



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

**INDAGINI REOLOGICHE SU SOSPENSIONI ACQUOSE DI
LAPONITE**

Relatore:

Prof. Orazio Baglieri

Correlatore:

Ing. Fabrizio Miglietta

Studente:

Vanessa Tritto

MAT. 224902

SETTEMBRE 2018

*A mio padre,
l'uomo più importante della mia vita.
Ti porterò sempre nel cuore.*

Sommario

ABSTRACT.....	1
INTRODUZIONE	3
1. IL FENOMENO DELLA LIQUEFAZIONE	7
1.1. Cause di innesco del fenomeno.....	7
1.2. Cause scatenati e predisponenti	9
1.3. Meccanismi di rottura	11
1.4. Interventi di mitigazione del rischio	15
1.5. Utilizzo di geomateriali per la prevenzione del rischio di liquefazione.....	17
2. LAPONITE: CARATTERISTICHE CHIMICHE E PROPRIETÀ REOLOGICHE.....	21
2.1. Struttura chimica	22
2.2. Proprietà e caratteristiche delle dispersioni di acqua e laponite	24
2.3. Caratteristiche reologiche delle sospensioni di acqua e laponite.....	28
2.3.1. Cenni sul comportamento tissotropico dei materiali	28
2.3.2. Tipologia di test oscillatori	30
2.3.3. Risultati dei test oscillatori sulle sospensioni di acqua e laponite	32
3. ANALISI SPERIMENTALE	37
3.1. Strumentazione.....	38
3.1.1. Reometro rotazionale.....	38
3.1.2. Agitatore meccanico	43
3.2. Materiali	44
3.3. Preparazione del campione	46
3.4. Procedura di prova	49
3.5. Caratteristiche delle prove.....	53
4. ANALISI DEI DATI	56

4.1.	Andamento dei moduli G' e G''	57
4.1.1.	Andamento dei moduli G' e G'' a 3 ore dalla miscelazione	58
4.1.2.	Andamento dei moduli G' e G'' a 8 ore dalla miscelazione	60
4.1.3.	Andamento dei moduli G' e G'' a 7 giorni dalla miscelazione	62
4.1.4.	Considerazioni generali	64
4.2.	Andamento della viscosità nella fase di pre-shearing	66
4.2.1.	Considerazioni generali	68
4.3.	Abbattimento del modulo elastico	69
4.3.1.	Abbattimento del modulo elastico al variare della percentuale di laponite 70	
4.3.2.	Abbattimento del modulo elastico al variare dello shear rate.....	72
4.3.3.	Considerazioni generali	74
5.	CONCLUSIONI	75
	BIBLIOGRAFIA	79

Indice delle figure

Figura 1.1 - Stato tensionale sul generico elemento di terreno: a) condizione geostatica, b) effetto degli sfozi di taglio ciclici	8
Figura 1.2 - Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione	10
Figura 1.3 - Loma Prieta, California, 1989. Vulcanello formatosi a seguito di un terremoto di magnitudo 7.1	12
Figura 1.4 - Emilia Romagna, Italia, 2012. Rottura del terreno e fuoriuscita di acqua e sabbia (http://www.meteoweb.eu/2014/07/terremoto-emilia-falde-innalzate-e-liquefazione-dei-terreni-dopo-il-sisma-del-2012/303527/)	13
Figura 1.5 - Niigata, Giappone, 1964. Ribaltamento delle strutture a seguito di fenomeni di liquefazione	13
Figura 1.6 - Kocaecki, Turchia, 1999. Fuoriuscita di acqua e sabbia e formazione di laghi	14
Figura 1.7 - CSR versus cicli alla liquefazione per campioni di sabbia e bentonite (0%, 3%, 5%)	18
Figura 1.8 - Andamento del modulo G e G al variare dello shear strain per campioni contenenti il 10% di bentonite ed il 3.25% di laponite	19
Figura 1.9 - Rigidezza al taglio di geomateriali di argilla	20
Figura 1.10 - Esempio di test oscillatorio svolto su dispersioni di bentonite	20
Figura 2.1 - Struttura di una cella elementare di minerali di laponite	23
Figura 2.2 – Particella di laponite	23
Figura 2.3 - Interazione tra le particelle di laponite. (a) edge-to-face (b) face-to-face	25
Figura 2.4 - Processo di formazione della laponite	25
Figura 2.5 - Diagramma di fase delle sospensioni di acqua e laponite (Tanaka et al., 2004)	27
Figura 2.6 - Processo di cage-diffusion delle particelle di laponite.....	27
Figura 2.7 - Variazione della microstruttura di un materiale tissotropico in seguito all'applicazione di uno shear rate	29
Figura 2.8 - Ciclo di isteresi dei materiali tissotropici.....	30
Figura 2.9 - Test oscillatori.....	31

Figura 2.10 - Andamento della viscosità per sospensioni al 3% di laponite per tempi di invecchiamento di (a) 15 minuti e (b) 6 ore.....	34
Figura 2.11 - Andamento di G' , G'' e δ in funzione della deformazione di taglio applicata e per diversi tempi di invecchiamento (a) 1 ora (b) 2 ore (c) 4 ore (d) 12 ore	35
Figura 2.12 - Andamento di G' e G'' dopo l'applicazione di uno shear rate di 50 1/s per 5 minuti.....	36
Figura 2.13 - Evoluzione del modulo viscoso per tempi di inattività di 6 giorni e per diverse concentrazioni di laponite (dal basso 3.5, 3.2, 2.8 e 2.4%).....	36
Figura 3.1 - Reometro Physica MCR 301 prodotto da Anton Paar	38
Figura 3.2 - Motore sincrono EC	39
Figura 3.3 - Possibili sistemi di misura installabili nel reometro Physica MCR 301	40
Figura 3.4 - Sistema piatto-cono CP-50.....	42
Figura 3.5 - Agitatore meccanico Heidolph RZR 2041	43
Figura 3.6 - Girante utilizzata per le operazioni di preparazione del campione	44
Figura 3.7 - Procedura di preparazione del campione	48
Figura 3.8 - Inserimento del campione nel reometro.....	51
Figura 3.9 - Rasatura del campione	51
Figura 3.10 - Fase finale	52
Figura 4.1 - Prova condotta su un campione al 2.6% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 3 ore.....	58
Figura 4.2 - Prova condotta su un campione al 2.9% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 3 ore.....	58
Figura 4.3 - Prova condotta su un campione al 2.9% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 3 ore.....	59
Figura 4.4 - Prova condotta su un campione al 2.6% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 8 ore.....	60
Figura 4.5 - Prova condotta su un campione al 2.9% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 8 ore.....	61
Figura 4.6 - Prova condotta su un campione al 3.2% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 8 ore.....	61
Figura 4.7 - Prova condotta su un campione al 2.6% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 7 giorni	62

Figura 4.8 - Prova condotta su un campione al 2.9% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 7 giorni	63
Figura 4.9 - Prova condotta su un campione al 3.2% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 7 giorni	63
Figura 4.10 - Andamento della viscosità nella fase di pre-shearing per un tempo di invecchiamento di 3 ore	66
Figura 4.11 - Andamento della viscosità nella fase di pre-shearing per un tempo di invecchiamento di 8 ore	67
Figura 4.12 - Andamento della viscosità nella fase di pre-shearing per un tempo di invecchiamento di 7 giorni	67
Figura 4.13 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare del valore di shear rate (miscela 2.6%)	70
Figura 4.14 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare del valore di shear rate (miscela 2.9%)	70
Figura 4.15 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare del valore di shear rate (miscela 3.2%)	71
Figura 4.16 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare di percentuale di laponite (shear rate 700 1/s).....	72
Figura 4.17 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare di percentuale di laponite (shear rate 800 1/s).....	72
Figura 4.18 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare di percentuale di laponite (shear rate 800 1/s).....	73

ABSTRACT

Recenti studi hanno dimostrato che le sospensioni di acqua e argilla possono influenzare sensibilmente le caratteristiche geotecniche di un terreno granulare. L'introduzione di tali sospensioni in terreni granulari può rappresentare una valida alternativa ai più comuni interventi di rinforzo del terreno, soprattutto nei riguardi di fenomeni di liquefazione. La liquefazione è un avvenimento legato alla propagazione delle onde sismiche all'interno di terreni con particolari proprietà geologiche e geotecniche, che determina una riduzione o un annullamento della resistenza al taglio e un aumento della pressione interstiziale dell'acqua presente nei pori. In questo caso il terreno assume il comportamento di un fluido e manifesta meccanismi di rottura che coinvolgono il terreno stesso e le costruzioni presenti su di esso. Gli interventi di mitigazione del rischio di liquefazione sono molteplici, tuttavia l'introduzione di sospensioni di acqua e argilla rappresenta un intervento non invasivo, che non induce disturbo nel terreno.

Lo scopo di questo elaborato è lo studio delle proprietà reologiche di un particolare tipo di sospensione: acqua e laponite. La laponite è un'argilla sintetica caratterizzata da particelle molto più piccole delle argille naturali. Percentuali di laponite dell'ordine del 3% disperse in acqua determinano la formazione di un sistema colloidale, le cui caratteristiche evolvono nel tempo. Inizialmente, la miscela si presenta come un sol, successivamente, all'aumentare del tempo di maturazione, la struttura evolve in un gel trasparente che esibisce comportamenti tempo-dipendenti, simili a quelli manifestati dai materiali tissotropici. Grazie a questa caratteristica, tale materiale può essere facilmente iniettato nel terreno, senza arrecare disturbo. Il comportamento delle sospensioni di acqua e laponite è dovuto alla microstruttura della laponite: le particelle si attraggono generando una configurazione *edge-to-face* o *face-to-face*, responsabile della formazione di una struttura stabile simile a quella di un gel. Tuttavia, l'applicazione di stimoli esterni provoca la rottura dei legami interparticellari, comportando la distruzione della struttura interna. In questo caso, il materiale comincia a fluire, manifestando comportamenti liquid-like. Al cessare dello stimolo, inizia il processo di ristrutturazione della materia, quindi la sospensione torna ad esibire comportamenti solid-like. Tale processo è influenzato sia dall'entità dello stimolo

esterno, sia dalla percentuale di laponite dispersa in acqua. Per tale motivo i test coinvolti nella presente sperimentazione sono stati condotti facendo variare questi due parametri.

Le sospensioni di acqua e laponite sono state testate per mezzo di test oscillatori e rotazionali, eseguiti con l'ausilio dei reometri del "Laboratorio Materiali Stradali" del Politecnico di Torino. Lo scopo dei test è quello di valutare l'andamento delle proprietà viscoelastiche nelle stesse condizioni, ma in tempi di invecchiamento differenti. La sperimentazione è stata divisa in più fasi. Inizialmente sono stati preparati tre gruppi di campioni con diversa percentuale di laponite su peso d'acqua: 2.6%, 2.9% e 3.2%. Poiché la presenza di eventuali ioni dispersi in acqua può influenzare sensibilmente il comportamento della miscela, per la preparazione dei campioni è stata utilizzata acqua deionizzata. Successivamente i campioni sono stati lasciati maturare per tre ore, prima dell'inizio dei test. Le prove sono state condotte alla temperatura di 22.5°C e per diverse finestre temporali, relative al tempo di invecchiamento della miscela: 3, 4, 5, 6, 7, 8, 24, 48 ore, 7 e 10 giorni. Ogni miscela è stata testata per tre diversi valori di shear rate: 700 1/s, 800 1/s e 1000 1/s. L'applicazione di shear rate simula l'effetto di un generico disturbo esterno che può manifestarsi sulla miscela, come ad esempio il disturbo arrecato durante la fase di iniezione di quest'ultima nel terreno. Durante questa fase, il materiale comincia a fluire e si può osservare una variazione delle sue proprietà viscoelastiche. In particolare, è possibile notare una variazione della viscosità e del modulo complesso della miscela. Questi due parametri sono stati l'oggetto di studio della sperimentazione. La loro variazione è risultata dipendente non soltanto dalla composizione della miscela, ma anche dal tempo di invecchiamento della stessa e dal valore di shear rate applicato, parametro che influenza il processo di ristrutturazione della materia.

INTRODUZIONE

La liquefazione è un fenomeno causato dalla propagazione delle onde sismiche, che si manifesta in particolari tipi di terreno granulare. La liquefazione comporta una variazione di stato del terreno a seguito dell'aumento della pressione interstiziale dell'acqua presente nei pori.

Numerose sono le testimonianze degli effetti legati a questo tipo di fenomeno. Si ricordano, ad esempio, i terremoti manifestati a Niigata, in Giappone (1964), Loma Prieta, in California (1989), Kocaeli, in Turchia (1999), a Taiwan (1999) e anche i più recenti terremoti che hanno coinvolto l'Italia nel 2012. Gli effetti della liquefazione sono evidenti sia sul terreno, sia sulle strutture: i danni registrati sono elevati, ad esempio rotture del terreno, formazione di depositi di acqua e sabbia, cedimenti del terreno e delle fondazioni delle strutture.

Per salvaguardare le opere civili e per garantire adeguati livelli di sicurezza sulla vita delle persone, gli interventi che sono stati adottati su terreni liquefacibili sono molteplici. Tali interventi si differenziano in base alla tipologia di terreno, al livello di severità del terremoto atteso, alla profondità dello strato potenzialmente liquefacibile e al tipo di strutture presenti in superficie. Alcune tecniche risultano essere molto invasive, provocando un elevato grado di disturbo sull'ambiente circostante, per questo motivo non sempre possono essere utilizzate, specialmente in prossimità di opere esistenti. Recenti studi focalizzano la loro attenzione sull'introduzione di nuove tecniche meno invasive, come l'iniezione di geomateriali costituiti da sospensioni di acqua e argilla. Tali materiali, per le loro caratteristiche fisiche e reologiche, si prestano meglio all'iniezione, provocando un grado di disturbo minimo, confrontato con altre tecniche più invasive come ad esempio il jet-grouting.

Lo scopo del presente elaborato è studiare le proprietà reologiche che caratterizzano un tipo particolare di queste sospensioni, ovvero la miscela di acqua e di un'argilla sintetica, la laponite.

La laponite è un materiale che, se disperso in acqua, manifesta proprietà liquid-like e solid-like, in relazione al tempo di invecchiamento della miscela. Inizialmente la sospensione si presenta fluida, per questo motivo può essere facilmente iniettata nel

terreno, andando ad occupare i pori presenti in esso. Successivamente la struttura evolve in un gel, caratterizzato da un determinato valore del modulo complesso.

Il lavoro è mirato a valutare l'andamento della viscosità nel tempo e l'evoluzione che subisce il modulo elastico nel tempo, a seguito dell'applicazione di differenti valori di shear rate. Attraverso queste informazioni è possibile valutare il comportamento della miscela ed il processo di risuttrutturazione che essa subisce a seguito dell'applicazione di stimoli esterni. La sperimentazione è stata condotta con le strumentazioni presenti nel Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino.

Il presente elaborato è strutturato nelle seguenti cinque sezioni principali:

- Il CAPITOLO 1 è dedicato alla descrizione del fenomeno della liquefazione. In particolare, sono elencate le cause che innescano il fenomeno, le cause predisponenti e le cause scatenanti. Successivamente, sono elencati i possibili meccanismi di rottura che coinvolgono il terreno e le costruzioni e gli interventi di mitigazione del rischio, focalizzando l'attenzione sull'utilizzo di geomateriali, quali miscele di acqua e bentonite o acqua e laponite;
- Il CAPITOLO 2 tratta le caratteristiche chimiche e reologiche della laponite. Inizialmente è descritta la struttura chimica di questa particolare argilla sintetica, successivamente sono analizzate la microstruttura e le proprietà delle dispersioni di acqua e laponite, facendo riferimento al diagramma di fase della miscela. Sulla base delle analisi riportate in letteratura, è stato possibile analizzare il comportamento reologico della sospensione, nonché l'andamento della viscosità e del modulo complesso;
- Il CAPITOLO 3 espone la parte sperimentale della tesi. Sono descritti gli strumenti ed i materiali utilizzati per i test e le procedure adoperate per la preparazione dei campioni. Gli ultimi paragrafi sono dedicati alla descrizione delle prove e alle loro caratteristiche;
- Il CAPITOLO 4 analizza i risultati ottenuti dalle prove. In una prima fase è stato necessario fare una premessa riguardo la variabilità dei risultati, dovuta a fattori esterni e non sempre controllabili. Successivamente viene valutato il trend del modulo elastico e del modulo viscoso durante le prove effettuate e l'andamento della viscosità nella fase di pre-shearing, con l'applicazione di diversi valori di shear rate;

- Nel CAPITOLO 5 sono riportate le possibili conclusioni tratte dal lavoro svolto in fase di sperimentazione e l'efficacia del comportamento della miscela per lo scopo prefissato dalla tesi.

1. IL FENOMENO DELLA LIQUEFAZIONE

In geotecnica con il termine *liquefazione* si intende la riduzione di resistenza al taglio di un terreno sabbioso saturo per effetto dell'incremento delle pressioni interstiziali. Il primo a descrivere tale fenomeno fu Terzaghi, che nel 1925 fornì la seguente definizione:

“la liquefazione può avere luogo se un terreno saturo collassa, trasferendo quindi il peso delle particelle solide all'acqua circostante; come conseguenza, la pressione idrostatica, indipendentemente dalla profondità, aumenta fino a raggiungere il valore del peso di volume immerso del terreno”.

1.1. Cause di innesco del fenomeno

Le cause di innesco possono essere dovute ad azioni di tipo statico o dinamico. In relazione al tipo di sollecitazione agente, è possibile distinguere due tipi di liquefazione:

- *liquefazione statica*: il meccanismo di rottura avviene in determinate conformazioni di depositi sabbiosi e limosi, i quali, per effetto di perturbazioni esterne (ad esempio il cedimento di un pendio), raggiungono la condizione critica;
- *liquefazione ciclica*: il meccanismo di rottura è indotto da carichi dinamici e ciclici (scuotimento indotto dal sisma) a frequenze relativamente elevate.

Facendo riferimento al fenomeno di liquefazione ciclica, si consideri il comportamento del terreno sotto l'azione di sollecitazioni dinamiche indotte dal sisma. Inizialmente il terreno è costituito da un insieme di grani a contatto e da acqua interstiziale. In tali condizioni (condizioni geostatiche) la resistenza è di tipo frizionale (dipende solo dalla tensione media di contatto σ') e lo stato tensionale è caratterizzato da tensioni efficaci verticali e orizzontali (σ'_v , σ'_h) ed eventuali tensioni tangenziali τ_D . Durante un evento sismico, il terreno è soggetto ad uno scuotimento indotto dalla propagazione delle onde di taglio che provocano la nascita di sforzi di taglio ciclici τ_{cyc} . Questi sforzi

determinano l'addensamento del terreno (densificazione ciclica) con riduzione dell'indice dei vuoti fino ad un valore minimo (Figura 1.1)

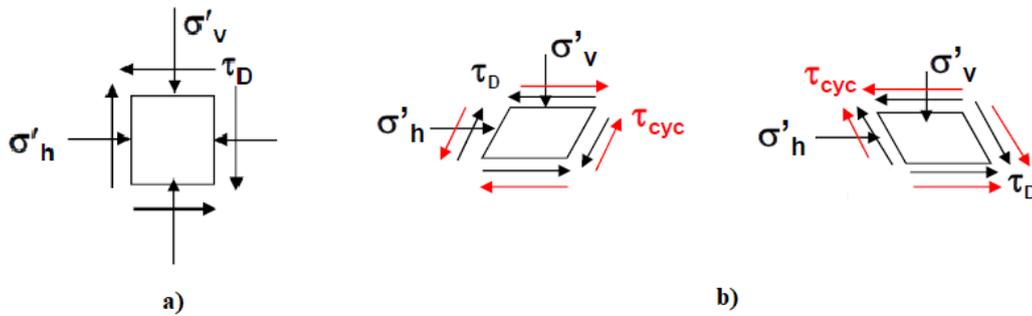


Figura 1.1 - Stato tensionale sul generico elemento di terreno: a) condizione geostatica, b) effetto degli sforzi di taglio ciclici

Nel caso di terreni sciolti in condizioni non drenate, la diminuzione di volume genera un incremento della pressione interstiziale del fluido presente nei vuoti. Poiché lo scuotimento indotto dal sisma è applicato con alta frequenza e velocità, l'allontanamento dell'acqua non è contestuale all'applicazione del carico: si generano delle sovrappressioni interstiziali Δu che impediscono l'addensamento del terreno. La pressione a cui è soggetto il fluido risulta pertanto la seguente:

$$u = u_0 + \Delta u$$

All'aumentare di tale pressione, la tensione di contatto fra le particelle si riduce fino al raggiungimento della condizione critica, rappresentata dall'annullamento delle tensioni efficaci:

$$\sigma' = \sigma - u = 0$$

In questa situazione, le particelle di terreno non sono più a contatto e non sono in grado di trasferire il carico con continuità: il terreno si comporta come un fluido viscoso. Tale comportamento è confermato dall'annullamento della resistenza al taglio, espressa dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb:

$$\tau_r = \sigma' \tan \varphi = 0$$

Terminata l'azione del sisma, la sovrappressione interstiziale si diffonde nella zona circostante, innescando un fenomeno di dispersione che porta all'annullamento delle sovrappressioni. In tale situazione, si osserva un recupero delle tensioni efficaci e della resistenza. Tuttavia, nonostante il fenomeno sia temporaneo, possono verificarsi danni permanenti e cedimenti delle strutture costruite su tali depositi di terreno.

1.2. Cause scatenati e predisponenti

Un deposito di terreno può essere soggetto a liquefazione se sono verificate contemporaneamente una serie di condizioni predisponenti (natura del terreno) e scatenanti (caratteristiche dell'azione sismica).

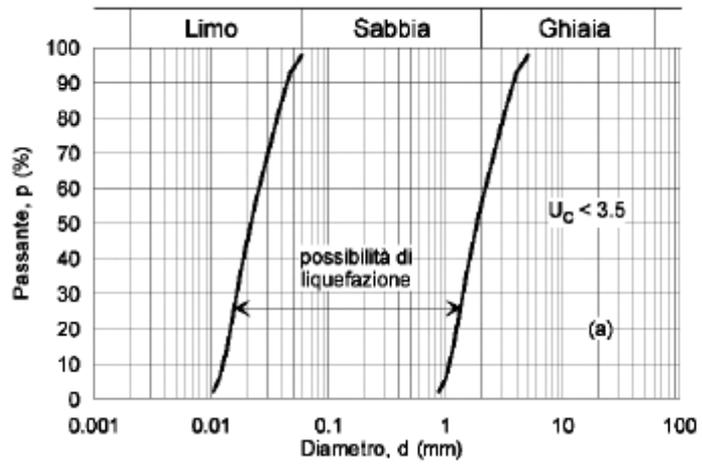
I *fattori scatenati* determinano una variazione delle sovrappressioni interstiziali Δu . Affinchè si manifesti la liquefazione è necessario che l'azione sismica abbia le seguenti caratteristiche:

- Magnitudo superiore a 5.5 della scala Richter;
- Accelerazione massima al suolo PGA superiore a 0.15g;
- Durata dell'evento sismico superiore a 15-20 secondi.

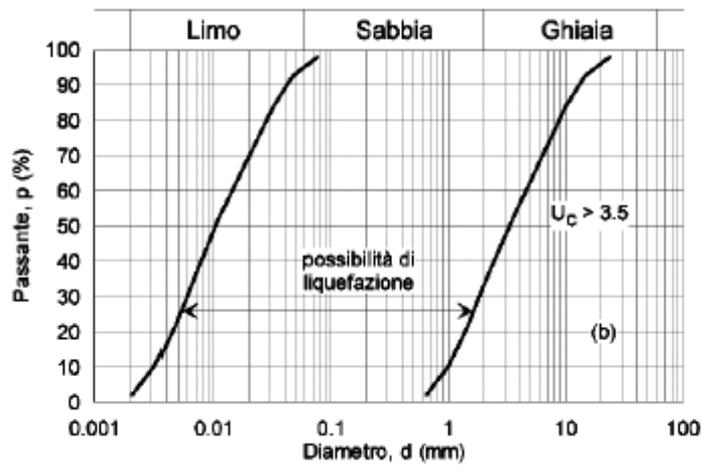
I *fattori predisponenti* influiscono sullo stato tensionale iniziale σ' . A tal proposito, i depositi di terreno liquefacibili sono quelli in cui si verificano le seguenti condizioni:

- Profondità dello strato di terreno (misurata rispetto al piano campagna) inferiore a 15-20 metri;
- Profondità della falda inferiore a 5 metri;
- Densità relativa $D_r < 60\%$ (terreni sciolti o poco addensati);
- Diametro medio delle particelle $0.02 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$;
- Frazione di fini, con diametro $< 0.005 \text{ mm}$, minore del 15%.

Inoltre, le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 suggeriscono dei fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione, in relazione al coefficiente di uniformità U_c (Figura 1.2).



a)



b)

Figura 1.2 - Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione

1.3. Meccanismi di rottura

I meccanismi di rottura che si possono generare a seguito di fenomeni di liquefazione sono molteplici:

- Rottura per flusso: si verifica in aree con pendenze superiori a 3 gradi, costituite generalmente da sabbie limose sature, in cui interviene un rapido scorrimento del suolo liquefatto con spostamenti di grosse quantità di terreno per diversi metri o decine/centinaia di metri e con velocità di decine di Km/h;
- Dislocazione laterale: si verifica in aree a bassa pendenza (2-3 gradi) costituite da due strati, il primo superficiale rigido che poggia su un secondo formato da materiale liquefatto limitato da un canale o dall'argine di un corso d'acqua. Lo strato superficiale rigido si frantuma lateralmente provocando un movimento di blocchi verso l'esterno;
- Oscillazioni del terreno: si verifica in aree in cui il suolo è completamente piatto, costituite da due strati dove solo quello sottostante è liquefatto. Il suolo superficiale si rompe formando grosse fessure in cui blocchi di materiale galleggiano sul secondo strato liquefatto oscillando in verticale;
- Perdita di capacità portante: si verifica quando il suolo si trasforma in liquido, diventa poco resistente e può perdere la sua capacità di sopportare edifici larghi e con fondazioni anche ben progettate;
- Cedimenti differenziali: si verificano quando lo strato di terreno liquefacibile non ha uno spessore uniforme. Il cedimento differenziale può causare danni alle strutture supportate o a quelle all'interno delle terreno.

(G. Riga, 2007)

Le manifestazioni di tali meccanismi di rottura sono varie e numerose e possono consistere in:

- Mulinelli di sabbia (sand boils), formati da sospensioni di acqua e particelle sabbiose/limose che fuoriescono dal terreno sottostante attraverso fratture e fessure degli strati più superficiali;

- Cedimento del terreno, conseguenti all'addensamento degli strati incoerenti causato dall'espulsione in superficie di grandi volumi di terra e alla dissipazione delle pressioni interstiziali;
- Oscillazioni del terreno che producono fratture, avvallamenti e danni alle strutture sovrastanti;
- Galleggiamento di infrastrutture sepolte che risultano più leggere del terreno circostante liquefatto;
- Collasso di opere di sostegno;
- Perdita di capacità portante delle fondazioni.

Le immagini seguenti mostrano l'effetto della liquefazione sui terreni e sulle strutture di terremoti avvenuti in passato.



Figura 1.3 - Loma Prieta, California, 1989. Vulcanello formatosi a seguito di un terremoto di magnitudo 7.1



*Figura 1.4 - Emilia Romagna, Italia, 2012. Rottura del terreno e fuoriuscita di acqua e sabbia
(<http://www.meteoweb.eu/2014/07/terremoto-emilia-falde-innalzate-e-liquefazione-dei-terreni-dopo-il-sisma-del-2012/303527/>)*

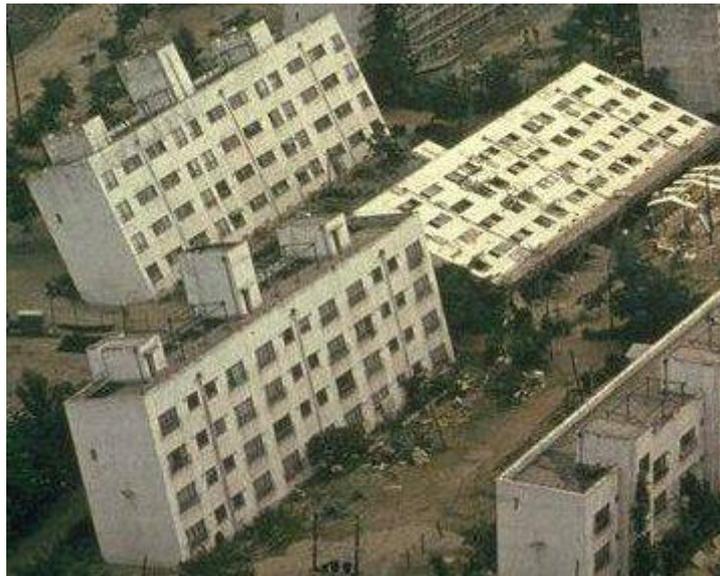


Figura 1.5 - Niigata, Giappone, 1964. Ribaltamento delle strutture a seguito di fenomeni di liquefazione



Figura 1.6 - Kocaeli, Turchia, 1999. Fuoriuscita di acqua e sabbia e formazione di laghi

1.4. Interventi di mitigazione del rischio

Gli interventi di mitigazione del rischio di liquefazione sono molteplici e possono essere applicati sia nel caso di nuove costruzioni, sia per opere esistenti. Tali interventi possono essere raggruppati in tre categorie:

1. Progettazione o adeguamento di strutture di fondazione resistenti;
2. Addensamento del terreno;
3. Rinforzo del terreno.

La scelta del metodo dipende da numerosi fattori, legati principalmente all'estensione e profondità del terreno interessato, livello di severità del terremoto atteso, tipologia strutturale e condizioni di accessibilità del sito.

Strutture resistenti

Gli interventi variano in relazione al caso di opere nuove o esistenti. Lo scopo è quello di minimizzare i danni conseguenti il fenomeno della liquefazione, rendendo la struttura sufficientemente rigida ed in grado di assorbire eventuali sforzi differenziali. Questo è possibile attraverso la realizzazione di controventi o irrigidimenti della fondazione. In alternativa è possibile prevedere opere di fondazione su pali, fondate sugli strati di terreno più profondi e non soggetti a liquefazione.

Addensamento del terreno

La densificazione del terreno comporta principalmente due vantaggi, ovvero la riduzione dei vuoti interstiziali, con conseguente diminuzione della tendenza del terreno ad addensarsi per effetto del sisma, e la riduzione delle deformazioni attese. Le tecniche di densificazione sono molteplici:

- *Compattazione dinamica profonda*: sulla superficie del deposito sono applicati una serie di impatti mediante la caduta di un grave, lasciato cadere da diversi metri di altezza;
- *Vibrocompattazione*: la densificazione avviene per effetto di vibrazioni indotte da una sonda vibrante a punta conica. Il foro è riempito con materiale granulare che viene addensato contro le pareti del foro. Tale tecnica può essere applicata a diverse profondità;

- *Vibrosostituzione*: la tecnica prevede l'innescare di un fenomeno di liquefazione locale utile all'inserimento di materiale addizionale;
- *Compattazione per iniezione*: all'interno del terreno è inserito un agente cementante che genera una colonna resistente. Poiché la miscela è inserita con una certa pressione, questa tende ad espandersi e compatta lateralmente il terreno.

Rinforzo del terreno

Gli interventi di rinforzo consistono nell'iniezione di una miscela avente il compito di compattare il terreno e creare zone ad alta resistenza e bassa deformabilità. Tali tecniche sono:

- *Iniezione per permeazione*: si inietta una malta liquida a bassa viscosità nei vuoti interstiziali dei terreni granulari, permeando il terreno circostante;
- *Jet-grouting*: una o più miscele fluide vengono iniettate in profondità mediante inserimento nel terreno di una sonda che, in risalita, inietta ad altissima pressione la miscela. Ruotando, la sonda crea una colonna di terreno trattato, che rappresenta l'elemento di rinforzo;
- *Miscelazione profonda*: a differenza del jet-grouting, in cui la miscelazione avviene per effetto della pressione di iniezione, in questo caso la miscelazione avviene per effetto meccanico. Ciò permette un miglior controllo di qualità, prevedendo il diametro della colonna trattata.

1.5. Utilizzo di geomateriali per la prevenzione del rischio di liquefazione

È dimostrato che l'utilizzo di piccole percentuali (<3% sulla massa di terreno) di geomateriali, in questo caso di dispersioni di acqua e argilla, riduce il rischio di liquefazione, provocando un aumento della resistenza ciclica. Tale risultato è dovuto principalmente alle particolarità reologiche di tali dispersioni. Attraverso l'iniezione di questi materiali è possibile stabilizzare il terreno, senza provocarne disturbo. Di conseguenza essi possono essere utilizzati sia come interventi su strutture nuove sia su strutture esistenti.

I risultati riportati in letteratura riguardano principalmente lo studio di miscele di acqua-bentonite e acqua-laponite^{[1][7][8]}.

In Figura 1.7 sono riportati i risultati di test triassiali ciclici eseguiti su campioni di sabbia Ottawa, preparati con lo stesso contenuto di vuoti e con l'aggiunta di percentuali di bentonite rispettivamente pari a 0%, 3% e 5%. I campioni sono stati testati dopo un periodo di 72 ore di immersione in acqua, per garantire l'idratazione ed il rigonfiamento della bentonite. Successivamente i test sono stati eseguiti dopo 24 ore dalla completa maturazione, con una pressione di consolidazione di 100 kPa. È stato dimostrato che l'aggiunta di bentonite provoca un aumento del numero di cicli a liquefazione di un ordine di grandezza. Inoltre tali benefici sono associati anche ad un invecchiamento prolungato della bentonite.

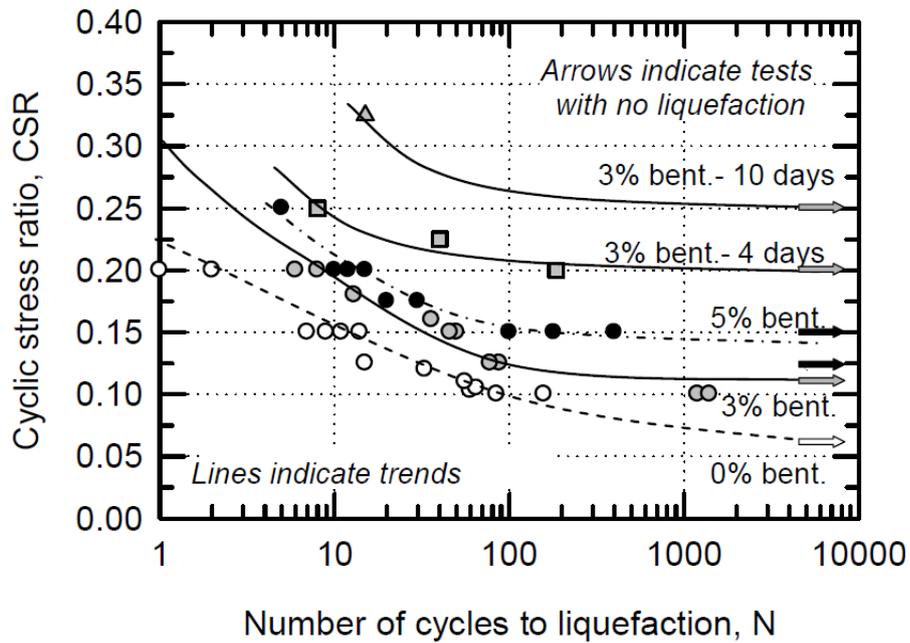


Figura 1.7 - CSR versus cicli alla liquefazione per campioni di sabbia e bentonite (0%, 3%, 5%)

La laponite offre alcuni vantaggi rispetto alla bentonite. Le particelle di laponite, infatti, sono più piccole rispetto a quelle di bentonite (ordine di grandezza inferiore di 5-10 volte) e questo comporta un miglioramento della fase di iniezione del materiale nel terreno. Inoltre la laponite presenta un'elevata plasticità (limite liquido $LL = 1280\%$ e limite plastico $LP = 180\%$) ed una concentrazione più bassa determina la produzione di un gel con proprietà equivalenti a quelle delle dispersioni di bentonite. Inoltre i campioni di acqua e bentonite non sempre esibiscono un punto di cross-over, infatti tale punto può essere raggiunto in tempi elevati e per percentuali di bentonite più alte rispetto a quelle utilizzate con la laponite. Risultati simili a quelli ottenuti con la laponite, infatti, sono relativi a miscele che presentano il 10% di bentonite (Figura 1.8), a conferma del fatto che con l'utilizzo di basse percentuali di laponite si possono ottenere prestazioni elevate.

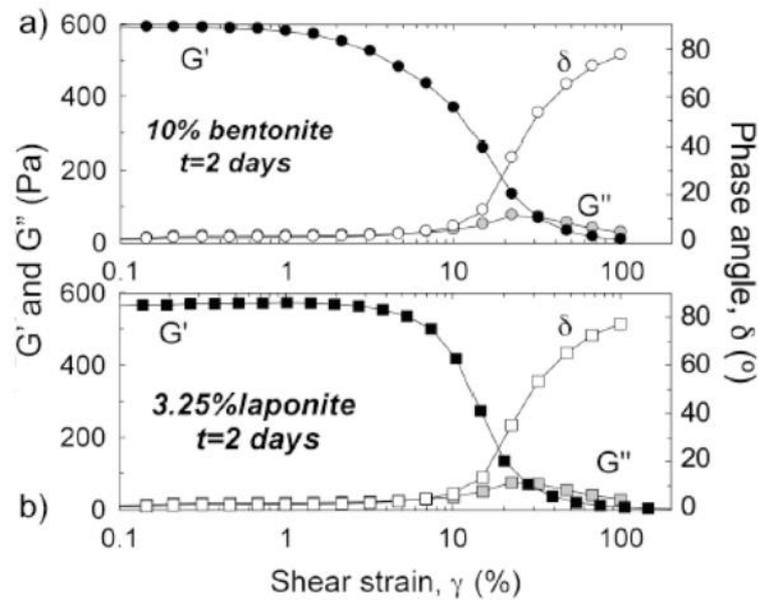


Figura 1.8 - Andamento del modulo G' e G'' al variare dello shear strain per campioni contenenti il 10% di bentonite ed il 3.25% di laponite

Il comportamento evidenziato in precedenza è dovuto principalmente alle proprietà reologiche delle miscele di acqua e argilla. Tuttavia, la rigidità al taglio di geomateriali costituiti da dispersioni di argilla è notevolmente inferiore rispetto ad altri materiali utilizzati nel settore geotecnico (Figura 1.9). Per questo motivo, i tradizionali test geomeccanici non possono essere utilizzati per caratterizzare questo tipo di miscele. A tale scopo si utilizzano test reologici per la caratterizzazione, in particolare test oscillatori e dinamici. Attraverso questi test dinamici è possibile indagare le proprietà viscoelastiche del materiale. Le prove consistono nell'applicazione di sforzi (o deformazioni) di taglio ciclici per misurare le deformazioni (o gli sforzi) di taglio sul campione. I risultati dei test restituiscono informazioni riguardo l'andamento della viscosità del materiale nel tempo, l'andamento del modulo elastico e del modulo viscoso e l'evoluzione dell'angolo di fase.

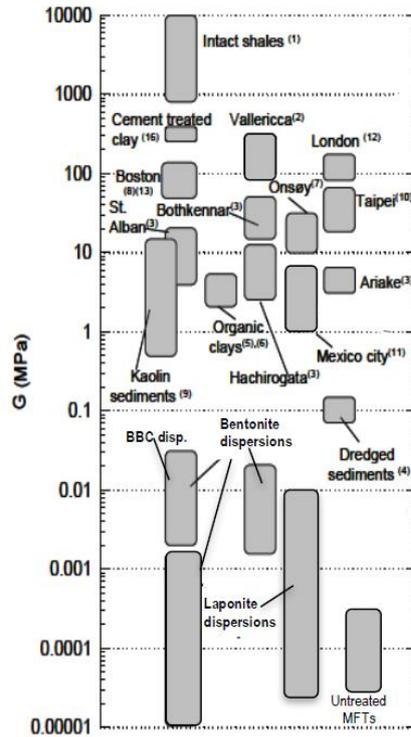


Figura 1.9 - Rigidezza al taglio di geomateriali di argilla

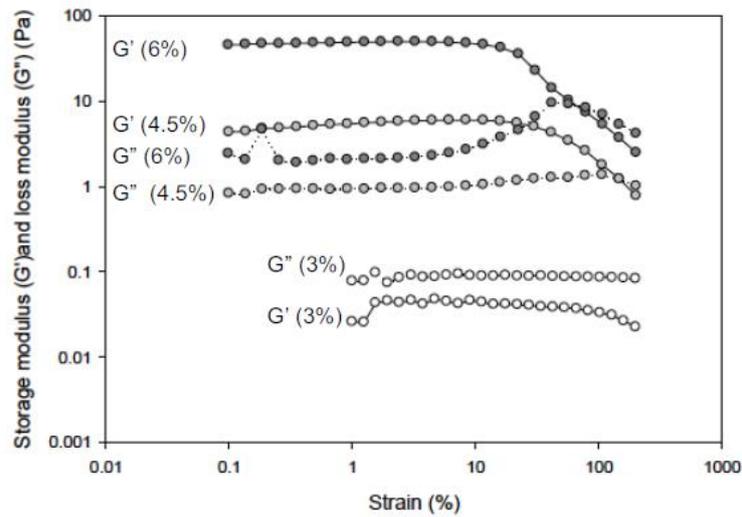


Figura 1.10 - Esempio di test oscillatorio svolto su dispersioni di bentonite

2. LAPONITE: CARATTERISTICHE CHIMICHE E PROPRIETÀ REOLOGICHE

La laponite è un'argilla sintetica con caratteristiche simili all'hectorite (minerale di montomorillonite costituente l'argilla bentonitica) che forma un sistema colloidale una volta dispersa in acqua. La dispersione di una moderata percentuale di laponite in acqua genera un una sostanza colloidale le cui caratteristiche evolvono nel tempo. Inizialmente la miscela risulta liquida, successivamente, all'aumentare del tempo di maturazione, le caratteristiche sono quelle di un gel con comportamento tissotropico. Inoltre, a causa delle ridotte dimensioni delle sue particelle e della sua bassa densità, le sospensioni di argilla in acqua si presentano trasparenti.

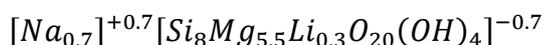
Grazie alla sua purezza e all'assenza di contaminanti, presenti generalmente nelle argille naturali, alla elevata viscosità e alle proprietà reologiche che manifesta quando è dispersa in acqua, oggi la laponite è ampiamente utilizzata in vari settori come *rheology modifier* e *film former*. La laponite è impiegata nel settore industriale, per la preparazione di smalti ceramici e vernici, come componente per detersivi, in cosmetica ed in ambito farmaceutico.

2.1. Struttura chimica

I minerali di laponite presentano una struttura cristallografica a strati tipica dei minerali di argilla smectica, appartenente al gruppo dei montomorillonoidi. La struttura di questi minerali è data dalla sovrapposizione di piani (o “fogli”) bidimensionali tetraedrici a maglia ciclica (strati T) e di strati ottaedrici (strati O) formati da cationi trivalenti e bivalenti. Il piano tetraedrico si compone di silicati SiO_4 , disposti in modo tale per cui tre ioni di ossigeno sono condivisi con i tre tetraedri vicini, mentre il quarto ione è libero di legarsi al foglio ottaedrico. I piani ottaedrici sono formati da ossido di magnesio e sono inseriti tra due fogli tetraedrici. A seconda della valenza del catione, possono formarsi due possibili disposizioni: struttura diottaedrica e struttura triottaedrica. La struttura diottaedrica si ottiene se due dei tre possibili siti ottaedrici sono occupati da cationi trivalenti Al^{3+} . La struttura triottaedrica è formata da cationi bivalenti Mg^{2+} che occupano tutti e tre i possibili siti ottaedrici.

La laponite è un caso speciale di smectite, sintetizzata combinando sali di sodio, magnesio e litio con silicati di sodio, a velocità e temperatura controllata. La sostituzione cationica avviene solo nel foglio ottaedrico: alcuni cationi bivalenti di magnesio Mg^{2+} del piano centrale sono rimpiazzati da cationi monovalenti di litio Li^+ , determinando delle cariche negative bilanciate dall’unione di ioni sodio Na^+ , come mostrato in Figura 2.1^{[1][2]}.

La formula generale della laponite è la seguente:



All’interno della formula empirica si può notare la presenza di atomi ossigeno e di gruppi idrossili OH.

Questa cella elementare si ripete più volte in due direzioni, costituendo particelle a forma di disco, aventi diametro medio di 25 nm e spessore medio di 1 nm (Figura 2.2), molto più piccole delle argille naturali.

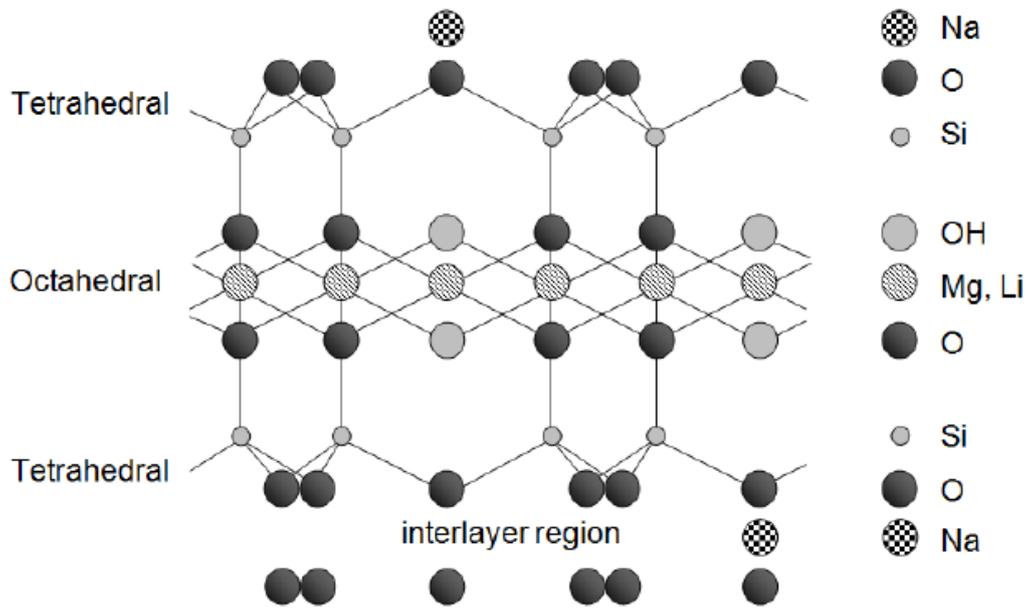


Figura 2.1 - Struttura di una cella elementare di minerali di laponite

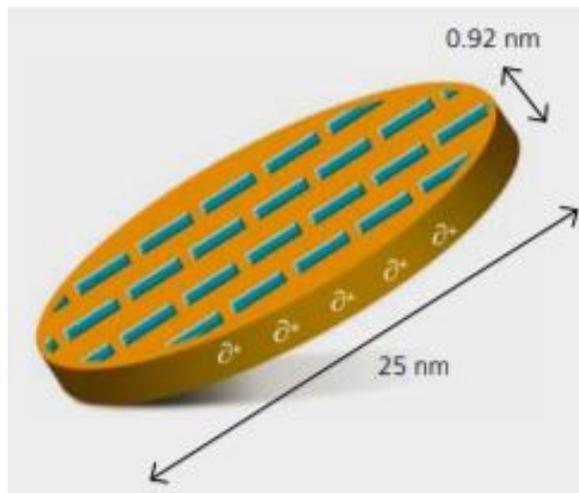


Figura 2.2 – Particella di laponite

2.2. Proprietà e caratteristiche delle dispersioni di acqua e laponite

Quando la laponite è dispersa in acqua, le singole particelle subiscono ionizzazione, processo dovuto all'idratazione ed al rilascio dei cationi di sodio adsorbiti all'interfaccia. Ne consegue che le facce delle particelle sono caratterizzate da una carica negativa, mentre sui bordi si formano delle cariche positive legate al processo di protonazione dei gruppi OH^- localizzati in tali regioni. La dispersione degli ioni Na^+ è responsabile della formazione di un doppio strato elettrico (*double layer*) che impedisce l'agglomerazione e la conseguente precipitazione delle particelle.

È noto dalla letteratura che piccole percentuali di laponite, che variano dallo 0.5% al 3% su peso dell'acqua, provocano la formazione di un gel. Il processo di formazione del gel è ancora motivo di dibattito, per cui è possibile tenere in considerazione tre tipi di interazione interparticellare:

- Forze di van der Waals: sono forze attrattive di tipo debole che si generano tra le particelle quando si trovano a stretto contatto;
- Interazione *edge-to-face*: è un'interazione elettrostatica di tipo *attrattiva* che nasce fra le cariche positive presenti sui bordi delle particelle e le cariche negative presenti sulla faccia. Queste interazioni danno luogo ad una struttura denominata "house of cards" (Figura 2.3 a));
- Interazione *face-to-face*: è un'interazione elettrostatica di tipo *repulsiva* esercitata a lungo raggio tra i doppi strati sovrapposti. Ne risulta una struttura in equilibrio, in cui le particelle di argilla non possono muoversi liberamente a causa delle forze repulsive circostanti (Figura 2.3 b)).

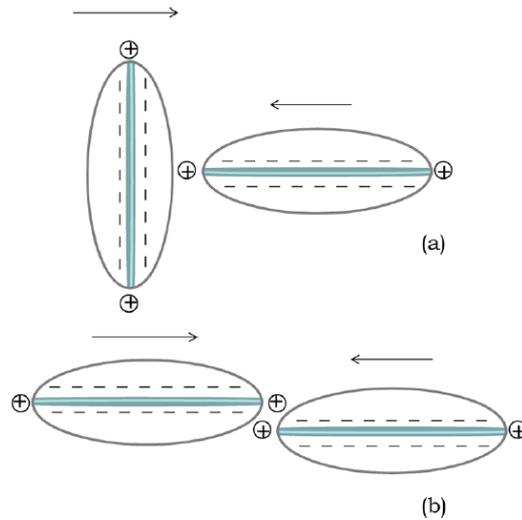


Figura 2.3 - Interazione tra le particelle di laponite. (a) edge-to-face (b) face-to-face

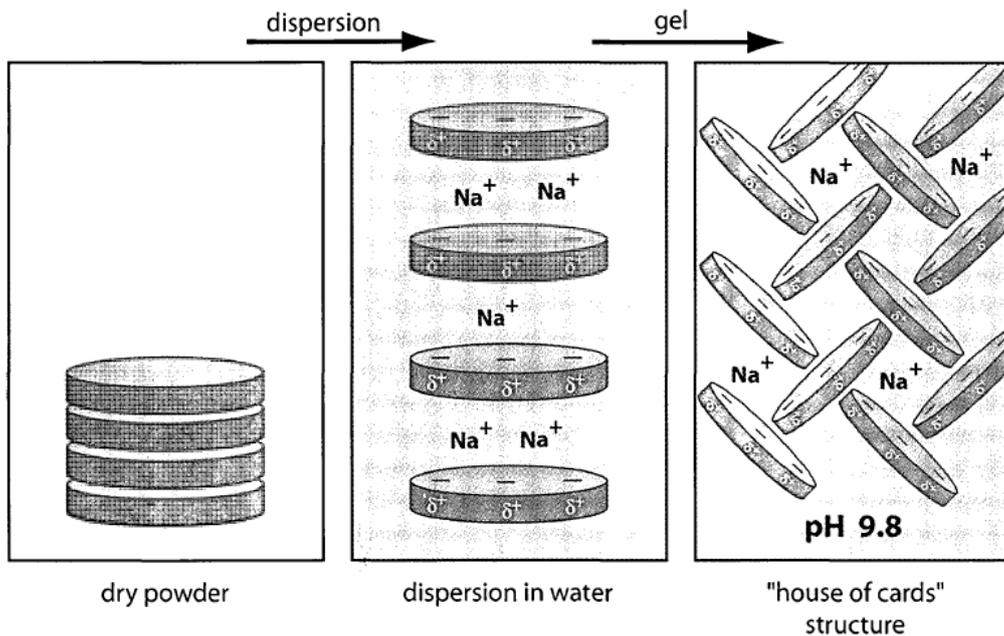


Figura 2.4 - Processo di formazione della laponite

I comportamenti reologici di sospensioni di laponite in acqua possono variare sensibilmente in funzione della concentrazione della laponite e della forza ionica del sistema (influenzata dalla concentrazione dei sali disciolti in acqua). Tuttavia, numerosi fattori possono incidere sui risultati sperimentali ottenuti tra mascele preparate con eguali valori di concentrazione e forza ionica. Tali fattori sono legati principalmente

ai tempi di preparazione della miscela, alle modalità di preparazione e di conservazione e all'ambiente che le circonda. Nonostante le controversie riscontrate in letteratura, è possibile spiegare il comportamento della miscela attraverso il diagramma di fase suggerito da Tanaka et al. (2004), riportato in Figura 2.5. Tale diagramma è funzione della forza ionica (espressa in concentrazione molare M) e della concentrazione di laponite nella miscela (espressa in percentuale). Per concentrazioni di sale molto basse, cui corrisponde una forza ionica inferiore a $10^{-4} M$, l'interazione tra le particelle di laponite è di tipo repulsivo: ciò comporta la formazione di un vetro di Wigner, ovvero un vetro stabilizzato dalla repulsione elettrostatica residua. Aumentando la concentrazione di sali disciolti in acqua aumenta anche la concentrazione dei cationi nel sistema, quindi prevalgono le forze attrattive di van der Waals rispetto alle forze repulsive. Per concentrazione di sali molto elevata ($I > 10^{-2} M$) si manifesta un'agglomerazione delle particelle di laponite con conseguente sedimentazione.

Ulteriori considerazioni che possono essere eseguite sul diagramma di fase riguardano lo stato fluido. Esso può essere suddiviso in due stati: sol e liquido. Nello stato liquido la miscela si presenta omogenea, mentre nello stato sol tale omogeneità si perde a causa della formazione di *clusters*. Inoltre, a parità di forza ionica (in un range di I compreso tra $10^{-4} M$ e 10^{-2}), la concentrazione di laponite dispersa in acqua determina il passaggio rispettivamente da stato liquido a stato vetroso e da stato sol a stato gel. La transizione da stato liquido a stato vetroso è detta "invecchiamento" (*aging*): in questa fase le particelle sono arrestate in "pozzi di energia", dette "gabbie" (*cages*). Tale processo è denominato *cage-diffusion*. Inizialmente le particelle sono in grado di muoversi, successivamente, con la formazione di tali barriere, le particelle sono bloccate all'interno di queste gabbie fino alla formazione di una struttura di equilibrio (Figura 2.6). La transizione da stato solido a stato gel è detta "gelificazione" (*gelation*): in questa fase le forze di van der Waals diventano sempre più importanti, fino alla formazione di *cluster* che si estendono nel tempo, formando una rete elastica^[1]. Da tali considerazioni, si deduce che anche il tempo di maturazione della miscela gioca un ruolo fondamentale sullo stato fisico in cui essa si presenta.

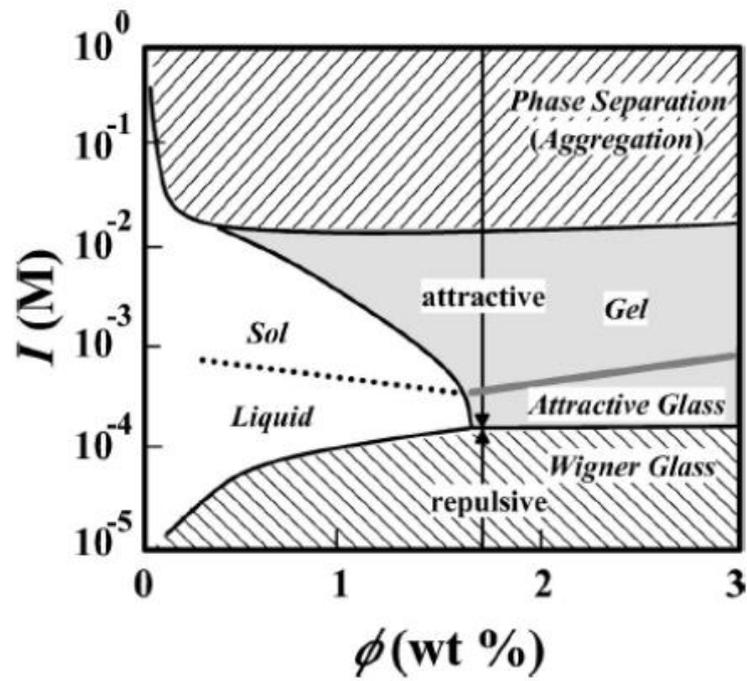


Figura 2.5 - Diagramma di fase delle sospensioni di acqua e laponite (Tanaka et al., 2004)

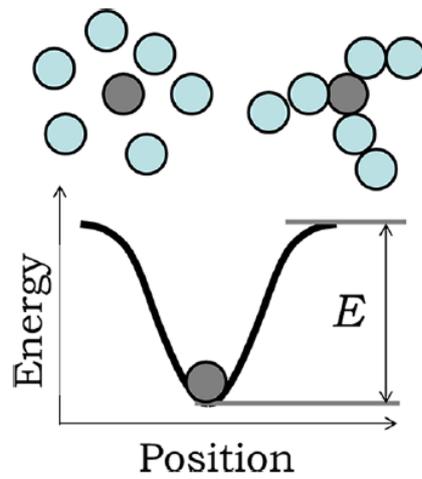


Figura 2.6 - Processo di cage-diffusion delle particelle di laponite

2.3. Caratteristiche reologiche delle sospensioni di acqua e laponite

Come già accennato nell'introduzione del capitolo, piccole percentuali di laponite disperse in acqua determinano la formazione di una sostanza con comportamento tempo-dipendente. Nelle prime ore dalla miscelazione, la sospensione manifesta una microstruttura e proprietà fisiche assimilabili a quelle di un fluido newtoniano, successivamente la struttura evolve in un gel. Tale evoluzione rappresenta la capacità della miscela di modificare la propria microstruttura per raggiungere livelli energetici più bassi e quindi creare strutture più stabili nel tempo. L'aggiunta di laponite in acqua genera un aumento della viscosità e del modulo elastico, anche di diversi ordini di grandezza, per questo motivo si può affermare che tali miscele abbiano un comportamento simile a quello manifestato dai materiali tissotropici. Tuttavia, precedenti studi hanno dimostrato che le proprietà viscoelastiche di sospensioni di acqua e laponite sono solo in parte reversibili: dai risultati dei test oscillatori condotti sul materiale, è stato riscontrato che la viscosità complessa manifesta un *plateau* tanto più grande quanto più è elevato il tempo di inattività del campione. Inoltre, dopo l'applicazione di sforzi di taglio, l'evoluzione temporale del modulo elastico G' e del modulo viscoso G'' subisce un arresto per tempi di inattività del campione elevati. Da tali risultati si deduce che la struttura della miscela non può essere completamente distrutta a seguito dell'applicazione di sforzi di taglio^[4].

2.3.1. Cenni sul comportamento tissotropico dei materiali

Alcuni materiali sottoposti ad uno stimolo esterno (*shear stress* o *shear rate*) manifestano una diminuzione della viscosità nel tempo. Successivamente, quando tale stimolo è rimosso, si può osservare un recupero della viscosità. Il comportamento associato a questo fenomeno è detto *tissotropia*.

Per comprendere il comportamento dei materiali tissotropici è necessario studiare le caratteristiche della loro microstruttura. Tra le particelle del materiale esistono delle deboli forze di attrazione, responsabili della formazione di flocculi che riempiono lo spazio a loro disposizione, generando un reticolo di particelle. Poiché i legami

interparticellari sono deboli, quando viene applicato uno stimolo esterno, la struttura interna viene distrutta, comportando una diminuzione di viscosità. In questa situazione, si creano aggregati di flocculi di dimensioni tanto più elevate quanto più è grande il valore dello shear rate applicato. Cessato lo stimolo esterno, la struttura reticolata si ricostituisce impiegando un certo tempo, quindi la viscosità del materiale viene recuperata (Figura 2.7).

La tissotropia può essere studiata in relazione alle curve di flusso in andata e in ritorno. Si applichi su un campione di materiale tissotropico una velocità di taglio (*shear rate*) compresa tra zero e un valore massimo. Riportando i dati su un grafico in cui in ascisse sono riportati i valori di shear rate ed in ordinate i valori di shear stress, si nota un ciclo di isteresi che descrive il comportamento tissotropico del materiale. L'area compresa nel ciclo rappresenta la tempo-dipendenza del materiale. L'area e la forma del ciclo di isteresi possono variare sensibilmente in relazione alle caratteristiche del campione, tuttavia esse dipendono principalmente dalle condizioni di prova e dalla storia di taglio precedente la prova stessa (Figura 2.8).

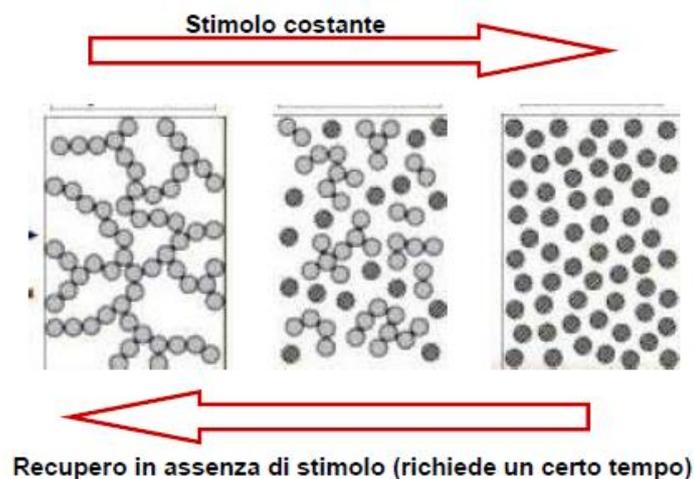


Figura 2.7 - Variazione della microstruttura di un materiale tissotropico in seguito all'applicazione di uno shear rate

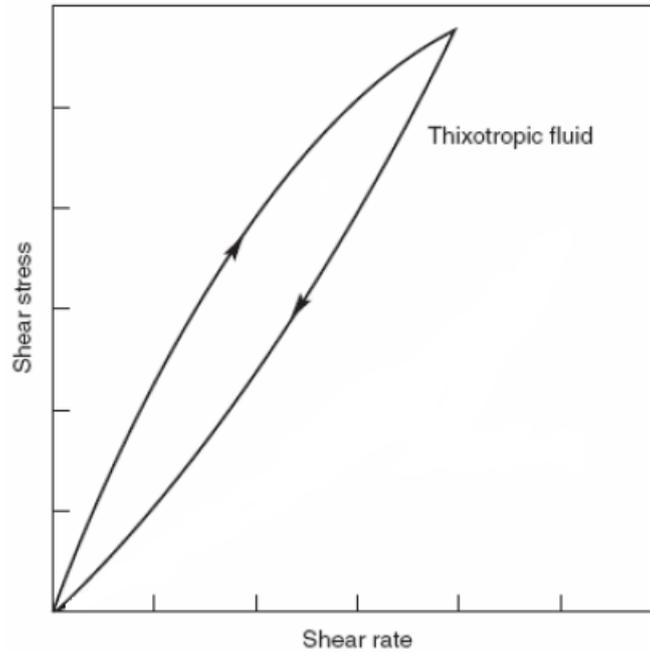


Figura 2.8 - Ciclo di isteresi dei materiali tissotropici

2.3.2. Tipologia di test oscillatori

Le prove atte a determinare le proprietà viscoelastiche di materiali tissotropici sono test oscillatori in cui si applica una sollecitazione (stress o deformazione) la cui intensità varia nel tempo con una legge di tipo sinusoidale. Supponendo di applicare una forzante che varia nel tempo con una legge oscillatoria del tipo

$$\tau(t) = \tau_0 \text{sen}(\omega t)$$

dove τ_0 rappresenta il modulo e ω la pulsazione, il materiale viscoelastico risponde con una deformazione avente la stessa lunghezza d'onda. Tuttavia, tale risposta risulta essere sfasata rispetto alla forzante di un angolo δ detto "angolo di fase". La legge che descrive la risposta del sistema è la seguente:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \text{sen}(\omega t - \delta)$$

L'angolo di fase è funzione dalla temperatura e della frequenza di carico e può variare da 0 a 90°. I materiali perfettamente elastici presentano un angolo di fase pari a 0 in quanto la risposta del materiale è istantanea, quindi esiste un legame biunivoco tra tensione e deformazione. I materiali perfettamente viscosi hanno, invece, un angolo di

fase pari a 90° . Nei materiali viscoelastici δ si colloca all'interno di questo range. Ovviamente più alto è il suo valore e più il materiale esibisce proprietà più simile a quelli perfettamente viscosi e viceversa.

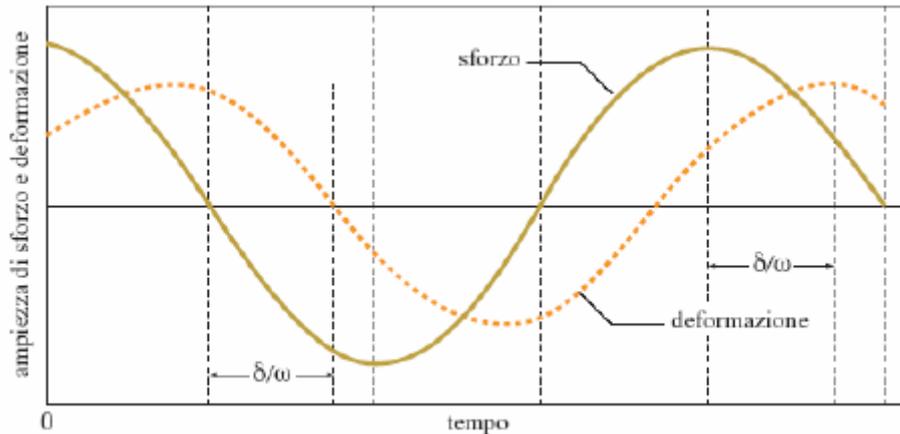


Figura 2.9 - Test oscillatori

Attraverso questo tipo di test è possibile determinare la rigidità del materiale, espressa tramite il modulo complesso G^* . Il termine “complesso” deriva dal fatto che tale grandezza può essere definita attraverso un numero complesso, costituito da una componente reale ed una immaginaria. Di conseguenza si definiscono:

- Componente reale elastica G' (*storage modulus*): racchiude la risposta elastica del sistema e rappresenta l'energia immagazzinata e poi restituita;
- Componente immaginaria viscosa G'' (*loss modulus*): racchiude la componente viscosa del sistema e rappresenta l'energia dissipata durante lo scorrimento viscoso.

L'analisi in oscillazione è condotta facendo variare una serie di parametri:

- Intensità massima dello stimolo applicato (*stress o strain sweep*);
- Tempo di applicazione dello stimolo (*time sweep*);
- Frequenza di applicazione dello stimolo applicato (*frequency sweep*);
- Temperatura (*temperature sweep*).

Stress sweep test

Questo test è utile per la determinazione del regime viscoelastico lineare e prevede l'applicazione di uno stimolo con intensità massima variabile nel tempo. Il regime viscoelastico lineare rappresenta il range di stress o deformazione entro il quale i parametri reologici misurati sono caratteristici del sistema, indipendentemente dalle condizioni di analisi.

Time sweep test

In questo caso lo stimolo è applicato con intensità massima mentre frequenza e temperatura rimangono costanti per intervalli di tempo selezionati. Questa prova è utile per determinare la stabilità del materiale ed il recupero di sistemi strutturati.

Frequency sweep test

La frequenza dello stimolo è variabile nel tempo mentre gli altri parametri, quali l'intensità massima e la temperatura rimangono costanti. Questo test è utile per determinare le proprietà viscoelastiche su diverse scale di tempo.

Temperature sweep test

Si applica uno stimolo la cui frequenza e ampiezza massima sono costanti, facendo variare la temperatura in maniera continua o a gradini. L'obiettivo è quello di monitorare le variazioni reologiche del campione in funzione della temperatura, come la variazione di consistenza o le transizioni sol-gel. È bene scegliere una velocità di riscaldamento o raffreddamento non troppo elevata affinché il provino si trovi in condizioni di giusta termostatazione. Questa prova è largamente utilizzata in quanto è risaputo che le proprietà viscoelastiche dipendono fortemente dalla temperatura.

2.3.3. Risultati dei test oscillatori sulle sospensioni di acqua e laponite

In letteratura è possibile trovare numerosi esperimenti condotti sulle sospensioni di acqua e laponite, atti a descriverne le caratteristiche viscoelastiche^{[1][4][5][6]}. Per ogni sperimentazione, le prove eseguite sui campioni sono test oscillatori e test rotazionali, da cui è possibile ricavare l'andamento del modulo complesso, della viscosità, del

punto di crossover e la transizione sol-gel. Ogni sperimentazione differisce dalle altre principalmente per i seguenti fattori:

- Tipo di laponite utilizzata: laponite RD o laponite XLG;
- Percentuale di laponite utilizzata;
- Il pH della miscela;
- Quantità di ioni dispersi nell'acqua: come mostra il diagramma di fase, lo stato della miscela è influenzato dalla potenza ionica del sistema. Alcuni esperimenti sono stati condotti utilizzando acqua deionizzata, al fine di eliminare la variabilità associata alla resistenza ionica. Altri studi sono stati condotti, invece, per analizzare il comportamento della laponite in presenza di sali disciolti in acqua, come cloruro di sodio (NaCl) o sodio pirofosfato decaidrato (SPP);
- Temperatura di prova: le prove sono condotte a temperatura ambiente che varia dai 22°C ai 25°C;
- Finestra temporale analizzata: le prove sono svolte per seguire l'evoluzione nel tempo dei parametri viscoelastici. Per questo motivo alcune prove sono state eseguite poche ore dopo la miscelazione del campione, altre a distanza di giorni.

Viscosità

La viscosità della miscela presenta un comportamento marcatamente differente in relazione al tempo di invecchiamento considerato. Per piccole finestre temporali si osserva un comportamento liquid-like, in cui la viscosità si mantiene ad un valore pressochè costante al variare dello shear rate applicato. All'aumentare del tempo di invecchiamento, invece, si nota un decremento della viscosità all'aumentare dello shear rate, con andamento non più lineare (Figura 2.10).

La viscosità è influenzata anche dalla concentrazione di laponite presente nella miscela. All'aumentare di tale concentrazione si osserva un aumento della viscosità, seguendo l'andamento di un fluido Newtoniano durante le prime fasi dell'invecchiamento.

Le caratteristiche manifestate precedentemente suggeriscono che la miscela acqua-laponite è idonea per essere iniettata nei terreni, operazione che viene eseguita durante i primi istanti di vita della miscela.

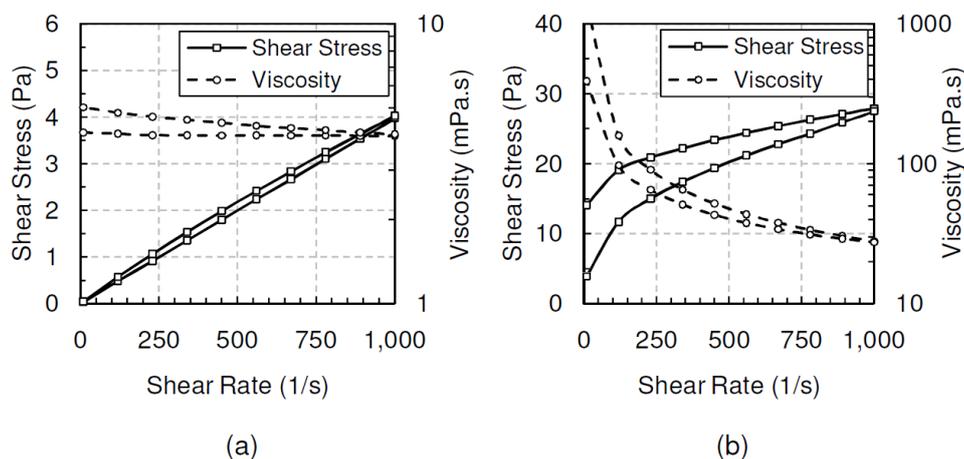


Figura 2.10 - Andamento della viscosità per sospensioni al 3% di laponite per tempi di invecchiamento di (a) 15 minuti e (b) 6 ore

Modulo complesso

I risultati dei test mostrano che, per tempi di invecchiamento bassi, il valore di G' risulta essere minore rispetto al valore di G'' : questo andamento indica che la miscela ha un comportamento liquid-like. Inoltre, l'angolo di fase δ manifesta valori prossimi a quelli riscontrati nei materiali viscosi. Al crescere della finestra temporale G' supera G'' e l'angolo δ diminuisce: in questo caso la miscela si comporta come un gel (Figura 2.11).

Anche la concentrazione di sale disciolto in acqua influenza l'andamento dei moduli. Le miscele con bassa concentrazione di sale manifestano un comportamento liquid-like per tempi di inattività più ampi rispetto alle miscele con concentrazioni di sale maggiori. Inoltre, per concentrazioni particolarmente elevate, la miscela si presenta come un gel anche per tempi di inattività molto brevi.

Focalizzando l'attenzione sull'andamento dei moduli, quando la miscela è sottoposta ad un test oscillatorio in cui viene applicato un certo valore di shear strain, per tempi di inattività molto brevi G'' risulta essere maggiore di G' e tale trend si mantiene

invariato durante tutta la durata della prova. Si può notare che, per tempi di invecchiamento superiori alle due ore, G' supera G'' , confermando il comportamento solid-like esposto all'inizio del paragrafo. Successivamente, superato un certo valore di shear strain, G' comincia a decrescere finché il materiale inizia a fluire. È possibile definire un punto in cui $G' = G''$ (*punto di crossover*): a partire da questo punto la miscela torna ad avere le caratteristiche di un sol (Figura 2.11).

Applicando un determinato valore di shear rate per un certo lasso di tempo (ad esempio 5 minuti), i legami interparticellari si rompono e la miscela comincia a fluire. Successivamente, al termine del flusso si riscontra un recupero del modulo elastico, il quale assume valori superiori rispetto a quello viscoso. Attraverso questo meccanismo (Figura 2.12) è possibile spiegare il carattere tissotropico del materiale: esso è capace di ricostituire i legami tra le particelle poiché alcuni di questi sono stati preservati. Tuttavia, come già accennato in precedenza, la laponite non è in grado di recuperare interamente la sua struttura e alcuni legami si perdono durante il flusso.

Un ulteriore aspetto riguarda G'' : al variare della concentrazione di laponite presente nella sospensione la pendenza con cui G'' decresce è più marcata per concentrazioni più elevate (Figura 2.13).

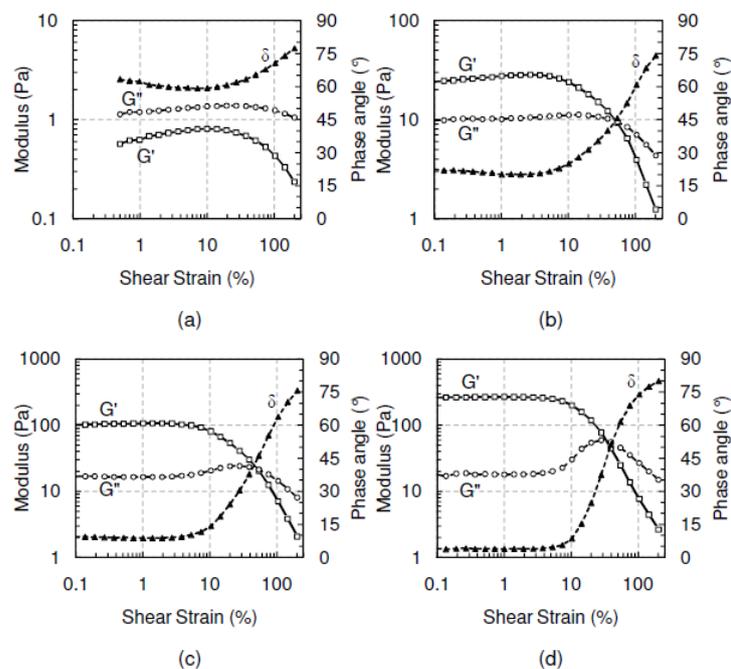


Figura 2.11 - Andamento di G' , G'' e δ in funzione della deformazione di taglio applicata e per diversi tempi di invecchiamento (a) 1 ora (b) 2 ore (c) 4 ore (d) 12 ore

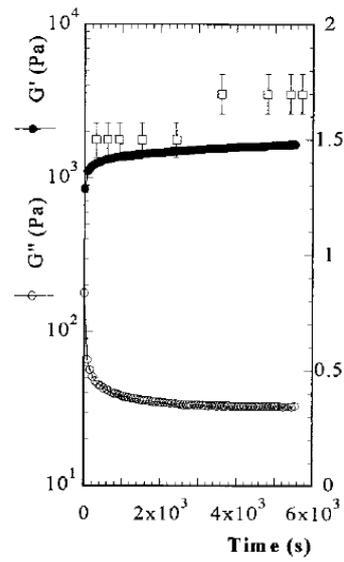


Figura 2.12 - Andamento di G' e G'' dopo l'applicazione di uno shear rate di 50 1/s per 5 minuti

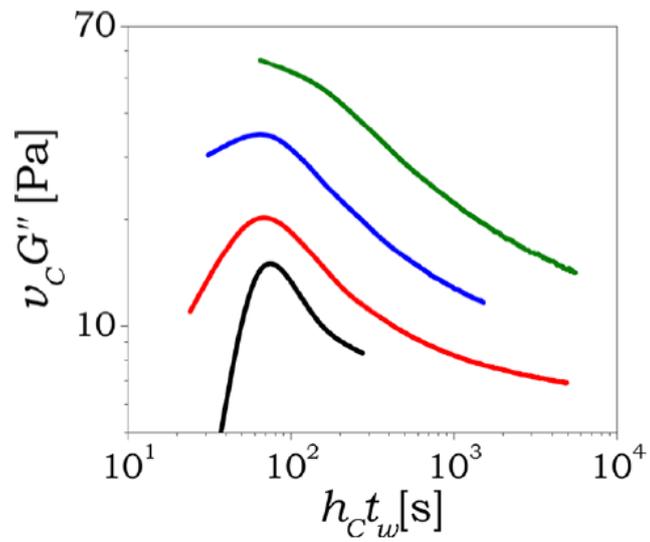


Figura 2.13 - Evoluzione del modulo viscoso per tempi di inattività di 6 giorni e per diverse concentrazioni di laponite (dal basso 3.5, 3.2, 2.8 e 2.4%)

3. ANALISI SPERIMENTALE

La reologia è la scienza che studia il comportamento del materiale a seguito di sollecitazioni esterne. Essa focalizza la sua attenzione sull'analisi dello scorrimento e della deformazione dei materiali in relazione all'intensità della forza applicata, della sua durata e della sua velocità.

L'indagine del comportamento reologico è fondamentale per descrivere le caratteristiche di miscele colloidali di acqua e laponite. Attraverso l'applicazione di una sollecitazione esterna è possibile dedurre caratteristiche quali la viscosità e l'andamento del modulo complesso. A tale scopo, la sperimentazione è stata condotta attraverso dei test oscillatori e rotazionali di vario genere, descritti in seguito. Le prove sono state eseguite nel "Laboratorio Materiali Stradali" del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino.

3.1. Strumentazione

3.1.1. Reometro rotazionale

Per l'analisi delle caratteristiche reologiche del materiale è stato utilizzato il reometro della serie Physica MCR 301, prodotto dall'azienda tedesca Anton Paar (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Reometro Physica MCR 301 prodotto da Anton Paar

La parte superiore del reometro impartisce le azioni esterne volute sul provino da testare. Essa è costituita da un motore sincrono EC montato su cuscinetti ad aria e da un encoder ottico (motore brushless DC) (Figura 3.2). Il motore si compone di un rotore dotato di magneti permanenti e di uno statore, in cui sono montate delle bobine con polarità opposta che producono poli magnetici. I magneti del rotore e le bobine

dello statore si attraggono, provocando un flusso rotante di corrente nella bobina, responsabile del movimento, privo di attrito, del rotore. La coppia del motore è misurata ed impostata tramite la corrente in ingresso. L'encoder ottico determina lo shear stress e lo shear rate e consente la misura ed il controllo delle deflessioni angolari fino a 50 nanoradiani. Il motore è supportato da due cuscinetti ad aria: un cuscinetto radiale centra e stabilizza l'albero ed il cuscinetto assiale supporta il peso delle parti rotanti. Tale sistema riduce al minimo l'attrito e le vibrazioni causate da contatti fisici, migliorando l'accuratezza della misura.



Figura 3.2 - Motore sincrono EC

I componenti di controllo meccanico ed elettrico sono incorporati nell'unità inferiore del reometro. In essa è presente un elemento di controllo della temperatura Peltier che permette di riscaldare o raffreddare il sistema, assicurando che venga rispettata la temperatura voluta durante tutta la prova. Inoltre, il sistema di misurazione è coperto da una cappa Peltier per avere un maggiore controllo della temperatura e

dell'evaporazione, soprattutto per i materiali sensibili a questi fattori. L'intera struttura è collegata ad un sistema di circolazione dell'acqua per garantire il raffreddamento.

I sistemi di misura che possono essere montati all'interno dello strumento sono molteplici (Figura 3.3). Essi sono costituiti da una parte fissa collegata all'unità inferiore del reometro e da una parte mobile collegata al rotore attraverso un attacco rapido. Tali sistemi di misura si differenziano in base al tipo di materiale da testare e alla tipologia di prova scelta. Le geometrie più comuni sono quelle a cilindro concentrico, il sistema piatto-piatto ed il sistema piatto-cono.

Liquidi a bassa viscosità	Liquidi viscoelastici	Materiali allo stato fuso	Materiali pastosi	Materiali tipo gel	Solidi soffici	Sistemi reattivi/per campioni di polvere	Solidi

Il sistema a cilindro concentrico è costituito da un contenitore fisso riempito del materiale da testare, all'interno del quale è immerso uno spindle o un cilindro di geometria variabile. Applicando un torcente al cilindro, questo viene messo in rotazione, permettendo la misura della viscosità tra le pareti dei due componenti. Tale geometria è adatta per materiali newtoniani, non newtoniani e solidi deboli ed è particolarmente indicata per materiali a bassa viscosità a causa dell'elevata area di contatto. Di contro, tale sistema di misura non permette l'analisi di campioni abbastanza viscosi e non è adatto per l'analisi viscoelastica.

La geometria piatto-piatto è costituita da due piatti paralleli, di cui uno fisso alla base e l'altro messo in rotazione. Viene utilizzato per misure dinamiche o a velocità costante e per materiali newtoniani e non. Il gap tra i piatti è costante e la velocità di deformazione varia dal centro alle estremità: in corrispondenza del raggio è applicata la velocità massima. Questa geometria è particolarmente indicata per materiali costituiti da particelle più grandi poiché lo spazio tra le piastre può essere impostato dall'utente. Tuttavia, l'interpretazione del comportamento reologico è più complessa a causa della non uniformità delle sollecitazioni applicate.

L'ultima geometria più comunemente utilizzata è quella piatto-cono. Il principio di funzionamento è simile a quello descritto per i piatti paralleli, ma in questo caso il piatto superiore ha una forma conica con conicità che varia da 1° a 4° . Quando il cono superiore viene messo in rotazione, le superfici di scorrimento sono superfici coniche ad apertura variabile in relazione alla distanza dalla punta del cono. La velocità di scorrimento in questo caso è misurata come il rapporto tra la velocità di rotazione del cono e la distanza tra i piatti, di conseguenza essa varia in relazione al valore del raggio. Tale variazione è compensata dalla diversa distanza piatto-cono, causata dalla geometria conica, di conseguenza si può assumere che la velocità di deformazione sia costante. Tale sistema di misura può essere utilizzato per materiali che presentano viscosità da bassa ad alta e per materiali viscoelastici. Nonostante il vantaggio legato all'uniformità della velocità di rotazione, gli errori di misura più significativi sono dovuti al riempimento del materiale e all'impostazione del gap tra il piatto ed il cono.

Il sistema di misura ritenuto più appropriato per l'esperimento, oggetto di questo elaborato, è il sistema piatto-cono. È stato utilizzato un CP50-1 (Figura 3.4), avente le seguenti caratteristiche:

- Serial Number: 7827
- Diameter: 49.950 mm
- Concentricity: $\pm 5 \mu\text{m}$
- Parallelity: $\pm 4 \mu\text{m}$
- Angle: 1.005°
- Truncation: $50 \mu\text{m}$

La scelta di tale geometria è ritenuta quella più appropriata per il tipo di materiale analizzato, il quale presenta un comportamento di un fluido newtoniano nelle prime fasi di inattività e successivamente evolve in gel. Inoltre, a causa delle ridotte dimensioni delle particelle di laponite non è stato ritenuto necessario l'utilizzo del sistema a piatti paralleli.

I dati di input utili alla taratura dello strumento e all'esecuzione della prova sono stati impostati grazie al programma Rheoplus, supportato dal sistema operativo Windows.



Figura 3.4 - Sistema piatto-cono CP-50

3.1.2. Agitatore meccanico

Per la preparazione del campione è stato utilizzato l'agitatore meccanico Heidolph RZR 2041 fornito dall'azienda Sigma-Aldrich (Figura 3.5).

Lo strumento è costituito da un motore ad induzione con moltiplicatore regolabile in continuo. L'intervallo di velocità viene raggiunto per mezzo di un variatore a due velocità. È collegato un albero motore che permette di regolare in altezza la posizione della girante. Il range di velocità raggiungibile varia da 0 a 10 rpm. Attraverso un'asta di supporto viene montato un mandrino al quale è collegato e fissato, con un'apposita chiave, l'utensile agitatore. La girante utilizzata per l'esperimento è mostrata in Figura 3.6. Tale geometria è stata ritenuta quella più idonea per garantire un'adeguata dispersione di laponite in acqua, evitando la formazione di agglomerati e garantendo l'omogeneità della miscela.



Figura 3.5 - Agitatore meccanico Heidolph RZR 2041



Figura 3.6 - Girante utilizzata per le operazioni di preparazione del campione

3.2. Materiali

La sperimentazione è stata condotta con l'utilizzo di laponite RD prodotta dall'azienda tedesca BYK, specializzata nella produzione di additivi. Di seguito sono riportate le proprietà descritte nel bollettino tecnico, disponibile sul sito www.byk.com, nella sezione "Additivi".

- Appearance: Free flowing white powder
- Bulk Density: 1000 kg/m³
- Surface Area (BET): 370 m²/g
- pH (2 % suspension): 9.8
- Chemical Composition (dry basis) SiO₂: 59.5 %
- Chemical Composition (dry basis) MgO: 27.5 %
- Chemical Composition (dry basis) Li₂O: 0.8 %
- Chemical Composition (dry basis) Na₂O: 2.8 %
- Chemical Composition (dry basis) Loss on Ignition: 8.2 %
- Gel strength: 22g min, QA Test Code: ELP-L-1H
- Sieve Analysis: 2 % Max >250 microns, QA Test Code: ELP-L-6A
- Free Moisture: 10 % Max, QA Test Code: ELP-L-5A

Prima di preparare il campione, è stato determinato il contenuto d'acqua naturale del materiale: un quantitativo di laponite pari a 30g è stato lasciato ad essiccare in forno a 110°C per 24 ore. Valutando il peso del campione prima e dopo la fase di essiccamento

è stato possibile calcolare il contenuto d'acqua, pari a 8.95% sul peso della laponite. Questo passaggio è fondamentale per calcolare con precisione il quantitativo esatto di laponite da introdurre nella miscela, tenendo conto del suo peso reale.

La laponite è stata miscelata con acqua deionizzata, fornita dal Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT) del Politecnico di Torino. La scelta di questa tipologia di acqua è correlata alle considerazioni effettuate nel capitolo precedente, concernenti il diagramma di fase. Al fine di eliminare l'influenza della potenza ionica prodotta dai sali naturalmente dispersi in acqua e per determinare le proprietà viscoelastiche della miscela, la scelta è ricaduta su acqua completamente esente da ioni dispersi.

3.3. Preparazione del campione

I test sono stati eseguiti su nove campioni con diverse percentuali di laponite: tre campioni sono stati preparati con una percentuale di laponite su peso d'acqua pari al 2.6%, altri tre con una percentuale pari a 2.9% e gli ultimi tre con una percentuale pari al 3.2%. La scelta di preparare tre campioni per ogni percentuale di laponite è dovuta al fatto che ogni gruppo di campioni è stato testato per tre valori differenti di shear rate: 700 1/s, 800 1/s e 1000 1/s. In questo modo è stato possibile monitorare il comportamento delle miscele per medesimi tempi di invecchiamento. Infatti, poiché ogni prova ha la durata di circa 29 minuti, testare un unico campione per tre valori differenti di shear rate significa dover tener conto di ulteriori 29 minuti oltre il tempo di invecchiamento stabilito.

L'operazione preliminare è stata quella di pesare i materiali. È stato scelto di mantenere fisso il quantitativo di laponite, facendo variare il quantitativo d'acqua in funzione della percentuale scelta. In questo modo si sono ottenuti campioni con le rispettive composizioni:

% laponite	m_{laponite} [g]	m_{water} [g]
2.6	10	352.21
2.9	10	315.69
3.2	10	286.02

Tabella 3.1 - Composizione dei campioni

I campioni sono stati preparati in barattoli di vetro, all'interno dei quali prima è stata inserita l'acqua deionizzata, successivamente è stata versata la laponite ed avviata la procedura di miscelazione. Prima di avviare il processo di miscelazione, ogni strumento ed i contenitori sono stati opportunamente puliti e disinfettati al fine di evitare la presenza di contaminanti esterni.

La procedura di miscelazione è stata articolata nel seguente modo:

- Il contenitore di vetro contenente sola acqua deionizzata è stato inserito nel mixer ed opportunamente rialzato in modo tale da poter immergere completamente la girante;
- La polvere è stata versata all'interno del contenitore e successivamente la girante è stata abbassata a circa metà dell'altezza del contenitore;
- Sono stati eseguiti cicli da 2+1 minuti ripetutamente, fino alla completa dispersione della polvere in acqua;
- Il primo ciclo di 2+1 minuti è stato eseguito ad una velocità di 8 rpm per evitare la dispersione di polvere rimasta in superficie, potenzialmente causata dal movimento della girante. Successivamente, dal secondo ciclo in poi, la velocità è stata aumentata al massimo, fino a 10 rpm;
- Al termine di ogni ciclo da 2 minuti e 1 minuto l'agitatore è stato messo a riposo in modo tale da verificare la dispersione di polvere sulle pareti del campione. A tal proposito, i bordi dei barattoli sono stati puliti con una spatola per evitare la dispersione di residui ed assicurare la corretta percentuale di laponite scelta;
- Durante ogni ciclo, il barattolo è stato messo in movimento manualmente in tutte le direzioni in modo tale da favorire una corretta dispersione di laponite ed evitare la formazione di precipitati;
- La procedura è stata considerata terminata quando il campione appariva visivamente omogeneo, controllando accuratamente che non vi fossero agglomerati di laponite in sospensione.

In totale, si può ritenere che la procedura sopra descritta sia stata eseguita in 15 minuti circa.

Dopo aver preparato il campione, il contenitore è stato chiuso ermeticamente e lasciato riposare fino all'inizio del primo test. Il campione è stato mantenuto indisturbato nell'arco di questo periodo in modo tale da evitare movimenti che potessero arrecare disturbo ed influenzare in qualche modo i risultati dei test.



Figura 3.7 - Procedura di preparazione del campione

3.4. Procedura di prova

Le prove sono state eseguite utilizzando il reometro a taglio dinamico (DSR), il quale richiede una serie di operazioni propedeutiche al corretto funzionamento dello strumento e all'installazione del sistema di misura, al fine di garantire l'affidabilità dei risultati.

La prima operazione da eseguire è quella di verificare l'alimentazione d'aria nello strumento. Questa è necessaria per garantire il corretto funzionamento del motore sincrono, il quale è supportato da cuscinetti ad aria, come già detto nel paragrafo 4.1.1. In questo caso, la pressione dell'aria deve essere pari a 5 bar. Successivamente viene acceso il criostato, la cui funzione è quella di garantire il raffreddamento del macchinario durante le prove condotte ad elevate temperature, evitando fenomeni di surriscaldamento del motore. Terminando queste operazioni, è possibile accendere il reometro e lanciare sul computer l'applicazione Rheoplus.

In seguito viene montato il sistema di misura scelto (piatto-cono CP50-1): il piatto inferiore è avvitato sulla cella posta alla base del reometro, mentre il piatto superiore è collegato al motore attraverso l'attacco rapido. È fondamentale verificare che lo strumento abbia riconosciuto il sistema di misura scelto, al fine di garantire il corretto funzionamento durante la prova.

Successivamente, dopo che lo strumento ha riconosciuto il sistema di misura, viene impostato il gap di misura (nonché la distanza tra piatto e cono). Per tali test, è stato scelto un gap di 0.05 mm. Durante questa fase il cono si abbassa fino a toccare il piatto inferiore, definendo il punto di riferimento in base al quale successivamente viene mantenuto il gap. In seguito si avvia il preriscaldamento del motore: dopo aver definito la temperatura di prova (in questo caso pari a 22.5°), la cappa viene abbassata fino a coprire interamente il sistema piatto-cono. Durante l'operazione di preriscaldamento, il software rileva l'andamento del momento torcente nel tempo.

Il sistema di misura viene tarato per garantire l'affidabilità dei risultati della prova. Per far ciò è fondamentale eseguire l'Aircheck per determinare l'andamento del momento torcente in funzione dell'angolo di deflessione φ . Il momento torcente deve essere

compreso in un range di $\pm 0.5 \mu\text{Nm}$. In caso contrario sarà necessario eseguire il Motor Adjustment.

A questo punto è possibile aprire il Workbook personale, all'interno del quale sono definiti tutti i parametri necessari allo svolgimento della prova.

Terminate le operazioni di settaggio dello strumento è possibile inserire il campione nel sistema di riferimento. Una piccola quantità di sospensione acqua-laponite è posta sul piatto inferiore, dopo di che il cono si abbassa fino a raggiungere un gap di 0.06 mm (*trim position*). In questa fase, attraverso una spatola, viene raccolto il materiale in eccesso che è stato espulso durante la fase di abbassamento del cono. Tale operazione è necessaria al fine di evitare motivi di disturbo durante la prova, provocata dal materiale in eccesso.

Poiché la laponite è un materiale igroscopico, esso è fortemente influenzato dalle variazioni di umidità dell'ambiente. Per questo motivo durante la prova è necessario mantenere un certo livello di umidità, al fine di non influenzarne le caratteristiche viscoelastiche. A tal scopo, attorno allo strumento di misura è stato inserito un fazzoletto imbevuto di acqua distillata, assicurando un certo livello di umidità dell'ambiente ed evitando che la miscela si disidrati durante la prova.

Tutte le fasi sopra descritte possono essere chiaramente visualizzate nelle seguenti immagini.

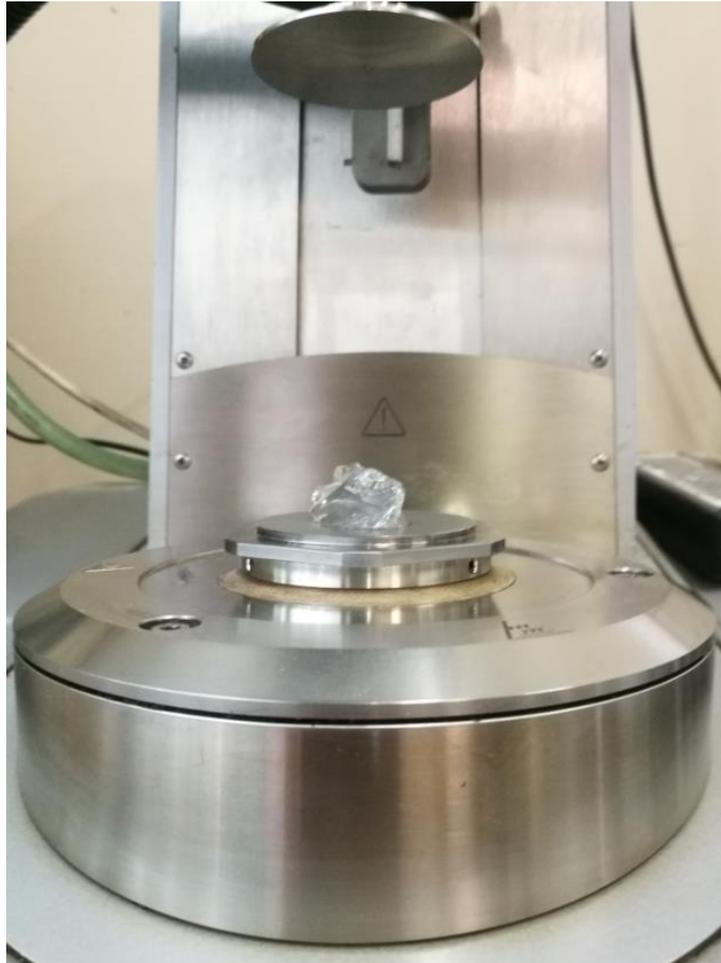


Figura 3.8 - Inserimento del campione nel reometro

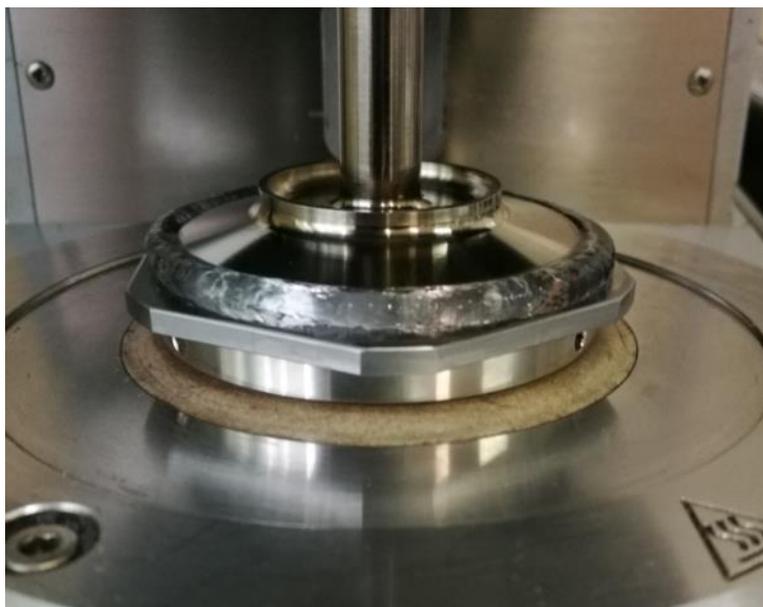


Figura 3.9 - Rasatura del campione



Figura 3.10 - Fase finale

3.5. Caratteristiche delle prove

Le tipologie di prova scelte per monitorare il comportamento reologico delle sospensioni di acqua e laponite sono le stesse per ogni campione preparato. Infatti, lo scopo della sperimentazione è proprio quello di verificare l'andamento delle proprietà viscoelastiche nelle stesse condizioni ma in tempi di invecchiamento differenti. A tal proposito le prove sono state eseguite per i seguenti tempi di inattività del campione, considerati a partire dall'istante in cui è terminata la fase di miscelazione:

- 3 ore
- 4 ore
- 5 ore
- 6 ore
- 7 ore
- 8 ore
- 24 ore
- 48 ore
- 7 giorni
- 10 giorni

La scelta di queste finestre temporali è giustificata da più motivazioni. La prima di esse consiste nel monitoraggio del processo di evoluzione da stato sol a stato gel. Si può notare come la maggior parte delle prove siano addensate durante il primo giorno di preparazione del campione. È proprio in questa finestra temporale che si può osservare visivamente il cambiamento che subisce la miscela. Superato il primo giorno, l'aspetto della miscela risulta essere invariato, quindi è necessario indagare nel dettaglio le proprietà interne della microstruttura. Inoltre, la scelta di varie finestre temporali è dettata dalla percentuale di laponite con la quale sono stati preparati i campioni. A tal proposito è necessario fare delle considerazioni: le miscele preparate con una percentuale di laponite pari al 2.6% mostrano un tempo di evoluzione più lungo di quelle preparate con una percentuale maggiore. Infatti, è stato rilevato visivamente che a tre ore dalla miscelazione il campione risultava ancora pressoché liquido, quindi anche durante il processo di inserimento del campione nel reometro bisognava porre attenzione che il materiale non fluisse via dal piatto inferiore. Di

conseguenza ci si attende che le proprietà reologiche che la miscela mostra durante questa prima finestra temporale siano simili a quelle di un sistema sol. I campioni preparati con una percentuale pari al 3.2%, invece, subiscono un processo di evoluzione più rapido, tale per cui a tre ore dalla miscelazione il campione si presenta già in fase gel. Da queste prime considerazioni si può già intuire come anche una piccola variazione di percentuale di concentrazione di laponite modifichi sensibilmente il comportamento della miscela.

Ogni prova ha la durata di circa 29 minuti ed è articolata nelle seguenti fasi:



La sequenza sopra indicata è stata scelta sulla base di studi già effettuati, disponibili in letteratura^[1].

La prima fase è caratterizzata dal *time sweep phase*, condotto in regime oscillatorio. Tale test serve a monitorare continuamente l'evoluzione della struttura del campione. Una deformazione di taglio $\gamma = 0.1\%$ è applicata con una frequenza di 1 Hz. Lo strumento cattura 18 punti caratteristici ogni 10 secondi, per una durata totale del test di 180 secondi. Attraverso questo test è possibile ridurre gli effetti del disturbo causato al campione durante le fasi di inserimento nel reometro, effetti difficilmente riproducibili da un campione all'altro. La durata del test non è casuale, ma è legata a considerazioni ritrovate in letteratura: durante questo periodo il campione ha la capacità di annullare gli effetti di disturbo indotto dalle operazioni di installazione e ridurre al minimo gli effetti dell'evaporazione.

Il secondo step riguarda l'applicazione di uno shear rate, condotto in regime continuo, per una durata pari a 240 s. La scelta di tale tempistica non è casuale, ma è giustificata da una serie di prove condotte in regime continuo, durante le quali vengono applicati i diversi valori di shear rate per durata variabile dai 5 ai 10 minuti. È stato scelto il tempo minimo necessario per raggiungere una viscosità di plateau. Le miscele sono state analizzate per tre diversi valori di shear rate:

1. 700 1/s
2. 800 1/s
3. 1000 1/s

Applicando questi shear rate, i legami interparticellari della microstruttura vengono distrutti. In tal modo è possibile valutare il processo di ristrutturazione della miscela a seguito di valori diversi di velocità di taglio. Questa fase è fondamentale in quanto simula gli effetti di disturbo indotti sul materiale, quale la fase di iniezione ed il suo comportamento nel terreno, verificando quindi la sua efficacia nel settore degli interventi di stabilizzazione.

Il terzo step è descritto da un altro *time sweep phase*. In questo caso sono stati rilevati 90 punti ogni 10 secondi, per una durata totale di 15 minuti. Anche per questo test è stato applicato un $\gamma = 0.1\%$ con la frequenza di 1 Hz. Il primo punto rilevato durante questa fase fornisce un'indicazione riguardo il valore del modulo elastico e del modulo viscoso a seguito dell'applicazione dello shear rate, indicando qual sia la capacità del materiale di ricostituire la propria struttura.

L'ultimo step è un *amplitude sweep phase*. La deformazione di taglio è fatta variare dallo 0.1% al 100% con la frequenza di 1 Hz, rilevando 25 punti. Attraverso questo test è possibile studiare la risposta viscoelastica del materiale al variare dello shear strain e in seguito al processo di *destructuring-rebuilding* del campione. La durata totale di questa fase è stata scelta ed impostata pari a 15 minuti. Infatti, studi precedenti hanno dimostrato che dopo 30 minuti dall'inizio della prova si osserva una disidratazione del campione, per questo motivo è stato necessario limitare la durata dell'amplitude sweep phase al fine di evitare tale processo di disidratazione.

4. ANALISI DEI DATI

Nel presente capitolo sono esposti i risultati ottenuti dai test descritti precedentemente. È necessario fare una premessa a tal proposito: il comportamento del materiale, nonché i risultati ottenuti, è fortemente influenzato da fattori esterni, talvolta non facilmente controllabili. I risultati possono variare sensibilmente in relazione alle condizioni ambientali (temperatura e umidità) in cui sono effettuati i test. Inoltre, anche le modalità di conservazione della sospensione possono provocare delle piccole variazioni rispetto alle prove eseguite in altre sperimentazioni. Tali condizioni sono relative, ad esempio, alla tipologia di contenitore scelto per la conservazione del materiale, la sua forma, la quantità d'aria che può essere contenuta al suo interno e la capacità di creare un ambiente ermetico. Questi fattori permettono di far intuire all'operatore la variabilità del comportamento di una sospensione di acqua e laponite. Inoltre bisogna anche tener conto di condizioni di *ripetibilità* e *riproducibilità* della prova, condizioni che influenzano la precisione dei risultati di misurazione successive all'interno di un set di misurazioni su uno stesso campione.

“La ripetibilità è la bontà dell'accordo tra i risultati di misurazioni successive dello stesso misurando (la grandezza oggetto di misurazione) condotte nelle stesse condizioni di misurazione”.

“La riproducibilità è il grado di concordanza tra una serie di misure di uno stesso misurando (la grandezza oggetto di misurazione), quando le singole misurazioni sono effettuate cambiando una o più condizioni”. ^{[14][15]}

Per far fronte a questi problemi, tipici di qualunque processo sperimentale, si è prestata attenzione nel rispettare lo stesso standard e le stesse procedure, sia in fase di preparazione del campione sia durante la prova stessa.

I risultati che sono stati analizzati durante la sperimentazione riguardano l'andamento della viscosità nella fase di pre-shearing (durante l'applicazione dello shear rate) e l'abbattimento del modulo elastico che la miscela presenta nel tempo, dopo l'applicazione dello shear rate. Inoltre sono riportati anche gli andamenti di G' e G'' nel corso della prova.

4.1. Andamento dei moduli G' e G''

I diagrammi riportati in seguito mostrano l'andamento dei moduli G' e G'' durante le prove effettuate. Va specificato che, in questo caso, per tempo t (espresso in minuti) si intende il tempo di prova e non il tempo di invecchiamento della miscela. Tutti i grafici sono stati normalizzati rispetto al valore di G_0' ; tale operazione è stata eseguita poiché il lavoro non è mirato alla determinazione numerica dei moduli, bensì al trend che essi manifestano nel tempo, per cui tutti i confronti effettuati sono di tipo qualitativo e non quantitativo. Si è scelto di riportare i grafici relativi ai seguenti tempi di invecchiamento: 3 ore, 8 ore e 7 giorni dalla preparazione del campione. La scelta di queste tre finestre temporali non è casuale, ma permette di visualizzare il comportamento della miscela a breve termine e a lungo termine. Le curve riportate nei grafici sono relative ai tre diversi valori di shear rate scelti e mostrano le fasi di time sweep, pre-shearing, time sweep e amplitude sweep.

4.1.1. Andamento dei moduli G' e G'' a 3 ore dalla miscelazione

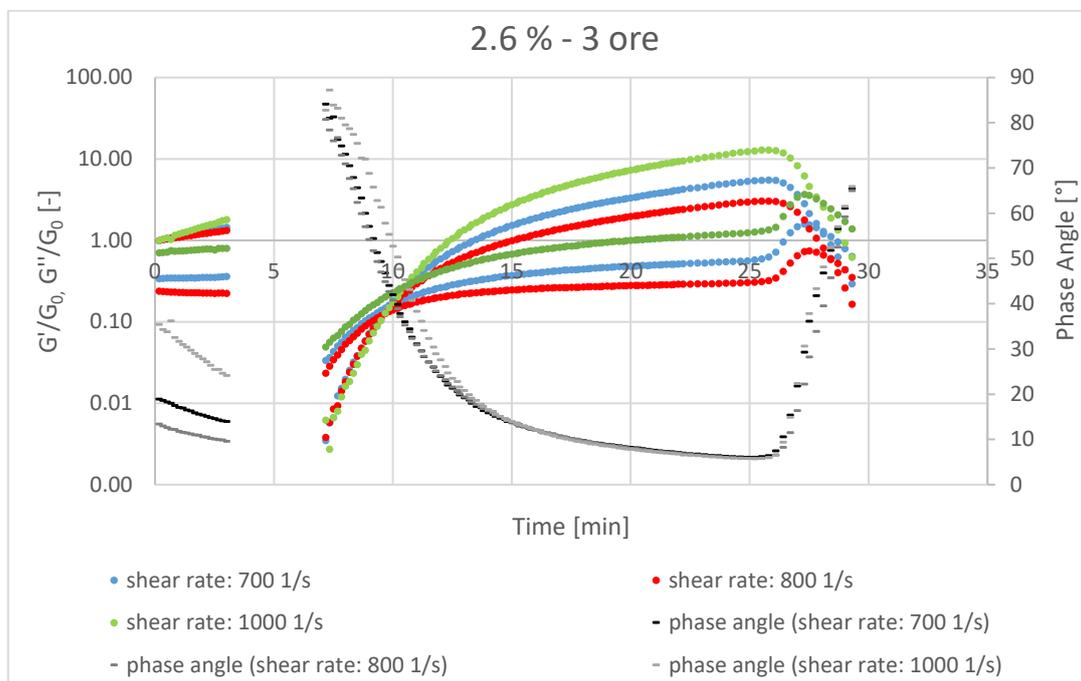


Figura 4.1 - Prova condotta su un campione al 2.6% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 3 ore

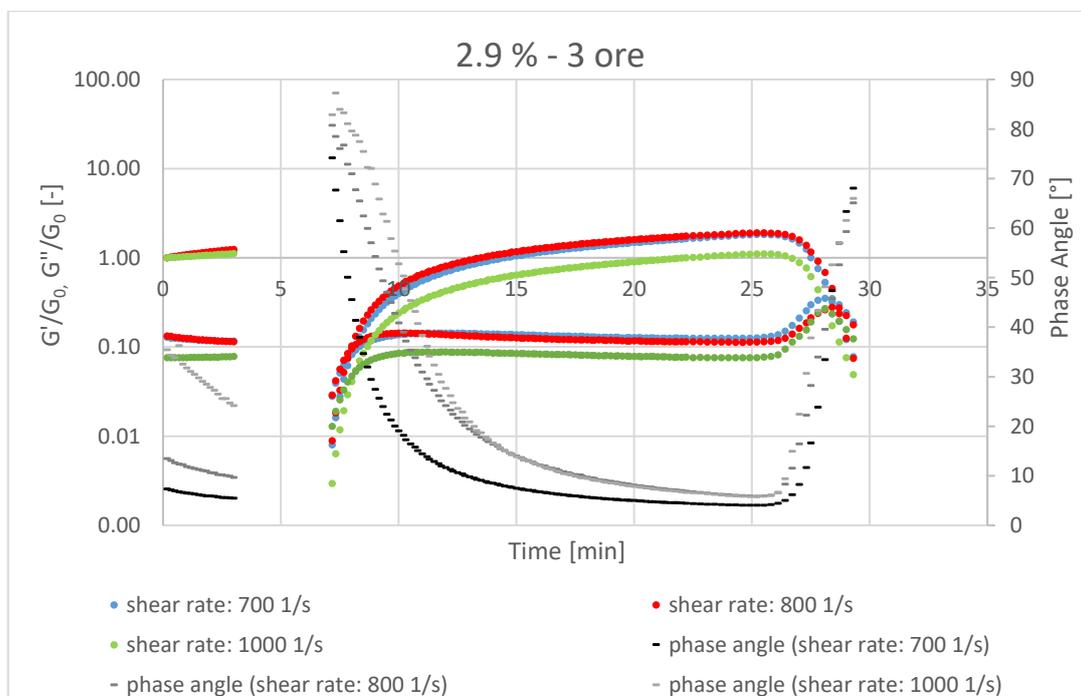


Figura 4.2 - Prova condotta su un campione al 2.9% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 3 ore

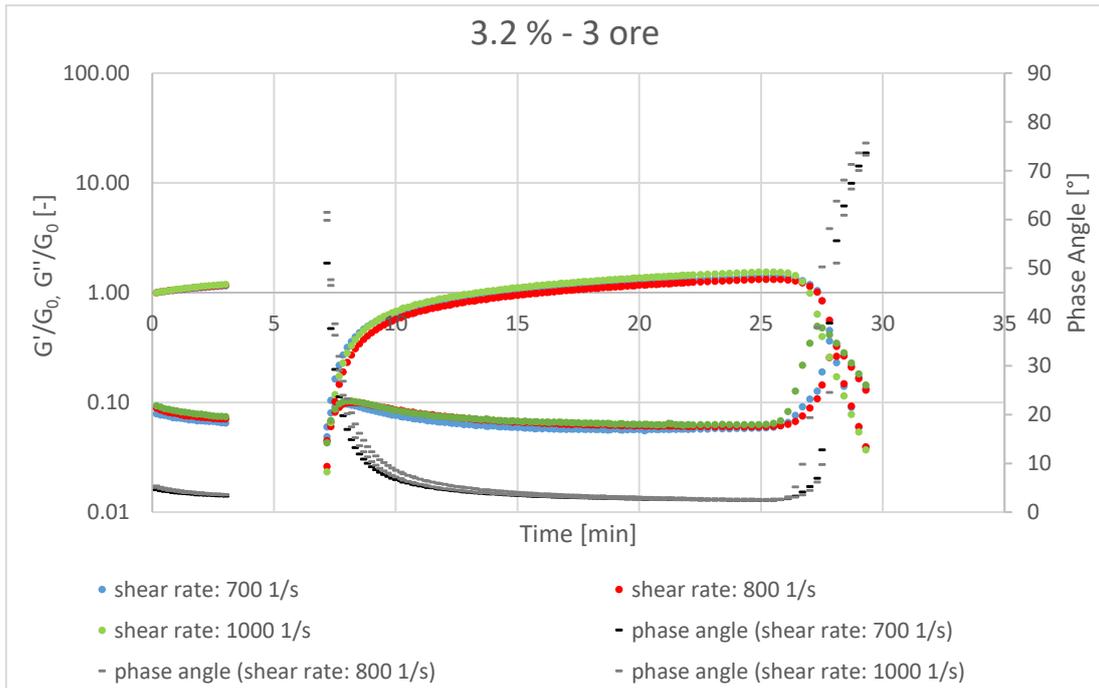


Figura 4.3 - Prova condotta su un campione al 2.9% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 3 ore

Dai grafici precedenti si può notare come, già a tre ore dalla preparazione del campione, il modulo elastico risulti essere superiore rispetto al modulo viscoso. Ciò indica che la miscela si comporta come un gel. Successivamente, dopo l'applicazione dello shear rate, il modulo viscoso risulta essere maggiore rispetto al modulo elastico, quindi il materiale si comporta come un fluido viscoso. Questo comportamento è dovuto al processo di rottura dei legami interparticellari provocati dall'azione esterna, i quali vengono successivamente ricreati durante il processo di ristrutturazione della materia. Tali legami, infatti, risultano essere ancora deboli. Va inoltre sottolineato come anche la percentuale di laponite influenzi il comportamento della miscela: la capacità di ristrutturare i legami è direttamente proporzionale alla percentuale di laponite. Maggiore è tale percentuale e più veloce sarà il processo di ristrutturazione.

Il comportamento descritto in precedenza può essere visualizzato anche dall'andamento dell'angolo di fase, rappresentato, nei grafici precedenti, dalle curve in scala di grigio. Si può notare come nella fase iniziale, indipendentemente dallo shear rate applicato, il valore dell'angolo di fase sia molto basso e prossimo a quello che assume un materiale perfettamente elastico. Successivamente alla fase di pre-shearing, invece, si nota un improvviso aumento dell'angolo di fase, con valori più simili a quelli

assunti dai materiali perfettamente viscosi. Successivamente l'angolo di fase tende a decrescere: la miscela, in questo caso, si comporta come un gel. Superato il punto di crossover, l'angolo di fase aumenta nuovamente, suggerendo che il materiale si comporta come un sistema sol.

4.1.2. Andamento dei moduli G' e G'' a 8 ore dalla miscelazione

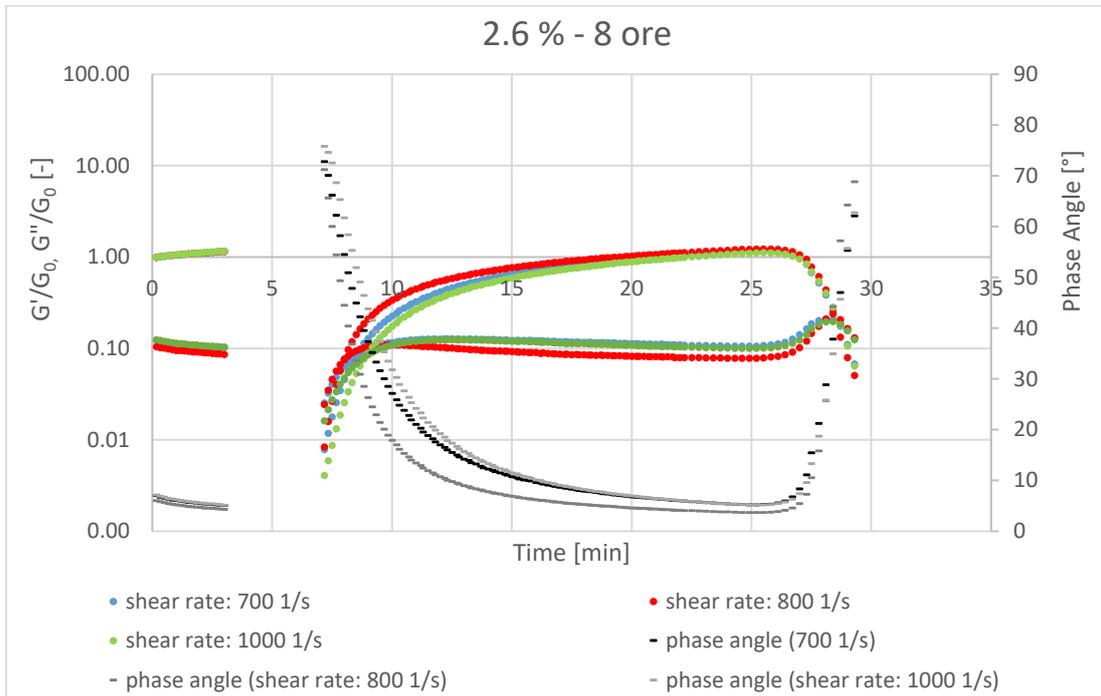


Figura 4.4 - Prova condotta su un campione al 2.6% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 8 ore

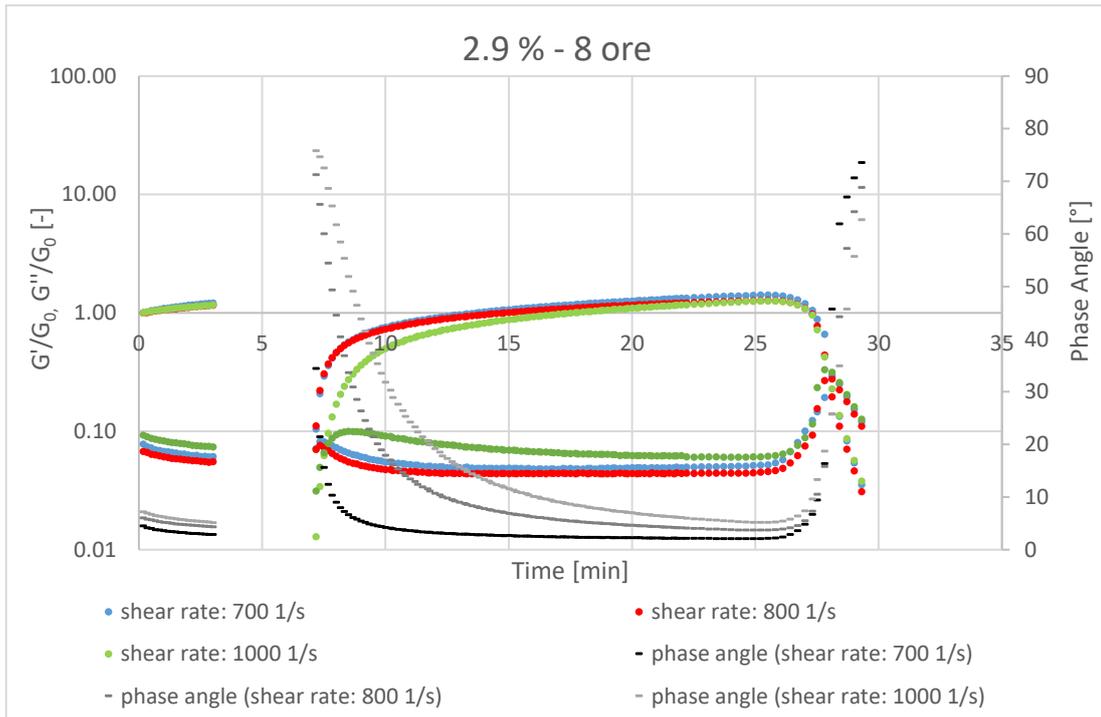


Figura 4.5 - Prova condotta su un campione al 2.9% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 8 ore

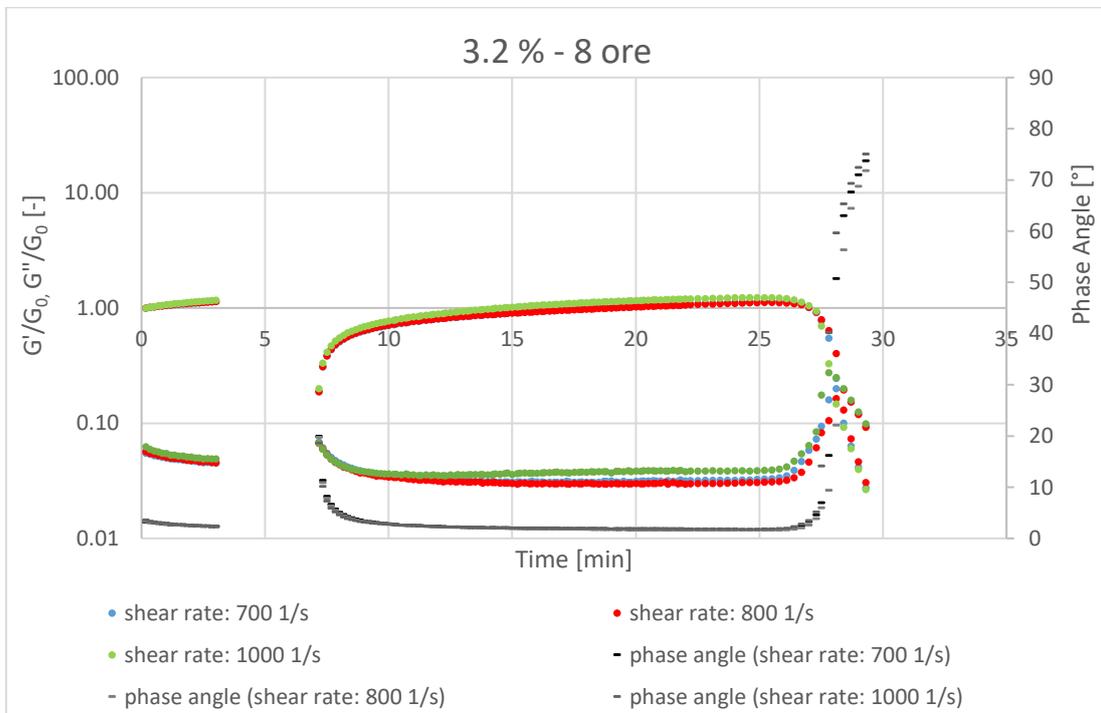


Figura 4.6 - Prova condotta su un campione al 3.2% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 8 ore

In questo caso, il comportamento della miscela è simile al precedente, con una differenza. La miscela con una percentuale di laponite del 3.2% manifesta, ad 8 ore, un modulo elastico superiore al modulo viscoso dopo la fase di pre-shearing. Questo vuol dire che durante tutta la prova il materiale mantiene un comportamento solid-like, nonostante l'applicazione di velocità di taglio.

4.1.3. Andamento dei moduli G' e G'' a 7 giorni dalla miscelazione

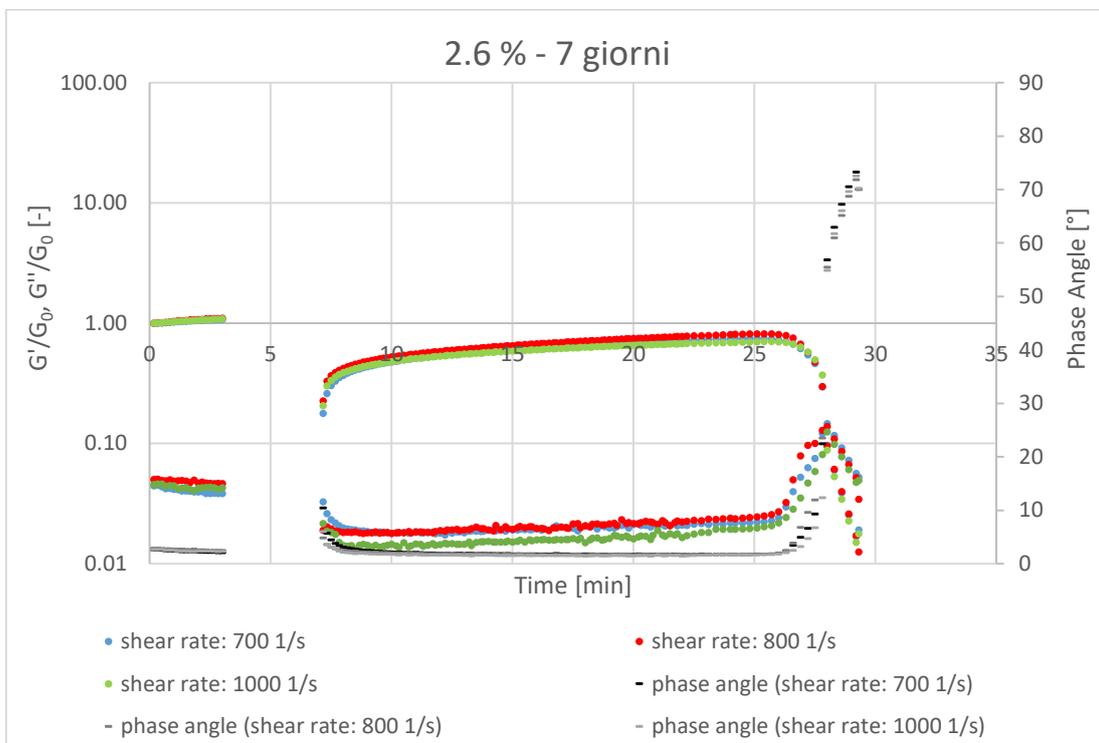


Figura 4.7 - Prova condotta su un campione al 2.6% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 7 giorni

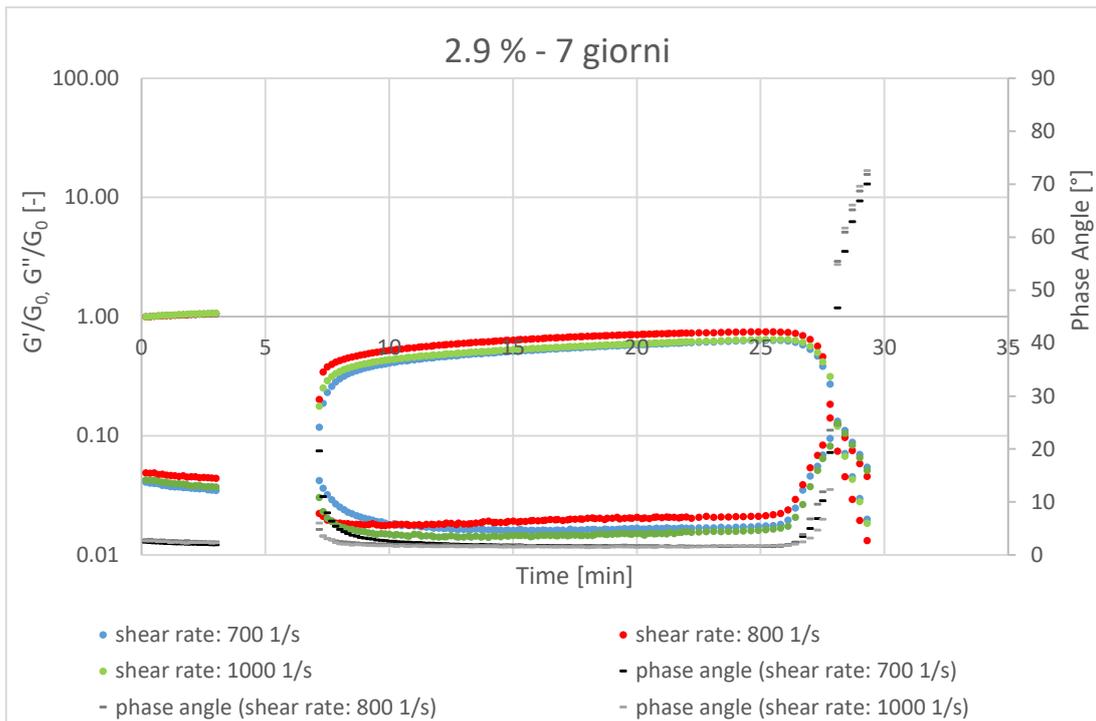


Figura 4.8 - Prova condotta su un campione al 2.9% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 7 giorni

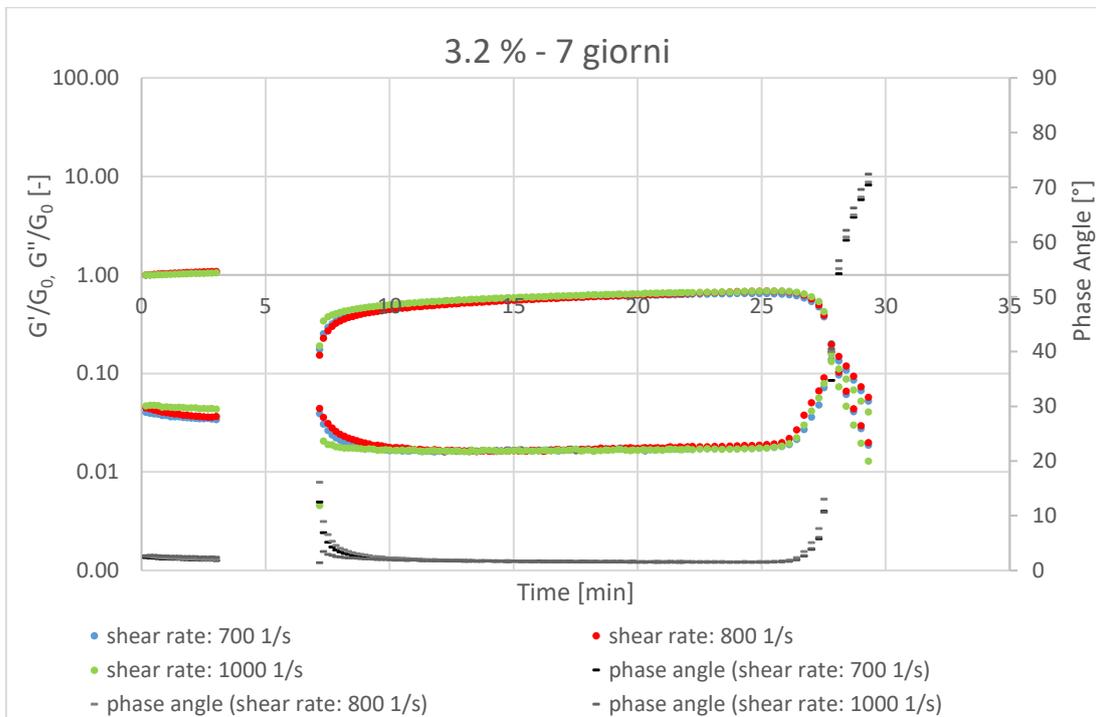


Figura 4.9 - Prova condotta su un campione al 3.2% di laponite su contenuto d'acqua per un tempo di invecchiamento di 7 giorni

I grafici relativi ad un tempo di invecchiamento di 7 giorni mostrano un comportamento simile a quello illustrato precedentemente per la miscela al 3.2% di laponite ed invecchiata ad 8 ore. Successivamente all'applicazione dello shear rate, il modulo elastico risulta essere più elevato rispetto al modulo viscoso, indipendentemente dalla concentrazione di laponite scelta e dalla severità del disturbo arrecato al campione. Questo mostra che all'aumentare dell'età della miscela il comportamento si mantiene conforme a quello di un sistema gel.

Valutando l'angolo di fase, si può notare come dopo la fase di pre-shearing i valori che esso assume si mantengono bassi, confermando che la miscela mantiene un comportamento solid-like durante tutta la fase antecedente il punto di cross-over.

4.1.4. Considerazioni generali

Sulla base dei risultati ottenuti dai test e focalizzando l'attenzione sui grafici riportati nei precedenti paragrafi, è possibile effettuare delle considerazioni di carattere generale.

Come già esposto precedentemente, la fase di pre-shearing comporta la rottura dei legami interparticellari a causa dell'applicazione di velocità di taglio di diversa intensità. A tal proposito, è possibile osservare la risposta del materiale a questa perturbazione esterna, in funzione del tempo di inattività. La capacità del materiale di ristrutturare i legami è proporzionale al tempo di invecchiamento. Si può notare, infatti, che i campioni testati a 3 ore dalla miscelazione presentano, dopo la fase di pre-shearing, un comportamento liquid-like più o meno marcato in funzione della percentuale di laponite. In questa fase la microstruttura è caratterizzata da legami interparticellari che risultano essere ancora deboli, per cui le forze applicate superano le forze di legame, provocando il collasso della microstruttura. Tutta l'energia meccanica fornita al materiale è dissipata, causandone il flusso (G'' è maggiore di G'). Tuttavia, all'aumentare del tempo di invecchiamento, il processo di ristrutturazione della materia risulta essere più efficace: le forze applicate sono minori rispetto alle forze interparticellari ed il materiale è in grado di immagazzinare energia. In questo caso, il campione mostra un comportamento solid-like durante tutta la prova ed è

idealmente in grado di riformare la sua configurazione iniziale. Apparentemente la miscela sembra manifestare un comportamento tissotropico, ma, valutando attentamente l'andamento del modulo elastico, si nota che dopo l'applicazione del disturbo esterno il valore G' si mantiene inferiore rispetto a quello misurato all'inizio della prova. Questa evidenza suggerisce che parte dell'energia meccanica immagazzinata dal sistema viene comunque dissipata e conferma quanto affermato nell'introduzione del Paragrafo 3.3.

L'andamento del modulo elastico è influenzato anche dalla percentuale di laponite utilizzata per la preparazione del campione. In particolare, durante le prime ore dalla miscelazione, si nota una struttura ancora non ben definita per la miscela 2.6%, infatti il modulo complesso è visibilmente influenzato dall'entità dello shear rate applicato. Tale considerazione non è del tutto valida per i campioni preparati con una percentuale di laponite maggiore. Tuttavia, all'aumentare del tempo di invecchiamento, tale variabilità sembra attenuarsi fino a perdersi a lungo termine. Questo conferma quanto detto precedentemente: all'aumentare dell'età della miscela, i legami interparticellari diventano sempre più forti ed in grado di resistere a perturbazioni esterne.

4.2. Andamento della viscosità nella fase di pre-shearing

I grafici seguenti mostrano l'andamento della viscosità delle miscele durante la fase di pre-shearing. In tal caso il tempo considerato è pertinente a questa fase della prova, pari a 4 minuti. Nei grafici sono riportate le curve relative ai tre gruppi di campioni considerati e per i tre valori di shear rate scelti. Le finestre temporali esaminate sono pari a 3 ore, 8 ore e 7 giorni dalla preparazione del campione, per i motivi chiariti nel paragrafo 5.1.

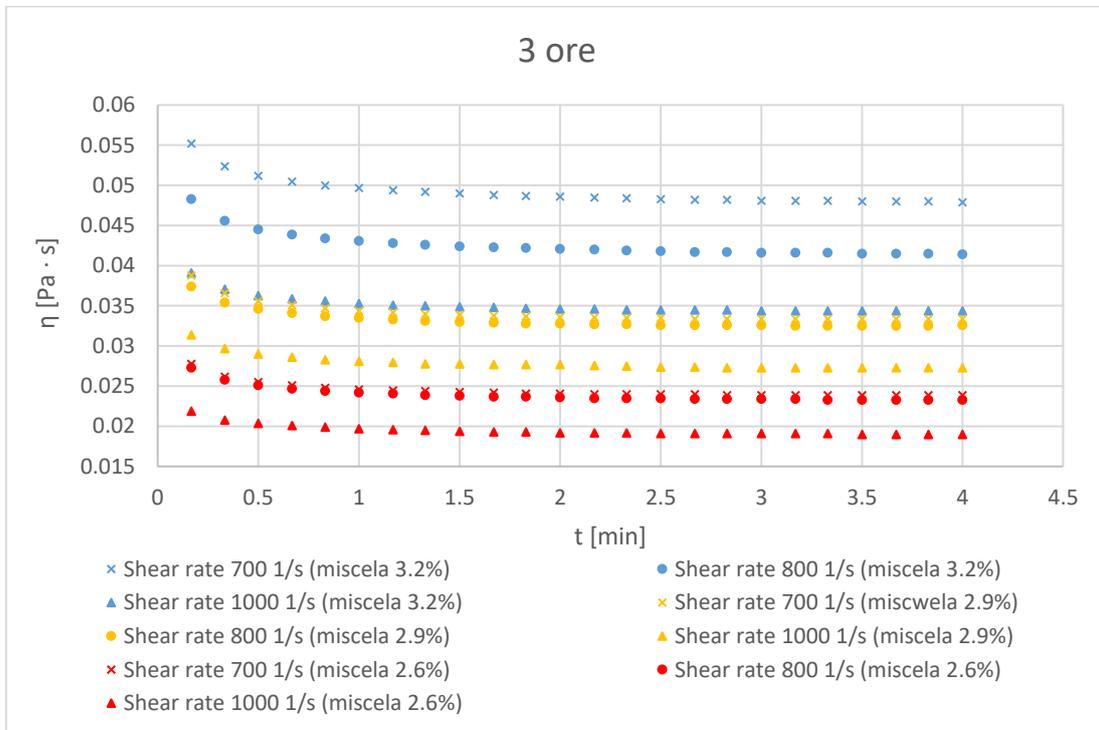


Figura 4.10 - Andamento della viscosità nella fase di pre-shearing per un tempo di invecchiamento di 3 ore

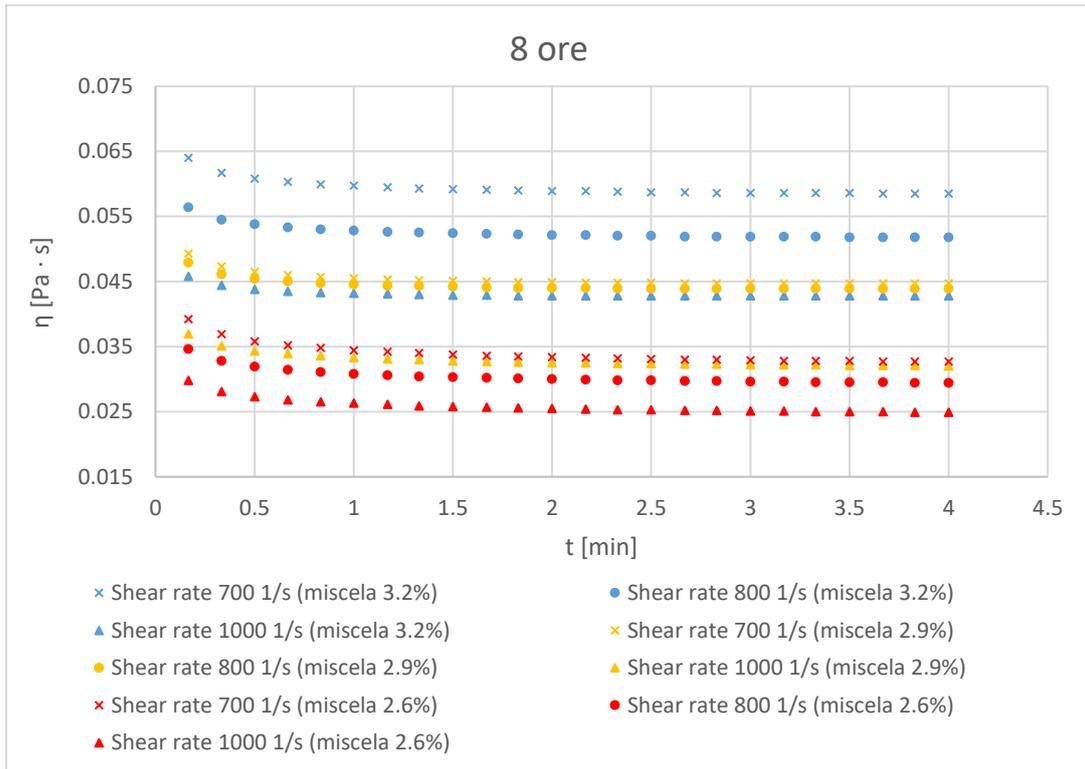


Figura 4.11 - Andamento della viscosità nella fase di pre-shearing per un tempo di invecchiamento di 8 ore

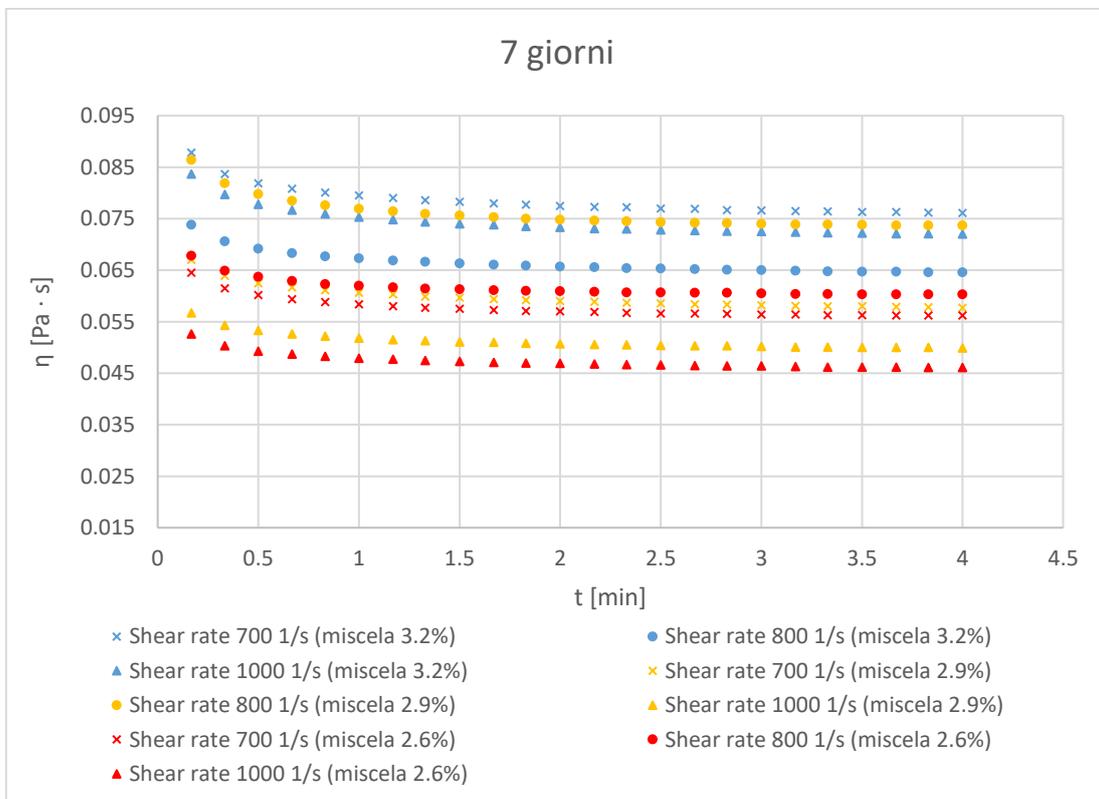


Figura 4.12 - Andamento della viscosità nella fase di pre-shearing per un tempo di invecchiamento di 7 giorni

4.2.1. Considerazioni generali

Dai grafici precedenti si può notare come la viscosità diminuisca con il tempo, raggiungendo un valore di plateau. Questo è il comportamento atteso dalla miscela, infatti, all'aumentare del tempo di applicazione dello shear rate, la destrutturazione del materiale continua finché la resistenza da esso opposta ad una sollecitazione esterna diminuisce. Si ricordi, infatti, che la viscosità è definita come la resistenza che un fluido oppone allo scorrimento e dipende dalle condizioni di attrito tra le molecole. Dopo la rottura dei legami, il materiale mostra una viscosità più bassa e questo è stato confermato dai risultati dei test.

I risultati suggeriscono che la viscosità dei tre sistemi, a parità di tempo di invecchiamento, cresce al crescere della percentuale di laponite, confermando quanto visibilmente osservato e ritrovato in letteratura.

Inoltre, a partire da 8 ore e a parità di tempo di maturazione, l'applicazione di shear rate elevati (per la miscela 3.2%) comporta una riduzione della viscosità maggiore rispetto alla viscosità della miscela 2.9%, ottenuta applicando shear rate più bassi.

4.3. Abbattimento del modulo elastico

I grafici riportati in seguito mostrano la percentuale di abbattimento del modulo elastico dei tre gruppi di campioni. In questo caso il tempo considerato (definito in ore) è relativo al tempo di invecchiamento della miscela e non al tempo di prova. Per questo motivo, per la realizzazione di tali grafici, sono state prese in considerazione tutte le prove eseguite per ogni finestra temporale scelta in fase preliminare. Per la costruzione delle curve si è fatto riferimento al primo valore che il modulo elastico assume a seguito della fase di pre-shearing. Inoltre le considerazioni riguardo l'abbattimento del modulo sono state eseguite analizzando il comportamento della miscela al variare dello shear rate applicato e al variare di percentuale di laponite scelta.

4.3.1. Abbattimento del modulo elastico al variare della percentuale di laponite

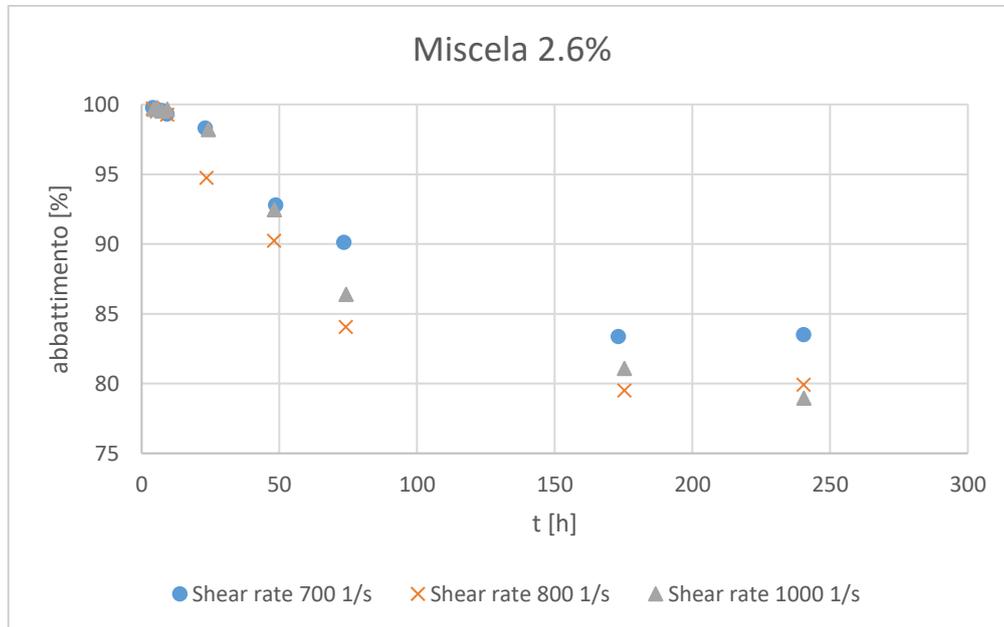


Figura 4.13 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare del valore di shear rate (miscela 2.6%)

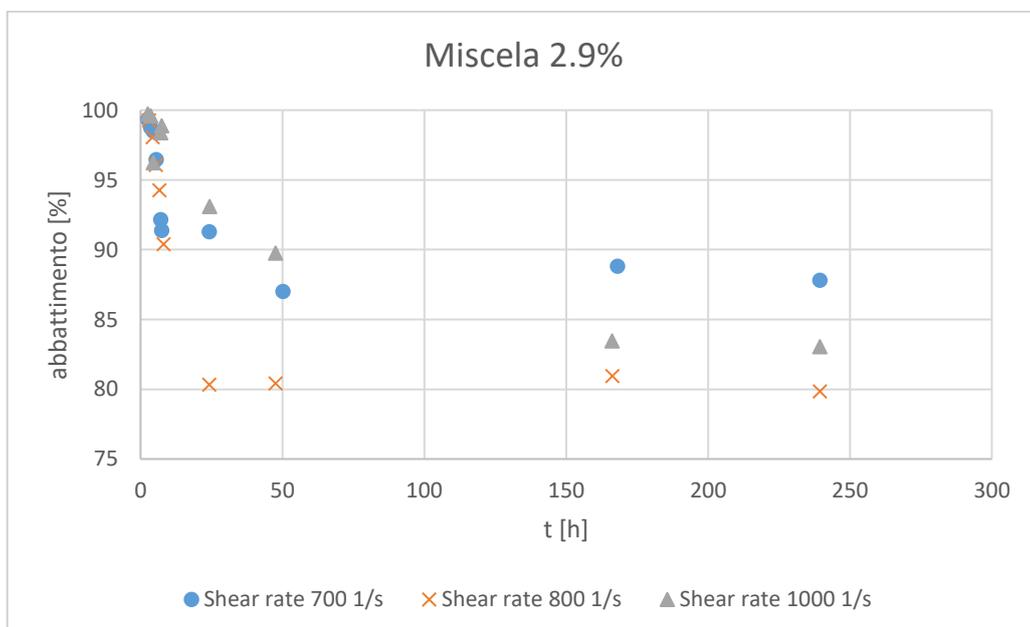


Figura 4.14 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare del valore di shear rate (miscela 2.9%)

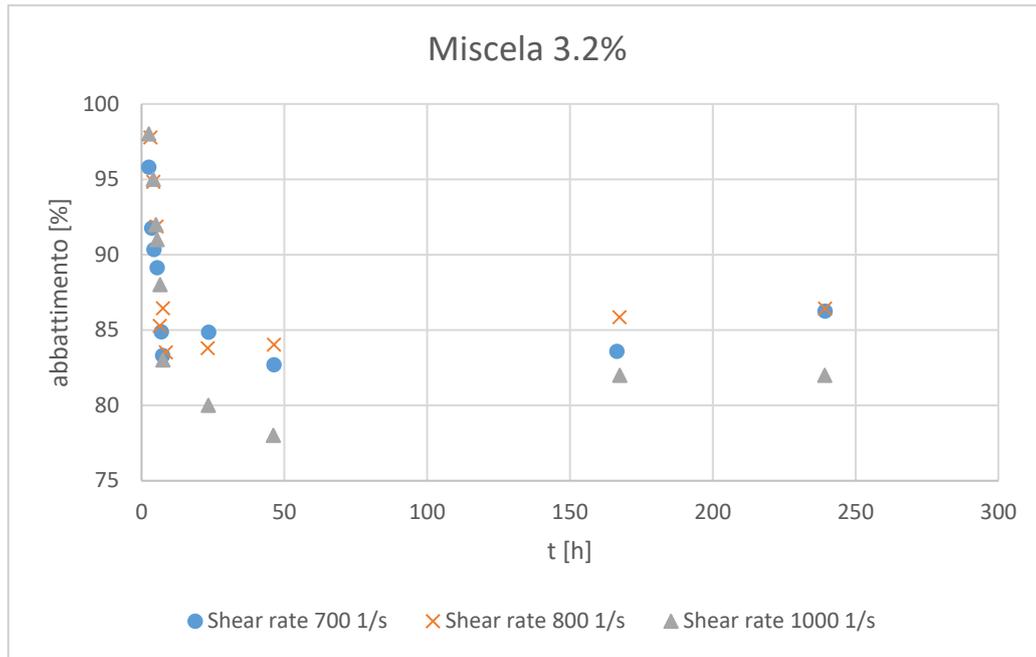


Figura 4.15 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare del valore di shear rate (miscela 3.2%)

4.3.2. Abbattimento del modulo elastico al variare dello shear rate

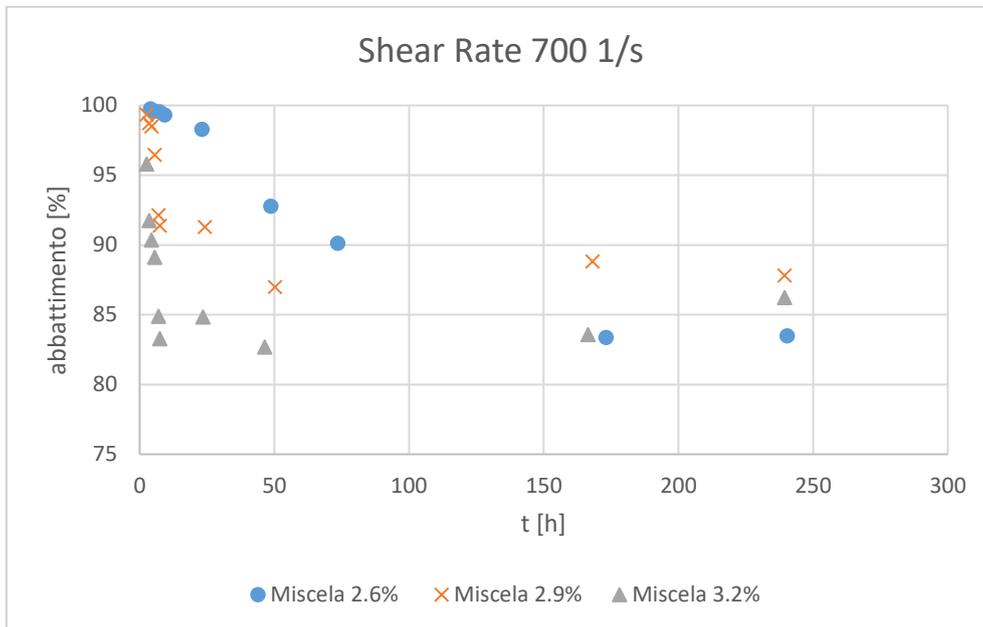


Figura 4.16 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare di percentuale di laponite (shear rate 700 1/s)

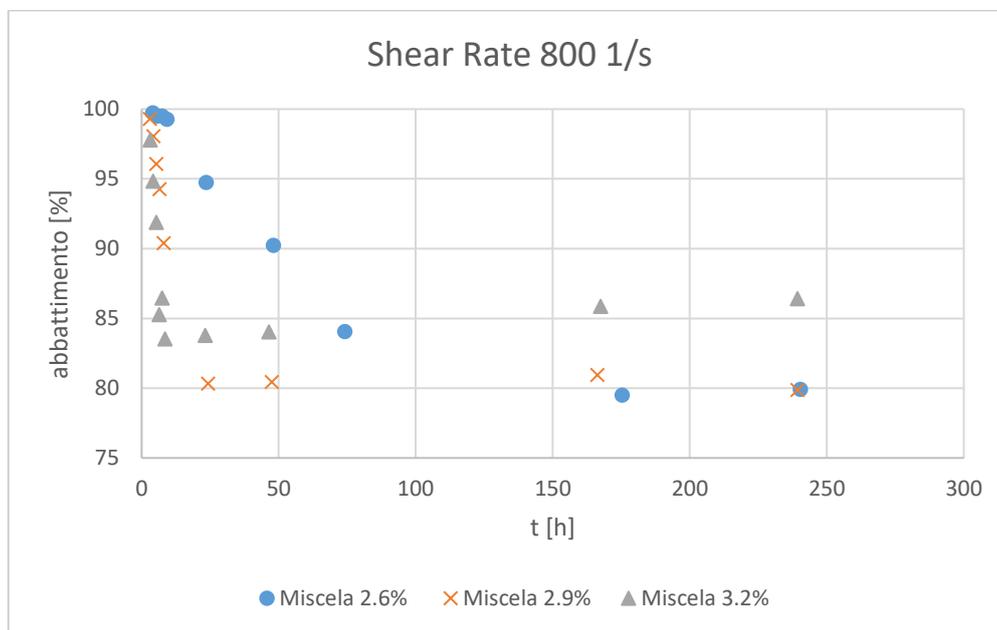


Figura 4.17 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare di percentuale di laponite (shear rate 800 1/s)

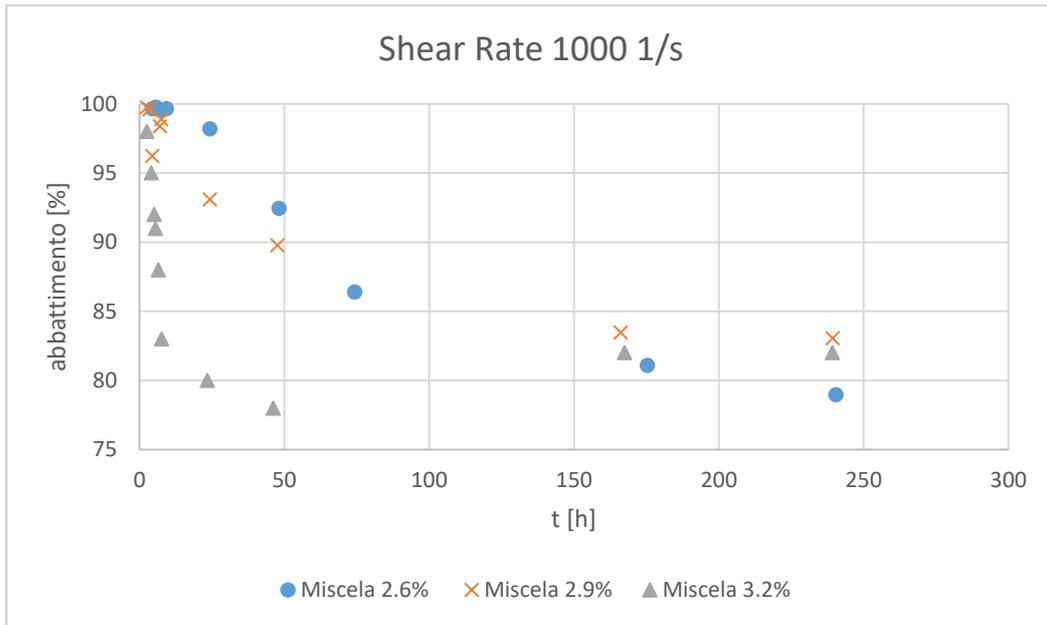


Figura 4.18 – Abbattimento del modulo elastico G' al variare di percentuale di laponite (shear rate 800 1/s)

4.3.3. Considerazioni generali

Dai grafici precedenti possono essere effettuate alcune considerazioni.

Al diminuire del contenuto di laponite, la miscela 2.6% presenta valori di abbattimento che si riducono gradualmente al crescere del tempo di maturazione (valutato in una finestra temporale di 10 giorni). Contrariamente, la miscela 3.2%, essendo una miscela che evolve più velocemente, presenta valori di abbattimento che decrescono molto velocemente nei primi periodi di maturazione e successivamente tendono a crescere leggermente. L'andamento dell'abbattimento per la miscela al 2.9% si pone in una situazione intermedia alla miscela 2.6% e 3.2%. Questo suggerisce che nelle prime fasi di invecchiamento, a prescindere dalla percentuale di laponite, il valore di abbattimento tende a decrescere. A lungo termine tale valore tende a crescere per le miscele 3.2% e 2.9%, mentre per la miscela 2.6% non si riscontra questo trend, che potrebbe manifestarsi in test eseguiti per tempi di invecchiamento più lunghi e superiori ai 10 giorni stabiliti in fase di sperimentazione. Per questo motivo è stato ritenuto opportuno testare la miscela 2.6% dopo più di tre mesi dalla preparazione. In questo caso i risultati dei test mostrano un leggero aumento del valore di abbattimento, dell'ordine di qualche punto percentuale. Nonostante ciò, è possibile che la rigidità della struttura interna della miscela 2.6% non raggiunga mai quella manifestata dalla miscela 3.2%. Per indagare tale aspetto, infatti, sarebbe necessario effettuare una serie di prove nel tempo, monitorando continuamente il comportamento del campione.

A parità di 10 giorni di maturazione e per la stessa miscela testata con tre shear rate differenti, l'abbattimento cresce al crescere dello shear rate applicato. A parità di shear rate e per tre miscele differenti, l'abbattimento cresce al decrescere della percentuale di laponite.

5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi è stato indagato il comportamento reologico nel tempo di sospensioni di acqua-laponite, in seguito all'applicazione di un certo grado di disturbo. Nel seguito sono esposte le conclusioni a cui si è pervenuti.

Come già chiarito nel Capitolo 5, è stato svolto uno studio di tipo qualitativo, valutando gli andamenti dei parametri studiati nel tempo, trascurando i loro valori numerici. Dai grafici riportati nel capitolo precedente non è particolarmente apprezzabile la variabilità dei risultati, causata da fattori esterni. È bene chiarire, dunque, in che modo il comportamento della miscela sia influenzato da tali fattori, sulla base delle osservazioni svolte durante la sperimentazione. La minima perturbazione esterna, la variazione di temperatura e di umidità dell'ambiente, la tipologia di acqua utilizzata e le modalità di conservazione del campione influiscono notevolmente sui valori numerici dei risultati. Nonostante sia stata prestata attenzione nel mantenere un certo standard invariato per ogni procedura, che va dalla preparazione del campione alla prova stessa, si sono ottenuti risultati alle volte variabili. Per questo motivo, osservando i dati con senso critico, si sono cercate soluzioni atte ad uniformare le informazioni ed, eventualmente, sono stati esclusi dati giudicati come outlier. Questa informazione può risultare interessante dal punto di vista pratico, come ad esempio nei riguardi del processo di produzione del materiale a livello industriale.

Analizzando gli andamenti del modulo elastico e viscoso durante la finestra temporale indagata di 10 giorni, si nota una crescita dei loro valori per ogni prova svolta. Tale trend è spiegato dalla formazione della microstruttura interna del materiale, la quale è costituita da legami deboli durante le prime ore di vita della miscela. L'evoluzione della microstruttura fa sì che il campione manifesti un comportamento che passa da liquid-like a solid-like. La velocità con cui si osserva tale variazione di comportamento dipende da una serie di fattori, ad esempio dalla percentuale di laponite adottata per la miscela. Si osserva che piccole variazioni di percentuale, pari a 0.3% in questo caso, determinano una notevole variazione del comportamento, aspetto confermato sia dai risultati ottenuti, sia osservato visivamente in fase di sperimentazione. Confrontando il comportamento dei campioni preparati con i due valori estremi di percentuale

adottata, la miscela preparata con il 3.2% di laponite su peso d'acqua evolve molto più velocemente rispetto a quella preparata con il 2.6% di laponite. Valutando, infatti, la fase della prova successiva all'applicazione dello shear rate (*time sweep phase*), si è riscontrato che il valore che assumono i moduli della miscela 2.6% risultano relativi a quelli di un sistema sol (G'' maggiore di G') fino a 24 ore dalla preparazione della miscela e per qualunque valore di shear rate applicato. La miscela 3.2%, invece, mantiene tale comportamento soltanto durante le prime fasi di inattività. Si è notato, infatti, che il passaggio da sistema sol a sistema gel, dopo la fase di pre-shearing, è apprezzabile già a partire da 4-5 ore dalla preparazione del campione. La miscela 2.9% assume un comportamento intermedio rispetto a quelli illustrati precedentemente, ma, comunque, il comportamento passa da liquid-like a solid-like durante il primo giorno di test.

Nonostante la variazione di comportamento della miscela sia indipendente dall'entità dello shear rate applicato, il valore dei moduli, invece, è influenzato da quest'ultimo. Tale dipendenza è risultata più forte nei primi periodi di invecchiamento, tendendosi ad annullare quando la miscela risulta essere più matura e strutturata.

Un ulteriore aspetto che è stato preso in considerazione è l'abbattimento del modulo elastico dopo l'applicazione dello shear rate. Tale abbattimento è stato valutato sia al variare dell'intensità del disturbo sia al variare della percentuale di laponite. Dai grafici ottenuti non è possibile dedurre un trend unico e ben distinto, tuttavia si può osservare, in generale, che l'abbattimento è prossimo al 100% durante le prime ore dalla preparazione del campione. Tale considerazione è valida per tutte le miscele e per ogni valore di shear rate applicato. Successivamente, il valore di abbattimento decresce e si attesta in un range che va dal 75% al 90%. Tale tendenza è giustificata dalla formazione di una microstruttura interna meno debole e meno suscettibile al disturbo applicato. Si può evidenziare che l'abbattimento è più marcato per le miscele al 3.2% di laponite, infatti esse evolvono in maniera più rapida. Durante il primo giorno di test l'abbattimento si riduce a valori anche inferiori all'80% e successivamente si mantengono pressochè costanti. Per le miscele 2.6% e 2.9% il modulo elastico subisce un abbattimento più graduale. La miscela 2.6% mostra un abbattimento che si mantiene molto elevato anche dopo 48 ore dalla miscelazione del campione, successivamente, dopo 7 e 10 giorni i valori di abbattimento oscillano attorno all'80%.

La miscela 2.9% mostra, al solito, un comportamento intermedio tra la 2.6% e la 3.2%, con valori di abbattimento che raggiungono l'80% già dopo 24 ore.

Considerando la finestra temporale di 10 giorni, si nota una leggera inversione dei valori di abbattimento, i quali tendono a crescere lievemente. Ciò è chiaramente visibile per la miscela 3.2%, che evolve rapidamente, mentre non è ugualmente visibile per le altre miscele. È nato, dunque, il sospetto che le altre miscele potrebbero manifestare tale andamento per tempi di invecchiamento molto più lunghi, per questo motivo è stato ritenuto opportuno testare la miscela 2.6% dopo più di tre mesi dalla preparazione del campione. In effetti i risultati mostrano che l'abbattimento del modulo elastico tende leggermente a crescere, anche se in maniera minore rispetto alla miscela 3.2%. Ciò suggerisce che probabilmente, a lungo termine, le miscele con minore percentuale di laponite potrebbero non presentare una microstruttura caratterizzata da legami forti quanto quelli che si manifestano nelle miscele con percentuale di laponite più elevata.

La viscosità, misurata nella fase di pre-shearing, tende a decrescere raggiungendo un valore di plateau. Tendenzialmente, la viscosità decresce all'aumentare dello shear rate applicato. Inoltre, a parità di tempo di invecchiamento, essa cresce al crescere della percentuale di laponite, confermando i dati trovati in letteratura. Osservando, infatti, i valori crescenti di modulo, l'andamento atteso è proprio quello appena descritto. La viscosità è stata indagata anche al fine di trovare un'ulteriore conferma al processo di destrutturazione del materiale. Una diminuzione di viscosità, infatti, implica un comportamento più vicino a quello di un fluido, quindi è stato ulteriormente confermato che, durante l'applicazione di uno stimolo esterno, il materiale fluisce.

Tenendo presente che lo scopo dell'elaborato è stato quello di eseguire un'indagine reologica del materiale, studio necessario per comprenderne le proprietà viscoelastiche, risulterebbe interessante inquadrare il lavoro svolto anche nel contesto geotecnico per il quale è stato concepito. Alla luce dei risultati ottenuti, non è possibile affermare o meno se le sospensioni di acqua e laponite possano effettivamente mitigare il rischio di liquefazione. Le analisi effettuate e descritte, infatti, sono preliminari ad una fase successiva, in cui può essere possibile indagare la resistenza ciclica offerta dai campioni di sabbia e sospensioni di laponite. Infatti, questa nuova fase della

sperimentazione potrebbe ispirarsi ai risultati ottenuti da varie tipologie di prove condotte su campioni di sabbia e bentonite, i cui risultati sono disponibili in letteratura. È possibile comunque evidenziare dei vantaggi che sicuramente mostrano le sospensioni di acqua e laponite, a scapito di altri metodi di mitigazione del rischio.

Considerando i dati ottenuti relativamente all'abbattimento del modulo, si è notato che tale grandezza risulti indipendente dall'entità dello shear rate applicato. Questo risultato è stato reputato positivo in fase di sperimentazione. L'entità dello shear rate può essere, infatti, assimilato alla pressione di pompaggio della miscela nel terreno. Si è notato che la miscela fluisce indipendentemente dall'entità del disturbo, quindi è possibile applicare pressioni inferiori con risultati positivi in termini di iniettabilità. In tal modo è possibile limitare il disturbo arrecato al terreno e facilitare le operazioni di iniezione, garantendo comunque una buona performance della miscela.

Un altro aspetto interessante delle sospensioni di acqua e laponite è proprio quello che riguarda il processo di ristrutturazione dei legami interni, dopo l'applicazione di un disturbo esterno. Confrontandone il comportamento con altri interventi, quale quello di cementazione del terreno, quando una sabbia cementata con varie tecniche è soggetta ad una forza esterna che supera il limite elastico, i legami interni vengono rotti in maniera irreversibile, rendendo non più adeguato il trattamento effettuato. Le sospensioni di acqua e laponite, invece, sono in grado di ricreare tali legami, rendendo l'intervento più efficace e durevole nel tempo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alain El Howayek, 2011. “*Characterization, rheology and microstructure of laponite suspensions*”. Purdue University Graduate School.
- [2] Barbara Ruzicka, Emanuela Zaccarelli (2011). “*A fresh look at the laponite phase diagram*”. *Soft Matter*, 1268-1286.
- [3] Jeffrey Warda, Irene Brückle, Anikó Bezúr, Dan Kushel (2013). “*Analysis of agarose, carbopol and laponite gel polities in paper conservation*”. *Journal of the American Institute for Conservation*, 263-279.
- [4] A. Shahin, Yogesh M Joshi (2012). “*Physicochemical effects in aging aqueous laponite suspensions*”. *Langmuir*, 15674-15686.
- [5] Céline Martin, Frédéric Pignon, Jean-Michel Piau, Albert Magnin, Peter Lindner, Bernard Cabane (2002). “*Dissociation of thixotropic clay gels*”. *Physical review e* 66., 021401.
- [6] Marika Santagata, Antonio Bobet, Alain El Howayek, Felipe Ochoa-Cornejo, Joseph V. Sinfield. “*Building a nanostructure in the pore fluid of granular soils*”. Lyles School of Civil Engineering, Purdue University.
- [7] Marika Santagata. “*Engineering the rheology of clay-water dispersions*”. Purdue University.
- [8] “*Engineering the pore fluid of sands with highly plastic nano-particles for liquefaction prevention*”.
- [9] Jan Mewis, Norman J. Wagner (2009). “*Thixotropy*”. *Advances in colloid and interface science*, 214-227.
- [10] Romano Lapasin (2016). “*Proprietà reologiche di dispersioni di laponite in matrici acquose di xantano*”. *Bollettino Panta Rei*, 7-19.

Sitografia

- [11] <https://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=60619&L=0>
- [12] http://www.ih.cas.cz/files/uploads/3_vyzkum/6_pristroje/MCR-501-brochure.pdf
- [13] <https://heidolph-instruments.com/documents/operation%20manuals/overhead%20stirrer/Operation-Manual-Overhead-Stirrer-RZR-2020-2021-2041.pdf>
- [14] <https://it.wikipedia.org/wiki/Ripetibilit%C3%A0>
- [15] <https://it.wikipedia.org/wiki/Riproducibilit%C3%A0>
- [16] https://www.byk.com/fileadmin/byk/additives/product_groups/rheology/former_rockwood_additives/technical_brochures/BYK_B-RI21_LAPONITE_EN.pdf
- [17] <https://www.byk.com/it/additivi/additivi-per-nome/laponite-rd.php>

Ringraziamenti

In primo luogo, vorrei ringraziare sentitamente il professor Orazio Baglieri, relatore di questa tesi, per aver seguito costantemente e con grandissima disponibilità il mio lavoro e per avermi dato l'occasione di lavorare in laboratorio, esperienza significativamente positiva e formativa, a mio parere. Ringrazio l'ingegnere Fabrizio Miglietta per aver dimostrato in ogni occasione infinita disponibilità e pazienza, per qualunque operazione e per qualunque chiarimento. I suoi preziosi consigli sono stati fondamentali per lo svolgimento dell'elaborato. Ringrazio anche tutto il personale del Laboratorio Materiali Stradali, in particolare il professore Davide Dalmazzo e l'ingegnere Lucia Tsantillis, che mi hanno aiutato durante la prima fase del mio percorso di tesi.

Ringrazio di cuore tutta la mia famiglia. Papà, sei stato l'uomo più importante della mia vita e al contempo l'uomo migliore che io abbia mai conosciuto. So bene quanto saresti stato orgoglioso del mio traguardo e quanto avresti gioito con me, nascondendoti tra lacrime felici. Ti dedico tutto il mio lavoro, tutto il mio impegno e la mia fatica, perché sono sicura che senza la tua fiducia non avrei raggiunto questo obiettivo. Ti porterò sempre nel cuore perché sei stata la persona più dolce, più gentile e più amorevole che abbia mai fatto parte della mia vita. Mamma, grazie per essere al mio fianco, nonostante i periodi più tristi. Grazie perché abbiamo avuto la forza di rialzarci, di andare avanti, affrontando la vita col sorriso stampato sulla faccia, senza far trasparire il minimo cedimento. Grazie per avermi sostenuta, soprattutto durante gli ultimi anni. Ringrazio i miei fratelli Maila e Maurizio, perché noi siamo forti, non ci abbattiamo e guardiamo verso il futuro con speranza e determinazione.

Francesco, queste poche righe non possono bastare a descrivere tutta la gratitudine che provo verso di te. Grazie, perché sei ancora qui, con me, per l'ultimo traguardo. Grazie per essere sempre al mio fianco, per avermi sempre aiutato. Grazie per la tua infinita pazienza, per tutti i momenti felici passati insieme e per tutti quelli che ancora devono venire. Grazie, perché sei una persona speciale, con un animo fuori dal comune. Grazie, perché non poteva capitarmi fortuna più grande dell'averti incontrato.

Piero e Santina, vi ringrazio non solo per essere miei amici, ma soprattutto perché siete stati la mia famiglia qui a Torino, il mio punto di riferimento. Piero, grazie per tutte le serate folli, per le lunghe chiacchierate fino all'alba, per tutte le giornate di studio (e

di pausa) passate assieme e per tutte le risate fino alle lacrime. Santina, grazie per essere la mia amica sincera e leale. Grazie per tutte le confidenze, per tutti i consigli e per tutti i pomeriggi passati assieme. Grazie, perché siamo così diverse eppure così legate. Vi ringrazio ragazzi, perché senza di voi non sarebbe stato così semplice affrontare tutti i momenti più difficili, perché con voi non esistono attimi di tristezza e di sconforto... *“queste sono amicizie per la vita”*.

Pietro, grazie di tutto. Grazie per tutte le risate e per tutti i battibecchi. Grazie per i momenti felici e per quelli meno belli. Grazie, perché ormai sei come un fratello, uno di quei fratelli con cui si fa sempre lite, ma con cui non si riesce a rimanere arrabbiati a lungo.

Cara Chiara, Caracalla, grazie per essere mia amica. Grazie per tutti i pomeriggi passati a chiacchierare nella C121, per tutte le serate in cucina o sul terrazzo, per tutte le risate e per tutti i momenti di delirio e follia. Sei stata importante perché, senza la tua presenza, la vita in collegio non sarebbe stata così bella.

Ringrazio le mie amiche di sempre, le persone su cui potrò sempre contare. Ringrazio Rosalinda per essermi sempre vicina, per essere sempre pronta ad ascoltarmi e a darmi consigli. Ringrazio Daniela e Ilenia, perché con voi il tempo si è fermato agli anni più belli. Anche se nostre vite hanno preso strade diverse, rincontrarsi è sempre una gioia, nonostante i lunghi periodi che ci separano.

Ringrazio tutti i miei colleghi del Politecnico di Torino. Primo fra tutti, ringrazio Angelo, il gigante buono. Lo ringrazio per la gioia e l'allegria che riesce a trasmettere a tutti noi. Lo ringrazio per la sua bontà d'animo e per la sicurezza che riesce ad infonderci. Ringrazio Paolo e Giuliana, la famiglia Vianello, perché mi hanno sempre accolto in casa loro, senza mai farmi sentire a disagio. Ringrazio Paolo per tutte le volte che mi ha fatto morire dal ridere e ringrazio Giuliana per la sua dolcezza indescrivibile. Ringrazio tutti i colleghi dell'indirizzo di Geotecnica, in particolare Vito e l'Ingegnere Porcasi, senza i quali l'esperienza del tirocinio non sarebbe stata così semplice ed allegra.

Ringrazio i miei coinquilini, Rosario e Giuseppe. Li ringrazio per tutte le serate passate a ridere, per tutte le cene assieme e per tutti i momenti di follia pura. Sono sicura che una casa allegra ed affiatata come la nostra sia molto difficile da trovare. Li ringrazio perché non solo sono stati miei coinquilini, ma sono anche miei amici. Ci vediamo per l'aperitivo, ragazzi!

Ringrazio tutti i ragazzi, ma soprattutto le ragazze del laboratorio DIATI, per tutte le giornate passate a lavorare assieme, con i rumori assordanti delle cappe e l'odore di petrolio e solventi. Il lavoro di laboratorio è pesante, ma ci trasmette infinita soddisfazione.

Ringrazio le mie colleghe del Politecnico di Bari, in particolare Katia, ragazza straordinaria e dalla quale non riesco a separarmi.

Ringrazio le amiche e gli amici di una vita, quelli del paesello, che contribuiscono, anno dopo anno, a rendere la mia vita più allegra, con la loro follia e la loro irrefrenabile voglia di fare. Grazie ragazzi, perché ne abbiamo passate tante ed ogni anno trascorso con voi è stato importante per me.

Infine ringrazio Torino, ringrazio il Politecnico, perché questo posto, tanto odiato alle volte, è stato in grado di donarmi gli anni migliori della mia vita, di farmi incontrare persone speciali e di creare amicizie talmente forti e ricordi talmente belli per cui non posso far altro che dire: nonostante tutto, ne è valsa la pena!