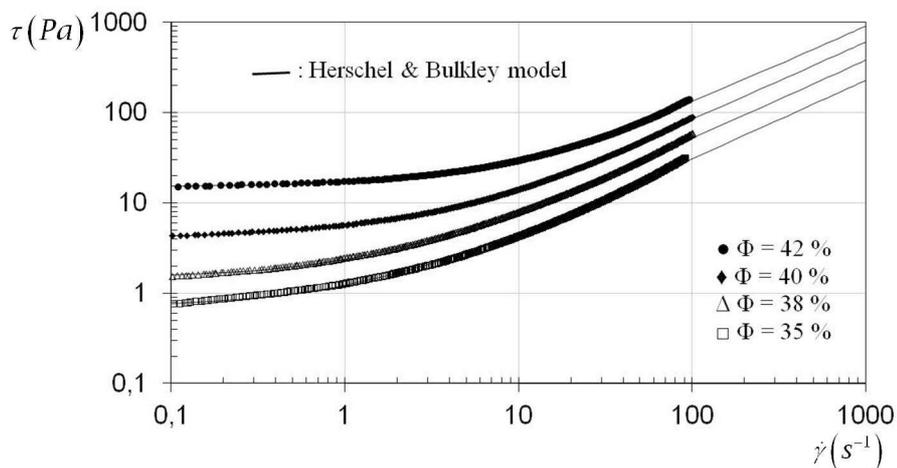


Figura B.11 Terreno III: curve di flusso sperimentali (simboli) e curve teoriche (linee continue) al variare della concentrazione solida volumetrica  $\Phi$ .

*Tabella B-1 Parametri del modello di Herschel&Bulkley utilizzati per l'interpretazione dei dati sperimentali.*

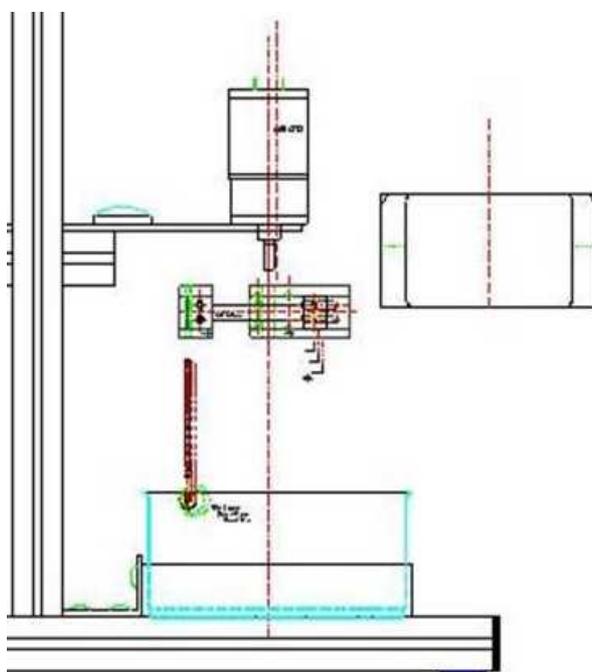
Herschel & Bulkley model				
$\tau = \tau_c + m \cdot \dot{\gamma}^{n^p}$				
Terreno	Concentrazione	Tensione di soglia	Indice di consistenza	Indice di pseudoplasticità
	$\Phi$	$\tau_c$	m	$n^p$
	%	Pa	Pa · s <sup>n</sup>	/
I	32	1,4	0,4	0,8
I	35	5,3	0,8	0,7962
I	38	15,9	2,1	0,7962
I	40	53,2	4,1	0,7962
I	42	89,9	4,7	0,7962
II-4	30	1,2	0,34	0,827
II-4	32	6,3	0,89	0,827
II-4	35	14	1,6	0,827
II-4	38	48	2,2	0,827
III	35	0,695	0,53	0,877
III	38	1,468	0,887	0,877
III	40	4,11	1,41	0,877
III	42	14,97	2,1	0,877



## Appendice C

# Schemi di progettazione e montaggio del reometro SDR

### C.1 SCHEMI DI PROGETTAZIONE



*Figura C.1 Sezione: configurazione principale del reometro SDR.*

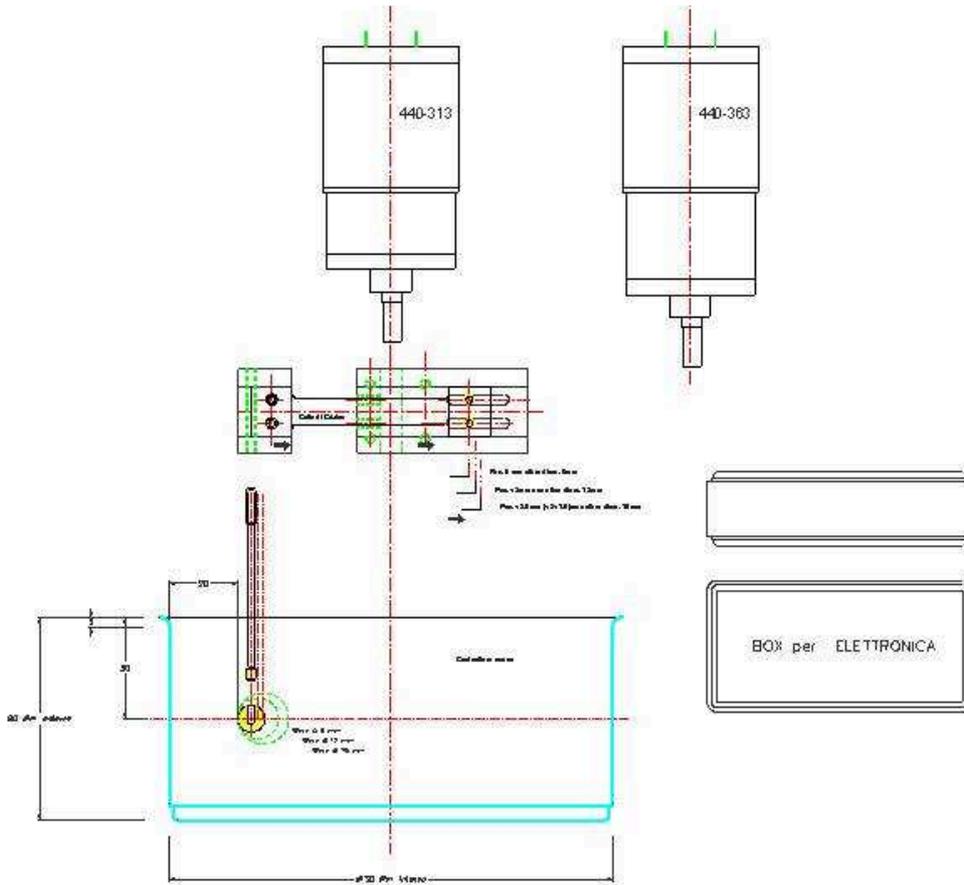


Figura C.2 Sezione: configurazione geometrica del reometro SDR, cella di carico, motoriduttori.



C.2 SCHEMI DI MONTAGGIO

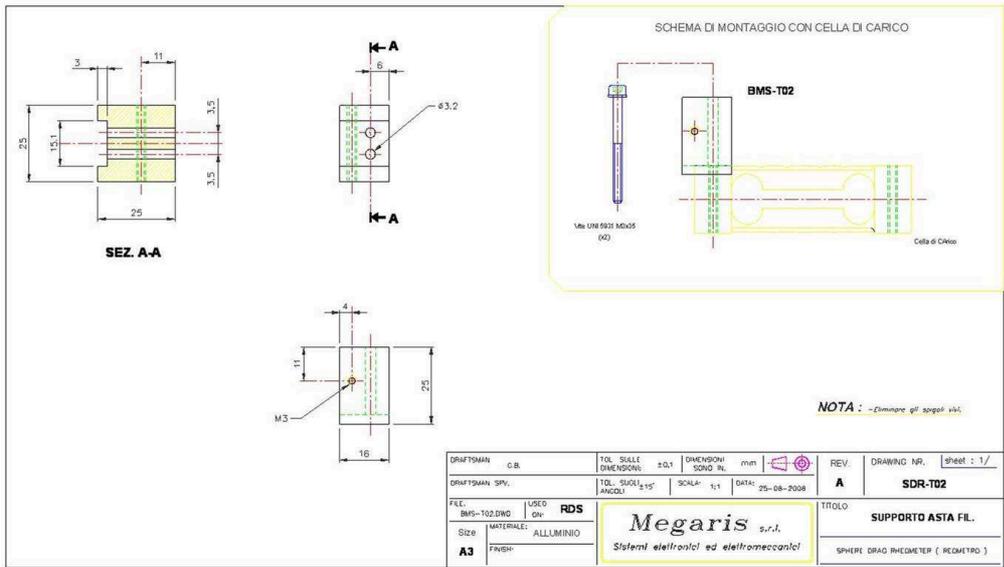


Figura C.4 Schema di montaggio cella di carico: supporto asta.





---

*Appendice D***Stabilità delle misure e modifiche apportate al reometro SDR****D.1 STABILITÀ DELLE MISURE**

In Figura D.1a e b è riportata un'elaborazione statistica delle misure desunte dalle prove di flusso eseguite con la sfera di diametro  $D$  pari a 18mm su due materiali differenti, un gel per capelli commercialmente in uso e una miscela acqua-sedimento a granulometria fine (Terreno I,  $\Phi=32\%$ ,  $d_{\max}<0,5\text{mm}$ ). Per un numero discreto di velocità rotazionali imposte è stato rilevato il valore minimo e massimo della forza di trascinamento  $F_D$  misurato in un giro completo della sfera all'interno del campione da analizzare. Si visto che, indipendentemente dal materiale, tali intervalli tendono ad essere di valore quasi costante.

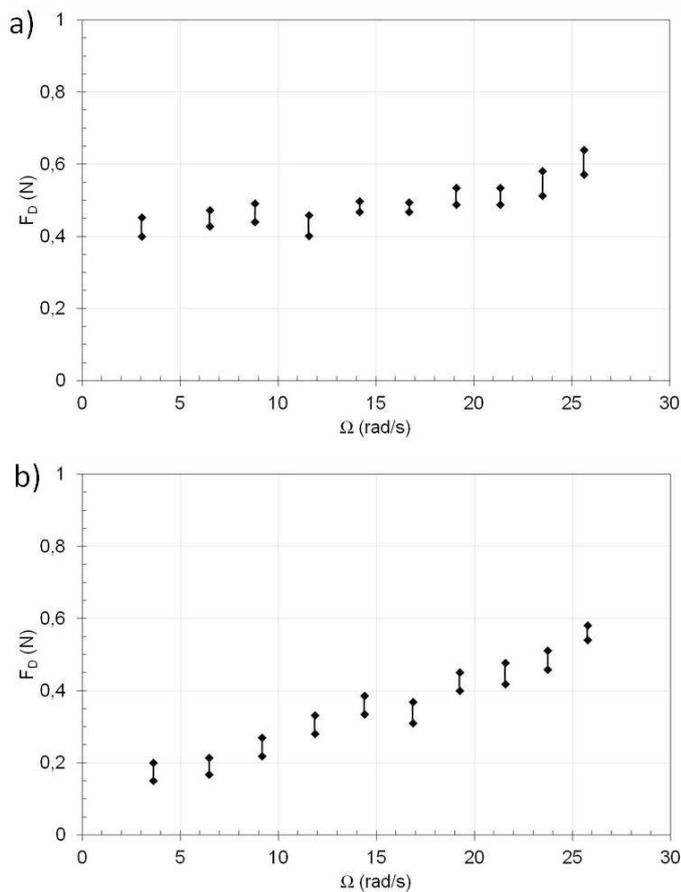


Figura D.1 Valore minimo e massimo della forza di trascinamento  $F_D$  misurata in un giro completo della sfera all'interno del campione per differenti valori di velocità di rotazione imposta. a)gel per capelli; b)miscela acqua-sedimento a granulometria fine (Terreno I,  $\Phi=32\%$ ,  $d_{max}<0,5mm$ ).

## D.2 INFLUENZA DELLA DIMENSIONE DELLA SFERA SUI RISULTATI SPERIMENTALI

Sono state condotte prove di flusso a velocità di rotazione controllata applicando una rampa crescente di velocità su un gel per capelli commercialmente disponibile, il quale ha un comportamento da fluido non Newtoniano dotato di tensione di soglia. Sono state seguite quattro prove di

flusso, una per ogni sfera in dotazione al reometro SDR ( $D_{\text{sfera}}=8, 15, 12$  e  $18\text{mm}$ ) ed in Figura D.2a sono riportate le curve sperimentali ottenute. Si nota che le prove eseguite con le sfere di diametro minore (8 e 12mm) non danno risultati attendibili circa il comportamento del materiale considerato: le curve di flusso sono piatte, ossia si ha più o meno la stessa misura della forza di trascinamento  $F_D$  all'aumentare della velocità angolare  $\Omega$  imposta, mentre la curva di flusso tipica di un gel per capelli è un curva in cui la forza di trascinamento  $F_D$  cresce al crescere della velocità angolare  $\Omega$ . Lo stesso tipo di risultato è stato osservato eseguendo le medesime prove su un altro materiale non newtoniano dotato di tensione di soglia, ossia una miscela acqua-sedimento a granulometria fine (Terreno I,  $\Phi=32\%$ ). In Figura D.2b sono riportate le curve di flusso ricavate al variare della dimensione della sfera utilizzata. Si nota che, anche per questo materiale, le misure effettuate con le sfere di diametro minore (8 e 12mm) non sono attendibili, in quanto si ha più o meno la stessa misura della forza di trascinamento al crescere della velocità di rotazione imposta. Indipendentemente dal materiale analizzato, le sfere di diametro maggiore hanno permesso di ricavare curve di flusso il cui andamento è coerente con quello tipico dei materiali considerati. Di conseguenza tutti i risultati sperimentali presentati nel presente lavoro si riferiscono a prove di flusso condotte utilizzando la sfera di diametro  $D$  pari a 18mm.

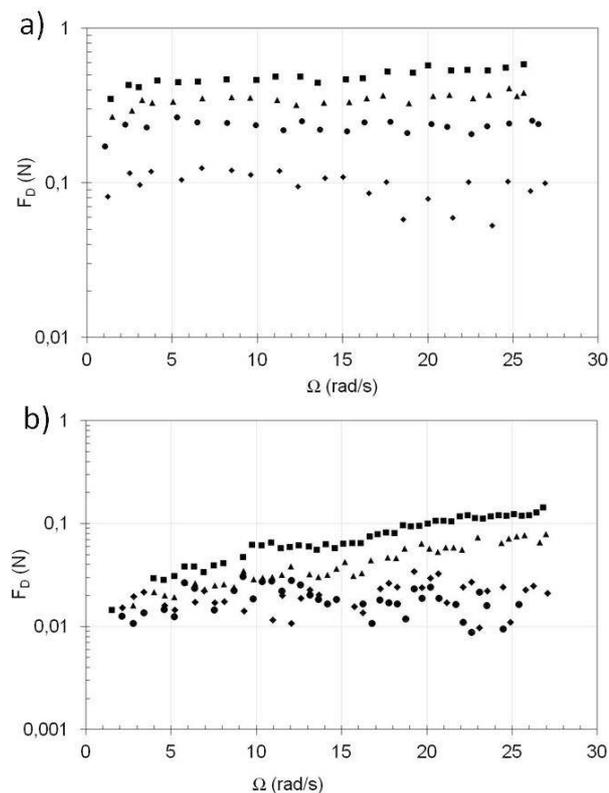
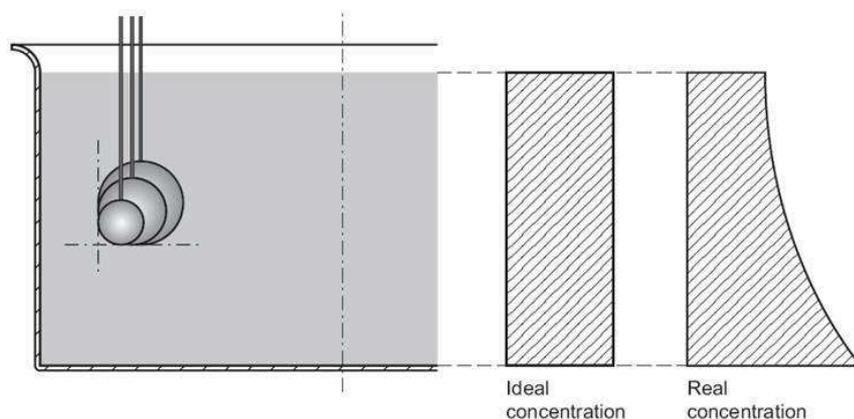


Figura D.2 Curve di flusso al variare della dimensione caratteristica  $D$  della sfera. a) gel per capelli: rombi,  $D=8\text{mm}$ ; cerchi,  $D=12\text{mm}$ ; triangoli,  $D=15\text{mm}$  quadrati,  $D=18\text{mm}$ ; b) Terreno I ( $\Phi=32\%$ ,  $d_{\max}=0,5\text{mm}$ ) : cerchi,  $D=8\text{mm}$ ; rombi,  $D=12\text{mm}$ ; rombi, triangoli,  $D=15\text{mm}$  quadrati,  $D=18\text{mm}$ .

### D.3 MODIFICHE APPORTATE AL REOMETRO SDR

Il reometro innovativo SDR è stato progettato per studiare il comportamento reologico di fluidi contenenti particelle di grandi dimensioni ed, in particolare, di miscele acqua-sedimento a granulometria grossolana ( $d_{\max}<10\text{mm}$ ). Durante l'esecuzione delle prove sono stati osservati fenomeni di sedimentazione delle particelle, anche se ogni miscela è stata opportunamente omogeneizzata prima di ogni esperimento. La sedimentazione determina un gradiente inverso di concentrazione di particelle lungo la profondità del contenitore, schematicamente illustrato in Figura D.3,

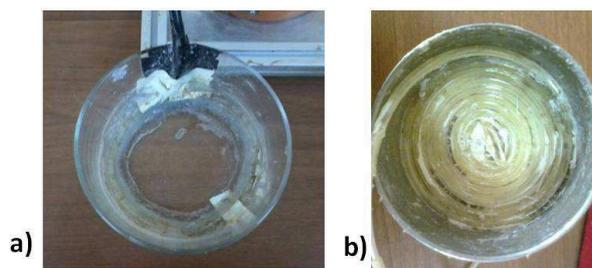
che dipende dalla concentrazione solida volumetrica della miscela, dalla dimensione dei grani e dalle proprietà fisico-chimiche delle particelle più piccole.



*Figura D.3 Concentrazione di sedimenti lungo la profondità del contenitore per le miscele analizzate con il reometro SDR.*

L'occorrenza della sedimentazione delle particelle in miscele a granulometria assortita può essere calcolata, per il materiale in condizioni statiche, attraverso la definizione del numero adimensionale  $Y = \tau_c / gd(\rho_g - \rho)$  (Chhabra&Richardson, 1999), dove  $\tau_c$  è la tensione di soglia,  $d$  il diametro dei grani,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $\rho_g$  e  $\rho$  sono la densità dei grani e del fluido, rispettivamente. Tuttavia nelle prove in reometro il materiale non è a riposo ma si trova in condizioni di flusso per cui il calcolo del numero statico  $Y$  non è stato effettuato nel presente lavoro. Purtroppo, sottoponendo a prova con il reometro SDR miscele siffatte, nelle quali le particelle hanno la tendenza a sedimentare, non è possibile stabilire se alla profondità di prova a cui si trova la sfera vengono misurate le proprietà reologiche della miscela nel suo insieme oppure quelle di una miscela meno concentrata. Esperimenti condotti nel presente lavoro con sistemi di misura tradizionali hanno dimostrato che l'aggiunta di piccole quantità di particelle grossolane in una miscela a granulometria fine provoca la riduzione dei parametri caratteristici della miscela (§ VI.4.1). In particolare è stata osservata una diminuzione della tensione di soglia in miscele a granulometria

grossolana con  $d_{\max} < 5\text{mm}$  rispetto il valore misurato per miscele a granulometria fine con  $d_{\max} < 0,5\text{mm}$ , a parità di Terreno e di concentrazione solida volumetrica. Prove preliminari in reometro SDR sulle medesime miscele hanno mostrato, invece, un andamento inverso: a parità di Terreno e di contenuto solido totale, la forza di trascinamento delle miscele a granulometria grossolana con  $d_{\max} < 5\text{mm}$  risulta maggiore di quella misurata per le miscele a granulometria fine con  $d_{\max} < 0,5\text{mm}$ . Probabilmente durante le prove in reometro SDR l'effetto della sedimentazione non è trascurabile e provoca una diminuzione della Forza di trascinamento nelle miscele poco concentrate e poco assortite a causa della diminuita resistenza che la sfera incontra nel suo moto. Prendendo come riferimento i risultati ottenuti con i sistemi di misura tradizionali (confermati anche in altri lavori presenti in letteratura, § VI.4.1), allo scopo di limitare gli effetti della sedimentazione sono state apportate alcune modifiche al reometro SDR. In un primo momento l'apparecchio è stato dotato di un agitatore, il quale, seguendo il moto della sfera, avrebbe dovuto mescolare in maniera continua la miscela durante l'esecuzione degli esperimenti. La presenza dell'agitatore limita sensibilmente l'intervallo di velocità di rotazione indagabile e causa la fuoriuscita della miscela dal contenitore quando la velocità di rotazione comincia a diventare elevata ( $\Omega > 15\text{rad/s}$ ). Al fine di ampliare l'intervallo di velocità applicabile è stata apportata un'ulteriore modifica all'apparecchio: sul fondo del contenitore, lungo il bordo, è stato posizionato un tubicino, forato per tutta la sua lunghezza, nel quale passa un flusso di aria compressa (Figura D.4a). Una volta apportata tale modifica (contemporanea presenza di agitatore e dell'aria compressa al bordo del contenitore) è stata condotta una prova di flusso a velocità di rotazione crescente su una miscela acqua-sedimento a granulometria grossolana (Terreno I,  $\Phi = 35\%$ ,  $d_{\max} < 5\text{mm}$ ) e la curva sperimentale così ottenuta è stata confrontata con quella ricavata per la medesima miscela ma in assenza di agitatore. Il confronto tra i risultati ottenuti è riportato in Figura D.5a.



*Figura D.4 Reometro SDR. a) circolazione di aria compressa al bordo del fondo del contenitore; b) circolazione di aria compressa su tutto il fondo del contenitore.*

Si nota che le curve sono pressoché paragonabili ma i valori di forza di trascinamento della miscela analizzata con il reometro in assenza di modifiche sono ancora minori di quelli misurati con l'apparecchiatura modificata. Al fine di migliorare i risultati, la medesima prova di flusso è stata eseguita sulla stessa miscela (Terreno I,  $\Phi=35\%$ ,  $d_{\max}<5\text{mm}$ ) imponendo la sola circolazione di aria compressa al bordo del contenitore. Il confronto tra i risultati ottenuti è riportato in Figura D.5b. Si nota che, a parità di velocità di rotazione, i valori misurati della forza di trascinamento sono molto maggiori nel caso di prova eseguita con il sistema di aria compressa al bordo del contenitore. In virtù di ciò, la circolazione dell'aria compressa è stata imposta su tutto il fondo del contenitore, eliminando definitivamente l'agitatore (Figura D.4b). Apportata tale modifica, è stata condotta la stessa prova di flusso sulla medesima miscela acqua-sedimento a granulometria grossolana (Terreno I,  $\Phi=35\%$ ,  $d_{\max}<5\text{mm}$ ) e la curva sperimentale così ottenuta è stata confrontata con quella ricavata per la medesima miscela ma in assenza di aria diffusa. Il confronto tra i risultati ottenuti è riportato in Figura D.5c. Sebbene non sia stato possibile indagare il comportamento della miscela ad elevati valori di velocità di rotazione, dal confronto tra i dati sperimentali si nota una riduzione della forza di trascinamento  $F_D$  misurata con il reometro modificato (Figura D.5c). Il reometro SDR munito del sistema di circolazione di aria compressa su tutto il fondo del contenitore sembra, quindi, la soluzione migliore da adottare per evitare che l'influenza della sedimentazione sulle curve sperimentali sia considerevole.

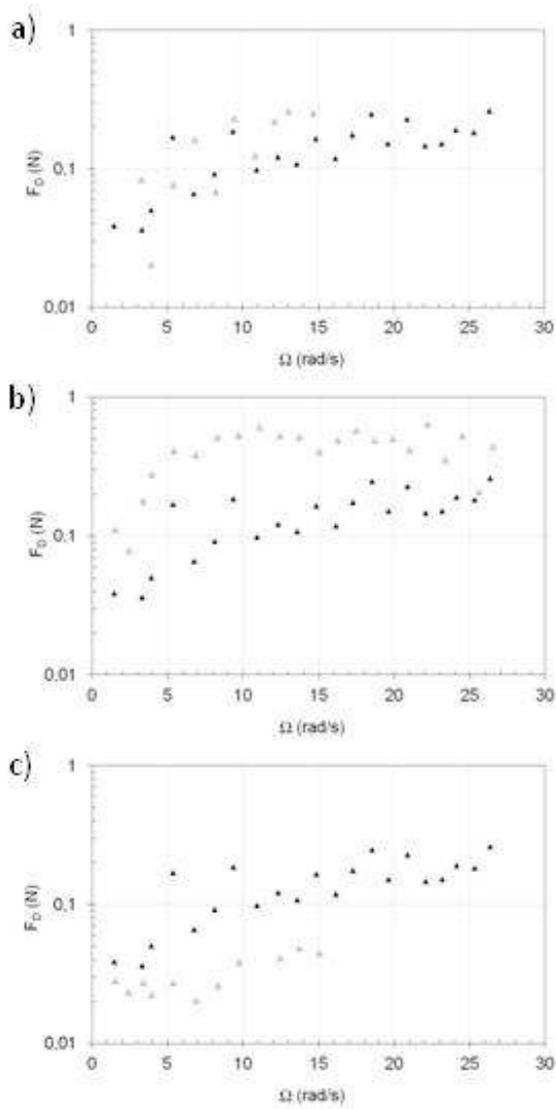


Figura D.5 Terreno I,  $\Phi=35\%$ ,  $d_{max}<5mm$ . Curve di flusso con il reometro modificato (simboli vuoti): a) presenza di agitatore ed aria compressa al bordo del fondo del contenitore; b) presenza della sola aria compressa al bordo del fondo del contenitore; c) presenza della sola aria compressa su tutto il fondo del contenitore. Curve di flusso in assenza di modifiche del reometro SDR (simboli pieni).

Ad ulteriore conferma del fatto che il sistema di circolazione di aria compressa su tutto il fondo del contenitore sia quello che permette di ridurre sensibilmente gli effetti della sedimentazione sui dati misurati, sono state eseguite altre prove di flusso a velocità crescente su una miscela di acqua e caolino (Terreno VI,  $\Phi=35\%$ ). Si è scelto di ripetere le prove con questo materiale perché il comportamento reologico del caolino è stabile e le particelle hanno minore tendenza alla sedimentazione rispetto quelle dei terreni piroclastici. Le prove sono state effettuate sia azionando il sistema di circolazione dell'aria al fondo del contenitore e sia in assenza di tale sistema. Il confronto tra i risultati sperimentali viene mostrato in Figura D.6. Si nota che, a parità di velocità di rotazione imposta, la forza di trascinamento  $F_D$  stimata con il sistema di aria compressa diffusa al fondo risulta minore di quella misurata in assenza di tale sistema.

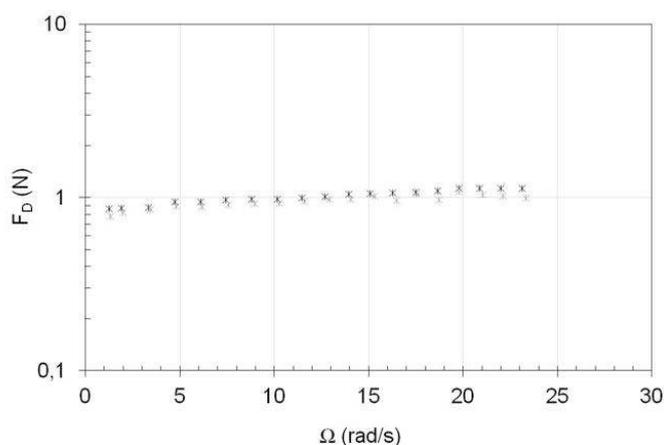


Figura D.6 Terreno VI,  $\Phi=35\%$ . Curve di flusso con il reometro modificato con la circolazione della sola aria compressa su tutto il fondo del contenitore (simboli grigi) e in assenza di modifiche del reometro SDR (simboli neri).

Probabilmente la circolazione dell'aria compressa su tutto il fondo del contenitore riduce la sedimentazione del materiale rimescolando in maniera continua la miscela: le particelle rimangono in sospensione durante il tempo di prova e la sfera, nel suo moto rotatorio all'interno del campione così omogeneizzato, incontra una resistenza minore. Una volta testato il sistema di circolazione dell'aria compressa diffusa al fondo sulla miscela di acqua e

caolino, la suddetta configurazione è stata utilizzata per effettuare una prova di flusso a velocità crescente su un'altra miscela acqua-sedimento a granulometria grossolana (Terreno II-8,  $\Phi=35\%$ ,  $d_{max}<10\text{mm}$ ). Il confronto tra la curva di flusso ottenuta con la configurazione di aria compressa su tutto il fondo del contenitore e quella ottenuta in assenza di modifiche all'apparecchiatura è mostrato in Figura D.7: in analogia a quanto già osservato per la miscela di acqua e caolino, la curva che si ottiene con l'utilizzo del sistema ad aria compressa diffusa è pressoché parallela a quella ottenuta in precedenza.

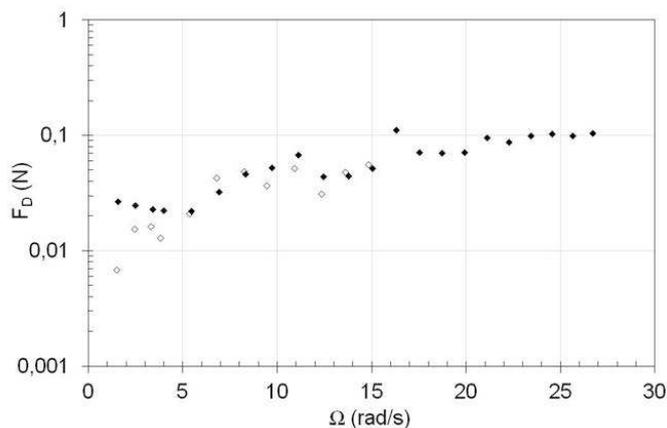


Figura D.7 Terreno II-8,  $\Phi=35\%$ ,  $d_{max}<10\text{mm}$ . Curve di flusso con il reometro modificato con la circolazione della sola aria compressa su tutto il fondo del contenitore (simboli vuoti) e in assenza di modifiche del reometro SDR (simboli pieni).

---

## Bibliografia

- AA.VV. (2002). Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico. Autorità di Bacino Nord-Occidentale della Campania, 4 vol., Napoli, TPS-SELCA.
- Adachi K. & Yoshioka N. (1973) Chem. Eng. Sci. 28, 215.
- Alderman, N. J., Meeten, G. H., and Sherwood, J. D. (1991). Vane rheometry of bentonite gels. *J. Non-Newton. Fluid.* 39, 291–310.
- Ancey C. & Jorrot H. (2001). Yield stress for particle suspension within a clay dispersion. *Journal of Rheology*, 45: 297-319.
- Ancey C. (2003). Role of particle network in concentrated mud suspensions. In Rickenmann D. and Chen C.L. (eds.) *Proc. 3rd Int. Conf. Debris flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessments*, Davos. Rotterdam: Millpress.
- Ancey C. & Evesque P. (2000). Frictional-collisional regime for granular suspension flows down an inclined channel. *Physical Review E*, 62: 8349-836.
- Ansley R.W. & Smith T.N. (1967). Motion of spherical particles in a Bingham plastic. *AIChE Journal*, 13: 1193-1196.
- A. Armanini; H. Capart; L. Fraccarollo; M. Larcher (2005). Rheological stratification of liquid-granular debris flows down loose slope. *J. of Fluid Mechanics*, p. 269 -319, 532.
- Atapattu D. D., Chhabra R. P., Uhlherr P. H. T. (1995). *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics* 59, 245.
- Bagnold R.A. (1954). Experiments on gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceeding of the Royal Society London, Series A*, 225:49-63.
- Barnes H.A. (1999). "The yield stress- a review or pantarei -everything flows?", *Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 81 (1-2):133-78.

Barnes H.A. & Nguyen Q.D. (2001). Rotating vane rheometry- A review. *Journal of non-Newtonian Fluids Mechanics* 98: 1-14.

Batchelor G.K. (1970). The stress system in a suspension of force-free particles. *Journal of Fluid Mechanics* 41, pp 545-570.

Batchelor G.K. & Green J.T. (1972). The hydrodynamic interaction of two small freely-moving spheres in a linear flow field. *Journal of Fluid Mechanics* 56, pp 375-400.

Batchelor G.K. (1977). The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics* 83, pp 97-117.

Beaulne M. & Mitsoulis E. (1997). Creeping motion of a sphere in tubes filled with Herschel-Bulkley fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 72: 55-71.

Beris A.N., Tsamopoulos J.A., Armstrong R.C. & Brown R.A. (1985). Creeping motion of a sphere through a Bingham plastic. *Journal of Fluid Mechanics*, 158: 219-244.

Blackery J. & Mitsoulis E. (1997). Creeping motion of a sphere in tubes filled with a Bingham plastic material. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 70: 59-77.

Brancaccio L., Cinque A., Sgrosso I. (1979). Forma e genesi di alcuni versanti di faglia in rocce carbonatiche: il riscontro naturale di un modello teorico. *Rend. Acc. Sc. Fis. Nat.*, s.IV, 46 21pp.

Briscoe B. J., Glaese M., Luckam P. F. and Ren S. (1992). *Colloid Surf.* 65, 69.

Budetta P., Calcaterra D., Corniello A., de Riso R., Ducci D., Santo A.,(1993). *Appunti di geologia dell'appennino meridionale*. Istituto di Geologia Applicata Università di Napoli. Pubblicazione n. 332.

Calcaterra D., de Riso R., Santo A. (2003). Landslide hazard and risk mapping: experiences from Campania, Italy. *Atti int. Conf. on Fast Slope movements Prediction and Prevention for Risk Mitigation*, Ass.Geot. Ital., 11-13 Maggio 2003, Napoli.

Calcaterra D. & Santo A. (2004). The January 10, 1997 Pozzano landslide, Sorrento Peninsula, Italy. *Eng. Geol.* 175, 181-200.

Calcaterra D., de Luca Tuppiti Schinosa F., Evangelista A., Ruopolo S. & Scotto di Santolo A. (2009). Modellazione di frane superficiali da

scorrimento-colata ad innesco meteorico nei depositi piroclastici del cratere degli Astroni (Campi Flegrei).

Cannon S.H. (1992). An empirical model for the volume change behaviour of debris flow. Proc.of the ASCE Hydr. Eng. '93, edited by Shen, H.W. and Wen,F, pp 1768-1773.

Cascini L. & Sorbino. G. (2003). The contribution of soil suction measurements to the analysis of flowslide triggering. Atti Int. Work. on Occurrence and mechanisms of flow-like landslides in natural slopes and earthfills, Ass.Geot. Ital., 14-16 Maggio 2003, Sorrento.

Chhabra R.P. & Uhlherr P.H.T. (1988). Static equilibrium and motion of spheres in viscoplastic liquids. Encyclopedia of Fluid Mechanics, Volume 7: Rheology and Non-Newtonian Fluids. Cheremisinoff N. (editor): 611-633.

Chhabra R.P. & Richardson J.F. (1999). Non-Newtonian Flow in the Process Industries. Butterworth-Heinemann. Oxford, Auckland, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Delhi. 436 p.

Chang C. & Powell R.L., (1994). "The rheology of bimodal hard-spheres dispersions", Phys. Fluids 6(5):1628-36.

Chen H. & Lee C.F. (2000). Numerical simulation of debris flows, Can. Geotech. J. 37:146-160.

Civita M., de Riso R., Lucini P., Nota d'Elogio E. (1975). Studio delle condizioni di stabilità dei terreni della penisola Sorrentina (Campania). Geologia Applicata e Idrogeologia, Bari, vol. X, parte I, pp. 129-188.

Comegna, L. (2005). Proprietà e comportamento delle colate in argilla. Seconda Università degli Napoli, Tesi di Dottorato: Napoli. p. 396.

Contreras S.M. & Davies T.R.H (2000). Coarse-Grained Debris-Flows, Hysteresis and Time-Dependent Rheology. J. Hydr. Eng., ASCEE, 126: 938-941.

Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. Can Geotech J 33:260-271.

Costa, J.E. and Williams, G.P. 1984. Debris flow dynamics. US Geological Survey Open file report 84-606.

Coussot, P. & Piau, J. M. (1994). On the behaviour of fine mud suspensions, Rheol. Acta, 33, 175-184.

Coussot P. & Piau J.M. (1995). A large-scaled field concentric cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. *J. of Rheology*, 39: 105-124

Coussot P., Proust S. & Ancey C. (1996). Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids. *J. non-Newtonian Fluids Mech.*, 66: 55-70.

Coussot, P. (1997). *Mudflow Rheology and Dynamics*. IAHR Monograph series, Balkema: Rotterdam.

Coussot P., Laigle D., Arattano M., Deganutti A. & Marchi L. (1998). Direct Determination of Rheological Characteristics of Debris Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124: 865-868.(1992).

Coussot P. (1999). *J. Fluid Mech.* 380, 363.

Coussot P. & Ancey C. (1999). "Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes", *Physical Review Letter E*, Vol.49, 4445-4456,.

Coussot P., Raynaud J.S. & Ancey C. (2003). Combined MRI-rheometry determination of behaviour of mud. In Rickenmann D. and Chen C.L. (eds.) *Proc. 3rd Int. Conf. Debris flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessments*, Davos. Rotterdam: Millpress.

Coussot, P., Nguyen, Q.D., Huynh, H.T., and Bonn, D., (2002). Avalanche behavior in yield stress fluids, *Physical Review Letters* 88, 175501.

Coussot, P. (2005). *Rheometry of Pastes, Suspensions and granular materials: Application in Industry and Environment*. New York: John Wiley & Sons, Inc., Publications.

Coussot, P. Tabuteau, H., Chateau, X., Tocquer, L., and Ovarlez, G., (2006). Aging and solid or liquid behavior in pastes. *J. Rheol.* 50, 975-994.

Damiano E. (2004). *Meccanismi d'innescimento di colate di fango in terreni piroclastici*. Tesi di Dottorato in Ingegneria Geotecnica, Seconda Università degli studi di Napoli.

Cruden D.M. & Varnes D.J. (1996). *Landslides Types and Processes*. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press, WA, 36-75.

De Vivo B., Rolandi G., Gans P.B., Calvert A., Bohrson B.A., Spera F.J., Belkin H.E. (2001). New constraints on the pyroclastic eruptive history of the Campania volcanic Plain (Italy). *Mineralogy and Petrology*, 73, pp. 47-65.

de Riso R., Budetta P., Calcaterra D., Santo A. (1999). Le colate rapide in terreni piroclastici del territorio campano. Atti Conv. su "Previsione e Prevenzione dei fenomeni franosi", Ass. Georisorse e Ambiente, Torino, Trento 17-19 giugno 1999.

de Riso R. Budetta P, Calcaterra D., De Luca, Del Prete S., Di Crescenzo G, Guarino P., Mele R., Palma G, Santo A. and Sgambati D. (2004). Fenomeni di instabilità dei versanti dei Monti Lattari e dell'Area Flegrea (Campania): scenari di suscettibilità da frana in aree campione. Quaderni di Geologia Applicata, 11 (1), pp. 1-30.

De Vita P. & Celico P., (2006). Distribuzione delle coltri piroclastiche sui versanti carbonatici perivesuviani e suscettibilità a franare. Giornale di Geologia Applicata 3, 145-151.

Denlinger R.P. & Iverson R.M., (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain. 1. Coulomb mixture theory. J. Geophysical Research, Vol. 106, Nr. B1: 537-552.

Denlinger R.P. & Iverson R.M., (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain. 2. Numerical predictions and experimental data. J. Geophysical Research, Vol. 106, Nr. B1: 553-566.

Di Crescenzo G. & Santo A. (1999). Analisi geomorfologica delle frane da scorrimento colata rapida in depositi piroclastici della Penisola Sorrentina (Campania). Geografia Fisica e Dinamica del Quaternario, 22, pp. 57-72.

Di Crescenzo G., Santo A. (2005). Debris slides–rapid earth flows in the carbonate massifs of the Campania region (Southern Italy): morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility. Geomorphology, 66, pp. 255-276.

Di Crescenzo G., Rotella M., Santo A. (2007). Il contributo della geologia per lo studio dei meccanismi di innesco di colate rapide di fango al campo sperimentale di Monteforte Irpino (primi risultati). In Piattaforme Evolute di Telecomunicazioni e di Information Technology per l'Offerta di Servizi al settore Ambiente PETIT-OSA a cura di C. Nunziata Aracne editrice srl Roma ISBN 978-88-548-1184-3.

Evangelista A., Scotto di Santolo A. (2001). Mechanical behaviour of unsaturated pyroclastic soil. In M. Kühne, H.H: Einstein, E. Krauter, H. Klapperich, R. Pöttler (eds.), Landslides – Causes, Impacts and Countermeasures, proc. Int. Conf., Davos: pp. 35-44.

Evangelista, A. & Scotto di Santolo, A. (2004). Analysis and field monitoring of slope stability in unsaturated pyroclastic soil slopes in Napoli, Italy. Proc. 5th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York 2004.

Evangelista A., Scotto di Santolo A., Lombardi G. (2007). Previsione dell'insacco di fenomeni franosi nelle coltri piroclastiche della città di Napoli. Atti del XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica, Padova 2007 pp. 227-234.

Faella C. & Nigro E. (2001). Effetti delle colate rapide sulle costruzioni. Parte seconda: valutazione delle velocità di impatto. Forum per il rischio idrogeologico "Fenomeni di colata rapida di fango nel maggio '98", Napoli, 22 giugno 2001, pp. 105-112.

Fall, A., Bertrand, F., Ovarlez, G., Bonn, D. (2009). Yield stress and shear-banding in granular suspensions. *Physical Review Letters* 103, 178301.

Fannin R.J. & Wise M.P. (2001). An empirical-statistical model for debris flow travel distance. *Canadian Geotechnical Journal* 38: 982-994.

Ferraris C.F., (1999). Measurement of the rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report, *Journal of Research of the National Institute of Standard Technology*, Vol. 104, N° 5, September-October 1999.

Ferroir T., Huynh H. T., Chateau X. and P. Coussot (2004). *Phys. Fluids* 16, 594.

Giammarino A. (2010). Analisi idro-meccanica di colate di argilla sulla base del monitoraggio di un sito sperimentale. Tesi di dottorato in Ingegneria delle Costruzioni, Università degli studi di Napoli.

Heymann L., Peukert S., Aksel N., (2002 ). On the solid-liquid transition of concentrated suspensions in transient shear flow. *Rheological Acta* 41 (4): 307-15.

Hungr O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32: 610-623.

Hunt M.L., Zenit R., Campbell C.S. & Brennen C.E. (2002). Revisiting the 1954 suspension experiments of R.A. Bagnold. *Journal of Fluid Mechanics*, 452: 1-24.

Isaia R., D'Antonio M., Dell'Erba F., Di Vito M., Orsi G. (2004). The Astroni volcano: the only example of closely spaced eruptions in the same

vent area during the recent history of the Campi Flegrei caldera (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133, 171-192.

Iverson, R.M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35: 245-296.

Jeffrey D.J. & Acrivos A. (1976). The Rheological Properties of Suspensions of Rigid Particles. *AIChE Journal* (Vol.22, N°3).

Johnson A.M. (1970). A method for interpretation of natural phenomena intrusions in igneous rocks, fractures and folds, flow of debris and ice. *Physical processes in geology*. Freeman, Cooper and Co., San Francisco, California.

Kaitna, R., Rickenmann, D. & Schatzmann, M. (2007). Experimental study on the rheologic behaviour of debris flow material. *Acta Geotechnica* (2007), 2: 71-85.

Lampitiello S. (2004). Resistenza non drenata e suscettività alla liquefazione di ceneri vulcaniche della Regione Campania. Tesi di Dottorato in Ingegneria Geotecnica, Seconda Università degli studi di Napoli.

Larson, R. G. (1999). *The Structure and Rheology of Complex Fluids*, Oxford Univ. Press, New York.

Machac I., Ulbrichova I., Elson T. P. and Cheesman D. J., (1995). *Chemical Eng. Sci.* 50, 3323

Major J.J. & Pierson T.C. (1992). Debris flow rheology: Experimental Analysis of Fine-Grained Slurries. *Water Resources Research*, vol. 28, 3,841-857.

Major J.J. (1996). Experimental studies of deposition at a debris-flow: Process, characteristics of deposition and effects of pore-fluid pressure. Ph.D. dissertation, University of Washington, Seattle, 341 p.

Major J.J. (1997). Depositional processes in large-scale debris-flow experiments. *J. Of Geology*, 105: 345-366.

Macosko C.W. (1994). *Rheology. Principles, Measurements and Applications*. Wiley-VCH, Inc. pp 550.

Malet J.P., Remaître A., Maquaire O., Anczyk C. & Locat J. (2003). Flow susceptibility of heterogeneous marly formations : implications for torrent hazard control in the Barcelonnette Basin (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Proc. of the 3rd Int. Conf. on debris flow hazards mitigation*.

Martino, R. (2003). Experimental analysis on the rheological properties of debris-flows deposit. In Rickenmann D. and Chen C.L. (eds) *Proceeding 3rd International Conference Debris Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Davos. Rottedradam: Millpress.

Metzner A.B. & Otto R.E. (1957). Agitation of Non-Newtonian Fluids. *AIChE Journal*, 3: 3-10.

Mewis J. & Spaul A.J.B., (1976). Rheology of concentrated dispersions. *Advanced in Colloidal and Interface Science*, 6, 173-200.

Mansoutre S., Colombet P. & Van Damme H. (1999). Water retention and granular rheological behaviour of fresh C3S paste as a function of concentration. *Cement & Concrete Research* 29, 1441-1453.

Müller M., Tyrach J. & Brunn P.O. (1999). Rheological characterization of machineapplied plasters. *ZKG International*, 52: 252-258.

Nguyen Q.D. & Boger D.V. (1987). Characterization of yield stress fluids with concentric cylinder viscometers. *Rheologica Acta*, 26: 508-515.

Nguyen, Q.D. & D.V. Boger (1992). Measuring the flow properties of yield stress fluids. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 24, 47-88.

Nicotera M.V. & Papa R. (2007). Comportamento idraulico e meccanico della serie piroclastica di Monteforte Irpino. In *Piattaforme Evolute di Telecomunicazioni e di Information Technology per l'Offerta di Servizi al settore Ambiente PETIT-OSA* a cura di C. Nunziata Aracne editrice srl Roma ISBN 978-88-548-1184-3.

O'Brien J.S. & Julien P.Y. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. *Proc. of the specialty conference on delineation of landslide, flash flood and debris flow hazards in Utah*, Utah State University, Logan, Utah, June 14-15, 1984. Utah Water Research Laboratory, General Series, UWRL/G-85/03: 260-279.

O'Brien J.S. & Julien P.Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114: 877-887.

Olivares L. & Picarelli L. (2001). Susceptibility of loose pyroclastic soils to static liquefaction: some preliminary data. In M. Kühne, H.H: Einstein, E. Krauter, H. Klapperich, R. Pöttler (eds.), *Landslides – Causes, Impacts and Countermeasures*, proc. Int. Conf., Davos: pp.75-85.

Olivares L., Picarelli L., Andreozzi L., Avolio B., Damiano E., Lampitiello S. (2002). Scenari di pericolosità di frana in terreni sciolti di natura

piroclastica. Proc. XXI Convegno Nazionale di Geotecnica, L'Aquila: pp. 173-181. Bologna: Patron.

Orsi G., de Vita S., Di Vito M. (1996). The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration. *Journal Volcanol. Geotherm. Res.*, 74, pp. 179-214.

Ovarlez, G., Rodts, S., Chateau, X. and Coussot, P. (2009). Phenomenology and physical origin of shear localization of the shear banding in complex fluids. *Rheologica Acta* 48, 831-844.

Papa R. (2007). Indagine sperimentale sulla coltre piroclastica di un versante della Campania. Tesi di dottorato in Ingegneria delle Costruzioni, Università degli studi di Napoli.

Pastor M., Fernandez Merodo J. A., Quecedo M., Herreros M.I., Gonzalez E, & Mira P. (2002). Modelling of Debris Flows and Flow Slides. *Numerical modelling in Geomechanics*: 1213-1232.

Pellegrino A.M. (2007). Analisi numerica dell'evoluzione delle colate rapide campane. Tesi di laurea in Ing. Strutturale e Geotecnica, Univ. di Napoli Federico II.

Pellegrino A.M., Scotto di Santolo A. & Evangelista A. (2008). Comportamento reologico di alcuni depositi piroclastici interessati da colate rapide. IARG Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Catania, Italia, 15-17 settembre 2008.

Pellegrino A.M., Scotto di Santolo A., Evangelista A. & Coussot P., (2009). Rheological study of pyroclastic debris flow material in Campania region, southern Italy. IARG Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Roma, Italia, 09 - 11 Settembre 2009.

Pellegrino A.M., Scotto di Santolo A., Evangelista A. & Coussot P. (2010). Rheological behaviour of pyroclastic debris flow, Third International Conference on Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flow "Debris Flow III", Milano, Italia, 24 - 26 May 2010.

Petra V.L. & Boger D.V. (1996). Yield stress measurements with the vane. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* Volume 63, Issues 2-3, Pages 235-261

Picarelli L., Evangelista A., Rolandi G., Paone A., Nicotera M.V., Olivares L., Scotto di Santolo A., Lampitiello S., Rolandi M. (2006). Mechanical properties of pyroclastic soils in Campania Region. Invited paper, 2nd Int.

Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore.

Pignon, F., Magnin, A., Piau, J. M. (1996). Thixotropic colloidal suspension and flow curve with a minimum: identification of flow regimes and rheometric consequence, *J. Rheol.*, 40, 573–587.

Pirulli M. (2005). Numerical modelling of landslide runout A continuum mechanics approach. Tesi di dottorato in Ingegneria Geotecnica, Politecnico di Torino.

Phillips C.J. & Davies T.R.H. (1991). Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology.*, 4: 101-110.

Pudasaini S.P. (2003). Dynamics of Flow Avalanches Over Curved and Twisted Channels: Theory, Numerics and Experimental Validation, Ph. D. thesis, Darmstadt University of Technology.

Rolandi G., Petrosio P., McGeehin J., (1998). The interplinian activity at Somma Vesuvius in the last 3500 years. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 82: 19-52.

Rolandi G., Bellucci F., Heizler M.T., Belkin H.E., De Vivo B., (2003). Tectonic controls on the genesis of ignimbrites from the Campania volcanic zone, southern Italy. *Mineralogy and petrology*, 79: 3-31.

Rosi M., Sbrana A., (1987). The Phlegrean fields. CNR, quaderni di La ricerca scientifica.

Savage S.B. & Hutter K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J Fluid Mechanics* 199: 177–215.

Schatzmann M., Bezzola G.R. & Minor H.E. (2003). Rheological Behaviour of Fine and Large Particle Suspensions. *J. Hydr. Eng., ASCE*, 129: 796-803.

Schatzmann M. (2005). Rheometry for large particle fluids and debris flows. Ph.D. dissertation No. 16093, ETH, Zürich, Switzerland.

Schatzmann, M., Bezzola, G.R., Minor, H.E., Windhab, E.J., Fischer, P. (2009). Rheometry for largeparticulated fluids: analysis of the ball measuring system and comparison to debris flow rheometry. *Rheologica Acta* 48, 715-733.

Sheidegger A.E. (1973). On the prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides. *Rock Mechanics*, vol.5.

Scotto di Santolo A (2000). Analisi geotecnica dei fenomeni franosi nelle coltri piroclastiche della provincia di Napoli. Tesi di dottorato in Ingegneria Geotecnica, Università degli studi di Napoli.

Scotto di Santolo A., Nicotera M.V., Ramondini M., Evangelista A., Pellegrino A., Urciuoli G. (2000). Some remarks on the shear strength of Neapolitan pyroclastic deposits. Proc. Int. Conf. on Geotech. Engin., GeoEng 2000, Melbourne.

Scotto di Santolo, A., Pellegrino, A. M. & Evangelista, A. (2009). Experimental study on the rheological behaviour of debris flow material in Campania region. Proc. 5th Int. Conf. Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow, New Forest 1, 305-316.

Scotto di Santolo A., Pellegrino A.M. & Evangelista A. (2009). Experimental study on the rheological behaviour of debris flow material in the Campania region. Geophysical Research Abstracts Vol. 11, EGU 2009 – 8788, 2009, EGU General Assembly 2009, 19 -24 Aprile 2009, Vienna, Austria.

Scotto di Santolo A., Pellegrino A.M., Evangelista A. & Coussot P. (2010). Post failure behaviour of pyroclastic debris flow. Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU 2010 – 1313, 2010, EGU General Assembly 2010, 2 - 7 Maggio 2010 Vienna, Austria.

Scotto di Santolo A., Pellegrino A.M. & Evangelista A. (2010). A new rheometer for mud and debris flow. Geophysical Research Abstracts Vol. 13, EGU 2011 – 10927, 2011, EGU General Assembly 2011, 3 - 8 Aprile 2011 Vienna, Austria.

Scotto di Santolo A., Pellegrino A.M. & Evangelista A. (2010). Experimental study on the rheological behaviour of pyroclastic debris flow. Natural Hazards and Earth System Sciences Journal 2010, vol. 10, issue 12, p. 2507-2514.

Scotto di Santolo A., Pellegrino A.M., Evangelista A. & Coussot P. (2011). Rheological behaviour of reconstituted pyroclastic debris flow”, *Geotechnique Journal*, [www.icevirtuallibrary.com](http://www.icevirtuallibrary.com).

Stickel, J.J. & Powell, R.L.(2005). Fluid mechanics and Rheology of Dense Suspensions. *Annu. Rev. Fluid Mech*, 37.

Takahashi T. (1991). Debris flows. IAHR Monograph series, Balkema: Rotterdam.

Valentik L. & Whitmore R. L. (1965). Br. J. Appl. Phys. 16, 1197.

Voellmy (1955). Uber die Zerstorungskraft von lawinen. Bauzeitung. Jahrgang 73, 212-285.

Wildemuth C.R. & Williams M.C. (1985). A new interpretation of viscosity and yield stress in dense slurries: Coal and other irregular irregular particles. Cement & Concrete Research 36, 1214-1221.

Zingariello M.C. (2006). Progettazione, messa a punto e primi risultati di un modello fisico di pendio. Tesi di dottorato in Ingegneria delle Costruzioni, Università degli studi di Napoli.