

POLITECNICO DI TORINO

Tesi di Laurea Magistrale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il
Territorio

Riutilizzo dei fanghi di segazione nelle malte cementizie a resistenza controllata CLSM



Candidato:

Michela Airoldi s232547

Relatori:

Paola Marini

Lorena Zichella

Pier Paolo Riviera

EldhoChoorackalAvirachan

Anno Accademico 2017/2018

Indice

Capitolo 1. Introduzione.....	5
Capitolo 2. Normativa riferita alla gestione dei fanghi di segagione.....	9
2.1. Quadro normativo europeo.....	9
2.2. Quadro normativo italiano	13
Capitolo 3. Origine dei fanghi di segagione	17
3.1. Ciclo produttivo delle pietre ornamentali	18
3.2. Metodologie di taglio.....	21
3.2.1. Trattamenti di volume	21
3.3. Gestione dei fanghi di segagione in stabilimento.....	29
3.4. Quadro economico sulla gestione dei fanghi di segagione	33
Capitolo 4. Caso studio.....	34
4.1. Inquadramento geografico e geologico strutturale	34
4.2. Aziende oggetto di campionamento	35
Capitolo 5. Prove di caratterizzazione sui fanghi	39
5.1. Analisi granulometrica	40
5.1.1. Risultati	41
5.2. Separazione magnetica ad umido	41
5.2.1. Risultati	45
5.3. Contenuto in quarzo con l'analisi d'immagine	47
5.3.1. Risultati	53
5.4. Test di cessione sul tal quale	54
5.4.1. Risultati	55
5.5. Analisi chimiche sul tal quale.....	56

5.5.1. Risultati	57
5.6. Densità specifica	58
5.6.1. Risultati	60
5.7. Confronto tra i risultati ottenuti	60
Capitolo 6. Malte cementizie a resistenza controllata CLSM	62
6.1. Premessa.....	62
6.2. CLSM generalità	64
6.2.1. Proprietà	65
6.2.2. Materiali standardizzati	67
6.2.3. Campi di applicazione	69
6.3. Effetto della conducibilità termica del materiale di riempimento sulle prestazioni delle linee di trasmissione	70
Capitolo 7. Valutazioni preliminari per una corretta impostazione del mix design	72
7.1. Caratterizzazione dei materiali da utilizzare.....	72
7.1.1. Caratterizzazione degli aggregati.....	75
7.2. Metodologia per il Mix-design.....	80
7.2.1. Mix design	81
Capitolo 8. Prove sperimentali.....	87
8.1. Modalità di preparazione delle miscele	87
8.2. Prova di spandimento su piastra	88
8.3. Confezionamento dei campioni cilindrici	89
8.4. Prova in cella triassiale a carico ripetuto (modulo resiliente)	91
8.4.1. Modelli analitici per l' interpretazione del Mr.....	97
8.5. Prova relativa alla conducibilità termica	99
Capitolo 9. Risultati	101

9.1. Risultati della prova di spandimento	101
9.2. Risultati relativi alla prova in cella triassiale a carico ripetuto a 28 giorni di maturazione.....	107
9.3. Risultati della prova di conducibilità termica	114
Capitolo 10. Conclusioni	120
Bibliografia	124
<i>Allegati</i>	CXXVI
ALLEGATO A - RISULTATI DELL'ANALISI D'IMMAGINE CON IMAGE J E MACROSCOPIO OTTICO	CXXVIII
ALLEGATO B - DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA AGGREGATI	CXXXII
ALLEGATO C - DENSITÀ SPECIFICA AGGREGATI DI QUARZITE	CXXXIII
ALLEGATO D - MODULO RESILIENTE.....	CXXXIV
ALLEGATO E -DOSAGGIO DELLE MISCELE	CXLII
ALLEGATO F – RISULTATI RELATIVI ALLA CONDUCEBILITA' TERMICA.....	CXLVI

Capitolo 1. INTRODUZIONE

Lo scopo del seguente elaborato di tesi è quello di verificare il possibile recupero dei fanghi di segagione per il confezionamento di una malta cementizia a resistenza controllata (abbreviato in seguito con CLSM) che verrà impiegata come sottofondo stradale all'interno del quale sono presenti dei sottoservizi.

I fanghi di segagione sono classificati secondo il quadro legislativo vigente come rifiuti inerti codificati con codice CER 10413, prodotti dalla lavorazione della pietra ornamentale negli stabilimenti, in particolare dai trattamenti definiti di volume e destinati ad operazioni di smaltimento.

A causa della natura del fango di segagione come la fine granulometria, che comporta problemi di instabilità geo-strutturali nelle discariche, alto contenuto di metalli pesanti e idrocarburi TPH, gli impatti che questi riversano sull'ambiente, nel momento dello smaltimento, sono sempre più negativi. Per tale ragione la ricerca, grazie anche a una normativa sempre più a favore del recupero/ riutilizzo degli scarti di produzione, si sta indirizzando verso lo studio di nuove operazioni che permettano ai fanghi di perdere la loro qualifica di rifiuti trasformandosi in *materie prime e secondarie* e quindi diventare materiali di input per nuovi cicli produttivi.

Secondo la normativa vigente, in particolare il decreto legislativo 205/2010, i fini di segagione possono essere riutilizzati, se rispettano determinati criteri e limiti di concentrazione, per il ripristino ambientale di cave e siti compromessi insieme con terreno vegetale; oppure come materiali impermeabilizzanti per substrati di discariche. Mentre non esiste ancora una normativa, sia europea che nazionale, che permette di seguire delle linee guida per il recupero di tali residui nella composizione di sottofondi stradali.

I fanghi utilizzati in questo studio provengono da due stabilimenti situati nel territorio del Verbano e presentano proprietà sia fisiche che chimiche diverse perché sono stati ottenuti mediante operazioni di taglio e blocchi di pietra madre differenti. I due campioni

sono denominati all'interno dell'elaborato come M e G. Questi sono stati utilizzati nelle loro forma *tal quale*, per la composizione di quattro miscele cementizie a resistenza controllata (CLSM) che differiscono a due a due per tipologia di fango e contenuto di cemento 50-100 Kg/m³. La malta cementizia richiesta per il riempimento del sottofondo stradale deve soddisfare alcuni requisiti, oltre a quelli propri del CLSM come capacità autolivellante, un'adeguata fluidità e resistenze meccaniche limitate nel tempo, deve avere una elevata e costante conducibilità termica. Tale proprietà è necessaria perché il sottofondo stradale dovrà ospitare cavi per la trasmissione di energia elettrica, per cui il materiale dovrà essere in grado di dissipare il calore prodotto dai cavi per tutta la durata di vita degli stessi, facendo in modo che sia la più lunga possibile. Per soddisfare tale requisito, si è scelto di utilizzare nella composizione delle miscele, degli aggregati con elevata conducibilità termica come la quarzite e il fango oggetto di studio. Quest'ultimo infatti, grazie al suo elevato contenuto di metalli pesanti e di minerali di quarzo provenienti dai blocchi madre, incrementa la conducibilità del conglomerato cementizio.

Per verificare i requisiti richiesti, le quattro miscele sono state sottoposte a prove di laboratorio.

La prima parte del seguente elaborato di tesi tratta i fanghi di segazione riportando, in particolare, il quadro legislativo inerente la tematica dello smaltimento e riutilizzo di tali inertiatravverso la presentazione della normativa attualmente vigente, dei concetti chiave presenti nelle direttive ed i relativi recepimenti nazionali. Successivamente è stato presentato il ciclo di produzione delle pietre ornamentali, dal recupero dei blocchi in cava fino alla produzione di lastre naturali commerciabili negli stabilimenti. Si riporta una descrizione dettagliata delle tipologie di fanghi, dei principali metodi di lavorazione del taglio e della loro gestione in stabilimento. Si prosegue con l'inquadramento geografico dell'area oggetto di studio, evidenziando la caratterizzazione geologica della stessa. Sono state fornite informazioni riguardo i due stabilimenti, come le modalità di taglio e le pietre trattate, in modo da prevedere le caratteristiche dei due fanghi campione. Il capitolo successivo riporta le prove di caratterizzazione che sono state effettuate sui due campioni in laboratorio e i relativi risultati:

- analisi granulometrica con setacciatura;
- contenuto di metalli pesanti sulla frazione magnetica con separazione magnetica in torbida e verifica con magnete permanente con scala Ghiotti;
- contenuto in quarzo con Analisi d'immagine sulla frazione amagnetica con microscopio elettronico e macroscopio ottico;
- densità specifica con "Le ChatelierFlak" sul tal quale;
- test di cessione sul tal quale;
- analisi chimiche sul tal quale.

Nella seconda parte del seguente elaborato viene invece trattato il CLSM, dando inizialmente delle informazioni generali su questa tipologia di malta cementizia e le sue proprietà. Successivamente verrà dato un inquadramento del caso studio, ovvero i requisiti che il materiale cementizio deve soddisfare, riportando il problema relativo alla produzione di calore dei cavi ad alta tensione che passeranno per tale sottofondo.

Nel capitolo successivo invece saranno inizialmente introdotti i materiali utilizzati e le loro caratteristiche e successivamente verrà spiegata la metodologia proposta per la progettazione della miscela in oggetto, con particolare riferimento al mix design. In particolare per il mix design del materiale si è partiti dalla curva di riferimento di *Andreasen and Andersen modificata* e si è giunti alla progettazione di quattro diverse miscele che differiscono a due a due per tipologia di fango, quelli precedentemente descritti, e contenuto in cemento.

Si prosegue poi con le spiegazioni della modalità di preparazioni delle quattro miscele, di confezionamento dei quattro provini e le prove di laboratorio effettuate su di essi:

- test di spandimento su piastra, per testarne la fluidità;
- cella triassiale a carico ripetuto a 28 giorni di maturazione dei campioni per determinare il modulo resiliente;
- prova di conducibilità termica con sensore KD2-pro a 6, 18 giorni di maturazione e in condizioni di secco;

-test di cessione sui conglomerati per verificare il rilascio di metalli pesanti una volta che il CLSM viene gettato in posa.

Capitolo 2. NORMATIVA RIFERITA ALLA GESTIONE DEI FANGHI DI SEGAGIONE

2.1. Quadro normativo europeo

Le principali direttive europee che regolano il flusso e la gestione dei rifiuti tra gli stati membri in prospettiva di uno futuro sviluppo sostenibile del settore sono la 2006/21 / CE (Gestione dei rifiuti delle industrie estrattive - rifiuti di estrazione), la 2008/98/CE (quadro sui rifiuti) e la Direttiva 1999/31/CE (discarica per rifiuti).

Uno dei maggiori flussi di rifiuti nell'Unione europea è quello derivante dalle operazioni minerarie e dalla lavorazione delle risorse minerarie. L'ambizioso obiettivo dell'Unione europea è trasformare questi rifiuti in risorse riciclabili, evitando gli sprechi e riducendo al minimo l'estrazione di risorse naturali in via di esaurimento. La direttiva che regola questa tipologia di rifiuto a livello europeo è la 2006/21 / CE, dove più avanti vengono riportati quelli che sono gli obiettivi. In questo capitolo sono inoltre trascritte le normative europee che regolano i rifiuti in senso generico, come queste si siano evolute andando sempre più ad incentivare le attività di recupero e di riutilizzo, definendo i criteri che permettono di capire quando una sostanza è un rifiuto oppure no e quindi reintrodurla nel mercato.

Il concetto di rifiuto è definito per la prima volta nella direttiva 75/442/CEE (art.1) insieme alle linee guida atte a garantire un corretto smaltimento del rifiuto stesso. Con la direttiva 91/156/CEE l'Europa inizia a dare una certa importanza alle attività di recupero e riciclaggio rispetto a quelle di smaltimento del rifiuto, adottando una visione della gestione dei rifiuti più sostenibile.

Attualmente la definizione di rifiuto è inclusa nella direttiva 2008/98 / CE (direttiva quadro sui rifiuti) di cui all'art. 3 definisce i rifiuti come: "*... qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi ...*".

Il concetto di “*end of waste*”[“fine del rifiuto” o “cessazione della qualifica di rifiuto”](tratto dal sito <http://fibers-life.eu/doc/A.Girelli-IWIW.pdf>), viene riportato nella stessa direttiva, aggiungendo criteri secondo i quali un rifiuto cessa di essere tale e quindi può essere facilmente riutilizzato. Tali criteri sono riportati nell’art. 6 della *Direttiva 2008/98/CE*:

- *“la sostanza o l'oggetto è comunemente utilizzato per scopi specifici;*
- *esistenza di un mercato o di una domanda per la sostanza o l'oggetto;*
- *la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa esistente e le leggi applicate ai prodotti;*
- *l'uso non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana.”*

Il rifiuto quindi viene destinato ad attività di recupero, se dopo tale attività, la sostanza soddisfa i requisiti elencati precedentemente, allora cessa di essere definito rifiuto e può tornare ad essere gestito come un prodotto. L'obiettivo strategico del concetto di “fine dei rifiuti” è quello promuovere le attività di riciclaggio e di recupero in modo da diminuire gli impatti, spesso negativi, che questi hanno nei confronti dell’ambiente; ridurre il consumo di materie prime; diminuire quantità di rifiuti destinati allo smaltimento in discariche autorizzate ormai sempre più colme e di difficile gestione. Inoltre generare benefici economici, contribuire all'innovazione e alla crescita alla creazione di posti di lavoro.

La stessa direttiva definisce un secondo importante concetto ovvero quello di “sottoprodotto” definendo i requisiti che una sostanza deve avere per essere considerata tale: *“La Sostanza o l'oggetto originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto. L'articolo non può essere considerato rifiuto ai sensi dell'articolo 3, punto 1, bensì sottoprodotto soltanto se sono soddisfatte le seguenti condizioni: a) è certo che la sostanza o l'oggetto sarà utilizzata/o; b) la sostanza o l'oggetto può essere utilizzata/o direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale; c) la sostanza o l'oggetto è prodotta/o come parte integrante di un processo di produzione e d) l'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto*

soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana." (Stessa definizione presente nel D.Lgs. 152 del 2006, decreto legislativo italiano che recepisce la direttiva).

La definizione di trattamento diverso da "normale pratica industriale" è un concetto ambiguo. La normativa non chiarisce quale tipologia di trattamento rientra nella normale pratica industriale. Alcune di queste attività di trattamento possono essere svolte dallo stesso produttore del residuo, alcune dall'utilizzatore finale e alcune da intermediari, a condizione che soddisfino il criterio di essere "prodotti come parte integrante di un processo di produzione" (Falkenberg K., 2012).

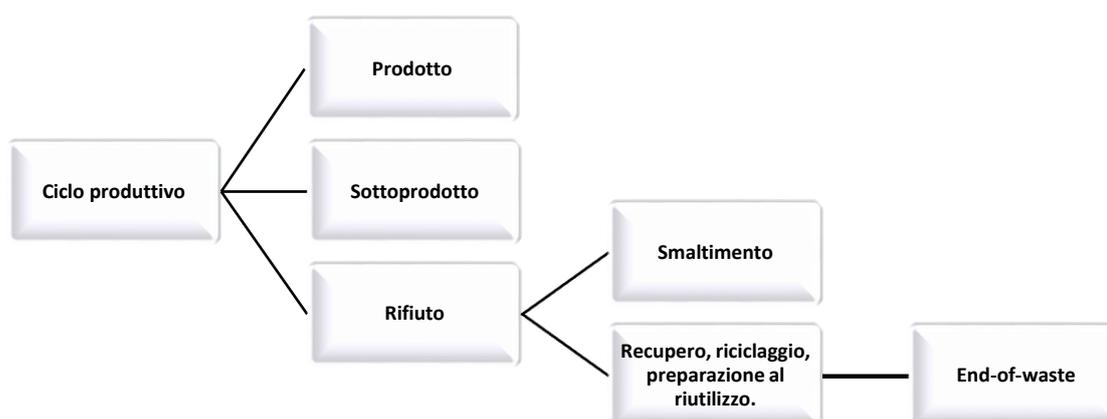


Figura 1: Flow chart che classifica i materiali ottenibili da un ciclo produttivo

La direttiva europea che presenta procedure, misure e linee guida per prevenire e / o ridurre i rischi ambientali derivanti dai rifiuti generati dall'industria mineraria, quindi che regola la gestione dei fanghi di segazione, è la Direttiva 2006/21/CE. Gli obiettivi principali della direttiva europea sono di minimizzare la produzione di rifiuti e incoraggiare il recupero di questi attraverso operazioni di riciclaggio, riutilizzo o recupero e di identificare le migliori pratiche per il recupero delle materie prime critiche (CRM) in modo da soddisfare gli aspetti legati all'economia circolare. Viene quindi introdotto il concetto di economia circolare. L'economia circolare è un sistema economico progettato per

rigenerarsi, dove i rifiuti e l'uso delle risorse sono ridotti al minimo e quando un prodotto raggiunge la fine della sua vita, viene riutilizzato per creare ulteriore valore. Questo aspetto può generare benefici economici, contributo all'innovazione, alla crescita e alla creazione di posti di lavoro.

La Comunità europea, con il decreto 2000/532 / CE della Commissione, fornisce una lista di rifiuti con i codici CER pertinenti. Il codice CER comprende 6 numeri che definiscono il tipo di rifiuto. I primi due numeri identificano il capitolo della fonte che genera lo spreco, i due numeri successivi indicano il processo di produzione da cui derivano. Questa nomenclatura è fondamentale per fare in modo che ogni rifiuto sia riconosciuto con una terminologia comune in tutta la Comunità europea e quindi siano facilitate le operazioni di gestione. Per il caso di studio di questa tesi il codice di riferimento CER è mostrato nella tabella 2.

CODICE CER	DESCRIZIONE
01	Rifiuti derivanti dall'esplorazione, estrazione mineraria, estrazione e trattamento fisico e chimico dei minerali.
01 04	Rifiuti da processi fisici e chimici di minerali non metalliferi
01 04 13	Rifiuti da taglio e segatura di pietre diversi da quelli menzionati in 01 04 07

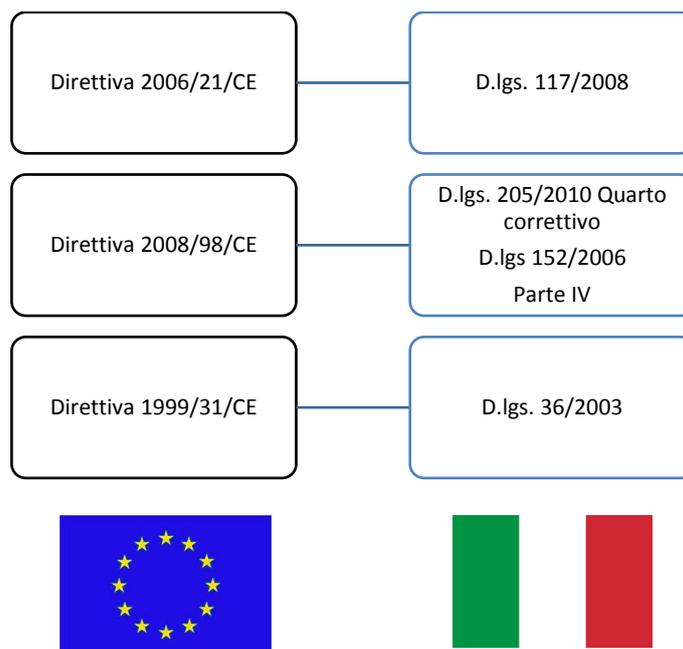
Tabella 1: codice CER dei fanghi di segazione

La direttiva 1999/31 / CE, relativa alle discariche di rifiuti, presenta requisiti operativi e tecnici per prevenire i possibili effetti negativi sull'ambiente e le informazioni che devono contenere le domande di autorizzazione per lo smaltimento di un rifiuto in discarica. La successiva direttiva 2003/33 / CE stabilisce i criteri e le procedure per l'accettazione dei rifiuti nelle discariche, vale a dire i requisiti tecnici che devono possedere i rifiuti pericolosi nella discarica a loro dedicata, i criteri e le valutazioni di sicurezza a lungo termine per il deposito degli stessi.

2.2. Quadro normativo italiano

Le direttive europee precedentemente descritte sono state recepite dallo stato italiano attraverso i seguenti decreti legislativi:

Figura 2: Direttive europee e recepimenti italiani



L'implementazione italiana della Direttiva Europea 2006/21 / CE è il Decreto Legislativo n° 117 del 30 maggio 2008 relativo alla gestione dei rifiuti delle industrie estrattive. Il presente decreto fornisce le definizioni di rifiuti, rifiuti pericolosi, trattamento e le linee guida per la gestione degli stessi.

“Il decreto legislativo n. 152/2006 è relativo alla gestione dei rifiuti e alle normative ambientali, delineando la prevenzione (articolo 180), riducendo la produzione di rifiuti pericolosi e incoraggiando la riduzione del consumo di energia attraverso le operazioni di riciclaggio (articolo 181), definisce inoltre le linee guida per lo smaltimento (articolo 182), la messa in discarica e l'incenerimento. Inoltre stabilisce criteri qualitativi e quantitativi (articolo 184-bis) al fine di considerare specifiche categorie di sostanze o oggetti come

sottoprodotti.”(tratto da S. Forbino, (2016). Tesi di Laurea magistrale “*Metodi di separazione ecocompatibili nell’ottica dell’end of west*”).)

Decreto legislativo n. 205/2010 (recepimento della direttiva 2008/98 / CE) modifica la parte IV del D.Lgs. 152/2006, fornendo una nuova definizione di sottoprodotto (art.12). Non vi è certezza di poter considerare i residui di estrazione e lavorazione litoide come “sottoprodotti”, poiché la relativa normativa riporta i requisiti che devono soddisfare gli oggetti per essere considerati tali, ma l’incertezza è legata ai tipi di trattamento da poter essere applicati ai sottoprodotti per poter essere reintrodotti nel mercato. “La direttiva comunitaria, recepita nel testo italiano, richiede che *la sostanza o l’oggetto possa essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale*. Tale frase, generica e senza alcun richiamo alla qualità dell’operazione svolta, consente di eseguire sul sottoprodotto tutte le operazioni di trattamento che sono tipiche della normale pratica industriale. Ciò che viene preso in considerazione non è il grado ma la tipicità dell’operazione che viene svolta nel contesto produttivo, cioè operazioni tipiche di un determinato ciclo produttivo. È utile precisare che la nozione di normale pratica industriale non dovrebbe essere intesa in termini assoluti, utilizzando pratiche note e in uso in un comparto produttivo; ma essa fa riferimento a quelle in uso in via ordinaria presso lo stabilimento nel quale il sottoprodotto è destinato ad essere riutilizzato”.(AnnileF., 2011. Tratto dal sito http://www.reteambiente.it/ra/rol/195/stralci/Rifiuti_sottoprodotti_Mps.pdf).

Il decreto n. 205/2010 definisce anche quando avviene “*la cessazione della qualifica di rifiuto, disciplinata nell’articolo 184-ter, ovvero il momento in cui un rifiuto, alla fine di una operazione di recupero, cessa di essere tale e diviene dal punto di vista merceologico e giuridico un prodotto. Si tratta delle materie prime secondarie (in seguito abbreviate MPS), cioè quelle sostanze od oggetti che sono il risultato finale di un’operazione di recupero di rifiuti, momento a partire dal quale non si applica più la disciplina dei rifiuti ma si applica quella relativa alle merci e i prodotti*” (Annile F., 2011. http://www.reteambiente.it/ra/rol/195/stralci/Rifiuti_sottoprodotti_Mps.pdf).

Con operazioni di “recupero” la normativa ha voluto dare un’ampia interpretazione che comprende sia il riciclaggio che “la preparazione per il riutilizzo” ovvero operazioni di controllo, pulizia e riparazione attraverso cui prodotti o componenti di prodotti diventati rifiuti sono preparati in modo da poter essere reimpiegati senza altro pretrattamento.

Le attività di recupero e di riciclo sono invece regolate da D.M. del 5 Febbraio 1998 aggiornato dal D.M. 5 Aprile 2006 n. 186 *“Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero, ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 Febbraio 1997, n. 22”*. Secondo l’articolo 3 del presente decreto ministeriale *“i procedimenti e i metodi di riciclaggio e di recupero di materia individuati nell'allegato 1 devono garantire l'ottenimento di prodotti o di materie prime o di materie prime secondarie con caratteristiche merceologiche conformi alla normativa tecnica di settore o, comunque, nelle forme usualmente commercializzate. In particolare, i prodotti le materie prime e le materie prime secondarie ottenuti dal riciclaggio e dal recupero dei rifiuti individuati dal presente decreto non devono presentare caratteristiche di pericolo superiori a quelle dei prodotti e delle materie ottenuti dalla lavorazione di materie prime vergini”*.

La normativa attuale prevede ora che il fango di segazione venga rimpiegato come materiale di riempimento di siti compromessi, mentre per altri recuperi non esistono ancora linee guida ben definite ed ufficializzate.

l’Allegato 5 titolo V parte IV del D.Lgs. 152/06 riporta la tabella con le concentrazioni limite dei principali contaminanti che i fanghi devono rispettare per poter essere rimpiegati nei siti compromessi. I limiti di concentrazione si distinguono in base al riutilizzo del composto in aree verdi pubbliche, industriali o messa in discarica.

Normativa riferita alla gestione dei fanghi di segazione

Parametro	Colonna A siti uso verde pubblico privato e residenziale [mg/kg ss]	Colonna B siti uso commerciale e industriale [mg/kg ss]
Arsenico	20	50
Cadmio	2	15
Cobalto	20	250
Nichel	120	500
Piombo	100	1000
Rame	120	600
Zinco	150	1500
Mercurio	1	5
Idrocarburi C>12	50	750
Cromo totale	150	800
Cromo VI	2	15
Amianto	1000	1000

Tabella 2: Allegato 5 titolo V parte IV del D.Lgs. 152/06

Nel caso in cui i fanghi presentino concentrazione di metalli pesanti che vanno a superare i limiti di legge e valori elevati di TPH, allora è necessario sottoporli a trattamenti di recupero e di bonifica prima di utilizzarli come riempimento.

Capitolo 3. ORIGINE DEI FANGHI DI SEGAGIONE

I fanghi di segagione sono materiali di scarto che derivano dalla lavorazione lapidea, in particolare sono ottenuti dalle operazioni di taglio del materiale estratto in cava per la produzione di manufatti commerciabili. Essi sono classificati come rifiuti inerti con codice CER 10413 e quindi destinati ad operazioni di smaltimento o recupero. Sono composti da acqua, frammenti metallici dovuti all'usura dell'utensile di taglio, dalla graniglia abrasiva in caso di taglio con telaio e da frazioni di litoidi provenienti dal blocco di pietra madre. Essi rappresentano un problema ambientale dal punto di vista dello smaltimento e del recupero a causa di alcune importanti caratteristiche come la granulometria fine (generalmente <25 micron), che comporta problemi di stabilità geo-strutturali dei versanti delle discariche, il contenuto di metalli pesanti, in particolare di Cr, Ni, Mn associati al Fe nella graniglia metallica dei fanghi derivanti da taglio con telaio e Co e Cu derivanti dagli utensili diamantati, ed a volte vi è la presenza di TPH.

In particolare la composizione dei fanghi di segagione dipende da:

- Tipo di materiale lavorato;
- Metodologia di taglio.

In base alla modalità di taglio si distinguono in:

- fanghi di segagione da telaio multilama composti da graniglia metallica abrasiva calce e materiale lapideo. Nella graniglia metallica sono presenti metalli pesanti quali Cr, Ni, Mn associati al Fe.
- fanghi di segagione da taglio con utensili diamantati costituiti da materiale lapideo, tracce minime dei metalli che formano il legante delle lame (a base di cobalto e carburi di tungsteno) e diamante (qualche ppm), con granulometria più fine rispetto ai primi;
- fanghi provenienti dalla lavorazione di finitura costituiti da materiale lapideo, rifiuti delle mole e additivi per la lucidatura.

In base al tipo di materiale lavorato si distinguono:

- fanghi provenienti da segazione di rocce quarzoso-silicatiche;
- fanghi provenienti da segazione di rocce carbonatiche.

Studi hanno dimostrato che i fanghi prodotti da filo diamantato posseggono una granulometria più fine rispetto a quelli ottenuti dal telaio, poiché in questi ultimi vi è la possibilità di trovare traccia della graniglia abrasiva. (tratto da Forbino S. (2016), Tesi di laurea magistrale *“Metodi separazione ecocompatibili nell’ottica del end of west”*).

3.1. Ciclo produttivo delle pietre ornamentali

Prima di esaminare le tecniche di taglio della pietra lapidea che avviene in stabilimento, è bene spiegare come avviene il ciclo produttivo delle pietre ornamentali. Questo inizia con l’attività di estrazione in cava, generalmente si procede con l’isolamento di una grossa porzione rocciosa chiamata bancata, normalmente con forma parallelepipedica e volume dell’ordine delle centinaia-migliaia di metri cubi, dimensioni multiple di quelle richieste per i blocchi commerciali. L’operazione di estrazione delle bancate prende il nome di taglio primario ed esistono differenti tecniche:

- tagliatrice a filo diamantato
- tagliatrice a catena
- tagliatrice a cinghia diamantata
- perforazione ± dispositivi separatori
- flame-jet (“lancia termica” o “fiamma”)
- water-jet
- altre tecnologie, subordinate.

Quando la bancata ottenuta possiede dei volumi ridotti può essere suddivisa direttamente in blocchi senza subire sezionamenti interni, al contrario essa viene invece sezionata in elementi più piccoli chiamate “fette” da ribaltare sul piazzale di cava.

Una volta ottenuta la bancata questa viene rovesciata sul piazzale della cava attraverso delle tecniche di ribaltamento. Esistono differenti operazioni di ribaltamento ma le più utilizzate sono le seguenti:

- cuscini divaricatori
- impianti sbancatori
- pale meccaniche, escavatori.

Bisogna assicurarsi che il piazzale sopra il quale adagerà la bancata sia ricoperto di detriti rocciosi, in modo da attenuare l'urto di caduta e limitare le rotture ai soli punti difettosi latenti nella roccia.

Una volta ottenute le bancate queste vengono ridotte in volumi minore ottenendo dei blocchi commerciali mediante delle operazioni di taglio dette taglio secondario. I blocchi commerciali devono soddisfare determinati requisiti volumetrici, dimensionale ed estetici in base alle modalità di taglio che verranno applicate in stabilimento. La dimensione del blocco è generalmente dell'ordine di 2,5 m³ fino a 9 m³ con dimensioni che vanno da 3x 1,75 x 1,75 m a 1,80 x 1,20 x 1,20 m. Non sempre però è possibile ottenere blocchi di forma regolare a causa delle caratteristiche della roccia, dei suoi difetti e della tecnica di taglio secondario scelta, quindi ogniqualvolta possibile, è bene procedere ad una riquadratura così da ottimizzare le successive fasi di lavorazione in stabilimento e di essere sicuri di trasportare all'impianto solamente quella che sarà la parte effettivamente utilizzabile dei blocchi risparmiando sui costi di trasporto. Le macchine impiegate per i tagli secondari possono essere sia le stesse dei tagli primari, sia modelli con minore potenza. Generalmente l'operazione di riquadratura avviene con macchine tagliatrici a filo diamantato in installazione fissa collocate al margine della cava (soprattutto di granito, con blocchi più irregolari).

Una volta ottenuti i blocchi questi verranno trasportati in stabilimento e sottoposti ad altre operazioni che permetteranno di trasformarli in un semilavorato o prodotto commerciabile. Le lavorazioni che si realizzano nello stabilimento si dividono in due categorie: trattamenti volumetrici e trattamenti superficiali. Nella prima categoria

prendono parte tutti quei processi che prevedono la riduzione dei blocchi di roccia, precedentemente riquadrati in cava, in lastre da dove derivano i fanghi analizzati in questo elaborato di tesi; queste operazioni prendono il nome di lavorazioni di segazione e sono:

- telaio a torbida abrasiva;
- impianto a filo o multifilo diamantato;
- segatrici a disco diamantato.

La seconda categoria comprende le lavorazioni di superficie e di finitura per conferire alla pietra estratta un aspetto estetico commerciabile. Esse sono:

- bocciardatura;
- fiammatura;
- levigatura;
- lucidatura.

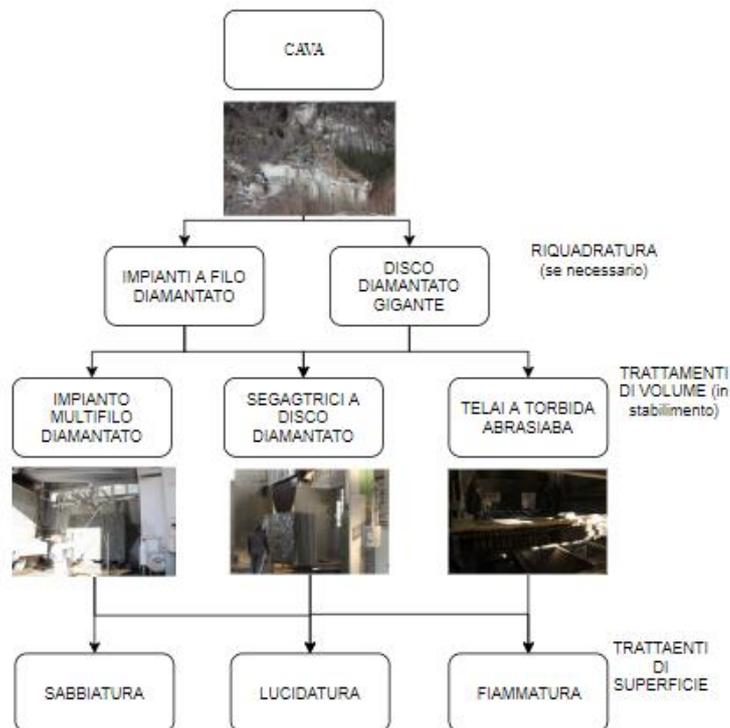


Figura 3: Ciclo produttivo delle pietre lapidee

3.2. Metodologie di taglio

Nel seguente elaborato di tesi ci si sofferma ad analizzare i trattamenti volumetrici perché sono la fonte di produzione dei fanghi di segazione oggetto di studio. La scelta tra le tre tecnologie elencate in precedenza dipende sostanzialmente dal tipo di roccia da trattare e anche i parametri meccanici variano a seconda di quest'ultimo.

3.2.1. Trattamenti di volume

I principali macchinari utilizzati per tali trattamenti sono:

Telai a torbida abrasiva

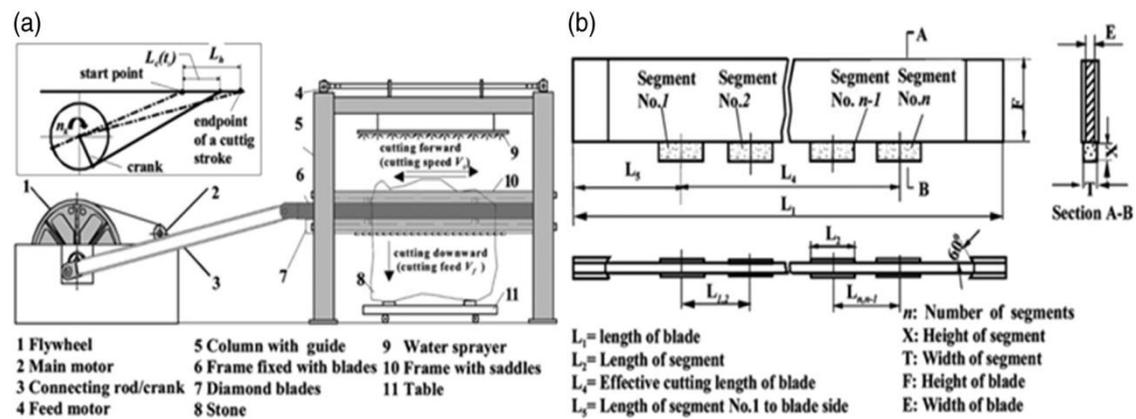


Figura 4: a) schema tecnico di un impianto a telajo. b) schema di lame usate nel telaio (fonte: H. Zhang et al, 2016).

Il telaio a torbida abrasiva è la tecnologia più comune e tradizionale, utilizzata generalmente per la segazione di gneiss e graniti, rocce silicatiche per cui abrasive. Esso è costituito da una serie di lame in acciaio che variano da 100 a 140 cm; un quadro porta lame; un telaio o armatura metallica. Le lame montate, distanziate e tensionate sul quadro porta lame, vengono spostate avanti e indietro alternativamente lungo la superficie di taglio con velocità di avanzamento programmato. Il movimento delle lame è indotto da quello rotatorio del volano collegato al telaio portalamme e trasmette un'azione d'urto e trascinamento sulla roccia. Il taglio è inoltre aiutato da un getto a pioggia di una

torbida abrasiva, formata da graniglia metallica e additivi, che viene immessa tra il blocco di roccia e le scanalature costituenti le lame.

A seguito di numerosi studi volti a migliorare le efficienze di questi macchinari citiamo H. Zhang et al. Che nel 2016 hanno studiato, attraverso una serie di test di taglio e simulazioni, un nuovo prototipo di telaio il cui movimento delle lame non avviene più in modo rettilineo ma utilizza un meccanismo di guida a cerniera eccentrico, in questo modo il contatto tra la lama e il blocco è minore e consente quindi una minore usura delle lame, una maggiore planarità delle lastre e conseguentemente una migliore efficienza di taglio.

La torbida abrasiva, che ha lo scopo di aiutare l'azione di taglio svolta dalle lame, gioca un ruolo abbastanza influente nella composizione finale del fango di scarto, infatti è costituita normalmente da:

- graniglia metallica che costituisce il 13% in peso della torbida;
- acqua che ha la funzione di raffreddare gli utensili di taglio e diminuire le polveri prodotte;
- calce che ha il compito di evitare l'ossidazione dei materiali ferrosi e di dare la viscosità necessaria per consentire il ricircolo continuo della graniglia avente ancora un potere tagliente.

La scelta della grana metallica è importante e viene effettuata sulla base della durezza della pietra di taglio e dalla velocità di avanzamento della produzione. Esistono tre diversi tipi di graniglia metallica:

- graniglia d'acciaio: sferica e angolare estremamente dura e resistente;
- graniglia di ghisa: sferica e angolare, di notevole durezza e abrasività;
- miscele di acciaio e ghisa: unione delle caratteristiche precedenti.

Questa sospensione abrasiva viene spruzzata attraverso ugelli, posizionati sopra le lame, in modo continuo. La graniglia esausta viene normalmente passata attraverso un idrociclone, che seleziona la dimensione della grana ancora riutilizzabile, per reinserirla nel processo di taglio. La distribuzione granulometrica della grana varia da 0,2 mm a 3



Figura 5: da sinistra- graniglia abrasiva e telaio a torbida abrasiva

mm, ma il più utilizzato per il taglio di rocce dure è di 0,4 mm, 0,6 mm e 0,8 mm. È possibile combinare diverse forme e dimensioni adatte alle esigenze di taglio. La durata della grana varia da 400 a 600 cicli, per questo motivo l'impianto fornisce un sistema di recupero mediante un idrociclone. Anche il dosaggio durante il processo di taglio è importante, poiché un sovradosaggio può causare una maggiore usura della lama e un accumulo irregolare della graniglia comporta, durante il taglio, una deviazione delle lame; mentre un sottodosaggio può causare la rottura dei segmenti della lama e una riduzione della produzione ("velocità di avanzamento"). L'alimentazione della torbida per il ciclo di taglio deve essere misurata in peso e non in volume per ottenere una miscela a densità costante.

La durata delle lame e la qualità del taglio dipendono dalla corretta quantità e distribuzione dell'acqua di raffreddamento. Deve essere utilizzata acqua correttamente filtrata, in particolare quando si lavora con materiali che producono residui abrasivi o di fango.

Composizione metallica degli utensili a telaio

Ai fini del seguente studio è importante comprendere la composizione metallica degli strumenti che vanno a formare i macchinari di taglio poiché il fango prodotto possiede, oltre alla frazione rocciosa proveniente dalla roccia madre, anche una frazione metallica ottenuta dall'usura di questi utensili e nel caso del telaio anche una frazione di graniglia

metallica. In particolare nella graniglia metallica è possibile trovare alcuni elementi che variano di tipologia e quantità a seconda che sia d'acciaio o di ghisa.

La Tabella mostra le percentuali in peso dei metalli che si possono trovare nella graniglia prodotta da differenti stabilimenti

Tipo di graniglia metallica	Pometon spa	Abrasivi metallici spa – graniglia in acciaio con trattamento termico Mn	Abrasivi metallici spa – graniglia grigia con bassa P e S	Wheelabrator – Alievard – graniglia bianca	Wheelabrator – Alievard – graniglia in acciaio
Fe C	0.95%	0.9÷1.1%	3.2÷3.7%	2.8÷3.2%	≥0.85%
Si	0.85%	0.6÷0.8%	1÷1.2%		
Mn	0.75%	1.3÷1.7%	0.4÷0.6%		
S		0.015%	0.1% max	0.15÷0.25%	≤0.05%
P		0.015%	0.2% max	0.3÷0.6%	≤0.05%
Rockwell hardness	65±2.5	46÷50	62÷65	58÷60	≥64

Tabella 3: tratto da Pometon spa, Abrasivi metallici spa, Wheelabrator/Alievard.

Le lame per seghe a telaio sono realizzate in acciaio e offrono il massimo livello di prestazioni con una lunga durata. La composizione chimica delle lame varia anche in base al produttore e alle prestazioni da raggiungere.

La tabella mostra esempi di composizione chimica in percentuale in peso

Tipi di acciaio	75Ni8	DIN C75	C-75/SAE-1075/C-75S/CK-75
Fe C	0.75%	0.75%	0.70-0.80%
Si	0.25%	0.25%	0.15-0.35%
Mn	0.40%	0.70%	0.50-0.80%
P	≤0.025%	≤0.025%	0.35 max
S	≤0.020%	≤0.020%	0.35 max
Ni	2%		

Tabella 4: tratto da http://purvainternational.com/en_US/gangsaw-blades/ and <http://stelcolimited.com/gang-saw-steel/>.

La presenza del minerale Nichel porta diversi benefici alla lama stessa come: una minima produzione di ruggine, una maggiore durata, tensione migliorata e una maggiore resistenza alla trazione. Inoltre nel caso in cui ci si trova a tagliare dei blocchi di roccia troppo duri, vengono applicati dei segmenti diamantati alle lame del telaio. Questi segmenti sono costituiti da polveri di Cu, Sn, Fe, Ag, Co, Ni, WC, Mo, grafite, ecc. che vanno a influenzare la composizione del fango.

Impianto a filo o multifilo diamantato



Figura 6: impianto a filo diamantato

L'impianto è caratterizzato da una struttura metallica composta da due colonne verticali, una trave orizzontale, due volani che hanno la funzione di ridurre il carico di fatica sull'utensile di taglio, filo/i elementi taglienti di tali impianto. Il blocco viene collocato al di sotto della struttura metallica e il principio di funzionamento del macchinario è quello di incidere la roccia attraverso un movimento di trascinamento e disgregazione per opera del filo diamantato o dei fili. L'utensile di taglio viene contemporaneamente fatto calare e scorrere sul blocco e allo stesso tempo viene fatta fluire dell'acqua in modo da diminuire l'usura e raffreddare il macchinario. Il filo diamantato è costituito da microutensili striscianti montati su un portautensile flessibile e hanno lo scopo di applicare sulla superficie di contatto delle pressioni elevate che vanno a asportare piccoli spessori di roccia. Il filo ha normalmente un diametro complessivo di 10-11 mm ed è composto da:

- cavo di acciaio zincato;
- una guaina in gomma;
- perline diamantate.

Lo scopo del cavo di acciaio zincato è quello di assorbire le sollecitazioni statiche e dinamiche e di sostenere le perline diamantate che sono ancorate ad esso attraverso una

guaina di gomma. L'elemento tagliante vero e proprio sono le perline che sono costituite da un anello metallico lungo 8-10 mm e di diametro interno 5 mm ed esterno di 8 mm. Esistono due tipologie:

- perline elettrodeposte costituite da un supporto circolare in acciaio rivestito da uno strato di diamanti, depositati sulla superficie mediante elettrolisi e fatti aderire tramite un legante al nichel. Tali tipi di perline sono adatte al taglio di pietre marmifere mentre sono sconsigliate per i graniti per ragioni economiche.



Figura 7: Perla elettrodeposta. Tratta da diamantboart, utensili diamantati per l'industria della pietra

- perline a sinterizzate sono adatte alla lavorazione di qualsiasi tipo di pietra anche il granito. La perlina è costituita da un anello a concentrazione diamantata, dove i diamanti sono immersi in un amalgama composta da cobalto e bronzo; alcuni studi hanno dimostrato che la vita utile di tali perline era maggiore di quelle prodotte con l'elettrodeposizione sebbene la produttività (in m²/h) era inferiore.



Figura 8: Perla a concentrazione. Tratta da diamantboart, utensili diamantati per l'industria della pietra

Nelle perline, attraverso analisi al microscopio a scansione elettrico (SEM), è stata trovata traccia di minerali come il Nichel (Ni), carbonio (C), ferro (Fe) e cobalto (Co).

Precedentemente è stato descritto un impianto monofilo, per quelli a multifilo il funzionamento e la struttura dell'impianto è la stessa ciò che varia ovviamente è il numero dei fili montati che devono essere almeno 20.

La ricerca per questi tipi di impianto sta continuando ad evolversi in particolare si sta cercando di ridurre il più possibile il diametro del filo da 11 ai 6,2 mm in modo da diminuire le quantità di scarto prodotta e sostituire l'attuale cavo in acciaio con altri materiali che possono garantire una maggior vita utile, è estremamente frequente che la durata del cavo di supporto non sia adeguatamente tarata rispetto alla durata della componente abrasiva dell'utensile.

Segatrici a disco diamantato

La tecnologia prevede una trave di supporto sulla quale sono posizionate due guide parallele che permettono il movimento di traslazione dell'utensile di taglio che prende il nome di disco diamantato. Il disco diamantato è l'elemento che caratterizza questo impianto ed è costituito da:

- anima o nucleo di acciaio
- denti diamantati
- legante o matrice.

Il diametro del disco può avere dimensioni diverse a seconda dell'altezza del blocco da tagliare. I dischi giganti hanno diametri che vanno da 2500 mm a 3500 mm. Con un diametro del disco di 2500 mm è possibile tagliare blocchi con un'altezza massima di 1100 mm, mentre i blocchi con un diametro massimo di 1800 mm possono essere tagliati con un disco del diametro di 3500 mm.



Figura 9: segatrice a disco diamantato

I denti diamantati hanno il compito di asportare il materiale lapideo, sono saldati all'anima d'acciaio e possiedono una larghezza leggermente superiore rispetto al corpo del disco in modo da proteggere l'anima da un possibile fregamento contro il materiale. I denti sono formati da una grana di diamante attaccata al supporto del disco per mezzo di un legante, generalmente formato da una miscela di polveri metalliche, il quale deve anche permettere la caduta della grana in caso di rottura.

I denti possono avere una profondità che varia dai 5 mm ai 17 mm. I diamanti utilizzati negli strumenti sono sintetici, a causa delle loro caratteristiche più forti e più uniformi.

Per ottenere lastre lapidee che siano il più possibile planari bisogna fare attenzione, oltre al posizionamento del disco, al suo pensionamento in modo da evitare effetti vibranti e quindi ottenere superfici non perfettamente lisce.

La scelta del disco, i parametri della macchina come velocità di avanzamento, potenza ecc. sono tutti fattori che dipendono dal materiale lapideo da trattare. Nell'impianto si utilizza acqua di raffreddamento per evitare il surriscaldamento dello strumento. L'alimentazione dell'acqua deve essere eseguita correttamente, ricordando che l'utensile deve essere refrigerato in tutta la sua profondità di taglio.

Composizione metallica degli utensili della sega a disco diamantato

Il disco è costituito dal nucleo in acciaio su cui appoggiano i denti di diamante. Il segmento diamantato può essere fissato al centro dell'acciaio usando due metodi di base, brasatura e saldatura a laser. La Tabella 6 mostra un esempio di composizione del nucleo d'acciaio del disco. Il cromo è utilizzato in lega per ottenere acciai speciali ad alta resistenza e inossidabili.

	Utensili in acciaio 75Cr 1
Fe C	0.70÷0.80 %
Si	0.25÷0.50 %
Mn	0.50÷0.70 %
Cr	0.30÷0.40 %
hardness Rockwell	46

Tabella 5: composizione chimica del nucleo di un disco

I denti del disco sono composti da diamanti e dalla matrice metallica generalmente per quest'ultima si utilizzano le leghe a base di Cobalto, W-Co e Cobalto.

3.3. Gestione dei fanghi di segazione in stabilimento

I fanghi di segazione provengono dal taglio delle pietre lapidee in stabilimento attraverso le modalità descritte precedentemente. Generalmente i fini di segazione vengono conferiti in discarica per inerti autorizzate e si stima un costo di smaltimento (gestione impianti, trasporto dal luogo di produzione alla discarica, conferimento in discarica) mediamente compreso tra lo 0,02-0,05 euro/kg. Prima di essere conferiti in discarica, questi scarti devono essere resi palabili ovvero devono subire dei trattamenti di disidratazione in modo da raggiungere un'umidità del 25%. Secondo la letteratura detti fanghi "vengono scaricati con una concentrazione di solido in massa dell'ordine del 40%" (Mancini et al, 2005. Tratto dal sito

<http://www.naturalstoneinfo.com/download/interregIII.03.pdf>).

Gli stabilimenti utilizzano due tipologie di disidratazione dei fanghi: vasche di decantazione o silos con flocculanti più filtropressa.

Le vasche di decantazione vengono impiegate quando il fango decanta in modo naturale. In questo caso si ottengono acque chiare e un addensato con alta concentrazione di

solido pari a circa il 70%. Il fango addensato verrà successivamente posto in vasche di stoccaggio dove tenderà a compattarsi ed asciugarsi nel tempo per poi essere smaltito nelle discariche.



Figura 10: vasca di decantazione

Quando invece il fango non decanta in modo naturale oppure quando gli stabilimenti hanno necessità di adottare strutture meno ingombranti delle vasche, si adotta un impianto costituito da un silos per la decantazione della torbida più aggiunta di flocculante (elettroliti polimeri organici), e filtropressameccanica. In questo caso si risparmia sullo spazio occupato dagli impianti ma si ottiene un fango molto fluido a causa della struttura dei flocculi che provoca la ritenzione di molta acqua, infatti si ottiene un residuo con una concentrazione di solido pari al 50%. Per questa ragione è quindi necessario l'intervento di una filtropressa in modo da diminuire il contenuto in acqua e rendere il residuo solido più compatto. Normalmente vengono disciolti a pioggia 2-3 grammi di prodotto flocculante per metro cubo di acqua torbida da depurare all'interno del silos di decantazione.

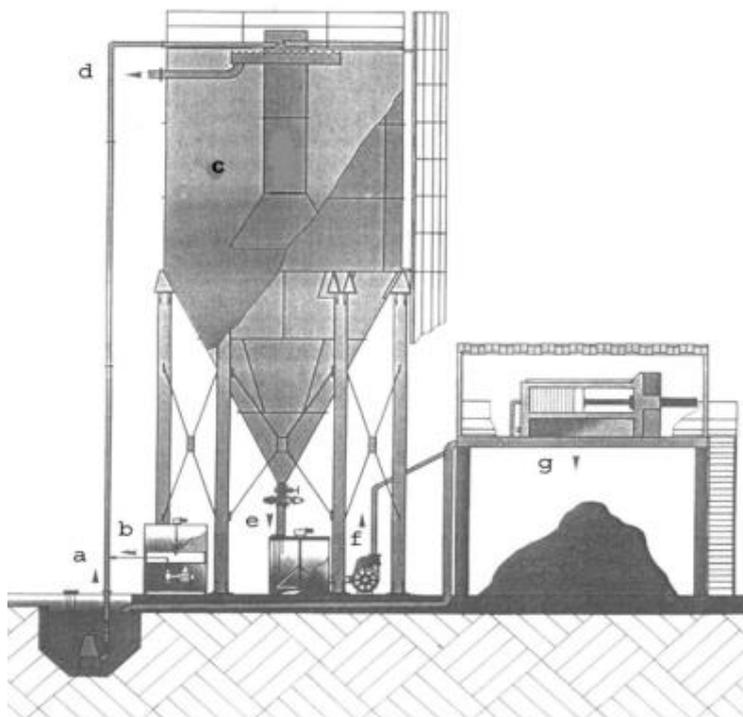


Figura 11: impianto di depurazione acqua e compattazione fanghi (Mancini et al, 2005. Tratto dal sito <http://www.naturalstoneinfo.com/download/interregIII.03.pdf>)

La preparazione del flocculante avviene in impianti automatici che lavorano mediante un sistema tricamerale: nella prima camera si ha la preparazione della soluzione polvere flocculante e relativa acqua dove viene agitata ed inviata nella camera di maturazione. La terza camera serve per lo stoccaggio della soluzione e il conseguente dosaggio che avviene per mezzo di pompe dosatrici. La funzione del silos di decantazione è quella di ottenere un fango addensato che viene scaricato per caduta libera per mezzo di una valvola pneumatica dal fondo dello stesso e raccolto in vasche. Queste vasche sono attrezzate da un agitatore per mantenere il fango in condizioni costanti e da una pompa che trasferisce il fango liquido all'interno di una filtropressa. La maggior parte degli stabilimenti utilizzano un modello di filtropressa a piastre caratterizzate da una struttura metallica e da piastre che permettono la pressatura del fango stesso. L'acqua che fuoriesce durante l'operazione di filtratura, scorre attraverso le piastre andando a finire in canaline collegate alle vasche di raccolta delle acque torbide, mentre il fango rimane intrappolato tra le placche fino a quando termina la perdita di liquidi. In quel momento le piastre si aprono permettendo alle torte di fango di cadere in bacini di raccolta.

L'acqua chiara ottenuta da questi due sistemi di disidratazione viene rinviata al ciclo produttivo di taglio delle lastre. (Mancini et al, 2005. Tratto dal sito <http://www.naturalstoneinfo.com/download/interregIII.03.pdf>.)



Figura 12:Filtropressa



Figura 13: interno di una filtropressa

3.4. Quadro economico sulla gestione dei fanghi di segazione

La maggior parte degli stabilimenti inviano i propri fanghi presso discariche autorizzate volte allo smaltimento, soprattutto per ragioni economiche. Il recupero di questo prodotto non è ancora una pratica usuale a causa di una mancata normativa che vada ad incentivare l'acquisto da parte di aziende di *materie prime secondarie*.

Di seguito sono riportati i principali costi a carico dello stabilimento per la messa in discarica del rifiuto inerte.

Nel caso in cui le concentrazioni di metalli pesanti nel fango non superano le soglie normative, allora questi verranno smaltiti in discariche per inerti non speciali e i prezzi sono circa 20-30 €/t:

- 13 €/t per la messa in discarica;
- 3 € fissi di eco-tassa;
- 12 €/t per il trasporto;

se invece, le concentrazioni limite sono superate, allora il fango diventa un rifiuto speciale per cui i prezzi salgono fino a 100 €/t:

- 70-80 €/t per la messa in discarica;
- 8,50 €/t di eco-tassa;
- 20 €/t di trasporto.

In particolare il costo di smaltimento più trasporto del fango incide per il 6-10% sulla vendita delle lastre commerciabili, nel caso di fanghi inerti. Se invece il fango è considerato speciale allora il costo di incidenza sale al 40-50%.

Capitolo 4. CASO STUDIO

4.1. Inquadramento geografico e geologico strutturale

I fanghi utilizzati per la composizione dei campioni di calcestruzzo a resistenza controllata CLSM, su cui si basa l'elaborato di tesi, provengono da due stabilimenti situati nella provincia del Verbano-Cusio-Ossola, denominati stabilimento M e G. Questi stabilimenti si differenziano principalmente per la modalità di taglio dei blocchi di pietra, mentre le tipologie di rocce trattate sono quelle che derivano dall'assetto geografico del VCO. Come verrà dimostrato nel capitolo successivo, le caratteristiche fisiche e chimiche dei due campioni di fango risultano essere diverse.

Prima di riportare le specifiche tecniche dei due stabilimenti e i loro residui di segagione, è bene avere un'idea dell'inquadramento geografico in cui si trovano le due aziende, in modo da capire la natura geologica delle rocce produttrici del fango oggetto di studio.

Il territorio della provincia del Verbano Cusio Ossola (nel seguito abbreviata VCO) è ubicato all'estremità nord-orientale del Piemonte. Esso confina a N con la Svizzera, a NE con il Canton Ticino e a NW con il Canton Vallese, a E con la provincia di Varese in Lombardia, a S con la provincia di Vercelli e Novara in Piemonte.

“Da un punto di vista geologico la provincia del VCO si trova nelle Alpi centro-occidentali ed è caratterizzata da una complessa storia geologica. Le Alpi sono definite da una catena a doppia vergenza: una europea, le Alpi propriamente dette, e una africana, le Alpi Meridionali, separate tra loro da un importante lineamento tettonico denominato Lineamento Periadriatico o Linea Insubrica.” (tratto da http://www.pietredelvco.it/html/assetto_geologico.php).

“Il territorio del VCO, benché geograficamente limitato, è particolarmente ricco di materiali lapidei ornamentali, quali gneiss, marmi e graniti, la cui estrazione riveste un ruolo importante nell'economia piemontese, rappresentando oltre il 60% in volume della produzione regionale” (Filipello A., 2004).

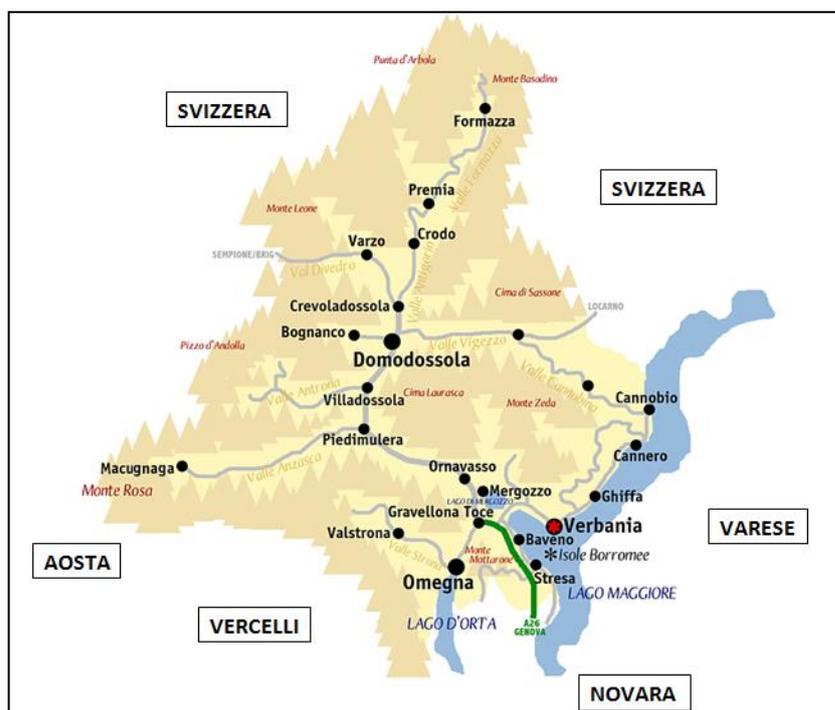


Figura 14: Confini amministrativi del Verbano Cusio Ossola. Tratta da [CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=378464](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=378464), (2009), visualizzato il 18/06/2017

I tipi litologici presenti nel territorio possono essere tutti ricondotti agli gneiss (serizzi, beole e graniti) e ai marmi. Questi però variano molto dal punto di vista della tessitura e dei colori, generando numerose varietà commerciali. Le numerose varietà sono proprio dovute alla complessità dell'assetto geologico-strutturale dell'area che dipendono dalla deformazione alpina.

4.2. Aziende oggetto di campionamento

Stabilimento M

lo stabilimento M ha iniziato la sua esperienza nel settore lapideo nel 1953. L'attività su cui si basa l'azienda è quella della trasformazione, ovvero sottoporre i blocchi lapidei a trattamenti di volume e di superficie per produrre lastre commerciabili di beola e serizzo. Lo stabilimento è ubicato a Crodo (VB) e le pietre lapidee sottoposte alla lavorazione sono estratte da cave situate nell'intorno dello stesso.

Nella tabella 7, sono riassunte le tipologie di pietre ornamentali naturali trattate da questo stabilimento insieme a una descrizione mineralogica e geologica. Queste

informazioni sono necessarie per avere una prima valutazione della composizione chimica minerale del fine di segazione.

L'azienda utilizza due impianti a telaio a grana abrasiva in acciaio per la lavorazione dei blocchi. Questi ultimi arrivano allo stabilimento con un volume di circa 18 m³ con un peso di 486 quintali e il telaio impiega circa un giorno per ridurlo in lastre con spessore 3 cm e volume di 6 m².

Il fango prodotto, viene recuperato tramite un sistema di canalette, convogliato in un idrociclone per recuperare la graniglia abrasiva buona, mentre lo scarto viene inviato a un sistema di filtropressa in modo da ridurre umidità, volume e facilitarne il trasporto. Vengono prodotte circa 1800 t/anno di fango.

Lo stabilimento dispone di una propria discarica per inerti autorizzata e oltre a smaltire i propri residui, di natura sia litoidi che fanghi, è aperta li altri stabilimenti sempre se sono rispettate le soglie normative.



Figura 15: impasto abrasivo prima della selezione della grana riutilizzabile

Stabilimento G

Lo stabilimento G è un'azienda operante nel settore lapideo da oltre 50 anni. È stata una delle prime aziende della realtà ossolana ad operare nel settore dell'estrazione e lavorazione di graniti, marmi e porfidi.

Le pietre lavorate provengono dai dintorni dello stabilimento per cui la tipologia è simile a quella delle pietre trattate da M, le differenze sono a livello di tessitura, colore.

Lo stabilimento utilizza diversi impianti per il taglio, dal disco diamantato, con diametri che variano dagli 800 mm ai 1200 mm, al filo e telaio, per cui il fango prodotto avrà una composizione chimica variabile.

Lo stabile stima circa una produzione di fango pari a 280 Q/settimana, quindi ha produzione decisamente maggiore rispetto allo stabilimento M.

lo stabilimento non prevede nessuna attività di recupero, ma smaltimento in discariche autorizzate.

Materiale		Descrizione	Composizione mineralogica [% in volume]	Tecnica di taglio	Presenza di additivi
<u>Beola bianca</u>		Ortogneiss granitoide a grana eterogenea, con tessitura finemente listata. La scistosità è pervasiva, e definita da muscovite e da biotite.	Quarzo 30%, plagioclasio 25%, feldspati alcalini 26%, biotiti 10%, muscovite 5%	Telaio a graniglia abrasiva per M; Mista (filo, disco telaio) per G	Non specificato
<u>Beola grigia</u>		Ortogneiss con struttura foliata di colore grigio uniforme, a grana medio-fine.	Quarzo 30%, plagioclasio 13%, feldspati alcalini 40%, biotite 10%, muscovite 5%, epidoto 2%.		
<u>Bianco Montorfano</u>		Granito a grana medio-grossa, duro e compatto. Ha un colore chiaro uniforme dovuto all'abbondanza di quarzo e feldspati rispetto alla biotite.	Quarzo 40%, plagioclasio 20%, ortoclasio 35%, biotite 5%		
<u>Serizzo Antigorio</u>		Ortogneiss con struttura foliata occhiadina a grana da media a grossa caratterizzato da colore grigio scuro per la presenza di biotite	Quarzo 30%, plagioclasio 25%, ortoclasio 26%, biotite 10%, muscovite 5%, epidoto 3%		
<u>Palissandro bluette</u>		Marmo dolomitico a grana fine e aspetto eterogeneo, foliato, dal tipico colore grigio azzurro delicato.	Carbonati 85%, flogopite 7%, anfibolo 4%, mg. Clorite 3%, quarzo 1%		
<u>Palissandro oniciato</u>		Marmo dolomitico a grana fine, color crema piuttosto uniforme con screziature bronzee dovute alla presenza di flogopite.	Dolomite 80%, flogopite 12%, Clorite+anfibolo 2%, quarzo 5%, opachi 1%		

Tabella 6: Descrizione dei principali materiali lavorati presso gli stabilimenti M e Ge la tecnica di taglio utilizzata (tratto da: Tesi di Laurea Magistrale di Silvia Forbino "Metodi di separazione ecocompatibile nell'ottica dell'end-of-waste")

Capitolo 5. PROVE DI CARATTERIZZAZIONE SUI FANGHI

Nel seguente capitolo verranno spiegate le prove di caratterizzazione effettuate sui due campioni di fango prodotti dagli stabilimenti di M e di G, riportando i rispettivi risultati così da avere una conoscenza dettagliata dei due residui prima del loro impiego nelle malte a resistenza controllata CLSM.

Per questo studio, il fango, è stato utilizzato in sostituzione ai consueti aggregati fini per il confezionamento del calcestruzzo a bassa resistenza, in modo da incrementare la conducibilità termica di quest'ultimo. Per tale fine è quindi importante conoscere la quantità di metalli pesanti presenti nel fango e anche la quantità di minerali quarzosi proveniente dai blocchi di pietra madre.

Per la composizione del mix design o meglio per l'ottimizzazione dello scheletro litico, è fondamentale ricavare la curva granulometrica di ogni elemento presente nel mix, quindi anche del fango insieme alla densità specifica.

In sintesi le prove di caratterizzazione effettuate sui due campioni sono:

- analisi granulometrica con setacciatura;
- contenuto di metalli pesanti sulla frazione magnetica con separazione magnetica in torbida e verifica con permanente con scala Ghiotti;
- contenuto in quarzo con Analisi d'immagine sulla frazione amagnetica;
- densità specifica con "Le ChatelierFlak" sul tal quale;
- test di cessione sul tal quale;
- analisi chimiche sul tal quale.

5.1. Analisi granulometrica

Vista la granulometria molto fine del fango di segazione, l'analisi granulometrica è stata effettuata ad umido mediante vagliatura in modo da evitare dispersioni di materiale con granulometria più fine e ridurre la possibilità che questo si attacchi al grossolano andando quindi a compromettere la prova. La norma da seguire per l'analisi granulometrica è la UNI EN 933 Parte1 che ci fornisce indicazioni sul numero di setacci e l'apertura delle maglie da utilizzare. Questi sono stati posti l'uno sopra l'altro in modo da formare una colonna, con aperture delle maglie crescenti se partiamo dal setaccio posto sopra la vasca di raccolta.

Al termine della prova il materiale trattenuto da ogni vaglio viene filtrato con apposita carta, posto in forno ed infine pesato.



Figura 16: setacci per l'analisi granulometrica a umido dei fanghi di segazione

5.1.1. Risultati

Qui di seguito sono riportate le due curve di distribuzione granulometrica dei due campioni di fango, ottenute implementando su un grafico la percentuale di passante cumulativa per ciascun setaccio in funzione della maglia (in scala logaritmica).

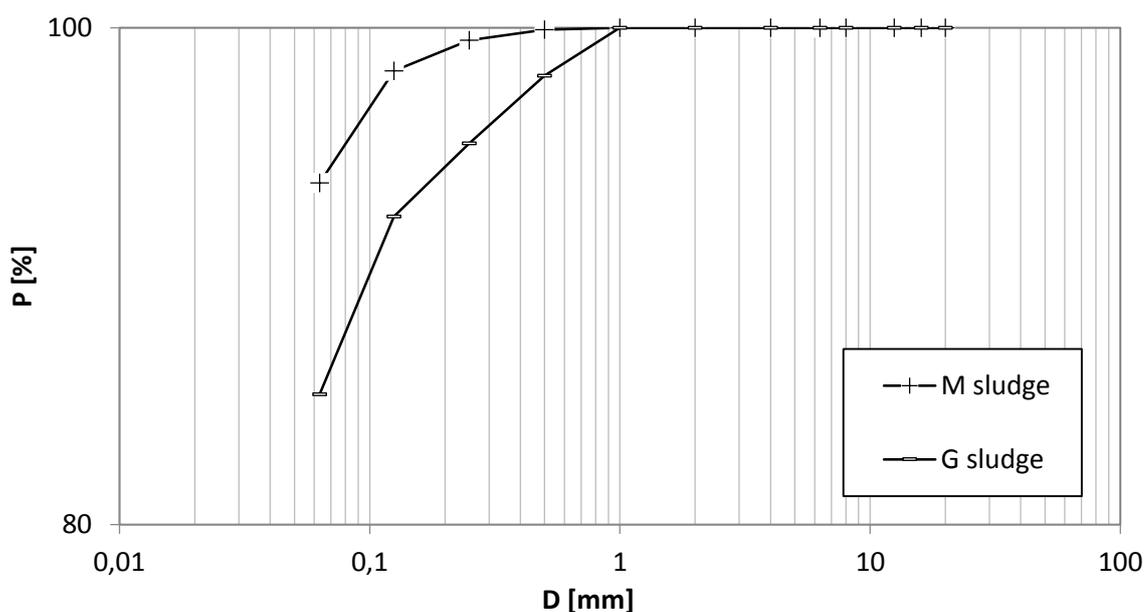


Figura 17: distribuzione granulometrica dei due campioni di fango oggetto di studio

Dall'analisi delle curve si nota come entrambi i campioni presentano una granulometria simile a quella di un materiale limo-argilloso e il campione derivante dallo stabilimento di M ha una granulometria più fine rispetto a quello di G.

Il 95.5% delle particelle del campione M ha diametro < 0.075 mm mentre per G 88.08%.

5.2. Separazione magnetica ad umido

La separazione magnetica ad umido non rientra nelle prove di caratterizzazione, ma in quelle di trattamento. Essa ha permesso di calcolare il tenore di metalli pesanti presenti nei due campioni di fine di segazione e di ottenere una frazione amagnetica sulla quale, invece, è stata fatta un'analisi di immagine per il calcolo del tenore di quarzo.

Questa prova prevede di separare, mediante un separatore, il fango in due frazioni: una magnetica, contenente elementi e particelle con elevata suscettività, come i metalli pesanti, e una frazione amagnetica in cui i costituenti non possiedono tale proprietà, come i minerali.

Quando si tratta con materiale molto fine, come appunto il fango, generalmente si decide di operare ad umido perché in questo modo si evita che le particelle magnetiche vadano ad aggregarsi con quelle amagnetiche rendendo l'operazione di separazione più complessa.

Lo strumento utilizzato è un separatore magnetico ad umido a campo intenso con dispositivo di separazione del tipo a filtro magnetico, costruito dalla casa ERIEZ Magnetics. Lo strumento opera su materiali fini o finissimi con granulometria $<0.6\text{ mm}$ (dimensione massima) in torbida, per tale ragione come magnete viene utilizzato un'attrezzatura particolare, detta "filtro magnetico", un filtro in paglia di ferro adatto per lavorare con i fanghi. Il campo magnetico viene realizzato da due bobine alimentate da corrente continua.



Figura 18: Separatore magnetico ad umido, a campo intenso, con dispositivo di separazione del tipo a filtro magnetico, casa costruttrice ERIEZ Magnetics.

Si procede alla prova inizialmente con la pesatura del campione di fango da introdurre nello strumento e questa non deve superare i 100 g; ogni campione è stato prelevato da una classe granulometrica. Successivamente si porta il campione in forno, in modo da ottenere il suo reale peso a secco. Viene aggiunta acqua (circa 3 litri) al campione essiccato, in modo da creare una torbida, che costituirà l'alimentazione all'interno del separatore magnetico, per evitare l'intasamento e ottenere una buona separazione. Lo strumento è dotato di un imbuto di alimentazione all'interno del quale viene versata la torbida con flusso regolato manualmente; all'interno dello strumento la frazione amagnetica viene raccolta in un contenitore posto sotto lo strumento, mentre il materiale magnetico viene trattenuto dal filtro magnetico attraverso l'azione del campo magnetico. Una volta terminata la prova, viene azzerato il campo magnetico e recuperata la frazione magnetica attraverso il lavaggio del filtro. La frazione magnetica e amagnetica, recuperata in torbida, viene fatta decantare, essiccare ed infine pesata.

Una volta ottenuto il peso della frazione magnetica, si calcola la percentuale di metalli pesanti supponendo che questa sia formata la maggior parte da questi, secondo la seguente formula:

$$\% \text{ metalli pesanti} = \frac{P_M \cdot 100}{P_{TOT}}$$

Dove:

- P_M è la massa espressa in grammi della frazione magnetica;
- P_{TOT} è la massa espressa in grammi del campione di fango tal quale.

Per verificare l'efficienza della separazione ad umido, si è effettuata un'analisi al microscopio ottico. Questa ha rivelato che i campioni amagnetici risultano essere abbastanza puliti dal materiale magnetico, invece quelli magnetici molto "sporcati" dal materiale roccia. Poiché la prima separazione non ha avuto ottimi risultati, si è deciso di ritrattare i prodotti magnetici dei vari campioni ad umido, aumentando e diminuendo il

campo, in modo da ridurre le percentuali di magnetico, che risultano essere alte per la presenza di carica minerale riscontrata dall'analisi visiva dei vetrini.

Infine, per un ulteriore controllo, la frazione amagnetica è stata sottoposta alla prova con magnete permanente e scala ghiotti.

La scala Ghiotti è uno strumento generalmente in legno, dotata di scalini che permette di regolare il campo magnetico del magnete permanente in funzione della distanza tra questo e il campione. Su di una tavola di legno viene steso uno strato di fango monogranulare il più uniforme possibile; questa viene fatta scorrere su una guida all'interno dello strumento, passando sotto al magnete permanente incastrato su un determinato livello della scala. Durante l'esecuzione della prova si è deciso di mantenere il campo magnetico a massima intensità, ponendo cioè la calamita sullo scalino più basso.



Figura 19: Scala Ghiotti

Il materiale attratto dal magnete permanente, che proviene dalla frazione fine, ha un peso praticamente trascurabile per cui possiamo affermare che la prova con separatore magnetico sia stata efficiente.

5.2.1. Risultati

Le tabelle riportano la percentuale di metalli pesanti riscontrata dei campioni M e G. Ogni frazione è stata recuperata dal separatore mediante filtraggio, essiccata e pesata.

D [mm]	Peso del trattenuto[g]	Frazione magnetica [g]	Frazione magnetica [% for class]	Frazionemagnetica[% VS TOTAL WEIGHT]	Frazione amagnetica [g]
0,425	0,92	0,74	80,43	0,14	0,18
0,212	2,18	1,31	60,09	0,25	0,87
0,106	7,9	3,03	38,35	0,58	4,87
0,075	10,05	2,59	25,77	0,49	7,46
0,038	45,87	7,02	15,30	1,34	38,85
0,001	458,9	0,9	0,20	0,17	458,00
TOT.	525,82	15,59		2,96	
				Frazione magnetica totale M [%]	

Tabella 7: percentuale di metalli pesanti presente nel campione

D [mm]	Peso del trattenuto[g]	Frazione magnetica [g]	Frazione magnetica [% for class]	Frazionemagnetica[% VS TOTAL WEIGHT]	Frazione amagnetica [g]
0,425	14,09	1,5	10,65	0,27	12,59
0,212	14,97	2,43	16,23	0,44	12,54
0,106	16,64	0,17	1,02	0,03	16,47
0,075	19,85	0,05	0,25	0,01	19,80
0,038	60,7	0,04	0,07	0,01	60,66
0,001	423,6	0	0	0	423,60
ToT	549,85	4,19		0,76	
				Frazione magnetica totale G [%]	

Tabella 8: percentuale di metalli pesanti presenti nel campione G

Il campione di fango M possiede un contenuto di metalli pesanti maggiore rispetto a quello di G e questo è giustificato dal fatto che lo stabilimento taglia con telaio a griglia abrasiva, la quale finisce nel fango incrementando il contenuto di metalli pesanti insieme a quelli derivanti dall'usura dell'utensile di taglio. Lo stabilimento G, invece, predilige impianti a disco e filo diamantato per cui si trovano basse rese di metalli. Un'ulteriore differenza sta nel fatto che nel campione M il materiale metallico si concentra nelle classi granulometriche più fini, mentre in quello G le particelle metalliche hanno una granulometria maggiore rimanendo quindi nelle classi con diametro superiore allo 0,212 mm.

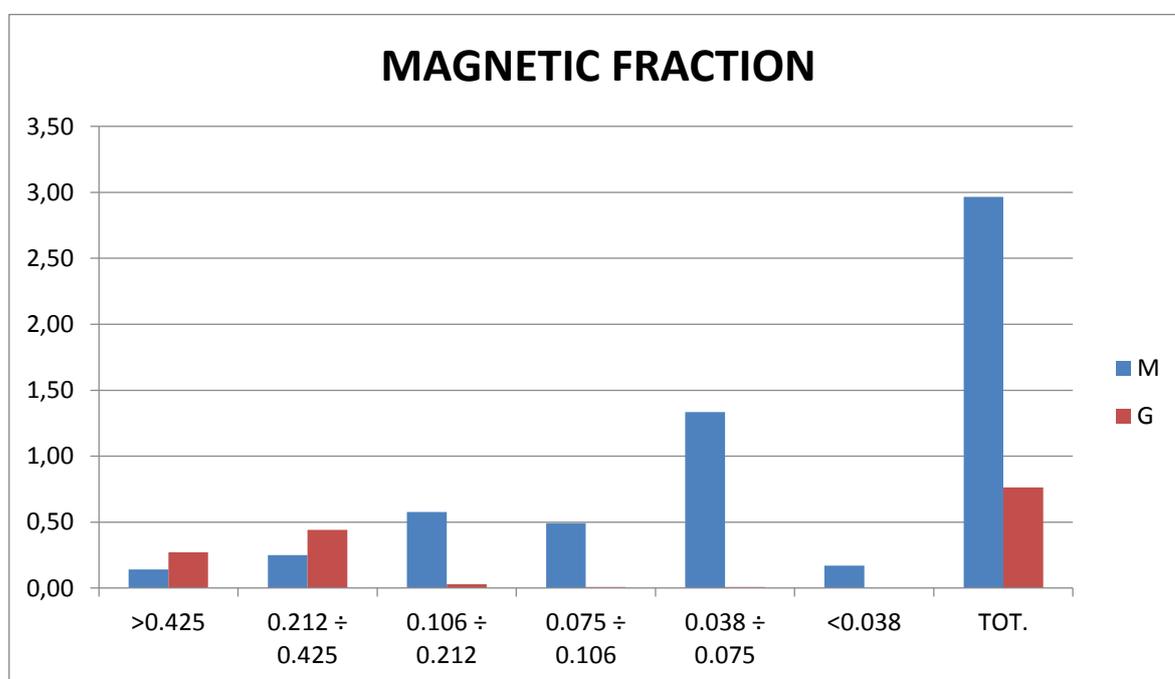


Figura 20: Istogramma distribuzione granulometrica della frazione magnetica

5.3. Contenuto in quarzo con l'analisi d'immagine

Il minerale quarzo è uno degli elementi più conduttivi dal punto di vista termico esistenti e per soddisfare gli scopi di tale studio, è stato necessario andare a calcolare la quantità di quest'ultimo nella frazione amagnetica dei fanghi campione. L'analisi è stata condotta sulla frazione amagnetica perché in questo modo il riconoscimento del quarzo, dagli altri elementi, risultava essere più semplice.

La presenza di questo minerale nei fanghi è dovuta al fatto che gli stabilimenti trattano blocchi di roccia silicatica, come gli gneiss, quindi ricchi di quarzo e feldspati.

Per avere un'analisi quantitativa di questo minerale è stato necessario utilizzare il software *Image j*. “Questo permette un trattamento mirato dell'immagine e generalmente utilizza algoritmi per effettuare misure e calcoli sugli oggetti, allo scopo di ottenere informazioni per il caso di studio che si ritengono importanti per il caso di studio. Esempi di parametri ricercati frequentemente nella fase di analisi sono l'abbondanza, le dimensioni (area, perimetro, lunghezza, ecc.), la forma, la posizione spaziale e l'orientamento” (tratto da <http://www.simoneprovenzano.info/animm10.php>).

Oltre al software, è stato adoperato il microscopio ottico *Leika DMLP* per petrografia che permette di analizzare il campione in diverse modalità quali, contrasto di fase, luce polarizzata o diretta con diversi obiettivi. Per distinguere i minerali di quarzo dal resto degli elementi, si è utilizzato un olio di eugenolo con indice di rifrazione 1.550.

Il microscopio è stato utilizzato per studiare le classi granulometriche del fango inferiori ai 106 μm , per quelli superiori l'analisi è stata fatta con il macroscopio ottico.

Si è proceduto realizzando dei vetrini per ogni classe granulometrica (>0.425 mm, 0.212 \div 0.425, 0.106 \div 0.212, 0.075 \div 0.106, 0.038 \div 0.075, <0.038), 12 in totale. La quantità di fango da applicare ad ogni vetrino dipende dalla granulometria in esame, l'area occupata e la gradazione dell'obiettivo.

Ogni vetrino è stato suddiviso in 25 campi e per ogni campo sono stati contati manualmente i minerali di quarzo. L'individuazione del minerale è stata aiutata dall'utilizzo dell'olio che ha la funzione di rendere il quarzo di colore blu con contorno rossiccio e irregolare, nel caso in cui il microscopio è impostato con luce in contrasto di fase, o color biancastro e brillante se la modalità è quella di luce polarizzata.



Figura 21: rappresentazione al microscopio ottico della frazione amagnetica G 0,075-0,106 mm in contrasto di fase a sinistra e polarizzata a destra 10X

Per ogni quarzo individuato è stata misurato, grazie al software *image j*, la lunghezza del diametro, dato necessario per calcolare il volume del singolo grano.

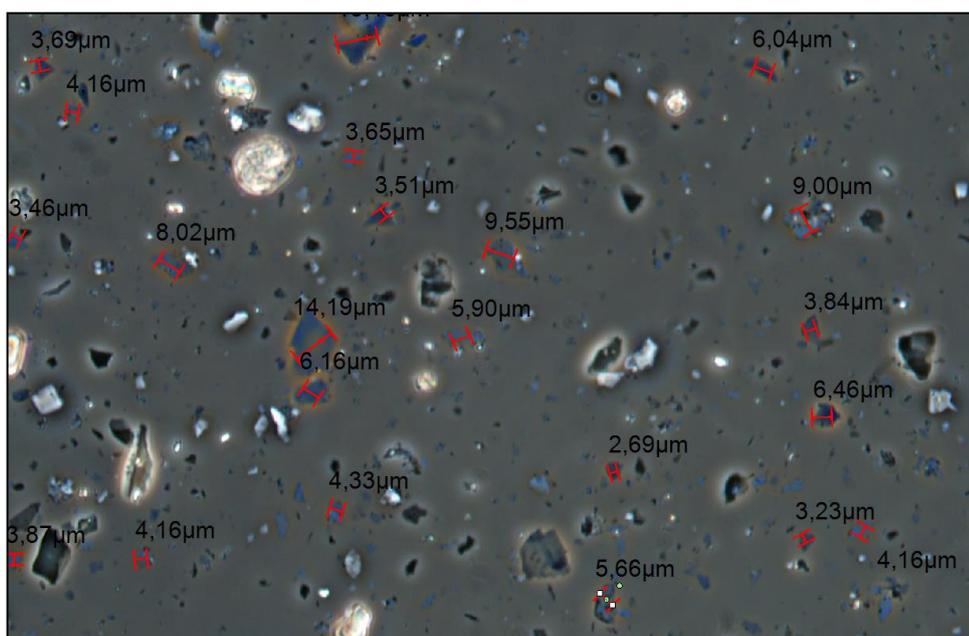


Figura 22: frazione amagnetica M <0.038 mm, misura dei diametri mediante Image J 40X

Una volta noto il volume e la densità, è stata ricavata la massa dei quarzi con la seguente formula.

$$\text{massa grani} = \text{densità media grani} \cdot \text{volume grani}$$

La densità media del quarzo si stima pari a 2,6 mg/mm³.

Nota la massa di quarzo presente su ogni vetrino, la massa della frazione amagnetica presente sul vetrino, l'area impolverata, il numero dei campi e l'area di quest'ultimo, è possibile calcolare il tenore di quarzo in percentuale presente nei due campioni di fango.

Per quanto riguarda le classi granulometriche superiori allo 0.106 mm si è proceduto nello stesso modo, adoperando però il macroscopio ottico e senza l'utilizzo di particolari oli, poiché il quarzo risulta essere ben distinguibile dal resto degli elementi grazie al suo colore trasparente e lucentezza.

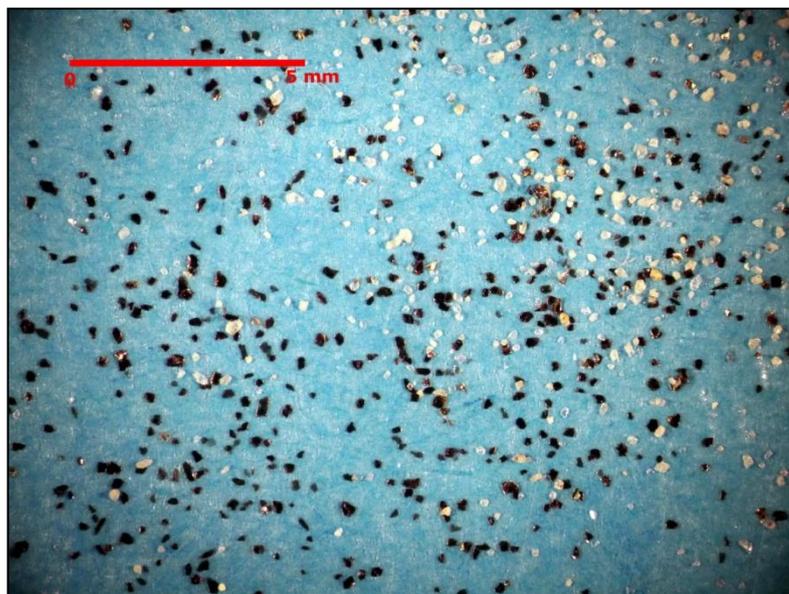


Figura 23: frazione amagnetica 0,106-0,212 mm campione G macroscopio ottico 10X

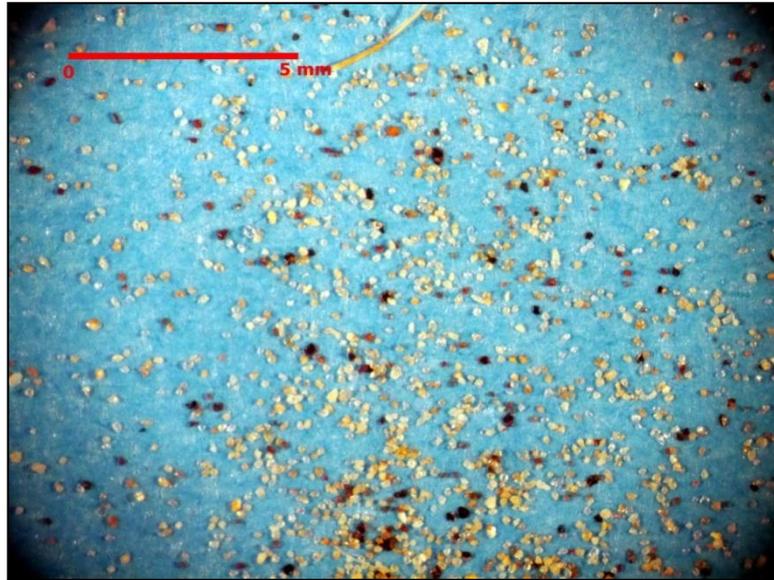


Figura 24: frazione amagnetica 0,106-0,212 mm campione M macroscopio ottico 10X

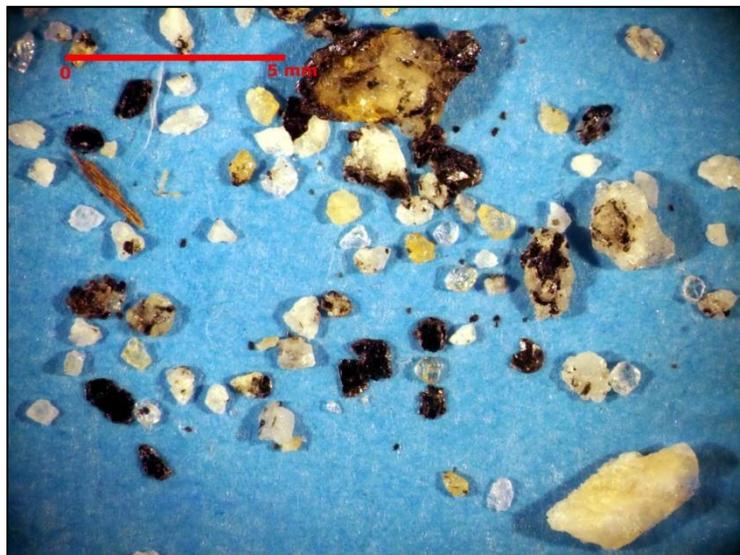


Figura 25: frazione amagnetica > 0,425 mm campione G macroscopio ottico 10X



Figura 26: frazione amagnetica >0,425 mm campione M macroscopio ottico 10X

5.3.1. Risultati

Sono riportate le tabelle con indicate le percentuali di quarzo contenute nei fanghi campione.

classi (μm)	Massa totale materiale amagnetico per classi (g)	Massa di quarzo sul vetrino (mg)		Massa Quarzo sulla classe (mg)	Massa Quarzo sulla classe (gr)		Tenore quarzo sulla classe (%)
>0.425	12,59	73,50		4406,50	4,407		35,000
0.425-0.212	12,54	103,5		5643,000	5,643		45,000
0.212-0.106	16,47	56,0		5764,500	5,765		35,000
0.106-0.075	19,80	3,7		1578,163	1,578		7,971
0,075-0,038	60,66	3,52927		13380,331	13,380		22,058
<0,038	423,60	0,26007		220333,246	220,333		52,014
totale	545,66				251,106		
	Massa totale campione (g)	Tenore Quarzo totale (%)					
	545,66	46,02					

Tabella 9: tenore di quarzo fango G

classi (μm)	Massa totale materiale amagnetico per classi (g)	Massa di quarzo sul vetrino (mg)		Massa Quarzo sulla classe (mg)	Massa Quarzo sulla classe (gr)		Tenore quarzo sulla classe (%)
>0.425	0,18	3,0		9,000	0,009		5,000
0.425-0.212	0,87	5,0		87,000	0,087		10,000
0.212-0.106	4,87	22,5		1217,500	1,218		25,000
0.106-0.075	7,46	4,0		642,711	0,643		8,615
0,075-0,038	38,85	1,80534		4383,600	4,384		11,283
<0,038	458,00	0,21554		197431,887	197,432		43,107
totale	510,23				203,772		
	Massa totale campione (g)	Tenore Quarzo totale (%)					
	510,23	39,94					

Tabella 10: tenore di quarzo fango M

Il fango di segagione con maggior tenore di quarzo è quello prodotto dallo stabilimento G per cui ci si aspetta che i provini di CLSM contenenti tale fango siano più conduttivi rispetto a quelli confezionati con fango di M.

Il contenuto in quarzo dipende dalla natura dei blocchi lapidei trattati dallo stabilimento in quel determinato periodo in cui sono stati prodotti i fanghi campione. Per esempio i graniti hanno un contenuto in quarzo maggiore rispetto ai serizzi e lo stabilimento G orienta il suo lavoro verso quest'ultimo.

5.4. Test di cessione sul tal quale

Il test di cessione è una prova prevista dalla normativa e si applica sui fanghi per determinare le concentrazioni degli elementi chimici costituenti.

Per la determinazione del test di cessione si applica l'appendice A alla norma UNI 10802, secondo la metodica prevista dalla norma UNI EN 12457-2. La prova prevede un contatto, per un tempo definito, tra un rifiuto con un lisciviante (solitamente una soluzione acquosa). Il liquido che ne deriva prende il nome di eluato (*Mondini N., 2014*).

La procedura da seguire per i materiali granulari (con diametro delle particelle massimo minore o uguale a 4 mm), come appunto i fanghi, è differente da quella per i materiali monolitici. Infatti, per i fanghi, la prima fase da seguire è quella di diluire il campione con acqua considerando un rapporto 1/10. Si prosegue mettendo l'eluato in un agitatore per circa 24 ore, si esegue la filtrazione a 0.45 micron ed infine si analizza tramite ICP massa, ottenendo in questo modo la concentrazione dei metalli presenti.

Le concentrazioni devono essere confrontate con i valori riportati nell'allegato 3 del D.M. 05/04/2006 n. 186, nel caso in cui si voglia sottoporre il rifiuto ad attività di recupero.

Parametri	Unità di misura	Concentrazioni limite
Nitrati NO3	mg/l	50
Fluoruri F	mg/l	1.5
Solfati SO4	mg/l	250
Cloruri Cl	mg/l	100
Cianuri Cn	µg/l	50
Bario Ba	mg/l	1
Rame Cu	mg/l	0.05
Zinco Zn	mg/l	3
Berillio Be	µg/l	10
Cobalto Co	µg/l	250
Nichel Ni	µg/l	10
Arsenico As	µg/l	50
Vanadio V	µg/l	250
Cadmio Cd	µg/l	5
Cromo Totale Cr	µg/l	50
Piombo Pb	µg/l	50
Selenio Se	µg/l	10
Mercurio Hg	µg/l	1
Amianto	mg/l	30

Tabella 11: D.M. 186 04/2006

Il test di cessione deve essere effettuato almeno all'inizio di ciascuna attività e successivamente ogni dodici mesi, salvo diversa disposizione dell'autorità competente e comunque quando vengono apportate modifiche nel processo di recupero (art. 9 e allegato 3 del DM 05/02/1998 e successivo aggiornamento D.M. 5 Aprile 2006 n. 186).

5.4.1. Risultati

I risultati della prova di cessione sono riportati nella tabella seguente. si ricorda che la prova è stata effettuata *sul tal quale* dei due campioni.

CAMPIONI TAL QUALI	Al	V	Cr tot	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Limiti di legge [mg/l]		0.25	0.05			0.25	0.01	0.05	3	0.05	0.005	0.05
M [mg/l]	1.809	0.001	<0.05	0.181	4.480	0.003	0.014	0.006	0.007	0.001	<0.005	<0.05
G [mg/l]	1.851	0.003	<0.05	0.056	0,269	0.332	0.001	0.012	0.026	0.002	<0.005	0.001

Tabella 12: risultati del test di cessione sul tal quale

Considerando il fango prodotto dallo stabilimento M, le soglie sono tutte rispettate tranne per il Nichel che supera il limite per 0.004 mg/l. Il superamento può essere ricondotto al fatto che questo elemento è molto frequente nella composizione chimica delle lame del telaio meccanico. Nonostante il risultato sia buono, per normativa, il fango non può essere utilizzato in altri cicli produttivi, ma può essere smaltito in discariche per rifiuti inerti oppure sottoposto a trattamenti volti ad abbassarne le concentrazioni. Il fango derivate dallo stabilimento G supera i limiti per conto del metallo Cobalto.

5.5. Analisi chimiche sul tal quale

Oltre al test di cessione, i due campioni di fango allo stato *tal quale* sono stati sottoposti ad analisi chimiche che seguono la normativa EPA 3051 CNR_IRSA, il cui scopo è la determinazione delle concentrazioni di metalli e semimetalli attraverso digestioni acide alternative e spettroscopie atomiche.

La procedura prevede di mineralizzare i campioni di fango previa essiccazione. Con mineralizzazione si intende porre il campione, con peso di 1 grammo, all'interno di uno strumento chiamato mineralizzatore microonde e dissolverlo in acido per il processo di solubilizzazione dei metalli. Il campione poi viene esposto a radiazioni a microonde in modo da velocizzarne le reazioni di solubilizzazione dei metalli e di degradazione della matrice organica. Gli acidi utilizzati dipendono dai metalli pesanti che devono essere investigati, per esempio: per Zn, Fe e Cu si utilizza acido nitrico in rapporto 1:1 con l'acqua, mentre per le leghe di Ni e Co si usa acido nitrico+ acido cloridrico + fluorico in rapporto 7:3:1. La prova dura circa 24 ore.



Figura 27: mineralizzatore a microonde Fkv Ethos Easy

Il modello di mineralizzatore a microonde utilizzato in questo studio è Fkv Ethos Easy e permette di mantenere la miscela di fango e acido a pressioni e temperature controllate.

Dopo la mineralizzazione i campioni vengono esaminati con lo strumento ICP-Mass analyser. Quest'ultimo prevede una tecnica analitica basata sull'utilizzo della spettrometria di massa abbinata al plasma accoppiato induttivamente. L'ICP permette di determinare le concentrazioni di sostanze inorganiche metalliche e non, con l'utilizzo di una torcia al plasma per produrre la ionizzazione di uno spettrometro di massa per la separazione e rivelazione degli ioni prodotti. I risultati ottenuti vengono poi confrontati con i limiti riportati nel decreto n. 186/2006.

5.5.1. Risultati

	Cr tot	Mn	Co	Ni	Zn	Pb	Cu	Mo	W	Sn	Sb
	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
Limite A	150	/	20	120	150	100	120	/	/	/	/
Limite B	800	/	250	500	/	1000	600	/	/	/	/
M	130	/	10.4	86.5	54.5	4.7	186*	/	/	/	/
G	1836	87	102*	15	125	26	108	16	54	/	/

Tabella 13: concentrazioni ottenute da analisi chimiche. I numeri con * rappresentano gli elementi che superano i valori limite per l'applicazione in siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale.

Nella tabella 13 sono riportate le concentrazioni degli elementi costituenti i campioni insieme ai limiti normativi. I limiti normativi si distinguono in limiti A e B:

- Limite A: siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale.
- Limite B: siti ad uso commerciale e industriale.

Nel caso in cui le concentrazioni rispettino le soglie riportate, allora possono essere rimpiegate nei relativi siti.

Le analisi chimiche svolte sul campione G, hanno dimostrato che per gli elementi Cr e Co i limiti normativi non sono rispettati; il primo per entrambi i rimpieghi, mentre il secondo per i siti a uso verde pubblico. Il Cr e Co sono i principali composti che caratterizzano la matrice metallica dei denti dei dischi diamantati come si può notare dalla tabella 6, per cui il risultato ottenuto è attendibile.

Per il campione M si nota un eccesso di rame, dovuto probabilmente della graniglia abrasiva.

5.6. Densità specifica

La massa volumica rappresenta la massa della sostanza, in questo studio il fango, che occupa un volume.

Per determinazione di tale proprietà sugli aggregati fini limo-argillosi, si è utilizzato un particolare tipo di picnometro che prende il nome di “Le ChatelierFlask” seguendo la normativa UNI EN 1097-6:2002. Lo strumento è realizzato in vetro borosil e si contraddistingue per la sua forma eterogenea. La parte superiore è costituita da un imbuto con diametro di 55 mm all’interno del quale si applica un tappo in vetro smerigliato, da un collo con diametro 11 mm e con gradazione che varia tra i 18 e i 24 ml a seconda dei modelli. Una sfera, di altezza 270 mm e diametro 90 mm, compone la parte inferiore dello strumento e ha una capacità approssimativa di 250 ml.



Figura 28: Le ChatelierFlask

La prova prevede, come primo step, il peso del picnometro vuoto con il tappo inserito (M1). Si versa il campione di fango *tal quale* essiccato all'interno dello strumento fino a riempire metà del volume della sfera inferiore e si pesa lo strumento sempre con il tappo inserito (M2). Viene aggiunta generalmente acqua distillata fino a riempire metà strumento, si scuote e si agita il picnometro in modo tale da far uscire le bolle d'aria presenti nella miscela acqua-fango ed infine si tiene a riposo la miscela per una decina di ore con il tappo inserito nel picnometro. Se il laboratorio è munito di una pompa sottovuoto è bene utilizzarla perché permette una fuori uscita dell'aria in tempi più brevi. al termine delle ore, si riempie completamente "Le ChatelierFlask" con acqua distillata, è importante che l'intero volume dello strumento sia riempito di acqua, si asciuga la parte esterna e si pesa (M3).

Per la determinazione della massa volumica si applica la seguente formula:

$$\text{massa volumica} = \frac{(M2 - M1)}{V - (M3 - M2) / \rho_w}$$

Dove:

- M1 peso del picnometro vuoto con capuccio;
- M2 peso del picnometro+capuccio+fango;
- M3 peso del picnometro+capuccio+fango+acqua;
- V volume del picnometro;
- P è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova.

5.6.1. Risultati

Fango	ρ_m [g/cm ³]
M	2.67
G	2.74

Tabella 14: densità specifica dei due campioni di fango

Per il fango M si è ottenuta una densità specifica di 2.67 g/cm³, mentre per quello G 2.74 g/cm³. La densità specifica è un parametro che influenza la composizione del mix design del CLSM.

5.7. Confronto tra i risultati ottenuti

	Granulometria<0.075 mm	% metalli pesanti	% quarzo	Massa volumica g/cm ³	Test cessione	Analisi chimica	Metodologia di taglio	Roccia madre
M	95.5%	2.96	39.94	2.64	Ni	Cu*	Telaio a grana abrasiva in acciaio	Beola bianca e grigia, granito Montorfano, serrizoAntigoro e Formazza.
G	88.08%	1.23	46.02	2.74	Co	Cr, Co*	Mista	

Tabella 15: si riporta i dati principali che permettono di caratterizzare i due campioni di fango. Nella colonna "test di cessione e analisi chimica" sono riportati i metalli pesanti che superano i valori di soglia secondo normativa.

Nella precedente tabella sono riassunti i risultati delle prove che hanno permesso di caratterizzare i due campioni di fango.

Capitolo 6. MALTE CEMENTIZIE A RESISTENZA CONTROLLATA CLSM

6.1. Premessa

Il CLSM studiato in questo elaborato di tesi sarà applicato come materiale di riempimento di sottofondi stradali all'interno dei qualisaranno collocati i sottoservizi, tra i quali i tubi per la raccolta delle acque, i cavi per la trasmissione dell'energia elettrica e la condotta antincendio. Il materiale cementizio dovrà soddisfare i seguenti requisiti:

- *“un'adeguata fluidità, in quanto a causa della presenza dei sottoservizi il materiale dovrà poter fluire anche in sezioni molto ristrette e per distanze notevoli;*
- *caratteristiche autolivellanti, così da evitare l'utilizzo di macchine compattanti che potrebbero andare a danneggiare i sottoservizi;*
- *portanza nel breve termine adeguata, per evitare che il passaggio di mezzi pesanti, a pochi giorni dal getto, possa creare danni al materiale;*
- *resistenze meccaniche nel lungo termine limitate, per evitare di creare un materiale troppo rigido rispetto alle caratteristiche dei materiali sovrastanti;*
- *buona conduttività termica, poiché il materiale sarà a contatto con i cavi che raggiungono temperature prossime ai 70° e che quindi dovrà essere in grado di dissipare il calore velocemente per non compromettere la funzionalità dei cavi stessi.” (tratto da Zisa G. (2017), Tesi di laurea Magistrale “L'utilizzo delle malte cementizie fluide nelle sedi stradali in galleria: mix design e prove di campo in vera grandezza”)*

Per soddisfare quest'ultima proprietà, oltre all'utilizzo dei fanghi di segazione, si è scelto di adoperare degli aggregati di quarzite derivanti dalla cava SASIL(BI), per la composizione del CLSM. Il quarzo infatti è uno dei minerali più conduttivi presenti sulla crosta terrestre. L'aspetto negativo di tale aggregato è quello relativo al costo, poiché nel seguente studio è stata scelta della quarzite pura al 90% e rappresenta una materia prima e non un materiale di recupero.

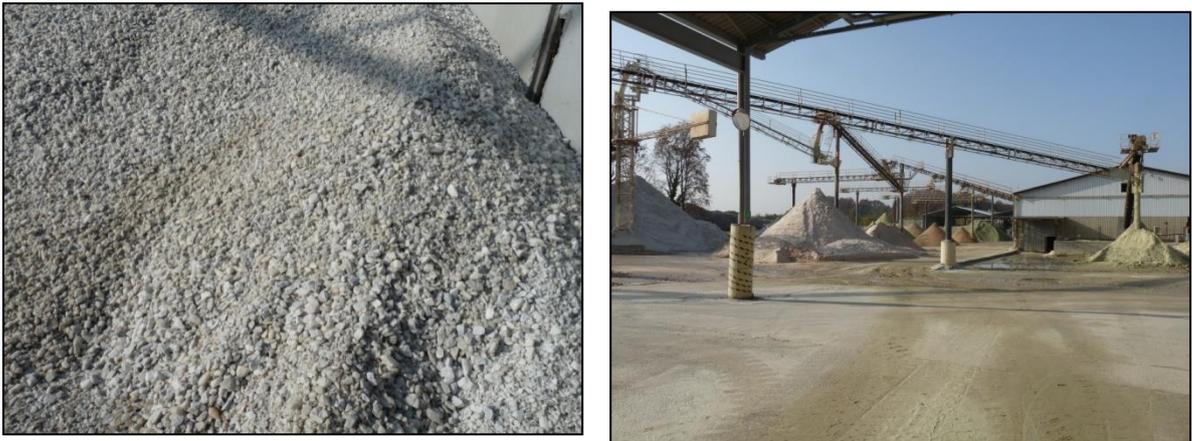


Figura 29: Stabilimento SASIL per approvvigionamento quarzite 0-8 e 8-16 mm.

Per questo studio si è scelto di analizzare quattro diverse malte cementizie che variano a due a due per tipologia di fango, contenuto di cemento (50 e 100 [Kg/m³]):

- M_50 campione di miscela composto da: Cemento 50 kg/m³, fango proveniente dallo stabilimento M, quarzite 0-8 e 8-16 mm, acqua, additivo.
- M_100 campione di miscela composto da: Cemento 100 kg/m³, fango proveniente dallo stabilimento M, quarzite 0-8 e 8-16 mm, acqua, additivo.
- G_50 campione di miscela composto da: Cemento 50 kg/m³, fango proveniente dallo stabilimento G, quarzite 0-8 e 8-16 mm, acqua, additivo.
- G_100 campione di miscela composto da: Cemento 100 kg/m³, fango proveniente dallo stabilimento G, quarzite 0-8 e 8-16 mm, acqua, additivo.

Da queste quattro miscele, sono stati confezionati dei provini cilindrici, di altezza 200 mm e diametro 100 mm, sui quali sono state effettuate delle prove di laboratorio per testare le loro caratteristiche fisiche e meccaniche allo stato indurito:

- Prova in cella triassiale a carico ripetuto a 28 giorni di maturazione;
- Prova di sensibilità termica a 6 e 18 giorni di maturazione e in condizioni di stabilità termica.

6.2. CLSM generalità

La malte cementizie a resistenza controllata sono dei materiali cementizi autolivellanti utilizzati principalmente come riempimento in alternativa ai tradizionali materiali granulari. Sono indicati nella letteratura internazionale con il termine “ControlledLow-strengthMaterials CLSM”, ma sono riconosciuti anche con diversi nomi come “materiali fluidi di riempimento” (flowablefill), “materiali a densità controllata” (controller densituffill), “malte fluide” (flowablemortar) e “malte plastiche terra-cemento” (plasticsoilcement).

Le malte a resistenza controllata sono state impiegate per la prima volta nel 1964 da parte dell’U.S. Bureau of Reclamation, per la realizzazione del letto di posa di una condotta di lunghezza pari a 515 km in Texas, e da allora hanno assunto sempre più applicazioni nel campo infrastrutturale e strutturale-ambientale.

Il termine “materiali a resistenza controllata” è stato approvato e adottato dal Comitato n.229 dell’American Concrete Institute (ACI) nel 1984 indicando tra essi materiali con legante cementizio auto-compattante utilizzato principalmente per il riempimento. Negli ultimi anni sono stati effettuati numerosi studi con lo scopo sia di migliorare la prestazione in opera, sia per utilizzare materiali di recupero.

L’ACI 116R definisce che il CLSM deve avere una resistenza a compressione di 8,3 Mpa o inferiore anche se la maggior parte delle applicazioni richiede resistenze a compressione del materiale non confinato di 2,1 MPa o meno.

I CLSM non sono da confondere con i calcestruzzi compattanti, poiché non richiedono strumenti di compattazione per raggiungere le resistenze desiderate ed inoltre i calcestruzzi raggiungono valori di resistenza a lungo termine che superano i 8,3 MPa dei CLSM.

Esistono delle linee guida, documenti tecnici come ACI 229R-99 che descrivono i requisiti che un CLSM deve possedere in termini di resistenza, permeabilità ecc.; i materiali costituenti e i loro range di dosaggi in base agli obiettivi che si vogliono raggiungere;

come viene trasportato e gettato in opera. Nei prossimi paragrafi si riportano queste info tratte dal documento ACI 229R-99 "Controlled low-strength materials".

6.2.1. Proprietà

Le proprietà dei CLSM rappresentano un punto di incontro tra quelle dei calcestruzzi tradizionali e quelle delle terre. Infatti, queste miscele, sono preparate utilizzando materiali e attrezzature proprie dei calcestruzzi ordinari ma presentano comportamenti simili a quelli delle terre.

Di seguito vengono riportate le principali proprietà dei CLSM:

Fluidità

È una proprietà che indica la capacità di un materiale di autolivellarsi, senza la necessità di mezzi di auto compattazione convenzionale, di scorrere e riempire facilmente i vuoti. Questo parametro viene determinato tramite prove di spandimento su piastra, secondo le prescrizioni della norma ASTM D 1603. La miscela deve essere fluida ma allo stesso tempo non deve presentare fenomeni di segregazione, di separazione tra fluido e i componenti, poiché potrebbero compromettere i requisiti meccanici finali. Quindi per soddisfare tale proprietà è necessario trovare un buon equilibrio tra i componenti fluidi e aggregati nella miscela.

Tempo di indurimento

Rappresenta l'intervallo di tempo necessario affinché la malta cementizia possa passare dallo stato plastico a quello solido, raggiungendo resistenze in grado di sostenere il peso di una persona. Generalmente sono necessarie 3-5 ore.

Pompaggio

Le attrezzature di pompaggio per la distribuzione dei CLSM sono quelle solite dei calcestruzzi ordinari. Le miscele dovranno avere una sufficiente coesione poiché saranno sottoposte ad elevate pressioni di pompaggio. Inoltre devono essere evitate operazioni di interruzione e mantenere un flusso costante in modo da non creare problemi di segregazione.

Resistenza

I CLSM devono assicurare resistenze meccaniche controllate che non incrementino con il tempo, in modo da facilitarne una possibile rimozione senza adottare strumenti di demolizione. Queste resistenze devono essere confrontabili con quelle di un materiale granulare tradizionale usato per i riempimenti in trincea. “Un CLSM avente una resistenza a rottura per compressione in condizioni non confinate compresa tra 0,3 e 0,7 MPa, equivale alla capacità portante ammissibile di un terreno ben compattato. La resistenza a rottura per compressione in condizioni non confinate è una misura dell’attitudine di un materiale a sopportare carichi che, in fase di esercizio, gravano direttamente o indirettamente su di esso.” (tratto da Zisa G. (2017), Tesi di Laurea magistrale “L’utilizzo delle malte cementizie fluide nelle sedi stradali in galleria: mix design e prove di campo in vera grandezza”)

Densità

La densità di un CLSM è maggiore rispetto a quella dei tradizionali materiali compattanti, circa 1840-2320 Kg/m³.

Isolamento/conduktività termica

I CLSM non sono dei buon isolanti, al contrario si contraddistinguono per la loro conducibilità termica dovuto all’alta densità. Nel caso in cui si desideri aumentare questa proprietà, come ad esempio nel riempimento di vuoti nel quale sono presenti cavi elettrici, sono auspicabili un’alta densità ed una bassa porosità. Infatti, all’aumentare dell’umidità e della densità secca aumenta anche la conducibilità termica.

Permeabilità

Per la maggior parte dei CLSM, è simile a quella dei materiali compattanti I valori tipici sono compresi tra 10^{-4} e 10^{-5} cm / sec. La permeabilità aumenta al diminuire dei materiali cementizi ed all’aumentare del contenuto di aggregati.

Ritiro

Non influenza le prestazioni del CLSM perché trascurabile, i valori sono compresi tra 0,002 e 0,05%.

Escavabilità

A seconda della miscela, i limiti di escavabilità possono variare. Miscele costituite da aggregati grossi sono difficili da rimuovere a mano nonostante le basse resistenze meccaniche. Miscele che utilizzano sabbia fine o solo ceneri volanti possono essere scavate con attrezzi meccanici fino a resistenze di 2,1 MPa.

6.2.2. Materiali standardizzati

La scelta dei materiali che andranno a costituire la miscela dipende da alcuni fattori come: costo, facilità di reperimento e caratteristiche che il materiale deve adempiere a livello di resistenza, escavabilità e densità. Generalmente le malte a resistenza controllata sono costituite da acqua, cemento portland, ceneri volanti, aggregati fini o aggregati grossi e additivi. Alcune miscele sono costituite solo da acqua, cemento portland e ceneri volanti per evitare fenomeni di segregazione.

Cemento

La norma ASTM C150 suggerisce l'uso di cemento portland di tipo I o II. Il contenuto in cemento varia tra i 30 e 120 kg/m³ a seconda dei requisiti che si devono raggiungere, ad esempio se si vogliono tempi di indurimento brevi e resistenze abbastanza elevate allora bisogna usare un alto contenuto in cemento. Lo scopo del cemento è quello di dare coesione e resistenza alle miscele e la sua origine lo fa risalire al 1824, data in cui ricorre il brevetto del cemento Portland da parte di Aspin. Il cemento è un legante idraulico, cioè un materiale inorganico finemente macinato che, mescolato con acqua, forma una pasta che rapprende e indurisce, a seguito di reazioni e processi di idratazione e che, una volta indurita, mantiene la sua resistenza e la sua stabilità anche sott'acqua. Esso influenza la reologia del calcestruzzo, durante il confezionamento e messa in opera, e le resistenze meccaniche.

Ceneri volanti

Sono usate per migliorare la fluidità della miscela, ridurre il bleeding, il ritiro e la permeabilità. Un altro aspetto relativo all'uso delle ceneri volanti riguarda il fatto che le miscele ad alto contenuto di ceneri volanti hanno una densità minore rispetto a quelle

con un elevato contenuto di aggregati. Sono dei materiali che si prestano bene come funzione di leganti ma anche per sostituire parte degli aggregati fini.

Additivi

Gli additivi per calcestruzzo, secondo la norma UNI EN 934-2, sono definiti come “un materiale da aggiungere durante il confezionamento del calcestruzzo in quantità non superiore al 5% in massa sul contenuto di cemento” con l’obiettivo di migliorare le prestazioni del calcestruzzo allo stato fresco e/o indurito. Gli additivi sono composti da una o più sostanze chimiche, di natura polimerica e non, per la maggior parte dei casi disciolte e veicolate in acqua.

In base alle proprietà che impartiscono al calcestruzzo, la normativa la UNI-EN 934-2 li classifica in:

- riduttori di acqua (fluidificanti) e riduttori di acqua ad alta efficacia (superfluidificanti);
- ritentori di acqua;
- aeranti, aumentano le proprietà di isolamento termico del calcestruzzo;
- acceleranti e ritardanti di presa;
- acceleranti di indurimento;
- additivi resistenti all'acqua;
- additivi modificatori di viscosità.

Acqua

Rispetto ai calcestruzzi tradizionali, nei CLSM viene utilizzata una quantità maggiore di acqua. Il contenuto di acqua solitamente è compreso tra 193 e 344 Kg/m³. Se il contenuto di aggregati fini è elevato, bisogna aggiungere più acqua nell’impasto. È importante che questa sia limpida, priva di Sali (in particolare solfati e cloruri) e non aggressiva. Il suo ruolo durante il confezionamento delle miscele non deve essere sottovalutato, infatti il suo dosaggio e la sua composizione sono determinanti al fine di assicurare al materiale le prestazioni richieste. L’acqua interviene con le sue proprietà chimico-fisiche in tutte le fasi della vita del calcestruzzo, assicura l’idratazione del

cemento, conferisce al calcestruzzo una certa plasticità e lavorabilità tali da consentire un'agevole messa in opera.

Aggregati

La letteratura preferisce l'utilizzo di aggregati fini rispetto a quelli grossolani. Per determinare il contenuto di aggregati fini bisogna prima stabilire la quantità di materiale necessaria per riempire il vuoto, dopo aver considerato il contenuto in cemento, acqua, ceneri volanti e aria.

“Gli aggregati che sono stati utilizzati con successo sono:

- aggregati che rispettino le prescrizioni dettate dalla norma ASTM C33;
- ghiaia fine con sabbia;
- aggregati con diametro massimo di 19 mm;
- terreni sabbiosi, con una percentuale di passante al setaccio di apertura 75µm maggiore del 10%;
- materiali di scarto delle cave, contenenti aggregati di dimensione massima inferiore a 10 mm.”

6.2.3. Campi di applicazione

Il CLSM viene utilizzato come riempimento al posto dei tradizionali terreni compattanti. Grazie alle sue caratteristiche di elevata fluidità e auto-compattazione è ideale per l'utilizzo in zone strette e poco accessibili in cui è difficile collocare e comprimere il materiale.

Le applicazioni principali dei CLSM elencate dalla NRMCA sono:

- trincee fognarie;
- spalle da ponte;
- muri di contenimento;

- sottofondi stradali;
- serbatoi sotterranei;
- pozzi;
- controllo dell'erosione;
- letti di posa delle condotte;
- isolamento termico con malta cementizia ad alto contenuto d'aria.

6.3. Effetto della conducibilità termica del materiale di riempimento sulle prestazioni delle linee di trasmissione

I cavi per il trasferimento di energia elettrica interrati ad alta tensione sono alimentati da corrente continua che genera calore a causa della resistenza elettrica del cavo stesso e per l'effetto joule. Generalmente questi cavi raggiungono temperature elevate intorno ai 70 °C e se il materiale circostante non è in grado di dissipare calore, questa aumenta andando a danneggiare il funzionamento degli stessi. La dissipazione deve essere tale da mantenere la temperatura di funzionamento del cavo elettrico a livelli di sicurezza, compatibili con i materiali di cui è costituito.

La temperatura del cavo durante il funzionamento è influenzata dai seguenti fattori:

- Proprietà termiche del suolo naturale che dipendono da umidità, contenuto di minerali e densità;
- Variazioni naturali di temperatura e temperatura indisturbate nel terreno, che dipendono da infiltrazioni di acqua o variazione del livello della falda;
- Proprietà termiche di un cavo a diverse temperature;
- Tipo di cavo, dimensioni del filo e numero di cavi;
- Profondità di posa per cavo;
- Distanza tra i cavi;
- Dimensionamento della potenza elettrica e della sua durata.

La Norma tecnica italiana che fa da riferimento per i tecnici interessati al corretto dimensionamento dei cavi elettrici interrati è la CEI 20-21. Nella norma il dimensionamento dei cavi, la geometria dello scavo e la profondità minima di posa dei cavi rispetto al piano campagna vengono stabiliti in base a una presunta conduttività termica media del materiale che andrà a ricoprire gli stessi. Inoltre, il cavo è progettato per una potenza elettrica (capacità di trasporto dell'energia) che genera una certa temperatura massima, correlata alla conduttività termica del materiale di riempimento. Il superamento della temperatura di progetto può influire sulla durata del cavo. Si capisce dunque come conoscere il valore di conducibilità termica del materiale adiacente i cavi sia di fondamentale importanza.

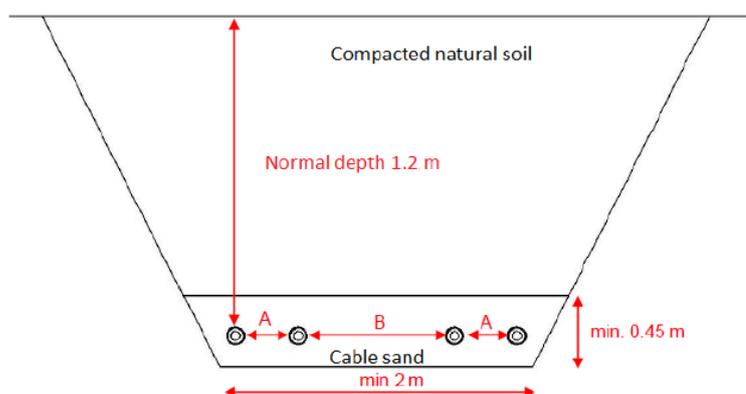


Figura 30: Sezione di scavo per la posa di quattro cavi interrati e le relative distanze in caso di utilizzo di terreni naturali.

Il terreno naturale non può essere considerato un buon materiale di riempimento per questa applicazione perché la sua conducibilità termica varia molto con il contenuto di acqua. Quando il terreno è saturo la sua conducibilità raggiunge delle buone efficienze ma mano a mano che il cavo genera calore, il terreno si asciuga incrementando così il valore di resistività termica dello stesso a causa della sostituzione dell'acqua con l'aria che ha una bassa conducibilità. È necessario dunque adoperare un materiale, che dissipi calore ad elevate velocità, abbia una elevata conducibilità termica e che questa sia stabile garantendo le prestazioni di trasmissione del cavo di progetto per tutta la sua durata anche quando questo è asciutto.

Capitolo 7. VALUTAZIONI PRELIMINARI PER UNA CORRETTA

IMPOSTAZIONE DEL MIX DESIGN

Nel seguente capitolo sono riportati i materiali usati per la composizione delle quattro miscele oggetto di studio e le relative prove che hanno permesso di caratterizzarli. Successivamente viene introdotta la metodologia assunta per il mix design, spiegando passo per passo come vengono calcolati i dosaggi. Si prosegue con la descrizione della modalità di preparazione della miscela e del confezionamento dei campioni cilindrici. Ed infine si analizzano le prove sperimentali necessarie per valutarne le caratteristiche sia meccaniche che fisiche e se queste soddisfano i requisiti richiesti per l'applicazione come sottofondo stradale.

7.1. Caratterizzazione dei materiali da utilizzare

Si riporta l'elenco dei materiali scelti per il confezionamento delle quattro miscele cementizie e le prove di caratterizzazione degli aggregati su richiesta del mix-design.

Cemento

Per il seguente studio è stato scelto cemento CEM I 42,5 R con densità specifica pari a 3,15 g/cc. Si intende cemento Portland con una percentuale di clinker almeno del 95% e appartenente alla classe di resistenza 42,5R.

Acqua

L'acqua utilizzata è quella potabile disponibile al laboratorio. Essa è risultata idonea per il confezionamento delle miscele poiché il contenuto di Sali disciolti è trascurabile e quindi non va compromettere l'idoneità durante loro fase di indurimento delle miscele.

Additivi

Il tipo di additivo utilizzato nel presente lavoro di tesi si chiama ADVA® Flow 455 ed è un superfluidificante di nuova generazione, a basso dosaggio efficace, per impartire caratteristiche di elevatissima fluidità senza segregazione agli impasti cementizi. Un

additivo viene definito riduttore di acqua o superfluidificante quando è possibile ridurre il rapporto a/p del 12% grazie al suo utilizzo. Generalmente questa tipologia di additivi sono composti da sostanze polimeriche idrosolubili con gruppi funzionali carichi che hanno proprietà disperdenti. Essi sono capaci di adsorbirsi sulla superficie dei granuli di cemento caricandoli negativamente, mentre generalmente le particelle di cemento sono soggette a forze di attrazioni che le portano a agglomerare ingrossandosi e flocculando. In questo modo i grani sono allontanate e disperse nell'acqua di impasto e la pasta cemento-acqua fa in modo di lubrificare particelle di inerte, sabbie ed aggregati, nella miscela del calcestruzzo cemento rendendo l'impasto, a parità di composizione, più "lavorabile". Questo additivo, oltre a ridurre il contenuto in acqua, evita fenomeni di segregazione e formazioni di grumi nella miscela e impartisce sensibili incrementi di resistenza.



Figura 31: additivo utilizzato per lo studio

Aggregati

L'aggregato è il materiale principale che va ad influenzare le prestazioni del conglomerato cementizio. Le sue proprietà di resistenza, durezza, forma, gelività, angolatura sono fondamentali e devono essere tali da permettere al calcestruzzo di raggiungere le migliori prestazioni sia di resistenza meccanica e durabilità, che di lavorabilità e messa in opera.

Gli aggregati costruiscono lo scheletro solido del conglomerato, per cui bisogna accettarsi che questi siano ben assortiti in modo tale che le particelle più fini vadano a riempire i vuoti interstiziali creati da quelli più grossolani. Secondo la normativa gli aggregati fini sono quelli con diametro inferiore ai 4mm mentre quelli grossi sono quelli superiore.

Per la realizzazione delle malte oggetto di studio si sono scelti degli aggregati che potessero andare ad incrementare la conducibilità termica dello stesso e che permettessero, allo stesso tempo, una resistenza meccanica confrontabile con quella dei materiali granulari tradizionali. Inoltre la scelta di utilizzare una sola tipologia di aggregato è stata dettata dal fatto di poter confrontare le efficienze dei due fanghi campioni.

Gli aggregati utilizzati sono:

- fanghi di segazione descritti nella prima parte dell'elaborato di tesi;
- quarzite con diametro 8-16 mm
- quarzite con diametro 0-8 mm.

La quarzite è stata reperita presso lo stabilimento SASIL(BI) e selezionata alle granulometrie occorrenti mediante setacciatura. Essa ha una purezza del 90% ovvero è costituita dal minerale quarzo per il 90% quindi garantisce un'alta conducibilità.



Figura 32: da sinistra: Cemento Portland, fango M, quarzite 0-8 mm, quarzite 8-16 mm

7.1.1. Caratterizzazione degli aggregati

La caratterizzazione è un'operazione molto importante poiché, insieme alla successiva ottimizzazione, permette di ricavare le percentuali degli aggregati e il dosaggio esatto da considerare nella miscela che verrà usata per confezionare i provini di CLSM. La caratterizzazione dei fanghi è già stata descritta nel capitolo 5 per cui si procede con quella delle quarziti.

Sono state analizzate:

- distribuzione granulometrica;
- densità specifica;
- contenuto in acqua.

7.1.1.1. Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica è stata effettuata mediante setacci seguendo la normativa UNI EN 933-1 che oltre a descrivere la procedura, riporta il valore dell'apertura che le maglie dei setacci devono possedere. Inizialmente sono stati preparati due campioni:

- 2 kg di quarzite 8-16mm;
- 1.5 kg di quarzite 0-8mm.

I campioni di quarzite sono stati dapprima lavati mediante setacci da 2 mm e 0.063 mm, così da conoscere la percentuale di fine inferiore ai 63 μ m necessaria per la formulazione del mix-design.

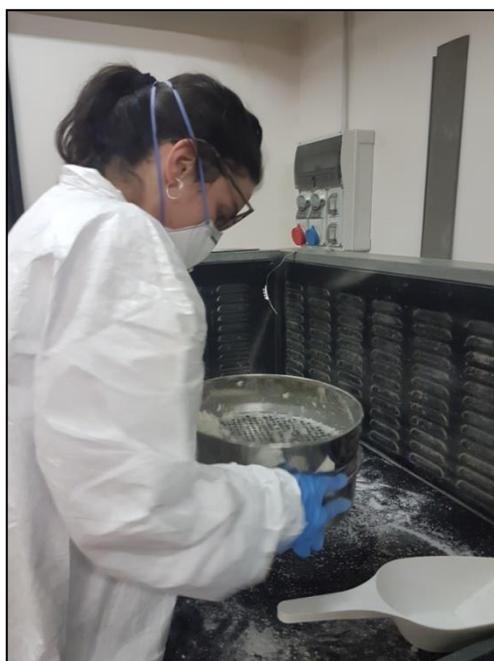


Figura 33: prima operazione di setacciatura per determinare la percentuale di materiale inferiore ai 63 μm

Il trattenuto del setaccio 63 μm è stato essiccato a 110° in forno per 24h, ne è stata misurata la massa ed infine posto in una colonna di setacci con apertura delle maglie crescenti partendo dal basso e avanzando verso l'alto.



Figura 34: colonna di setacci più pedana vibrante in laboratorio

La colonna è stata agitata attraverso una pedana vibrante in modo da dividere il campione in classi granulometriche. È stata determinata la massa del trattenuto di ogni setaccio

esprimendola come percentuale rispetto alla massa totale del materiale essiccato. Successivamente è stata calcolata la percentuale cumulativa, sempre rispetto alla massa di prova, che ha attraversato ogni setaccio fino a quello con apertura pari a 63 μm .

7.1.1.2. Risultati

Come per i fanghi, sono stati riportati su un grafico la percentuale cumulativa di passante per ciascun setaccio in funzione della dimensione della maglia (in scala logaritmica) e si è ottenuta la curva granulometrica.

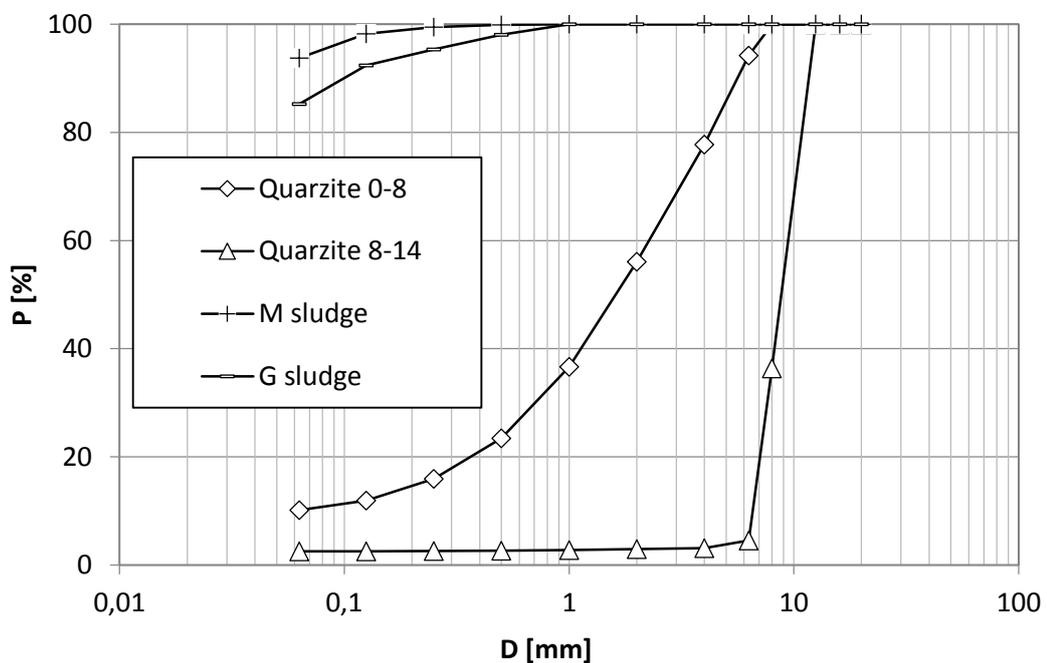


Figura 35: distribuzione granulometrica degli aggregati utilizzati per lo studio

7.1.1.3. Densità specifica della quarzite

La densità specifica esprime la massa degli aggregati che occupano 1 m³ di volume. Essa è stata determinata mediante il metodo del picnometro seguendo la normativa UNI EN 1097-6:2002.

Inizialmente sono stati preparati due campioni con massa 600 g per ogni classe di quarzite e prima di introdurli nei due strumenti è stata determinata la massa di questi ultimi vuoti con il cappuccio inserito.

La procedura da seguire è la stessa per entrambi i campioni di quarzite.

Una volta tarati i picnometri a vuoto, il materiale viene inserito all'interno dello strumento, pesati nuovamente assieme al cappuccio. Si aggiunge acqua distillata fino ad un massimo di 30 mm al di sotto del giunto della testa e posti al di sotto di una pompa sottovuoto per quattro ore circa, in modo da liberare tutta l'aria all'interno di essi. Al termine delle ore, viene aggiunta dell'acqua distillata fino a riempire l'intero volume del picnometro con il cappuccio inserito. Bisogna assicurarsi che non vi siano spazi vuoti e che l'intero picnometro sia riempito di acqua. Infine si asciuga la parte esterna dello strumento con un pezzo di carta, ripesato e infine misurata la temperatura dell'acqua con apposito termometro elettrico. L'intera procedura è stata ripetuta per due volte per ogni campione di quarzite, in modo da ottenere dei valori che siano il più rappresentativi possibile.

La formula applicata per la determinazione della densità specifica delle due quarziti è la stessa vista per i fanghi e si trova nel capitolo 5.5.

Di seguito si riportano alcune immagini relative al metodo del picnometro per la determinazione della densità specifica.



Figura 36: da sinistra: picnometri con all'interno quarzite oggetto di studio e materiale metamorfico. Sistema di pompa sottovuoto.

7.1.1.4. Risultati

Materiale	ρ_m (g/cm ³)
Quarzite 0-8 mm	2.551
Quarzite 8-16 mm	2.662

Tabella 16: densità specifica degli aggregati [g/cm³]

Essendo la densità del minerale quarzo attorno ai 2,6 g/cm³, si dimostra la purezza del materiale recuperato. Per avere maggiori dettagli sui risultati ottenuti si rimanda agli allegati.

7.1.1.5. Contenuto in acqua

Per determinare il contenuto d'acqua degli aggregati di quarzite si è preparato un campione per ogni granulometria nelle sue condizioni naturali, pesato ed infine posto in forno a 110° per 48 ore circa. Dopo l'essiccazione si sono ripesati i campioni e questi valori sono stati sottratti a quelli dei campioni nelle condizioni naturali ottenendo il contenuto d'acqua.

7.1.1.6. Risultati

Materiale	Contenuto d'acqua (%)
Quarzite 0-8	10
Quarzite 8-14	3

Tabella 17: contenuto di acqua negli aggregati allo stato naturale

7.2. Metodologia per il Mix-design

In seguito viene spiegata la metodologia per la composizione del mix-design, o meglio come vengono stabiliti i dosaggi dei componenti che andranno a formare le miscele di CLSM.

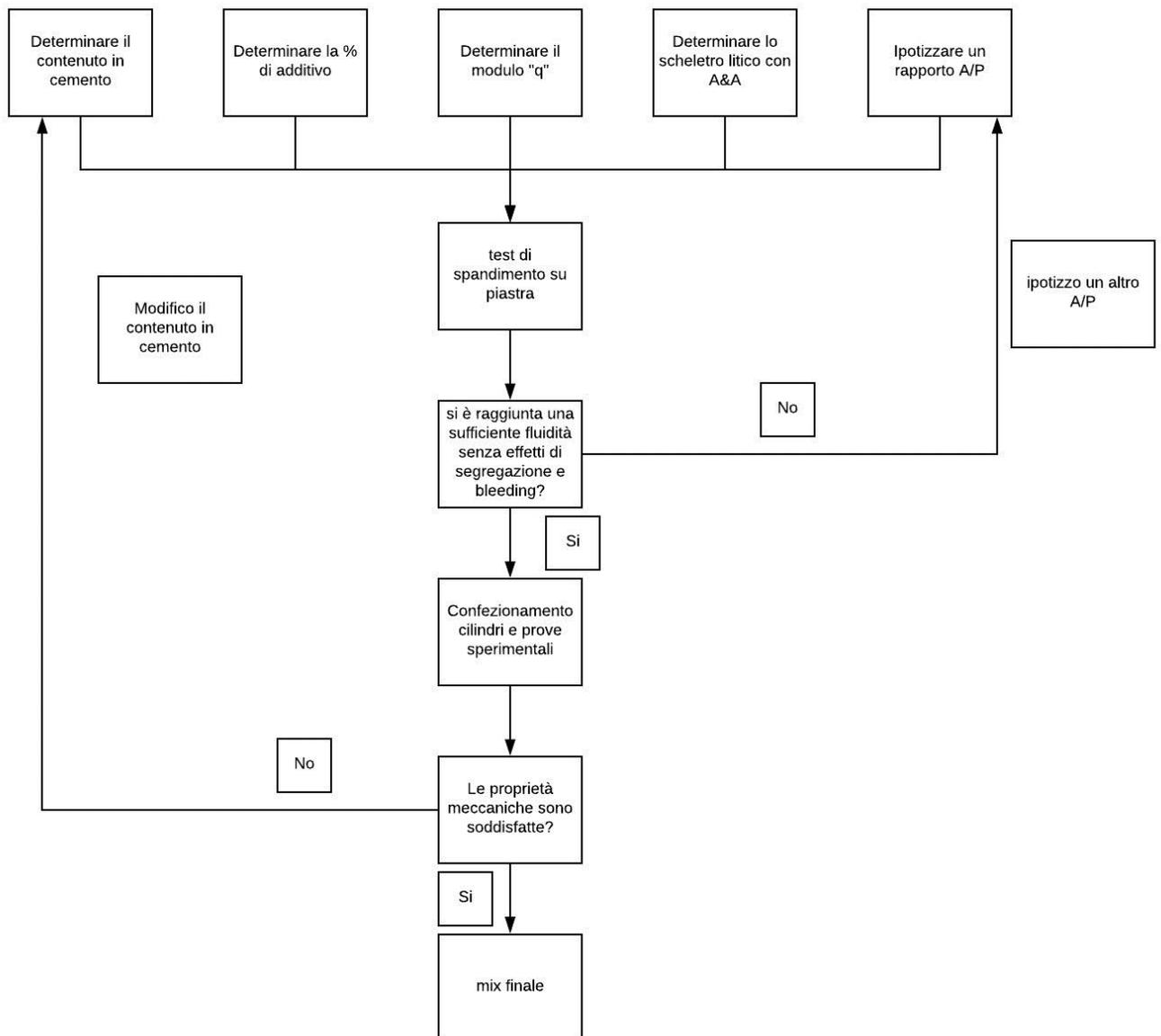


Figura 37: flow chart per la determinazione del mix-design

7.2.1. Mix design

Il mix design ha lo scopo di definire la composizione del calcestruzzo, in termini di quantità di cemento, di acqua, di additivi e di inerti per m³ di calcestruzzo, partendo da:

- materiali disponibili (aggregati, cemento e additivi)
- proprietà del materiale indurito (resistenza meccanica, ritiro, durabilità, ecc.)
- esigenze esecutive (lavorabilità, modalità di getto, ecc.)

Essendo il CLSM oggetto di studio una miscela composta da materiali non tradizionali e con caratteristiche diverse dai normali materiali auto-compattanti, non esiste una procedura di mix design specifica per cui si è scelto di sfruttare come curva di riferimento l'equazione di *Andreasen and Andersen modificata* solitamente utilizzata per i calcestruzzi auto-compattanti. Il CLSM infatti possiede una resistenza meccanica bassa, comparata agli altri calcestruzzi e diametri massimi degli aggregati ridotti.

La procedura per la determinazione del mix si sviluppa in tre fasi:

1. ottimizzazione dello scheletro litico a partire dalle curve granulometriche degli aggregati in modo da avvicinarsi alla curva di riferimento prescelta "A&A";
2. scelta del quantitativo di cemento, rapporto a/p e dosaggio additivo;
3. determinazione del dosaggio dei componenti della miscela.

7.2.1.1. Ottimizzazione dello scheletro litico

Il processo di ottimizzazione ha lo scopo di calcolare la percentuale in peso degli aggregati da inserire nella miscela e che costituiranno lo scheletro litico della malta. Lo scheletro litico deve essere ben studiato perché definisce le proprietà fisiche e meccaniche della malta. Esso deve essere costituito da aggregati eterogenei in modo che il contenuto di vuoti interstiziali sia ridotto. Il processo di ottimizzazione dello scheletro litico deve consentire l'avvicinamento alla curva ideale di distribuzione granulometrica prescelta utilizzando gli aggregati a disposizione.

Una volta determinata la distribuzione granulometrica di ogni aggregato che verrà inserito nel mix, si procede con l'applicazione dell'equazione di progetto che restituirà

curva granulometrica del mio CLSMe che a sua volta dovrà essere ottimizzata in modo che il suo andamento sia il più possibile simile a quello della curva di riferimento di *Andreasen and Andersen modificata*. La curva di riferimento rappresenta la distribuzione granulometrica ideale, che permette di creare uno scheletro litico il cui valore di vuoti interstiziali sia il più basso possibile. Il processo di ottimizzazione tra le due curve avviene tramite il comando *solver tool* di Excel e si basa sulla teoria dei minimi quadrati. In particolare il comando calcola il valore dei coefficienti dell'equazione progetto che permette alla curva associata di avvicinarsi a quella di riferimento.

Equazione progetto:

$$P_{P(D)} = \alpha_{0-8} * P_{0-8} + \alpha_{8-16} * P_{8-16} + \alpha_{sludge} * P_{sludge}$$

$$\alpha_{0-8} + \alpha_{0-8-16} + \alpha_{sludge} = 1$$

Equazione di riferimento di *Andreasen and Andersen modificata* per i calcestruzzi auto-copattanti:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q}$$

$$\sum [P(D) - P_p]^2 = \min$$

Dove:

α_i = coefficiente relativo ad ogni aggregato usato;

P_i = la percentuale di materiale che passa attraverso il setaccio di diametro D;

D_{min} = diametro minimo dello scheletro litico;

D_{max} = diametro massimo dello scheletro litico;

q = coefficiente di aggiustamento.

Nell'equazione di *A&A modificata* il valore di q dipende dallo stato di lavorabilità che il CLSM deve raggiungere, in particolare il coefficiente indica il quantitativo di fine presente e all'aumentare di q il fine decresce. Esso varia tra 0-1 ma per le miscele molto fluide si utilizzano valori inferiori allo 0.23 e per il nostro studio è stato scelto 0.21.

Il diametro minore della particella che forma lo scheletro litico è di 0.005 mm mentre quello maggiore 12,5 mm.

Il valore dei coefficienti trovati mediante *Solvertool*, per ogni campione di aggregato, viene moltiplicato per cento così da rappresentare la percentuale in peso di ogni aggregato all'interno della miscela.

7.2.1.2. Risultati

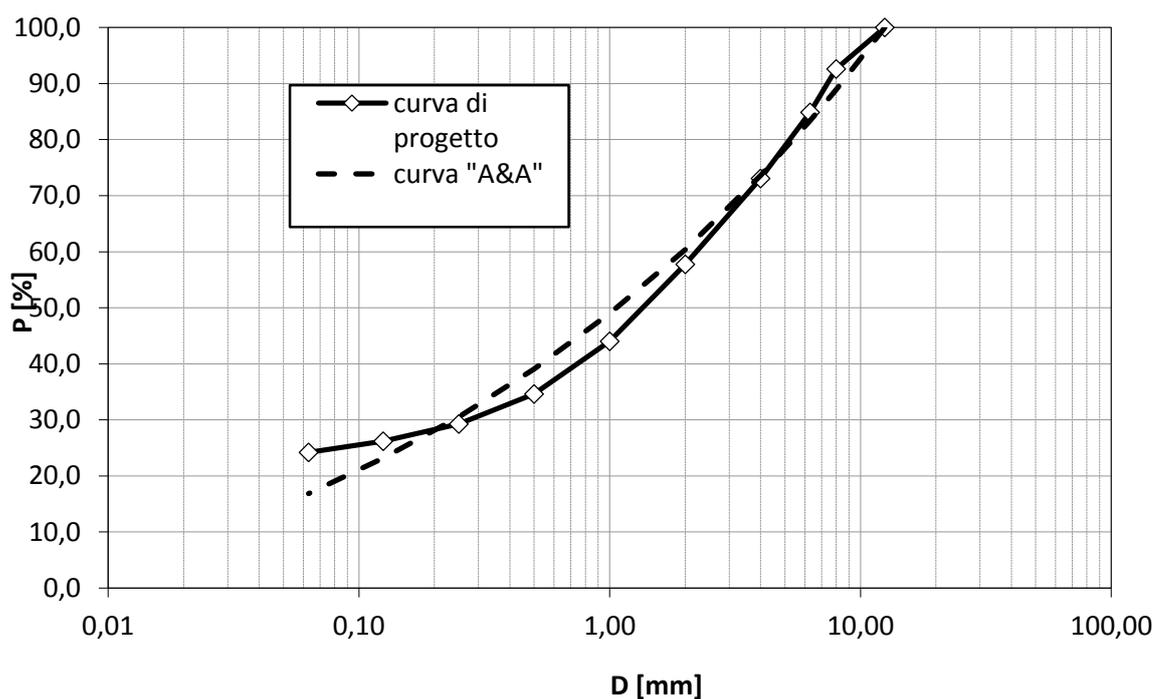


Figura 38: rappresentazione della equazione di progetto e "A&A", considerando il fango M

Aggregati	% in peso
Quarzite 0-8 mm	71
Quarzite 8-16 mm	11
Fango M	18

Tabella 18: percentuale in peso degli aggregati che formeranno le miscele costituite da fango M

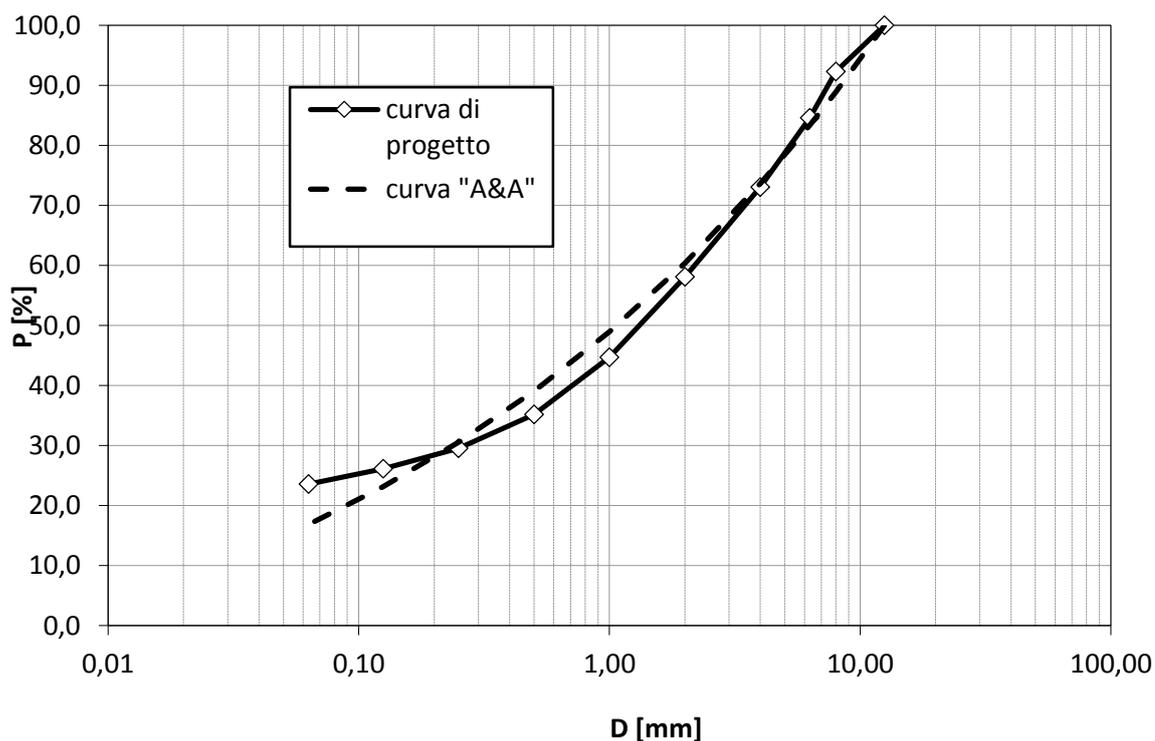


Figura 39: rappresentazione della equazione di progetto e "A&A", considerando il fango G

Aggregati	% in peso
Quarzite 0-8 mm	69
Quarzite 8-16 mm	12
Fango G	19

Tabella 19: percentuale in peso degli aggregati che formeranno le miscele costituite da fango G

7.2.1.3. Scelta del quantitativo di cemento, rapporto a/p e dosaggio additivo

Dopo avere caratterizzato lo scheletro litico, il passaggio successivo per completare la determinazione del mix-design è quello relativo alla scelta del contenuto di cemento. Il CLSM è una miscela cementizia che si contraddistingue per la sua modesta resistenza per cui generalmente si fissa un contenuto di cemento pari a 50 kg/m³, ma per analizzare il contributo di questo elemento nella conduzione termica si è scelto anche di fissare un valore pari a 100 Kg/m³. Questi valori sono compresi all'interno del range tipico dei CLSM (30 – 120 Kg/m³).

La scelta dell'additivo dipende molto dalle caratteristiche degli aggregati, per tale ragione e considerando alcuni studi, si è scelto di adottare un valore di additivo pari allo 0,5% della quantità di cemento.

Il rapporto a/p, acqua e polvere, per ognuna delle quattro miscele è stato scelto per tentativi attraverso la prova di spandimento o *flowability test* che verrà spiegato nei capitoli successivi. La scelta dipende dal fatto di creare una miscela facilmente lavorabile, che si auto-espandi e allo stesso tempo che non ci siano effetti di segregazioni. Per ognuna delle quattro tipologie di malta si sono ipotizzati i seguenti rapporti a/p: 0.6; 0.7; 0.75, 0.8, 0.85 e 0.9.

7.2.1.4. Determinazione del dosaggio della miscela

Dopo aver calcolato la percentuale in peso degli aggregati costituenti lo scheletro litico, fissato il contenuto di cemento (50 e 100 Kg/m³), di additivo (0.5%) e i rapporti a/p, si prosegue con il calcolo dei dosaggi finali di tutti i componenti della miscela in Kg/m³ tramite l'utilizzo delle corrispondenti masse volumiche. In particolare per questo ultimo passaggio si fa riferimento a un modello che considera 1 m³ di miscela composta solamente da cemento, aggregati, additivo e acqua.

Di seguito si riporta una tabella con i dosaggi (kg/m³) dei componenti che formano le quattro miscele cementizie.

Valutazioni preliminari per una corretta impostazione del mix design

Miscela M50	[Kg/m ³]	%	Miscela M100	[Kg/m ³]	%
Cemento	50	2,5	Cemento	100	4,7
Quarzite 0-8	1236,3	58,9	Quarzite 0-8	1212,8	57,5
Quarzite 8-14	191,5	9	Quarzite 8-14	187,9	8,9
Msludge	313,4	15	M sludge	307,5	14,5
Additive	0,25	0,012	Additive	0,5	0,024
Water _{add}	308,9	14,7	Water _{add}	305,3	14,5
W/P	0,85		W/P	0,75	

Miscela G50	[Kg/m ³]	%	Miscela G100	[Kg/m ³]	%
Cemento	50	2,3	Cemento	100	4,7
Quarzite 0-8	1236,9	57,9	Quarzite 0-8	1212,8	55,4
Quarzite 8-14	215,1	10	Quarzite 8-14	187,9	9,6
Gsludge	340,6	16	Gsludge	307,5	15,2
Additive	0,25	0,012	Additive	0,5	0,024
Water _{add}	293	13,7	Water _{add}	305,3	15
W/P	075		W/P	0,75	

Tabella 20: riporta i dosaggi di ogni componente, in Kg/m³, per ognuna delle quattro miscele oggetto di studio

Per conoscere i passaggi che portano alla determinazione di tali dosaggi si rimanda all'allegato E.

Capitolo 8. PROVE SPERIMENTALI

8.1. Modalità di preparazione delle miscele

Per la preparazione delle miscele, si procede con la pesatura dei componenti facendo riferimento ai dosaggi calcolati mediante i passaggi riportati nel capitolo precedente. Per gli aggregati è necessario che prima della pesatura questi siano essiccati in modo da perdere l'acqua trattenuta.

Successivamente gli ingredienti sono versati all'interno di un miscelatore con lo scopo di preparare l'impasto che sarà poi inserito all'interno dei provini. L'ordine di versamento dei componenti segue una regola: si inizia con il cemento precedentemente mescolato con il fango, aggregati e un quarto del contenuto di acqua con già all'interno l'additivo. Si aziona il miscelatore per cinque minuti, si interrompe e si aggiunge il resto dell'acqua più additivo e si prosegue la miscelazione per una decina di minuti fino a quando si crea un impasto omogeneo.



Figura 40: miscelatore utilizzato in laboratorio



Figura 41: impasto che si forma nel miscelatore

8.2. Prova di spandimento su piastra

Prima di confezionare i provini, bisogna verificare se il rapporto a/p ipotizzato sia in grado di restituire una miscela che abbia una certa fluidità e lavorabilità, che sia capace di auto-espandersi senza però avere effetti di segregazione e bleeding. La prova di spandimento su piastra serve a realizzare questa verifica.

La miscela ottenuta dal mix design, avendo ipotizzato un determinato rapporto acqua-polvere, viene inserita all'interno di uno stampo. Questo consiste in un cilindro di dimensioni standardizzate ($7,6 \pm 0,3$ cm di diametro interno e $15 \pm 0,3$ cm di altezza), anti aderente, posizionato sopra una piastra di plastica di dimensioni 40 x 40 cm. Il cilindro viene lentamente sollevato seguendo un movimento perpendicolare rispetto la piastra e la miscela si adagia su quest'ultima con una forma circolare. Viene valutato il diametro medio di spandimento e vi sono effetti di segregazione. Il diametro medio è la misura, mediante centimetro, del diametro di spandimento in una direzione e quello ad esso perpendicolare e, per una miscela efficiente questo deve essere compreso tra i 22 e i 25 cm.

Nel caso in cui questi requisiti non siano soddisfatti, si procede con la composizione di un nuovo impasto con a/p diverso e si ripete la prova di spandimento. Si avanza per tentativi fino a quando la miscela non raggiunge i requisiti di lavorabilità ricercati.



Figura 42: strumenti per la prova di spandimento

8.3. Confezionamento dei campioni cilindrici



Figura 43: stampo cilindrico di altezza 200 mm e diametro 100 mm

Una volta determinato il rapporto a/p per ognuna delle quattro miscele si prosegue con il confezionamento dei campioni. Si sono scelti degli stampi cilindrici di altezza 200 mm e diametro di 100mm. Ogni miscela viene versata all'interno dello stampo e fatta essiccare per un minimo di 24 h in condizioni ambiente prima di aprire lo stampo. Su tali campioni saranno poi eseguite le prove fisiche e meccaniche in laboratorio a tempi diversi di maturazione del campione.



Figura 44: stampi più malta all'interno



Figura 45: campioni induriti dopo un giorno di essiccazione

8.4. Prova in cella triassiale a carico ripetuto (modulo resiliente)

L'applicazione del materiale granulare oggetto di studio è quella di riempimento di sottofondi stradali ed è quindi importante conoscere il suo comportamento "elastico" quando viene sottoposto alle sollecitazioni ripetute dal passaggio dei veicoli, poiché tale comportamento influenza in maniera significativa le prestazioni delle pavimentazioni. Un indice in grado di caratterizzare questo comportamento è il modulo resiliente M_r che viene calcolato mediante una prova triassiale a carico ripetuto. Il conglomerato cementizio, come le terre, non ha un comportamento elastico di partenza ma se sottoposti a cicli di sollecitazione tendono a tale comportamento. Il modulo resiliente è un parametro richiesto dall'equazione di progettazione dello spessore dello strato di pavimentazione.

Prima di dare informazioni relative alla prova e al modulo, si analizzano gli stati tensionali nel caso stradale.

Le sollecitazioni dei carichi inducono negli strati dei sottofondi:

- Delle tensioni verticali σ_v ed orizzontali σ_h che variano con una legge assimilabile ad una sinusoide;
- Una variazione della direzione delle tensioni principali, evidenziata dalla variazione delle tensioni tangenziali anch'esse con legge assimilabile ad una sinusoide.

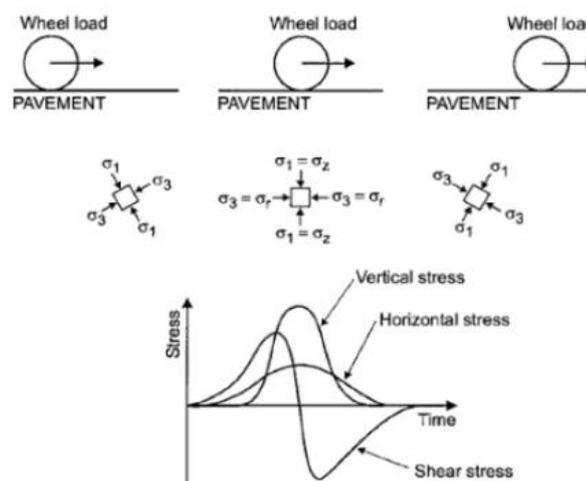


Figura 46: stato tensionale causato dal transito di un veicolo

In particolare analizzando lo stato tensionale nel tempo di un elementino di terreno attraversato da un carico si nota che al tempo $t=0$ la distanza orizzontale tra ruota ed elemento considerato è elevata, per cui le tensioni che agiscono sul punto medesimo sono trascurabili. Il carico avanza nel tempo in direzione orizzontale fino a raggiungere la distanza minima rispetto alla quale l'elemento di terreno inizia a risentire del carico e nascono delle tensioni, sul punto stesso, orizzontali, verticali e di taglio. Sia le tensioni verticali che quelle orizzontali, crescono all'aumentare del tempo fino a raggiungere il picco quando il baricentro della ruota si trova esattamente sulla verticale, dopo di che si ha un andamento decrescente. Quando si ha il valore di picco per le tensioni orizzontale e verticale, quella di taglio si annulla. Con il movimento del carico si verifica anche la rotazione dei piani principali.

In figura 48 è rappresentata la risposta dei materiali non legati sotto un generico ciclo di carico. In fase di carico si vede la non linearità, quindi il modulo di rigidità non è costante ma è funzione dello stato tensionale, mentre al termine della fase di scarico non si recupera tutta la deformazione. Quindi la risposta deformante dei materiali non legati sotto carichi ciclici è caratterizzata da una componente recuperabile (resiliente) ed una componente residua (permanente).

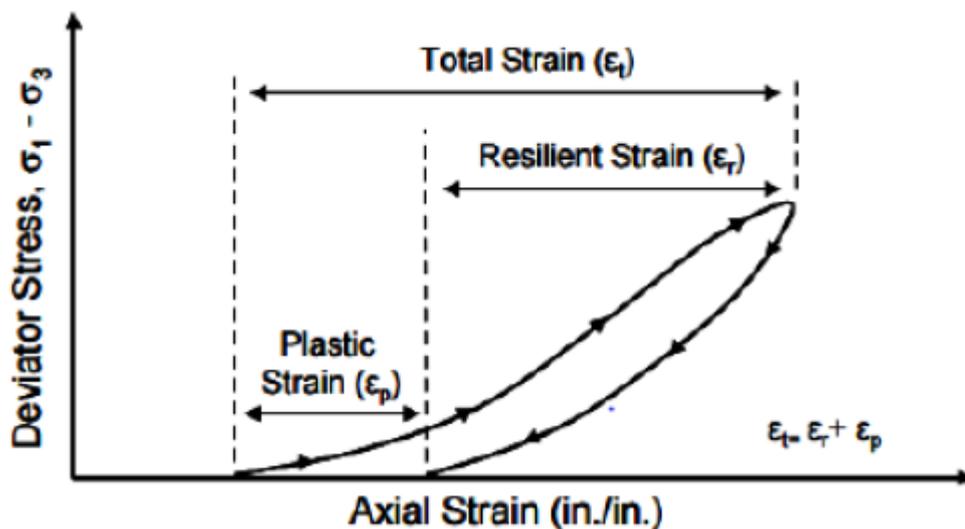


Figura 47: grafico tensione-deformazione

Quando un terreno è sottoposto a più cicli di carico, da un certo punto in poi la curva di carico si confonde con quella di scarico poiché la componente di deformazione permanente all'i-esimo ciclo tende progressivamente a ridursi e quella resiliente si assesta su un valore costante (deformazione elastica).

La prova triassiale a carico ripetuto è quella che meglio approssima il regime tenso-deformativo che si verifica in situ al passaggio dei veicoli e fornisce il modulo resiliente del conglomerato cementizio considerato come terreno. La prova segue la normativa AASHTO T307 che oltre a spiegare le modalità con cui deve essere eseguita, prescrive anche la dimensione dei provini di forma cilindrica in esame con altezza doppia rispetto al diametro. La macchina è composta da una cella all'interno della quale si posiziona il campione cementizio rivestito da una guaina impermeabile e confinato superiormente e inferiormente per mezzo di due dischi di pietra porosa. La cella trasmette una pressione isotropa al campione σ_3 , mentre lo sforzo assiale deviatorico $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ è provocato da un pistone che genera impulsi ciclici per mezzo di aria compressa. Considerando un generico istante, il provino all'interno della cella è sottoposto sulla superficie laterale a una pressione σ_3 e sulle basi ad una pressione $\sigma_1 = q + \sigma_3$. La pressione di confinamento (tensione minima) viene mantenuta in genere costante, mentre il deviatore di tensione σ_d funge da carico pulsante. La cella di carico elettronica ha lo scopo di misurare tale forza ed è posta tra l'attuatore e il pistone.



Figura 48: apparecchiatura della prova in cella triassiale a carico ripetuto

A destra e sinistra del pistone vi sono due trasduttori LVDT che convertono il movimento verticale in segnali elettrici e quindi misurano la deformazione assiale. Secondo la normativa i cicli di carico consistono in una fase di carico con durata 0.1 secondi e ha carattere impulsivo, successivamente si ha una fase di riposo 0.9 secondi quindi il ciclo i-esimo ha una durata di 1 secondo.



Figura 49: campione inserito nella cella triassiale

Per ricavare il modulo resiliente è necessario imporre una storia di carico e per il seguente studio è stata scelta quella relativa al materiale *base/subbase*. Si inizia con la fase di condizionamento del provino, in cui viene sottoposto a 500 stimoli (sequenza 0) il cui fine non è quello di determinare il modulo resiliente ma eliminare le imperfezioni di contatto all'interfaccia tra piatti di prova-provino e di eliminare gli effetti che si generano nell'intervallo di tempo compreso tra la sua compattazione e l'inizio della prova. Durante questa fase inoltre, la deformazione plastica o permanente tende a decrescere mentre quella resiliente ad aumentare fino a stabilizzarsi nell'intorno di un certo valore. Da questo momento è possibile calcolare il modulo resiliente.

Dopo questa fase, il conglomerato viene caricato secondo 15 sequenze di 100 impulsi ciascuna per un dato livello di sollecitazione e vengono registrate le deformazioni medie

recuperate per ciascun LVDT separatamente per gli ultimi cinque cicli. Le sequenze di carico per il materiale oggetto di studio, classificato *base/subbase*, sono riportate nella tabella 22.

Test Sequence	SUBGRADE			SUBBASE/BASE		
	Confining Pressure (psi)	Deviator (Axial) Stress (psi)	Bulk Stress (psi)	Confining Pressure (psi)	Deviator (Axial) Stress (psi)	Bulk Stress (psi)
0	6	4	22.0	15	15	60.0
1	6	2	20.0	3	3	12.0
2	6	4	22.0	3	6	15.0
3	6	6	24.0	3	9	18.0
4	6	8	26.0	5	5	20.0
5	6	10	28.0	5	10	25.0
6	4	2	14.0	5	15	30.0
7	4	4	16.0	10	10	40.0
8	4	6	18.0	10	20	50.0
9	4	8	20.0	10	30	60.0
10	4	10	22.0	15	10	55.0
11	2	2	8.0	15	15	60.0
12	2	4	10.0	15	30	75.0
13	2	6	12.0	20	15	75.0
14	2	8	14.0	20	20	80.0
15	2	10	16.0	20	40	100.0

Tabella 21: sequenze di carico per subgrade e subbase

Le deformazioni resilienti sono calcolate:

$$\varepsilon_{1,r} = \frac{\Delta h_r}{h_i}$$

Dove:

- Δh_r = la variazione di altezza del provino, esaurita la componente di deformazione plastica;
- h_i = l'altezza iniziale del provino, dopo i 500 colpi di condizionamento.

A questo punto è possibile conoscere il valore della risposta elastica del materiale in funzione del livello di stress. Il modulo resiliente è espresso dal rapporto tra la tensione deviatorica e la deformazione elastica verticale:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{1,r}}$$

Per ogni ciclo di carico, la macchina registra i seguenti dati:

- ϵ_p , deformazione permanente;
- σ_3 , tensione di confinamento;
- σ_{vmax} , tensione assiale massima;
- P_{vmax} , carico massimo assiale;
- P_{vciclo} , carico di ciclo;
- $P_v \text{ contatto}$, carico di contatto;
- Δh , spostamento resiliente medio;
- ϵ_r , deformazione resiliente;
- M_r , modulo resiliente.

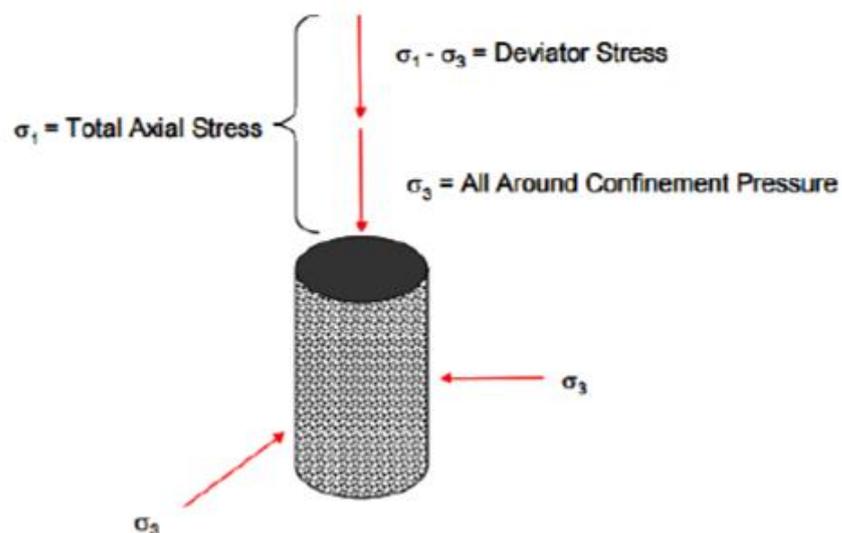


Figura 50: stato tensionale sul provino

8.4.1. Modelli analitici per l'interpretazione del M_r

I modelli analitici sono uno un'efficiente strumento in grado di descrivere un determinato fenomeno in forma analitica e quindi permettono di stimare parametri, come in questo studio il modulo resiliente, quando non si ha la possibilità di effettuare prove in laboratorio e/o quando non si hanno alcuni dati sperimentali.

In questo elaborato di tesi sono stati analizzati quattro differenti modelli analitici che permettono di ricavare un certo valore del modulo resiliente il quale viene confrontato con quello misurato dalla prova triassiale. il confronto suggerisce quale tra i quattro modelli proposti è quello più adatto per questo tipo di conglomerato.

il comportamento resiliente dei materiali granulari è maggiormente influenzato dallo stato tensionale, quindi è necessario un modello analitico in grado di legare il modulo resiliente allo stato tensionale a cui è sottoposto, tenendo in considerazione che la risposta dei materiali granulari non è lineare; infatti la legge che lega il deviatore delle tensioni q e la corrispondente deformazione resiliente è una curva.

Tra i vari modelli presenti in letteratura sono stati tenuti in considerazione i seguenti:

- Hicks – Monismith;
- Uzan;
- Puppala;
- MEPDG.

Il modello di *Hicks – Monismith*, denominato anche modello “ $k-\theta$ ”, è il modello più utilizzato nella letteratura e anche il più semplice. In questo modello, il modulo resiliente dipende dalla somma delle tre tensioni principali o tensione volumetrica ed è legato a questa tramite due costanti che dipendono dalle proprietà fisiche del materiale.

$$M_r = K_1 \cdot \theta^{K_2}$$

Dove:

- K_1 e K_2 sono le costanti di regressione;
- $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ tensione volumetrica.

Le costanti di regressione assumono diversi valori in relazione alle caratteristiche dei materiali come granulometria dell'aggregato, forma densità e contenuto in acqua.

Il modello è sicuramente semplice e facilita il problema ma presenta delle criticità che lo porta da essere poco preciso per cui diversi studiosi hanno apportato modifiche negli anni. Alcuni ricercatori hanno infatti osservato che, tramite prove in situ, il modulo resiliente dei materiali granulari è funzione non solo delle tensioni volumetriche, ma anche della intensità della deformazione di scorrimento indotta principalmente dalla tensione deviatorica. *Uzan* aggiunse un termine contenente la tensione deviatorica al modello K- θ :

$$M_r = K_1 \cdot \theta^{K_2} \cdot q^{K_3}$$

Dove:

- K1, K2 e K3 sono le costanti di regressione;
- θ la tensione volumetrica;
- $q = \sigma_3 - \sigma_1$ tensione deviatorica.

Per MPEDG, la tensione deviatorica, presente nel modello *Uzan*, è sostituita dalla tensione ottaedrica quindi questo modello si sviluppa nel caso tridimensionale:

$$M_r = K_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{K_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{K_3}$$

Dove

- K1, K2 e K3 sono le costanti di regressione;
- p_a è la pressione atmosferica;
- θ è il primo invariante;
- $\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$ è la tensione di taglio ottaedrale:
 - $\sigma_2 = \sigma_3$ è la tensione laterale di confinamento;

- σ_1 è la tensione principale massima.

Il modello *Puppola* supera la criticità del modello $k-\theta$ inserendo oltre la tensione deviatorica anche quella di confinamento:

$$M_r = K_3 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{K_4} \cdot \left(\frac{q}{p_a}\right)^{K_5} \cdot p_a$$

Dove:

- K_3 , K_4 e K_5 sono le costanti di regressione;
- σ_3 è la tensione laterale di confinamento;
- p_a è la pressione atmosferica;
- q è la tensione deviatorica.

8.5. Prova relativa alla conducibilità termica

La conducibilità termica (o conduttività termica) è una proprietà intensiva del materiale che esprime la sua attitudine a condurre il calore, dando un'idea della velocità con cui il calore stesso è trasferito per conduzione all'interno del campione e da esso verso l'esterno. Secondo il Sistema Internazionale la conduttività viene espressa in $W/(m \times K)$, dove il watt è l'unità di misura della potenza, il metro della lunghezza e il kelvin della temperatura.

In questo studio la misura della conducibilità termica avviene mediante l'utilizzo di un dispositivo chiamato KD2 Pro. Questo è costituito da un palmare in cui si possono leggere le informazioni relative al valore di conducibilità in $W/(m \times K)$, temperatura del provino prima dell'inizio della prova e l'errore commesso dalla misurazione; da una sonda ad ago che viene introdotta all'interno del provino cilindrico mediante apposito foro. La sonda utilizzata è il modello RK-1 di lunghezza 6 cm e diametro 3.9 mm.



Figura 51: Sensore KD-2 PRO

Il foro viene realizzato con un trapano e deve essere il più omogeneo possibile, in modo da rendere minimo lo spazio di vuoto tra il sondino e il materiale per non andare a compromettere le misure. La sonda è costituita al suo internodo un riscaldatore e un sensore di temperatura. Una corrente passa attraverso il riscaldatore e il sistema monitora la temperatura del sensore nel tempo. Tramite algoritmi che dipendono dal modello di sonda utilizzata, caratteristiche del conglomerato e i valori di temperatura registrati durante la prova, è possibile risalire al valore di conducibilità termica. È molto importante mantenere la sonda all'interno del provino per una decina di minuti prima di azionare lo strumento, in modo che il sensore si acclimi ed inoltre bisogna assicurarsi che le condizioni ambientali non varino durante tutta la durata della prova. Il calore viene immesso nel conglomerato per metà del tempo della prova che generalmente è attorno ai dieci minuti, le temperature registrate sono sedici.

Oltre alla resistenza di contatto tra sensore e materiale, un altro fattore in grado di compromettere la misura è la migrazione dell'acqua dalla regione in cui viene emesso il calore. Questo succede quando la potenza emessa per unità di area dell'ago è elevata e quando la sonda impiega troppo tempo per riscaldarsi. La migrazione dell'umidità dalla

regione di misurazione porta a ottenere un valore di conducibilità del materiale minore rispetto a quello reale.

Capitolo 9. **RISULTATI**

9.1. Risultati della prova di spandimento

Per ognuna delle quattro miscele (M_50, M_100, G_50 e G_100) sono stati ipotizzati sei rapporti a/p acqua-polvere: 0.6, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9.

Si è scelto un rapporto di 0.75 per tutti gli impasti tranne per quello di M_50 in cui si è optato per 0.85.

Per facilitare la spiegazione della scelta presa relativa al rapporto a/p, si riportano le tabelle con i diametri di spandimento e le foto delle prove.



Figura 52: da sinistra M50 0.6, M50 0.7, M50 0.8, In basso da sinistra M50 0.85 e M50 0.9

Miscela M_50						
a/p	0.6	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
Diametro di spandimento [cm]	12	15	/	21	24	26

Tabella 22: diametri di spandimento della miscela M50, a/p scelto è 0.85



Figura 53: da sinistra G50 0.6, G50 0.7, In basso da sinistra G50 0.75 e G50 0.8

Miscela G_50						
a/p	0.6	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
Diametro di spandimento [cm]	12	19	25	27	/	/

Tabella 23: diametri di spandimento della miscela G50, a/p scelto è 0.75



Figura 54: da sinistra M100 0.6, M100 0.7, In basso da sinistra M100 0.75 e M100 0.8

Miscela M_100						
a/p	0.6	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
Diametro di spandimento [cm]	14	17.5	22	24	/	/

Tabella 24: diametri di spandimento della miscela M100, a/p scelto è 0.75



Figura 55: da sinistra G100 0.7, G100 0.75, In basso G100 0.8

Miscela G_100						
a/p	0.6	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
Diametro di spandimento [cm]	17	18.5	24	28	/	/

Tabella 25: diametri di spandimento della miscela G100, a/p scelto è 0.75

Effetti della variazione di a/p sulla fluidità

Come mostrato in figura 57, all'aumentare del rapporto a/p aumenta il diametro di spandimento poiché aumenta il contenuto di acqua libera nello scheletro litico del campione. A parità di diametro di spandimento, la miscela con fango M necessita di più acqua rispetto a quella con fango G; questo può essere dovuto al fatto che il fango M è più sensibile all'acqua per cui assorbe di più rispetto a quello G.

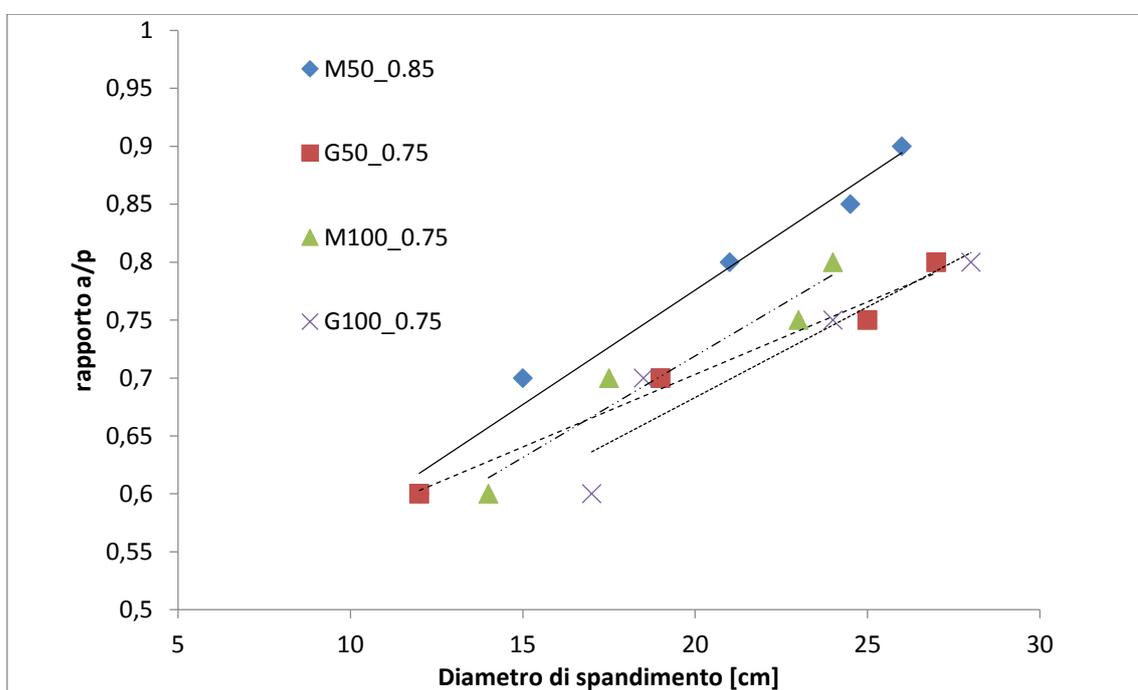


Figura 56: influenza di a/p sul diametro di spandimento

Influenza del contenuto di cemento sul diametro di spandimento

Le miscele caratterizzate da maggior contenuto di cemento presentano dei diametri di spandimento minori. L'acqua libera presente nei vuoti dello scheletro litico forma una pasta con il cemento con una viscosità minore rispetto a quella dell'acqua.

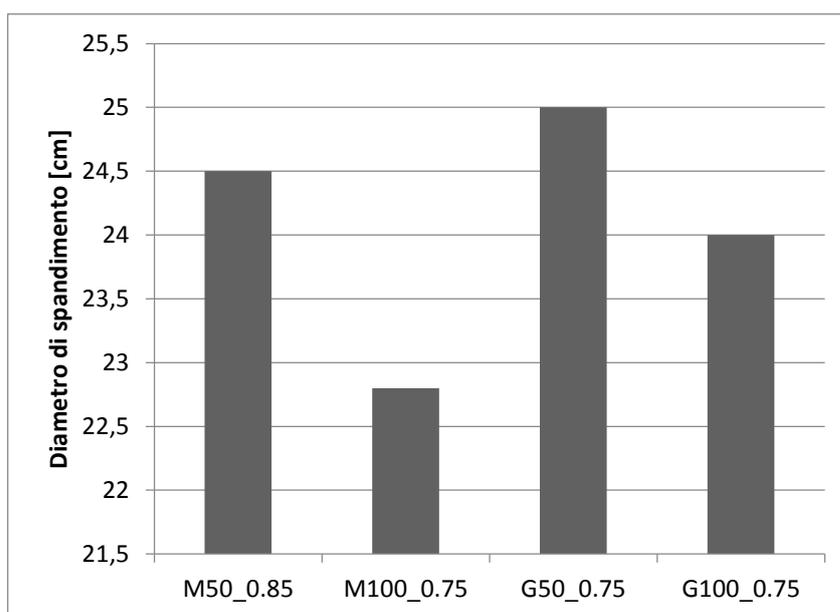


Figura 57: Influenza del contenuto di cemento sul diametro di spandimento

9.2. Risultati relativi alla prova in cella triassiale a carico ripetuto a 28 giorni di maturazione

I risultati della prove triassiale a carico ripetuto sono stati forniti dal programma in file txt e successivamente riportati su excel per procedere con l'analisi.

In figura 59 sono rappresentati gli andamenti dei moduli resilienti ottenuti a 28 giorni di maturazione dei quattro campioni insieme ai valori limiti relativi ai tipici materiali granulari usati per i sottofondi stradali.

I valori ottenuti per ogni tipologia di miscela seguono circa lo stesso trend e si osserva come tutti rientrano nel campo delimitato dai valori presenti in letteratura per i materiali granulari, per cui si può affermare che le malte oggetto di studio possiedono un comportamento simile a quello dei materiali granulari non leganti.

Dai grafici si nota anche come all'aumentare del primo invariante Θ è associato un incremento del modulo resiliente MR delle miscele. Questo tipo di comportamento viene detto "stress-stiffening" ed è tipico dei terreni granulari.

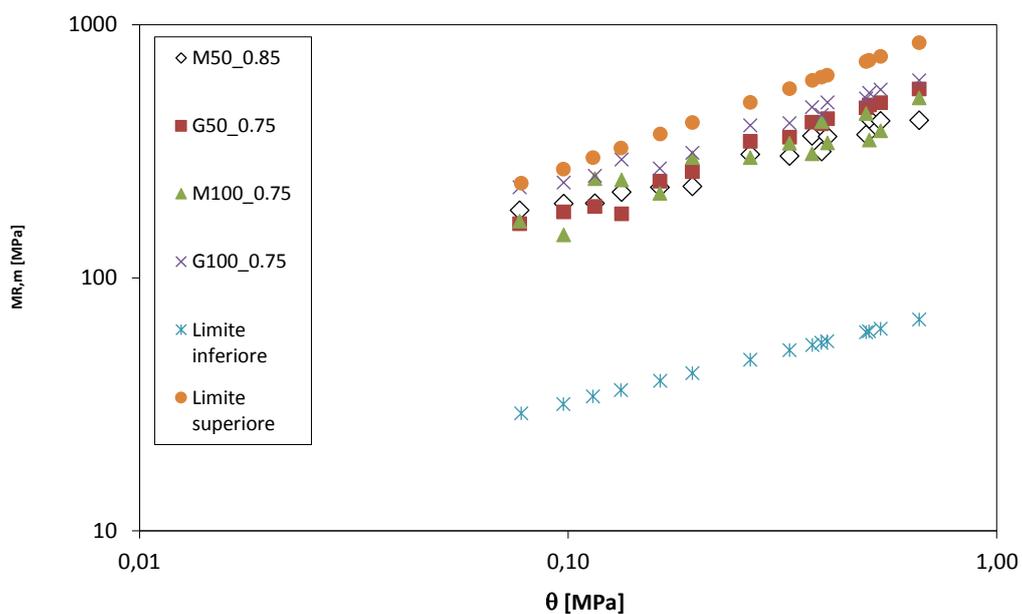


Figura 58: andamento del M_r con il primo invariante di ogni miscela e dei terreni granulari considerati limiti

Effetti della variazione del contenuto di cemento sul modulo resiliente a 28 giorni di maturazione

Il grafico riporta gli andamenti del modulo resiliente in funzione del primo invariante Θ . In particolare si vuole analizzare l'influenza del contenuto in cemento sulla determinazione del modulo resiliente. Per tale analisi, si confrontano le miscele G50_0,75 e G100_0,75.

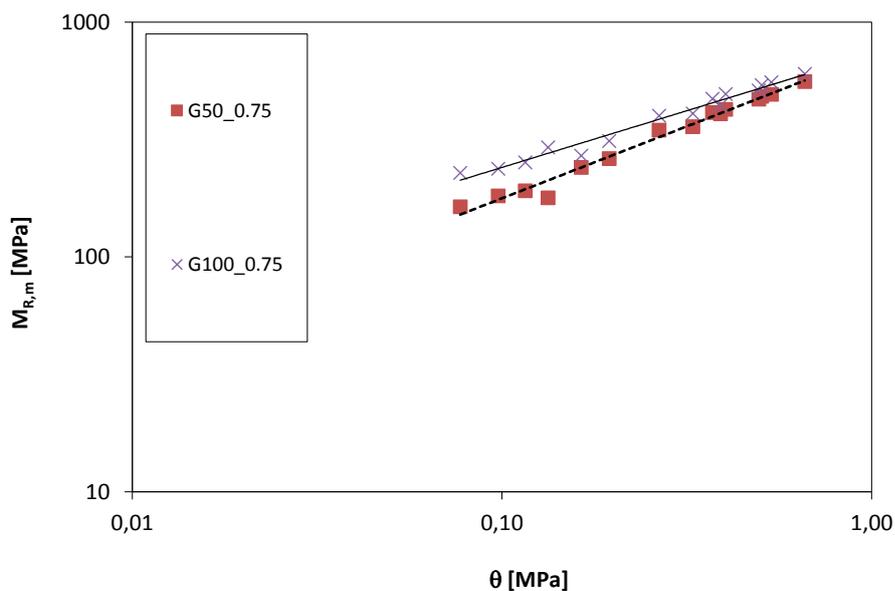


Figura 59: influenza del contenuto di cemento nel M_r a 28 giorni

A parità di tipologia di fango e di rapporto a/p, aumentando il contenuto di cemento la rigidità aumenta di poco. Inoltre per le miscele con 50 Kg/m³ si ha un comportamento di stress-stiffening leggermente più accentuato.

Effetti della tipologia di fango sul modulo resiliente a 28 giorni di maturazione

I grafici mostrano gli andamenti del modulo resiliente in funzione del primo invariante analizzando in questo caso come la tipologia di fango influenzi tale valore, mantenendo costante per entrambi il contenuto di cemento e il rapporto a/p.

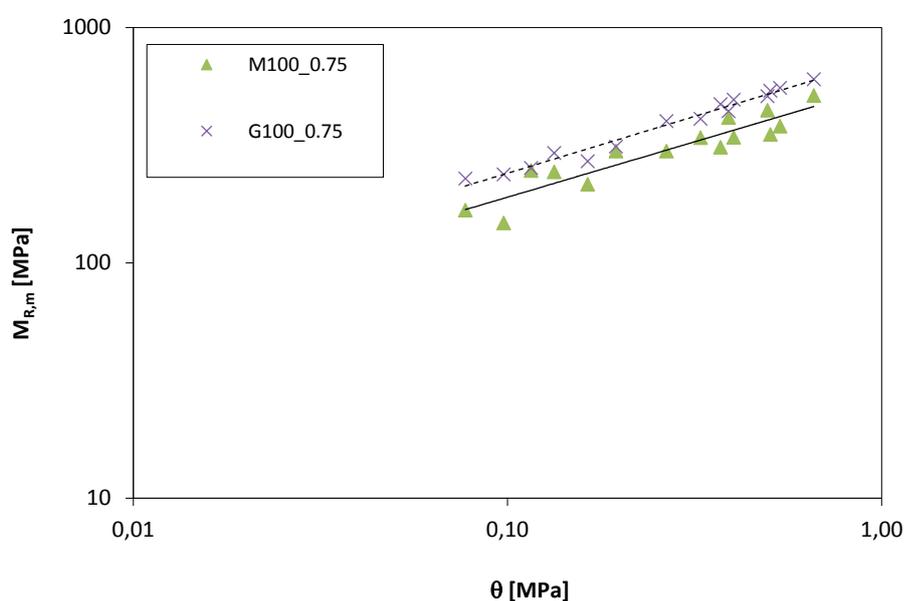


Figura 60: influenza della tipologia di cemento sul M_r a 28 di maturazione

Il fango provenientedallo stabilimento G offre maggiore resistenze al campione di CLSM rispetto a quello M. Una spiegazione può essere data dal fatto che il fango G viene dosato con una percentuale in peso maggiore rispetto a quello M e la densità è maggiore.

Effetti del rapporto a/p sul modulo resiliente a 28 giorni di maturazione

Si analizza l'influenza del rapporto a/p sul modulo resiliente nonostante le due miscele confrontate varino anche per tipologia di fango.

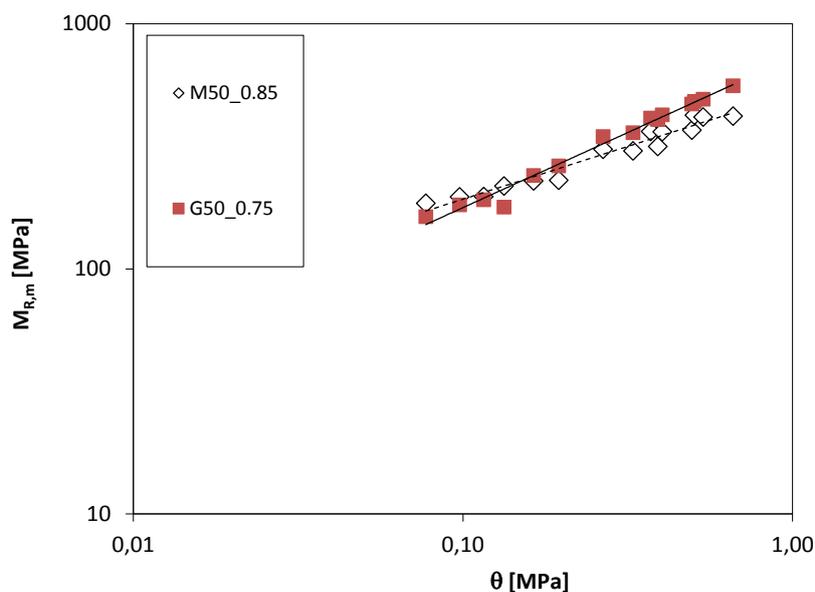
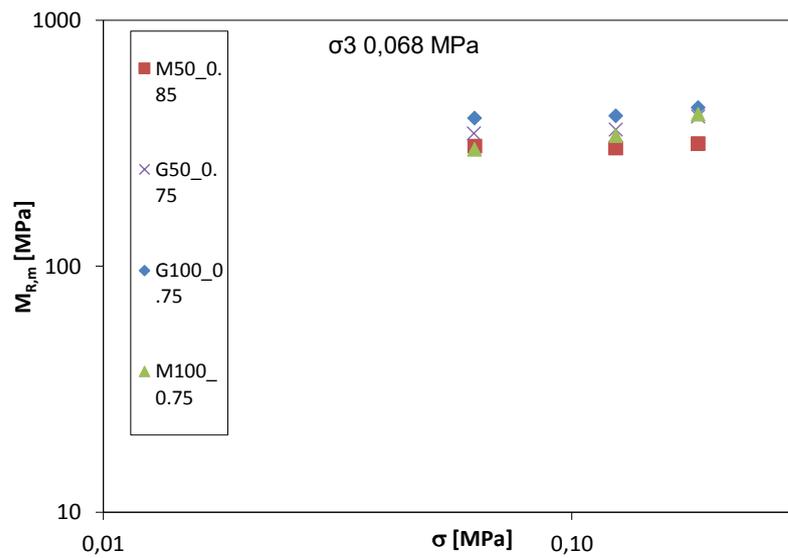
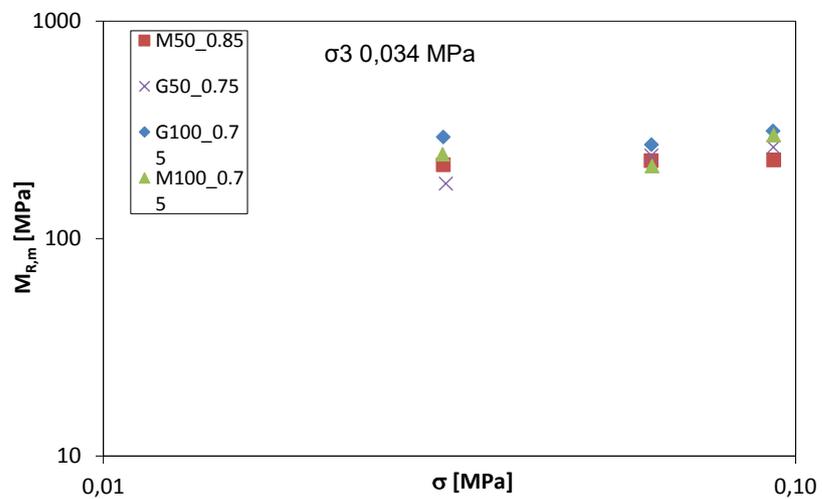
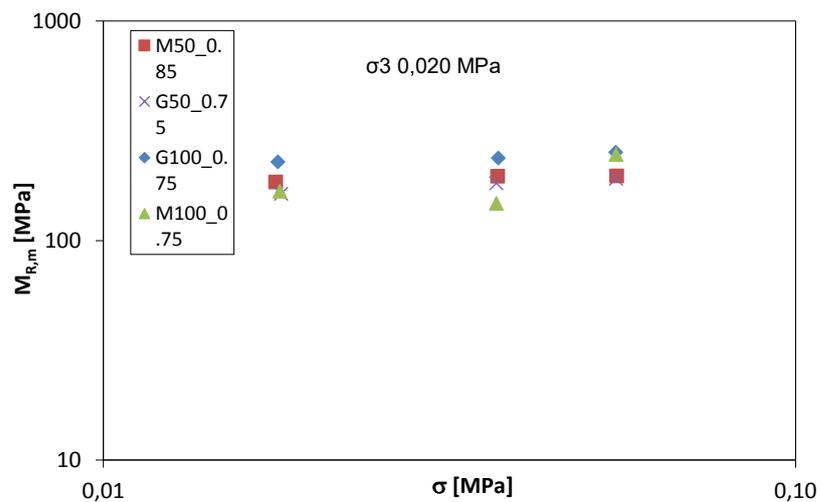


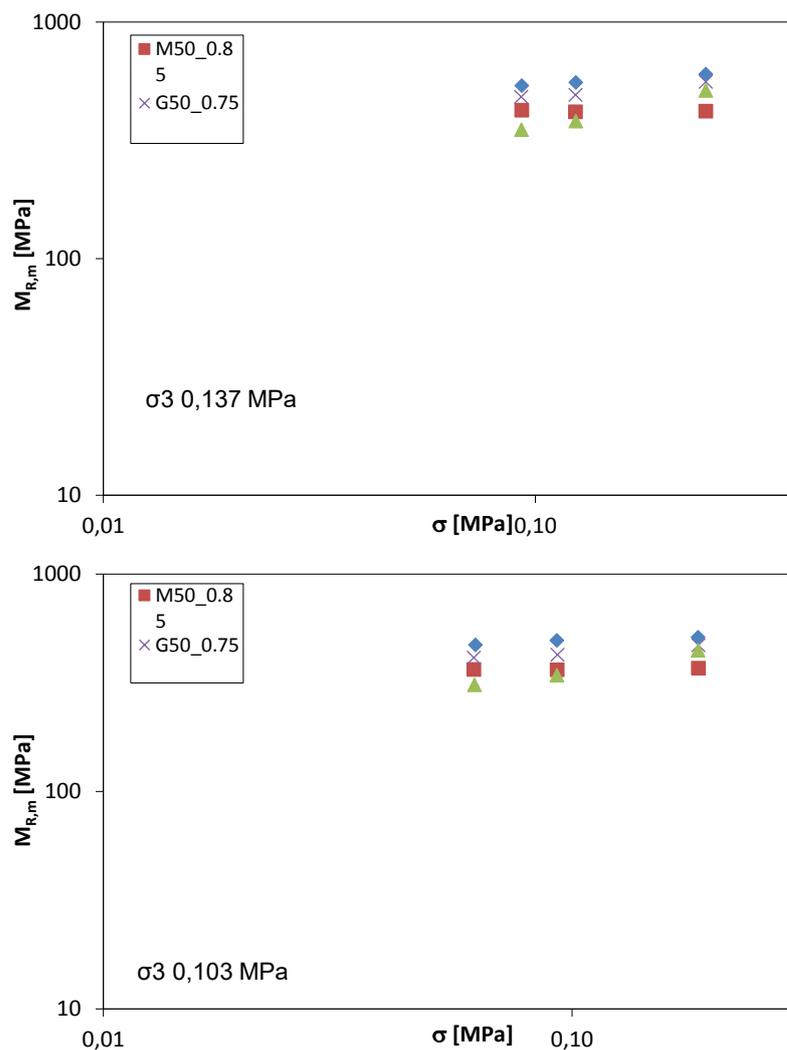
Figura 61: influenza di a/p sul Mr a 28 giorni di maturazione

A parità di contenuto di cemento, si nota come all'aumentare del rapporto a/p e quindi dell'umidità, diminuisce leggermente il modulo resiliente ovvero il materiale perde la sua rigidità in modo non molto sensibile. Questo è dovuto al fatto che un maggiore volume d'acqua causa, a seguito dell'indurimento del materiale, una percentuale dei vuoti maggiore. Tali pori rappresentano dei punti di debolezza del materiale e contribuiscono alla formazione di fessure nel momento in cui il materiale è soggetto a dei carichi.

Effetti della variazione della pressione di confinamento sul modulo resiliente a 28 giorni di maturazione

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove sul modulo resiliente a 28 giorni di maturazione ed in particolare i valori ottenuti vengono rappresentati in funzione della tensione deviatorica σ_d per le cinque differenti pressioni di confinamento σ_3 .





All'aumentare della pressione di confinamento, il modulo resiliente cresce. Questo comportamento può essere spiegato dal fatto che all'aumentare della pressione di confinamento il campione di calcestruzzo diventa sempre più rigido e forte, fornendo dunque valori di modulo più elevati. A parità di pressione di confinamento applicata, il modulo resiliente aumenta con la tensione deviatorica e questo è possibile perché i campioni compattati quando sono soggetti a carichi assiali più elevati tendono a diventare più duri, diminuendo le proprie deformazioni assiali e dunque restituendo valori di moduli elevati.

Modellazione dei moduli resilienti

Nella tabella 27 sono riportati i valori della costante di determinazione R^2 e delle costanti di regressione K_1 , K_2 e K_3 , ricavati dall'analisi di regressione sui dati ottenuti dalla prova triassiale a 28 giorni. La prima costante è quella influisce maggiormente nella scelta del modello, ovvero quel modello che restituisce un valore di modulo resiliente simile a quello misurato dalla prova. R^2 infatti varia da 0 a 1 e più si è vicino all'unità e più il modello è attendibile. Si nota come i modelli a tre variabili siano molto più rappresentativi rispetto a quello a due variabili proposto da Hiks-Monismith, grazie proprio alla propria natura multi variabile.

Modello	Miscela	K1	K2	K3	R2
Hiks-Monismith	M50_0.85	1889	0,44		0,9488
	G50_0.75	1774	0,61		0,9908
	M100_0.75	1908	0,47		0,8569
	G100_0.75	2358	0,50		0,9803
Uzan	M50_0.85	1570	0,59	-0,17	0,9944
	G50_0.75	1708	0,64	-0,03	0,9919
	M100_0.75	2530	0,23	0,26	0,9479
	G100_0.75	2132	0,58	-0,09	0,9919
MEPDG	M50_0.85	1972	0,55	-0,42	0,9874
	G50_0.75	1787	0,64	-0,09	0,992
	M100_0.75	1769	0,27	0,74	0,9544
	G100_0.75	2402	0,55	-0,19	0,9875
Puppala	M50_0.85	3610	0,41	0,01	0,994
	G50_0.75	4210	0,44	0,16	0,9898
	M100_0.75	3503	0,16	0,34	0,9466
	G100_0.75	4804	0,40	0,08	0,9924

Tabella 26: parametri dei modelli per le miscele realizzate in laboratorio

Prendendo in considerazione il modello sul modulo resiliente proposto da Puppala, si osserva che si è ottenuto un valore medio del coefficiente di determinazione pari a 0,98 il quale indica che il modello rappresenta bene i dati ottenuti dalle prove.

Si può osservare che la costante K_1 , che può essere vista come un indicatore della magnitudo del modulo resiliente, ha subito piccole variazioni in funzione del contenuto in cemento. Al contrario, si osserva un maggiore aumento di tale costante al variare della tipologia di fango.

La costante K2 che varia da 0,16 a 0,44 indica che c'è una dipendenza non lineare tra il modulo resiliente e la pressione di confinamento.

La costante K3 assume un valore positivo e ciò indica che c'è un comportamento di stress-stiffening.

9.3. Risultati della prova di conducibilità termica

Nel seguente elaborato di tesi è stata misurata la conducibilità termica dei quattro provini a 6 e 18 giorni di maturazione. Al diciottesimo giorno, dopo la misura, gli stessi sono stati messi in forno a 60 ° per 48h ed è stata ripetuta la prova di conducibilità in modo da determinare la loro stabilità termica. La prova è stata ripetuta tre volte

Conducibilità termica a sei giorni di maturazione

Il grafico 63 riporta i valori di conducibilità termica di quattro provini al sesto giorno di maturazione.

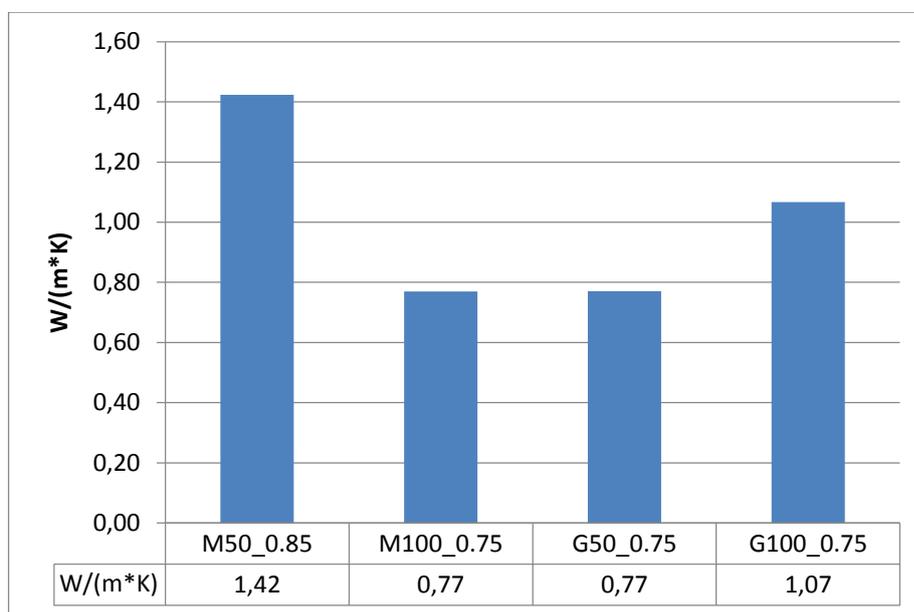


Figura 62: istogramma dei valori di conducibilità termica al sesto giorno di maturazione dei campioni

il provino M50_0.85 è quello che presenta un maggior valore di conducibilità termica. Il risultato ottenuto è giustificato dal fatto che questo presenta un contenuto di acqua libera maggiore rispetto agli altri, si veda anche dal rapporto a/p stabilito, e l'acqua si

comporta come buon conduttore. Inoltre la misura è stata fatta il sesto giorno di maturazione, per cui l'acqua non ha avuto abbastanza tempo di liberarsi dallo scheletro litico dei provini. In questo caso, quindi, l'acqua è il fattore che predomina sulla conducibilità termica rispetto agli altri componenti.

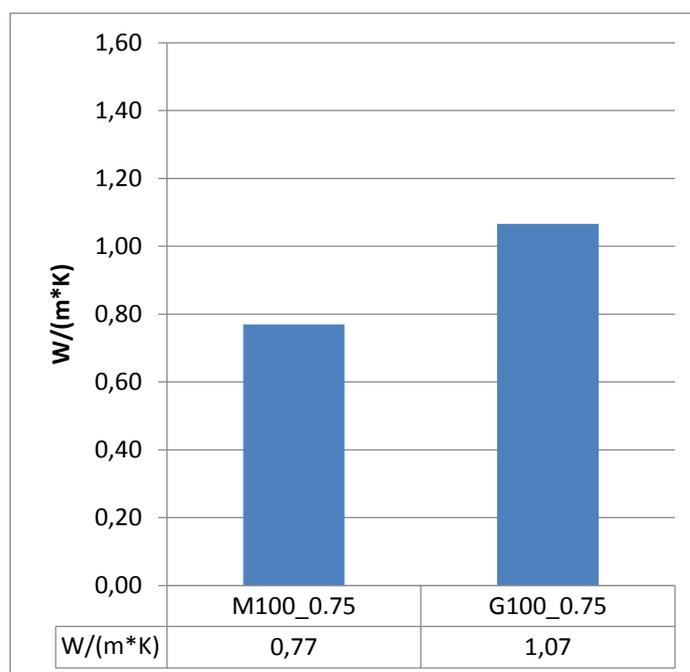


Figura 63: influenza della tipologia di fango nella conducibilità termica

Confrontando invece la tipologia di fango, fissato il contenuto di cemento in Kg/m³ e rapporto a/p, il provino costituito dal fango proveniente dallo stabilimento G risulta più conduttivo rispetto a quello con il fango M. Il fango G è stato usato in dosi maggiori rispetto a quello M, come suggerisce il mix-design, e inoltre è caratterizzato da un contenuto di minerali di quarzo superiore rispetto a M.

Conducibilità termica a diciotto giorni

I grafici successivi presentano i valori di conducibilità termica dei quattro provini al diciottesimo giorno di maturazione.

Non è possibile confrontare i risultati con quelli ottenuti al sesto giorno, perché i provini utilizzati per le due misure sono diversi. Essi sono stati confezionati utilizzando lo stesso procedimento e gli stessi dosaggi ma si possono comunque trovare differenze a livello microscopico. Questa scelta è stata fatta perché durante la prova dei sei giorni alcuni

campioni si sono danneggiati a causa della loro fragilità dovuta al poco tempo di maturazione.

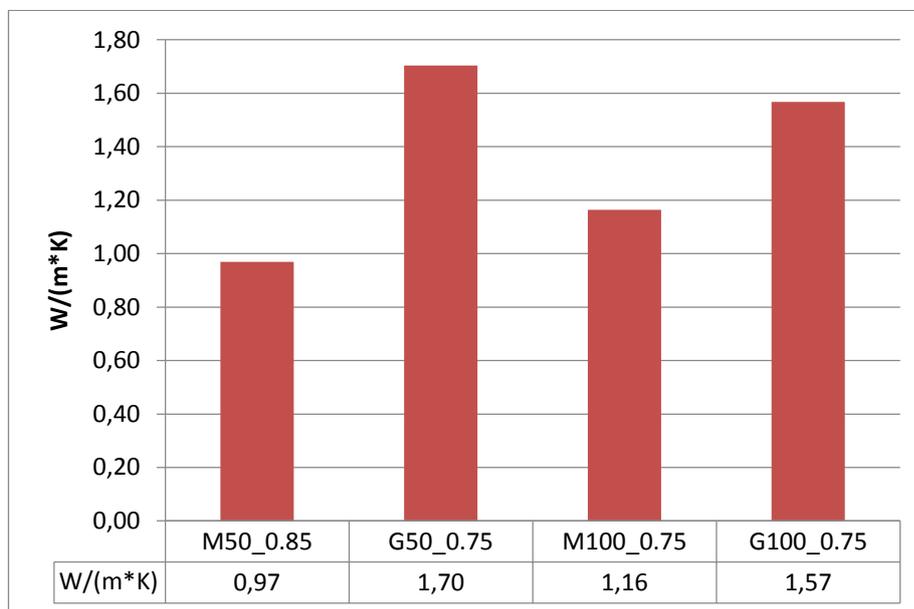


Figura 64: istogramma dei valori di conducibilità termica al diciottesimo giorno di maturazione dei campioni

La misurazione al diciottesimo giorno ha rivelato che il campione G50_0,75 è il più conduttivo. Entrambi i provini costituiti dal fango G presentano valori di conducibilità maggiori rispetto a quelli M grazie ad un maggior dosaggio nella composizione del mix, maggior contenuto del minerale quarzo e densità.

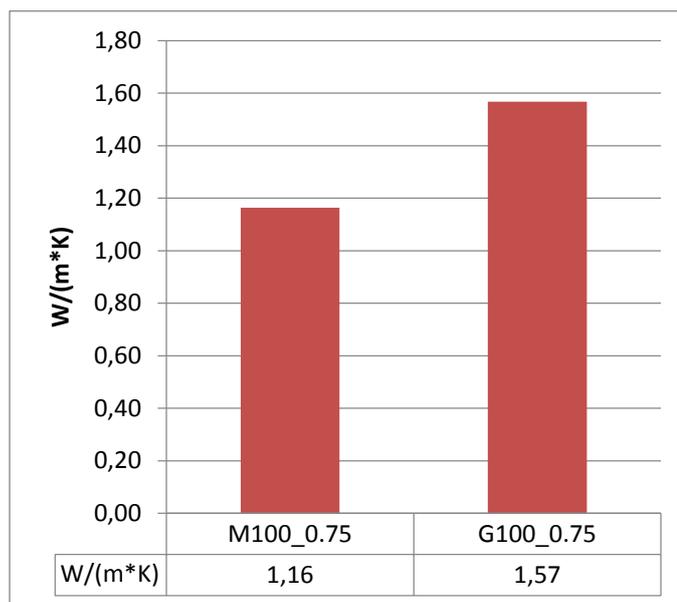


Figura 65: influenza della tipologia di fango nella conducibilità termica

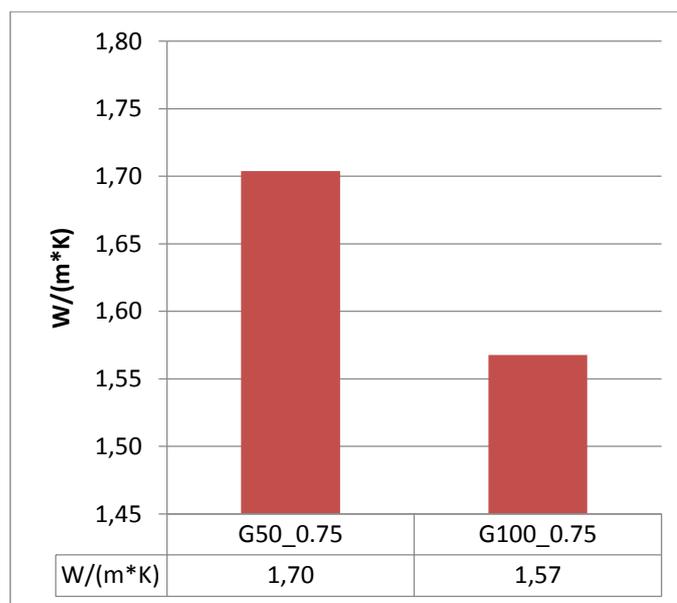


Figura 66: influenza del contenuto di cemento nella conducibilità termica

Al diciottesimo giorno, nei campioni è ancora presente dell'acqua all'interno dello scheletro litico che manifesta una certa influenza sulla misura della conducibilità. È vero che per il provino G50_0,75 è stata utilizzata meno acqua (circa il 7% in meno) rispetto G100_0,75, ma per quest'ultimo è stato usato il 12% di aggregati in meno. Per cui, al diciottesimo giorno, il contenuto di acqua sommato a quello degli aggregati ha un peso maggiore sulla determinazione della conducibilità rispetto al contenuto in cemento.

Stabilità termica

Per dimostrare l'effettiva efficienza del CLSM confezionato, è necessario testarlo nelle sue condizioni a secco, ovvero quelle di reale applicazione. Infatti, uno degli obiettivi del CLSM è quella di mantenere un'elevata conducibilità indipendentemente dai valori di umidità. Dovrà essere in grado di dissipare il calore generato dai cavi nelle condizioni secche, garantendo quindi una certa stabilità termica.

Gli stessi provini del diciottesimo giorno, sono stati messi in forno per 48 h a 60° C e nel grafico si riportano i risultati.

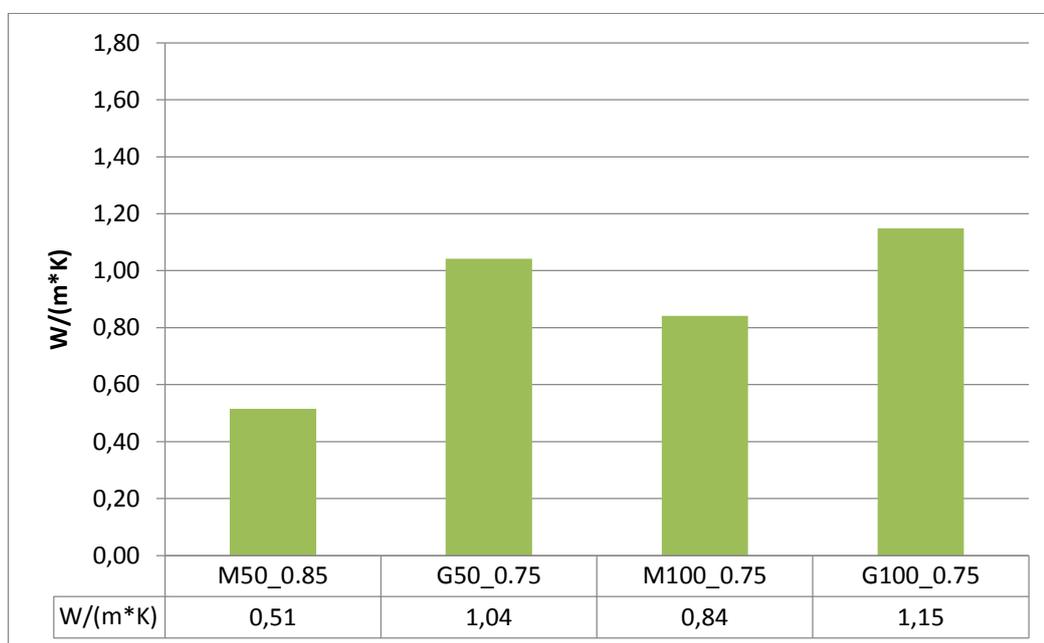


Figura 67: conducibilità termica dei campioni nelle condizioni dry

Come si aspetta, il provino con il fango G ha sempre valori di conducibilità maggiori ma, nelle condizioni dry il cemento è il componente che predomina sulla conducibilità, perché va occupare i vuoti al posto dell'aria.

Confronto della conducibilità termica nelle condizioni a secco e a diciotto giorni di maturazione

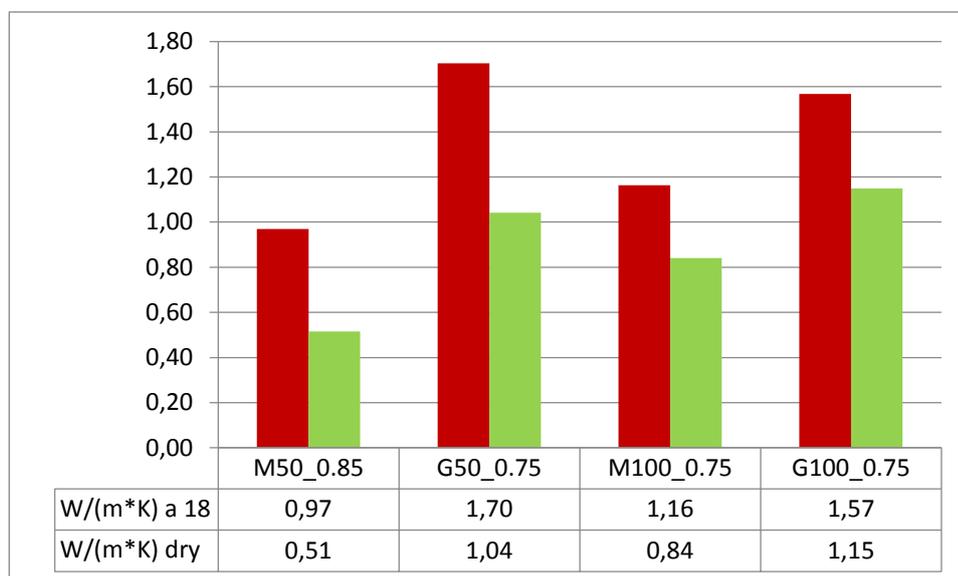


Figura 68: confronto della conducibilità termica nelle condizioni di secco e a diciotto giorni

I CLSMs possiedono un'efficiente stabilità termica infatti la variazione della conduttività termica con la riduzione del contenuto di acqua è bassa, quindi è verificata la propria stabilità termica.

Di seguito si riporta la percentuale di acqua evaporata durante l'essiccazione in forno, il campione M50_0.85 è quello che raggiunge la percentuale maggiore.

	M50_0,85	G50_0,75	M100_0,75	G100_0,75
% acqua persa	9,5	6,2	7,3	6,2

Tabella 27: percentuale di acqua evaporata

Capitolo 10. CONCLUSIONI

Lo scopo del seguente studio è quello di dimostrare il possibile recupero del fango di segazione nello stato *tal quale* per il confezionamento di una malta cementizia a resistenza controllata (CLSM) impiegata come sottofondo stradale.

Poiché gli aggregati a disposizione, come appunto il fango di segazione, non fanno parte dei materiali normalmente utilizzati, si è proposta una metodologia di mix-design sperimentale che impiega la curva di distribuzione granulometrica di "A&A" modificata per la composizione dello scheletro litico.

Sono state confezionate quattro miscele che si distinguono principalmente per tipologia di fango (M e G) e contenuto di cemento e sono state analizzate le relative proprietà allo stato fluido ed indurito.

Lo scopo è stato quello di ottenere un materiale fluido, autolivellante, con una adeguata portanza nel breve termine e limitata resistenza meccanica nel lungo termine, avente una buona conducibilità termica e contenente fango di recupero.

Dallo studio effettuato si evince come la metodologia di mix design proposta, basata sull'utilizzo della curva di riferimento di *Andreasen and Andersen modificata*, si presta bene ad essere utilizzata per la progettazione di malte cementizie fluide contenenti elevate quantità di fanghi di segazione e quarziti. La granulometria e il rapporto acqua-polvere sono i parametri che influenzano maggiormente il mix.

Per quanto riguarda le caratteristiche delle quattro miscele si evince che:

- Al variare de rapporto acqua/polvere cambiano sensibilmente le proprietà di lavorabilità, fluidità e di conducibilità termica. Mentre influisce poco sulla riposta resiliente dei materiali.
- All'aumentare del contenuto in cemento peggiorano le proprietà di fluidità mentre migliorano quelle di resistenza e di conducibilità termica nelle condizioni di secco.

In definitiva si può affermare che ogni miscela è in grado di soddisfare i requisiti che sono richiesti.

Con una buona regolazione di a/p si è in grado di determinare un'efficiente fluidità per ognuna delle quattro miscele.

La risposta resiliente di ogni miscela risulta simile a quella dei tradizionali materiali granulari non legati, per cui si assicurano resistenze basse a lungo termine e quindi facile rimozione in caso di rottura dei sottoservizi.

Dal punto di vista della conducibilità termica, la scelta di utilizzare fango di segagione e quarzite ha portato un valore aggiunto. Infatti, generalmente i CLSM costituiti da aggregati standard possiedono dei valori di conducibilità vicini allo $0,5 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, mentre in questo studio si raggiungono valori simili al $0,8- 1 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ nelle condizioni di dry.

In aggiunta si osserva che le malte cementizie a resistenza controllata CLSM costituite dai fanghi G presentano migliori efficienze in termini di conducibilità termica, fluidità e resistenze rispetto a quelle con M. Queste differenze sono dovute alle diverse proprietà chimiche dei fanghi campioni che vanno ad influenzare le reazioni con gli altri componenti costituenti della miscela.

Per quanto riguarda il contenuto in cemento, le miscele con un contenuto più elevato garantiscono prestazioni migliori a fronte di costi maggiori. Dunque, seconda del caso applicativo, se si vuole investire su un materiale in grado di garantire elevate efficienza in termini di conducibilità si suggerisce di scegliere una miscela G100_0,75. Se invece si vuole trovare un equilibrio tra performance e costi allora è consigliata una malta G50_0,75, che nonostante le conducibilità siano leggermente minori, lo sono anche le resistenze e diminuiscono pure i costi di acquisto del cemento.

Per quanto concerne il fango di segagione, la normativa italiana corrente, D.Lgs. 152/2006, non consente di sottoporre il fango ad attività di recupero se gli elementi chimici che lo costituiscono superano i limiti normativi. E' necessario un trattamento a monte per diminuire le concentrazioni, come ad esempio una separazione magnetica, in

modo da trasformare il rifiuto in una *materia prima e secondaria* e a questo punto impiegarlo per la composizione di CLSM.

Il seguente studio, però, ha la necessità di utilizzare il fango nella sua forma *tal quale* perché deve essere sfruttata la sua alta concentrazione di metalli pesanti, che va ad incrementare la conducibilità del CLSM. Infatti il campione M si contraddistingue per il suo alto tenore di nichel e rame; mentre G per il cromo totale e cobalto.

Si consiglia dunque di effettuare un test di cessione sui conglomerati cementizi induriti, in modo da capire se, una volta che il fango si aggrega con gli altri componenti all'interno della malta indurita, il rilascio dei metalli nel tempo non supera le soglie normative. Se così fosse allora, saranno necessari dei pre-trattamenti a monte prima di un possibile recupero del residuo, in modo che il conglomerato cementizio non diventi una sorgente di rilascio di inquinanti.

Attualmente non esiste né un mercato, né una normativa che incentivi gli stabilimenti produttori di conglomerati cementizi ad acquisire materiali di recupero come il fango. Si spera che altri studi come questi possano smuovere le istituzioni ad adottare norme che inducano al riutilizzo di questo residuo anche quando le concentrazioni limite non lo permettono, sempre se la loro seconda vita non influisca negativamente sull'ambiente. In questo modo oltre a evitare lo smaltimento in discariche sempre più colme, si crea un nuovo mercato e si riduce lo sfruttamento di materie prime in via di esaurimento.

BIBLIOGRAFIA

- Directive 2006/21/EC. *“Management of waste from extractive industries – Mining waste”*.
- Directive 2008/98/EC. *“Waste framework”*.
- Directive 1999/31/EC. *“Landfill waste”*.
- D.Lgs.3/4/2006 n.152. Implementation of Directive 2008/98/EC. *“Norme in materia ambientale – Stralcio – Parte IV – Gestione dei rifiuti, imballaggi e bonifica dei siti inquinati”*.
- D.Lgs. 30/05/2008, n.117. Implementation of Directive 2006/21/EC. *“Gestione dei rifiuti delle industrie estrattive”*.
- D.M. 10/08/2012, n.161. *“Rifiuti”*.
- D.M. 05/02/1998. *“Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposte alle procedur esemplificate di recupero ai sensi dell’articolo 31 e 33 del D.Lgs.5/2/1997 n.22.*
- ANNILE F.,(2011).Rifiuti, sottoprodotti e Mps: commento ai nuovi articoli 184 bis e 184-ter, in Bollettino Rifiuti n.180-181/2011: la nuova Parte quarta del “codice ambientale” Il testo normativo aggiornato, coordinato e annotato (Ed. Ambiente, Mi).http://www.reteambiente.it/ra/rol/195/stralci/Rifiuti_sottoprodotti_Mps.pdf.
- MONTANARI E., (2007). *“Una particolare categoria di rifiuti provenienti da attività estrattiva: i limi di lavaggio inerti-Problematiche inerenti e quadro normativo.”* Il Geologo dell’Emilia Romagna; 2007
http://www.geologiemiariomagna.it/rivista/2007-27_Montanari.pdf
- MONDINI N.,(2014). convegno sulla qualità degli aggregati riciclati, i controlli ambientali e i controlli prestazionali.
- OBERTEUFFERJOHN A., (1974).*“Magnetic separation: A review of principles, devices, and applications”*. IEEE Transactions on Magnetics, 10(2), 223-238. DOI: 10.1109/TMAG.1974.1058315.
- BERRUERO M., (2016). Tesi di laurea magistrale *“Recupero dei fanghi di segazione: analisi e proposte metodologiche”*.
- COSA. S, (2016).Tesi di laurea magistrale *“Recupero dei fanghi di segazione”*.
- DINO G., FORNARO M, (2005). *“L’utilizzo integrale delle risorse lapidee negli aspetti estrattivi, di lavorazione e di recupero ambientale dei siti”*. Giornale di Geologia Applicata 2 (2005) 320–327, doi: 10.1474/GGA.2005–02.0–47.0073.
- VERNITI S., (2010). Tesi di laurea *“Utilizzo di fanghi di cartiera per ripristini ambientali tecniche per la messa in sicurezza rispetto alla produzione di biogas”*.

- ALMA M., (2008). Tesi di laurea magistrale “*Criterio di ottimizzazione tecnico economica nell'estrazione di blocchi da telaio*”.
- ZISA G., (2018). Tesi di laurea magistrale “*L'utilizzo delle malte cementizie fluide nelle sedi stradali in galleria: mix design e prove in campo in vera grandezza*”
- Forbino S., (2016). Tesi di laurea magistrale “*Metodi di separazione ecocompatibili nell'ottica dell'end of west*”.
- MANCINI R., FORNARO M., DINO G., (2005). “*Applicazioni e trattamenti in campo ingegneristico e industriale*”. <http://www.naturalstoneinfo.com/download/interreqIII.03.pdf>.
- Sito http://purvainternational.com/en_US/gang-saw-blades/.
- Sito <http://stelcolimited.com/gang-saw-steel/>.
- K. J. FOLLIARD, *Development of a Recommended Practice for Use of Controlled Low-Strength Material in Highway Construction*. National Academies Press, 2008.
- ACI, “116R-90: Cement and Concrete Terminology,” *Tech. Doc.*, p. 58, 2000.
- B. W. Ramme, “ACI 229R-99 Controlled Low-Strength Materials,” *Aci*, vol. 99, no. Reapproved, pp. 1–15, 2005.
- T. Della Norma, “UNI EN 933-1:1999 - Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per staccatura,” 1999.
- T. Della Norma, “UNI EN 1097-6:2002 - Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua,” 2002.
- D. D. R. Funk J.E., “Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspension Applied to Ceramic Manufacturing,” p. ISBN 978-0-7923-9409-9, Springer US, 1994.
- S. V. Kumar and M. Santhanam, “Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review,” *Indian Concr. J.*, vol. 77, no. 9, pp. 1324–1331, 2003.
- J. L. Groeger, G. R. Rada, and A. Lopez, “AASHTO T307 - Background and Discussion,” pp. 16–29, 2017.
- S. T. Method, “Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material,” pp. 3–5.
- R. Hicks and C. Monismith, “Factors influencing the resilient response of granular materials,” *Highw. Res. Rec.*, vol. 345, pp. 15–31, 1971.
- M. W. RW May, “effective granular modulus to model pavement responses,” *Transp. Res. Rec.*, no. 810, p. pp 1-9, 1981.
- J. Uzan, “Characterization of granular material,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 1022, no. 1022, pp. 52–59, 1985.
- A. J. Puppala, L. R. Hoyos, and A. K. Potturi, “Resilient Moduli Response of Moderately Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 7, pp. 990–998, 2011.
- L. Khazanovich, C. Celauro, B. Chadbourn, J. Zollars, and S. Dai, “Evaluation of Subgrade Resilient Modulus Predictive Model for Use in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 1947, no. January 2006, pp. 155–166, 2006.

ALLEGATI

ALLEGATO A - RISULTATI DELL'ANALISI D'IMMAGINE CON IMAGE J E MACROSCOPIO OTTICO

ALLEGATO B - DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA AGGREGATI

ALLEGATO C - DENSITÀ SPECIFICA AGGREGATI DI QUARZITE

ALLEGATO D - MODULO RESILIENTE

ALLEGATO E -DOSAGGIO DELLE MISCELE

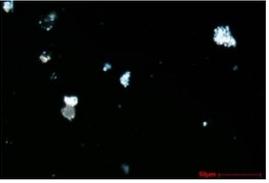
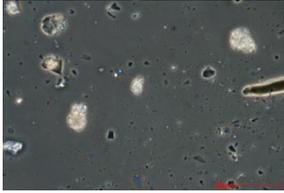
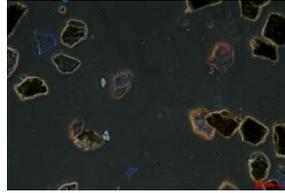
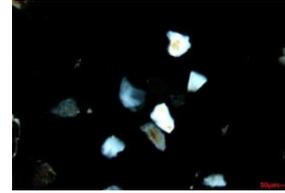
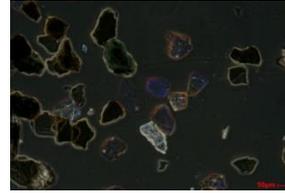
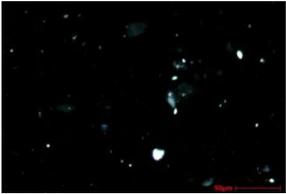
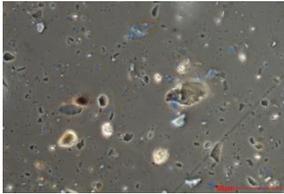
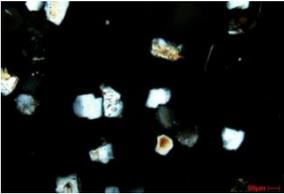
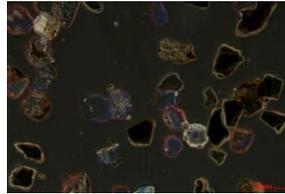
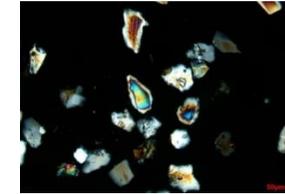
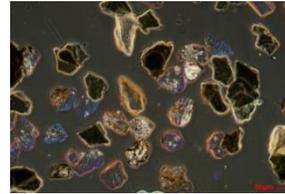
ALLEGATO F – RISULTATI RELATIVI ALLA CONDUCIBILITA' TERMICA

ALLEGATO A - RISULTATI DELL'ANALISI D'IMMAGINE CON IMAGE J E MACROSCOPIO

OTTICO

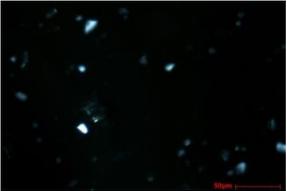
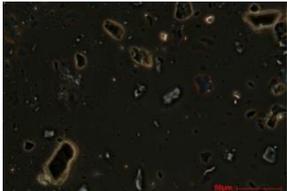
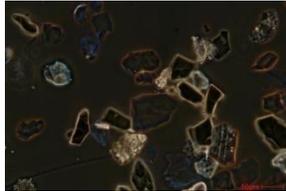
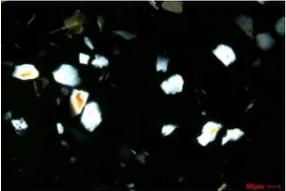
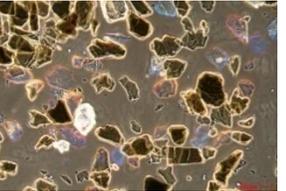
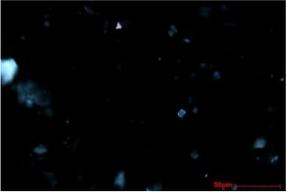
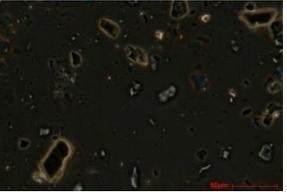
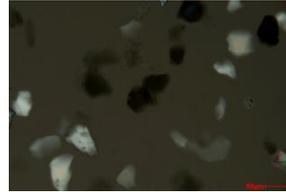
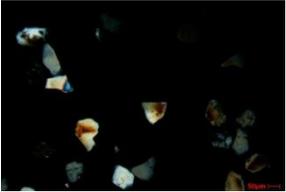
Campione M

- Immagini e elaborazioni eseguite con il software *Image J*, per ogni vetrino sono stati considerati 25 campi ma di seguito ne sono riportati solamente due:

<u>Campo 1</u>					
					
<i>Figura 1: M, <math><0.038</math>, 40X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 2: M, <math><0.038</math>, 40X, contrasto di fase</i>	<i>Figura 3: M, <math>0.038-0.075</math>, 20X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 4: M, <math>0.038-0.075</math>, 20X, contrasto di fase</i>	<i>Figura 5: M, <math>0.075-0.106</math>, 10X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 6M, <math>0.075-0.106</math>, 10X, luce polarizzata</i>
<u>Campo 2</u>					
					
<i>Figura 7: M, <math><0.038</math>, 40X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 8M, <math><0.038</math>, 40X, contrasto di fase</i>	<i>Figura 9M, <math>0.038-0.075</math>, 20X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 10: M, <math>0.038-0.075</math>, 20X, contrasto di fase</i>	<i>Figura 11: M, <math>0.075-0.106</math>, 10X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 12: M, <math>>0.106</math>, 10X, contrasto di fase</i>

Campione G

- Immagini e elaborazioni eseguite con il software *Image j*, per ogni vetrino sono stati considerati 25 campi ma di seguito ne sono riportati solamente due:

<u>Campo 1</u>					
					
<i>Figura 13: G, <math><0.038</math>, 40X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 14: G, <math><0.038</math>, 40X, contrasto di fase</i>	<i>Figura 15: G, <math>0.038-0.075</math>, 20X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 16: G, <math>0.038-0.075</math>, 20X, contrasto di fase</i>	<i>Figura 17: G, <math>0.075-0.106</math>, 10X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 18: G, <math>0.075-0.106</math>, 10X, contrasto di fase</i>
<u>Campo 2</u>					
					
<i>Figura 19: G, <math><0.038</math>, 40X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 20: G, <math><0.038</math>, 40X, contrasto di fase</i>	<i>Figura 21: G, <math>0.038-0.075</math>, 20X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 22: G, <math>0.038-0.075</math>, 20X, contrasto di fase</i>	<i>Figura 23: G, <math>0.075-0.106</math>, 10X, luce polarizzata</i>	<i>Figura 24: G, <math>0.075-0.106</math>, 10X, contrasto di fase</i>

Campione M e G

- Immagini catturate tramite fotocamera inserita in un macroscopio manuale:

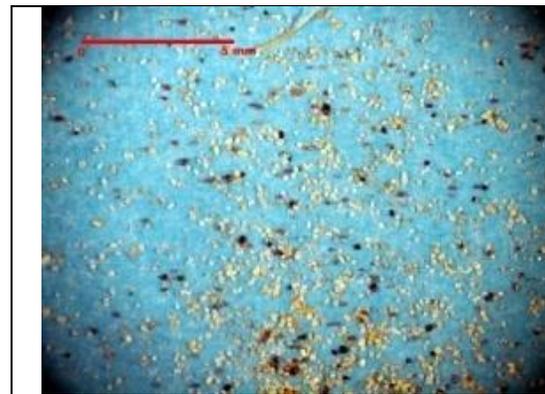


Figura 25 M:,0,106-0.212 mm , 10X

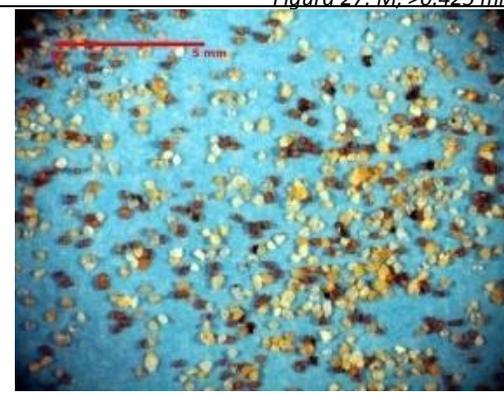


Figura 26: M, 0.212-0.425 mm 10X

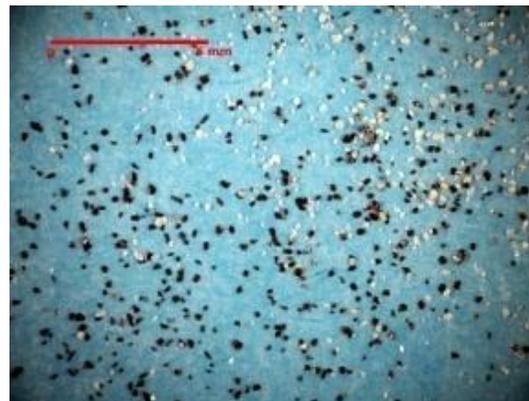


Figura 28: G, 0.106-0.212 mm, 10X



Figura 29: G, 0.212-0.425 mm, 10X

Figura 27: M, >0.425 mm , 10X

ALLEGATO A - RISULTATI DELL'ANALISI D'IMMAGINE CON IMAGE J E MACROSCOPIO OTTICO



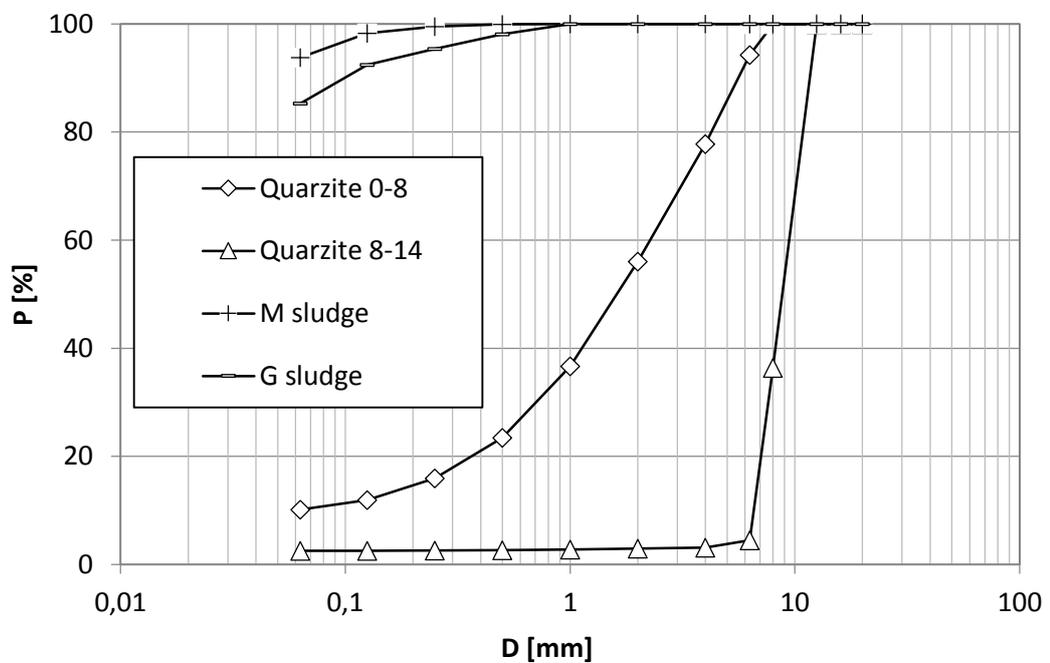
Figura 29: M <0.425 mm, 10X



Figura 30: G, <0.425 mm 10X

ALLEGATO B - DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA AGGREGATI

D [mm]	Passing [%]			
	Quarzite 0-8	Quarzite 8-14	Msludge	Gsludge
16	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	100,0	100,0	100,0
8	99,9	36,4	100,0	100,0
6,3	94,2	4,5	100,0	100,0
4	77,8	3,1	100,0	100,0
2	56,1	2,9	100,0	100,0
1	36,7	2,8	100,0	100,0
0,5	23,4	2,7	99,9	98,1
0,25	16,0	2,6	99,5	95,4
0,125	11,9	2,5	98,3	92,4
0,063	10,2	2,5	93,8	85,2



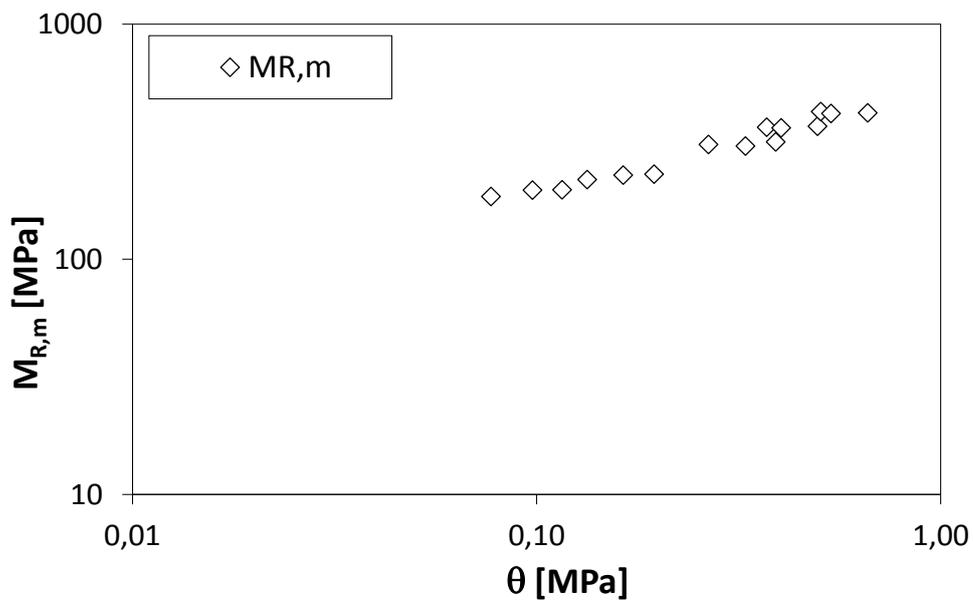
ALLEGATO C - DENSITÀ SPECIFICA AGGREGATI DI QUARZITE

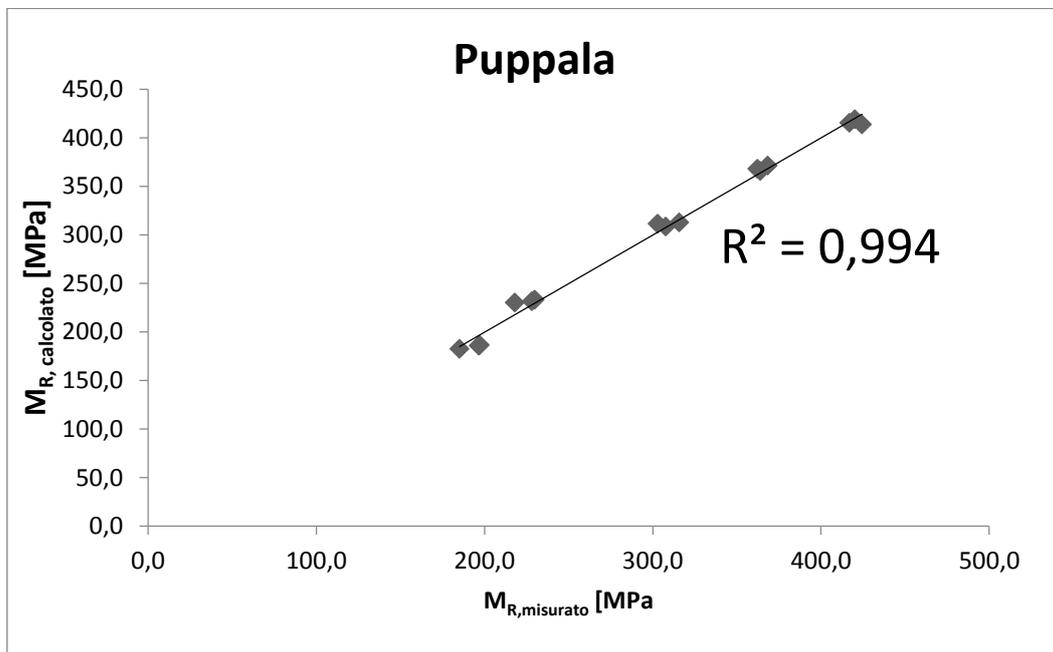
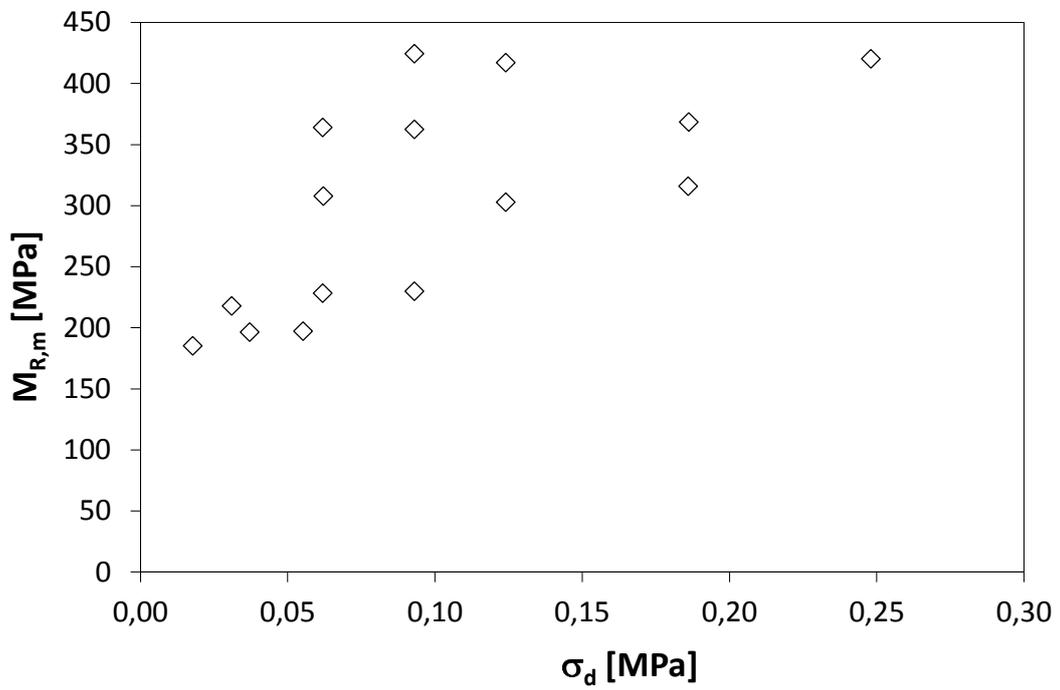
Materiale	Picnometro	M ₁ [g]	M ₂ [g]	M ₃ [g]	V m ³	T [°C]	ρ _{mw} [g/cm ³]	ρ _{mw} [g/cm ³]
Quarzite 0-8	T+F	888,4	1565,2	2681,9	0,001384	23,0	2,555	2,551
	K+A	921,8	1535,2	2656,8	0,001365	23,1	2,546	
Quarzite 8-14	K+F	925,1	1405,6	2586,9	0,001365	20,5	2,652	2,662
	T+B	863,1	1146,7	2426,4	0,001389	21,9	2,672	

ALLEGATO D - MODULO RESILIENTE

Miscela M50 con $q = 0,21$, $a/p = 0,85$, $C = 50 \text{ kg/m}^3$ - 28 giorni – confezionato in laboratorio.

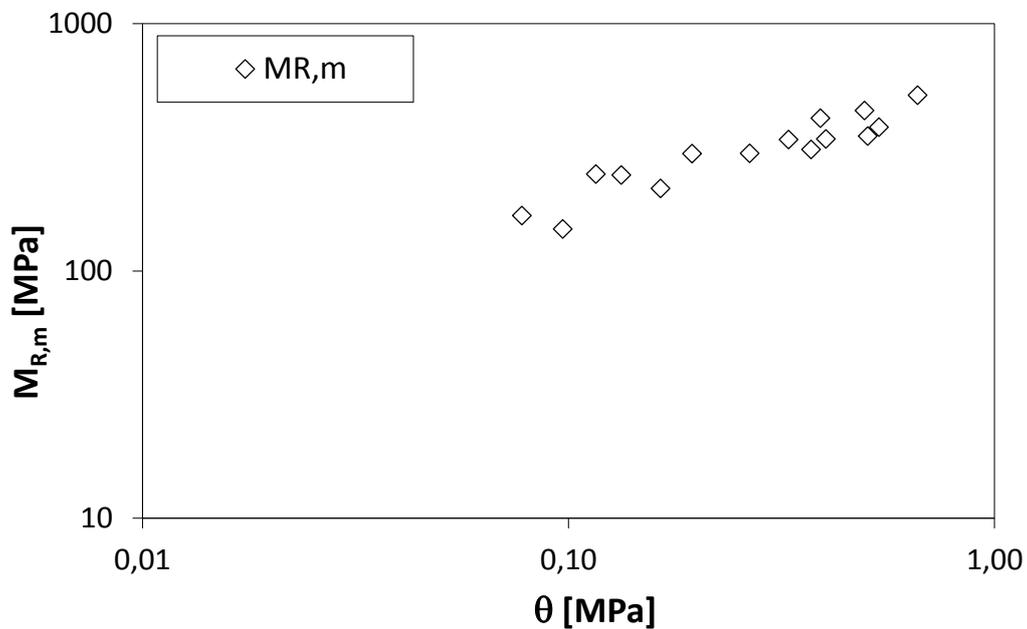
SEQUENZA DI CARICO	s3	sv,max	sv,ciclo	MR, misurato	θ
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,020	0,032	0,018	185,1	0,077
2	0,020	0,051	0,037	196,6	0,098
3	0,020	0,069	0,055	197,2	0,115
4	0,034	0,045	0,031	218,0	0,133
5	0,034	0,076	0,062	228,2	0,164
6	0,034	0,107	0,093	229,9	0,195
7	0,068	0,076	0,062	307,7	0,266
8	0,068	0,137	0,124	302,9	0,328
9	0,068	0,206	0,186	315,8	0,390
10	0,103	0,076	0,062	364,0	0,371
11	0,103	0,103	0,093	362,3	0,402
12	0,103	0,206	0,186	368,4	0,495
13	0,137	0,107	0,093	424,4	0,504
14	0,137	0,138	0,124	417,0	0,535
15	0,137	0,275	0,248	420,1	0,659

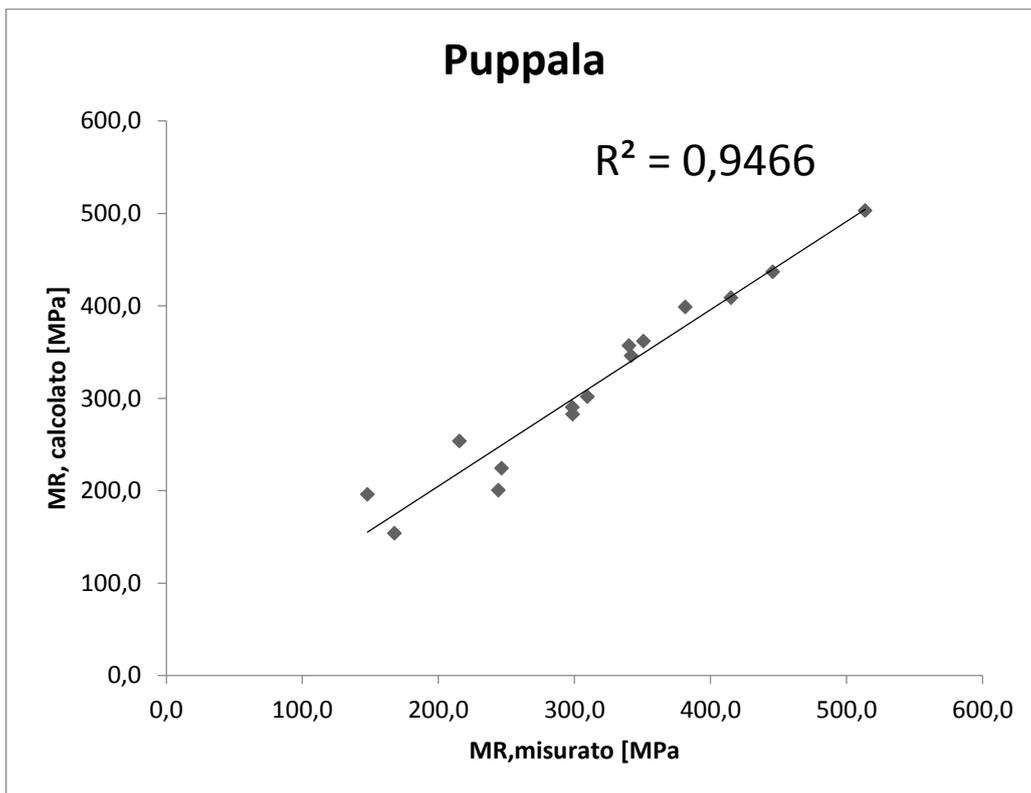
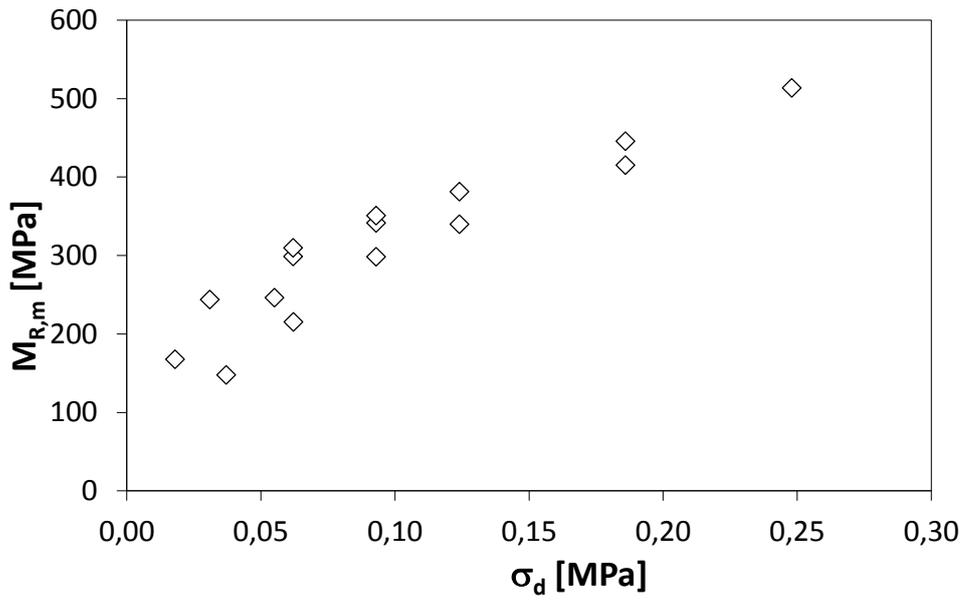




Miscela M100 con $q = 0,21$, $a/p = 0,75$, $C = 100 \text{ kg/m}^3$ - 28 giorni – confezionato in laboratorio.

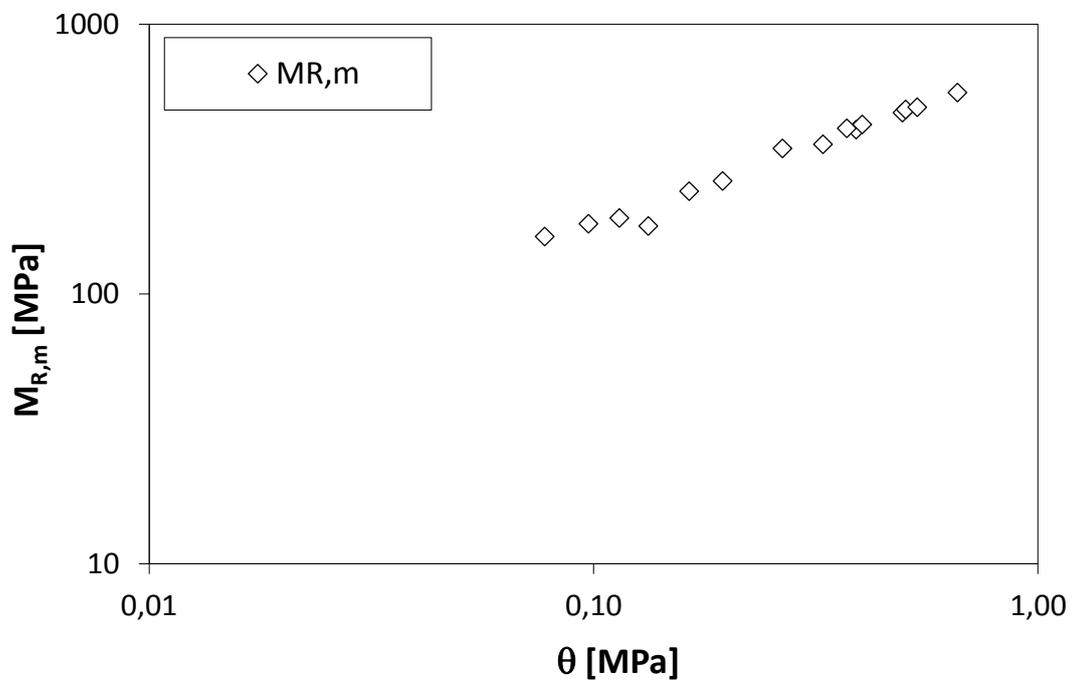
SEQUENZA DI CARICO	σ_3	$\sigma_{v,max}$	$\sigma_{v,ciclo}$	M_R , misurato	θ
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,020	0,028	0,018	167,8	0,078
2	0,020	0,041	0,037	147,8	0,097
3	0,020	0,069	0,055	246,5	0,116
4	0,034	0,046	0,031	244,0	0,133
5	0,034	0,068	0,062	215,6	0,164
6	0,034	0,107	0,093	298,4	0,195
7	0,068	0,076	0,062	298,7	0,266
8	0,068	0,137	0,124	340,0	0,328
9	0,068	0,206	0,186	415,1	0,390
10	0,103	0,076	0,062	309,6	0,371
11	0,103	0,107	0,093	341,7	0,402
12	0,103	0,206	0,186	445,7	0,495
13	0,137	0,106	0,093	350,8	0,504
14	0,137	0,137	0,124	381,5	0,535
15	0,137	0,275	0,248	513,6	0,659

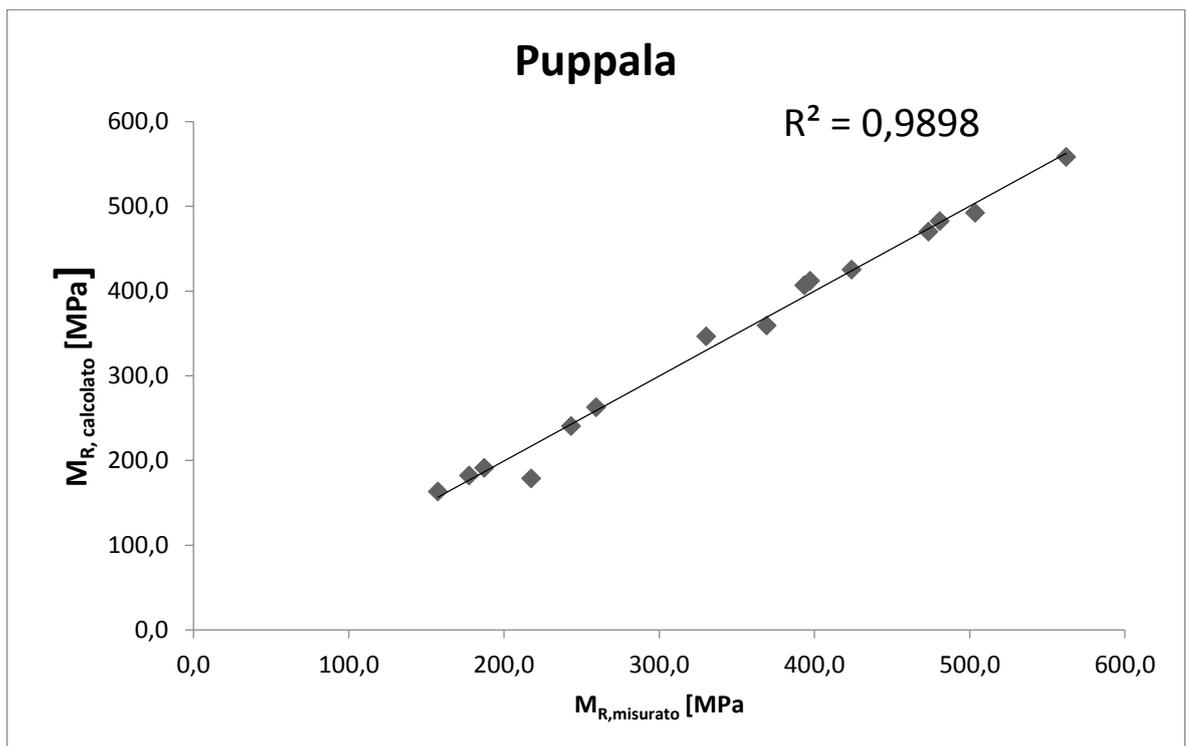
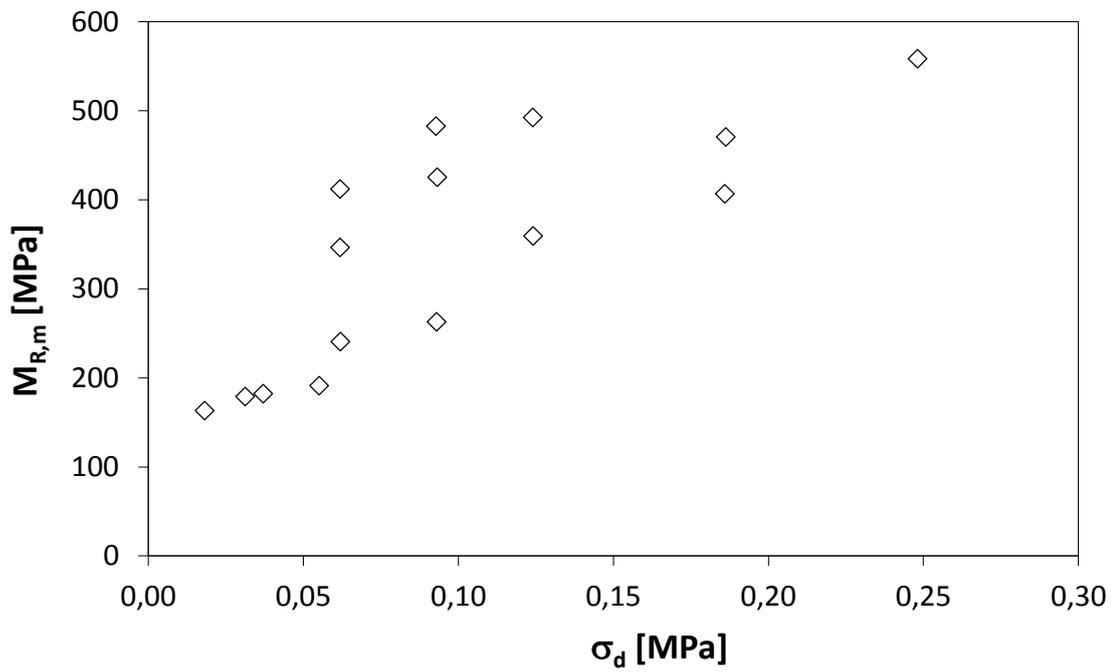




Miscela G50 con $q = 0,21$, $a/p = 0,75$, $C = 50 \text{ kg/m}^3$ - 28 giorni – confezionato in laboratorio.

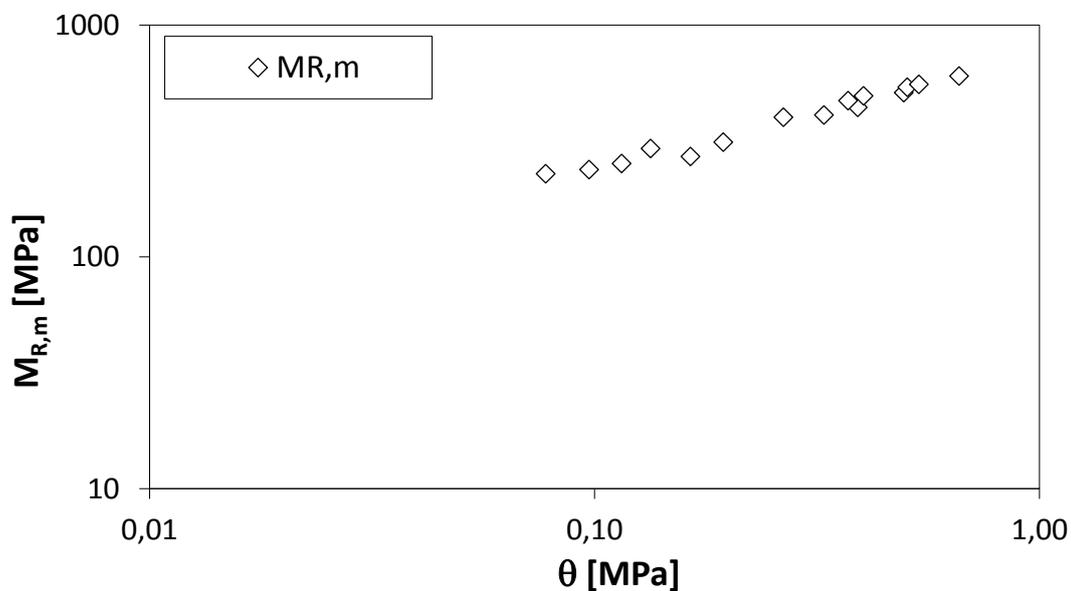
SEQUENZA DI CARICO	σ_3	$\sigma_{v,max}$	$\sigma_{v,ciclo}$	$M_{R, misurato}$	θ
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,020	0,032	0,018	163,5	0,078
2	0,020	0,051	0,037	182,3	0,097
3	0,020	0,069	0,055	191,3	0,114
4	0,034	0,034	0,031	179,0	0,133
5	0,034	0,076	0,062	240,9	0,164
6	0,034	0,107	0,093	262,9	0,195
7	0,068	0,076	0,062	346,7	0,266
8	0,068	0,137	0,124	359,6	0,328
9	0,068	0,206	0,186	406,9	0,390
10	0,103	0,076	0,062	412,2	0,371
11	0,103	0,107	0,093	425,5	0,402
12	0,103	0,206	0,186	470,5	0,495
13	0,137	0,107	0,093	482,9	0,504
14	0,137	0,137	0,124	492,5	0,535
15	0,137	0,275	0,248	558,5	0,659

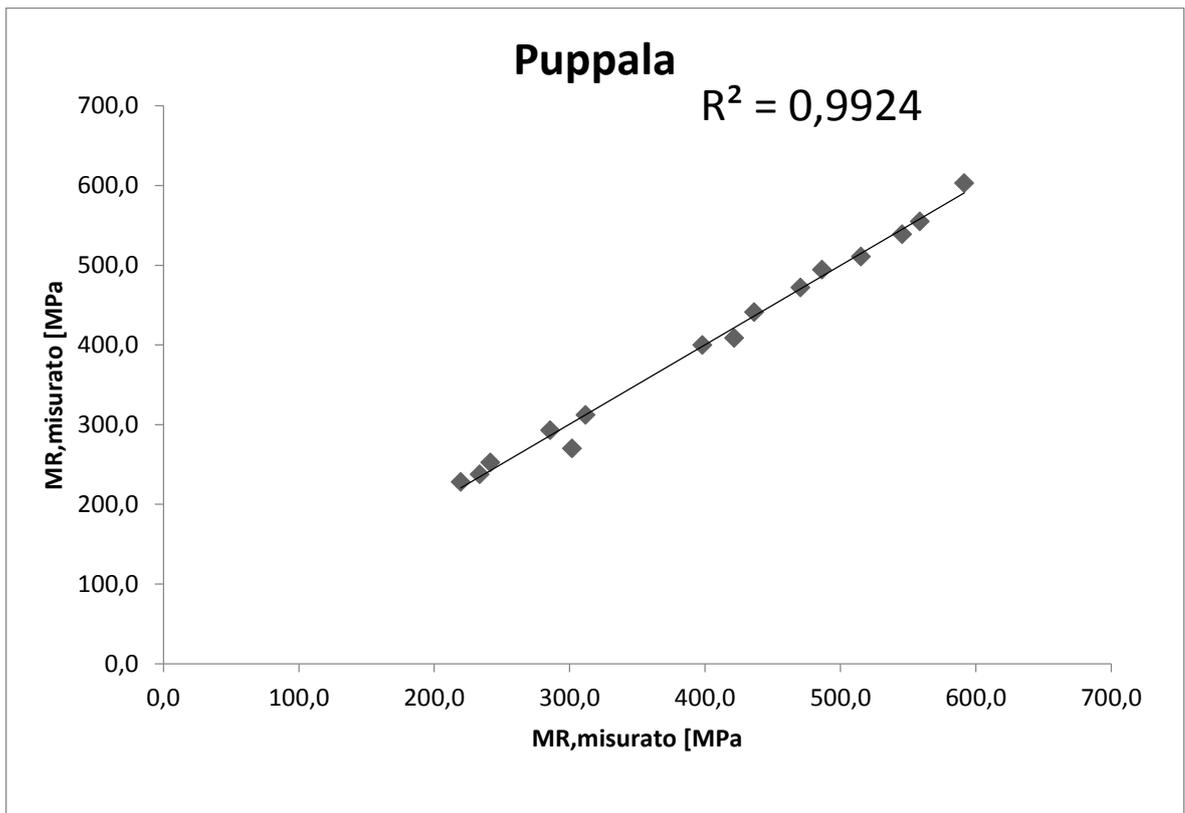
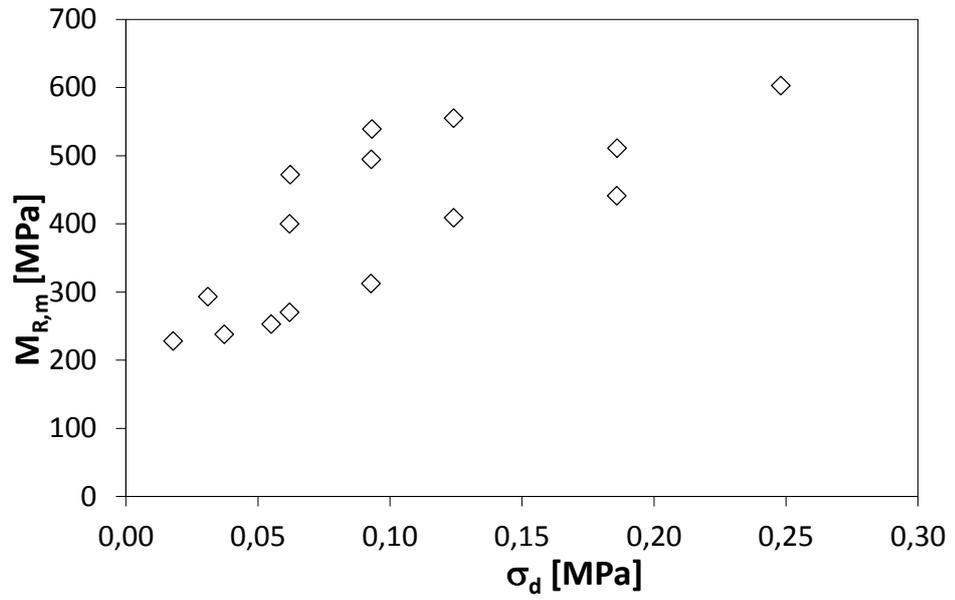




Miscela G100 con $q = 0,21$, $a/p = 0,75$, $C = 100 \text{ kg/m}^3$ - 28 giorni – confezionato in laboratorio.

SEQUENZA DI CARICO	σ_3	$\sigma_{v,max}$	$\sigma_{v,ciclo}$	M_R , misurato	θ
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,020	0,032	0,018	228,1	0,078
2	0,020	0,051	0,037	237,9	0,097
3	0,020	0,069	0,055	252,8	0,115
4	0,034	0,045	0,031	293,1	0,134
5	0,034	0,068	0,062	270,4	0,164
6	0,034	0,107	0,093	312,4	0,195
7	0,068	0,076	0,062	400,1	0,266
8	0,068	0,138	0,124	408,8	0,328
9	0,068	0,206	0,186	441,4	0,390
10	0,103	0,075	0,062	472,1	0,371
11	0,103	0,107	0,093	494,4	0,402
12	0,103	0,206	0,186	511,1	0,495
13	0,137	0,106	0,093	539,2	0,504
14	0,137	0,137	0,124	555,1	0,535
15	0,137	0,275	0,248	603,0	0,659





ALLEGATO E -DOSAGGIO DELLE MISCELE

Miscela M50 con $q=0,21$, $a/p 0,85$, $c = 50 \text{ Kg/m}^3$ - confezionato in laboratorio

Additivo	0,5	[%]
W/P	0,85	[%]

Dosaggi

Cemento	50	[kg/m ³]
Additivo	0,25	[kg/m ³]
Acqua _{cem}	42,5	[kg/m ³]

Densità

Cemento	3150	[kg/m ³]
Additivo	1060	[kg/m ³]
Acqua	997	[kg/m ³]

Volumi

Cemento	0,0159	[m ³ /m ³]
Additivo	0,0002	[m ³ /m ³]
Acqua _{cem}	0,0426	[m ³ /m ³]
Acqua+Aggregati	0,9413	[m ³ /m ³]

	% in peso	% in peso _{corr}	ρ_{mw} [g/cm ³]	Volume [cm ³]	Peso [kg]
Quarzite 0-8	71,0	61,6	2,551	24,1	1236,3
Quarzite 8-14	11,0	9,5	2,662	3,6	191,5
Moro sludge	18,0	15,6	2,670	5,8	313,4
Acqua _{limo}	15,3	13,3	0,997	13,3	266,4

Recipe for 1 m³

Cement	50	[kg/m ³]
Quarzite 0-8	1236,3	[kg/m ³]
Quarzite 8-14	191,5	[kg/m ³]
Moro sludge	313,4	[kg/m ³]
Additive	0,25	[kg/m ³]

Water _{add}	308,8	[kg/m ³]
----------------------	-------	----------------------

W/P	0,85	[%]
C/P	0,14	[%]

Miscela G50 con $q=0,21$, a/p 0,75, $c = 50 \text{ Kg/m}^3$ - confezionato in laboratorio

Additivo	0,5	[%]
W/P	0,75	[%]

Dosaggi

Cemento	50	[kg/m ³]
Additivo	0,25	[kg/m ³]
Acqua _{cem}	37,5	[kg/m ³]

Densità

Cemento	3150	[kg/m ³]
Additivo	1060	[kg/m ³]
Acqua	997	[kg/m ³]

Volumi

Cemento	0,0159	[m ³ /m ³]
Additivo	0,0002	[m ³ /m ³]
Acqua _{cem}	0,0376	[m ³ /m ³]
Acqua+Aggregati	0,9463	[m ³ /m ³]

	% in peso	% in peso _{corr}	ρ_{mw} [g/cm ³]	Volume [cm ³]	Peso [kg]
Quarzite 0-8	69,0	60,4	2,551	23,7	1236,9
Quarzite 8-14	12,0	10,5	2,662	3,9	215,1
Giovanna sludge	19,0	16,6	2,740	6,1	340,6
Acqua _{limo}	14,3	12,5	0,997	12,5	255,5

Recipe for 1 m³

Cement	50	[kg/m ³]
Quarzite 0-8	1236,9	[kg/m ³]
Quarzite 8-14	215,1	[kg/m ³]
Giovanna sludge	340,6	[kg/m ³]
Additive	0,25	[kg/m ³]

Water _{add}	292,8	[kg/m ³]
----------------------	-------	----------------------

W/P	0,75	[%]
C/P	0,13	[%]

Miscela M100 con $q=0,21$, a/p 0,75, $c = 100 \text{ Kg/m}^3$ - confezionato in laboratorio

Additivo	0,5	[%]
W/P	0,75	[%]

Dosaggi

Cemento	100	[kg/m ³]
Additivo	0,5	[kg/m ³]
Acqua _{cem}	75	[kg/m ³]

Densità

Cemento	3150	[kg/m ³]
Additivo	1060	[kg/m ³]
Acqua	997	[kg/m ³]

Volumi

Cemento	0,0317	[m ³ /m ³]
Additivo	0,0005	[m ³ /m ³]
Acqua _{cem}	0,0752	[m ³ /m ³]
Acqua+Aggregati	0,8926	[m ³ /m ³]

	% in peso	% in peso _{corr}	ρ_{mw} [g/cm ³]	Volume [cm ³]	Peso [kg]
Quarzite 0-8	71,0	62,6	2,551	24,5	1212,8
Quarzite 8-14	11,0	9,7	2,662	3,6	187,9
Moro sludge	18,0	15,9	2,670	5,9	307,5
Acqua _{limo}	13,5	11,9	0,997	11,9	230,6

Recipe for 1 m³

Cement	100	[kg/m ³]
Quarzite 0-8	1212,8	[kg/m ³]
Quarzite 8-14	187,9	[kg/m ³]
Moro sludge	307,5	[kg/m ³]
Additive	0,5	[kg/m ³]

Water _{add}	305,3	[kg/m ³]
----------------------	-------	----------------------

W/P	0,75	[%]
C/P	0,25	[%]

Miscela G100 con $q=0,21$, a/p 0,75, $c = 100 \text{ Kg/m}^3$ - confezionato in laboratorio

Additivo	0,5	[%]
W/P	0,75	[%]

Dosaggi

Cemento	100	[kg/m ³]
Additivo	0,5	[kg/m ³]
Acqua _{cem}	75	[kg/m ³]

Densità

Cemento	3150	[kg/m ³]
Additivo	1060	[kg/m ³]
Acqua	997	[kg/m ³]

Volumi

Cemento	0,0317	[m ³ /m ³]
Additivo	0,0005	[m ³ /m ³]
Acqua _{cem}	0,0752	[m ³ /m ³]
Acqua+Aggregati	0,8926	[m ³ /m ³]

	% in peso	% in peso _{corr}	ρ_{mw} [g/cm ³]	Volume [cm ³]	Peso [kg]
Quarzite 0-8	69,0	60,4	2,551	23,7	1166,7
Quarzite 8-14	12,0	10,5	2,662	3,9	202,9
Giovanna sludge	19,0	16,6	2,740	6,1	321,3
Acqua _{limo}	14,3	12,5	0,997	12,5	240,9

Recipe for 1 m³

Cement	100	[kg/m ³]
Quarzite 0-8	1166,7	[kg/m ³]
Quarzite 8-14	202,9	[kg/m ³]
Giovanna sludge	321,3	[kg/m ³]
Additive	0,5	[kg/m ³]

Water _{add}	315,6	[kg/m ³]
----------------------	-------	----------------------

W/P	0,75	[%]
C/P	0,24	[%]

ALLEGATO F – RISULTATI RELATIVI ALLA CONDUCIBILITA' TERMICA

- Misura della conducibilità termica al sesto giorno di maturazione dei campioni

Campioni	TC [W/(m*K)]			media
	1°	2°	3°	
M50_0.85	1,498	1,362	1,411	1,42
M100_0.75	0,792	0,705	0,811	0,76
G50_0.75	0,786	0,838	0,687	0,77
G100_0.75	1,082	1,012	1,105	1,06

- Misura della conducibilità termica al diciottesimo giorno di maturazione dei campioni

Campioni	TC [W/(m*K)]				Media
	1°	2°	3°	4°	
M50_0.85	1,089	1,392	0,709	0,685	0,97
G50_0.75	1,987	1,891	1,397	1,54	1,70
M100_0.75	0,876	0,924	1,387	1,467	1,16
G100_0.75	1,844	1,596	1,521	1,31	1,57

- Misura della conducibilità termica nelle condizioni dry

Campioni	TC [W/(m*K)]				Media
	1°	2°	3°	4°	
M50_0.85	0,62	0,589	0,478	0,372	0,51
G50_0.75	1,037	1,064	1,03	1,036	1,04
M100_0.75	0,743	0,676	0,989	0,957	0,84
G100_0.75	0,989	1,238	1,163	1,205	1,15