

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

Studio sperimentale per valutare l'adeguatezza di ripiene bianche per la chiusura di gallerie esaurite nella miniera di Fontane.



Relatore:

Prof. Ing. Daniele MARTINELLI

Corelatori:

Prof. Ing. Daniele PEILA

Dott. Ing. Carmine TODARO

Dott. Ing. Andrea CARIGI

Candidato:

Dott. Vito TURANO

Marzo 2020

Dedico questo lavoro ai miei genitori,
ringraziandoli del sostegno e dell'affetto
che mi hanno sempre dimostrato.

Sommario

Indice delle figure.....	8
Indice delle tabelle	8
Indice dei diagrammi.....	9
1. Introduzione.....	1
1.1. Miniera di Rodoretto	1
1.2. Inquadramento geologico	2
1.3. Talco	4
1.4. Miniera moderna.....	4
1.5. Ripiena bianca	5
2. Fondamenti teorici.....	6
2.1. Metodi di scavo	6
2.1.1. Drill & blast.....	6
2.1.2. Brokk.....	7
2.2. Caratterizzazione delle ripiene	8
2.2.1. Cementi	8
2.2.2. Inerti	10
2.2.3. Additivi.....	13
2.2.4. Trasporto del calcestruzzo e posa in opera.....	14
2.3. Back & fill inverso	15
2.4. Prove sperimentali	16
2.4.1. Prova di compressione monoassiale.....	16
2.4.2. Slump test.....	18
2.4.3. Bleeding	20
3. Analisi dei dati.....	21
3.1. 2014	21
3.2. 2015	24
3.3. 2016	26
3.4. 2017	31
3.4.1. Galleria S966-S29T.....	31
3.4.2. Galleria N968-N10AT.....	34
3.4.3. Galleria S962-LBN	38
3.5. 2018	39
3.5.1. Galleria S962-N2T	39
3.5.2. Prove svolte senza il politecnico	41
3.6. 2019	46
3.7. Comparazione risultati.....	47

4.	Studio sperimentale	52
4.1.	Acqua, cemento e a/c.....	52
4.2.	Inerte.....	52
4.3.	Additivo	55
4.4.	Mix design	56
4.5.	Slump test	59
4.6.	Bleeding.....	62
4.7.	Risultati provini maturati.....	66
5.	Conclusioni.....	70
	Bibliografia.....	71

Indice delle figure

Figura 1.1: Miniera di Rodoretto, imbocco di Pomeifrè	1
Figura 1.2: inquadramento geologico miniera di Rodoretto, dal Geoportale Nazionale	2
Figura 1.3: inquadramento geologico, Ist. Lomb. Sc. e Lett., 1955	3
Figura 1.4: installazione Imerys	4
Figura 2.1: fasi del drill & blast	6
Figura 2.2: brokk	7
Figura 2.3: Galleria con centine installate.....	15
Figura 2.4: macchina per il test di compressione monoassiale utilizzata.....	18
Figura 2.5: cono di Abrams.....	19
Figura 2.6: altezza da misurare nella prova del cono di Abrams	19
Figura 3.1: rottura campione a 28 giorni con evidente taglio dei grani di talco	27
Figura 3.2: rottura campione a 28 giorni con evidente taglio dei grani di talco	28
Figura 3.3: grani di ripiena bianca di dimensione maggiore.....	28
Figura 3.4: pianta galleria S966-S29T	32
Figura 3.5: carotaggi galleria S966-S29T	32
Figura 3.6: pianta galleria N968-N10AT	34
Figura 3.7: carotaggi galleria N968-N10AT	35
Figura 3.8: foto della trancia ripienata al termine delle operazioni di carotaggio	35
Figura 3.9: rottura carota galleria N2T.....	39
Figura 3.10: pianta galleria S968-N2T.....	40
Figura 3.11: carotaggi orizzontali galleria S968-N2T	40
Figura 4.1: slump MIX 1.....	60
Figura 4.2: slump MIX 2.....	60
Figura 4.3: slump MIX 3.....	61
Figura 4.4: slump MIX 4.....	61
Figura 4.5: slump MIX 5.....	62
Figura 4.6: bleeding MIX 1.....	63
Figura 4.7: bleeding MIX 2.....	63
Figura 4.8: bleeding MIX 3.....	64
Figura 4.9: bleeding MIX 4.....	64
Figura 4.10: bleeding MIX 5.....	65
Figura 4.11: rottura provino MIX 5	69

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: classificazione dei cementi (cortesia di Maurizio Tava).....	10
Tabella 3.1: prove in secchio con cemento 32,5	26
Tabella 3.2: prove in secchio con cemento 42,5	29
Tabella 3.3: mix design galleria S966-S29T	33
Tabella 3.4: UCS galleria S966-S29T	33
Tabella 3.5: mix design provini cubici galleria N968-N10AT	36
Tabella 3.6: UCS provini cubici galleria N968-N10AT	37
Tabella 3.7: UCS provini cilindrici galleria N968-N10AT.....	37
Tabella 3.8: UCS galleria S962-LBN e S962-N2T.....	38
Tabella 3.9: mix design galleria S968-N2T	41

Tabella 3.10: UCS galleria S962-N2T	41
Tabella 3.11: mix design galleria N968-N14AT.....	42
Tabella 3.12: UCS galleria N968-N14AT.....	42
Tabella 3.13: mix design galleria N968-LBN	43
Tabella 3.14: mix design galleria S962-N3T	44
Tabella 3.15: UCS galleria S962-N3T	44
Tabella 3.16: mix design galleria NS24T.....	45
Tabella 3.17: ulteriori prove svolte nel 2018	46
Tabella 3.18: mix design galleria S962-S13AT	46
Tabella 3.19: tabella riepilogativa mix.....	50
Tabella 4.1: valori a/c per i differenti mix	52
Tabella 4.2: inerte totale nei vari mix	53
Tabella 4.3: granulometria inerte bianco.....	53
Tabella 4.4: granulometria inerte bianco.....	54
Tabella 4.5: granulometria sabbia	54
Tabella 4.6: Percentuali di inerte nei vari mix	55
Tabella 4.7: MIX 1	56
Tabella 4.8: MIX 2	57
Tabella 4.9: MIX 3	57
Tabella 4.10: MIX 4	58
Tabella 4.11: MIX 5	59
Tabella 4.12: tensione di rottura a 28 giorni dal getto	66

Indice dei diagrammi

Diagramma 2.1: curva sforzi-deformazioni ottenuta tramite una procedura di prova monoassiale D in accordo al ASTM-D7012, fonte ASTM-D7012.....	17
Diagramma 3.1: UCS a 7 giorni con inerte acquistato e sabbia granita.....	21
Diagramma 3.2: UCS a 28 giorni con inerte acquistato e sabbia granita.....	22
Diagramma 3.3: UCS a 28 giorni con frantumato d'acquisto	22
Diagramma 3.4: UCS a 28 giorni con mix inerti minaggio e acquistati	23
Diagramma 3.5: UCS a 28 giorni con frantumato di miniera e sabbia granitica	24
Diagramma 3.6: UCS a 28 giorni in funzione della percentuale di sabbia per $0,8 < a/c < 0,9$...	25
Diagramma 3.7: UCS a 7-28-90 giorni	25
Diagramma 3.8: UCS con cemento con classe di resistenza 32,5.....	26
Diagramma 3.9: prove in secchio con cemento con classe di resistenza 42,5	29
Diagramma 3.10: andamento della resistenza con la percentuale di inerte bianco nella coltivazione	30
Diagramma 3.11: 100% sterile bianco con cemento 32,5.....	31
Diagramma 3.12: granulometria galleria S966-S29T	33
Diagramma 3.13: granulometria galleria N968-N10AT	36
Diagramma 3.14: curva granulometrica galleria N968-N14AT	42
Diagramma 3.15: curva granulometria galleria N968-LBN	43
Diagramma 3.16: curva granulometrica galleria S962-N3T	44
Diagramma 3.17: curva granulometrica galleria N968-S24T	45
Diagramma 3.18: curva granulometrica galleria S962-S13AT.....	46
Diagramma 3.19: relazione UCS e a/c	47

Diagramma 3.20: relazione UCS e quantità di cemento	48
Diagramma 3.21; quantità di cemento utilizzata nei vari mix negli anni	48
Diagramma 3.22: UCS medio negli anni	49
Diagramma 3.23: UCS riepilogativo.....	51
Diagramma 4.1: passante cumulativo inerti.....	55
Diagramma 4.2: passante cumulativo MIX 1, MIX 2 e MIX 3	58
Diagramma 4.3: passante cumulativo MIX 4 e MIX 5	59
Diagramma 4.4: compressione monoassiale MIX di progetto.....	67
Diagramma 4.5: valori medi compressione monoassiale MIX di progetto.....	67
Diagramma 4.6: UCS medio negli anni con prove svolte nel 2020.....	68

1. Introduzione

1.1. Miniera di Rodoretto

La miniera di Rodoretto è una delle più importanti miniere europee per quanto concerne l'estrazione del talco. Situata vicino il comune di Prali, in Val Germanasca (complesso alpino Dora-Maira), si trova nel sud-ovest del Piemonte. La valle prende il nome di “Valle Bianca” sia a causa dei lunghi periodi di innevamento che caratterizzano la valle sia a causa della presenza di ricchi giacimenti di marmo e talco, dei quali quest'ultimo è particolarmente puro e apprezzato. La miniera, che è stata sfruttata fin dal XIX secolo, è suddividibile in numerosi complessi.

Nello studio sviluppato ci si concentra sulla miniera di Rodoretto, la più recente aperta nell'area.

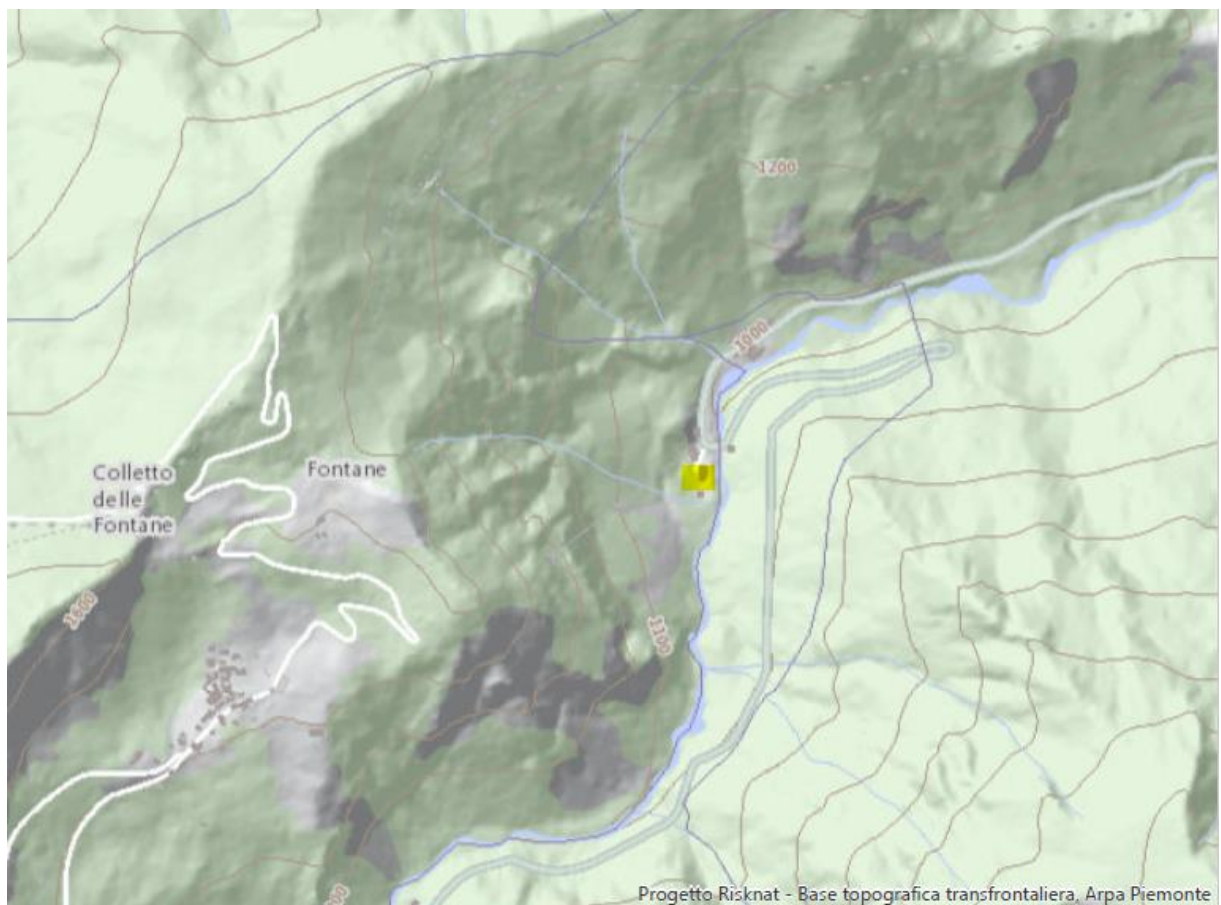


Figura 1.1: Miniera di Rodoretto, imbocco di Pomeifrè

1.2. Inquadramento geologico

La Valle Germanasca è composta da un basamento di roccia metamorfica risalente al Paleozoico ricoperto da depositi di natura marina e continentale (Daneshmand et al., 2013). La valle si estende per la maggior parte lungo il contatto tra il Massiccio di Dora-Maira (di origine continentale) e la Falda Pennidica (ricca di calcescisti con pietre verdi).

La maggior parte delle miniere di talco si sviluppano lungo questo contatto. In particolare, la miniera di Fontane, nella sezione di Rodoretto, è ancora attiva.



0  1,38 km

Figura 1.2: inquadramento geologico miniera di Rodoretto, dal Geoportale Nazionale

N15: micascisti e paragneiss, filladi, marmi (metamorfiti prealpine di medio grado);

N24: metabasiti, eclogiti, anfiboliti, pietre verdi (ofioliti e pietre verdi);

R60: calcari e marne metamorfosate in scisti associati con radiolariti (Giurassico).

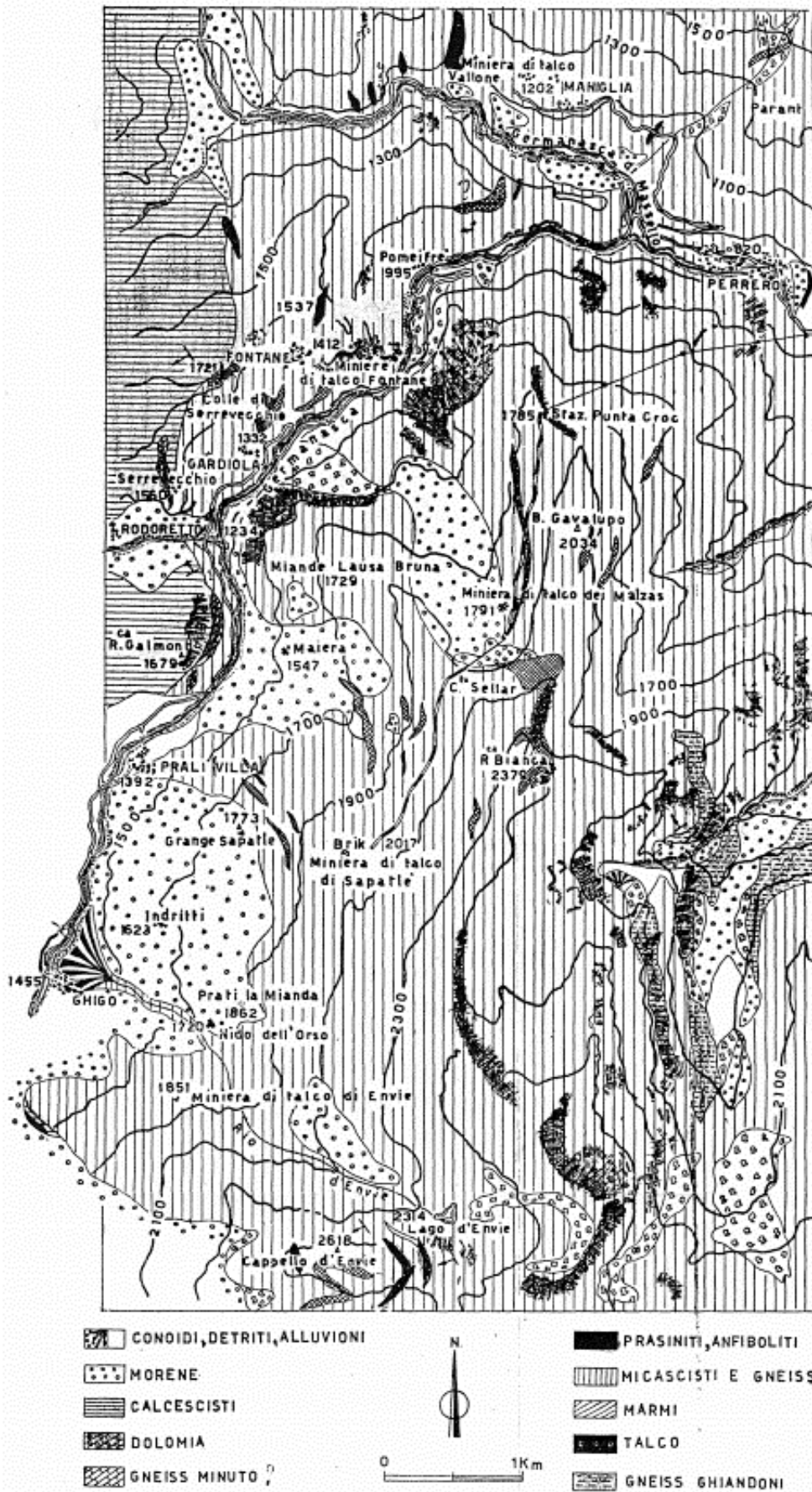


Figura 1.3: inquadramento geologico, Ist. Lomb. Sc. e Lett., 1955

1.3. Talco

Il talco è un silicato di magnesio idrato ed il più soffice materiale sulla terra, occupando il valore unitario nella scala di Mohs. Risulta essere untuoso al tatto e di colore variabile dal bianco al rosato, fino a colorazioni sul blu.

Il talco si presenta in forma di lamine compatte e scagliose e presenta la formula chimica $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$. Le lamine di talco sono flessibili ma non elastiche e le polveri di talco sono ritenute pericolose per i polmoni dei lavoratori dell'industria mineraria estrattiva.

È un materiale di origine secondaria, presente sia nelle rocce eruttive sia, come nel caso del giacimento in esame, di quelle metamorfiche. L'origine dei giacimenti è attribuibile a metamorfismo regionale di rocce basaltiche o dolomie silicee.

Tra gli usi principali del talco si annoverano impieghi nella produzione di lubrificante secco, come agente fluidificante nella produzione delle ceramiche e nella produzione industriale di paraurti. Viene inoltre operato nella preparazione di pitture, vernici e stucchi, nonché nella cosmesi e nella farmacopea se di elevata purezza. Il comune borotalco identifica un prodotto con talco e acido borico come prodotti di base.

1.4. Miniera moderna

L'installazione Imerys si trova lungo il pendio delle colline della valle, ad un'altezza di 1020m sopra il livello del mare (Figura 1.4).

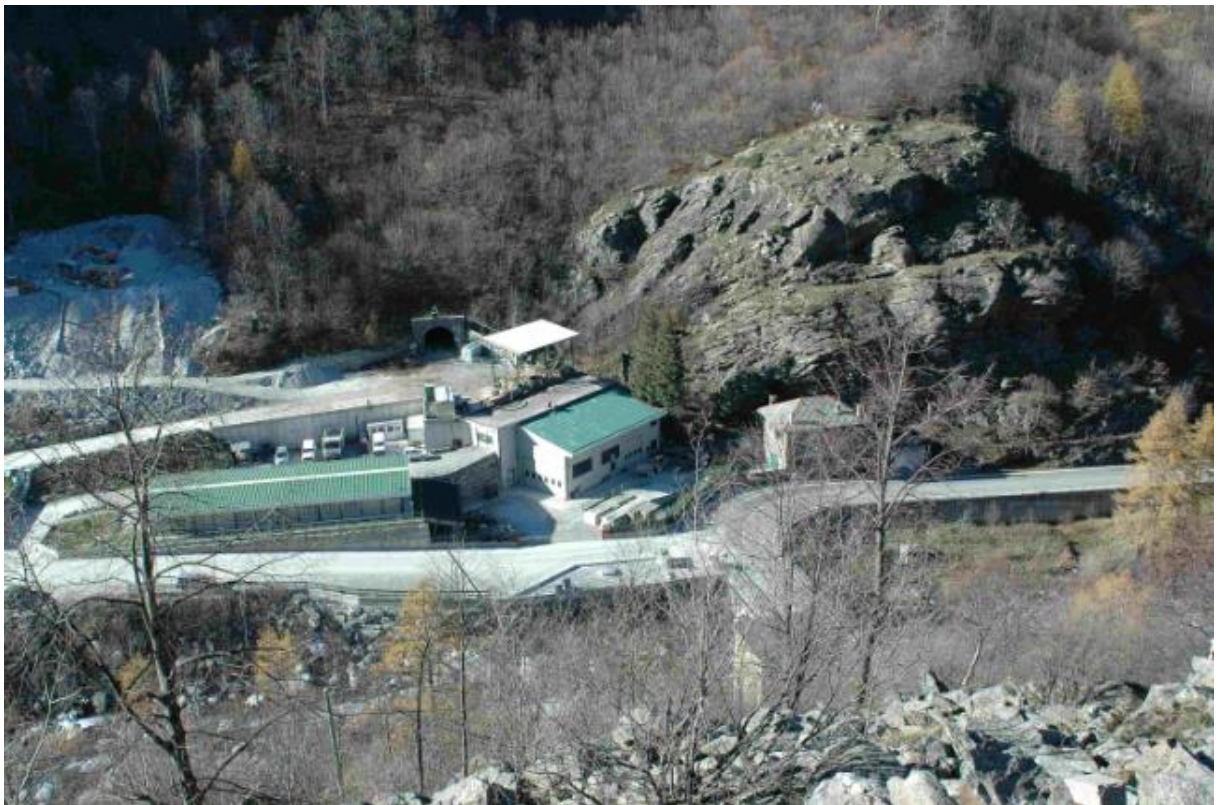


Figura 1.4: installazione Imerys

La miniera presenta un imbocco principale con un'inclinazione dell'1% e una sezione trasversale di 5x5m. Dopo una lunghezza di 1800m la galleria principale si divide in due più piccole. La prima è notevolmente inclinata ed è utilizzata per l'esplorazione del sottosuolo, la seconda è la rampa di accesso al sistema di gallerie principale con un'inclinazione del 7,5%.

Il metodo di scavo adottato nella miniera di Rodoretto è il back and fill inverso. Lo scavo procede, partendo dalla rampa principale, a causa della presenza di grosse sezioni di materiale duro, con il drill & blast. Un sistema di ventilazione assicura la pulizia dell'aria durante tutte le fasi di scavo delle gallerie principali.

Da quelle si diramano una serie di gallerie parallele e separate tra di loro con una distanza pari alla lunghezza trasversale della sezione delle stesse, 3,8m. Da queste gallerie si estraggono circa 100,000ton di materiale l'anno, dei quali 30,000ton sono di talco. Una volta che le gallerie sono esaurite vengono chiuse attraverso l'iniezione di calcestruzzo lungo tutta la lunghezza. Successivamente alla maturazione del calcestruzzo vengono scavate delle gallerie nelle sezioni comprese tra le gallerie esaurite e il processo viene ripetuto. Una volta che l'intero piano è esaurito ed è stato chiuso, lo scavo procede sul livello inferiore utilizzando un sistema di gallerie inclinate sul piano orizzontale rispetto al sistema di gallerie superiore.

Il calcestruzzo utilizzato per la chiusura non necessita un'elevata resistenza meccanica, è infatti richiesta una resistenza a compressione cubica di 6MPa. Il calcestruzzo è pompato direttamente all'interno della galleria.

1.5. Ripiena bianca

Al fine di diminuire i costi connessi alla chiusura delle gallerie esaurite si è pensato di utilizzare un aggregato ricavato dagli scarti dello scavo principale. Tale aggregato presenta tuttavia quantità non trascurabili di talco che vanno a determinare un indebolimento del calcestruzzo finale. Sia a causa della poca resistenza del materiale sia della struttura lamellare si è infatti osservato che, in presenza di grani di dimensioni elevate, la rottura avviene preferibilmente attraverso i grani medesimi. Si vuole quindi studiare una soluzione al problema garantendo un vantaggio economico per l'azienda e al contempo la sicurezza dei lavoratori durante i successivi scavi.

2. Fondamenti teorici

2.1. Metodi di scavo

A causa delle variabili e complesse condizioni geologiche della zona (vedi paragrafo 1.2) è necessario utilizzare diverse tipologie di scavo tradizionale. Tra quelle utilizzate si intende richiamare in questo paragrafo le più importanti: il drill & blast e lo scavo tradizionale mediante brokk.

2.1.1. Drill & blast

Il drill & blast è una procedura ciclica nella quale si alternano differenti fasi (figura 2.1). È solitamente eseguita su ammassi rocciosi di buona qualità, dove normali procedure tradizionali determinerebbero un eccessivo rallentamento dello scavo.

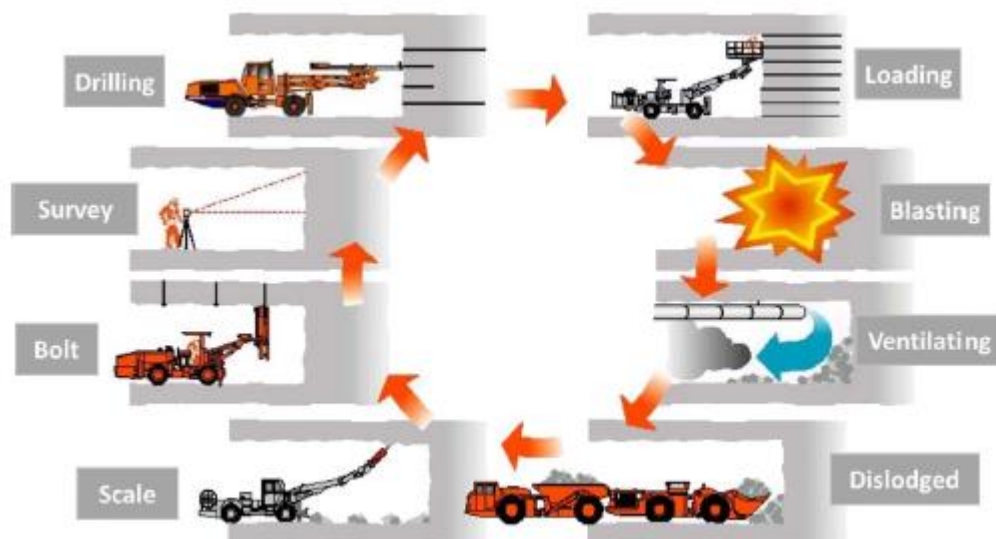


Figura 2.1: fasi del drill & blast

Dapprima vengono scavati i fori necessari per l'inserimento dell'esplosivo. La posizione e la spaziatura dei fori è tale da garantire, tramite l'uso di correlazioni empiriche basate sulle caratteristiche dell'ammasso e dell'esplosivo, una corretta rimozione dell'intero fronte di scavo. Successivamente si procede al carico dei fori. Questi vengono caricati con quantità differenti di esplosivo in dipendenza della posizione nel fronte. La galleria viene quindi evacuata e si procede all'esplosione. La carica viene fatta detonare in modo differito procedendo dal centro verso i contorni del fronte di scavo. Dopo la detonazione viene attivato il sistema di ventilazione in maniera da ripulire la galleria da polveri e gas nocivi e garantire la sicurezza dei lavoratori. Successivamente si procede alla rimozione del materiale frantumato e alla sistemazione dei contorni della galleria, che possono presentare spigoli e disomogeneità dovuti ai processi di installazione ed esplosione delle cariche. Il contorno viene poi opportunamente ancorato, basando il posizionamento delle chiodature su analisi dell'ammasso roccioso, al fine di evitare la caduta di volumi instabili. Infine, si

valuta la corretta esecuzione del processo attraverso opportuni sondaggi effettuati, solitamente, tramite una stazione totale.

La profondità raggiungibile con un singolo ciclo varia dai 2 ai 4m, con variazioni locali dovute alla disomogeneità della matrice rocciosa e al processo di carica degli esplosivi. L'intero ciclo risulta abbastanza rapido, permettendo anche più detonazioni durante la giornata.

2.1.2. Brokk

I brokk sono dei macchinari da demolizione comandati da remoto costituiti da una base, un braccio meccanizzato e una testa intercambiabile (figura 2.2).

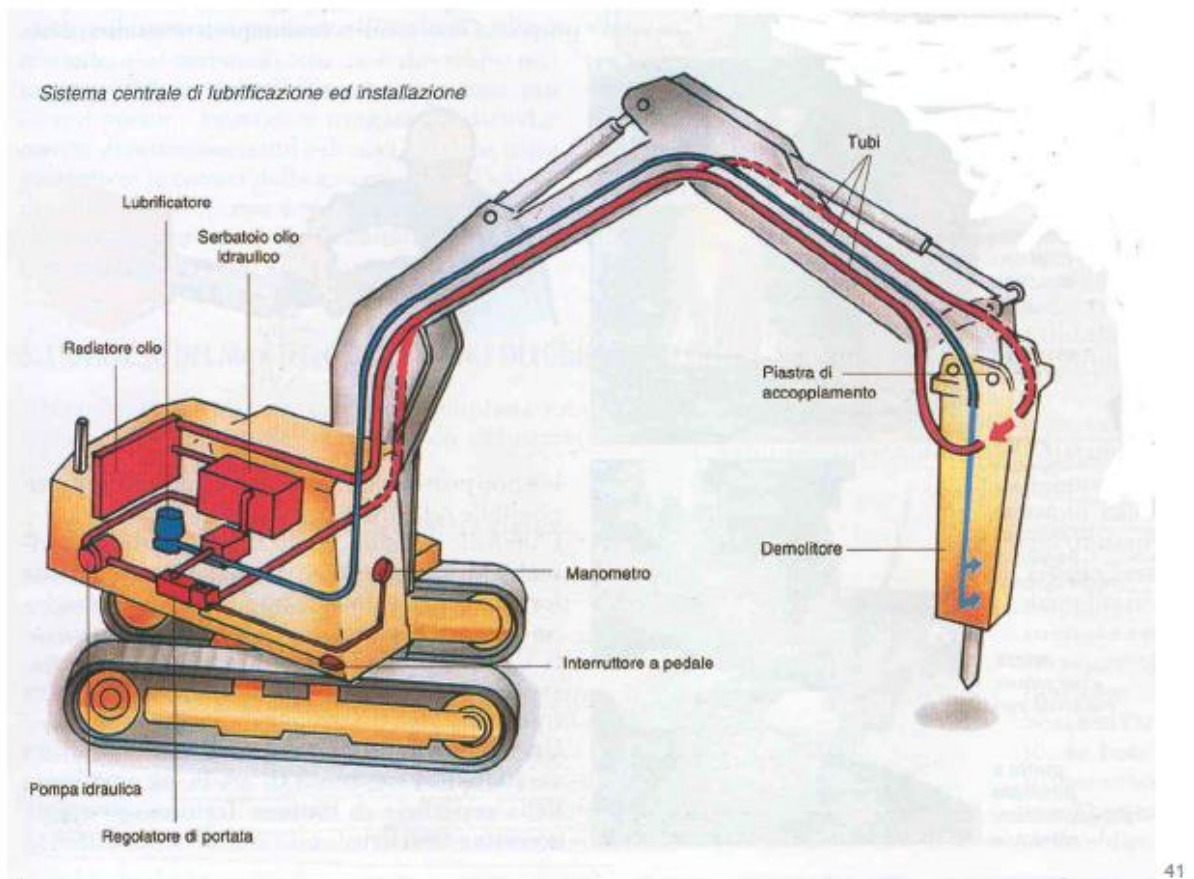


Figura 2.2: brokk

La testa può essere sostituita permettendo l'utilizzo di diversi strumenti, tra i quali:

- High Energy Impact Hammer;
- Demolitore per rocce;
- Splitter;
- Perforatore;
- Iniettore per shot crete.

2.2. Caratterizzazione delle ripiene

Le ripiene possono essere sciolte o cementate. Le prime di queste sono costituite da legante (solitamente cemento) e aggregati, le seconde invece sono composte da acqua, legante e aggregato. L'utilizzo di ripiene cementate rispetto a quelle sciolte presenta numerosi vantaggi:

- Applicabilità nelle coltivazioni discendenti;
- Drastica riduzione delle armature tradizionali;
- Possibilità di aprire cantieri di dimensioni maggiori con conseguente aumento di produttività;
- Impiego di mezzi di scavo e trasporto più produttivi;
- Miglioramento delle condizioni di lavoro nei cantieri (stabilità e migliore ventilazione).

A questi vantaggi si accompagna l'inconveniente di una maggiore incidenza economica della ripiena cementata rispetto a quella sciolta.

Al raggiungimento di buone caratteristiche fisico-meccaniche del conglomerato cementizio partecipano diversi fattori:

- Tipo e quantità di cemento;
- Curva granulometrica degli inerti;
- Quantità di acqua di impasto;
- Metodologia di messa in opera.

Il cemento più comunemente impiegato è il Portland. Il contenuto di cemento può variare entro limiti piuttosto ampi ($100\div 250\text{kg/m}^3$) a seconda delle funzioni che l'opera finita deve assumere.

Il quantitativo d'acqua viene espresso tramite il rapporto acqua/cemento a/c [l/kg]. Questo parametro è solito variare tra 0,4 e 0,7l/kg, poiché in questo range si ottengono i valori massimi per la resistenza del calcestruzzo. È possibile tuttavia arrivare ad un rapporto pari a 0,8l/kg qualora sia necessaria una particolare fluidità durante il trasporto.

2.2.1. Cementi

Tutte le sostanze che, impastate con acqua, danno origine ad una massa plastica soggetta a progressivo indurimento nel tempo fino a raggiungere una elevata resistenza meccanica, si dicono leganti.

Nel processo di indurimento è convenzionale distinguere due fasi:

- La presa, che è il periodo di tempo durante il quale la massa iniziale fluida diventa consistente e in grado di conservare la forma impartita.
- L'indurimento, che è il periodo di tempo durante il quale vi è un continuo aumento delle caratteristiche meccaniche. Questa fase segue quella di presa.

Se il processo di indurimento avviene solamente qualora il calcestruzzo sia esposto all'aria i leganti vengono detti aerei, se invece avviene anche in presenza di acqua si definiscono leganti idraulici (i cementi ricadono in questa categoria).

La proprietà del cemento di fare presa ed indurire è dovuta alla presenza di una serie di fasi (silicati, alluminati e alluminoferriti di calcio) capaci di reagire insieme all'acqua dando luogo a prodotti insolubili con proprietà cementanti.

La miscela di acqua e cemento viene detta pasta. La miscela di acqua, cemento e inerti è invece chiamata malta se gli inerti sono sabbie, o calcestruzzo se invece gli inerti sono sabbie e ghiaie.

I prodotti tipici della famiglia dei cementi sono classificati secondo la normativa EN/197-1 nei seguenti gruppi:

- CEM I, cemento portland: è un cemento costituito almeno per il 95% da clinker e in misura variabile da costituenti minori (tra lo 0 e il 5%). Sono solitamente utilizzati per calcestruzzi armati semplici e precompressi;
- CEM II, cemento portland composito: il clinker varia con una percentuale tra il 65 e il 94%, gli altri costituenti principali sono le loppe granulate d'altoforno, fumi di silice, le pozzolane, le ceneri volanti, il calcare e gli scisti calcinati. Le proprietà sono molto simili a quelle del CEM I;
- CEM III, cemento d'altoforno: sono costituiti da clinker fino al 64% e loppe granulata basica d'altoforno. Questo cemento è principalmente indicato per ambienti chimicamente aggressivi e per opere di grosse dimensioni;
- CEM IV, cemento pozzolanico: il clinker è compreso tra il 45 e l'89%, a cui viene aggiunto materiale pozzolanico naturale o artificiale in percentuale tra l'11 e il 55%. I materiali pozzolanici conferiscono un'elevata resistenza all'attacco chimico;
- CEM V, cemento composito: sono costituiti da una miscela di clinker, loppe d'altoforno e pozzolana e sono particolarmente indicati per ambienti mediamente aggressivi quali acqua di mare, acque acide, terreni solfatici, etc.

Per ciascuna delle cinque classi descritte esistono diversi sottotipi in funzione del contenuto di clinker, degli altri costituenti principali e della classe di resistenza (che può essere 32,5, 42,5, 52,5 ecc).

Esistono infine numerose altre sottocategorie di cementi (Portland bianco, alluminosi, idraulici microfini, etc.).

La normativa italiana (C11.2, NTC2018) classifica i cementi in base alla loro resistenza meccanica. Le prove sono eseguite su una malta confezionata con cemento e una sabbia standardizzata considerando un rapporto a/c pari a 0,5 e un rapporto sabbia/cemento s/c pari a 3. Sulla base dei risultati della prova, effettuata a 28 giorni su un provino cubico di spigolo standard lungo 150mm, si ricava il valore di resistenza a compressione. Questo valore permette di suddividere ogni classe CEM in 3 classi di resistenza:

- Cemento normale (resistenza del provino cubico 325kg/cm²);
- Cemento ad alta resistenza (resistenza del provino cubico 425kg/cm²);
- Cemento ad alta resistenza e rapido indurimento (resistenza del provino cubico 525kg/cm² o superiore).

Di seguito si riporta una tabella con le principali tipologie di cemento.

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		UNI EN 197/1:2001 - Composizione (Percentuale in massa) ^a										Costituenti secondari	
			Costituenti principali											
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumi di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare			
						Naturale	Naturale calcinata	Silicea	Calcica		L	LL		
K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Cemento Portland composito ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	-	-	-	0-5	
	CEM II/B-M	65-79	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	-	-	-	0-5	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	11-35	11-35	11-35	11-35	11-35	-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55	36-55	36-55	36-55	36-55	-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30	18-30	18-30	18-30	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50	31-50	31-50	31-50	-	-	-	0-5	

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari

b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%

c) Nei cementi Portland compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati nella denominazione del cemento.

Tabella 2.1: classificazione dei cementi (cortesia di Maurizio Tava)

2.2.2. Inerti

Si designa con questo nome la porzione solida di calcestruzzo, costituita da sabbia, ghiaia e pietrisco, che non partecipa ai fenomeni chimico-fisici che accompagnano l'idratazione del cemento (questi elementi nel lungo periodo possono interagire con il cemento, motivo per il quale si preferisce il termine *aggregati*).

Gli inerti possono essere facilmente suddivisi in base alla provenienza, si distinguono infatti:

- Inerti naturali, provenienti da depositi di vario genere (fluviali, glaciali, etc.);
- Inerti artificiali, provenienti da frantumazione di rocce compatte o da residui di lavorazioni industriali.

La presenza dell'inerte nel calcestruzzo è dovuta a ragioni economiche, per ridurre il ritiro della pasta cementizia durante la fase di presa e per migliorare la durabilità del conglomerato in opera.

La fase inerte agisce su differenti proprietà del calcestruzzo, andando a modificare la massa volumica, il modulo elastico, la stabilità e la durabilità.

L'influenza della fase inerte sulla resistenza meccanica del calcestruzzo indurito è marginale poiché la singola particella ha una resistenza meccanica di molto superiore rispetto sia alla matrice di cemento sia alla zona di interfaccia tra particella e cemento. La rottura, avvenendo sulla superficie di minore resistenza, favorisce le ultime fasi citate andando ad evitare i grani di aggregato.

Di particolare interesse sono le seguenti proprietà degli aggregati:

- Caratteristiche dipendenti dalla porosità (imbibizione);
- Caratteristiche dipendenti dal ciclo di trattamento subito, naturale o artificiale (smussatura, forma, dimensioni);
- Caratteristiche dipendenti dalla composizione chimica e mineralogica (resistenza meccanica, durezza, modulo elastico, inclusioni).

La forma, l'arrotondamento e la tessitura degli inerti influiscono sulla lavorabilità del calcestruzzo, è stato infatti dimostrato che inerti con spigoli più vivi, a parità di rapporto a/c, consentono una migliore adesione cemento-aggregato, fornendo caratteristiche meccaniche migliori. Inerti più arrotondati migliorano invece la lavorabilità del calcestruzzo.

La difficoltà delle analisi quantitative di aggregati a spigolo vivo e arrotondato, nella fattispecie per bassi range granulometrici, tende tuttavia a rendere difficile determinarne le percentuali.

Con gli aggregati possono essere introdotte numerose sostanze indesiderate che determinano peggioramenti del calcestruzzo. Tra le più comuni inclusioni abbiamo:

- Sostanze organiche
Presenti in prevalenza nella sabbia, incidono negativamente sul processo di idratazione, causando un aumento del tempo di presa.
- Silice reattiva
La reazione alcali-silice è la più deleteria sia per intensità d'effetto sia per l'estensione del fenomeno. Alcune forme di silice, quali l'opale, il calcedonio e il quarzo criptocristallino, reagiscono con le alcali presenti solitamente nel cemento, dando origine a espansioni e fessurazioni.
- Sostanze argillose
Tali sostanze, depositandosi sulla superficie degli inerti, inibiscono l'adesione tra pasta cementizia e grani, determinando un aumento del rapporto a/c per raggiungere la lavorabilità richiesta, che porta tuttavia a una riduzione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito. Tra i materiali argillosi più comuni si trova la pirite, la marcassite e i minerali a base di piombo.
- Cloruri e solfati
Interferiscono con il meccanismo di presa e indurimento. In particolare, gli ioni SO_4^{2-} reagiscono con gli alluminati idrati del calcestruzzo causando espansioni, compromettendo l'integrità strutturale dell'opera.

Nel confezionamento del conglomerato cementizio è importante valutare la corretta distribuzione granulometrica degli inerti al fine di diminuire il costo unitario dello stesso. L'analisi granulometrica consiste nel separare un insieme di inerti in diversi gruppi di

granuli aventi dimensioni comprese tra un limite superiore ed uno inferiore, tali gruppi vengono chiamati *classi granulometriche*.

Esistono numerose tecniche utilizzate per effettuare una divisione granulometrica: setacciatura, esame microscopico, sedimentazione per mezzo di fluido.

Queste tecnologie vengono spesso utilizzate congiuntamente, poiché sono applicabili per classi granulometriche differenti.

I risultati delle analisi vengono rappresentati graficamente. In ascissa si ha la dimensione, generalmente in scala logaritmica, dei grani (espressa in millimetri), in ordinata si ha la percentuale cumulata in peso.

La distribuzione granulometrica dell'aggregato per calcestruzzo deve rispondere a determinati requisiti:

- Massima densità del calcestruzzo con minimo dosaggio di cemento,
- Massima lavorabilità,
- Minima segregazione.

Tali obiettivi sono antitetici, si decide perciò di volta in volta un compromesso adatto all'opera di progetto, valutando che la lavorabilità aumenta con la quantità di legante, in contrasto con l'intento di minimizzazione del cemento.

Il requisito della massima densità del conglomerato con il minimo dosaggio di cemento è equivalente a quello del minimo contenuto di vuoti interstiziali tra i grani di inerte. Esso viene realizzato tramite la curva granulometrica descritta da Füller:

$$p_t = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1)$$

Dove:

- p_t è la percentuale in peso del passante cumulativo al setaccio di apertura d ;
- D è il diametro massimo dell'inerte.

Poiché ottenere operativamente e con affidabilità una curva granulometrica che segua quella di Füller risulta difficile è possibile riferirsi al *fuso di Füller* riportato nella norma UNI 7163-72.

Dal punto di vista della lavorabilità è stata invece proposta l'equazione di Bolomey, riferita all'insieme inerti-cemento:

$$p_t = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (2)$$

Dove:

- A è una costante in funzione della forma dell'inerte e della lavorabilità richiesta, determinabile in maniera approssimata tramite una relazione con lo slump del campione.

2.2.3. Additivi

Durante la fase di miscelazione del calcestruzzo ai componenti fondamentali (acqua, inerte, legante) vengono spesso aggiunte piccole quantità di additivi con differenti funzioni. Il dosaggio degli additivi viene controllato con attenzione, poiché piccole modifiche alle percentuali determinano una notevole riduzione delle caratteristiche meccaniche del prodotto indurito.

Solitamente gli additivi vengono aggiunti in percentuali in peso comprese tra lo 0,2 e il 2%.

Gli additivi vengono classificati in funzione dell'effetto che determinano sul calcestruzzo:

- Acceleranti
Si tratta di prodotti idrosolubili che catalizzano le reazioni di idrolisi dei costituenti del clinker. In commercio sono reperibili acceleranti di presa e acceleranti di indurimento. Accelerando la reazione di idratazione, che è isoterma, lo sviluppo di calore viene contenuto in un intervallo di tempo più breve, cosicché si verifica un aumento della temperatura di getto. Ciò impedisce il congelamento dell'acqua di impasto. L'irrigidimento precoce incrementa le resistenze a compressione alle brevi scadenze (3-7 giorni). Dosaggi normali si apprestano intorno al 2% in peso rispetto al cemento.
- Ritardanti
Sono sostanze generalmente organiche, il loro compito è ritardare il processo di indurimento e/o presa, aumentando i tempi di lavorabilità e diminuendo la temperatura durante il processo.
- Fluidificanti
Tali sostanze migliorano la tendenza alla deformazione dei calcestruzzi per effetto di costipazione e vibrazione. Spesso sono dei tensioattivi che riducono le forze di attrazione tra le particelle di acqua, cemento e aggregati fini, facilitando lo scorrimento viscoso. Inoltre abbassano la tensione superficiale all'interfaccia tra acqua, cemento e fini, rendendo il calcestruzzo più fluido e lavorabile. Un miglioramento della lavorabilità del calcestruzzo, a parità del rapporto a/c, si può raggiungere aumentando leggermente il dosaggio di cemento. Qualora questo fosse già abbondante, onde evitare il rischio di un eccessivo ritiro, si preferisce utilizzare fluidificanti, in percentuali comprese tra il 2 e il 3% in peso rispetto al quantitativo di cemento.
- Plastificanti
Migliorano la viscosità, stabilità e omogeneità del calcestruzzo aumentandone la coesione. Tornano utili nel caso di impasti con pochi aggregati fini e basso dosaggio di cemento, perché, essendo prodotti solidi (bentonite, farina fossile, ceneri) con granulometria simile a quella del cemento, completano in un certo senso la granulometria di malte e calcestruzzi. Il dosaggio varia tra l'1 e il 3% in peso rispetto al cemento.
- Aeranti
Sono impiegati per creare percentuali di vuoti modeste (5-6% in volume) sotto forma di bolle d'aria di diametro compreso tra i 20 e i 200 μm . L'effetto desiderato non è l'alleggerimento della struttura finita, ma il miglioramento della resistenza al gelo. Le bolle, non comunicanti tra loro né con l'esterno, chiudono i pori capillari e formano cavità entro le quali si depositano acqua e ghiaccio. Comportandosi da cuscinetti

assorbono le tensioni generate da cicli di gelo e disgelo. Inoltre nel calcestruzzo indurito si registra una migliore impermeabilità perché le bolle si oppongono all'entrata di acqua nei capillari. L'aerante diminuisce gli attriti tra particelle nel calcestruzzo fresco, esplicando un'azione positiva nei confronti della lavorabilità e della plasticità. Il dosaggio è funzione del rapporto a/c, della temperatura esterna, del tipo di cemento, della modalità di messa in opera, del tipo e della granulometria dell'aggregato.

- Idrofughi

Un calcestruzzo ha inevitabilmente un grado di permeabilità dovuto a imperfetta omogeneizzazione dell'impasto e a insufficiente costipazione. Gli idrofughi migliorano l'impermeabilità e forniscono una protezione all'assorbimento capillare. Si dividono in idrofughi di massa e idrofughi di superficie. I primi, costituiti da bentonite miscelata con tensioattivi e oli, chiudono i capillari senza ridurre la resistenza meccanica e vengono aggiunti a tutta la miscela durante il confezionamento. I secondi invece creano uno strato superficiale impermeabile.

- Antigelo

Sono sostanze idrosolubili che accelerano l'indurimento del calcestruzzo. A seconda del tipo di antigelo considerato, è possibile lavorare con calcestruzzo fresco fino a temperature di -10°C .

2.2.4. Trasporto del calcestruzzo e posa in opera

Il trasporto è l'operazione mediante la quale dal luogo della miscelazione la massa del calcestruzzo fresco viene portata dove è prevista la posa.

La tecnica di trasporto più comune in cantieri edili è il sollevamento delle benne (coniche a doppia valva, a cilindro conico con otturatore) a mezzo gru. L'inconveniente è la ciclicità dell'operazione che comporta tempi morti. Inoltre lo svuotamento della benna, specie nel caso di calcestruzzi poco lavorabili, può diventare un'operazione lunga.

L'impiego di trasportatori a nastro, esteso a cantieri minerari e civili, presenta il vantaggio di ridurre i tempi morti e coprire distanze notevoli. L'inclinazione massima dei nastri è di 30° rispetto all'orizzontale per calcestruzzi di media consistenza, mentre la velocità varia tra 0,3 e 3m/s. per evitare la separazione delle fasi durante il moto si ricorre a nastri con risalti in gomma. La tecnica di trasporto con nastro non è versatile e necessita di continua manutenzione.

I dumpers a cassone ribaltabile sono impiegati qualora si richiedano alte portate di calcestruzzo fresco e tragitti inferiori ai 5km, anche se la massima efficienza viene raggiunta per tratte di 1km. Lo svantaggio per questo sistema è la ciclicità delle operazioni e la segregazione.

La coesistenza delle operazioni di miscelazione e trasporto avviene impiegando l'autobetoniera. Questa consiste in un tamburo cilindro-conico con asse inclinato di 15° , montato su un autotelaio e capace di girare ricorrendo alla forza motrice del motore del veicolo o di un motore ausiliario. Alle pareti interne del tamburo sono assemblate a spirale delle piastre in acciaio che in fase di rotazione miscelano il calcestruzzo. Durante la miscelazione il tamburo ruota di 15rpm. Con questo sistema vengono ridotti i tempi morti e la continua miscelazione limita l'entità della segregazione.

Il trasporto del calcestruzzo può avvenire anche attraverso l'uso di pompe e tubazioni. Questa tecnologia presenta dei limiti di impiego dovuti alla dimensione massima dell'aggregato, che non deve eccedere $\frac{1}{3}$ del diametro del tubo di mandata.

Le metodologie previste finora presentano la comune limitazione dovuta al fenomeno della segregazione. Tale fenomeno produce, a causa della differenza di densità delle fasi costituenti il calcestruzzo, la suddivisione dello stesso nelle sue fasi. Il calcestruzzo risulta indebolito da questo fenomeno, è quindi sempre opportuno programmare sistemi di miscelazione del calcestruzzo durante tutta la fase di trasporto e messa in opera.

2.3. Back & fill inverso

La procedura di scavo prevede di utilizzare uno scavo convenzionale coadiuvato da drill & blast nelle sezioni con materiale a maggior resistenza. Vengono scavate delle gallerie parallele tra di loro con una distanza pari al diametro delle gallerie stesse (3,8m). Il sistema è messo in sicurezza tramite l'utilizzo di centine (figura 2.3) e la pulizia dell'aria è assicurata da un sistema di ventilazione sempre attivo durante tutte le fasi di scavo.

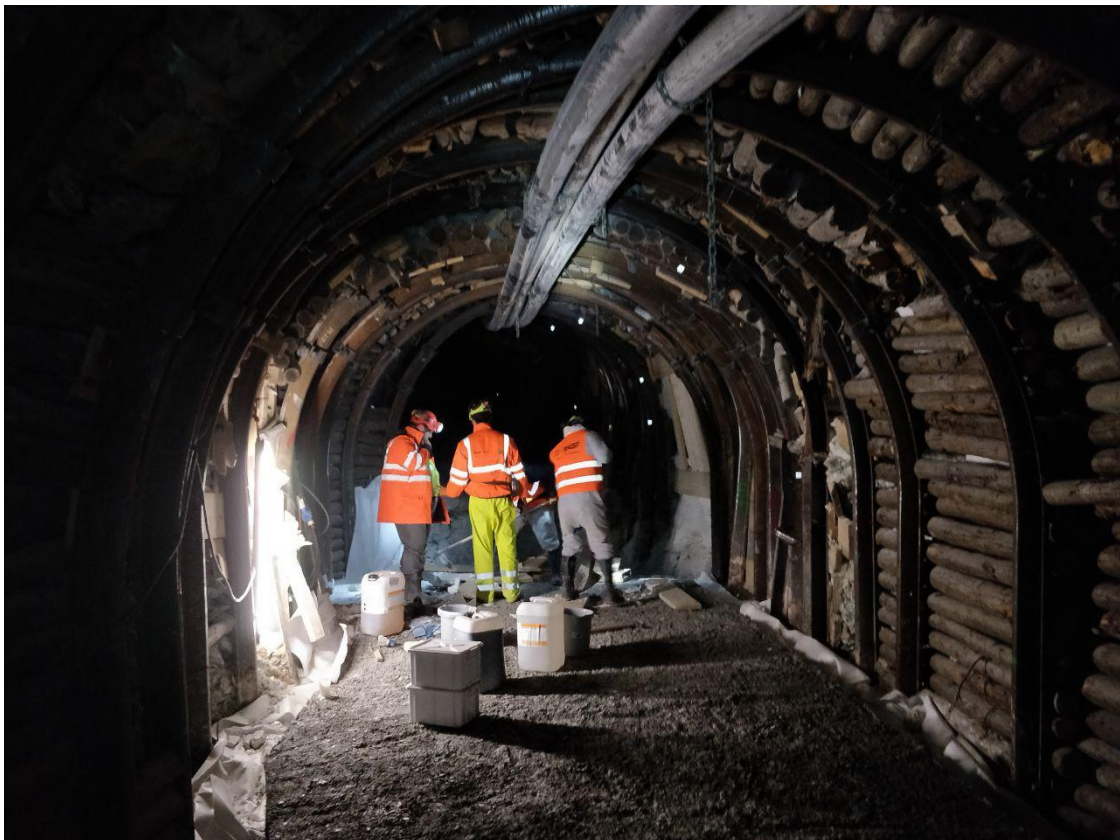


Figura 2.3: Galleria con centine installate

Una volta estratto il materiale, le gallerie vengono chiuse tramite l'utilizzo di una ripiena cementata. Una volta che il processo di indurimento si è concluso si procede allo scavo nelle sezioni comprese tra le prime gallerie, andando a formare un sistema di gallerie parallele alle prime con sezione di egual dimensione (3,8m). la procedura viene quindi ripetuta in toto.

Eseguito lo scavo e effettuata la ripiena in tutto lo strato si procede al livello inferiore, ottenendo in questo modo un nuovo sistema di gallerie immediatamente sotto il precedente. Queste vengono scavate mantenendo un'inclinazione rispetto al sistema sovrastante di 60°, al fine di evitare l'instabilizzazione di volumi di calcestruzzo. Rispetto al metodo back & fill classico (che prevede una procedura dal basso verso l'alto) questo viene adottato poiché la presenza di un tetto della galleria in materiale monolitico conferisce maggiore stabilità alla galleria stessa, favorendo la sicurezza dei lavoratori.

Il materiale estratto viene suddiviso in tre differenti qualità (due di talco e una di rifiuti).

2.4. Prove sperimentali

2.4.1. Prova di compressione monoassiale

La prova a compressione monoassiale consente una misura diretta della resistenza a compressione del provino. La prova viene effettuata secondo la norma ASTM-D7012 seguendo i metodi di prova C e D. Il primo metodo permette il calcolo della resistenza a compressione senza misurare la deformazione (solitamente viene utilizzato questo quando si vogliono ottenere dei parametri speditivi per calcoli progettuali), il secondo metodo di prova prevede invece la determinazione dei moduli elastici tramite l'analisi sia dello sforzo sul provino sia della deformazione dello stesso, dando origine alla curva sforzi-deformazioni. A sua volta il metodo di prova D può essere effettuato *in controllo di sforzi* o *in controllo di deformazioni*. Nel primo viene mantenuto costante l'incremento di tensione nel tempo, nel secondo viene mantenuta costante la deformazione nel tempo.

Viene utilizzato solitamente un provino cilindrico (con altezza di 300mm e diametro di 150mm) o cubico (con lato di 150mm), è tuttavia ammesso di modificare il rapporto tra la lunghezza e la larghezza del provino, purché il rapporto tra le dimensioni sia compreso tra 2:1 e 2.5:1. In dipendenza della forma del provino si registrano due differenti resistenze a rottura, denominate rispettivamente resistenza a rottura cilindrica f_c e resistenza a rottura cubica R_c . Per provini in calcestruzzo è possibile correlare questi due valori tramite la seguente relazione:

$$f_c = 0,83R_c \quad (3)$$

Durante il metodo di prova D vengono registrate le deformazioni radiali ε_r , assiali ε_a e la corrispondente tensione agente σ .

Noti questi valori si ricava la curva sforzi-deformazioni, la quale presenta l'andamento riportato nel diagramma 2.1.

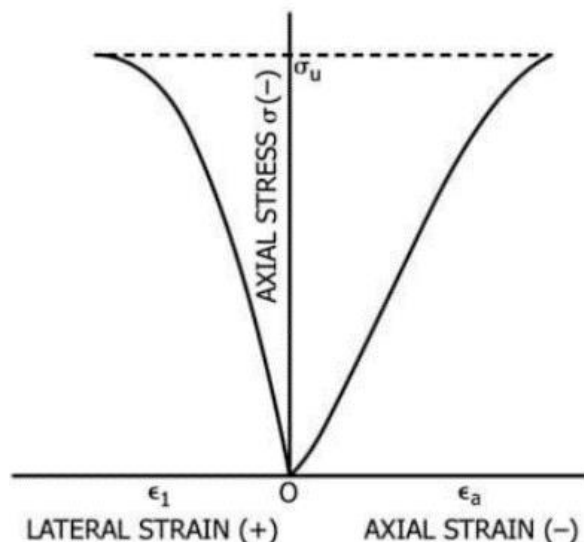


Diagramma 2.1: curva sforzi-deformazioni ottenuta tramite una procedura di prova monoassiale D in accordo al ASTM-D7012, fonte ASTM-D7012

Dall'analisi della curva è possibile osservare, partendo dalla condizione di carico nullo e deformazione nulla, la presenza di tre zone:

- Prima fase. Ottenibile con un leggero incremento della deformazione, è la fase di chiusura delle fessure. In questa fase l'andamento non è lineare e per piccoli incrementi di tensione si ottengono piccole deformazioni. La fase può essere più o meno estesa in dipendenza della quantità di fessure presenti nel provino. Questa fase non è apprezzabile quando si considerano le deformazioni laterali, è invece evidente osservando le deformazioni assiali.
- Seconda fase. Questa è la fase elastico-lineare. È una fase caratterizzata da una diretta corrispondenza tra sforzi e deformazioni. Tutte le deformazioni ottenute nel provino in questa fase possono essere recuperate scaricandolo.
- Terza fase. L'ultima fase, che avviene poco prima della rottura del provino, è la fase plastica. In questa fase si formano nel provino fessure e deformazioni non recuperabili, il comportamento non è elastico-lineare e a piccoli incrementi di tensione corrispondono grandi deformazioni. La fase si conclude con la rottura del provino.

Una volta terminata la prova è possibile ottenere la resistenza a compressione monoassiale σ_u come tensione alla quale avviene la rottura del provino (per rottura si intende un repentino abbassamento del carico sopportabile senza subire notevoli deformazioni). È possibile inoltre definire il modulo elastico del provino E :

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (4)$$

Il modulo elastico del provino può variare in funzione dei valori limite di tensione e deformazione. È utile definire il modulo elastico tangente E_t , ottenuto dal rapporto di sforzi e deformazioni in fase elastica, e il modulo elastico secante E_{sec} , ottenuto dal rapporto tra gli sforzi 0 e $0,5\sigma_u$ e le rispettive deformazioni.

Per testare i provini si utilizza una macchina per la compressione monoassiale disponibile presso il cantiere.



Figura 2.4: macchina per il test di compressione monoassiale utilizzata

2.4.2. Slump test

Il test di consistenza, o slump test o prova di Abrams, serve per misurare la consistenza del calcestruzzo fresco. Questo test è normato secondo la UNI EN 12350-2, della quale richiamiamo i punti fondamentali.

La prova si svolge tramite l'utilizzo di un cono cavo alle due estremità, comunemente chiamato cono di Abrams (fig. 2.4).



Figura 2.5: cono di Abrams

Il cono viene mantenuto fisso in posizione da un operatore mentre il calcestruzzo viene versato in tre strati a circa un terzo dell'altezza dello stampo. Ogni strato viene assestato tramite 25 colpi di barra di costipazione, distribuendoli uniformemente sulla sezione trasversale. Per lo strato inferiore i colpi vengono distribuiti a spirale dal perimetro verso il centro, inclinando leggermente la barra di costipazione. Per lo strato intermedio e quello superiore invece il pestello viene fatto penetrare per tutta la profondità dello strato. Quando riempie lo stampo e compatta lo strato inferiore, si deve aggiungere calcestruzzo in eccesso prima di iniziare l'assestamento. Dopo l'assestamento dell'ultimo strato la superficie superiore deve essere regolata tramite la rimozione del materiale rimanente tramite l'uso della barra di costipazione. Facendo attenzione al mantenimento del cono si deve poi rimuovere il materiale riversato sulla piastra di base. La prova si svolge tramite la rimozione verticale del cono con tempi compresi tra i 5 e i 10 secondi, avendo cura di non apportare scosse allo stesso. Dall'inizio del riempimento alla rimozione dello stampo devono passare non oltre 150 secondi. Successivamente alla rimozione del cono si misura la distanza verticale tra base superiore del cono del cono, posto accanto al getto, e la sommità del getto deformato, come mostrato in fig. 2.5.

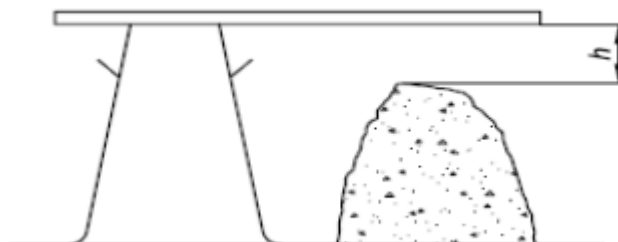


Figura 2.6: altezza da misurare nella prova del cono di Abrams

Sulla base della misura dell'abbassamento vero, arrotondata ai 10mm più prossimi, si classifica il calcestruzzo in 5 classi di consistenza secondo la norma UNI EN 206-2006:

- S1 – consistenza umida: abbassamento da 10 a 40 mm ;
- S2 – consistenza plastica: abbassamento da 50 a 90 mm ;
- S3 – consistenza semifluida: abbassamento da 100 a 150 mm ;
- S4: consistenza fluida: abbassamento da 160 a 210 mm ;
- S5: consistenza superfluida: abbassamento oltre 220 mm .

2.4.3. Bleeding

Lo scopo della prova di bleeding è la valutazione del valore di acqua essudata dal calcestruzzo fresco secondo la norma UNI 7122:1989.

La prova si svolge tramite l'utilizzo di un contenitore cilindrico non deformabile della capacità di 9 litri, avente diametro interno di $240 \pm 5\text{mm}$ ed altezza interna di $200 \pm 5\text{mm}$ e di un contenitore cilindrico graduato con capacità di 100cc .

Il contenitore viene riempito in due strati, compattando ogni strato con 25 colpi. I colpi di pestello devono essere distribuiti uniformemente sull'intera sezione. Inoltre la costipazione dello strato superiore deve essere fatta in modo che il pestello afondi fino alla superficie superiore dello strato sottostante e non oltre. Il contenitore viene poi chiuso con un coperto e lasciato riposare per 1h , misurando poi il volume di acqua essudata.

3. Analisi dei dati

Si analizzano, in questa sezione, tutte le prove svolte nel corso degli anni nella miniera di Fontane. L'analisi dei dati passati permette di progettare un opportuno mix design al fine di minimizzare i costi dell'azienda committente. Si riportano nei prossimi paragrafi le prove svolte dal 2014 al 2019 poiché di queste si hanno informazioni affidabili. Sono infine presentati dei diagrammi comparativi che evidenziano lo sviluppo delle resistenze del calcestruzzo nel corso degli ultimi 6 anni.

3.1. 2014

Nel corso del 2014 sono state svolte numerosissime prove su campioni cubici. Tali prove sono state effettuate tramite l'utilizzo di un mix design variabile, che prevede differenti additivi, differenti rapporti a/c e inerti provenienti sia da terze parti sia da materiale di scarto della miniera. Viene mantenuta costante solo la quantità di cemento, pari a $440\text{kg}/\text{m}^3$. Durante tutte le prove viene misurato lo slump dei provini, determinando una classe di consistenza S5 per ogni campione analizzato.

Si ricorda in particolare il limite inferiore di 6MPa richiesto dal cantiere.

Analizziamo per primi i test effettuati su campioni confezionati tramite l'utilizzo di inerte acquistato e sabbia granita:

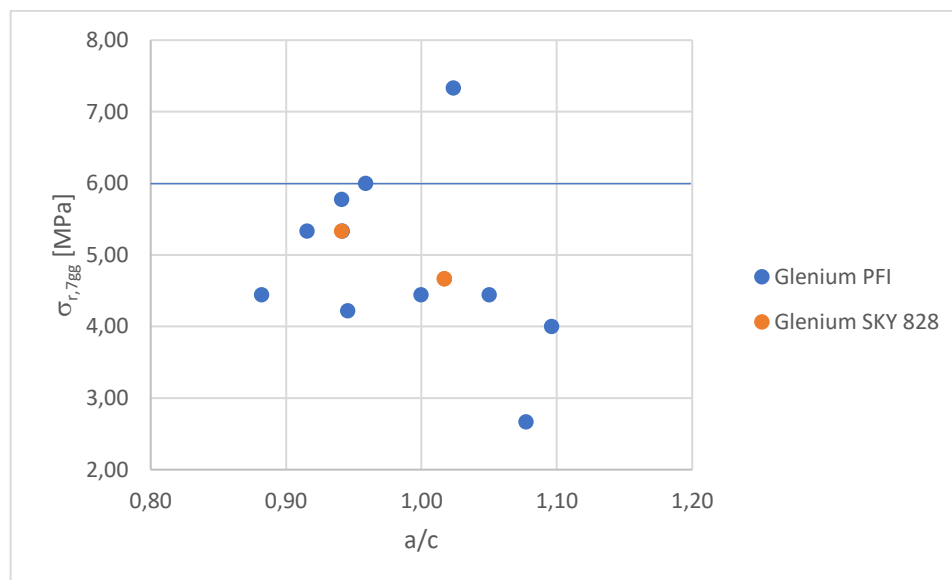


Diagramma 3.1: UCS a 7 giorni con inerte acquistato e sabbia granita

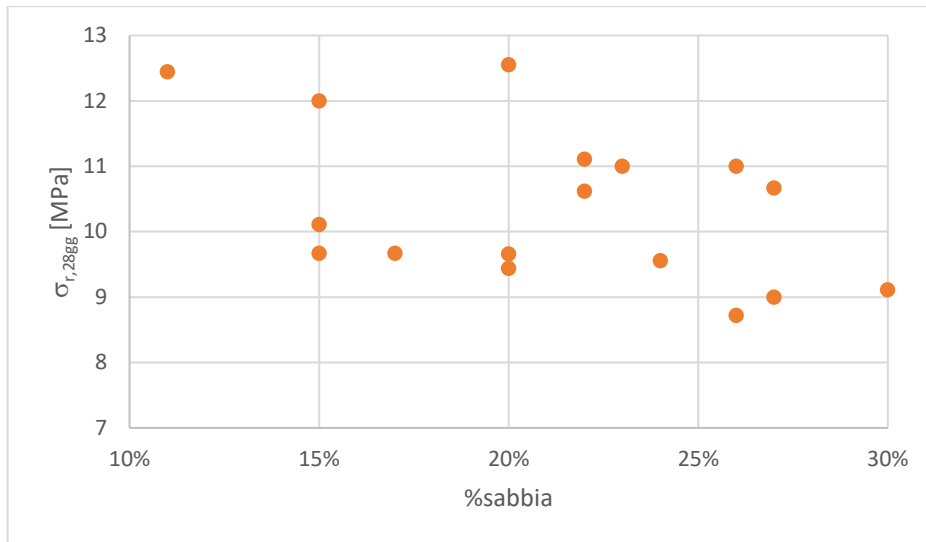


Diagramma 3.6: UCS a 28 giorni in funzione della percentuale di sabbia per $0,8 < a/c < 0,9$

Tale diminuzione è probabilmente causata dallo sbilanciamento della curva granulometrica dell'inerte. Di ciò non possiamo però essere certi poiché non è riportata la curva granulometrica dell'inerte utilizzato.

È evidente che risulterà necessario limitare la percentuale di sabbia nell'impasto per evitare una diminuzione della resistenza.

Alcuni provini sono stati infine testati a 7 e 90 giorni dal getto. Questo test è effettuato per valutare che la resistenza a compressione a lungo termine risulti essere maggiore di 6MPa , sono infatti testati tutti i campioni che a 28 giorni non superavano il controllo. Dal test si evidenzia inoltre l'incremento delle resistenze a lungo termine.

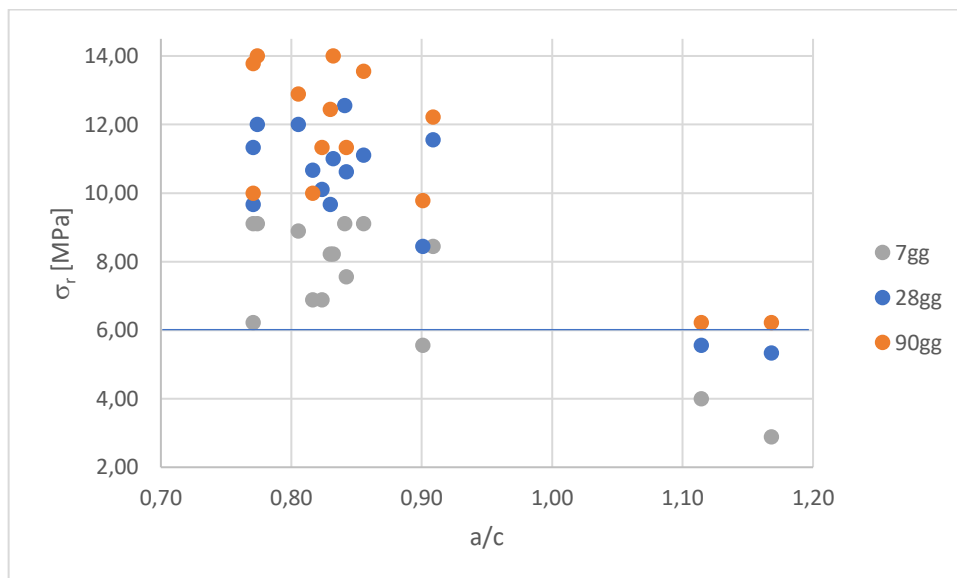


Diagramma 3.7: UCS a 7-28-90 giorni

Si vede come la resistenza dei vari provini a lungo termine superi sempre il valore limite di 6MPa .

3.3. 2016

Durante i test svolti nel 2016 si decide di operare sulla classe di resistenza del calcestruzzo, la composizione granulometrica dell'inerte e il rapporto a/c, al fine di diminuire la quantità di cemento necessaria. I test vengono svolti in secchio e i provini vengono lasciati a maturare per il tempo necessario alla maturazione in cantiere.

Per analizzare i risultati è utile suddividerli in base alla classe di resistenza del calcestruzzo.

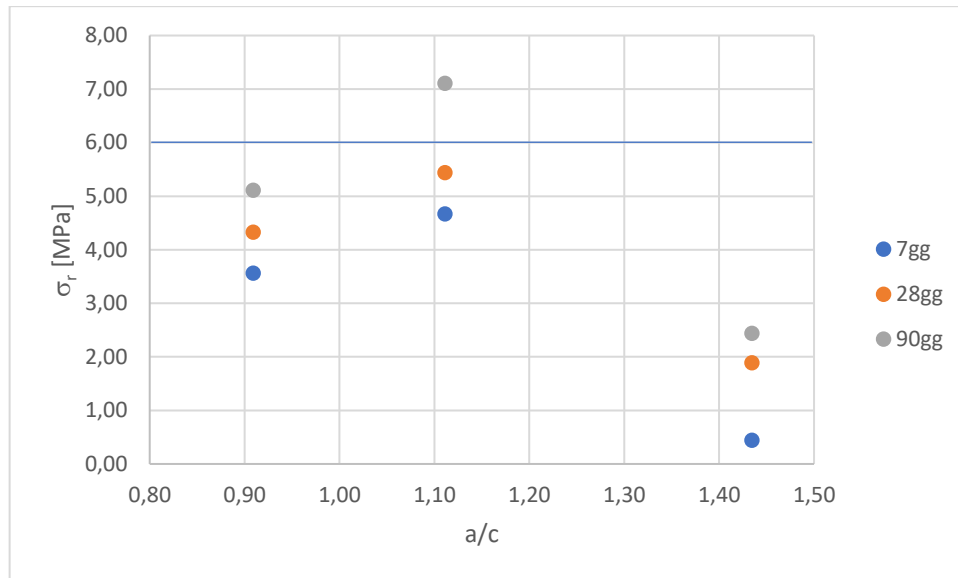


Diagramma 3.8: UCS con cemento con classe di resistenza 32,5

Per questi mix viene utilizzato un cemento con classe di resistenza 32,5, variabile quantità di fluidificante Glenium SKY 828, pari a $1,5\text{l/m}^3$ nella prova con $a/c = 1,11$ (MIX A), $1,6\text{l/m}^3$ nella prova con $a/c = 1,43$ (MIX B) e $3,3\text{l/m}^3$ nella prova con $a/c = 0,91$ (MIX C). Si riporta di seguito una tabella con le caratteristiche dei campioni.

	Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte totale [kg/m ³]	%sabbia	Additivo [l/m ³]
MIX A	200	180	1,11	1500	55%	1,5
MIX B	330	230	1,43	1840	0%	1,6
MIX C	300	330	0,91	1800	0%	3,3

Tabella 3.1: prove in secchio con cemento 32,5

Viene inoltre modificata la curva granulometrica nei tre mix esposti, utilizzando nel MIX A una combinazione di frantumato bianco (45%) e sabbia granitica (55%). Nei MIX B e C invece si utilizza solamente frantumato bianco.

Particolare attenzione la si deve porre ovviamente sul MIX B, poiché la combinazione di elevato rapporto a/c e fluidificante determina sì un mix liquido e ottimamente pompabile, ma a costo di una resistenza estremamente ridotta e non sufficiente per garantire la sicurezza delle operazioni di scavo.

Il tentativo di riduzione eccessivo delle quantità di cemento dei MIX A e B, in combinazione con l'utilizzo di un cemento con classe di resistenza di 32,5, ha portato a riduzioni elevate anche nelle resistenze meccaniche, impedendo di raggiungere la minima richiesta a 28 giorni.

Si vuole infine porre l'attenzione sul MIX A, poiché questo si avvicina al valore minimo di resistenza richiesto. Sarà opportuno approfondire mix simili per determinare una soluzione ottimale per l'azienda committente.

Sono presenti delle foto della rottura dei provini a 28 giorni, dalle quali si può osservare come la rottura passi per numerosi dei grani di talco di dimensioni maggiori (fig.3.3), tagliandone addirittura alcuni (fig.3.1 e 3.2).



Figura 3.1: rottura campione a 28 giorni con evidente taglio dei grani di talco



Figura 3.2: rottura campione a 28 giorni con evidente taglio dei grani di talco



Figura 3.3: grani di ripiena bianca di dimensione maggiore

I test successivi svolti utilizzano un cemento con classe di resistenza 42,5, e vengono effettuati sempre tramite prove in secchio.

Esattamente come i primi viene fatta variare la quantità di cemento, così come la quantità di acqua, di fluidificante e di inerte. Nel primo mix, a differenza degli altri, si utilizza una combinazione di inerte bianco e sabbia. Si riporta di seguito una tabella con i vari mix proposti durante lo studio.

	Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte totale [kg/m ³]	%sabbia	Additivo [l/m ³]
MIX A	160	250	0,64	2000	55%	2,3
MIX B	310	230	1,35	1850	0%	1,8
MIX C	270	330	0,82	1800	0%	3,3
MIX D	300	330	0,91	1800	0%	3,3
MIX E	210	280	0,75	1800	0%	3,2
MIX F	280	190	1,47	1800	0%	3,2
MIX G	210	210	1,00	1800	0%	2,2
MIX H	180	270	0,67	1800	0%	2,9
MIX I	180	310	0,58	1800	0%	2,8
MIX L	200	310	0,65	1800	0%	2,8

Tabella 3.2: prove in secchio con cemento 42,5

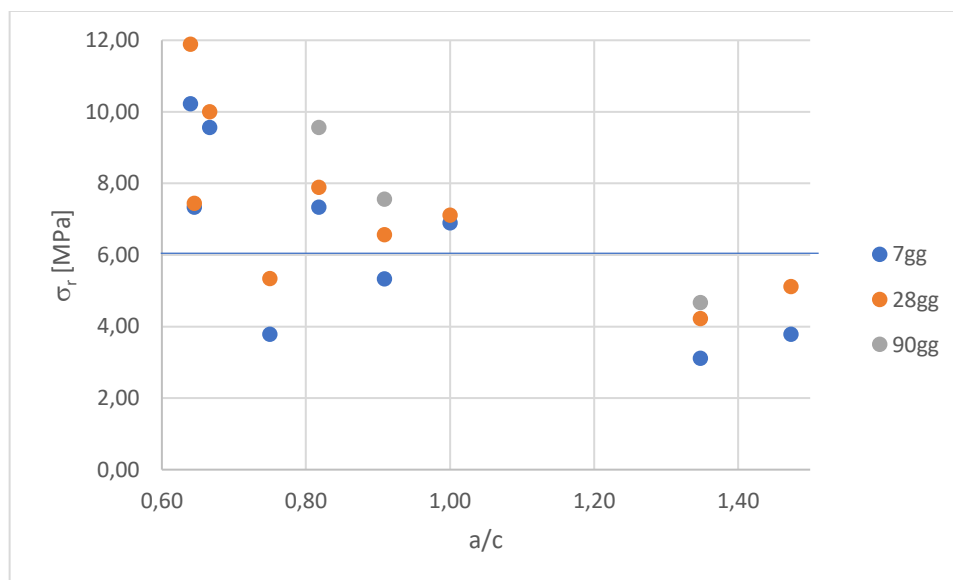


Diagramma 3.9: prove in secchio con cemento con classe di resistenza 42,5

A differenza degli anni precedenti si nota come la riduzione della quantità di cemento abbia influito negativamente sulla resistenza del calcestruzzo. Tale diminuzione può inoltre essere attribuita all'utilizzo preferenziale dell'inerte bianco. Come visto negli anni precedenti si nota che con rapporti molto elevati di a/c la resistenza tende a decadere. Decadimento che

si stabilizza a valori più elevati di a/c a causa, probabilmente, dell'assorbimento dell'acqua a causa della presenza di tracce di talco nell'impasto.

Confrontando i MIX A e B dei cementi con classe di resistenza 32,5 e 42,5 si può determinare un interessante relazione tra la resistenza a compressione a 28 giorni e la percentuale di inerte bianco. Si vede cioè che aumentando la percentuale di inerte bianco si ha una riduzione significativa della resistenza.

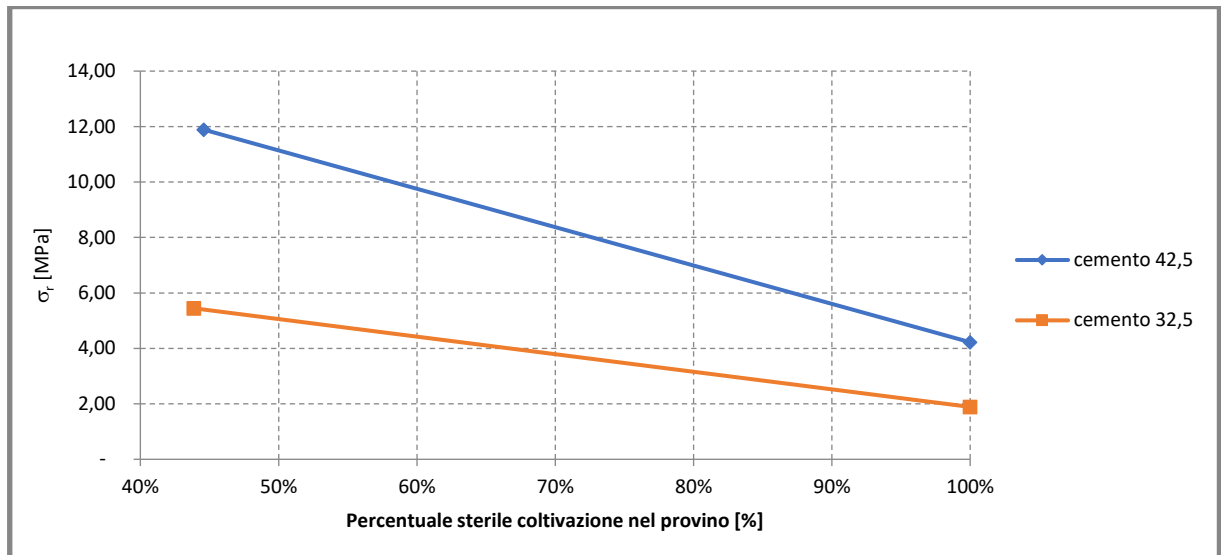


Diagramma 3.10: andamento della resistenza con la percentuale di inerte bianco nella coltivazione

È importante approfondire la relazione tra la classe di resistenza del cemento e la resistenza del calcestruzzo, ponendola in relazione alla percentuale di inerte bianco e acqua, poiché una riduzione della classe di resistenza con riduzione della quantità di cemento al metro cubo determinerebbe un ottimo guadagno per l'azienda. Al fine di confrontare preliminarmente queste grandezze si riporta il seguente diagramma, ottenuto per i MIX B e C con cemento 32,5:

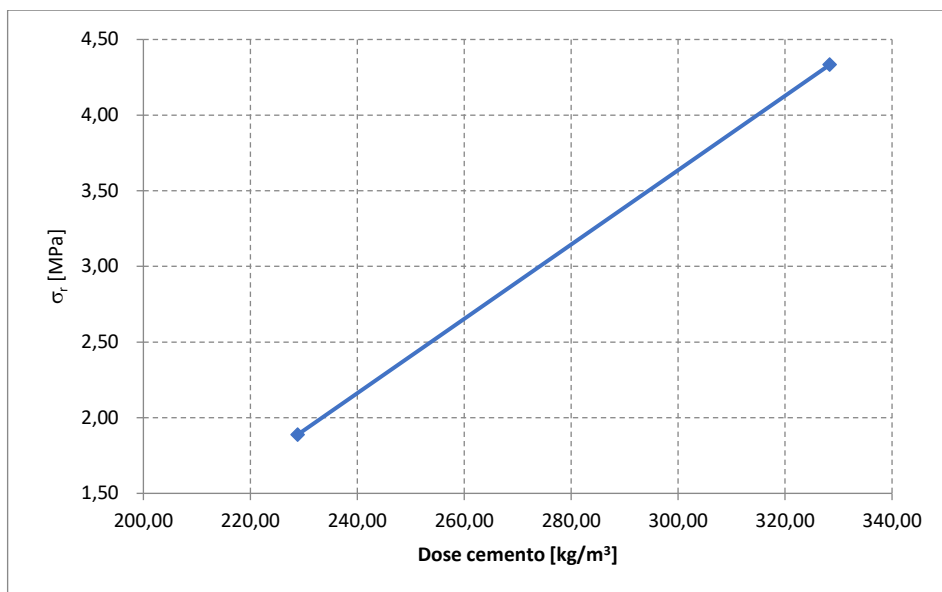


Diagramma 3.11: 100% sterile bianco con cemento 32,5

È chiaro come l'obiettivo dei test del 2016 sia quello di diminuire sensibilmente la quantità di cemento utilizzata. Si nota infatti come rispetto ai test svolti nel 2015 si ha una riduzione in media del 40% del quantitativo di cemento, riducendo però d'altro canto anche le resistenze del calcestruzzo.

3.4. 2017

A differenza dei dati precedentemente analizzati le analisi svolte durante il 2017 prevedono sia l'utilizzo di cubetti maturati in cantiere che di carotaggi. Sono inoltre disponibili molti più dati per ogni mix rispetto ai test meno recenti, si può perciò fornire un quadro più completo e si riporta in questo elaborato ogni prova relativa alla galleria nella quale viene effettuato il getto e la maturazione.

3.4.1. Galleria S966-S29T

La galleria S966-S29T è stata ripienata il 10 Aprile con una miscela usando lo sterile di coltivazione della miniera nel cemento. La perforazione è stata effettuata orizzontalmente nella nuova ripiena, dalla galleria 'Lungo Banco Sud', in modo da recuperare 3 carote di almeno 10 cm di diametro, per una lunghezza di 1.50m al meno.

2 carote vengono invece prelevate più 'in pendenza' di 30°- 40° verso l'alto, da 2m di altezza, attraverso la trancia di nuova ripiena.

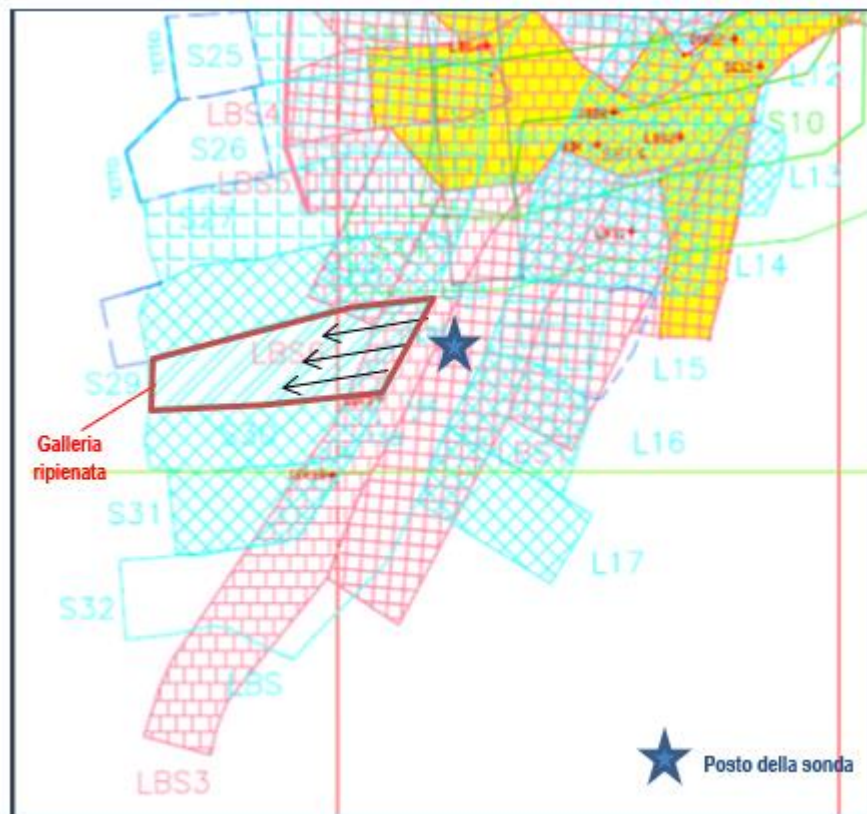


Figura 3.4: pianta galleria S966-S29T

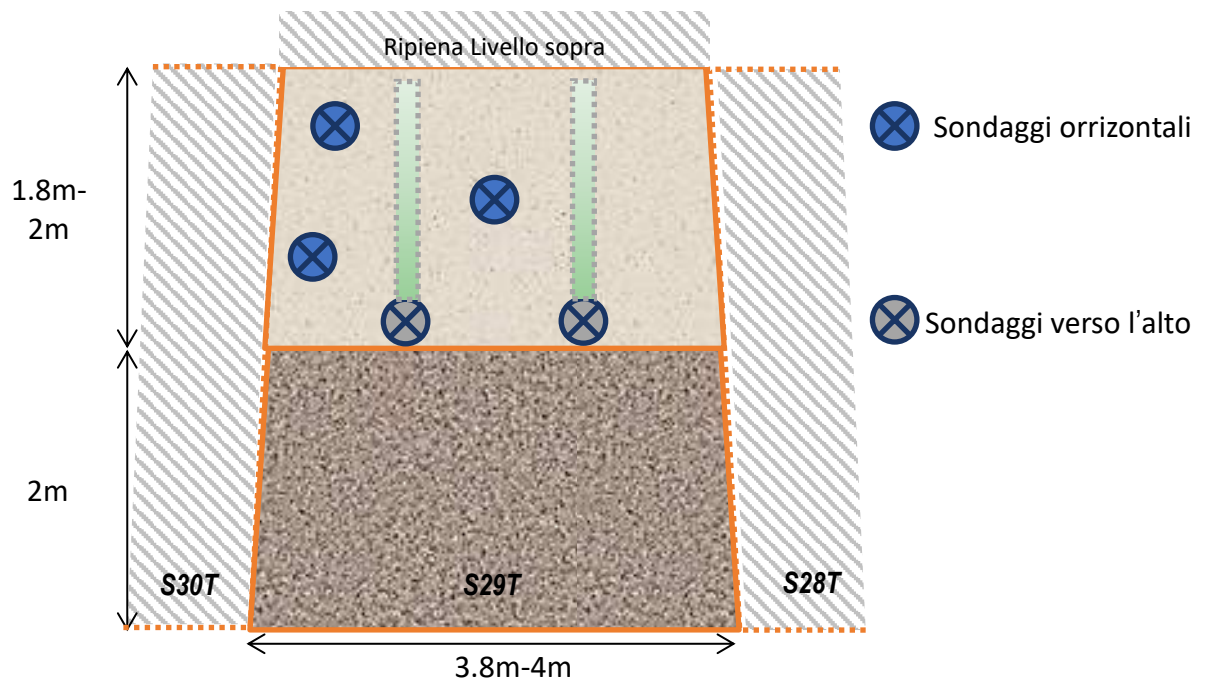


Figura 3.5: carotaggi galleria S966-S29T

I carotaggi sono stati effettuati secondo questo schema poiché il metodo back&fill inverso permette l'ottenimento di caratteristiche omogenee lungo una generica sezione orizzontale.

A causa di problemi tecnici della sonda sono stati prelevati solamente 7 campioni, carotati a 28 giorni dal getto e testati a rottura a 90 giorni di maturazione.

Nella stessa data del getto del calcestruzzo si confezionano 6 provini con egual mix design maturati in cantiere, testati a 28 giorni e a 90 giorni dal getto.

Viene utilizzato il cemento BUZZI 42,5 e l'additivo BASF MasterGlenium 3890.

Acqua aggiunta [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte umido [kg/m ³]	Additivi [l/m ³]
210	330	0,64	1800	3

Tabella 3.3: mix design galleria S966-S29T

È stata misurata un'umidità dell'inerte pari all'1,8% in peso. L'inerte presenta una curva granulometrica così formata:

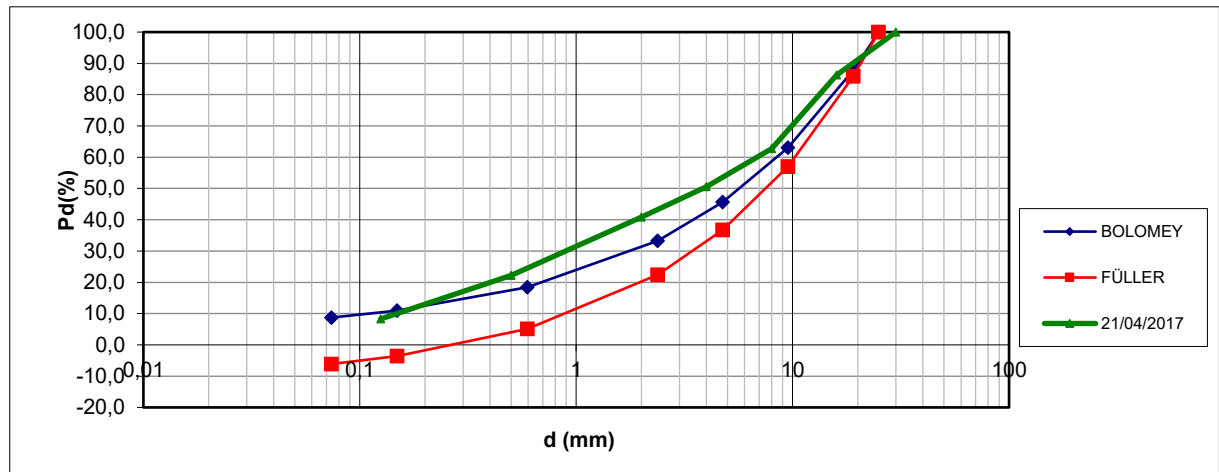


Diagramma 3.12: granulometria galleria S966-S29T

Si ottengono i seguenti risultati:

Provini	UCS [MPa]			
	28gg	media 28gg	90gg	media 90gg
Cubici	8,66	8,42		9,25
	8,35			
	8,26			
Cilindri			9,78	9,28
			7,87	
			10,09	
			9,81	
			10,19	
			7,92	
			10,29	
		10,19		
		8,47		
		8,09		

Tabella 3.4: UCS galleria S966-S29T

3.4.2. Galleria N968-N10AT

Le analisi riguardano la chiusura della galleria N10AT, della quale qui è riportata la pianta.

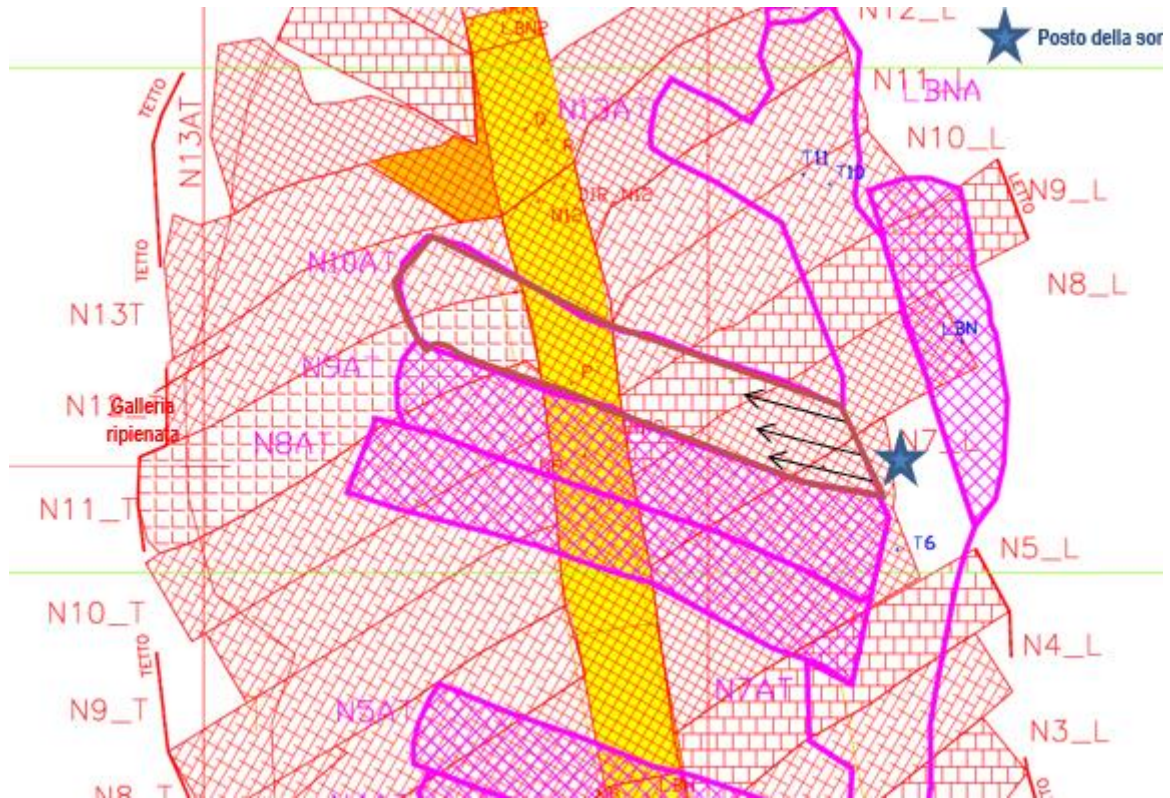


Figura 3.6: pianta galleria N968-N10AT

Anche per questa galleria vengono prelevati dei campioni dal getto della trancia. Tuttavia per questi non è stato possibile stabilire quale sia il mix design caratteristico di ogni provino. Lo schema dei carotaggi è il seguente:

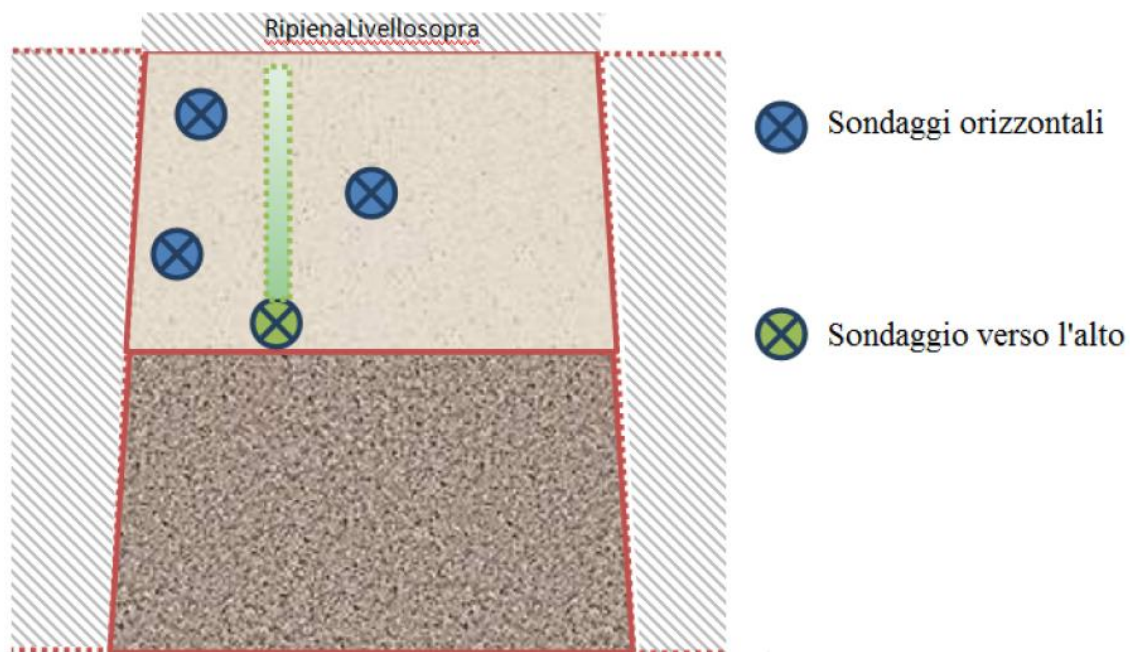


Figura 3.7: carotaggi galleria N968-N10AT

Al termine delle operazioni di carotaggio la trancia viene ripienata, al fine di garantire la continuità della ripiena.



Figura 3.8: foto della trancia ripienata al termine delle operazioni di carotaggio

Vengono confezionati inoltre alcuni provini cubici. Di questi è nota la composizione.

Si utilizzano gli additivi Glenium SKY 828 e MasterSuna 3890. Le quantità di attivi vengono cambiate di mix in mix. Viene mantenuta invece costante la quantità di cemento BUZZI 42,5. Si modifica infine la curva granulometrica degli inerti. I mix confezionati sono identificati nel seguente modo:

mix	Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte secco [kg/m ³]	%sabbia	Additivi [l/m ³]	
						Gl. 828	MS 3890
P3	263	335	0,79	1740	30%	3	0
P5	248		0,74	1740	30%	2,5	0
P6	233		0,70	1740	30%	1,5	0,6
P7	280		0,84	1740	30%	1,5	0,75
P8	275		0,82	1740	20%	1,5	0,75

Tabella 3.5: mix design provini cubici galleria N968-N10AT

Si riporta inoltre la granulometria degli inerti considerati:

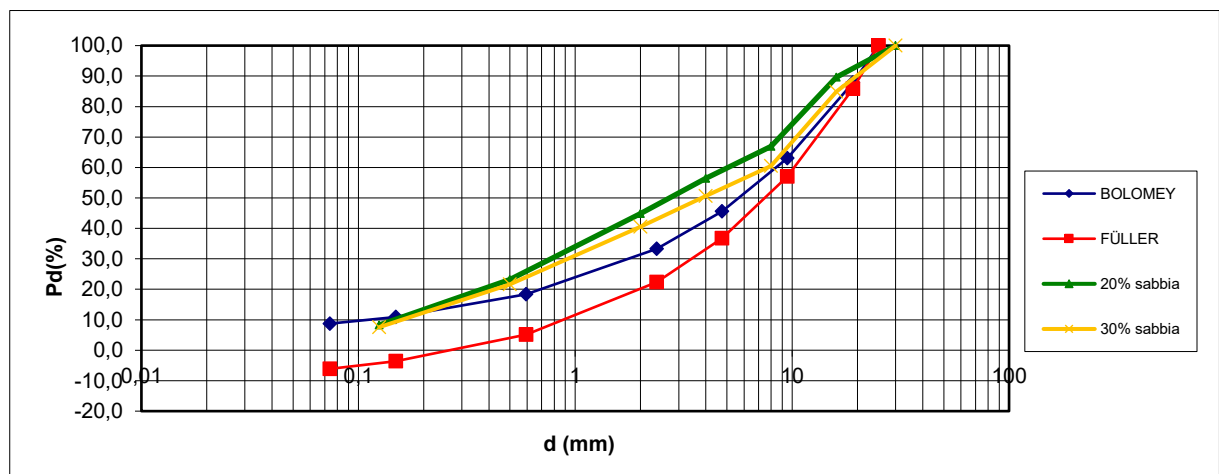


Diagramma 3.13: granulometria galleria N968-N10AT

Dall'analisi effettuata sui provini cubici si ottengono i seguenti risultati:

UCS [MPa]		
Provini	28gg	media 28gg
P3	9,29	9,75
	10,21	
P5	11,20	11,16
	11,12	
P6	10,42	10,44
	10,46	
P7	8,93	8,985
	9,04	
P8	8,66	8,65
	8,80	
	8,50	

Tabella 3.6: UCS provini cubici galleria N968-N10AT

Anche se non è disponibile il mix design dei provini cilindrici si suppone ricalchi i mix utilizzati per il confezionamento dei provini cubici. Si nota come il valore

UCS [MPa]	
28gg	media 28gg
5,06	6,85
9,19	
6,92	
7,00	
9,32	
7,78	
6,64	
7,34	
4,72	
5,88	
6,74	
5,63	
6,81	

Tabella 3.7: UCS provini cilindrici galleria N968-N10AT

Si nota come i valori di resistenza a compressione ottenuti per i provini cubici risultino essere differenti da quelli ottenuti su provini cilindrici. Ciò è probabilmente dovuto a fenomeni di segregazione durante le fasi del getto.

3.4.3. Galleria S962-LBN

Non è stato possibile né risalire alle esatte composizioni dei getti né alle procedure di prelevazione delle carote. Per queste prove si è utilizzato l'inerte sterile proveniente dalla frantumazione degli inerti di coltivazione. Le prove sono state effettuate a 90 giorni dal getto.

Come evidente dai risultati delle prove ottenuti i valori di resistenza a compressione risultano essere inferiori al valore di $6MPa$. Osservando la prova eseguita sulla trancia LBN non si evidenziano, a 90 giorni dal getto, miglioramenti in termini di resistenza a compressione, attestandosi invece intorno a $5,4MPa$.

Tramite l'analisi dei dati disponibili si deduce che tali valori di resistenza così ridotti sono attribuibili a riduzioni elevate del rapporto a/c, che si conosce essere pari a 0,6 con aumento del quantitativo di additivo, al fine di controbilanciare la riduzione della quantità di acqua aggiunta all'impasto.

UCS [MPa]		
	90gg	media 90gg
S962-LBN	5,73	5,41
	5,42	
	5,38	
	5,41	
	5,26	
	5,08	
	5,14	
	5,82	

Tabella 3.8: UCS galleria S962-LBN e S962-N2T

È importante osservare come la rottura attraversi, anche in queste prove, i grani di inerte di dimensioni maggiori:



Figura 3.9: rottura carota galleria N2T

3.5. 2018

3.5.1. Galleria S962-N2T

La galleria S962-N2T è stata ripienata il 09 Febbraio 2018 con una miscela per il calcestruzzo che contiene dello sterile di coltivazione della miniera come inerte. Le carote sono prelevate orizzontalmente da siti adiacenti e sono state testate a 28 giorni (carotaggi OR7 e OR8) e a circa 250 giorni dal getto (carotaggio OR9).

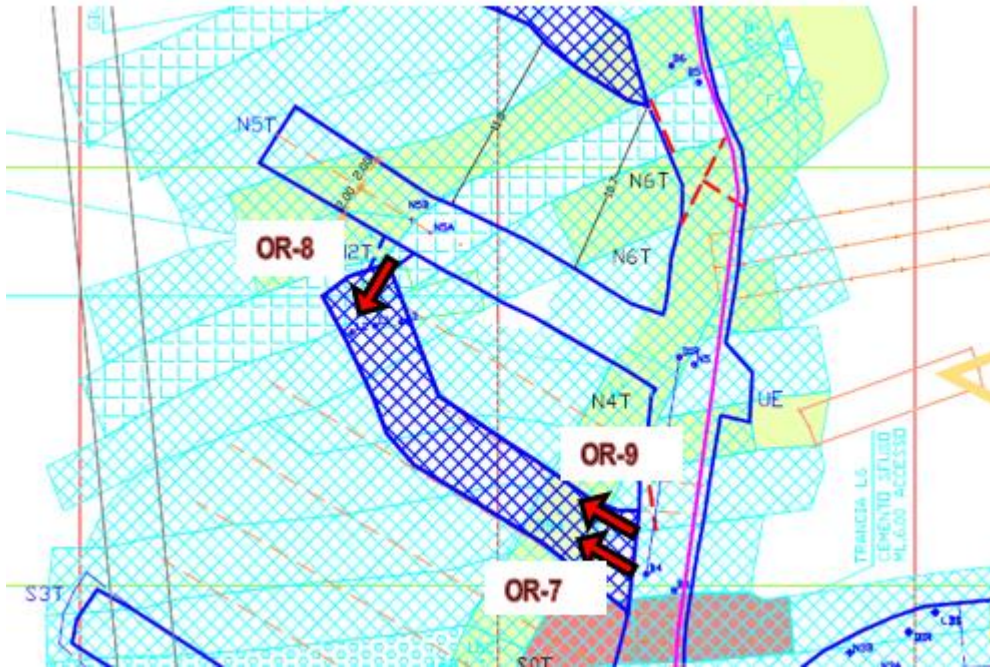


Figura 3.10: pianta galleria S968-N2T

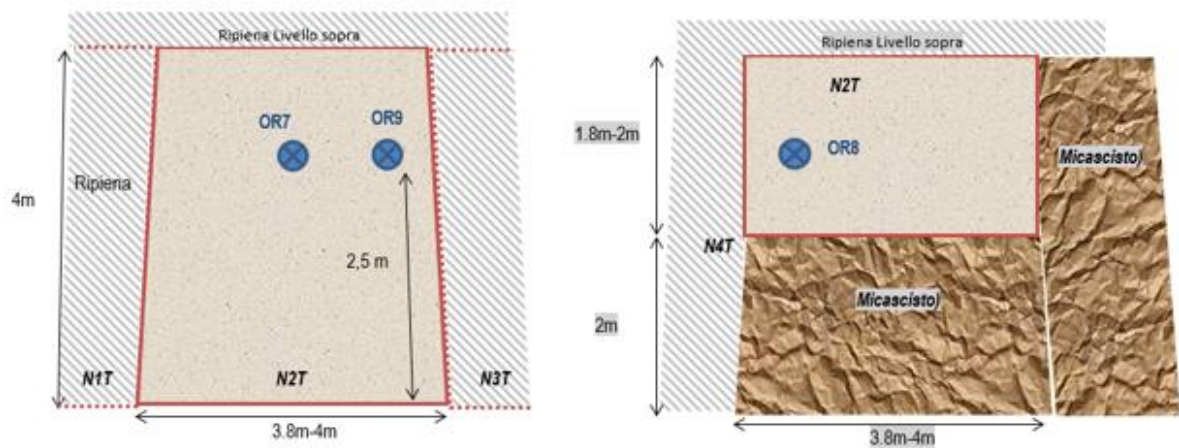


Figura 3.11: carotaggi orizzontali galleria S968-N2T

Si è misurata un'umidità dell'inerte del 5,5%. Vengono aggiunti al getto $1,5l/m^3$ di Glenium SKY 828 e $1l/m^3$ di MasterSuna 3890.

Acqua totale [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte umido [kg/m ³]
312	330	0,95	1800

Tabella 3.9: mix design galleria S968-N2T

Si riportano di seguito i risultati delle prove a compressione monoassiale per i campioni provenienti dai carotaggi OR7 e OR9.

		UCS [MPa]	
		28gg	media 28gg
S962-N2T,		6,40	5,84
		5,40	
		4,70	
		6,00	
		6,20	
		6,90	
		5,30	

Tabella 3.10: UCS galleria S962-N2T

Si osserva che la resistenza a compressione risulta avere valori relativamente bassi rispetto a quelli ottenuti negli anni precedenti con inerti standard.

3.5.2. Prove svolte senza il politecnico

Sono state svolte ulteriori prove su cubetti con il medesimo mix design del materiale gettato in opera. Di queste prove sono noti mix design e curve granulometriche, ma non sono riportate le modalità di estrazione. Alcune prove inoltre non riportano i valori a rottura a 28 giorni ma solamente quelli a 7. Si riportano nei seguenti sotto-paragrafi le composizioni e i risultati dei test effettuati. Le composizioni fanno riferimento a inerte umido e acqua totale nell'impasto. Si utilizzare cemento BUZZI 42,5.

3.5.2.1. Galleria N968-N14AT

Per la galleria N968-N14AT si sono adoperati 2 differenti mix design, il primo con $c = 280\text{kg/m}^3$ e il secondo con $c = 330\text{kg/m}^3$. Entrambi i campioni presentano la medesima curva granulometrica, ottenuta utilizzando sterile frantumato con sabbia.

Composizione					Additivi [l/m ³]	
Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte umido [kg/m ³]	Umidità [%]	Glenium SKY 828	MasterSuna 3980
320	280	1,14	1800	6,3	1	1,5
340	330	1,03	1800	6,7	1	1,5

Tabella 3.11: mix design galleria N968-N14AT

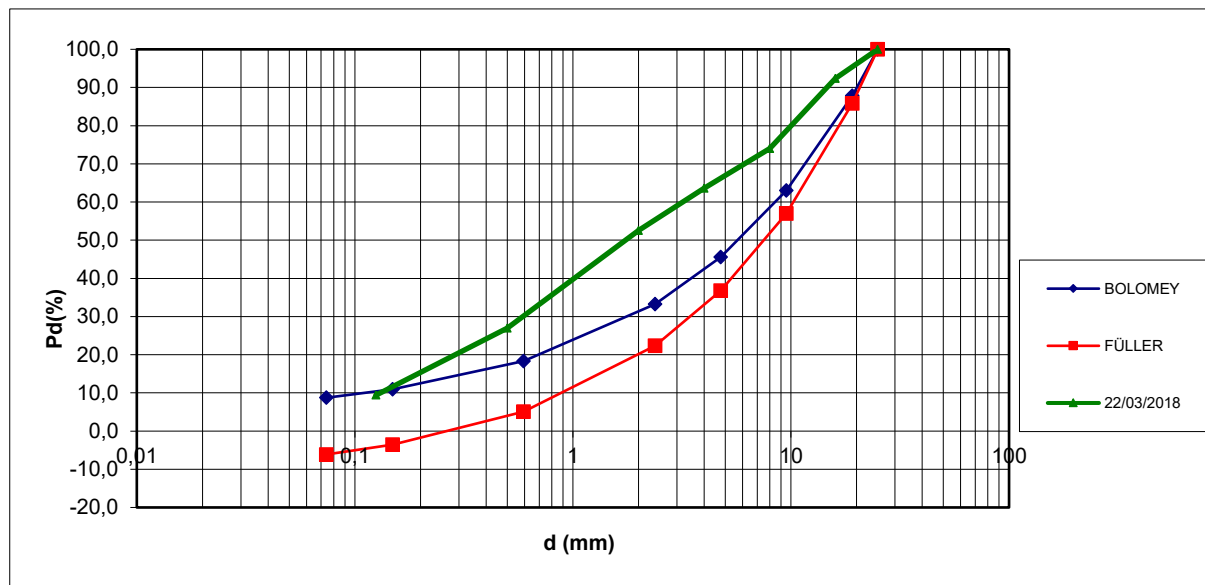


Diagramma 3.14: curva granulometrica galleria N968-N14AT

UCS [MPa]	
7gg	28gg
4,22	4,8
4,89	6,4

Tabella 3.12: UCS galleria N968-N14AT

Le prove a 28 giorni mostrano una resistenza a compressione soddisfacente per il secondo mix, con valori più elevati di cemento.

3.5.2.2. Galleria N968-LBN

Composizione					Additivi [l/m ³]	
Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte umido [kg/m ³]	Umidità [%]	Glenium SKY 828	MasterSuna 3980
480	330	1,45	1800	13,90%	1,5	1

Tabella 3.13: mix design galleria N968-LBN

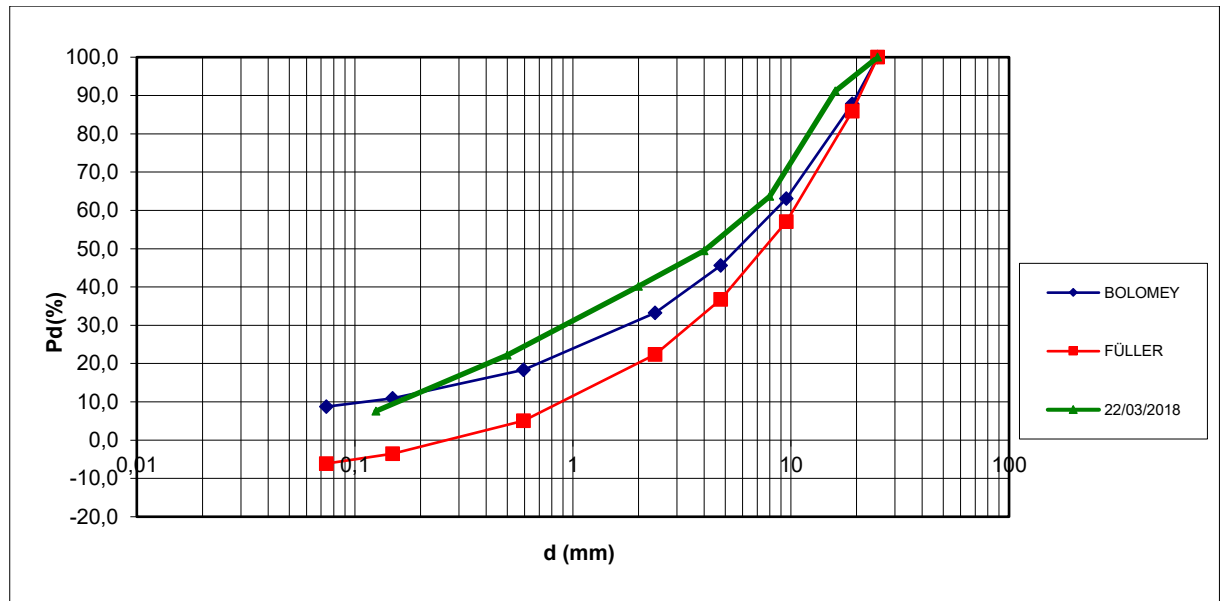


Diagramma 3.15: curva granulometria galleria N968-LBN

La resistenza a compressione monoassiale risulta essere pari a 4,79MPa a 7 giorni e 6,2MPa a 28 giorni.

La decisione di utilizzare un rapporto a/c così elevato può essere dovuta ad una bassa conoscenza dell'inerte, il cui contenuto d'acqua è stato probabilmente calcolato in seguito. È infatti riportato che al momento del setacciamento l'inerte era ancora umido. Come si può osservare dal passante granulometrico sono presenti minime tracce di sabbia.

3.5.2.3. Galleria S962-N3T

Composizione					Additivi [l/m ³]	
Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte umido [kg/m ³]	Umidità [%]	Glenium SKY	MasterSuna
630	660	0,95	1800	7,9%	828 1,5	3980 1

Tabella 3.14: mix design galleria S962-N3T

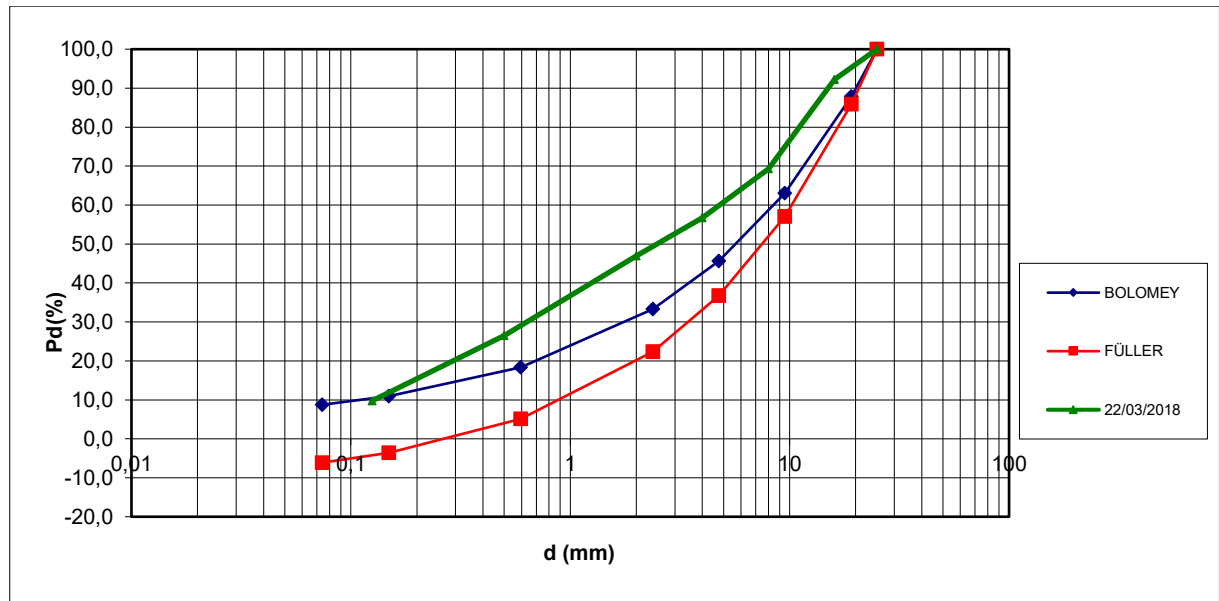


Diagramma 3.16: curva granulometrica galleria S962-N3T

UCS [MPa]	
7gg	28gg
4,17	6,51

Tabella 3.15: UCS galleria S962-N3T

Come si vede da questo test la resistenza a compressione tende a superare, a 28 giorni, i minimi richiesti. Tuttavia la composizione del mix non risulta chiara e pertanto il test viene considerato, in questo studio, come se il mix non fosse disponibile.

3.5.2.4. Galleria N968-S24T

Composizione					Additivi [l/m ³]	
Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte umido [kg/m ³]	Umidità [%]	Glenium SKY	MasterSuna
290	330	0,88	1800	5%	1,5	3980
					1,5	1,5

Tabella 3.16: mix design galleria NS24T

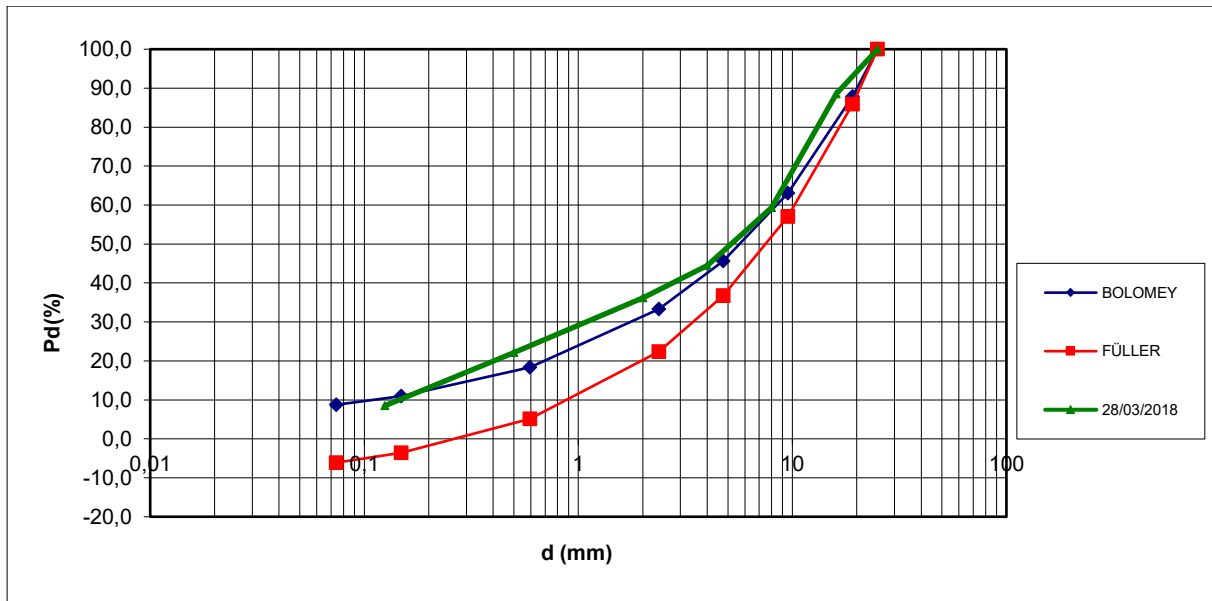


Diagramma 3.17: curva granulometrica galleria N968-S24T

La resistenza a compressione viene calcolata solamente a 7 giorni e risulta pari a 7,93MPa. A differenza dei mix precedenti questo non presenta sabbia aggiunta allo sterile frantumato.

3.5.4.5. Ulteriori prove

Sono state effettuate ulteriori prove, delle quali non è però nota la composizione granulometrica. È importante osservare che in alcune prove, segnate con un colore rosso nella tabella sottostante, non è stato possibile determinare l'umidità dell'inerte, che si è imposta forfettariamente pari al 5%.

Galleria di riferimento	Composizione					Additivi [l/m ³]		UCS [MPa]
	Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte umido [kg/m ³]	Umidità [%]	Glenium SKY 828	MasterSuna 3980	28gg
962 - S3T	270	330	0,82	1800	7,6%	1,5	1	6,5
968 - S24T	280	330	0,85	1800	5,0%	1,5	1	8,2
968 - S23-S28	260	330	0,79	1800	5,5%	1,5	1	5,4
968 - S27/29	250	330	0,76	1800	3,2%	1,5	1	7,0
968 - S11L	250	330	0,76	1800	2,9%	1,5	1	9,3
962-N6T	230	330	0,70	1800	5,0%	1,5	1	7,0
968-S11AL	280	330	0,85	1800	5,0%	1,5	1	10,5
962-S13AT	280	370	0,76	1800	6,0%	1,5	1	8,5

Tabella 3.17: ulteriori prove svolte nel 2018

3.6. 2019

Nel 2019 è stato effettuato un unico test. Tale mix, nel quale viene usato un cemento BUZZI 42,5, risulta essere quello attualmente impiegato dall'azienda committente. Il test viene effettuato sul mix utilizzato nella galleria S962-S13AT.

Composizione					Additivi [l/m ³]		UCS [MPa]	
Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte umido [kg/m ³]	Umidità [%]	Glenium SKY 828	MasterSuna 3980	28gg	90gg
290	370	0,78	1800	5%	1,5	1	8,5	11,3

Tabella 3.18: mix design galleria S962-S13AT

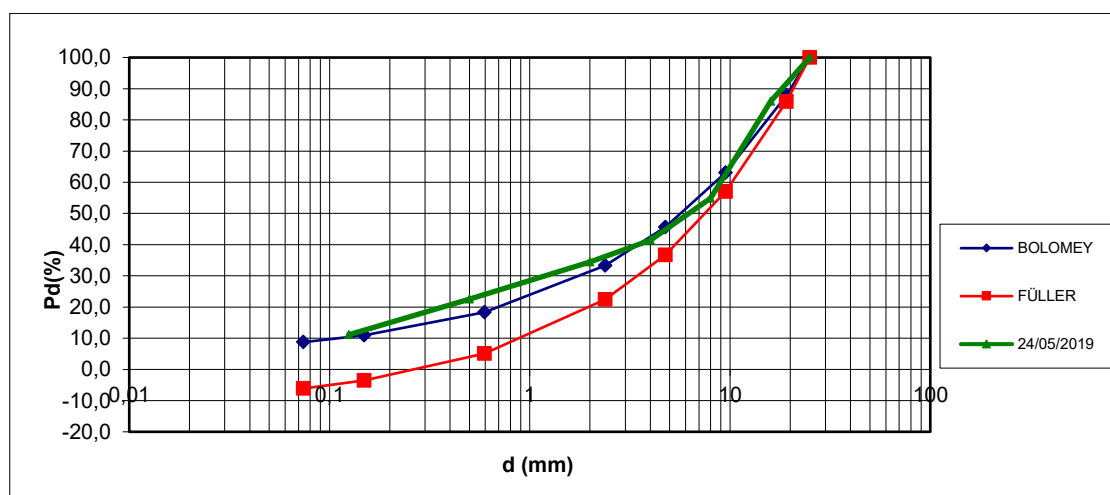


Diagramma 3.18: curva granulometrica galleria S962-S13AT

3.7. Comparazione risultati

Si ricapitolano, in questo paragrafo, tutti i risultati ottenuti nei test passati. I risultati verranno comparati in base al rapporto a/c, all'inerte utilizzato e alla quantità di cemento.

Si indicano i test svolti nei vari anni attraverso colori differenti nel diagramma. Per l'identificazione dei valori ci si può ricondurre al paragrafo riguardante i test medesimi.

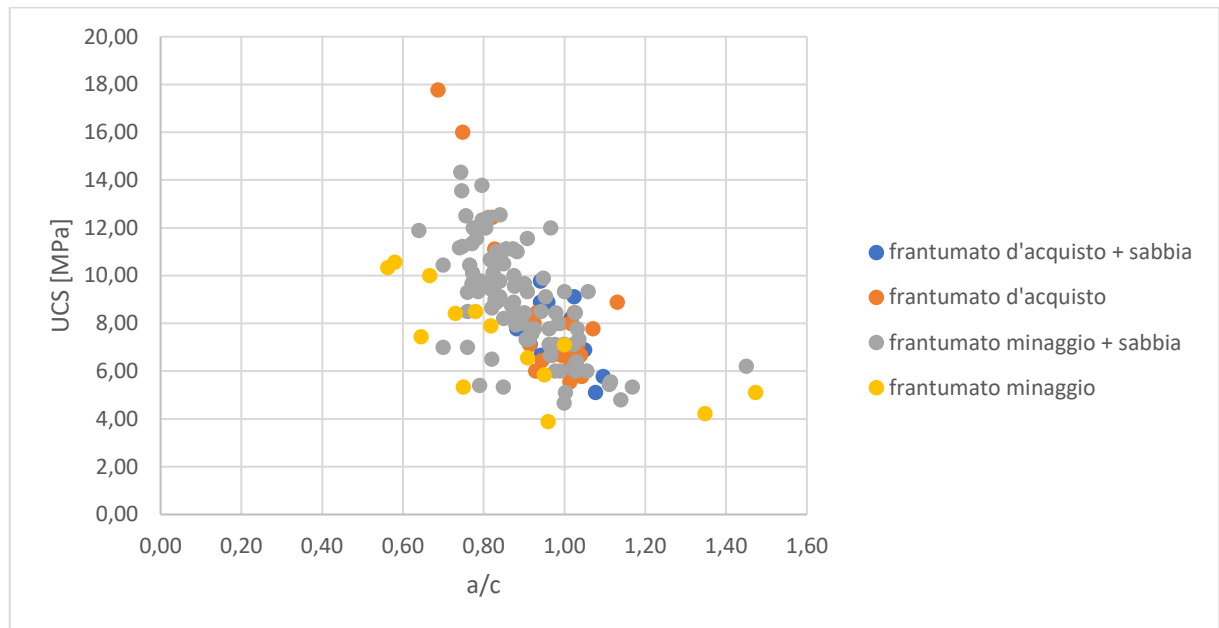


Diagramma 3.19: relazione UCS e a/c

Come si evince dal diagramma i risultati di minore qualità sono stati ottenuti utilizzando unicamente frantumato di minaggio come inerte. Tale risultato è conforme alle pessime qualità di resistenza dei residui talcosi nell'inerte. La resistenza più elevata è stata ottenuta con un frantumato d'acquisto, cemento BUZZI 42,5 in quantità pari a $440\text{kg}/\text{m}^3$ ed un rapporto a/c pari a 0,68, di cui tuttavia non sono disponibili dati dettagliati riguardanti la granulometria dell'inerte e le quantità di superfluidificante utilizzato. Tale test risulta comunque fornire valori nettamente più elevati delle richieste dell'azienda con un conseguente aumento del costo per la preparazione del mix.

Ci si sofferma inoltre sui valori ottenuti dal frantumato minaggio + sabbia. Le percentuali di sabbia sono spesso non definite, si sa comunque che in ogni test risultano essere inferiori alle percentuali di sterile di coltivazione frantumato. I valori sono notevolmente dispersi. Basti notare come, osservando nell'intorno di $a/c = 0,8$, si hanno resistenze variabili tra 5MPa e 14MPa.

Per comprendere la dispersione di tali dati è importante valutare la quantità di legante utilizzata, considerando che l'acqua e il fluidificante determinano, per ogni mix, una classe di consistenza S5, fornendo perciò la fluidità necessaria per rendere il mix pompabile.

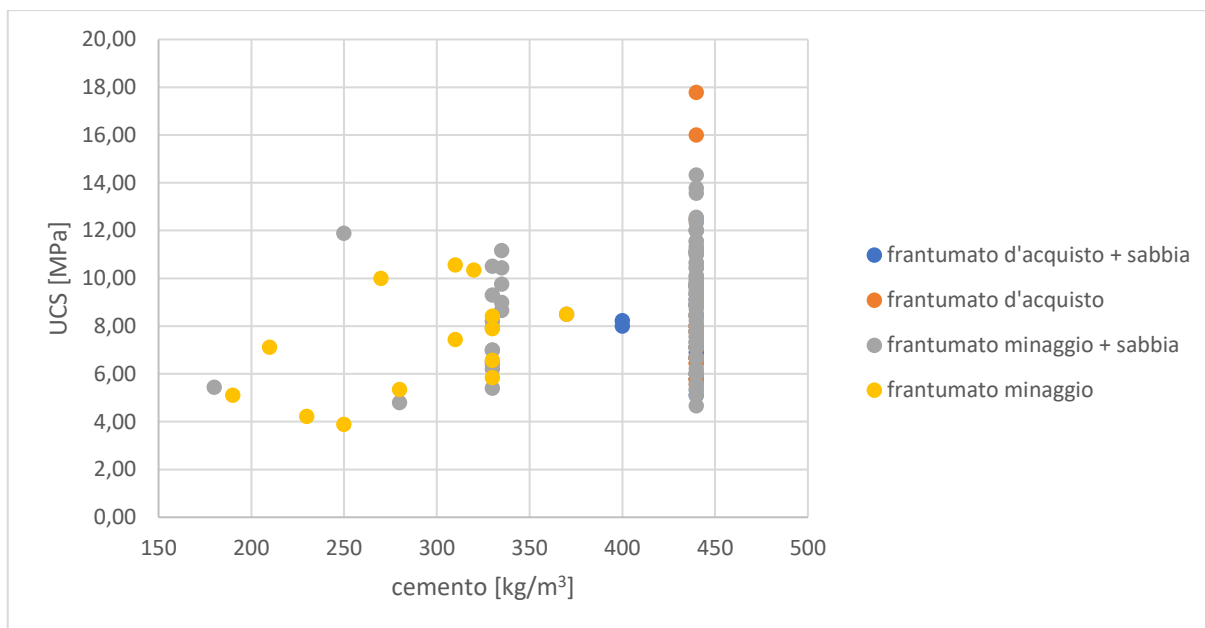


Diagramma 3.20: relazione UCS e quantità di cemento

Nel diagramma 3.20 è importante osservare come la quantità di cemento sia mantenuta costante quando si sono utilizzati frantumati d'acquisto con o senza sabbia. Questi sono infatti i dati relativi ai test effettuati nel corso del 2014 (vedi par. 3.1). Successivamente a quell'anno si è scelto di ridurre, progressivamente, la quantità di cemento per valutare se fosse possibile raggiungere resistenze ottimali utilizzandone una quantità inferiore.

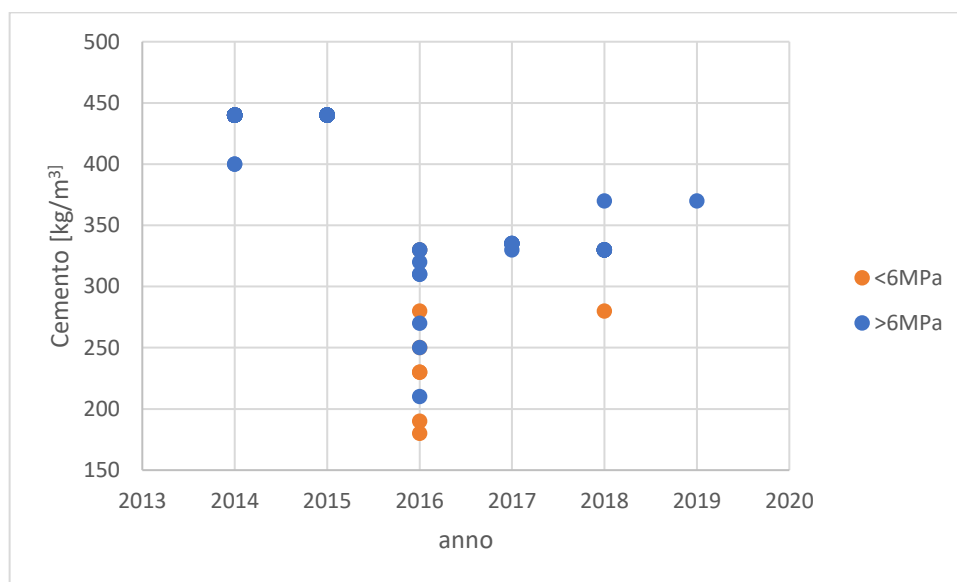


Diagramma 3.21; quantità di cemento utilizzata nei vari mix negli anni

Si evidenzia che riducendo la quantità di legante si riducono le resistenze a compressione.

Si vede inoltre l'andamento nel tempo della resistenza a compressione.

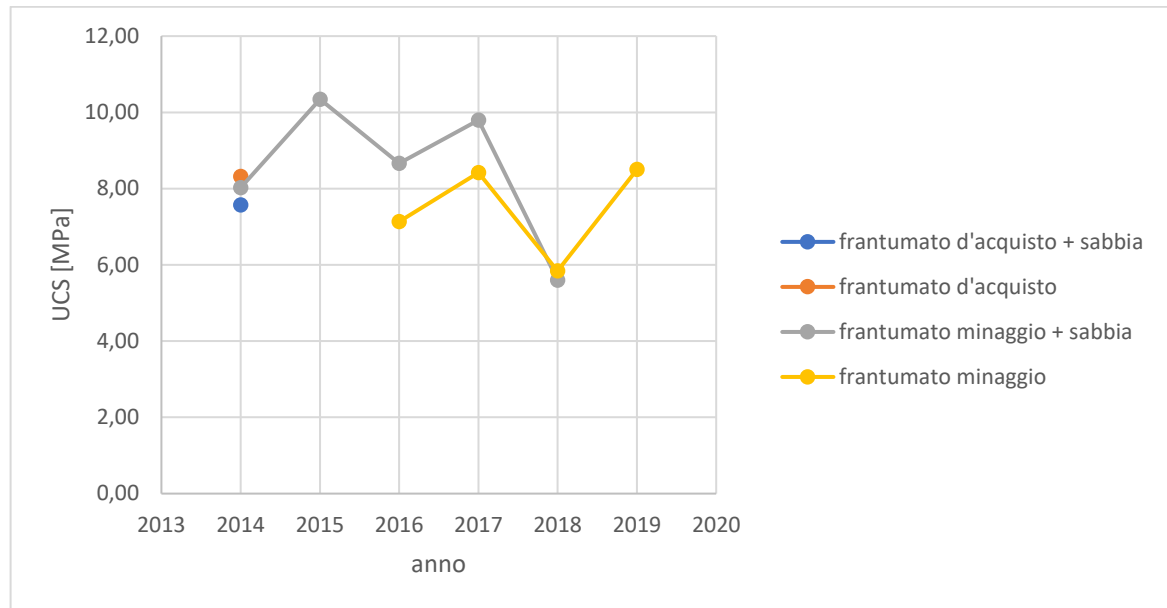


Diagramma 3.22: UCS medio negli anni

Si riportano infine alcuni diagrammi comparativi forniti dall'azienda committente, nei quali si individuano i test discussi nei paragrafi precedenti.

	Composizione						Additivi [l/m ³]		
	Tipo cemento	Acqua [l/m ³]	Cemento [kg/m ³]	a/c	Inerte [kg/m ³]	Umidità [%]	%sabbia	Glenium SKY	MasterSuna
P1	42,5	267	335	0,80	1800	4,00%	24%	3	0
P2	42,5	282	335	0,84	1800	4,00%	0%	3	0
P3	42,5	263	335	0,79	1800	3,50%	30%	3	0
P4	32,5	253	335	0,76	1800	3,50%	30%	2,75	0
P5	42,5	248	335	0,74	1800	3,50%	30%	2,5	0
P6	42,5	233	335	0,70	1800	3,50%	30%	1,5	0,6
P7	42,5	279,8	335	0,84	1800	3,60%	30%	1,5	0,75
P8	42,5	274,8	335	0,82	1800	3,60%	20%	1,5	0,75
P3-1	42,5	340	330	1,03	1800	5,00%		3	0
P3-2	42,5	353,3281	330	1,07	1800	4,91%	30%	1,5	1
P3-3	42,5	346,8678	330	1,05	1800	4,55%	0%	1,5	1
P3-4	42,5	350	330	1,06	1800	5,00%	30%	1,5	0,75
P3-5	42,5	350	330	1,06	1800	5,00%	30%	1,5	0,75
P4-1	42,5	327,5	330	0,99	1800	5,00%	30%	2,5	0
P4-2	42,5	355	330	1,08	1800	5,00%	30%	2,5	0

P5-2	42,5	315	330	0,95	1800	5,00%	30%	2,5	0
P6-1	42,5	312	330	0,95	1800	5,50%	30%	1,5	1
P6-2	42,5	340,2	330	1,03	1800	6,40%	30%	1,5	1
Testimonio	42,5	302,6	330	0,92	1800	3,70%	5%	1,5	1
400 kg/m3	42,5	307,6	405	0,76	1800	3,70%	5%	1,5	1
P7	42,5	315	370	0,85	1800	3,00%		1,5	1
968 - N14AT	42,5	323,4	280	1,16	1800	6,30%		1,5	1
968 - N14AT	42,5	335,6	330	1,02	1800	6,70%		1,5	1
968 - LBN - prima parte	42,5	480,2	330	1,46	1800	13,90 %		1,5	1
962 - S3T	42,5	381,8	330	1,16	1800	7,60%		1,5	1
968 - LBN- seconda parte	42,5	342,2	330	1,04	1800	7,90%		1,5	1
968 - LBN- seconda parte	42,5	344	330	1,04	1800	8,00%		1,5	1
968 - S24T	42,5	290	330	0,88	1800	5,00%		1,5	1
968 - S23-S28	42,5	419	330	1,27	1800	5,50%		1,5	1
968 - S27/29	42,5	302,6	330	0,92	1800	3,20%		1,5	1
968 - S11L	42,5	308,2	330	0,93	1800	2,90%		1,5	1
962-N6T	42,5	290	330	0,88	1800	5,00%		1,5	1
968-S11AL	42,5	290	330	0,88	1800	5,00%		1,5	1
962-N4AT/N7 C	42,5	265	370	0,72	1800	6,00%		1,5	1
962-S13AT	42,5	294,5	370	0,80	1800	6,00%		1,5	1

Tabella 3.19: tabella riepilogativa mix

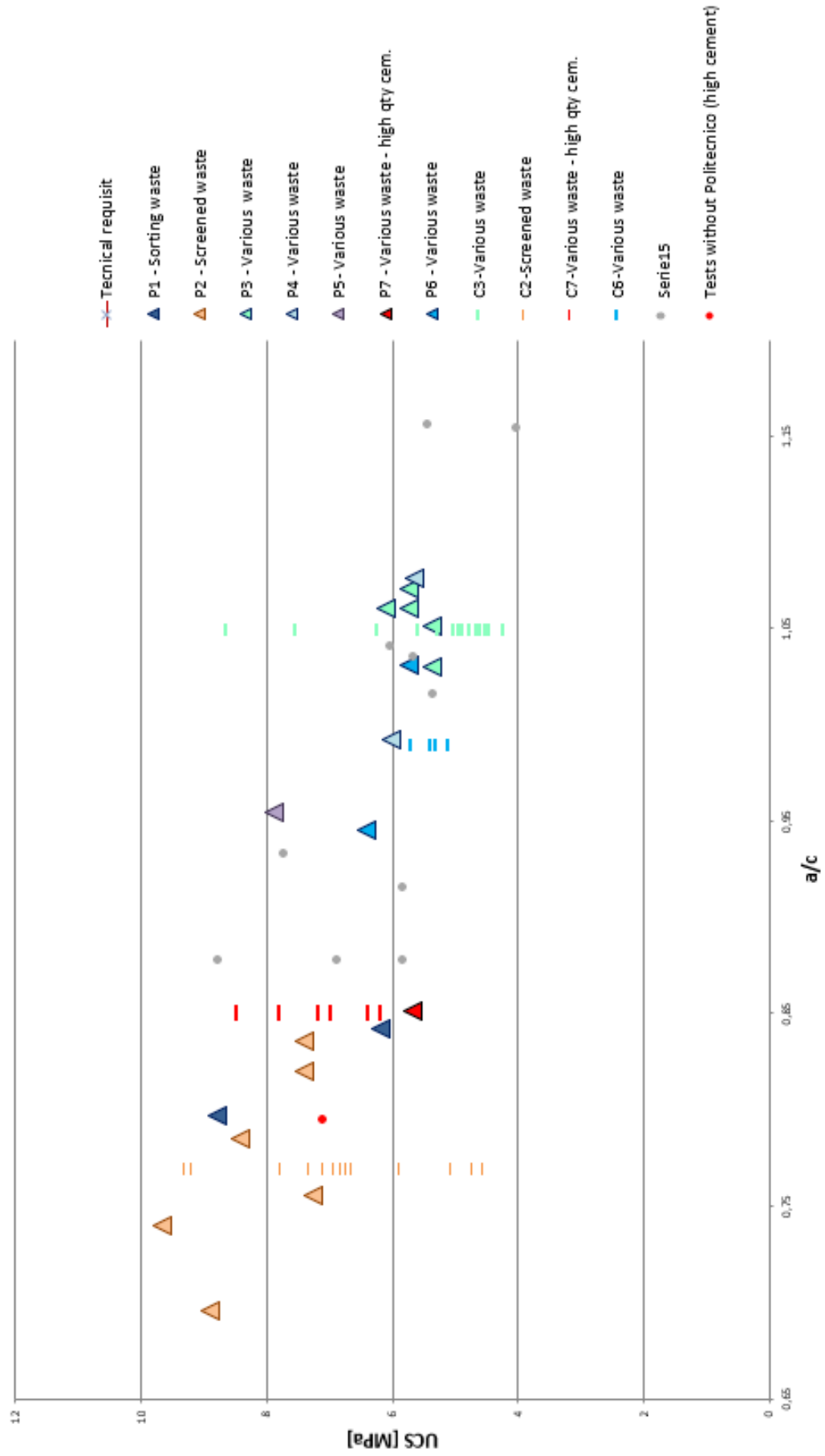


Diagramma 3.23: UCS riepilogativo

4. Studio sperimentale

Sulla base delle analisi disponibili svolte sui campioni carotati e gettati nel corso degli anni si è proposta una variazione del rapporto a/c (rispetto al valore precedentemente adottato, vedi par. 3.6), con riduzione del quantitativo di cemento, ponendo particolare attenzione alla composizione granulometrica dell'inerte e alla quantità di additivo.

Si preparano perciò 5 mix design differenti da sottoporre, a 28 giorni dal getto, a prova di compressione monoassiale. Vengono gettati 5 provini di dimensioni standardizzate (cubo di lato $150mm$) per ogni mix, al fine di fornire un risultato statisticamente più affidabile.

4.1. Acqua, cemento e a/c

Rispetto al corrente mix design (vedi par. 3.6) si cerca di ridurre il quantitativo di cemento al m^3 , poiché questo rappresenta la spesa predominante per l'azienda. Si cerca inoltre di mantenere un rapporto a/c elevato per garantire la pompabilità del calcestruzzo. Si considerano perciò i seguenti mix:

	Acqua [kg/m^3]	Cemento [kg/m^3]	a/c
MIX1	360	300	1,20
MIX2	300	315	0,95
MIX3	290	320	0,91
MIX4	350	310	1,13
MIX5	350	310	1,13

Tabella 4.1: valori a/c per i differenti mix

Per i test si utilizza il cemento Buzzi Tipo II/A-LL 32,5 R, con una densità media di $3100kg/m^3$.

4.2. Inerte

A causa di limitazioni tecnologiche legate alla disponibilità del cantiere (vi è la disponibilità di due sole tramogge) si decide di utilizzare una composizione granulometrica derivata dal mix di percentuali differenti di due soli inerti, a fronte dei tre disponibili.

Si ipotizza costante ed uguale a $2600kg/m^3$ la densità dell'inerte, derivante da un valore medio delle densità misurata nel corso delle prove disponibili. Tale assunzione risulta essere adeguata considerando la variabilità dell'aggregato medesimo durante il getto.

Inerte secco [kg/m³]	
MIX1	1510
MIX2	1610
MIX3	1650
MIX4	1550
MIX5	1550

Tabella 4.2: inerte totale nei vari mix

Si considerano tre inerti differenti:

- Inerte bianco: inerte con elevate percentuali di talco e di granulometria variabile, umidità variabile che si assesta tra il 3% e il 5%.

	Setacci [mm]	Trattenuto [g]	Passante cumulativo [%]
Trattenuto al setaccio	16	194,86	92,24
Trattenuto al setaccio	12,7	189,81	84,69
Trattenuto al setaccio	9,5	175,93	77,68
Trattenuto al setaccio	6,3	222,99	68,81
Trattenuto al setaccio	4,75	113,85	64,27
Trattenuto al setaccio	2,8	254,03	54,16
Trattenuto al setaccio	1,4	308,68	41,87
Trattenuto al setaccio	0,85	206,2	33,66
Trattenuto al setaccio	0,425	287,84	22,20
Trattenuto al setaccio	0,212	307,55	9,96
Trattenuto al setaccio	0,15	95,59	6,15
Trattenuto al setaccio	0,106	73,03	3,25
Trattenuto al setaccio	0,075	37,35	1,76
Passante 0,075		44,2	
Peso totale campione della setacciatura		2511,91	

Tabella 4.3: granulometria inerte bianco

- Inerte marrone: inerte contenente percentuali di talco con granulometria simile al bianco, umidità intorno al 3%.

	Setacci [mm]	Trattenuto [g]	Passante cumulativo [%]
Trattenuto al setaccio	16	114,43	95,06
Trattenuto al setaccio	12,7	227,74	85,24
Trattenuto al setaccio	9,5	181,24	77,43
Trattenuto al setaccio	6,3	188,23	69,31
Trattenuto al setaccio	4,75	91,17	65,37
Trattenuto al setaccio	2,8	306,68	52,15
Trattenuto al setaccio	1,4	332,64	37,80
Trattenuto al setaccio	0,85	181,73	29,96
Trattenuto al setaccio	0,425	243,97	19,44
Trattenuto al setaccio	0,212	282,95	7,24
Trattenuto al setaccio	0,15	70,28	4,21
Trattenuto al setaccio	0,106	44,13	2,30
Trattenuto al setaccio	0,075	24,55	1,24
Passante 0,075		28,82	
Peso totale campione della setacciatura		2318,56	

Tabella 4.4: granulometria inerte bianco

- Sabbia: inerte con nessuna traccia di talco e contenuto d'acqua intorno al 7%.

	Setacci [mm]	Trattenuto [g]	Passante cumulativo [%]
Trattenuto al setaccio	16	0	
Trattenuto al setaccio	12,7	0	
Trattenuto al setaccio	9,5	0	100,00
Trattenuto al setaccio	6,3	61,24	97,68
Trattenuto al setaccio	4,75	102,97	93,78
Trattenuto al setaccio	2,8	391,38	78,96
Trattenuto al setaccio	1,4	577,12	57,11
Trattenuto al setaccio	0,85	355,75	43,64
Trattenuto al setaccio	0,425	494,1	24,93
Trattenuto al setaccio	0,212	298,73	13,62
Trattenuto al setaccio	0,15	172,09	7,10
Trattenuto al setaccio	0,106	103,56	3,18
Trattenuto al setaccio	0,075	51,81	1,22
Passante 0,075		32,24	
Peso totale campione della setacciatura		2640,99	

Tabella 4.5: granulometria sabbia

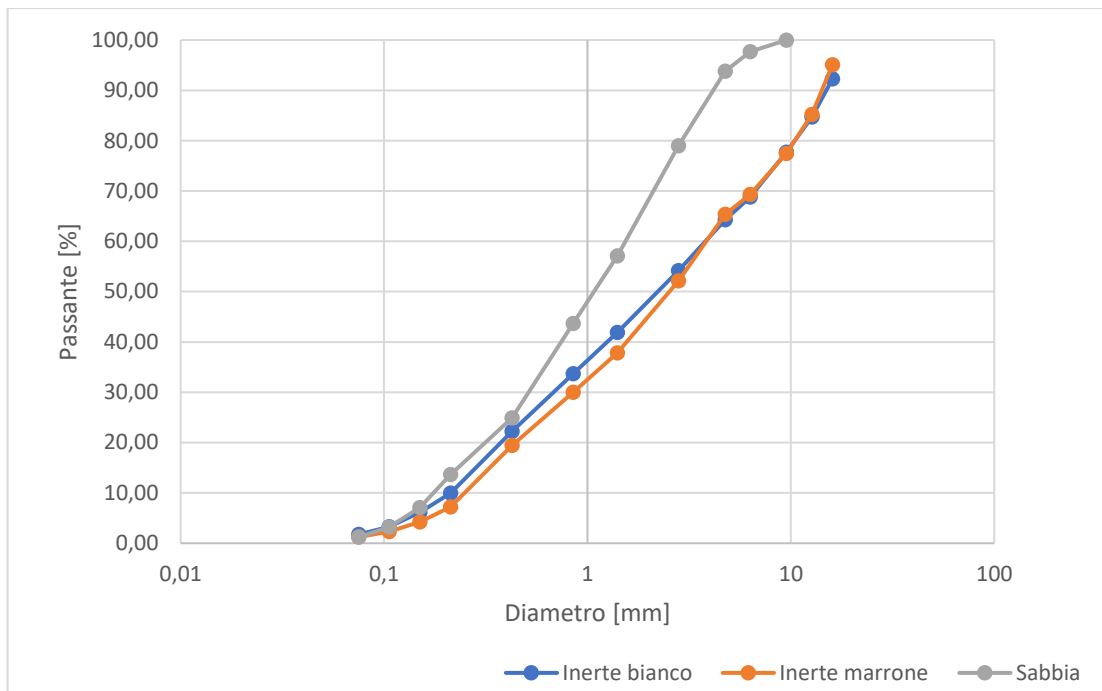


Diagramma 4.1: passante cumulativo inerti

Nei 5 mix design si impongono differenti percentuali di questi inerti:

	Bianco	Marrone	Sabbia
MIX1	50%	50%	0%
MIX2	70%	30%	0%
MIX3	30%	70%	0%
MIX4	90%	0%	10%
MIX5	90%	0%	10%

Tabella 4.6: Percentuali di inerte nei vari mix

4.3. Additivo

Vengono considerati 3 additivi della BASF per migliorare la pompabilità del getto. Questi vengono aggiunti su calcestruzzo umido:

- MasterSuna SBS 3890:

È un additivo appositamente studiato per risolvere problematiche legate all'elevato adsorbimento di additivi riduttori d'acqua. L'uso è adatto per la confezione di calcestruzzo di elevata lavorabilità e buon mantenimento di lavorabilità, in particolare per calcestruzzo pompato. Viene accoppiato con additivi riduttori d'acqua. Le macromolecole di MasterSuna sono caratterizzate da una elevatissima affinità con i minerali argillosi espansivi. Viene intrappolato dai materiali adsorbenti lasciando così libero il riduttore d'acqua di disperdere in modo ottimale la pasta di cemento. L'uso di questo additivo, in combinazione con un riduttore d'acqua, permette di ottenere un calcestruzzo con consistenze S3/S4/S5 e di mantenere buona lavorabilità anche per più

di 90 minuti ed evitando una riduzione delle resistenze meccaniche a compressione alle brevi stagionature. Questo viene aggiunto prima del riduttore d'acqua per assicurare il massimo dell'efficacia.

- **MasterGlenium SKY 828:**
È un additivo superfluidificante capace al contempo di mantenere la lavorabilità anche per temperature elevate del calcestruzzo, senza alcun effetto secondario di ritardo nello sviluppo delle resistenze meccaniche a brevi stagionature. L'additivo permette perciò di garantire la buona lavorabilità per il tempo necessario al trasporto e alla posa in opera del calcestruzzo.

- **MasterEase 7000:**
È un additivo superfluidificante progettato in modo da impartire eccezionali proprietà reologiche al calcestruzzo fresco. Il suo utilizzo facilita il pompaggio del calcestruzzo, riduce la viscosità dell'impasto e garantisce un'ottima lavorabilità in tutte le stagioni.

4.4. Mix design

Si definiscono i seguenti mix, ponendo particolare attenzione alla curva granulometrica, che viene confrontata con i mix teorici proposti da Bolomey e Füller, considerando per il primo modello un valore di $A = 14$, poiché inerte con classe di consistenza S5 di frantumazione e dimensione massima dell'inerte $D_{max} = 20mm$:

- **MIX 1:** si incrementa il contenuto di acqua diminuendo al contempo la quantità di cemento rispetto al vecchio mix, si utilizza inerte bianco con contenuto d'acqua del 5% e marrone con contenuto d'acqua del 3,4% in eguali quantità.

			[kg/m ³]
Acqua			360
Cemento			300
a/c			1,20
Inerte secco	bianco	50%	750
	marrone	50%	760
	sabbia	0%	0
Additivo	Glenium 828		1,5
	Mastersuna 8590		1
	Masterease 7000		0

Tabella 4.7: MIX 1

- MIX 2: si mantiene un buon rapporto a/c aumentando leggermente la quantità di cemento. Per controbilanciare questa diminuzione di acqua si incrementa la quantità di additivo, utilizzando per la maggior parte inerte bianco con contenuto d'acqua del 3% e inerte marrone con contenuto d'acqua del 3,4%.

			[kg/m ³]
Acqua			300
Cemento			315
a/c			0,95
Inerte secco	bianco	70%	1130
	marrone	30%	480
	sabbia	0%	0
Additivo	Glenium 828		3
	Mastersuna 8590		1,5
	Masterease 7000		0

Tabella 4.8: MIX 2

- MIX 3: cercando di mantenere un mix simile al 2 si invertono le quantità di inerte bianco e marrone con lo stesso contenuto d'acqua del MIX 2.

			[kg/m ³]
Acqua			290
Cemento			320
a/c			0,91
Inerte secco	bianco	30%	490
	marrone	70%	1160
	sabbia	0%	0
Additivo	Glenium 828		3
	Mastersuna 8590		1,5
	Masterease 7000		0

Tabella 4.9: MIX 3

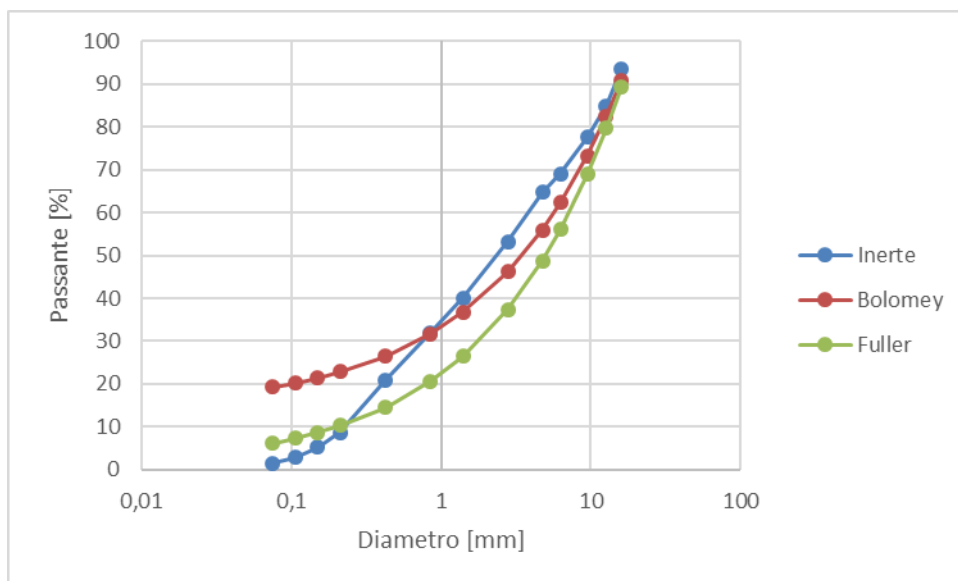


Diagramma 4.2: passante cumulativo MIX 1, MIX 2 e MIX 3

- MIX 4: vista la presenza di sabbia generalmente aggiunta in cantiere all'inerte bianco si considera un mix di questi due inerti, mantenendo elevato il rapporto a/c e considerando inerte bianco con contenuto d'acqua del 5% e sabbia con contenuto d'acqua del 6,9%.

				[kg/m ³]
Acqua				350
Cemento				310
a/c				1,13
Inerte secco	bianco	90%		1400
	marrone	0%		0
	sabbia	10%		150
Additivo	Glenium 828			3
	Mastersuna 8590			1,5
	Masterease 7000			0

Tabella 4.10: MIX 4

- MIX 5: mantenendo lo stesso mix del precedente si considera invece l'aggiunta di un additivo innovativo, sostituendolo al già studiato Glenium SKY 828.

			[kg/m ³]
Acqua			350
Cemento			310
a/c			1,13
Inerte secco	bianco	90%	1400
	marrone	0%	0
	sabbia	10%	150
Additivo	Glenium 828		0
	Mastersuna 8590		3
	Masterease 7000		2

Tabella 4.11: MIX 5

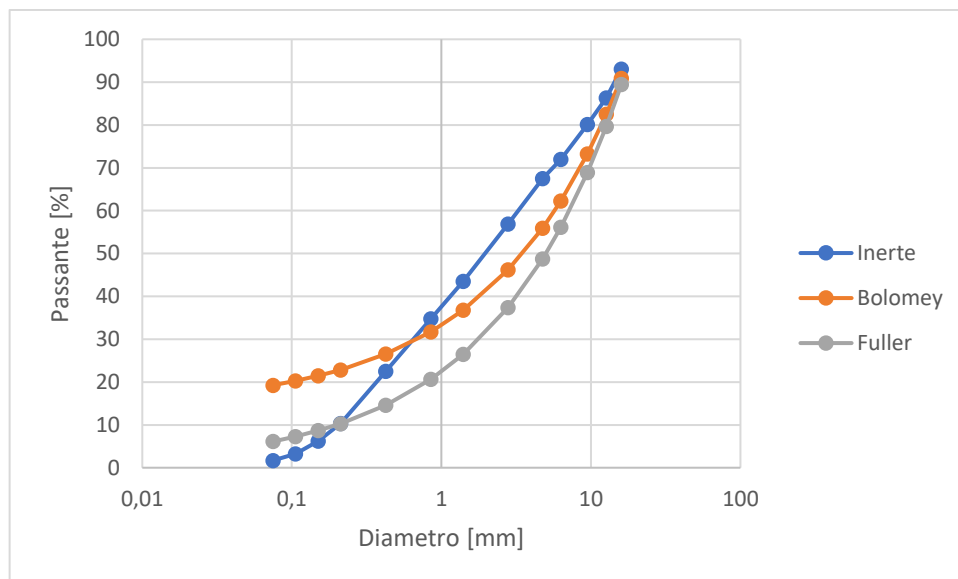


Diagramma 4.3: passante cumulativo MIX 4 e MIX 5

4.5. Slump test

Durante il getto dei provini si è proceduto a effettuare lo slump test con ogni mix progettato. Si ricorda l'importanza di avere una classe di consistenza S5 per garantire la pompabilità del getto.

Di seguito si riportano i risultati dei test.

- MIX 1: slump 22cm.



Figura 4.1: slump MIX 1

- MIX 2: slump 23cm.



Figura 4.2: slump MIX 2

- MIX 3: slump 23cm.



Figura 4.3: slump MIX 3

- MIX 4: slump 26cm.

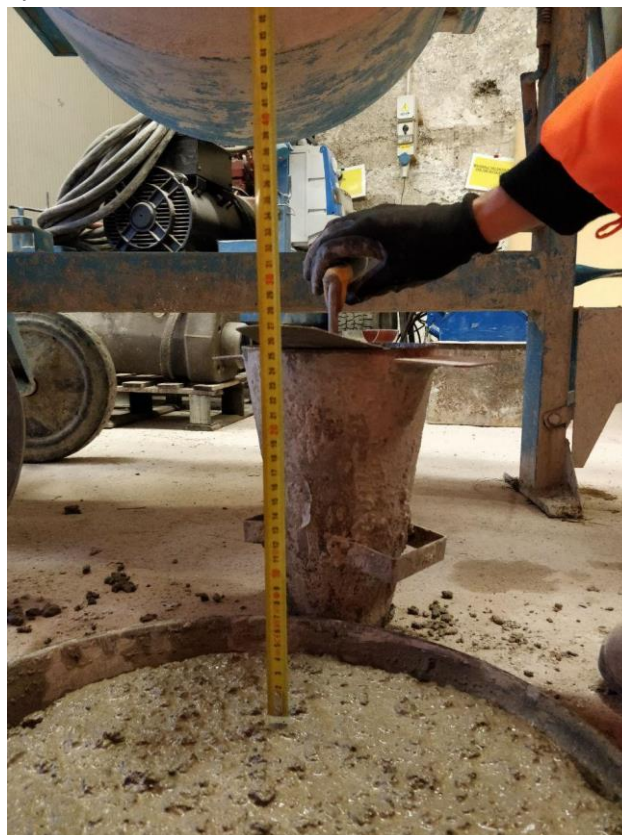


Figura 4.4: slump MIX 4

- MIX 5: slump 26 cm.



Figura 4.5: slump MIX 5

Sulla base dei risultati si evidenzia come la classe di consistenza sia sempre oltremodo rispettata. In particolare si pone attenzione sui MIX 1 e 4/5, notando come l'aggiunzione di piccole quantità di additivo favorisca la fluidità del materiale, pur avendo una riduzione del contenuto d'acqua.

4.6. Bleeding

Aumentando il volume d'acqua vi è il rischio di determinare una deposizione, durante la fase di maturazione, degli inerti più grossolani, causando una risalita in superficie dell'acqua di impasto. Al fine di assicurare che il quantitativo di acqua aggiunta risulti essere sufficiente per garantire la pompabilità ma non tanto elevato da causare fenomeni di essudazione troppo elevati si va a misurare tale fenomeno durante la prima ora di maturazione del calcestruzzo. Si riportano qui i risultati ottenuti per i vari mix.

- MIX 1: bleeding 2 mm a 1h, essudazione pari all'1,3% del volume.



Figura 4.6: bleeding MIX 1

- MIX 2: bleeding 0,5 mm a 1h, essudazione pari allo 0,2% del volume.



Figura 4.7: bleeding MIX 2

- MIX 3: bleeding 0,3 mm a 1h, essudazione pari allo 0,1% del volume.



Figura 4.8: bleeding MIX 3

- MIX 4: bleeding 5 mm a 1h, essudazione pari allo 1,7% del volume.



Figura 4.9: bleeding MIX 4

- MIX 5: bleeding 4 mm a 1h, essudazione pari allo 1,4% del volume.



Figura 4.10: bleeding MIX 5

Si noti come l'aumento di additivo fluidificante venga ben controbilanciato dalla riduzione di acqua di impasto nei MIX 2 e 3 rispetto al MIX 1 diminuendo, di fatto, l'essudazione percentuale. Aumentando invece l'acqua di impasto (MIX 4 e 5) mantenendo un'elevata quantità di fluidificante il bleeding aumenta notevolmente.

4.7. Risultati provini maturati

Trascorsi 28 giorni dalla data del getto dei provini si è provveduto a effettuare i test di compressione monoassiale. I provini sono stati quindi scasserati e testati singolarmente. Di ogni provino si registra la tensione di rottura, e di ogni mix viene fatta una media tra i risultati dei provini. Viene richiesta una tensione di rottura minima di $6MPa$.

	$\sigma_{r,28gg}$ [MPa]	$\sigma_{r,medio,28gg}$ [MPa]
MIX 1	5,41	5,40
	5,52	
	5,37	
	5,25	
	5,44	
MIX 2	6,49	6,19
	6,04	
	6,04	
	6,22	
	6,14	
MIX 3	7,73	8,01
	8,44	
	7,94	
	7,66	
	8,28	
MIX 4	4,44	4,36
	4,79	
	4,25	
	4,25	
	4,05	
MIX 5	3,60	3,97
	4,00	
	4,14	
	3,73	
	4,36	

Tabella 4.12: tensione di rottura a 28 giorni dal getto

Sulla base dei risultati ottenuti si evidenzia una significativa omogeneità dei dati, che testimonia la corretta esecuzione dei getti e l'affidabilità dei risultati.

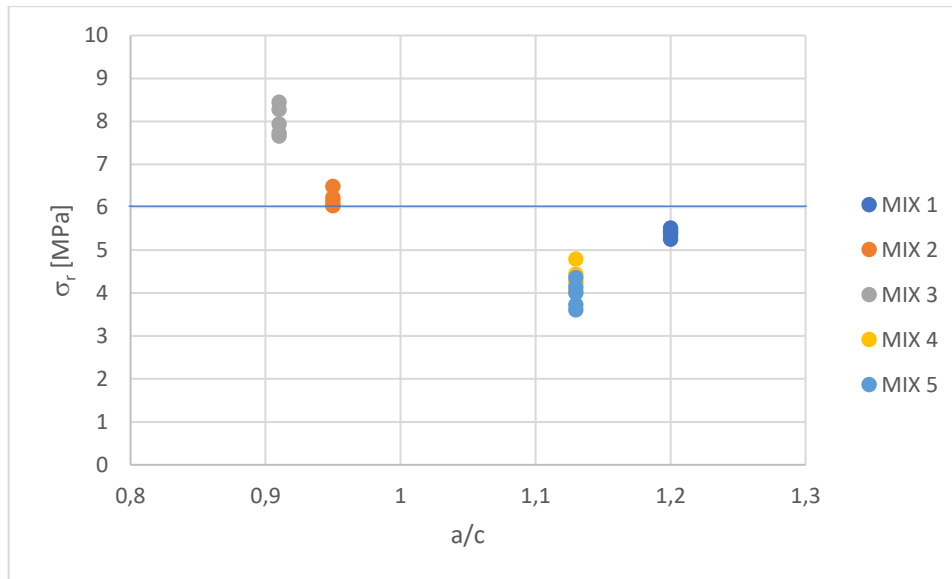


Diagramma 4.4: compressione monoassiale MIX di progetto

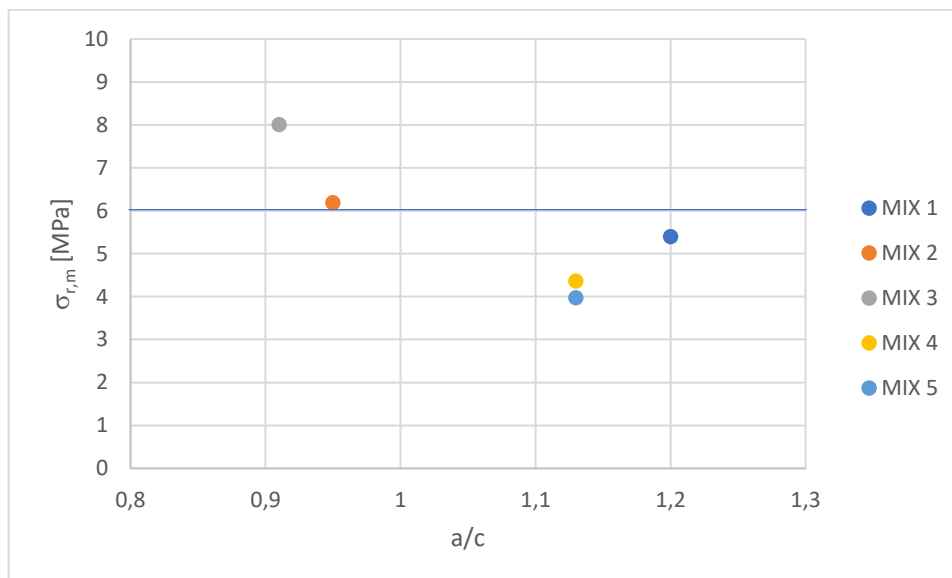


Diagramma 4.5: valori medi compressione monoassiale MIX di progetto

Si riporta inoltre il diagramma 3.22 aggiornato con i nuovi risultati ottenuti dallo studio:

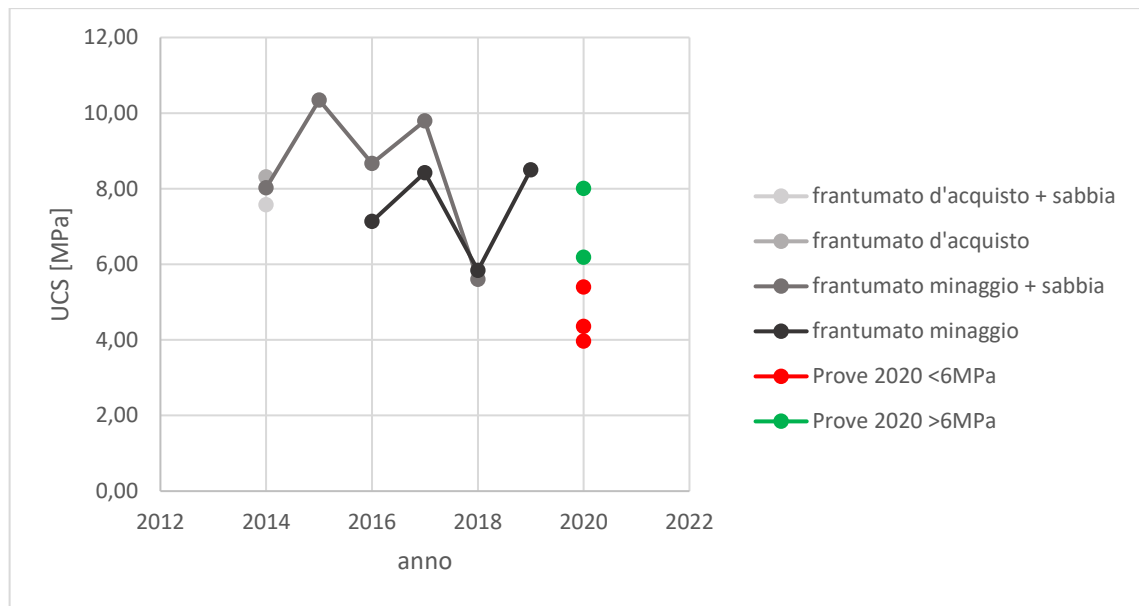


Diagramma 4.6: UCS medio negli anni con prove svolte nel 2020

A differenza degli anni precedenti, osservando il diagramma, si nota come la resistenza a compressione risulti essere inferiore. È tuttavia inferiore anche la quantità di cemento utilizzata, risultando quindi più conveniente per l'azienda.

Analizziamo singolarmente i risultati dei diversi MIX:

- MIX 1:

La resistenza a compressione media ricavata è risultata inferiore al limite minimo richiesto dall'azienda. Tale valore di resistenza è probabilmente dovuto sia all'elevato rapporto a/c utilizzato, pari a 1,2, sia alla bassa quantità di cemento adoperata. Si osserva infatti come, dai test svolti durante il 2015 e il 2016 (Par. 3.2 e 3.3), valori di a/c prossimi a quello utilizzato comportino abbassamenti della resistenza sotto i limiti minimi, sia utilizzando un cemento 42,5 (2015) o un cemento 32,5 (2016).

Pur se sotto i 6MPa è essenziale osservare come l'utilizzo unicamente di inerti talcosi permetta l'ottenimento di decenti valori di resistenza.

- MIX 2:

Nel secondo MIX si è scelto di ridurre il quantitativo di acqua a favore di un aumento di additivo. Questa scelta ha permesso di ottenere un valore di resistenza che supera i 6MPa con una riduzione di ben $55\text{kg}/\text{m}^3$ di cemento.

- MIX 3:

Aumentando le percentuali di inerte marrone, cioè riducendo la componente talcosa nel calcestruzzo e mantenendo un mix approssimativamente uguale al secondo si sono ottenute resistenze ottime.

- MIX 4 e MIX 5:

Gli ultimi due MIX, con un contenuto elevatissimo di talco e un valore $a/c = 1,13$, hanno fornito risultati scadenti. L'utilizzo di un additivo rispetto all'altro non ha portato a miglioramenti della resistenza. Si può anzi osservare come l'utilizzo del Masterease 7000 abbia determinato una riduzione della resistenza a compressione nell'ultimo MIX. Ciò può essere dovuto al potere fluidificante dell'additivo stesso (aggiunto in quantità superiori rispetto al corrispettivo superfluidificante utilizzato nel quarto MIX) che ha determinato un mix troppo fluido e con evidenti problemi di essudazione. Potrebbero valutarsi ulteriori test da effettuare riducendo le quantità di additivo o il quantitativo di acqua.

Si riporta, a titolo di esempio, la rottura di uno dei provini dove risulta evidente il passaggio attraverso i grani di talco e la natura fragile della rottura attraverso gli stessi, che infatti presenta superfici frastagliate e lucide.



Figura 4.11: rottura provino MIX 5

Dall'analisi dei risultati risulta evidente che i MIX migliori risultano essere il secondo ed il terzo. Sarà compito dell'azienda, in base ai volumi di inerte disponibile in cantiere, valutare in quale occasione utilizzare il secondo rispetto al terzo. Avendo ottenuto una riduzione così elevata del quantitativo di cemento (pari, nel migliore dei mix, al 15%) si assicura una sostanziale riduzione dei costi connessi al trasporto e all'acquisto di cemento.

5. Conclusioni

Sotto commissione della Imerys Talco si è studiata la relazione che esiste tra resistenza a compressione monoassiale di un calcestruzzo pompabile e la presenza di talco nell'inerte dello stesso calcestruzzo. Sulla base delle analisi svolte nel corso degli anni precedenti, tramite le quali è stato possibile osservare come la presenza di sterile bianco riduca le caratteristiche di resistenza del calcestruzzo a parità di acqua e cemento aggiunti all'impasto, avendo come scopo la riduzione del quantitativo di cemento al metro cubo (che rappresenta il costo maggioritario per l'azienda committente), si sono studiati differenti mix di progetto, imponendo una riduzione media del cemento di $60\text{kg}/\text{m}^3$ rispetto al mix adottato nel corso del 2019 (che prevedeva $370\text{kg}/\text{m}^3$).

Mantenendo elevati rapporti a/c , necessari a causa dell'assorbimento di acqua dovuto alla presenza di talco nello sterile di coltivazione, si è fatto variare nei mix i quantitativi di inerte utilizzato scegliendone due per mix, a fronte dei tre disponibili, qui richiamati:

- Inerte bianco: sterile di coltivazione frantumato con elevate quantità di talco;
- Inerte marrone: sterile di coltivazione frantumato con tracce di talco;
- Sabbia: inerte con granulometria compresa tra 2 e $0,0625\text{mm}$.

La scelta di utilizzare solamente due inerti in ogni mix viene dettata da limitazioni tecnologiche, sono infatti disponibili solamente due tramogge nel cantiere.

I campioni sono stati gettati in data 19/02/2020 e sono stati testati a 28 giorni di maturazione, in data 18/03/2020. Durante il getto sono stati effettuati dei test di slump e bleeding al fine di valutare la corretta composizione del calcestruzzo per valutarne la pompabilità e la possibilità di generare segregazioni durante la presa. Sulla base dei risultati ottenuti è stato possibile assicurare la resistenza minima richiesta di 6MPa in due dei 5 MIX testati. È compito dell'azienda valutare quale risultato adoperare in base alle quantità di inerte disponibile.

La riduzione del 15% del quantitativo di cemento al m^3 ottenuta nel secondo MIX permette una sostanziale riduzione dei costi sostenuti dall'azienda per l'acquisto e il trasporto del cemento.

Bibliografia

La storia delle miniere, quaderno di documentazione della comunità montana Valli Chisone e Germanasca; C. Ferrero, 1988.

Istituto Lombardo di Scienze e Lettere, vol. LXXXVIII, 1955.

Rio tinto minerals, M. Martelli e P. Jannin.

Geological-Structural analysis and 3D modelling of the Fontane talc mineralization (Germanasca Valley, Inner Cottian Alps), master's thesis, Università di Torino, 2009/2010.

New study to assess the geomechanical behavior of the expansion of the Rodoretto talc mine, D. Martinelli e D. Peila, World Tunnel Congress, 2014.

Coltivazione con ripiena cementata nella miniera di talco di Fontane, O. Del Greco, S. Pelizza, P. Sartorio e L. Stagiotti, bollettino dell'associazione mineraria subalpina, anno XIII, n. 3, 1976.

Norme tecniche per le costruzioni, decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

Concrete mix design, J.D. McIntosh, 1964.

Norma ASTM-D7012.

Norma UNI EN 12350-2.

Norma UNI EN 206-2006.

Norma UNI 7122:1989.