

POLITECNICO DI TORINO
LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE
A.A. 2018/2019

Utilizzo di malta bicomponente per le applicazioni di
backfilling in scavi meccanizzati con TBM scudata



Relatore:

Prof. PEILA Daniele

Candidato:

BONGIORNO Marco

Correlatori:

Ing. MARTINELLI Daniele

Ing. TODARO Carmine

Luglio 2019

Indice

Sommario.....	13
1 Introduzione.....	14
1.1 Scopo della tesi.....	18
1.2 Oggetto della tesi.....	18
1.3 Outline.....	19
2 Backfilling grouting.....	20
2.1 Aspetti generali.....	20
2.2 Modalità di iniezione.....	22
2.2.1 Riempimento tramite il rivestimento.....	22
2.2.2 Iniezioni tramite la coda dello scudo.....	23
2.3 Specifiche del backfilling.....	26
2.3.1 Miscelazione.....	27
2.3.2 Dosaggio.....	29
2.3.3 Pompaggio.....	29
2.4 I materiali.....	32
2.4.1 Le tipologie.....	32
2.4.2 Differenze tra mono e bicomponente.....	37
3 La malta bicomponente.....	41
3.1 I materiali costituenti.....	41
3.1.1 Il cemento.....	41
3.1.2 La bentonite.....	43

3.1.3	Il componente FR10.....	46
3.1.4	Il ritardante.....	46
3.1.5	L'accelerante.....	50
3.2	Prestazioni bicomponente	54
3.2.1	Creazione di bolla incompressibile	54
3.2.2	Durabilità	55
3.2.3	Consistenza e resistenza.....	56
3.2.4	Caratteristiche dell'impianto nel cantiere di Brisbane.....	57
4	Casi studio.....	59
4.1	Roma metro C	59
4.2	Brisbane Airport Link	60
4.3	Pechino linea metropolitana	61
4.4	Legacy Way road tunnels (Australia)	63
4.5	Bolaños-Campobecerros twin tunnels (Spagna)	64
4.6	Follo Line railway tunnels (Norvegia).....	65
5	Prove sperimentali	66
5.1	Introduzione	66
5.2	Procedura preparazione della componente A.....	67
5.3	Prove su componente A	70
5.3.1	Determinazione della densità.....	70
5.3.2	Determinazione della fluidità con cono di Marsh.....	71
5.3.3	Determinazione del bleeding	72

5.4	Prove su bicomponente (componente A+B)	73
5.4.1	Gel time.....	73
5.4.2	Prove di resistenza a compressione	74
5.4.3	Prove di taglio	79
5.5	Risultati preliminari	82
5.5.1	Eliche diverse.....	84
5.5.2	Procedure di miscelazione differenti	88
5.5.3	Mix design diversi	89
5.6	Risultati mix design 2.....	92
5.7	Risultati mix con bentonite al 99% di montmorillonite	101
5.8	Risultati mix con cemento*	104
5.9	Mix con FR10	105
5.10	Mix con FR10*	112
5.11	Mix con FR10 in polvere.....	117
6	Conclusioni e futuri sviluppi.....	123
	Allegato A.....	125
	Allegato B	138
	Allegato C	155
	Bibliografia	226

Indice delle figure

Figura 1 - Open TBM	14
Figura 2 - Shield TBM.....	15
Figura 3 - Double Shield TBM	16
Figura 4 - EPB-Shield TBM	17
Figura 5 - Slurry Shield TBM.....	17
Figura 6 - Fattori che influenzano lo spessore del gap (Thewes and Budach, 2009)	21
Figura 7 - Iniezioni tramite fori nel rivestimento	22
Figura 8 - Iniezioni tramite lo scudo.....	23
Figura 9 - Malta bicomponente iniettata trite lo scudo (Brisbane).....	25
Figura 10 - ‘Injection ports’ (Brisbane).....	25
Figura 11 - Malta bicomponente iniettata trite lo scudo (Beijing)	26
Figura 12 - ‘Injection ports’ (Beijing)	26
Figura 13 - Schema di un ‘colloidal mixer’	28
Figura 14 Pompa a doppio pistone con linea di alimentazione di malta	30
Figura 15 - Pompa peristaltica	30
Figura 16 - Pompa a cavità progressiva.....	31
Figura 17 – Pannello di controllo	32
Figura 18 - Struttura della montmorillonite.....	44
Figura 19 - Struttura della bentonite dopo la miscelazione con acqua	45
Figura 20 - Apparecchio di Vicat	51
Figura 21 - Effetti sulla presa ed indurimento degli acceleranti (Myrdal, 2007)	52
Figura 22 - Progetto linea 14 della metropolitana di Pechino	61
Figura 23 - Variazione di resistenza a compressione della malta bicomponente	63
Figura 24 - Legacy Way portale di lancio	63
Figura 25 - Agitatore digitale Agolab AM20-D	68

Figura 26 - Lame per la miscelazione.....	69
Figura 27 - Equipaggiamento per la determinazione della densità.....	70
Figura 28 - Test di fluidità. Il riempimento del cono Marsh e le misure del flusso sono mostrati rispettivamente al centro e a destra.....	72
Figura 29 - Bleeding test.....	73
Figura 30 - Esecuzione prova di gel time	74
Figura 31 - Stampo di polistirolo 160x40x40 mm.....	74
Figura 32 - Dettagli prova.....	76
Figura 33 - Stampi speciali per test a compressione a $t=3h$	77
Figura 34 - Pressa ed accessori	77
Figura 35 - (A): flessore su 3 punti (A'): realizzazione semi-campioni (B) comprimitore	78
Figura 36 - Prova di taglio diretto.....	79
Figura 37 - Fase preliminari prova di taglio	80
Figura 38 - Macchina e scatola di taglio	81
Figura 39 - Gel time dei mix design	91
Figura 40 - Valori medi della resistenza a compressione monoassiale per i mix design	91
Figura 41 - Prova di taglio al variare di σ'_v su mix design 2 maturato 1 ora.....	96
Figura 42 - Involuppo a rottura mix design 2 maturato 1 ora.....	96
Figura 43 - Prova di taglio al variare di σ'_v su mix design 2 maturato 3 ore.....	97
Figura 44 - Involuppo a rottura mix design 2 maturato 3 ore.....	97
Figura 45 - Prova di taglio al variare di σ'_v su mix design 2 maturato 24 ore.....	98
Figura 46 - Involuppo a rottura mix design 2 maturato 24 ore.....	98
Figura 47 - Prova di taglio al variare di σ'_v su mix design 2 maturato 28 giorni	99
Figura 48 - Involuppo a rottura mix design 2 maturato 28 giorni	99
Figura 49 - (a): malta maturata 3 ore (b) malta maturata 28 giorni	100

Figura 50 - Bolle d'aria inglobate all'interno della malta	109
Figura 51 - Bolle d'aria inglobate all'interno dei campioni maturati	110

Indice delle tabelle

Tabella 1 Caratteristiche richieste alla malta per colmare il gap anulare	35
Tabella 2 - Panoramica utilizzo del backfilling (Thewes and Budach, 2009)	36
Tabella 3 - Tipi di malte:vantaggi e svantaggi (ITAtch, 2014)	37
Tabella 4 - Presenza di fine nei tipi di cemento con dimensione particella tra 40 e 150 mm (Garshol, 2003)	41
Tabella 5 - Dimensioni particelle dei più frequenti cementi da iniezione (Garshol, 2003)	42
Tabella 6 - Malta bicomponente utilizzata per la linea C della metro di Roma	59
Tabella 7 - Malta bicomponente utilizzata per la linea 'Bisbane Airport Link'	61
Tabella 8 - Risultati di test sulla componente A e sulla bicomponente	62
Tabella 9 - Componente A utilizzata per 'Legacy Way road tunnels'	64
Tabella 10 - Componente A utilizzata per 'Bolaños-Campobeceros twin tunnels'	65
Tabella 11 - Componente A utilizzata per 'Follo Line railway tunnels'	65
Tabella 12 - Mix design 'standard'	66
Tabella 13 - Componente A per un volume di 3 litri	68
Tabella 14 - Densità attesa	82
Tabella 15 - Fluidità attesa	82
Tabella 16 - Bleeding atteso	82
Tabella 17 - Gel time atteso	82
Tabella 18 - Resistenza a compressione con penetrometro attesa (a t=1h)	83
Tabella 19 - Resistenza a compressione con penetrometro attesa (a t=3h)	83
Tabella 20 - Resistenza a compressione con pressa attesa (a t=24h)	83
Tabella 21 - Resistenza a flessione e compressione con pressa attesa (a t=28gg)	84
Tabella 22 - Densità ottenuta con elica standard	84
Tabella 23 - Densità ottenuta con elica con due alette mobili	84
Tabella 24 - Densità ottenuta con elica rettangolare e 3 fori	85

Tabella 25 - Fluidità ottenuta con elica standard.....	85
Tabella 26 - Fluidità ottenuta con elica con due alette mobili.....	85
Tabella 27 - Fluidità ottenuta con elica rettangolare e 3 fori.....	85
Tabella 28 - Bleeding ottenuta con elica standard.....	86
Tabella 29 - Bleeding ottenuta con elica con due alette mobili.....	86
Tabella 30 - Bleeding ottenuta con elica rettangolare e 3 fori.....	86
Tabella 31 - Prova penetrometrica t=1h ottenuta con elica con due alette mobili.....	87
Tabella 32 - Prova penetrometrica t=3h ottenuta con elica con due alette mobili.....	87
Tabella 33 - Prova penetrometrica t=1h ottenuta con elica rettangolare a 3 fori.....	87
Tabella 34 - Prova penetrometrica t=3h ottenuta con elica rettangolare a 3 fori.....	87
Tabella 35 - Fluidità ottenuta con procedura A.....	88
Tabella 36 - Fluidità ottenuta con procedura B.....	88
Tabella 37 - Mix design sperimentati (*: bentonite fornito da Mapei).....	89
Tabella 38 - Densità dei mix design.....	89
Tabella 39 - Fluidità dei mix design.....	90
Tabella 40 - Bleeding dei mix design.....	90
Tabella 41 - Densità del mix design 2.....	92
Tabella 42 - Fluidità del mix design 2.....	92
Tabella 43 - Bleeding del mix design 2.....	92
Tabella 44 - Gel time del mix design 2.....	92
Tabella 45 - Resistenza a compressione con penetrometro (a t=1h).....	93
Tabella 46 - Resistenza a compressione con penetrometro (a t=3h).....	93
Tabella 47 - Resistenza a compressione con pressa (a t=3h).....	93
Tabella 48 - Resistenza a compressione con pressa (a t=24h).....	94
Tabella 49 - Resistenza a flessione e compressione con pressa (a t=28h).....	94
Tabella 50 - Parametri di resistenza mix design 2 maturato 1 ora.....	96

Tabella 51 - Parametri di resistenza mix design 2 maturato 3 ore.....	97
Tabella 52 - Parametri di resistenza mix design 2 maturato 24 ore.....	98
Tabella 53 - Parametri di resistenza mix design 2 maturato 28 giorni	99
Tabella 54 - Densità del mix con bentonite al 99% di montmorillonite.....	101
Tabella 55 - Fluidità del mix con bentonite al 99% di montmorillonite.....	101
Tabella 56 - Bleeding del mix con bentonite al 99% di montmorillonite.....	102
Tabella 57 - Gel time del mix con bentonite al 99% di montmorillonite	102
Tabella 58 - Resistenza a compressione con penetrometro (a t=1h)	102
Tabella 59 - Resistenza a compressione con penetrometro (a t=3h)	102
Tabella 60 - Resistenza a compressione con pressa (a t=24h).....	103
Tabella 61 - Resistenza a flessione e compressione con pressa (a t=28h).....	103
Tabella 62 - Bleeding del mix con bentonite al 99% di montmorillonite.....	104
Tabella 63 - Gel time del mix con bentonite al 99% di montmorillonite	104
Tabella 64 - Mix design con FR10	105
Tabella 65 - Tre litri di componente A con 5 kg/m ³ di FR10	105
Tabella 66 - Bleeding del mix con 5 kg/m ³ di FR10	105
Tabella 67 - Tre litri di componente A con differenti kg/m ³ di FR10	106
Tabella 68 - Bleeding del mix con differenti kg/m ³ di FR10	106
Tabella 69 - Densità del mix con differenti kg/m ³ di FR10.....	107
Tabella 70 - Resistenza a compressione con pressa mix con 5 kg/m ³ (a t=28gg)	107
Tabella 71 - Resistenza a compressione con pressa mix con 6 kg/m ³ (a t=28gg)	107
Tabella 72 - Resistenza a compressione con pressa mix con 7 kg/m ³ (a t=28gg)	108
Tabella 73 - Resistenza a compressione con pressa mix con 8 kg/m ³ (a t=28gg)	108
Tabella 74 - Resistenza a compressione con pressa mix con 9 kg/m ³ (a t=28gg)	108
Tabella 75 - Resistenza a compressione con pressa mix con 10 kg/m ³ (a t=28gg)	109
Tabella 76 - Fluidità del mix con 10 kg/m ³ di FR10	110

Tabella 77 - Fluidità del mix con 10 kg/m ³ di FR10	110
Tabella 78 - Resistenza a compressione del mix con 10 kg/m ³ con penetrometro (a t=1h)	111
Tabella 79 - Resistenza a compressione del mix con 10 kg/m ³ con penetrometro (a t=3h)	111
Tabella 80 - Resistenza a compressione del mix con 10 kg/m ³ con pressa (a t=3h)	111
Tabella 81 - Tre litri di componente A con differenti kg/m ³ di FR10*	112
Tabella 82 - Densità del mix con 7 kg/m ³ di FR10*	112
Tabella 83 - Densità del mix con 8 kg/m ³ di FR10*	112
Tabella 84 - Fluidità del mix con 7 kg/m ³ di FR10*	113
Tabella 85 - Fluidità del mix con 8 kg/m ³ di FR10*	113
Tabella 86 - Bleeding del mix con 7 kg/m ³ di FR10*	113
Tabella 87 - Bleeding del mix con 8 kg/m ³ di FR10*	113
Tabella 88 - Gel time del mix con 8 kg/m ³ di FR10*	113
Tabella 89 - Gel time del mix con 8 kg/m ³ di FR10*	114
Tabella 90 - Resistenza a compressione del mix con 7 kg/m ³ di FR10* con penetrometro (a t=1h).....	114
Tabella 91 - Resistenza a compressione del mix con 8 kg/m ³ di FR10* con penetrometro (a t=1h).....	114
Tabella 92 - Resistenza a compressione del mix con 7 kg/m ³ di FR10* con penetrometro (a t=3h).....	115
Tabella 93 - Resistenza a compressione del mix con 8 kg/m ³ di FR10* con penetrometro (a t=3h).....	115
Tabella 94 - Resistenza a compressione del mix con 7 kg/m ³ di FR10* con pressa (a t=24h)	115

Tabella 95 - Resistenza a compressione del mix con 8 kg/m ³ di FR10*con pressa (a t=24h)	116
Tabella 96 - Resistenza a flessione e compressione del mix con 7 kg/m ³ di FR10*con pressa (a t=28h)	116
Tabella 97 - Resistenza a flessione e compressione del mix con 8 kg/m ³ di FR10*con pressa (a t=28h)	117
Tabella 98 - Tre litri di componente A con differenti kg/m ³ di FR10 polvere	117
Tabella 99 - Densità del mix con 2,5 kg/m ³ di FR10 liquido	118
Tabella 100 - Densità del mix con 3,0 kg/m ³ di FR10 liquido	118
Tabella 101 - Fluidità del mix con 2,5 kg/m ³ di FR10 liquido	118
Tabella 102 - Fluidità del mix con 3,0 kg/m ³ di FR10 liquido	118
Tabella 103 - Bleeding del mix con 2,5 kg/m ³ di FR10 liquido	118
Tabella 104 - Bleeding mix con 3,0 kg/m ³ di FR10 liquido	119
Tabella 105 - Gel time del mix con 2,5 kg/m ³ di FR10 liquido	119
Tabella 106 - Gel time del mix con 3,0 kg/m ³ di FR10 liquido	119
Tabella 107 - Resistenza a compressione del mix con 2,5 kg/m ³ di FR10 liquido con penetrometro (a t=1h)	119
Tabella 108 - Resistenza a compressione del mix con 3,0 kg/m ³ di FR10 liquido con penetrometro (a t=1h)	120
Tabella 109 - Resistenza a compressione del mix con 2,5 kg/m ³ di FR10 liquido con penetrometro (a t=3h)	120
Tabella 110 - Resistenza a compressione del mix con 3,0 kg/m ³ di FR10 liquido con penetrometro (a t=3h)	120
Tabella 111 - Resistenza a flessione e compressione del mix con 2,5 kg/m ³ di FR10 liquido con pressa (a t=28h)	121

Tabella 112 - Resistenza a flessione e compressione del mix con 3,0 kg/m ³ di FR10 liquido con pressa (a t=28h).....	121
---	-----

Sommario

Lo studio in esame si articola in tre fasi principali: macchine da scavo e tecniche di backfilling con focus sull'utilizzo della malta bicomponente; casi studio nei quali è stata adottata la tecnologia; infine studio sperimentale di alcuni mix design di malta bicomponente approfondendone la caratterizzazione meccanica.

Il sistema di backfilling con bicomponente è diventato il metodo più utilizzato per colmare il gap che si crea durante l'avanzamento della macchina da scavo. Esso si basa sul mix di due fluidi, una malta a base di cemento (componente A) e un accelerante (componente B), che fluiscono attraverso separate condotte dalla stazione di dosaggio alla coda della macchina dove sono miscelate pochi centimetri prima degli ugelli. La turbolenza indotta consente di ottenere il giusto mix che gelifica in pochi secondi.

Premesso il basso livello di standardizzazione nel campo delle prove sulla bicomponente, le procedure largamente utilizzate ed accettate dai committenti devono garantire che la componente A risulti facilmente pompabile, stabile e preservi la sua lavorabilità e che la bicomponente (componente A+B) in pochi istanti acquisisca una resistenza sufficiente. Prove di densità, viscosità, bleeding, gel time, prove penetrometriche; prove con pressa e prove di taglio sono state eseguite. Il variare di certi parametri, come la quantità di polimero o la percentuale di accelerante all'interno del mix oppure la procedura di miscelazione influenzano le performance del prodotto finale.

1 Introduzione

In questo capitolo si descrivono le differenti tipologie di TBM (*Tunnel Boring Machine*) ossia le macchine da scavo in grado di perforare ammassi rocciosi e terreni e di realizzare gallerie. Le prime TBM compaiono agli inizi del 19esimo secolo quando la rivoluzione industriale conduce allo sviluppo di nuovi e più rapidi mezzi di trasporto quale quello su rotaia. Da allora migliaia di chilometri sono stati scavati ed altrettanti chilometri di gallerie saranno realizzate.

Il primo antenato della TBM fu ideato da Sir Marc Isambard Brunel nel 1806 per scavare un tunnel sotto il Tamigi a Londra conclusosi nel 1825. Si trattava di un primo prototipo costituito da uno scudo in legno che proteggeva da possibili venute d'acqua e da convergenze in galleria, per il resto la costruzione prevedeva i metodi classici di scavo utilizzati all'epoca.

Oggigiorno ci sono cinque principali tipologie di TBM: open, shield, double shield, EPB (*Earth Pressure Balance*) shield, slurry shield TBM.

L'open TBM (Figura 1) è generalmente utilizzata in scavi di ammassi rocciosi con caratteristiche meccaniche medio-alte in modo tale da poter far presa sull'ammasso senza danneggiarlo e allo stesso tempo lavorare in sicurezza dato che dietro la testa di scavo l'accesso è aperto. Essa è costituita da una testa di scavo, da un cuscinetto reggispinta (*main bearing*) ovvero il dispositivo in grado di ruotare e di consentire la spinta alla testa della TBM, e dai grippers in grado di fare presa sull'ammasso roccioso e di consentire l'avanzamento della macchina. È generalmente utilizzata con supporti temporanei (steel ribs e shotcrete) mentre gli altri tipi di TBM avendo uno scudo utilizzano rivestimenti finali. Proprio perché non scudata, l'impiego del backfilling non è compatibile con questa macchina.



Figura 1 - Open TBM

La shield TBM ovvero con singolo scudo (Figura 2) presenta la testa di scavo seguita da uno scudo di acciaio che crea un ambiente chiuso in grado di garantire stabilità e sicurezza; è utilizzata in ammassi rocciosi scadenti ad esempio con faglie e discontinuità diffuse, mentre in ammassi resistenti il progetto mostra parecchi inconvenienti. Per bilanciare la spinta che consente lo scavo, la shield TBM preme tramite martinetti contro l'ultimo anello di rivestimento; questa operazione è ciclica: mentre il rivestimento è posizionato la testa della TBM è ferma. Bisogna prestare attenzione in condizioni di squeezing poiché una larga convergenza potrebbe intrappolare la macchina. Un ulteriore svantaggio è il difficile accesso alla testa di scavo.



Figura 2 - Shield TBM

La double TBM ovvero con doppio scudo (Figura 3) è stata progettata per ovviare alla ciclicità della precedente che portava a perdite di tempo dovuta all'installazione del rivestimento. È composta da due scudi collegati con connessione telescopica: il primo contiene la testa di scavo e la tramoggia, il secondo scudo, quello di coda, fa presa sull'ammasso roccioso (gripper) ed erige i conchi. Se da un lato il processo è diventato continuo dall'altro la lunghezza dello scudo, maggiore rispetto alla TBM con singolo scudo, aumenta il rischio che la macchina rimanga intrappolata. Essa può lavorare come illustrato se l'ammasso roccioso ha medio-alte caratteristiche altrimenti in condizioni scadenti lavora come se avesse un singolo scudo.



Figura 3 - Double Shield TBM

L'EPB shield TBM (Figura 4) nata in Giappone negli anni '70 e progettata per scavare terreni morbidi, ha avuto un formidabile sviluppo in quasi 50 anni e oggi può essere utilizzata anche per perforare ammassi rocciosi. Sono le macchine più usate al mondo rappresentando tra l'85-90% del totale; essa è versatile, può avanzare in 'modo chiuso' ovvero con la camera piena di materiale condizionato e in pressione oppure in 'modo aperto' quando non c'è condizionamento e il materiale, finito nella parte bassa della camera, viene estratto dalla coclea.

Il materiale scavato è condizionato tramite schiume apposite nella camera dietro la testa dove bilancia la pressione geostatica del terreno e la pressione idrostatica (se sottofalda). Il materiale è poi estratto tramite una coclea che dovrebbe essere sempre piena per garantire il controllo delle pressioni e per minimizzare le forze di filtrazione; in altre parole deve fungere da tappo. Il controllo delle pressioni è fatto sui volumi di materiale, quello estratto deve essere uguale a quello scavato.

Aspetto fondamentale è il progetto del condizionamento in modo da garantire la giusta plasticità, bassa permeabilità e consistenza pastosa. Altro aspetto importante è il design della testa poiché il consumo degli utensili da scavo in questo tipo di macchine è alto, dunque i numerosi interventi per la loro sostituzione comportano lo stop della macchina e la perdita di produzione. In più la EPB presenta i 'limiti' già visti della single shield TBM come la discontinuità del processo.



Figura 4 - EPB-Shield TBM

Il principio della slurry shield TBM (Figura 5) è creare una porzione, di fronte la macchina, piena di fango bentonitico. Esso è pompato in pressione in una camera ed ha due funzioni: la stabilità del fronte e la rimozione del letame (fango più residui). Questa tecnologia ha avuto significativi sviluppi negli ultimi 50 anni tuttavia è meno conveniente di altri metodi per il difficile ed oneroso trattamento del fango, serve infatti un impianto di separazione apposito, la difficoltà di mantenere costante la pressione al fronte, i problemi legati alla fuga del fango bentonitico. Slurry TBM vengono impiegate per microtunnels oppure per gallerie con diametro uguale o maggiore di 17 metri perché il momento torcente richiesto alla testa di scavo è più piccolo in una slurry che in una EPB TBM.

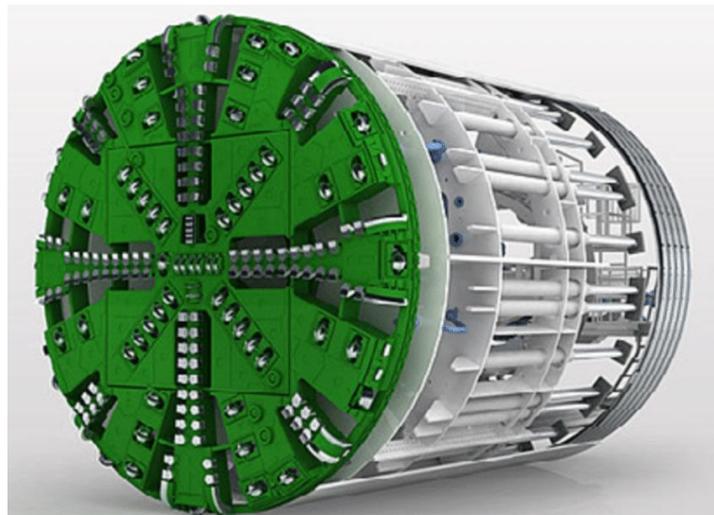


Figura 5 - Slurry Shield TBM

1.1 Scopo della tesi

L'operazione di scavo di una galleria tramite una TBM scudata e le iniezioni di backfilling sono strettamente legate. Il completo riempimento del gap anulare è un'operazione fondamentale perché ha influenza diretta sulla stabilità dei terreni o degli ammassi rocciosi. In caso di non corretto backfilling potrebbero esserci cedimenti superficiali o rottura del rivestimento per carichi puntuali o poiché esso non è ben fisso oppure convergenze in galleria o ancora venute d'acqua. Per evitare tutto ciò il progetto e l'esecuzione dello scavo della galleria e del backfilling devono viaggiare in parallelo. Requisito importante dell'iniezione di materiale è sostenere lo stato di tensioni nel terreno durante il processo di scavo.

1.2 Oggetto della tesi

L'uso della bicomponente per il riempimento del gap negli ultimi dieci anni è diventato sempre più popolare, tuttavia la ricerca e le normative non hanno tenuto il passo con il suo impiego. Oggi non ci sono specifiche che regolano la procedura nella produzione della bicomponente oppure le dosi nel mix design o i controlli qualità rendendo la ricerca un campo ampio e importante su cui investire. Si è proceduto adattando standard esistenti e utilizzando procedure basate sull'esperienza dei fornitori.

L'uso della bicomponente per backfilling conduce ad una serie di vantaggi rispetto ad altre tipologie di riempimento, il che giustifica per quale ragione negli ultimi anni il suo impiego nei cantieri è in crescita. Conoscere sempre più un prodotto con tale innovazione, assicurando un modo univoco di studiare e testare, è così importante per lo sviluppo di regolamenti e procedure attinenti.

Considerando ciò, l'oggetto della tesi è fornire un contributo alle conoscenze del comportamento meccanico di questo materiale, esaminando l'influenza di certi componenti nelle performance del prodotto finale. Gli esperimenti sono stati sviluppati nel laboratorio di gallerie e lavori in sotterraneo (TUSC) del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI). Come già detto, non essendoci una normativa apposita, i test sono basati su procedure empiriche ampiamente accettate dai fornitori, e in alcuni casi sugli standard di malte cementizie, con le corrispondenti considerazioni teoriche e pratiche.

1.3 Outline

Dopo una generale introduzione sulle macchine da scavo e sulle loro applicazioni, lo scopo e l'oggetto della tesi è stato presentato (Capitolo 1). Di seguito si entrerà nello specifico analizzando le varie tipologie di backfilling e le modalità di iniezioni (Capitolo 2) seguite da una attenta analisi sulla malta bicomponente (Capitolo 3) a partire da un focus chimico delle sue componenti. Si metteranno inoltre in evidenza i casi studio ove la bicomponente è stata usata attenționando i risultati (Capitolo 4). Le procedure utilizzate verranno illustrate così come i risultati ottenuti sui mix design studiati (Capitolo 5); infine si elencheranno le conclusioni del lavoro di tesi e verranno espote le raccomandazioni per i futuri sviluppi riguardanti le applicazioni con malta bicomponente.

2 Backfilling grouting

Il backfilling è il sistema utilizzato durante lo scavo di una galleria per mezzo di una TBM per riempire il vuoto creato durante l'avanzamento della macchina dovuto principalmente a due fattori: l'overcut ovvero il fatto che la macchina da scavo ha un diametro più grande rispetto a quello della coda e lo spazio tra il diametro esterno dello scudo della macchina e il diametro esterno del rivestimento. Se a questo si aggiunge che lo scudo non è perfettamente cilindrico ma presenta una certa conicità, il risultato è la formazione di un gap anulare funzione del diametro della galleria che deve essere riempito.

Gli scopi del backfilling sono: minimizzare i cedimenti, garantire il contatto tra il terreno/ammasso roccioso e rivestimento in modo da bloccarli immediatamente nella loro posizione, garantire che il rivestimento non si muova a causa dei carichi di back-up, garantire l'impermeabilità all'anello. A seconda delle condizioni al contorno alcuni aspetti saranno più rilevanti che altri; ad esempio scavando un terreno per costruire una galleria superficiale è prioritario minimizzare i cedimenti, al contrario durante uno scavo in un ammasso roccioso fratturato possono verificarsi distaccamenti in calotta che causino il blocco della TBM oppure, se il backfilling non è ben realizzato, generino la rottura del rivestimento (ITA-AITES, WTC 2018 Dubai).

2.1 Aspetti generali

Durante lo scavo con macchine scudate elementi prefabbricati sono installati per formare il rivestimento. Si crea un gap anulare dietro la coda dello scudo tra l'estradosso del rivestimento e il terreno circostante. Lo spessore del vuoto (Figura 6) è dovuto all'overcut, alla conicità dello scudo, allo spessore dello scudo e alla dimensione delle spazzole; il suo spessore varia da 13 a 18 centimetri a seconda del diametro della TBM.

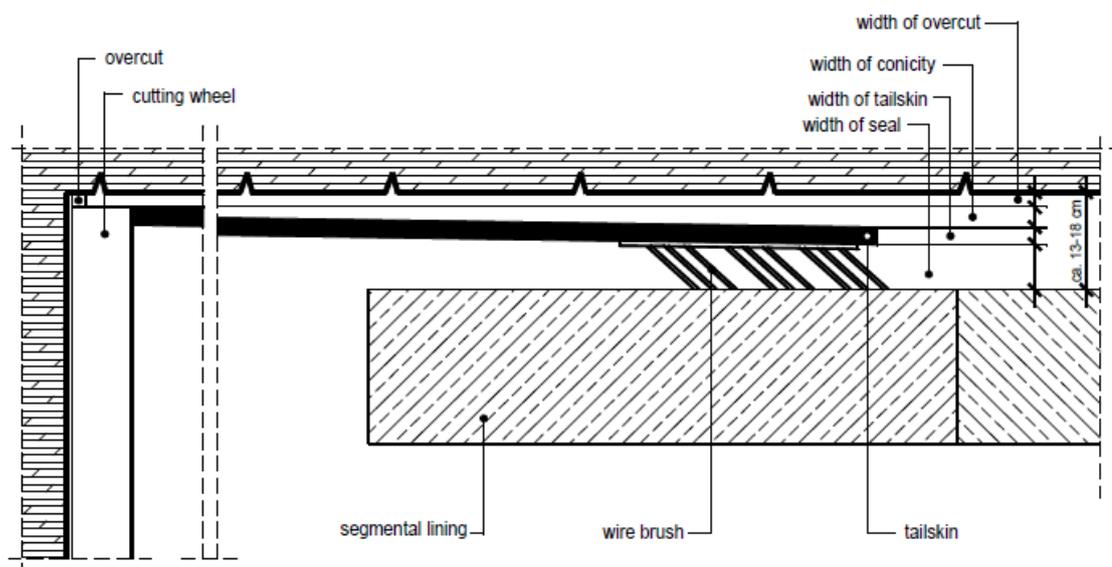


Figura 6 - Fattori che influenzano lo spessore del gap (Thewes and Budach, 2009)

In modo da minimizzare i cedimenti, garantire il contatto tra il terreno/ammasso roccioso e rivestimento in modo da bloccarli immediatamente nella loro posizione, garantire che il rivestimento non si muova a causa dei carichi di back-up e garantire l'impermeabilità all'anello, il gap deve essere riempito in modo continuativo. Durante l'avanzamento dello scavo il backfilling è necessario per trasmettere le tensioni dal tunnel al terreno circostante. Il materiale di riempimento dovrebbe avere allo stadio ultimo almeno le stesse proprietà del terreno che lo circonda (Thewes and Budach, 2009).

I principali obiettivi dell'operazione di backfilling sono:

- il completo riempimento del gap anulare in modo da generare un contatto uniforme tra il rivestimento e il terreno ed evitare carichi puntuali assicurando l'applicazione di carichi omogenei e simmetrici lungo l'anello;
- minimizzare i cedimenti superficiali sopra la galleria; se il gap che si crea non è correttamente riempito dopo il passaggio dello scudo il movimento del terreno causerà appunto spostamenti verticali in superficie;
- bloccare il rivestimento nella sua posizione, evitando il movimento dovuto al peso proprio;
- contribuire all'impermeabilizzazione dello scavo assieme ai gasket; se il rivestimento in calcestruzzo presenta delle crepe dovute all'installazione non corretta, il backfilling dovrebbe essere d'aiuto e mitigare le venute d'acqua in galleria;
- sostenere i carichi di back-up trasferiti della macchina al rivestimento ed evitare qualsiasi danneggiamento strutturale;

- inibire gli spostamenti dell'anello di calcestruzzo dovuto ai carichi esterni.

2.2 Modalità di iniezione

Le tecniche di riempimento prevedono due differenti modalità: da una parte il trasporto e l'inserimento del materiale attraverso i conci che formano il rivestimento, dall'altra l'utilizzo di linee di alimentazione e l'iniezione del materiale attraverso lo scudo (Thewes and Budach, 2009).

2.2.1 Riempimento tramite il rivestimento

I conci in calcestruzzo del rivestimento in fase di progetto devono essere equipaggiati con fori appositi da cui il materiale di riempimento colma il gap anulare (Figura 7). I fori devono avere un meccanismo di ritenuta come valvole di non ritorno o tappi che evitino il rientro in galleria del materiale di riempimento. Il numero dei fori dipende dalla deformazione plastica del materiale di riempimento, è solito avere un foro per concio. Dopo che i conci sono fissati, i tubi sono collegati ai fori in modo da colmare il gap. Il processo di riempimento dovrebbe partire non appena possibile per ridurre al minimo i cedimenti. Alcune spazzole metalliche alla fine dello scudo prevengono la penetrazione del materiale all'interno della macchina da scavo. Controllando la pressione di riempimento e quella della camera di scavo è impedito il contatto tra macchina e materiale. Una lamiera d'acciaio evita la penetrazione del materiale dentro la camera di scavo.

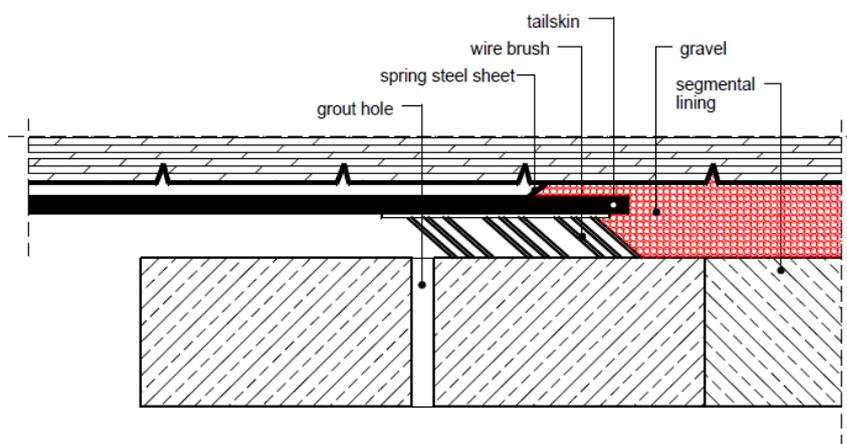


Figura 7 - Iniezioni tramite fori nel rivestimento

Se la corona della galleria presenta cavità più grandi dell'1% del diametro dello scudo esse sono il risultato dello slump del riempimento primario. Un secondo riempimento è allora necessario ed è effettuato tra 40 e 100 metri lontani dallo scudo alla fine del sistema di back-up della TBM (Maidl et. al, 1996). In caso di ghiaia come materiale di backfilling, è sempre necessario il riempimento secondario.

2.2.2 Iniezioni tramite la coda dello scudo

Nei terreni ‘teneri’ è necessario saturare i vuoti in maniera continuativa; per questa ragione è stata sviluppata la tecnologia di iniezione tramite la coda dello scudo (Figura 8). Usando questo metodo, il materiale è iniettato dentro il gap anulare attraverso una linea di alimentazione. Generalmente, la dimensione della linea di alimentazione varia da una sezione circolare con diametro di 65 millimetri a una sezione ovale con stessa area. La pressione di iniezione è scelta in base alla pressione alla faccia della macchina, al sovraccarico sulla corona e alla pressione dell’acqua; non c’è un valore standard accettato, il range è empirico e varia da caso a caso.

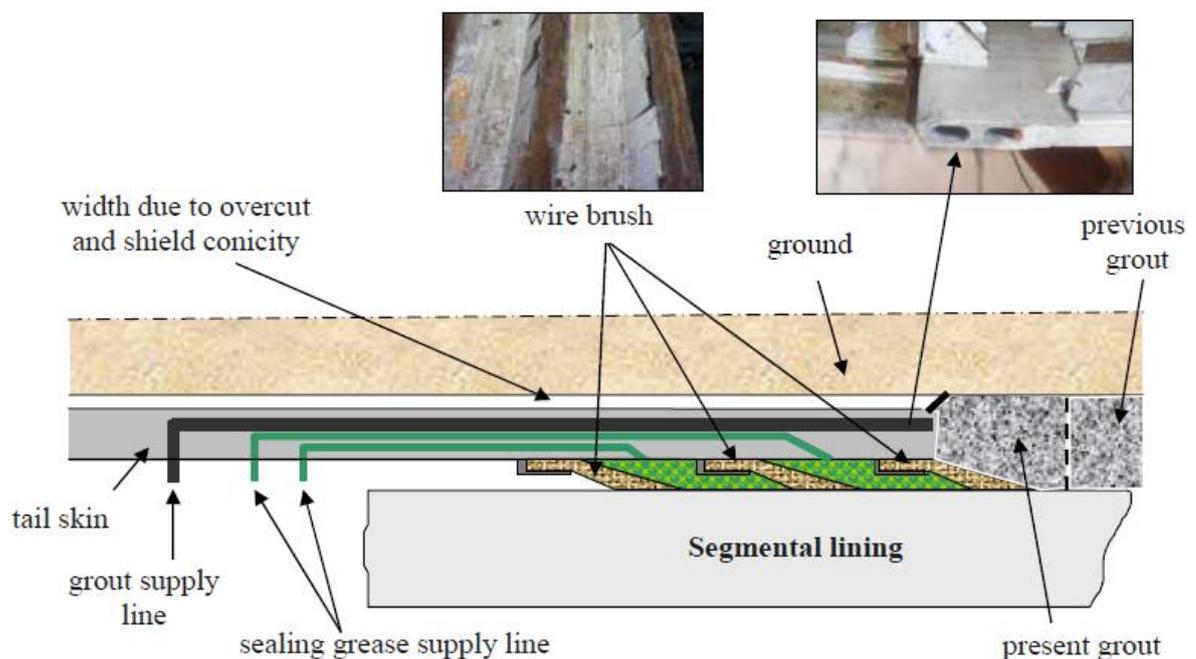


Figura 8 - Iniezioni tramite lo scudo

Probabilmente ogni compagnia di costruzione ha il proprio valore raccomandato ricavato dall’esperienza in progetti precedenti ma non c’è nella letteratura tecnica un valore teorico dato. La pressione dell’iniezione deve rispettare alcuni criteri (Peila, Borio, Pelizza 2011):

- deve essere uguale alla somma tra pressioni verticali del terreno e pressioni dell’acqua (per evitare cedimenti);
- deve essere più grande della pressione alla faccia dello scavo (per evitare che la malta scappi nello spazio tra lo scudo e il profilo di scavo).

Il numero di ‘grouting ports’ utilizzate dipende da una serie di fattori: il tipo di materiale di riempimento fornito, il diametro della macchina, la velocità della macchina, il tipo di terreno che si sta scavando. In una shield TBM con diametro inferiore a 10 metri in terreni ‘teneri’,

il backfilling con tecnica bicomponente, realizzata seguendo la corretta procedura di iniezione, viene usualmente adoperato con l'impiego di sole due porte. Questo è dovuto alla capacità della miscela fluida di girare attorno ai conci e di riempire completamente l'anello. Al contrario il backfilling con tecnica monocomponente richiede generalmente quattro porte per TBM con diametro tra 6 e 8 metri. La monocomponente infatti è meno fluida rispetto alla bicomponente, così per colmare il gap c'è bisogno di un maggior numero di 'grouting ports'.

La velocità di avanzamento della TBM gioca anch'essa un ruolo importante: più alta è la velocità maggiore sarà il materiale da iniettare, il che potrebbe dire aumentare il numero di linee oppure avere pompe più grandi. Ogni porta deve avere una pompa indipendente in modo da controllare meglio i volumi iniettati e prevenire l'intasamento delle linee.

Un altro fattore che influenza è la dimensione delle porte. Scavando nei terreni 'grouting ports' possono essere posizionati all'estradosso dello scudo e la dimensione non è un problema. In ammassi rocciosi le porte devono essere inglobate nella struttura dello scudo, ciò vuol dire che si tende a mantenere relativamente piccole le porte per non aumentare eccessivamente lo spessore dello scudo, aumentando così il gap anulare da colmare.

In aggiunta, quando si progetta il sistema di iniezione è importante avere un sistema di risciacquo in grado di evitare l'intasamento e assicurare facilità di pulizia. Porte con diametro più piccolo e velocità costante nelle linee di alimentazione prevengono l'intasamento riducendo la sostituzione dei tubi ostruiti. Questo vale sia per monocomponente che per bicomponente; nella seconda ipotesi per esempio è buona prassi riempire gli ultimi 10 centimetri con la sola componente A per assicurare che la fine dei tubi non si intasi a causa dell'accelerante (ITAtch, 2014).

Un esempio di sistema di iniezione è mostrato di seguito (Figura 9); si tratta di una EPB shield TBM con diametro di 12,48 m utilizzata a Brisbane, Australia. La componente B viene introdotta attraverso una pompa di iniezione che si trova a 1,45 metri dalla fine dello scudo. La miscelazione avviene su questa lunghezza prima di essere scaricata dalla porta di iniezione.

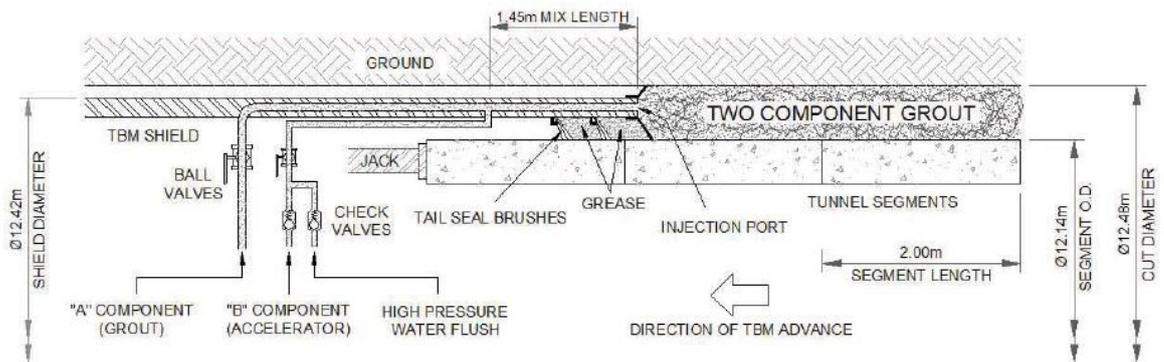


Figura 9 - Malta bicomponente iniettata trite lo scudo (Brisbane)

Lo scudo della TBM è dotato di un totale di otto porte di iniezione di cui due utilizzate come ricambi (Figura 10). Tuttavia, solo quattro sono utilizzate nelle operazioni di riempimento primario (A1, A2, A5 e A6) mentre la pompa A3 è utilizzata per iniezioni secondarie attraverso il rivestimento in calcestruzzo e la pompa A4 come ricambio di A3. La pompa A1 è utilizzata anche per pompare bentonite nella camera di scavo in caso di interruzioni prolungate del lavoro.

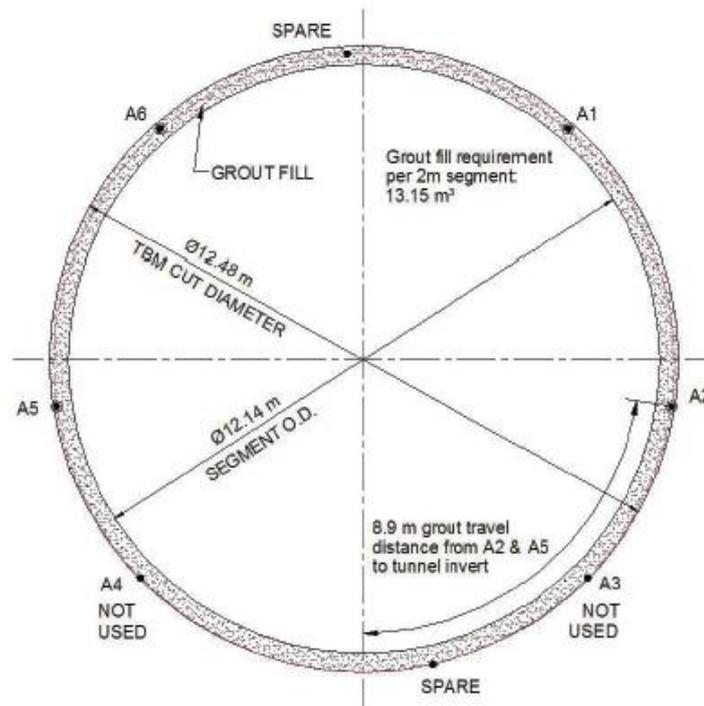


Figura 10 - 'Injection ports' (Brisbane)

Altro esempio è la EPB shield TBM di diametro di 10,22 m utilizzata a Pechino, China (Figura 11), in cui l'equipaggiamento per il sistema di bicomponente consta di cinque set di 'grouting ports' disposte in cinque posizioni lungo la circonferenza dello scudo (Figura 12).

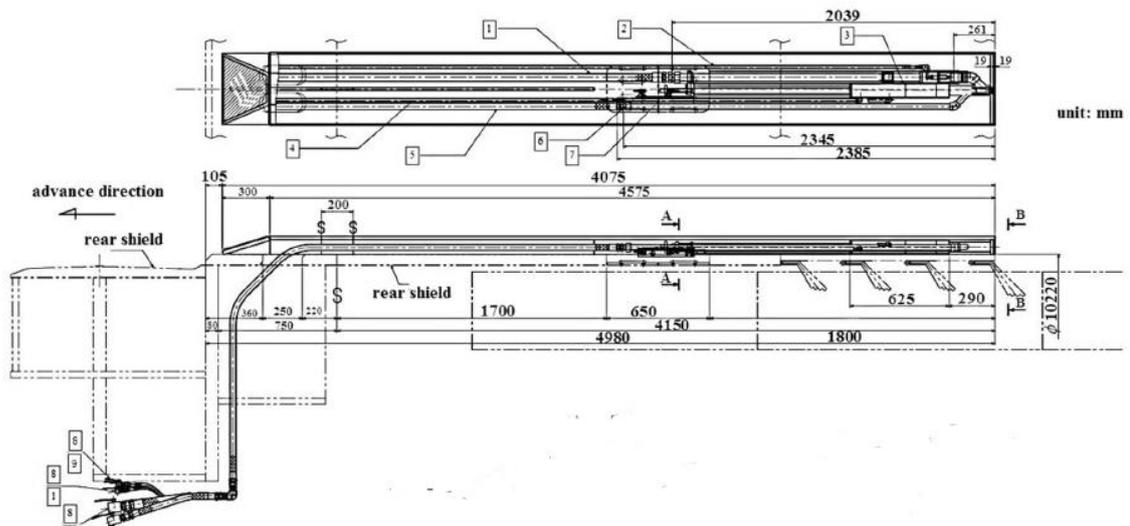


Figura 11 - Malta bicomponente iniettata trite lo scudo (Beijing)

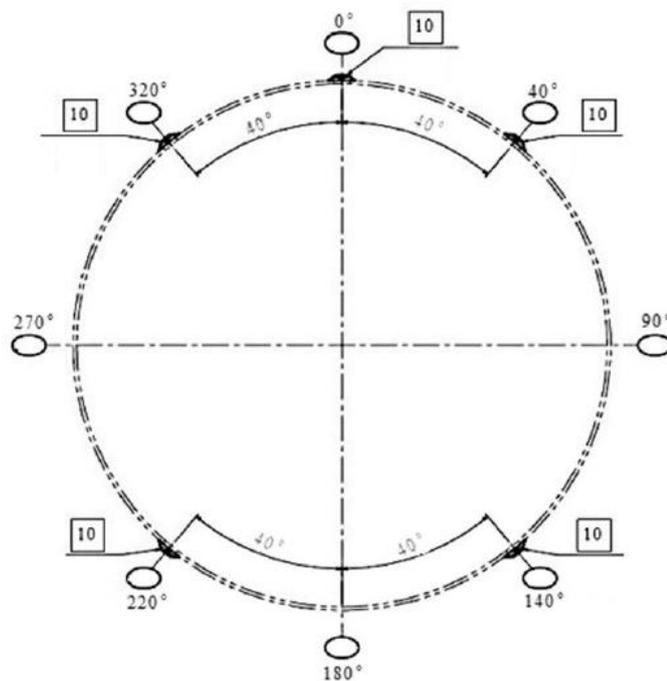


Figura 12 - 'Injection ports' (Beijing)

2.3 Specifiche del backfilling

L'equipaggiamento per miscelare influenza direttamente le proprietà e la qualità del prodotto finale. L'equipaggiamento di pompaggio usato per le iniezioni deve essere adatto alla tipologia di lavoro e pienamente in grado di incontrare le richieste del progetto. Più tipi di pompe esistono e non c'è una soluzione univoca migliore delle altre. Alcune delle più comuni sono la pompa a pistone e la pompa peristaltica. Il tipo, la dimensione e il numero varia da un progetto all'altro e dipende dalle dimensioni del lavoro stesso, dalle distanze tra

le pompe e da alcuni bisogni specifici di cantiere. È dunque impossibile stabilire delle specifiche standard in grado di incontrare le esigenze di tutte le applicazioni. Come regola generale, la capacità dell'impianto di miscelazione e dei serbatoi di stoccaggio dovrebbero essere sufficienti a riempire almeno un anello completo. Ove possibile l'equipaggiamento di miscelazione e di pompaggio dovrebbero corrispondere in capacità al tasso di avanzamento della TBM e al tasso di erezione del concio. La pressione alla quale il materiale è pompato e la pressione sviluppata dietro al rivestimento dovrebbe essere controllata e dovrebbe essere installato un interruttore automatico in grado di limitare le pressioni di picco. In aggiunta, dovrebbero essere controllati i volumi di materiale iniettato (EFNARC, 2005)

2.3.1 Miscelazione

L'impianto di miscelazione deve avere una capacità in grado di miscelare sufficiente materiale per ogni anello. Il tempo di miscelazione deve essere il più breve possibile tenendo però in conto i tempi minimi per il completo mix dei componenti. La miscelazione deve essere effettuata in un miscelatore ad azione forzata; a seconda del tipo di materiale da miscelare può essere utilizzato un mixer a basso taglio (paddle mixer) o ad alto taglio (colloidal mixer).

I tempi minimi di miscelazione devono essere determinati mediante prove su ampia scala sull'impianto di miscelazione e devono essere individuate le dosi corrette di materiali da utilizzare.

La disposizione dei paddle mixer deve essere tale che non esistano "zone morte" nel mixer stesso. Bisogna fare sempre riferimento alle istruzioni per l'uso e ai consigli per la manutenzione fornite dal produttore. Le tramogge di pesatura e le bilance devono essere calibrate come parte di un predeterminato schema di garanzia di qualità: registrazioni dettagliate della calibrazione devono essere conservate, anche in caso di errori rilevanti. La ricalibrazione deve essere effettuata almeno ogni mese o prima se i risultati di laboratorio indicano variazioni nella qualità del materiale.

I miscelatori colloidali sono in uso per le costruzioni civili dal 1937 e sono ampiamente riconosciuti come il più efficiente metodo di miscelazione di malte cementizie (Houlsby, 1990). Il mulino colloidale ospita un disco che gira a 2100 giri al minuto; è qui che si creano violente turbolenze capaci di abbattere i grappoli di particelle di cemento (Figura 13).

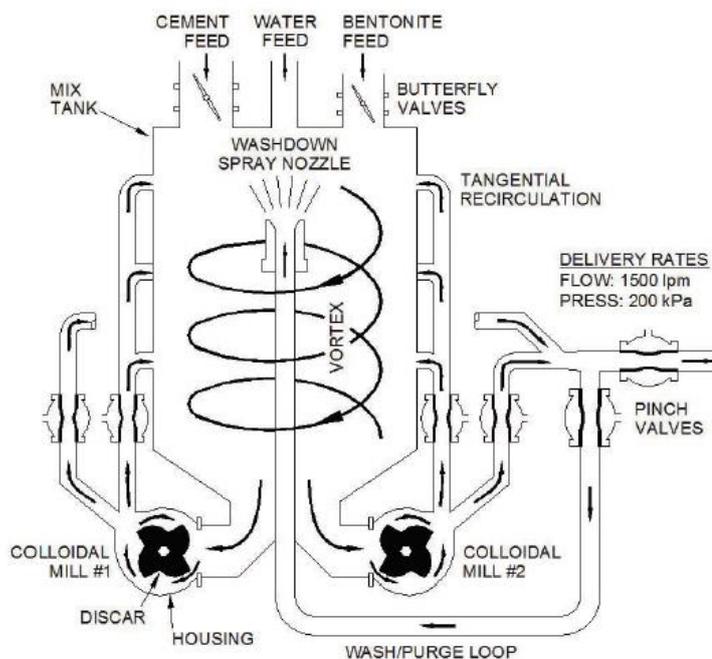


Figura 13 - Schema di un 'colloidal mixer'

Il miscelatore raffigurato ospita due di questi mulini con portata fino a 750 L / min per mulino. La forte azione del vortice all'interno del serbatoio assimila rapidamente gli ingredienti nell'acqua di miscelazione. La sospensione risultante mostra proprietà colloidali, cioè le particelle di cemento rimangono in sospensione con bleeding minimo. Il vantaggio pratico, rispetto ai miscelatori a pale, non si riduce solo al basso bleeding ma include l'aumento della resistenza. I test hanno dimostrato che la resistenza raddoppia rispetto alle stesse miscele preparate da paddle mixer. In definitiva c'è un potenziale risparmio di cemento e dunque di costi in quanto la ricetta è ottimizzata.

All'interno dell'impianto, il miscelatore colloidale ha in cima celle di carico e funziona quindi come sistema di pesatura. L'acqua viene prima pesata utilizzando un sistema di tubazioni ad alimentazione rapida seguito da un sistema di avanzamento lento per ottenere un'elevata precisione di pesata (deviazione standard <0,25% del peso target). L'acqua viene fatta circolare attraverso un ugello interno per pulire il mixer.

Lo stabilizzante viene quindi dosato tramite una pompa a diaframma e misurato da un flussometro con una deviazione standard inferiore allo 0,3 per cento del valore target. Le coclee di bentonite e cemento sono controllate tramite convertitori di frequenza per alimentare con precisione le quantità di materiale richieste tramite alimentazione rapida e lenta. I registri di dosaggio indicano una deviazione standard inferiore all'1,0 % dal peso target per l'alimentazione del cemento. La bentonite viene aggiunta e miscelata per circa 30 secondi prima di aggiungere il cemento. Questo è fatto per idratare la bentonite il più

possibile. Dopo l'aggiunta del cemento, la miscelazione continua per un ulteriore minuto dopo il quale il materiale viene trasferito automaticamente nei serbatoi di agitazione con capacità di 3,2 m³.

2.3.2 Dosaggio

L'operazione di dosaggio fatto nei mixer in superficie deve assicurare che il materiale che si sta miscelando sia proprio quello previsto dal mix design. Per raggiungere l'obiettivo, il peso della materia prima come cemento, bentonite, polveri, acqua e ritardante sono regolati da un pannello di controllo. Per ogni batch il mix effettivo miscelato è registrato per verificare appunto che sia in accordo con quello previsto dal mix di progetto concedendo comunque un grado di tolleranza.

Le polveri e gli ingredienti come cemento e bentonite devono avere un'accuratezza di $\pm 2\%$ rispetto ai materiali previsti dal mix design. L'acqua può essere pesata opportunamente oppure aggiunta tramite flussometri; in entrambi i casi l'accuratezza deve essere di $\pm 1\%$ rispetto alla quantità prevista dal mix di progetto. Per ciò che riguarda gli additivi si fa una differenziazione tra additivi liquidi e secchi. Gli additivi liquidi devono essere aggiunti per via di una pompa oppure tramite un serbatoio apposito per pesare liquidi; la precisione deve essere di $\pm 5\%$ rispetto alla misura attesa dalla miscela di progetto. Gli additivi secchi invece devono essere aggiunti tramite una specifica tramoggia, anche questa volta la precisione deve essere dell'ordine di $\pm 5\%$. Ogni additivo deve essere erogato attraverso il proprio equipaggiamento di dosaggio ed essere aggiunto all'acqua durante la fase di miscelazione. Le tramogge di pesatura, i flussometri e gli altri strumenti devono essere calibrati come parte di uno schema che ne garantisca la qualità. RegISTRAZIONI di calibrazione devono essere fatte e ricalibrazioni devono essere ripetute almeno una volta al mese o più spesso se i risultati di laboratorio indicano variazioni nella qualità della malta.

2.3.3 Pompaggio

Per riempire il gap anulare creatosi durante lo scavo differenti tipologie di pompe possono essere utilizzate allo scopo di trasportare le possibili malte dalla superficie alla TBM in prossimità alla coda dello scudo (Thewes and Budach, 2009).

La pompa a pistone (Figura 14) è una delle più comuni pompe per colmare il gap tra il rivestimento e il terreno. Il funzionamento è molto semplice: la pompa spinge il materiale attraverso una linea di alimentazione e la malta viene così convogliata. Il volume di malta iniettata è misurato dal ritmo del pistone. Esistono pompe a singolo o a doppio pistone; per

le applicazioni di tunnelling vengono generalmente utilizzate le pompe a doppio pistone per il loro design compatto. Ogni pistone colma una sola linea di alimentazione di malta.



Figura 14 Pompa a doppio pistone con linea di alimentazione di malta

Un'altra possibilità è la pompa peristaltica (Figura 15), la cui componente principale è un tubo flessibile montato all'interno di una pompa circolare. La pompa conduce il materiale all'interno del tubo provocando un vuoto nel tubo stesso sotto la simultanea spinta del materiale che si trova avanti e dalla rotazione dei rulli sul tubo. Grazie a questo processo la pompa è detta peristaltica. Generalmente la linea di alimentazione della malta si trovano nella parte inferiore della pompa mentre l'uscita del materiale è prevista nella parte superiore. Le pompe peristaltiche sono generalmente usate per trasportare fluidi poiché essi le degradano meno. Sono state usate per pompare calcestruzzo da iniettare nel luogo di installazione oppure per trasportare la componente A di una malta bicomponente senza alcun aggregato. Generalmente con malte queste pompe non sono considerate le migliori sia per ragioni economiche che pratiche a causa della maggiore usura e del maggior tempo di manutenzione rispetto alle pompe a pistone.



Figura 15 - Pompa peristaltica

La pompa a cavità progressiva (Figura 16) contiene una spirale orizzontale all'interno di un tubo per trasportare il materiale per l'attrito della lama a spirale. Tra l'interno del tubo e l'esterno della lama a spirale c'è poco spazio. Usando una cavità progressiva si può pompare un flusso continuo di materiale, essa può essere utilizzata con una malta. Normalmente le pompe a cavità progressiva sono utilizzate per progetti di tunneling solo per il trasporto di malta bicomponente. Proprio come per le pompe peristaltiche, il trasporto della malta non è economico e non pratico a causa dell'usura e dell'ampio tempo necessario per la manutenzione.



Figura 16 - Pompa a cavità progressiva

Si può infine utilizzare aria pressurizzata per scavi in roccia che prevedono il backfilling tramite ghiaia; il gap viene colmato attraverso i fori fatti nel rivestimento utilizzando aria compressa. Sono necessari potenti compressori per garantire la diffusione del materiale e per colmare il divario.

Dopo che l'impianto che si trova in superficie è sincronizzato con l'impianto sulla TBM e quando entrambi i pannelli di controllo sono connessi, in modalità automatica le malte sono pompate e trasferite dalla superficie ai serbatoi di allestimento della macchina fino al raggiungimento della soglia superiore del serbatoio stesso. Le pompe di superficie possono anche funzionare manualmente tramite il pannello di controllo di superficie.

Tornando all'esempio di Brisbane è stata utilizzata una pompa peristaltica da 100 mm, con una pressione di 25 bar per trasferisce la componente A al serbatoio di raccolta di capacità di 15 m³ presente sulla TBM. L'uscita massima è di 26,4 m³/h che equivale a una velocità di 0,93 m/s. In base all'esperienza del personale del sito, questa velocità dovrebbe essere sufficiente a mantenere le particelle di cemento in sospensione e prevenire la sedimentazione e l'accumulo nella linea di alimentazione. Tuttavia, del grasso viene pompato almeno una volta al giorno per garantire la perfetta funzionalità della linea stessa.

Una pompa peristaltica simile da 42 mm trasferisce la componente B in un serbatoio di raccolta di 5 m³. La portata massima della pompa è di 2,3 m³/h (a 5 bar).

Le pressioni di pompaggio per entrambe le linee sono monitorate dal programma PLC (*Programmable Logic Controller*) dell'impianto e regolate automaticamente in risposta a pressioni elevate. La comunicazione tra gli impianti di superficie e l'operatore sulla TBM è ottenuta tramite la rete di fibre ottiche del sito. Un pannello di controllo nella TBM (Figura 17) consente all'operatore di controllare manualmente le pompe di trasferimento di superficie o di mantenere automaticamente pieno il serbatoio di raccolta.

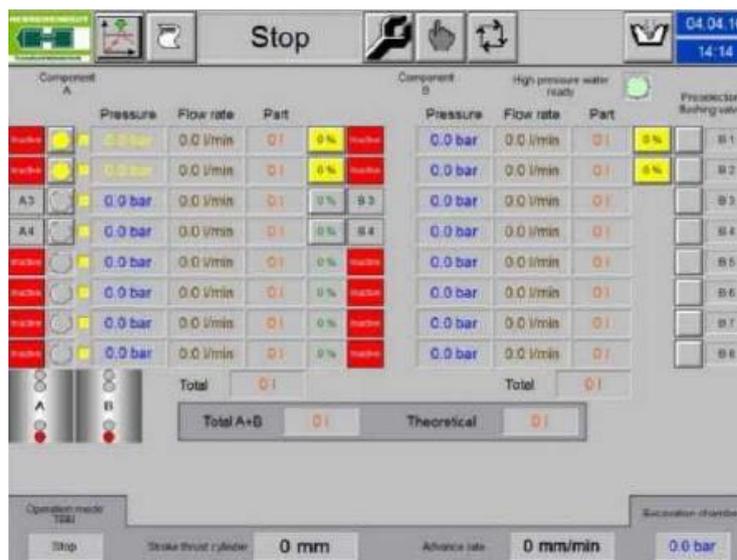


Figura 17 – Pannello di controllo

2.4 I materiali

Finora si è parlato di quali obiettivi persegue il backfilling e di tutte le specifiche che ne consentono la realizzazione. Ora ci si concentra sulle diverse soluzioni in termini di materiali che possono essere usati per eseguire il backfilling.

2.4.1 Le tipologie

Differenti tipologie di materiali possono essere utilizzate per minimizzare i cedimenti, garantire il contatto tra il terreno/ammasso roccioso e rivestimento in modo da bloccarli immediatamente nella loro posizione, garantire che il rivestimento non si muova a causa dei carichi di back-up, garantire l'impermeabilità all'anello. Tipicamente le malte monocomponenti e bicomponenti sono largamente utilizzate per le operazioni di riempimento del gap. Oppure in caso di macchine scudate per scavi in roccia dura il divario anulare può essere colmato con la tecnica del 'pea gravel' oppure tramite un mix di inerti al

posto di iniettare malta. Queste diverse tecnologie sono descritte di seguito (Thewes and Budach, 2009).

2.4.1.1 Mix inerti

La miscela di inerti è composta principalmente da sabbia opportunamente trattata e da altri costituenti, come filler, cenere; in generale questa soluzione è più economica rispetto all'uso di malte. L'assenza di cemento evita il rischio di intasamento dei tubi dovuti alla prematura maturazione. La sabbia deve essere correttamente selezionata, vagliata e miscelata: le anomalie dovute alle dimensioni o al tipo di grano aumentano in modo significativo la possibilità di un riempimento irregolare ed eterogeneo, aumentando anche le possibilità di intasare le linee di alimentazione. Poiché la sabbia non può essere pompata facilmente, è necessario iniettare dietro lo scudo attraverso i conci. Tipicamente questo viene effettuato attraverso 1 o 2 fori nel rivestimento opportunamente progettati per lo scopo. Questo ha un effetto negativo nei confronti dell'impermeabilizzazione poiché aumentano i punti di debolezza nel rivestimento. Inoltre, l'impostazione dei conci è molto ritardata e la resistenza finale è molto bassa (Pelizza et al., 2010).

Il processo di controllo di materiali come le malte nelle fasi di produzione, iniezioni e di indurimento è davvero complesso per questa ragione quando è possibile rinunciare a mix cementizi in favore di prodotti con presa posticipata (reazione pozzolanica) lo si fa volentieri.

2.4.1.2 Pea gravel

In uno scavo in ammasso roccioso è possibile usare un semplice mix di sabbia e ghiaia, detto ghiaietto o 'pea gravel', per riempire il vuoto anulare. Quando si usano macchine scudate in ammassi duri con pressione nulla sulla faccia di scavo combinata al backfilling, la penetrazione della malta nella camera di scavo potrebbe verificarsi e causare danni. L'area della corona del vuoto anulare inoltre è difficile da riempire, il blocco immediato dei conci è raggiunto solo parzialmente. Pertanto, il gap anulare in scavi in ammassi rocciosi è di solito riempito prima iniettando malta nella parte bassa per prevenire cedimenti del sistema, poi iniettando il ghiaietto tramite i fori nel rivestimento solo dopo che la macchina da scavo è già passata. La procedura richiede ghiaia vagliata e lavata con un diametro compreso tra 8 e 12 mm (rotta o arrotondata). La ghiaia non dovrebbe presentare fine per minimizzare l'intasamento. È importante a notare che in scavi in ammasso roccioso altamente fratturato con un alto afflusso d'acqua nel gap anulare potrebbe servire uno strato che funga da

drenaggio, dove l'acqua viene raccolta e scorre via verso la camera di scavo della macchina scudata. In questi casi può essere realizzata un anello completo di ghiaietto con resina anti-acqua introdotta dall'interno dei segmenti del rivestimento (Thewes e Budach, 2009).

2.4.1.3 Malta monocomponente

Dall'inizio dello sviluppo delle macchine scudate l'uso delle malte a base di cemento è stata la tecnologia più utilizzata in Europa per le applicazioni di backfilling. Tra i mix possibili il primo esperimento nel passato è stato un mix di acqua e cemento poi superato con l'uso di una malta cementizia contenente sabbia. Si è arrivati dopodiché ad una malta contenente cemento, acqua e bentonite (più additivi e/o aggregati). Le performance richieste alla malta monocomponente sono:

- lavorabilità, superiore a 72 ore poiché la malta è generalmente prodotta nell'impianto di miscelazione in superficie poi pompato dentro il tunnel e depositata in serbatoi;
- impermeabilizzazione nei confronti delle venute d'acqua;
- capacità di essere pompata;
- stabilità del mix, evitando la segregazione e il bleeding;
- basso restringimento ovvero riduzione di volume durante l'indurimento;
- buona resistenza a compressione e a taglio.

La malta, come detto, dovrebbe avere in primo luogo un'eccellente capacità di essere pompata in modo da ridurre il rischio di intasamento delle linee di alimentazione. Allo stesso tempo dovrebbe fin da subito raggiungere una rigidità tale da assicurare il blocco immediato dell'anello. La richiesta di rigidità e la richiesta di buona plasticità nei primi istanti in cui la malta è iniettata contrastano tra di loro; una malta con ottime caratteristiche in termini di rigidità a volte ha non buone proprietà di essere pompata e viceversa. La rigidità della malta deve essere controllata in modo tale che sia possibile riprendere lo scavo dopo un'interruzione. Le caratteristiche che deve avere una malta per riempire il gap tra terreno e rivestimento in termini di lavorabilità, resistenza a compressione e modulo elastico sono riportate di seguito (Tabella 1)

Tabella 1 Caratteristiche richieste alla malta per colmare il gap anulare

Workability	Spread diameter (t = 0 h): 15 cm ± 5 cm Flow diameter (t = 0 h): 20 cm ± 5 cm Flow diameter (t = 8 h): 15 cm ± 5 cm (Flow table test: DIN 18555, T2, 3.2.1.1 and 3.2.1.2; ASTM C124)
Compression strength	Compression strength (24 h): small, but measurable sometimes: 0,5 N/mm ²
Stiffness modulus	Similar to a soil that is suitable for tunnelling with segment linings (e.g. 5 – 10 MN/m ²)

Le proprietà della malta sono governate dalla componente cementizia. È possibile dividere le malte in attive, semi-attive e inerti. Nei sistemi inerti il cemento è assente, nei sistemi semi-attivi la quantità di cemento varia tra 50 e 200 kg/m³, nei sistemi attivi il cemento è oltre i 200 kg/m³ e ciò consente al legante di sviluppare una completa idratazione.

2.4.1.4 Malta bicomponente

La miscela bicomponente, come dice lo stesso nome, è costituita da due componenti: una malta superfluida (componente A), in genere composta da cemento, acqua, bentonite e ritardante, stabilizzata al fine di garantire la sua lavorabilità per un tempo abbastanza lungo per le operazioni di dosaggio, trasporto e iniezione; un accelerante (componente B) aggiunto alla malta pochi centimetri prima del gap anulare.

Il mix gelifica alcuni secondi dopo l'aggiunta dell'accelerante, di norma 8-12 secondi durante i quali la TBM avanza di circa 10-15 mm, il gel presenta una consistenza tixotropica ed inizia a sviluppare istantaneamente la resistenza meccanica, in genere raggiunge 50 kPa a 1 ora sufficiente a garantire che l'anello non si muova.

La malta bicomponente viene iniettata sotto pressione per tutto il tempo ed è in grado di penetrare in qualsiasi vuoto presente nel gap anulare; può, inoltre, penetrare nel terreno circostante a seconda della sua permeabilità.

L'agente ritardante ha un effetto plastificante in grado di inibire l'indurimento del mix in tal modo garantendo la sua lavorabilità fino a 72 ore dopo il dosaggio: questo agevola l'accumulo di materiale all'interno dei serbatoi ragion per cui il loro volume deve essere più grande rispetto al volume teorico di materiale da iniettare per ogni anello. Questo è fondamentale per evitare uno dei più comuni errori, ovvero il dosaggio e lo stoccaggio del solo importo teorico e non di più. Se alla fine si scopre un vuoto più grande deve essere colmato, altrimenti si lascerebbe la corona non supportata per troppo tempo portando a conseguenze potenzialmente gravi.

L'aggiunta del componente B alla malta fluida conduce alla formazione quasi immediata di un gel che inizia a sviluppare resistenza meccaniche. Tale gel è omogeneo e quindi evita carichi puntuali in grado di portare a rottura il rivestimento in calcestruzzo armato.

I costituenti della bicomponente provengono da un processo industriale e devono quindi essere perfettamente controllati, garantendo la regolarità delle componenti stesse con evidenti vantaggi nella qualità delle miscele sia fresche che indurite. Nessun componente dovrebbe mostrare caratteristiche variabile (come ad esempio la sabbia) (Pelizza et al., 2010).

Utilizzando un mix design appropriato e attrezzature appositamente progettate, i rischi di intasamento delle linee di alimentazione possono essere ridotti al minimo. Alcuni problemi potrebbero riguardare l'ugello della linea dell'accelerante: questo può essere normalmente attribuito ad una pulizia impropria oppure semplice usura del meccanismo di iniezione.

La bentonite aumenta significativamente l'omogeneità e l'impermeabilità della miscela indurita. Inoltre, riduce al minimo la separazione dei componenti, aiuta, quando il flusso si ferma perché il gap è stato colmato, a raggiungere la consistenza tixotropica e partecipa nel processo di gelificazione, conferendo maggiore impermeabilità al sistema (in genere meno di 8-10 m/s).

Sono stati analizzati le modalità di iniezione, i diversi metodi di miscelazione, dosaggio e pompaggio, le varie tipologie di malte utilizzabili nelle applicazioni di riempimento del gap. Di seguito si riassumono i risultati combinandoli con i range di applicazione (Tabella 2).

Tabella 2 - Panoramica utilizzo del backfilling (Thewes and Budach, 2009)

Material	Application range		Backfilling system		Required Equipment				Specifics / remarks
	Hard rock	Soil	Grouting through grout holes in the lining segments	Grouting through the tailskin	Piston pump	Peristaltic pump	Progressive cavity pump	Pressurised air	
Mortar – active system	x	x	x	x	x				Conventional mortar, stiffness behaviour depends on using of additives
Mortar – reduced active system	x	x		x	x				Stiffness behaviour depends on using of additives
Mortar – inert system		x		x	x				Stiffness behaviour depends on using of additives
Two-component grout		x	x	x		(x)	x		Stiffness behaviour just after mixing
Deforming mortar	x		x	x			x		Only usable in hard rock (material under development)
Pea Gravel	x		x					x	Often used in hard rock, increasing of bedding by using mortar at the bottom, normally lower modulus of deformation and lower properties of embedment than for an active mortar

2.4.2 Differenze tra mono e bicomponente

Si riporta di seguito un grafico che scansiona punto per punto i vantaggi e gli svantaggi tra una malta monocomponente e bicomponente (Tabella 3).

Tabella 3 - Tipi di malte: vantaggi e svantaggi (ITAttech, 2014)

GROUT TYPE ADVANTAGES CHART		
CONSIDERATION	SINGLE COMPONENT	TWO-COMPONENT
Strength	X	
Cost	X	
Transportation		X
Groundwater		X
Early Set Time		X
Early Support		X
Fluidity		X
Batching		X
Maintenance		X

La resistenza della malta dipende dal mix design e dal tempo che la malta ha per indurire. La malta monocomponente deve essere progettata con alta resistenza a causa delle proprietà della miscela. La malta bicomponente non deve raggiungere alte resistenze come le malte monocomponente grazie alla mancanza di aggregati nella miscela. Sia le malte mono che bicomponenti devono essere miscelate e testate per il terreno o ammasso roccioso specifico per garantire la miscela ottimale. Il principio guida per il contraente deve essere quello che la malta raggiunga la resistenza sufficiente a sostenere il rivestimento del tunnel quando l'ultimo anello installato esce dalla coda della macchina. Inoltre, la resistenza dovrebbe essere sufficiente per supportare i carichi imposti dal backup della TBM.

Il contraente nella scelta se utilizzare una malta monocomponente o bicomponente pone attenzione ai costi. La malta monocomponente ha un costo più basso nella maggior parte dei mercati mondiali a parità di volumi. Se si guarda invece al costo complessivo ovvero prendendo in considerazione anche la quantità di miscela perduta nel corso delle varie operazioni allora il costo di una malta monocomponente non è detto che sia inferiore a quello di una malta bicomponente. La scelta della metodologia di iniezione è influenzata notevolmente anche dal costo dei fori, poiché più grande è il gap più costa la malta. L'iniezione attraverso i conci non aumenta il diametro del foro, rendendo il metodo più conveniente economicamente. Tuttavia, questo metodo aumenta il rischio di cedimenti

durante le operazioni di avanzamento al fronte di scavo, principalmente perché l'iniezione non può iniziare prima che la coda dello scudo abbia superato l'ultimo anello del rivestimento, lasciando il vuoto esposto. Questo può essere minimizzato avendo più fori di iniezione in ogni concio. Viceversa, iniettando attraverso la coda dello scudo all'aumentare del gap anulare il foro di iniezione sarà più grande, ma con questo metodo si minimizzano i cedimenti. Nella scelta della metodologia l'aumento del costo dovuto ad un diametro del foro di iniezione più grande (e quindi un maggior volume) deve essere rapportato con l'aumento del rischio di cedimenti.

Il trasporto e i tempi di trasporto della miscela giocano un ruolo importante in tutte le fasi di realizzazione del tunnel. Mentre la malta monocomponente è più comunemente portata nel tunnel attraverso betoniere, la malta bicomponente può essere pompata dall'impianto di superficie fino all'interno del tunnel. A seconda dei metodi di costruzione un metodo di trasporto può essere preferito all'altro perciò per la sua scelta è richiesto uno studio completo della profondità del tunnel, lunghezza, dimensioni e altri fattori.

Nelle gallerie sotto la falda acquifera l'acqua sotterranea interagirà con la malta iniettata in diversi modi. Un problema che è associato alle iniezioni sottofalda freatica è la possibile miscelazione dell'acqua di falda con la malta diluendo la malta stessa. Questo costituisce un problema più per la malta monocomponente che per la bicomponente poiché essa gelifica istantaneamente e ha bassa permeabilità. Alcuni agenti anti-washing possono essere aggiunti alla malta monocomponente per ovviare al problema.

La resistenza immediata della malta può svolgere un ruolo importante nella capacità di resistenza del rivestimento. L'abilità del materiale di backfilling di resistere ai carichi è importante, e questo non è dovuto solo ai carichi del terreno. È importante resistere alle forze dovute al peso del rivestimento stesso e alle sollecitazioni generate dallo spingere in avanti la macchina o spostare gli ingranaggi posteriori, ovvero i carichi di back-up, verso gli anelli appena eretti. Una pressione ben distribuita sul supporto e la capacità di bloccare l'anello in posizione il più presto possibile sono auspicabili. Questa configurazione può aiutare a ridurre i costi di manutenzione e gli interventi di riparazione sull'intera costruzione del tunnel. L'utilizzo di malta bicomponente grazie al tempo di presa rapida consentono di minimizzare i cedimenti del terreno e, in condizioni di grandi tensioni, ridurre la convergenza del terreno. La resistenza 'al tempo zero' gioca un ruolo rilevante nella capacità dei conci del rivestimento di evitare movimenti e problemi tra gli anelli a causa della creazione di un passo tra di loro. Più veloci sono le operazioni in questo senso, maggiori sono le probabilità che la

deformazione dell'anello non si verifichi. La malta monocomponente ha un tempo di presa più lento considerando la capacità di idratarsi del cemento rispetto alla bicomponente. Inoltre, la malta bicomponente ha un valore più alto di resistenza iniziale dovuto all'aggiunta dell'accelerante.

La fluidità della malta è un altro aspetto importante da tenere in considerazione nella scelta della giusta tecnologia. Essa ha un ruolo nel trasporto e posizionamento finale della malta tra i conci e il terreno. Più grande è la fluidità della malta, più è facile da trasportare e da iniettare intorno alla struttura ad anello. La malta monocomponente, avendo una consistenza pastosa, è molto più difficile da trasportare e pompare rispetto alla malta bicomponente che invece presenta un'elevatissima fluidità di entrambe le componenti, sia A che B.

La logistica e le proprietà della malta che si vuole ottenere possono influenzare il processo di miscelazione e dosaggio. La capacità di miscelare e dosare in modo rapido e uniforme la maggior quantità di mix è essenziale per progetti di grandi dimensioni per assicurare costruzione rapida e risparmio economico. In questo senso è più facile ottenere risultati favorevoli utilizzando malte bicomponenti anche se è possibile ottenere analisi positive con malta monocomponente, ma questo dipende dall'esperienza dell'appaltatore e implementazione di un efficace sistema di dosaggio. Entrambi i tipi di la malta sono abbastanza facili da miscelare e le operazioni sono eseguite tramite impianti di malte automatizzati e con attrezzature di dimensioni contenute.

La malta bicomponente rimane fluida e pompabile fino all'ugello di miscelazione a pochi centimetri dal gap da riempire. Invece, la malta monocomponente può rimanere nelle linee di alimentazioni per un tempo prolungato ed intasarle richiedendo la sostituzione delle linee stesse e fermando così la macchina.

In definitiva la malta bicomponente porta ad una serie di vantaggi irrinunciabili ragion per cui oggi ha completamente superato la malta monocomponente:

- riduce la quantità di spostamenti verticali (*Fortebracci et al, 2001*) ed è utilizzata con successo per controllare i cedimenti quando il tunnel attraversa terreni difficili in luoghi sensibili (*Battye, 2010*);
- le malte convenzionali richiedono pompe ad alta pressione che possono avere un effetto nocivo sulla geologia circostante mentre le bicomponenti sono molto fluide e facilmente pompabili su lunghe distanze. A causa della ridotta viscosità della bicomponente, possono penetrare più efficacemente nel gap creatosi tra anello e

terreno, con meno energia, riducendo lo sforzo sui rivestimenti in calcestruzzo (*Robinson e Bragard, 2007*);

- l'uso di un ritardante e/o di uno stabilizzante può prolungare la durata di conservazione della componente A per più giorni, conducendo a meno intasamenti nelle linee e meno malta sprecata dovuto alle interruzioni e/o ai ritardi imprevisti;
- la resistenza iniziale della bicomponente stabilizza il terreno e sostiene il rivestimento quasi immediatamente. Con alcune malte monocomponenti, il tempo di indurimento può essere così alto che il rivestimento del tunnel può spostarlo o distorcerlo (*Robinson e Bragard, 2007*);
- La malta bicomponente ha bassa permeabilità, resiste all'azione dilavante dell'acqua ed è molto efficace nella sigillatura contro l'acqua presente nel sottosuolo.

3 La malta bicomponente

Si approfondisce in questo capitolo la malta bicomponente a cominciare dalla sua composizione, analizzando i singoli materiali, per concludere discutendo delle sue prestazioni.

3.1 I materiali costituenti

3.1.1 Il cemento

Si parte dal presupposto che qualsiasi tipo di cemento può essere utilizzato per scopi di iniezione. Anche cementi grossolani ovvero con particelle di dimensioni relativamente grandi, possono essere usati ma solo per colmare gap importanti. Due importanti parametri regolano la capacità di essere pompato del cemento: la dimensione delle particelle e loro distribuzione. La dimensione media delle particelle può essere espressa come la superficie specifica di tutte le particelle di cemento in una data quantità. Più fine è la macinazione, maggiore è la superficie specifica, espressa dal valore di Blaine (m^2/kg). Per un dato valore di Blaine, la distribuzione delle particelle può variare e il fattore che gioca il ruolo chiave è la dimensione massima delle particelle. Si fa dunque riferimento al d_{95} ovvero la dimensione del setaccio che consente al 95% delle particelle di cemento di passare attraverso il setaccio stesso (e viceversa, il restante 5% delle particelle è più grande di questa dimensione e non passerà il setaccio). La dimensione massima delle particelle deve essere contenuta, per evitare il blocco prematuro di aperture piccole, causate dal blocco delle particelle più grossolane e la creazione di filtri in spazi ristretti (Garshol, 2003). Di seguito si riportano differenti tipologie di cemento forniti dalla maggior parte dei produttori, senza speciali requisiti richiesti al cemento (Tabella 3.1).

Tabella 4 - Presenza di fine nei tipi di cemento con dimensione particella tra 40 e 150 mm (Garshol, 2003)

Cement type/Specific surface	Blaine(m^2/kg)
Low heat cement for massive structures	250
Standard Portland cement (CEM 42.5)	300-350
Rapid hardening Portland cement (CEM 52.5)	400-450
Extra fine rapid hardening cement (limited availability)	550

I cementi con il valore Blaine più alto saranno normalmente i più costosi, a causa di una più fine macinazione. È fornito un esempio di distribuzione delle dimensioni delle particelle di cemento comunemente usato per le operazioni di iniezione a pressione, valido dunque per il

backfilling (Tabella 5). Si nota che le cifre ottenute sono solo delle indicazioni, poiché la tabella si basa su singole misurazioni su specifici campioni di cemento.

Tabella 5 - Dimensioni particelle dei più frequenti cementi da iniezione (Garshol, 2003)

Percent passing				
μm	Norwegian rapid hardening (RP38)	Spinor A12 Ciments d'Origny	W650 Blue Circle	Swedish Injection cement Degerhamn
1	7.0	12.9	10.1	12.6
3	22.0	59.0	31.2	30.4
5	32.0	82.5	45.2	40.5
10	50.7	98.3	68.8	55.4
15	65.6	100.0	86.5	66.6
20	76.9		95.5	73.8
25	86.3		99.1	80.9
32	95.6		100.0	90.4
40	99.6			97.1
50	100.0			99.8
	μm			
90%<	27.3	6.4	16.6	31.6
10%<	1.3	0.5	1.0	0.9
Average particle size	9.8	2.5	5.9	7.9

Dal punto di vista dell'iniezione, questi cementi avranno le seguenti proprietà di base:

- Un cemento altamente macinato con piccole dimensioni di particelle, si legherà di più con l'acqua rispetto ad un cemento grossolano. Il rischio di bleeding (separazione dell'acqua delle particelle) in una sospensione fatta da un cemento più fine è quindi più in basso e un gap colmato con un cemento più fine rimarrà completamente riempita.
- I cementi più fini hanno un'idratazione più rapida e una maggiore resistenza finale. Questo normalmente è un vantaggio, ma causa anche lo svantaggio di un minor tempo di apertura nell'attrezzatura di iniezione. Le alte temperature aumenteranno i problemi potenziali di intasamento di linee e valvole. La miscelazione intensiva richiesta per i cementi, deve essere strettamente controllata, per evitare lo sviluppo

di calore causato dall'attrito nel mixer ad alto taglio, e quindi anche un indurimento più veloce.

I cementi più fini penetreranno più facilmente in crepe fini e aperture piccole. Questo vantaggio sarà realizzato solo a condizione che il processo di miscelazione sia efficiente cioè in grado di separare le singole particelle e di idratarle adeguatamente.

Qualche volta viene sollevata la questione sulla definizione di micro-cemento. Sfortunatamente, questa domanda non può ricevere risposta univoca poiché non esiste un accordo accettato a livello internazionale sulla definizione ed è lasciato alla pratica comune e caso per caso viene fornita una indicazione. Come indicazione informativa di un requisito minimo per il termine micro-cemento, si può usare il seguente suggerimento: cemento con un valore Blaine $> 600 \text{ m}^2/\text{kg}$ e un minimo del 99% della dimensione delle particelle minore a $40 \text{ }\mu\text{m}$ (Garshol, 2003).

3.1.2 La bentonite

La bentonite è tradizionalmente utilizzata in combinazione con il cemento per parecchie applicazioni che riguardano i terreni e gli ammassi rocciosi, come ad esempio operazioni di consolidamento oppure di backfilling. La principale ragione per la quale si usa assieme al cemento è la tendenza di quest'ultimo di separarsi quando è in sospensione con l'acqua e questo fatto è amplificato in presenza di rapporti acqua-cemento maggiori di 1,0 come avviene per le iniezioni di malta bicomponente. La bentonite è dunque usata per ridurre il più possibile il bleeding ovvero la separazione tra le particelle e l'acqua; il dosaggio standard di bentonite per ottenere un mix ben stabilizzato è del 3 – 5 % il peso del cemento.

Il termine bentonite, nota anche come "terra di Fuller", è usato per rappresentare qualsiasi argilla del gruppo delle argille smectiti con capacità di elevato assorbimento; il minerale argilloso dominante al suo interno è la montmorillonite. La bentonite si trova naturalmente in formazioni vulcaniche come prodotto di decomposizione della cenere vulcanica, in formazioni sedimentarie e si trova anche negli strati del fondale marino. La chimica e la distribuzione degli elementi della bentonite è dettata dalla natura della roccia madre e dall'ambiente circostante. I principali depositi sono situati nel Nord America, in particolare nel Montana, vicino Fort Benton, località da cui deriva il nome di tale sostanza e in Australia, più comunemente nel Nuovo Sud Galles e Queensland, ove la produzione commerciale di bentonite supera rispettivamente 25.000 tonnellate/anno e 100.000 tonnellate/anno.

La formula generica (Figura 18) per la montmorillonite di-ottaedrica espansibile può essere espressa come:

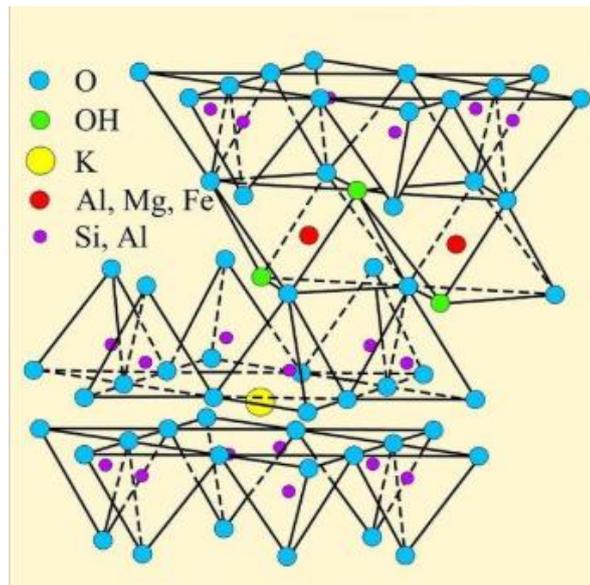
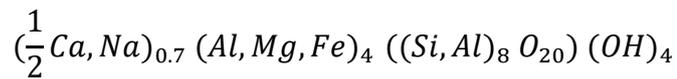


Figura 18 - Struttura della montmorillonite

La nomenclatura della bentonite deriva dall'elemento che ha donato il catione primario scambiabile con l'argilla. Le più diffuse e conosciute sono la bentonite sodica e la bentonite calcica mentre altre tipologie sono la meta-bentonite o bentonite di potassio, la saponite o bentonite di magnesio, presente in ambienti vulcanici e cavità minerali; forma rara è la hectorite o, più facilmente, bentonite di litio. Una caratteristica della bentonite è la capacità di rigonfiare che la rende adatta a diversi scopi. Sono utilizzate in alcune applicazioni in discariche come rivestimento, nelle perforazioni con fanghi bentonitici, in fonderia come argille di legame. Per le applicazioni industriali e su larga scala sono commercialmente prodotte bentoniti di sodio e di calcio.

La bentonite di sodio si espande quando è bagnata, assorbendo quanto più acqua, parecchie volte la sua massa secca. Per via delle sue eccellenti proprietà colloidali, è spesso usata come fango di perforazione per pozzi di gas e pozzi di oli e per indagini geotecniche ed ambientali. La sua capacità di rigonfiare, come già accennato, rende la bentonite di sodio un ottimo sigillante, specialmente per la chiusura ermetica dei sistemi di smaltimento del sottosuolo per il combustibile nucleare esaurito e per la quarantena di inquinanti metallici di acque sotterranee. Usi simili includono la realizzazione di pareti e barriere impermeabilizzanti, ad esempio per sigillare l'anello di un pozzo d'acqua, per tappare vecchi pozzi oppure per allineare la base di terra per prevenire la migrazione di percolato. La bentonite di sodio può anche essere aggiunta ai materiali sintetici per creare rivestimenti in argilla geo-sintetici

(GCL) per gli scopi di cui si è appena parlato. Questa tecnica consente un trasporto e un'installazione più convenienti, e riduce notevolmente il volume di bentonite sodica richiesta. Varie modifiche alla ricetta standard della bentonite di sodio sono state effettuate nel campo della ricerca migliorando il comportamento reologico e le prestazioni di tenuta in applicazioni geo-ambientali, ad esempio tramite l'aggiunta di polimeri.

La bentonite di calcio è un adsorbente di ioni in soluzione, così come di grassi e oli. Essendo un ingrediente attivo principale della “terra di Fuller”, probabilmente è stato uno dei primi agenti industriali prodotti. La bentonite di calcio può essere convertita in bentonite di sodio, denominata beneficio di sodio, mediante un processo noto come “scambio ionico” (brevettato nel 1935 dai tedeschi U. Hofmann e K. Endell).

Nell'uso comune, questo significa aggiungere tra il 5 e il 10% di un sale sodico solubile come il carbonato di sodio alla bentonite umida, miscelandolo bene, e concedendo il tempo alla miscela di effettuare lo scambio ionico e all'acqua di rimuovere il calcio scambiato. Alcune proprietà della bentonite attivata dal calcio e divenuta di sodio, come viscosità e perdita di sospensioni, potrebbero non essere completamente equivalenti a quelli della bentonite di sodio naturale. Per esempio, carbonati di calcio residui possono comportare prestazioni inferiori nelle applicazioni nelle fodere geo-sintetiche di questa bentonite.

In definitiva, principalmente si usa la bentonite di sodio in combinazione con il cemento grazie alla sua miglior capacità di rigonfiamento quando miscelata con acqua tra le 10 e le 25 volte il volume secco di base. Le particelle assumono una forma complessa come fossero tanti tasselli incastrati (Figura 19) e le loro superfici assorbiranno acqua rendendo stabile la miscela. Infine, le particelle si immergono molto lentamente all'interno della sospensione grazie alla loro forma, (Garshol, 2003).

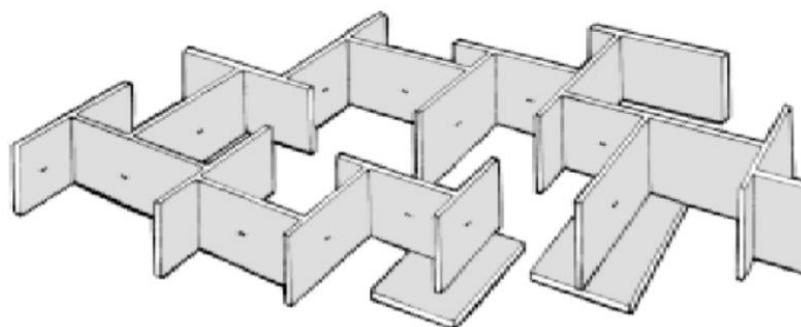


Figura 19 - Struttura della bentonite dopo la miscelazione con acqua

3.1.3 Il componente FR10

Si tratta di un polimero stabilizzante per miscele cementizie con peso specifico di 1,3 kg/l. Mapeidrill FR10 è una miscela di polimeri naturali e sintetici, in soluzione acquosa in grado di agire come viscosizzante e riduttore di filtrato per miscele cementizie da iniezione e slurries bentonitici per lo scavo meccanizzato con slurry shield TBM. Può essere utilizzato come polimero viscosizzante e stabilizzante per l'iniezione di miscele cementizie (malte o boiacche) di riempimento ed intasamento a tergo dei conci di rivestimento di gallerie scavate con TBM (scavo meccanizzato di gallerie).

In quest'ultima applicazione, ovvero per il backfilling:

- sostituisce completamente l'utilizzo di bentonite, spesso proibito per motivi ambientali oppure non possibile per ragioni di tipo logistico (approvvigionamento della bentonite);
- aggiunto in bassi dosaggi alla bentonite, aumenta la stabilità volumetrica della miscela (basso valore di bleeding) minimizzando il rischio di ostruzione delle linee di iniezione e dei serbatoi di stoccaggio qualora la bentonite non riesca a garantire da sola le caratteristiche di stabilità e viscosità richiesta.

Il dosaggio del componente FR10 dipende:

- dal rapporto acqua-cemento;
- dal rapporto acqua-bentonite, dalla percentuale di bentonite, dal tipo di bentonite utilizzata;
- dal tipo di backfilling (malta monocomponente, malta bicomponente);
- dalle caratteristiche richieste in termini di bleeding e viscosità.

Per ciò che riguarda la pulizia è sufficiente l'uso di acqua.

3.1.4 Il ritardante

I ritardanti sono classificati come tipo B (additivi ritardanti) o tipo D (additivi per la riduzione dell'acqua e ritardanti); sono additivi chimici per calcestruzzo portland con denominazione ASTM C494. La loro funzione primaria è, come suggerisce il nome, ritardare il tempo di indurimento del cemento. Come effetto secondario, molti ritardanti riducono la richiesta di acqua per produrre un calcestruzzo di lavorabilità desiderata e maggiore resistenza a parità di contenuto di cemento. Alcuni ritardanti, inoltre, producono numerose piccole bolle d'aria, simili a quelle prodotte dagli agenti aeranti nelle miscele di calcestruzzo. In definitiva, l'uso di ritardanti è utile per migliorare alcuni aspetti del calcestruzzo come lavorabilità, resistenza e durabilità (Yamamoto, 1972). L'uso di ritardanti è utile per:

- posizionare o iniettare calcestruzzi complessi;
- finiture superficiali speciali;
- compensare l'effetto accelerante delle alte temperature sull'indurimento;
- prevenire la formazione di giunti freddi.

Quando questi ritardanti vengono aggiunti a miscele di cemento, alcune reazioni fisiche e/o chimiche avvengono in modo tale da ritardare il tempo di presa e indurimento. Poco si conosce su quale sia la struttura molecolare effettiva dei ritardanti e su come avviene il meccanismo di rallentamento. La teoria più accreditata del processo di rallentamento è la cosiddetta "teoria del rivestimento". L'idea della teoria è fondamentalmente questa: non appena viene aggiunto il ritardante, esso viene adsorbito all'interfaccia liquido-solido dei grani di cemento e l'idratazione del ritardante è raggiunta. Le molecole del ritardante bloccano o ritardano in avanti il contatto del cemento non idratato con l'acqua e quindi ritardano l'idratazione del cemento. La struttura molecolare efficace dei ritardanti, quindi, deve essere tale da fungere da guarnizione, rivestimento (Yamamoto, 1972). I ritardanti commerciali sono classificati chimicamente in sette categorie (Petrowikiorg, 2016):

a. Lignosolfonati

Tra tutti i composti chimici che sono stati identificati come ritardanti, i lignosolfonati sono i più usati. Un lignosulfonato è un sale solfonato metallico derivato dalla lignina recuperata dalla lavorazione dei rifiuti di legno. I lignosulfonati comuni sono calcio e sodio lignosulfonato. Tre gradi di lignosulfonato sono disponibili per il ritardo dei fanghi di cemento. Ogni grado è disponibile sotto forma di sali di calcio/sodio o sale di sodio. I tre gradi sono:

- Filtrati

Il sale di calcio o sale di sodio di solito viene utilizzato ad una temperatura di 200 °F BHCT o inferiore ad una concentrazione di 0,6% BWOC o meno. Può essere usato a temperature più elevate ma sarà normalmente limitato da considerazioni economiche.

- **Puri**

Il grado purificato rappresenta una classe di lignosolfonati in cui il contenuto di zucchero è stato ridotto. Il sale calcio/sodio viene in genere utilizzato a un BHCT di 200 °F o inferiore e ad una concentrazione di 0,5% BWOC o inferiore.

- **Modificati**

Il grado modificato rappresenta i lignosolfonati che sono stati miscelati o hanno reagito con un secondo componente. I composti più comunemente utilizzati come componenti di miscela sono l'acido borico e gli acidi idrossicarbossilici, o i loro sali. I materiali misti sono disponibili sotto forma di sali di calcio o di sodio. I lignosolfonati modificati sono tipicamente usati in un BHCT di 200 °F o superiore. Sono più efficaci dei puri e sono in grado di reagire a temperature superiori a 250 °F. I vantaggi sono: maggiore stabilità alle alte temperature, anche superiore a 300 °F, maggiore attività di dispersione e migliore sinergia con additivi per la perdita di liquidi.

b. I derivati della cellulosa

Due polimeri celluloseici possono essere utilizzati come ritardanti nelle operazioni ove compare il cemento. Sono l'idrossietilcellulosa (HEC) e il carbossimetilidrossietile cellulosa (CMHEC). L'HEC è comunemente considerato un additivo per evitare la perdita di liquidi. Sebbene è un'opzione possibile, vale la pena notare che viene utilizzato a temperature di 125 °F o meno, che il tempo di presa può arrivare a circa due ore in un impasto di acqua dolce; per questi motivi non è comunemente utilizzato. Al contrario, il CMHEC è tradizionalmente usato come ritardante a base di cellulosa. È funzionale come rallentatore grazie al fatto che può reagire fino a circa 230 °F BHCT alle stesse concentrazioni del lignosolfonato di calcio, ma, a differenza di esso, fornisce anche un buon controllo nella perdita di liquidi.

c. Gli acidi idrossicarbossilici

Gli acidi idrossicarbossilici sono ben noti per il loro comportamento antiossidante e 'rivestente' (vedi teoria del rivestimento) che favoriscono le prestazioni del mix cemento-bentonite. La proprietà antiossidante migliora la stabilità alle temperature di composti solubili come gli additivi per la perdita di liquidi. Comunemente gli acidi idrossicarbossilici e i loro derivati più usati sono:

- l'acido citrico;
- l'acido mararico;
- l'acido gluconico;
- il glucoheptonate;
- il glucono-delta-lattone.

Gli acidi idrossicarbossilici comunemente utilizzati come ritardanti sono generalmente derivati da zuccheri presenti in natura.

d. Gli organofosfati

Gli organofosfonati, con poche eccezioni, sono i più potenti ritardanti usati nel cemento. Questi materiali non sono ampiamente utilizzati in applicazioni col cemento a causa della bassissima concentrazione richiesta, che conduce a grosse difficoltà nell'accuratezza delle misurazioni e ad una estrema sensibilità alla concentrazione. Il vantaggio dei ritardanti organofosfati è la loro efficacia per le applicazioni che riguardano pozzi ad altissime temperature (> 450 °F) o in applicazioni in cui sono desiderati tempi di presa prolungati di 24 ore o più.

e. I sintetici

Il termine ritardante sintetico è un termine improprio poiché finora i ritardanti menzionati e descritti sono tutti prodotti dall'uomo. Tuttavia, è stato attribuito il termine sintetico ad una famiglia di copolimeri a basso peso molecolare. Questi ritardanti si basano sugli stessi gruppi funzionali dei ritardanti convenzionali (come il solfonato, l'acido carbossilico o un composto aromatico). I due ritardanti sintetici più comuni sono:

- l'anidride maleica;
- l'acido 2-acrilammido-2-metilpropansolfonico (AMPS).

f. I composti inorganici

Il meccanismo ritardante dei composti inorganici sull'idratazione del cemento è diverso da quella dei ritardanti precedentemente discussi. I composti inorganici, comunemente usati come ritardanti di cemento, sono il borace ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e altri borati come l'acido borico (H_3BO_3) e il suo sale di sodio e l'ossido di zinco (ZnO). I borati sono comunemente usati come ausilio al ritardante per le alte temperature come BHCT di 300 °F (149 °C) e superiori. Il borato è un ritardante meno potente a temperature più basse, tuttavia, esercita un effetto sinergico con altri ritardanti come i lignosolfonati, per cui la

combinazione fornisce un ritardo migliore rispetto a qualsiasi altro ritardante da solo. L'ossido di zinco è un forte ritardante quando è usato da solo, e viene normalmente utilizzato per il ritardo dei cementi chimicamente estesi.

g. I sali

L'acqua contenente concentrazioni di sali superiori al 20% BWOW ha un effetto ritardante sul cemento. La gelificazione è evidente nel profilo di viscosità rispetto al tempo di presa dei fanghi di sale saturi dovuti all'improvviso aumento delle unità di consistenza di Bearden che poi si stabilizzano prima di indurire. I fanghi di sale saturi sono utili per la cementazione tramite le cupole di sale. Aiutano anche a proteggere le sezioni di scisto dalla desquamazione e dal sollevamento durante la cementazione e prevengono la formazione di ponti anulari e la perdita di circolazione che potrebbe avvenire. Anche i cementi salati saturi sono dispersi e il sale riduce l'efficacia di additivi per la perdita di liquidi.

3.1.5 L'accelerante

La velocità della reazione chimica tra le particelle dei cementi e l'acqua, spesso chiamata reazione di idratazione del cemento, può essere alterata aggiungendo piccole quantità di sostanze chimiche durante la fase di miscelazione. Le sostanze che influiscono su tale velocità danno un aumento complessivo nel tasso di idratazione delle particelle di cemento. L'effetto è dunque accelerante, e per questa ragione queste sostanze sono chiamate additivi acceleranti o semplicemente acceleranti. Un accelerante è aggiunto al calcestruzzo allo scopo di accorciare i tempi di presa e/o aumentando lo sviluppo iniziale della resistenza. Nel primo caso la principale azione dell'accelerante avviene allo stato fluido della pasta cementizia, mentre nel secondo caso l'accelerante agisce principalmente allo stato indurito. Alcuni acceleranti influenzano la fase di presa o quella di indurimento, mentre altri accelerano sia la presa che l'indurimento. Essi possono essere classificati in numerosi modi. Ad esempio, la norma europea EN 9342:2001 fa una distinzione quando si definiscono acceleranti per calcestruzzo tra presa e indurimento (Myrdal, 2007):

- Additivi acceleranti in fase di presa

Additivo che diminuisce il tempo di presa nel passaggio del mix dallo stato fluido allo stato solido.

- Additivi acceleranti in fase di indurimento

Sostanze che aumentano lo sviluppo precoce di resistenza nel calcestruzzo, con o senza influenzare il tempo di presa.

La fase di presa è normalmente determinata misurando il tempo che il mix cementizio impiega per ottenere una certa resistenza meccanica che può essere misurata tramite un ago che sia in grado di penetrare nella pasta di cemento, ad esempio con l'apparecchio Vicat (Figura 20).

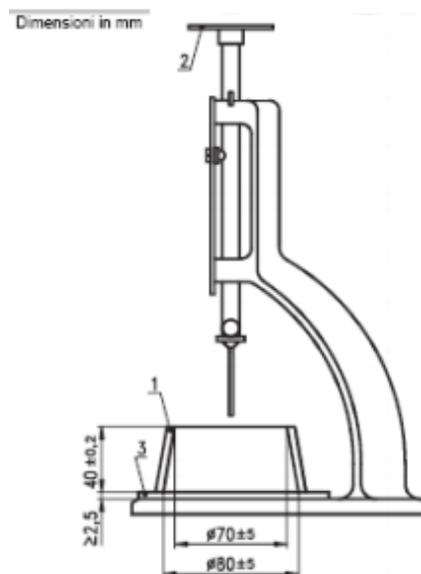


Figura 20 - Apparecchio di Vicat

Una distinzione è anche fatta tra il tempo di presa iniziale e quello finale. Il livello di indurimento è normalmente determinato misurando la resistenza a compressione di pasta cementizia indurita, malta e prismi di cemento. Presa e indurimento possono anche essere determinati indirettamente misurando la trasmissione di calore e o l'aumento della temperatura generato dalle reazioni chimiche tra cemento e acqua. L'idratazione del cemento, essendo una reazione esotermica, produce calore e se l'idratazione viene accelerata, il calore viene prodotto prima (in fase di presa) oppure ad una velocità maggiore (in fase di indurimento) (Figura 21).

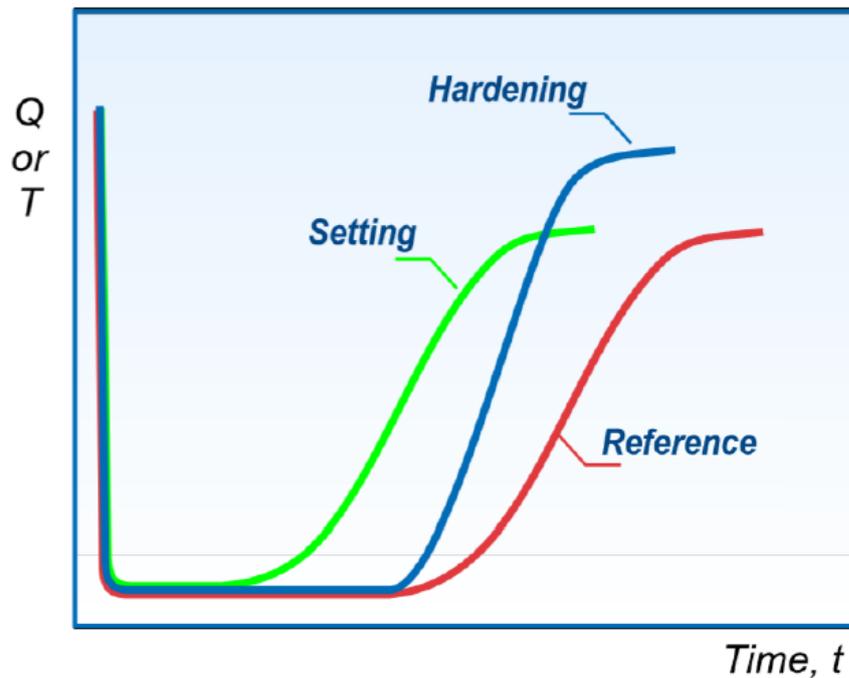


Figura 21 - Effetti sulla presa ed indurimento degli acceleranti (Myrdal, 2007)
nei confronti del calore Q (W/kg) o della temperatura T ($^{\circ}\text{C}$) durante l'idratazione del cemento.

Reference: Cemento senza accelerante.

Setting: Cemento con accelerante in fase di presa.

Hardening: Cemento con accelerante in fase di indurimento.

Bisogna, tuttavia, essere consapevoli del fatto che la maggior parte di acceleranti influenzano sia la presa che l'indurimento, a seconda del dosaggio dell'accelerante stesso. Da un punto di vista pratico, a volte vengono classificati semplicemente in base al tipo di calcestruzzo in cui sono miscelati (Myrdal, 2007):

- Accelerante per calcestruzzo ordinario

Accelerante aggiunto durante la miscelazione del calcestruzzo nell'impianto di miscelazione.

- Accelerante per calcestruzzo proiettato

Accelerante aggiunto nell'ugello dell'apparecchiatura durante la fase di spruzzatura.

Un altro modo per fare distinzioni tra diversi acceleranti è dividerli in gruppi in base alla loro forma fisica e natura chimica (Petrowiki Org., 2016 a):

- Cloruro di calcio (CaCl_2)

Dei sali di cloruro, quello di calcio è il più usato e nella maggior parte delle applicazioni è anche la soluzione più economica. Fa eccezione il caso in cui vengano usati polimeri

idrosolubili come agenti fluidi a perdita di controllo, in questa situazione è sconsigliato l'uso. I principali vantaggi del cloruro di calcio sono la significativa riduzione del tempo di presa e che, a prescindere dalla concentrazione, agisce sempre come accelerante. Il normale range di concentrazione di CaCl_2 da utilizzare è compreso tra l'1 e il 4% in peso di cemento (BWOC). Oltre la concentrazione del 6% BWOC, i risultati diventeranno imprevedibili e può verificarsi gelificazione.

- Cloruro di potassio (KCl)

Le prestazioni da accelerante del cloruro di potassio sono simili a quelle del cloruro di sodio (NaCl). KCl ha due vantaggi rispetto agli altri acceleranti:

- ha un effetto stabilizzante su scisti e/o formazioni contenenti argilla attiva (come in presenza di bentonite)
- ha un effetto minimo sulle performance degli altri additivi (ad esempio sugli additivi a perdita di fluido).

Come accelerante, il cloruro di potassio può essere utilizzato a concentrazioni fino al 5% BWOW; per la stabilizzazione di mix a base cemento, concentrazioni del 3% BWOW sono già efficaci.

- Silicato di sodio (Na_2SiO_3)

Il silicato di sodio è normalmente considerato un estensore chimico, sebbene sia anche funzionale come accelerante. L'efficacia dipende dalla concentrazione e dal peso molecolare. La forma a basso peso molecolare può essere utilizzata a concentrazioni dell'1% BWOC o meno per accelerare i fanghi a densità normale. La forma ad alto peso molecolare, invece, è un accelerante efficace a concentrazioni fino al 4% di BWOC. Il sodio-meta-silicato fornisce anche eccellente controllo sulle perdite in fase di circolazione quando utilizzato con cemento o salamoie di CaCl_2 .

- Idrossidi alcalini ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH)

Gli idrossidi alcalini sono comunemente usati in cementi pozzolanici allungati. Essi accelerano sia la componente pozzolanica che le particelle di cemento alterando la chimica.

- Alluminato monocarbonico ($\text{CaO Al}_2\text{O}_3 = \text{CA}$)

L'alluminato di calcio è usato come accelerante in cementi pozzolanici e in cementi contenenti gesso.

3.2 Prestazioni bicomponente

3.2.1 Creazione di bolla incompressibile

Poiché la malta bicomponente iniettata è un fluido liquido che, grazie all'aggiunta di un additivo accelerante giusto prima della sua iniezione, ottiene una consistenza tixotropica in pochi secondi, e poiché è costituita da un'enorme quantità d'acqua (circa 800 litri per metro cubo di materiale), costituisce senza dubbio un fluido incompressibile, proprio come l'acqua. La conseguenza è che il vuoto anulare che si è creato dopo il passaggio della TBM per le ragioni viste precedentemente, può essere considerato come una bolla chiusa che è riempita, istante per istante, con un fluido incompressibile. Pertanto, ogni movimento dell'ambiente circostante che tende ad entrare nella bolla o qualsiasi movimento del rivestimento in calcestruzzo che tende a ridurre il volume della bolla, porta alla creazione di una pressione sulla bolla stessa che evita qualsiasi tipo di deformazione; questa pressione è uniforme lungo tutto il volume e sopra tutte le superfici del volume. Quindi l'incompressibile bolla di gel confina perfettamente e completamente l'anello di rivestimento già installato e il nuovo anello che deve essere installato. Affinché ciò possa essere effettivamente reale, è necessario che si ottengano le seguenti condizioni (Pelizza et al., 2010):

- il materiale iniettato deve rimanere incompressibile;
- il fluido non deve fuoriuscire dalla bolla:
 - non può permeare attraverso il terreno circostante (questo è evitato dall'acqua sotterranea che esercita una pressione idrostatica sul materiale iniettato);
 - non può sfuggire attraverso lo spazio tra la coda e il profilo di scavo, che viene evitato da un corretto bilanciamento tra la pressione al fronte del tunnel e la pressione di iniezione (che deve essere di circa 0,2 bar in più di quella al fronte, non di più);
- se il terreno circostante si trova in cattive condizioni tende a chiudersi verso la bolla; in questo caso non può essere consentito di iniettare con eccessive pressioni, altrimenti la pressione necessaria per far avanzare la macchina aumenterebbe troppo. Il tutto deve essere equilibrato e controllato con un giusto bilancio tra la pressione nella camera di scavo e la pressione di iniezione. Si può aiutare l'avanzamento e evitare pericoli di blocco tramite lubrificazione dell'estradosso della coda dello scudo con una bentonite. Si suggerisce l'iniezione di liquami di bentonite nel punto dove avviene esattamente il blocco della coda, cioè alle spalle del rivestimento, nella parte finale della coda;

- l'anello di conci appena installato non può presentare deformazioni (in generale, senza ovalizzazione) dovute al suo stesso peso, che potrebbero portare ad un'installazione anomala degli anelli seguenti oppure ad una pressione troppo bassa sugli stessi conci;
- il gel non può essere percolato dall'acqua sotterranea.

È evidente dalle ragioni di cui sopra che è necessario iniettare un fluido che non indurisca istantaneamente, ma che diventi un gel rapidamente e progressivamente consentendo la formazione di una bolla incompressibile di volume costante. I parametri meccanici come la resistenza del materiale a lungo termine non hanno alcun significato, perché non dà alcun contributo strutturale nel supporto dei carichi idrostatici e geostatici (questi sono completamente a carico del rivestimento in calcestruzzo), ma il gel deve essere il più omogeneo possibile al fine di mitigare i carichi esterni (una bolla chiusa). Per questo obiettivo è senza dubbio necessario che il gel non si decomponga dopo la sua iniezione: la durabilità deve garantire che la bolla incompressibile sia mantenuta permanentemente nel tempo. Quindi tutta l'attenzione deve essere concentrata sul comportamento del materiale iniettato nelle fasi iniziali (dai primi istanti ad alcune ore), che include le fasi di iniezione e di installazione di alcuni ring di rivestimento. È evidente che la creazione e il mantenimento di una bolla chiusa non comprimibile è il fattore da garantire più importante.

3.2.2 Durabilità

La durabilità del gel che riempie totalmente il gap anulare è garantita in condizioni di umidità normali del terreno (anche quando il tunnel è scavato sottofalda freatica). Durante la costruzione di molte linee della metropolitana a Singapore, i costruttori si accorsero che, dal momento che la malta bicomponente ha iniziato ad essere utilizzata, più di dieci anni fa, c'era stato un calo di durabilità della malta. Una prova completa del comportamento futuro non esiste, ma il gel deve avere due caratteristiche che danno un indice sulla durabilità:

- L'incompressibilità:
questo parametro appare immediatamente come il più significativo, infatti il gel, come detto, è costituito principalmente da acqua. Se l'acqua non è persa (per evaporazione o filtrazione), il materiale rimarrà stabile per un lunghissimo periodo. È quindi essenziale mantenere nel terreno 'ospitante' la naturale umidità.
- la permeabilità tecnica del terreno:

è il parametro fisico che favorisce la creazione della situazione sopra descritta.

Entrambe le caratteristiche citate possono essere misurate in laboratorio e possono essere assunto come indicatori della durabilità della malta bicomponente.

3.2.3 Consistenza e resistenza

La prima importante considerazione derivante da ciò che è stato scritto sopra è che, quando si usa un mix bicomponente superfluido, le fasi iniziali in termini di resistenze meccaniche sono le più importanti: infatti, il rivestimento in calcestruzzo, e non la malta iniettata, deve sopportare le pressioni idrostatiche e geostatiche. Questa considerazione sembra essere assolutamente corretta perché è nelle prime ore (da 8 fino a 24, quando la TBM avanza regolarmente) che il gel deve riempire ogni vuoto del gap (ed eventualmente i vuoti nel terreno circostante) e proteggere il rivestimento di calcestruzzo. Colmare ogni vuoto deve essere garantito dall'alta fluidità del materiale iniettato e dalla rapida creazione del gel. Il gel inoltre deve bloccare l'anello nella sua posizione di installazione (evitando la formazione di carichi puntuali) e allo stesso tempo evitare che l'ultimo anello installato si deformano a causa della spinta della TBM e della rotazione della testa della macchina. È di fondamentale importanza che si crei un gel dopo pochi secondi, così da generare una bolla chiusa incompressibile: quindi la creazione del gel deve essere testata (da 30 minuti fino a 8 ore misure di resistenze meccaniche speditive, ad esempio con un penetrometro tascabile, devono essere eseguite). La logica della mezz'ora può essere regolata per adattarsi al tempo impiegato per installare un anello: il tempo dovrebbe essere abbastanza lungo per ottenere una resistenza sufficiente da evitare fluttuazioni attorno alla malta. Le misure superiori alle 24 ore sono utili per una fase di controllo: affinché il gel non si decomponga, ma aumenti la sua resistenza e consenta l'estrazione di alcuni nuclei attraverso i conci, utili per controllare se il riempimento del gap anulare è effettivo e globale. Non c'è inoltre dubbio che la misura delle resistenze a compressione su nuclei estratti in situ (anche se il carotaggio può disturbare parzialmente i campioni) è il più affidabile e significativo metodo, perché il materiale è iniettato a pressione e lì rimane in condizioni ambientali naturali (Pelizza et al., 2010).

3.2.4 Caratteristiche dell'impianto nel cantiere di Brisbane

La Parsons Brinckerhoff Arup Joint Venture ha condotto il progetto del tunnel e ha fornito il contratto delle specifiche per la malta bicomponente per backfilling. Viene specificata una resistenza alla malta di 1 MPa quando il rivestimento in calcestruzzo viene caricato dal peso del primo portale di backup. Mentre la resistenza della malta è di primaria importanza dal punto di vista del contratto, altre proprietà della malta sono anch'esse importanti per garantire il riempimento massimo del vuoto. Queste proprietà includono la durabilità, la fluidità (viscosità), la stabilità (bleeding) ed il tempo di gelificazione. La componente A viene preparata sulla superficie, poi pompata in un serbatoio di raccolta sul backup della TBM. Mentre su altri i progetti non è raro vedere conservata la malta da due a tre giorni per accogliere interruzioni impreviste dei lavori, per questa applicazione si è ritenuta accettabile una minima data di scadenza di 24 ore.

Le macchine da scavo EPB di diametro più piccolo utilizzano tipicamente due porte di iniezione approssimativamente posizionate alle ore due e dieci. Tuttavia, a causa del diametro significativamente maggiore di questo tunnel, quattro porte di iniezione sono necessarie (Figura 10, vengono utilizzate le porte A1, A2, A5 e A6). La malta bicomponente deve quindi viaggiare attorno alla circonferenza dei conci dalle porte A2 e A5 attraverso un arco di circonferenza, fino ad una distanza di 8,9 m. È quindi importante che la malta rimanga fluida. Per questa ragione è desiderabile un tempo di cono di Marsh (prova speditiva di cantiere dove si misura il tempo impiegato dal mix per riempire un litro di volume passando attraverso il cono standardizzato di Marsh) relativamente basso. Questa è principalmente funzione del rapporto acqua cemento. In misura minore dipende anche dalla qualità e dal contenuto di bentonite così come dalla qualità della miscelazione; miscelazione colloidale ad alto taglio si traduce in viscosità più basse. Sulla base dell'esperienza, il personale del cantiere ha ritenuto accettabili tempi da 8 a 12 secondi per l'imbuto di Marsh. Herrenknecht ha progettato il sistema di iniezione delle TBM in modo tale che i componenti A e B si mescolino su una lunghezza di 1,45 metri attraverso la coda dello scudo prima di raggiungere la porta di iniezione (Figura 9). In base alla pressione della pompa di iniezione della malta, occorrono in genere da 5 a 10 secondi circa per la bicomponente per viaggiare dalla porta di iniezione al gap da colmare. Di conseguenza, il rischio di blocco delle linee di alimentazione è ragionevolmente alto suggerendo l'uso di malta altamente fluida con tempi di gel più lunghi. Un gel 'più morbido' riempirebbe il gap anulare, ridurrebbe il rischio di blocco delle linee e risulterebbe relativamente semplice lavarle con acqua ad alta pressione se dovessero verificarsi. Gel time da 5 a 20 secondi sono stati ritenuti accettabili con preferenza verso il tempo più lungo. Sebbene i serbatoi di dosaggio e miscelazione siano

impiegati in superficie, la stabilità del componente A ha importanza per quanto riguarda il tempo di residenza nelle pompe. La separazione tra particelle solide e acqua (bleeding) deve essere ridotto al minimo per evitare che le particelle di cemento si depositino e si accumulino all'interno della tubazione; infatti il cemento può indurire all'interno della linea, riducendo l'area effettiva e aumentando le pressioni della pompa richieste. Mentre questo può essere mitigato attraverso la manutenzione delle condotte è comunque preferibile minimizzare il sanguinare della malta il più possibile. Il bleeding è ridotto grazie all'uso della bentonite e tramite una miscelazione colloidale ad alto taglio ottimale. Con una distanza totale massima della pompa di circa 2,65 km, un bleeding inferiore al 5% è stato ritenuto necessario. Altrettanto importante per la distanza di pompaggio è la viscosità complessiva del componente A. La viscosità può avere un impatto significativo sulle pressioni di pompaggio. Viscosità inferiore, eseguita col cono Marsh, riduce i requisiti di pressione e di energia per portare il componente A dalla superficie in galleria. I calcoli preliminari indicano che le pompe di erogazione sulla superficie richiederanno un massimo di pressione di 16 bar per trasferire la malta fino alla fine del tunnel. Questo include le perdite di pressione sulle condotte e le perdite aggiuntive dovute all'avvolgimento, ai raccordi e alla pulizia delle linee stesse.

4 Casi studio

Nel capitolo seguente si espongono un certo numero di casi in cui la tecnologia di malta bicomponente è stata utilizzata per le operazioni di backfilling.

4.1 Roma metro C

- **Sintesi del progetto**

Il progetto per costruire la linea C della metropolitana di Roma è unico nel suo genere dato l'importanza del sito archeologico che la linea attraversa e le conseguenti difficoltà tecniche nella costruzione di detta linea. Inoltre, è la prima grande opera di trasporto pubblico infrastrutturale in Italia ad essere gestita tramite controllo remoto da un sistema completamente automatizzato. Il percorso, che misura oltre 25 km di lunghezza, attraversa la città da nord-ovest a sud-est, toccando il centro storico di Roma, sito UNESCO del patrimonio mondiale in diversi punti del percorso. In sintesi, un progetto con un'anima nel passato, ma un esempio per il futuro. Grazie alla metro C è possibile andare da San Pietro al Colosseo in soli 5 minuti.

Due macchine EPB di diametro di 6,7 metri hanno scavato la prima parte della linea, circa 4 km, attraversando un terreno costituito da una pozzolana stabile e difficilmente permeabile. La seconda parte è stata scavata da altre due EPB machines, stavolta in un terreno permeabile e morbido. Sebbene in una prima fase del progetto per l'operazione di backfilling si era scelta una malta monocomponente, in una seconda e decisiva fase si è scelto di iniettare una malta bicomponente attraverso la coda dello scudo delle macchine.

- **Mix design**

Si riporta di seguito il mix design utilizzato (Tabella 6 - Malta bicomponente utilizzata per la linea C della metro di Roma).

Tabella 6 - Malta bicomponente utilizzata per la linea C della metro di Roma

Componente A	Acqua (kg/m ³)	770-820
	Bentonite (kg/m ³)	30-60
	Cemento (kg/m ³)	310-350
	Ritardante (l/m ³)	3.0-7.0
Componente B	Accelerante (l/m ³)	50-100

4.2 Brisbane Airport Link

- **Sintesi del progetto**

Il progetto di Brisbane Airport Link (APL) con i suoi 5 milioni di dollari stabilisce il record come singolo investimento più grande nel ramo delle infrastrutture e del trasporto nella storia dell'Australia e uno delle imprese ingegneristiche più impegnative nella storia del Queensland. Il gruppo Thiess/John Holland JV (TJH) segue la progettazione e la costruzione di questo megaprogetto che comprende 25 ponti, quasi 15 km di tunnel e oltre 7 km di lavori stradali di superficie. Una volta completato, produrrà il tunnel stradale più lungo in Australia con i suoi 6,7 km. A partire da Kalinga Park a Toombul, due macchine da scavo (TBM) prodotte da Herrenknecht sono essere utilizzate per perforare le sezioni a doppio diametro per una lunghezza di 2.45 km fino a Lutwyche sui complessivi 6,7 del tunnel stradale. Con 12,48 m di diametro e 4900 kW di potenza totale, queste sono le TBM più grandi mai utilizzate in Australia.

Sono anche le più grandi *Earth Pressure Balance Machines* (EPBM), al di fuori del Giappone, dove questo metodo è stato sviluppato per la prima volta, che incorporano l'iniezione di malta bicomponente attraverso la coda dei loro scudi. A causa delle dimensioni da record delle gallerie, la progettazione della malta e l'implementazione sono state attentamente studiate. Team Mixing Technologies (Canada) ha ottenuto il contratto di fornitura per l'impianto di malta, in gran parte basato sulle prestazioni tecniche dei loro miscelatori colloidali che massimizzano la resistenza della malta e riducono al minimo il bleedind. Le prove in sito sono state realizzate tramite un impianto di prova per iniezione di malte fornito da Herrenknecht che, in modo realistico, simula il comportamento reale dei vari mix possibili. I mix sono stati selezionati per bilanciare il requisito di contratto di rapido sviluppo di resistenza assieme ad un elevata fluidità (per riempire completamente il vuoto tra il rivestimento e il terreno).

- **Mix design**

Si riporta, di seguito, il mix design utilizzato per il progetto (Tabella 7).

Tabella 7 - Malta bicomponente utilizzata per la linea 'Bisbane Airport Link'

	Ingredienti	Quantità
Componente A	Acqua	723 kg/m ³
	Ritardante	6,7 l/m ³
	Bentonite	40 kg/m ³
	Cemento	337 kg/m ³ (2.32 w:c ratio)
Componente B	Accelerante	81 kg/m ³
	Acqua	60 kg/m ³

Si sottolinea che il componente B è presente nel mix con il 6,7% in volume mentre il rimanente 93,3% è costituito da componente A. Inoltre, l'acqua servita sia per la miscelazione della componente A che della componente B: la quantità di acqua aggiunta all'acceleratore (60 kg/m³) per la diluizione viene sottratta dalla quantità di acqua utilizzata per preparare il componente A ($783 - 60 = 723$ kg/m³); il rapporto acqua-cemento rimane invariato per il prodotto finale.

4.3 Pechino linea metropolitana

- **Sintesi del progetto**

Il progetto comprende tre stazioni (Dongfengbeiqiao con una lunghezza 298,7 m, Jiangtai di 166 m di lunghezza e la stazione di Gaojiayuan lunga 179 m) e 2507,9 metri di gallerie a doppio binario per la realizzazione della linea 14 della metropolitana di Pechino (Figura 22)

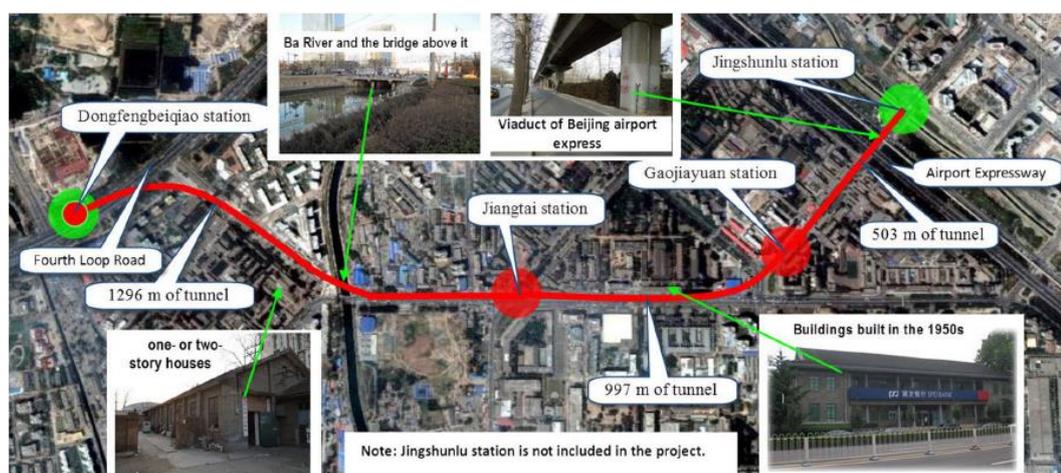


Figura 22 - Progetto linea 14 della metropolitana di Pechino

Invece di due tunnel a singolo binario, è stata adottata una galleria a doppio binario per collegare due stazioni adiacenti a causa dello spazio limitato sotterraneo. Una macchina da scavo EPB con diametro di 10,22 metri è stata scelta; per ridurre la durata del progetto, il piano di costruzione impiegato ha coinvolto in modo continuato lo scavo di 3151,6 m prima, seguita dalla costruzione delle due stazioni (stazioni di Jiangtai e Gaojiayuan) espandendo il

tunnel. Due elementi riguardanti l'allineamento della galleria sono il raggio minimo di curvatura di 350 m e la pendenza massima di 27 %. I terreni in sabbia incontrati, ricchi di acque sotterranee, il sovraccarico superficiale e il piccolo raggio di curvatura contribuiranno tutti assieme ad elevati cedimenti superficiali se non adeguatamente affrontati. Il progetto è stato pensato in modo che il tunnel attraversi aree di Pechino densamente costruite ed abitate. Il grande diametro della EPBM può influenzare gli edifici e le strutture vicine, inoltre passando al di sotto delle strade principali della città, può influire sul manto stradale e sugli impianti subito al di sotto. Le condotte coinvolte comprendono l'approvvigionamento di calore, gas, acqua e drenaggio, cavi per la comunicazione e così via. Altre fonti di rischio identificate sono le numerose case a uno o due piani, i bassi edifici costruiti negli anni '50, il fiume Ba, il ponte sopra il fiume, il Fourth Loop Road, l'Airport Expressway e il viadotto dell'aeroporto di Pechino. Tutti questi elementi sensibili alla costruzione del tunnel hanno rappresentato un aspetto significativo di sfida ingegneristica.

- **Risultati**

Innanzitutto, la componente A è stata preparata mescolando diversi possibili mix, dopodiché il test di gel time sulla bicomponente è stato eseguito (Tabella 8).

Tabella 8 - Risultati di test sulla componente A e sulla bicomponente

Rapporto in massa del componente A				Densità del componente A (g/cm³)	Rapporto in volume del componente A su B	Gel time (s)
Acqua	Cemento	Bentonite	Ritardante			
0,8	1	0,3	0,013	1,31	10/1	20,5
1,1	1	0,22	0,009	1,29	10/1	20,2
1,1	1	0,23	0,013	1,32	10/1	23,5
1,1	1	0,33	0,011	1,27	10/1	35,2
1,25	1	0,25	0,01	1,24	10/1	36,3
1	1	0,25	0,013	1,32	10/1	16,5
1	1	0,3	0,013	1,32	10/1	16,4
1	1	0,4	0,013	1,32	10/1	17,3
1	1	0,5	0,013	1,32	10/1	25,9
1	1	0,6	0,013	1,32	10/1	35,2
1	1	3,52	0,016	1,21	10/1	24,6
1	1	3,52	0,016	1,21	11/1	25,6
1	1	3,52	0,016	1,21	12/1	28,7
1	1,2	3,52	0,016	1,22	12/1	14,7
1	1,4	3,52	0,016	1,23	12/1	13,5
1	1,08	0,37	0,012	1,32	10/1	17,1

Dopo aver analizzato i risultati dei vari test, il tempo di solidificazione scelto è stato di 16,4 secondi, con un rapporto di miscelazione di acqua-cemento-bentonite-ritardante di 1:1:0,3:0,013.

Una volta scelto il mix design, sono stati analizzati i valori di resistenza a compressione della malta col passare del tempo (Figura 23).

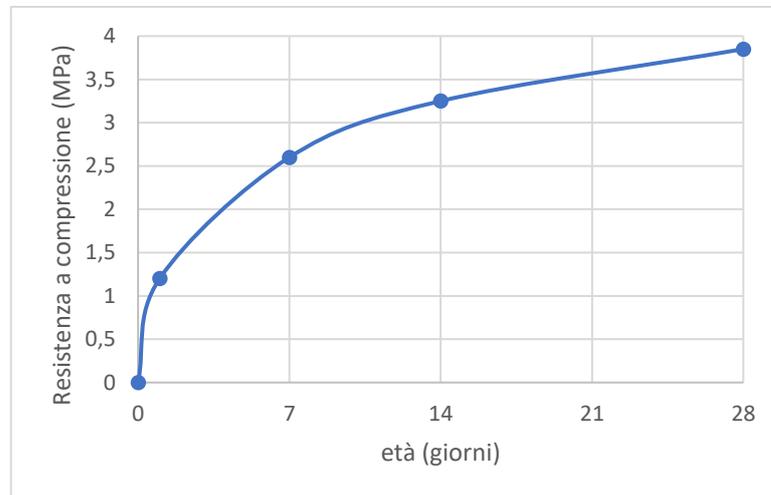


Figura 23 - Variazione di resistenza a compressione della malta bicomponente

4.4 Legacy Way road tunnels (Australia)

- Sintesi del progetto

In questo progetto sono state utilizzate due TBM a doppio scudo e il backfilling è stato realizzato combinando iniezioni tramite la coda dello scudo con iniezioni attraverso il rivestimento (Figura 24). La peculiarità di questo progetto è l'utilizzato della malta bicomponente per le applicazioni di backfilling in uno scavo in un ammasso roccioso al posto della più tradizionale tecnica del pea-gravel.



Figura 24 - Legacy Way portale di lancio

- **Mix design**

Tabella 9 - Componente A utilizzata per 'Legacy Way road tunnels'

	Ingredienti	Quantità (kg)
Componente A	Acqua	766
	Ritardante	5
	Bentonite	40
	Cemento e ceneri	40+80

Si riporta il mix design adottato per la componente A (Tabella 9). Il contenuto di silicato di sodio liquido proposto (componente B) è tra il 9% e il 10% del volume del componente A.

4.5 Bolaños-Campobecerro's twin tunnels (Spagna)

- **Sintesi del progetto**

Questo è un caso unico di scavo con una TBM scudata in un ammasso roccioso applicando una malta bicomponente che contribuisce all'impermeabilizzazione delle gallerie. Il progetto fa parte della linea ferroviaria nord-ovest ad alta velocità in Galizia, Spagna. L'appaltatore è la Joint Venture formata da ACCIONA Infrastructures, FCC, CYES Construction and Contratas y Ventas Company. La sezione del tunnel è di 52 m², di forma circolare, con un diametro di scavo di 9,90 m, rivestimento in calcestruzzo di 37 cm di spessore e un diametro interno di 8,76 m. Sono state fornite, inoltre, una piattaforma di evacuazione di 1,62 m per l'accesso in superficie (larghezza totale di 1,86 m) e una piattaforma di servizio di 1,48 m. Le operazioni di scavo sono state effettuate con una TBM a singolo scudo per roccia dura; si tratta di una TBM Herrenknecht rinnovata per questo progetto. La lunghezza dello scudo della TBM è di 10 m, mentre il totale la lunghezza (incluso il back-up) è di 120 m. Il lavoro principale del contratto è lo scavo di due gallerie gemelle a binario singolo in direzione Campobecerro's. La data di completamento dei tunnel era fissata in dicembre 2016. Secondo i precedenti studi geotecnici effettuati durante la fase di progettazione, la pressione dell'acqua prevista in alcuni punti dello scavo era di 140 m di colonna d'acqua, con picchi fino a 100 litri/secondo. Ecco perché la preoccupazione principale in questo progetto è stata l'utilizzo di un sistema a tenuta stagna migliorato di backfilling. A soddisfare il requisito di impermeabilità è stata utilizzata una malta bicomponente, invece di una malta convenzionale, per colmare il divario generato tra il diametro di perforazione della macchina e il diametro esterno del rivestimento. Simile alle resine utilizzate per la stabilizzazione al fronte dei tunnel, la malta bicomponente è una malta formata da due componenti (A, con cemento, bentonite, acqua e un ritardante e B, silicato di sodio liquido usato come

accelerante) che una volta iniettato produce una reazione attorno al perimetro dell'anello che in pochi secondi crea un gel e un'alta resistenza (0,4 MPa durante le prime 24 ore).

Questa soluzione già utilizzato da Acciona Infrastructures con buoni risultati nello scavo del tunnel urbano di Legacy Way a Brisbane (Australia), sta sostituendo negli ultimi anni le convenzionali soluzioni (malta monocomponente, pea-gravel) per scavi meccanizzati, anche se è la prima volta che lo si fa utilizzando una TBM a scudo singolo in una formazione rocciosa.

- **Mix design**

Si riporta il mix design adottato per la componente A (Tabella 10). Questa volta non è noto la percentuale di contenuto di silicato di sodio liquido proposto (componente B).

Tabella 10 - Componente A utilizzata per 'Bolaños-Campobecerros twin tunnels'

	Ingredienti	Quantità (kg)
Componente A	Acqua	1668.6
	Ritardante	6
	Bentonite	70,8
	Cemento	600

4.6 Follo Line railway tunnels (Norvegia)

- **Sintesi del progetto**

Oggigiorno è frequente che le specifiche del contratto richiedano un tunnel stretto, anche in caso di elevate pressioni d'acqua nella formazione rocciosa da perforare. Questo è il caso del progetto Follo Line in Norvegia in cui in alcuni punti si sono raggiunte pressioni di 16 bar. In questo progetto sono state utilizzate quattro TBM a doppio scudo e il backfilling di malta bicomponente è stato realizzato combinando iniezioni tramite la coda dello scudo della TBM e iniezioni tramite il rivestimento.

- **Mix design**

Si riporta il mix design adottato per la componente A (Tabella 11). Il contenuto di silicato di sodio liquido proposto (componente B) è tra il 6% e il 7% del volume del componente A.

Tabella 11 - Componente A utilizzata per 'Follo Line railway tunnels'

	Ingredienti	Quantità (kg)
Componente A	Acqua	807
	Ritardante	5
	Bentonite	30
	Cemento	340

5 Prove sperimentali

5.1 Introduzione

I componenti di una malta bicomponente sono: acqua, cemento, bentonite, ritardante ed accelerante. Le proporzioni e i prodotti da utilizzare sono stati forniti dal committente come di seguito riportato (Tabella 12):

Tabella 12 - Mix design 'standard'

Componente A	Acqua (kg)	853
	Bentonite (kg)	30
	Cemento (kg)	230
	Ritardante (kg)	3.5
Componente B	Accelerante (kg)	81

A partire dal mix illustrato sono state fatte alcune considerazioni su:

- la procedura di miscelazione da utilizzare in laboratorio per riprodurre il comportamento che la malta bicomponente possedeva in cantiere (utilizzando diverse eliche in fase di miscelazione e/o cambiando procedura di miscelazione);
- le proporzioni del mix, modificandole, mantenendosi nel suo intorno, e cambiando i prodotti utilizzati.

A questo punto si è approfondito lo studio del mix 'standard' con campagne complete; test di laboratorio sul componente A sono: (Peila et al., 2011; Zarrin et al., 2015; Barnett, 2008; Pellegrini et al., 2009; Antunes, 2012) la valutazione della densità, test di viscosità e test di bleeding; sulla malta bicomponente A+B la valutazione del tempo di gelificazione e per la malta indurita prove penetrometriche, prove di compressione uniassiale e prove di taglio. Viene spesso utilizzato anche il test di flessione su tre punti come fatto convenzionalmente per le malte.

L'obiettivo della determinazione della viscosità e del bleeding è di verificare se il componente A mantiene il suo stato fluido (cioè è pompabile) e se rimane omogeneo (cioè acqua e cemento non si separano). La valutazione del gel time ha lo scopo di stimare la quantità corretta del componente B da utilizzare per ottenere una gelificazione rapida mentre la resistenza a compressione è il principale parametro meccanico della malta bicomponente solitamente richiesto.

Dopodiché, per rafforzare i risultati ottenuti e per introdurre altre considerazioni, si è deciso di modificare il mix design:

- è stata sostituita la bentonite Clariant con una bentonite con altissimo contenuto di montmorillonite (prodotto naturale);
- si è sostituito il cemento ‘standard’ con uno di egual resistenza ma proveniente da latte diverso;
- si è sostituita la bentonite con un prodotto innovativo, il polimero FR10.

Si è, oggi, in fase di determinazione del modulo di elasticità della malta bicomponente del mix design 2 poiché il trend di progettisti e committenti di cantieri è richiedere informazioni sullo stesso modulo. La malta bicomponente a breve termine (le prime 24 ore di maturazione) non possiede rigidità e resistenza tale da effettuare la determinazione del modulo elastico tramite la norma relativa alle malte (EN12390 – 13); da qui si è deciso di procedere per via geofisica. Per la malta a lungo termine (a partire da 28 giorni di maturazione) la determinazione è quella relativa alle malte.

5.2 Procedura preparazione della componente A

Poiché la qualità finale della malta è fortemente influenzata dalla qualità del componente A, per la produzione è stata sviluppata una procedura in scala di laboratorio standardizzata. L'ordine e la durata di ogni fase di produzione sono stati definiti al fine di ottenere, su scala di laboratorio, un prodotto finale simile a quello ottenuto nell'impianto di cantiere, in termini di densità, omogeneità, bleeding, consistenza, fluidità e tempo di indurimento. Tipicamente, il componente A viene prodotto all'esterno del tunnel (Peila et al., 2011; ITAtech, 2014; Dal Negro et al., 2017) in aree idonee chiamate stazioni di dosaggio, dove un processo ad alta turbolenza consente la produzione di malta. Normalmente i miscelatori di cantiere richiedono pochi minuti per produrre alcuni metri cubi del componente A.

Per garantire in laboratorio una buona omogeneità del prodotto finale, è necessario rispettare i seguenti punti:

- il rapporto tra il volume del serbatoio e il volume della malta deve essere compreso tra 2 e 3;
- la girante deve essere dotata di pale inclinate in grado di creare grandi turbolenze e deve essere posizionata al centro del serbatoio durante la preparazione della malta;
- la distanza tra la girante e il fondo del serbatoio dovrebbe essere tale da evitare un impatto durante la rotazione;

- il rapporto tra il diametro del serbatoio e quello della girante deve essere di circa 2 per ottenere una buona turbolenza nel serbatoio.

La procedura di miscelazione seguita, definita procedura B, è la seguente:

- aggiunta di bentonite all'acqua in agitazione ad una velocità di 800 rpm,
- agitazione del composto per 7 minuti a 2000 rpm,
- aggiunta del cemento e agitazione per 3 minuti a 2000 rpm,
- aggiunta del ritardante e agitazione per 2 minuti a 2000 rpm.

In laboratorio, per prima cosa, si determina il peso di ciascun costituente a partire dal volume di componente A realizzabile. A tal proposito si dispone di un contenitore di circa 7dm³, con un diametro di 210 mm e un'altezza di 240mm ragion per cui è possibile miscelare fino a tre litri di componente A per volta; il completamento al m³ viene sempre effettuato mediante l'aggiunta di acqua (Tabella 13).

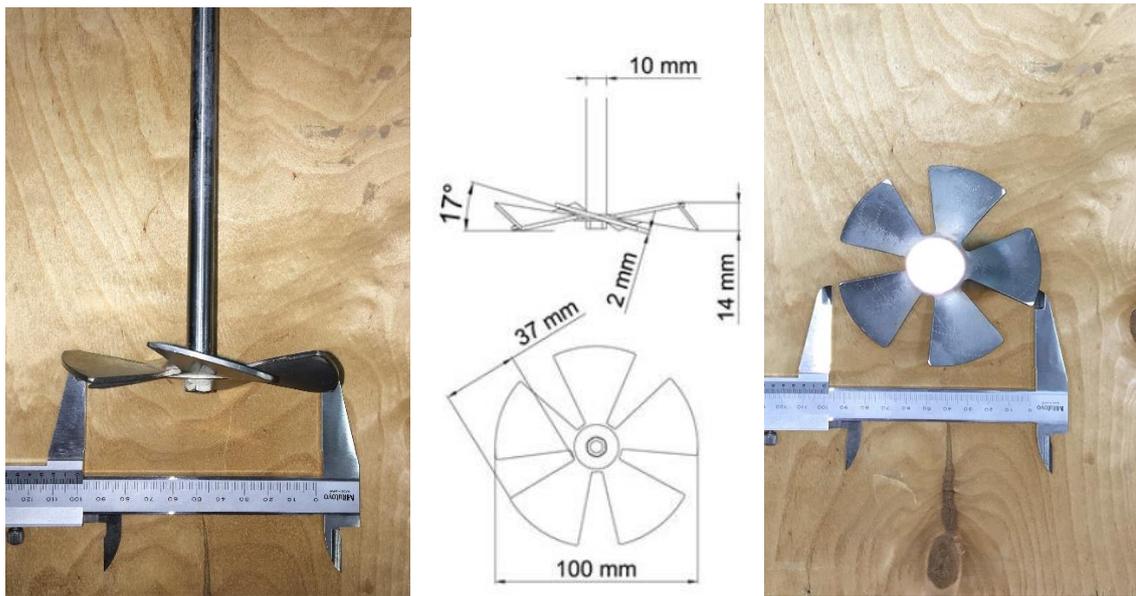
Tabella 13 - Componente A per un volume di 3 litri

Acqua (g)	2552
Bentonite Clariant (g)	90
Cemento (g)	690
Ritardante (g)	10,98

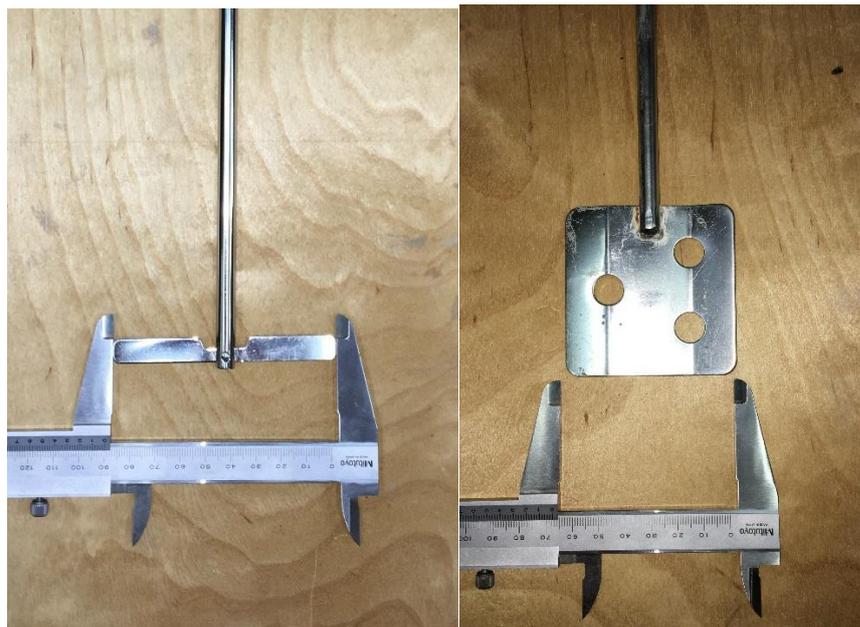
Il processo di miscelazione è stato eseguito con un agitatore digitale rotazionale Agolab AM20-D (Figura 25) ed un accessorio con una lama di rivestimento. A questo intento in laboratorio sono state scelte tre diverse lame con cui sono state eseguite le miscele (Figura 26).



Figura 25 - Agitatore digitale Agolab AM20-D



(A)



(B)

(C)

Figura 26 - Lame per la miscelazione

(A): Elica 'standard' (B): Elica 'con due alette mobili' (C) Elica rettangolare 'con 3 fori'

I risultati ottenuti, riportati nei paragrafi seguenti, hanno dimostrato come l'utilizzo dell'elica A conduce a risultati confrontabili con quelli forniti dal committente, invece l'uso dell'elica B e C non consente di ottenere una miscela omogenea ragion per cui da adesso in avanti tutte le miscelazioni sono eseguite con l'elica A.

Ora, una volta verificata l'elica da utilizzare, si è cambiata procedura di miscelazione a dimostrazione del fatto che essa influenza in maniera significativa la qualità finale del mix; si riporta di seguito la procedura A:

- aggiunta di bentonite all'acqua in agitazione ad una velocità di 800 rpm,
- agitazione del composto per 7 minuti a 2000 rpm,
- aggiunta del ritardante ed agitazione per 2 minuti a 2000 rpm,
- aggiunta del cemento ed agitazione per 3 minuti a 2000 rpm.

I risultati ottenuti, riportati nei paragrafi seguenti, dimostrano che l'uso della procedura A comporta uno scostamento sostanziale dai risultati attesi, al contrario l'utilizzo della procedura B conduce ai risultati attesi.

5.3 Prove su componente A

5.3.1 Determinazione della densità

La densità, o più precisamente, la densità di massa volumetrica di una sostanza è la sua massa per unità di volume. In conformità con la norma EN 1015-6 si effettuano tre misurazioni del peso dopo un'attesa di 5 minuti al fine di consentire la risalita delle bolle d'aria. L'equipaggiamento usato per determinare la densità è il seguente (Figura 27):

- Bilancia: bilancia KERN 572-39 con una precisione di 0,01 g;
- Matraccio tarato: di vetro, con un volume di 250 ml (V).



Bilancia KERN 572-39



.Matraccio tarato

Figura 27 - Equipaggiamento per la determinazione della densità

La procedura prevede, in primo luogo, di pesare il contenitore vuoto (w), quindi ripetere l'operazione pesando il recipiente pieno di componente A fino alla tacca di 250 ml. Una volta determinato il peso (W) del recipiente pieno, la densità (d) può essere determinata come segue:

$$d = \frac{W - w}{V}$$

5.3.2 Determinazione della fluidità con cono di Marsh

Per la misura di fluidità, invece di eseguire test di viscosità standard con viscosimetro, metodo più accurato ma più lungo e complesso, il metodo di prova usato è quello del cono di Marsh (UNI 11152-13). Questo test è semplice ed affidabile; consente di comprendere le proprietà reologiche di cementi e malte. Il tempo di scorrimento della malta attraverso il cono di Marsh (Figura 28) è un indicatore della viscosità della malta. Il cono è costituito da un recipiente conico in ottone, tenuto su da un supporto, con un orifizio di 4,8mm nella parte terminale. Un cronometro è necessario per misurare il tempo impiegato da un litro di malta per passare attraverso il recipiente. Questo test viene eseguito in momenti diversi di maturazione del componente A, in particolare a 0, 24, 48 e 72 ore. Il contenitore in cui si trova la miscela ha una capacità di circa 7dm³ e deve essere sigillato dopo ogni misura in maniera tale da preservare la malta. Il campione utilizzato per questo test è di due litri e prima del ripetere la prova è necessario miscelare manualmente per un minuto.

Questo parametro è molto importante per due ragioni: in primo luogo, questo materiale deve essere pompato per una lunga distanza (dallo stabilimento di produzione, al di fuori del tunnel, al fronte di scavo) motivo per cui una adeguata fluidità deve essere garantita; in secondo luogo, nel caso in cui la TMB avesse bisogno di una riparazione o un eventuale arresto dovrebbe essere richiesto, la fluidità per un determinato tempo deve essere assicurata in modo da evitare l'intasamento delle linee.



Figura 28 - Test di fluidità. Il riempimento del cono Marsh e le misure del flusso sono mostrati rispettivamente al centro e a destra.

5.3.3 Determinazione del bleeding

Il valore del bleeding (o bleeding) è un indice percentuale, calcolato come rapporto tra i volumi di acqua ‘perduta’ e il volume di miscela quando il mix rimane fermo in un contenitore standardizzato alla temperatura di 20° +/- 2°. L'attrezzatura utilizzata per questa prova consiste in un contenitore cilindrico con una capacità di un litro e un diametro di 60 mm. L'acqua ‘perduta’ è l'acqua che si è separata dalla miscela in un intervallo di tempo specifico (Figura 29). La determinazione del bleeding è eseguita in accordo con la norma UNI 11152-11; sono utili misurazioni dell'acqua rilasciata dopo 1, 3 e 24 ore dalla produzione. La miscela viene inserita nella provetta, appena preparata, facendo scorrere attraverso le pareti del contenitore fino alla tacca di 1 litro. Il contenitore deve essere coperto in modo impermeabile e lasciato in un luogo privo di vibrazioni per tutti il periodo di prova. La misura del volume della fase acquosa (ΔV_t) è fatto al momento corrispondente (t). La decantazione (DEC_t) è stata misurata come la percentuale del volume di acqua ‘perduta’ rispetto al volume iniziale della miscela (V):

$$DEC_t = \frac{\Delta V_t}{V} \cdot 100$$



Prima

Dopo

Figura 29 - Bleeding test

Il capitolo raccomanda un valore di bleeding massimo dell'8% poiché un bleeding eccessivo conduce ad un mix non stabile.

5.4 Prove su bicomponente (componente A+B)

5.4.1 Gel time

Il tempo di gelificazione è il tempo in cui il mix, una volta che il componente B è stato aggiunto, perde completamente le sue proprietà di fluidità ed acquisisce una consistenza da gel per alcuni secondi fino a diventare un solido. Non ci sono metodi standard per misurare il gel time, di conseguenza si procede applicando la metodologia suggerita dai fornitori di questo prodotti: 200 grammi di componente A sono inseriti in un contenitore da 400 ml, e in un altro bicchiere, con la stessa capacità, il componente B (accelerante). Un mix veloce dei due componenti viene eseguito, il processo inizia con lo sversamento del componente A nel recipiente in cui si trova il componente B per garantire la giusta turbolenza; quindi sversamenti consecutivi da un contenitore ad un altro vengono fatti. Un cronometro è utilizzato per misurare il tempo a partire da quando i componenti entrano in contatto fino a quando la malta non fluisce più da un bicchiere all'altro.



Figura 30 - Esecuzione prova di gel time

5.4.2 Prove di resistenza a compressione

A causa della mancanza di standard per il test di resistenza a compressione su questo tipo di malta (più simile ad un'argilla dura più che a un cemento debole) è stata utilizzata la norma UNI EN 196-1 poiché è semplice da applicare. Sebbene questo norma, a rigore, non sia applicabile alle malte con tempi di presa molto brevi, può essere adattata alle esigenze specifiche della malta bicomponente. Secondo questo precetto i campioni da produrre devono avere dimensioni di 160x40x40mm (Figura 31).



Figura 31 - Stampo di polistirolo 160x40x40 mm

La preparazione del campione non è facile con questo tipo di mix poiché richiede di riempire lo stampo in un tempo molto breve (prima che il processo di gelificazione sia iniziato). Si preparano generalmente 350 grammi di componente A in un recipiente e il corrispettivo di componente B (per il mix design 2 sono 26 grammi) in un altro contenitore. A questo punto si getta il componente A all'interno del componente B (mai viceversa poiché altrimenti non si genera la giusta turbolenza) e si ripete l'operazione; infine si getta il mix all'interno dello

stampo cercando di creare un flusso continuo. Dopo il riempimento dello stampo si rimuove il materiale in eccesso dalla superficie superiore, tramite una spatola. Dopodiché gli stampi sono sigillati ermeticamente al fine di evitare perdite di acqua dovute all'evaporazione e vengono lasciati indurire per 24 ore con una temperatura dell'aria fissa a 25°. Questo periodo di maturazione è fondamentale per poter eseguire l'operazione di sformatura senza danneggiare i campioni, appunto dopo 24 ore di maturazione. I campioni, a questo punto, se devono essere testati a 28 giorni, si lasciano stagionare in acqua potabile pulita con una temperatura fissa di 25 °.

Per la valutazione della resistenza a compressione a breve termine vengono eseguite prove penetrometriche a 1 e 3 ore dalla preparazione dei campioni e test di compressione monoassiale con pressa a 3, 24 ore, per quella a lungo termine si eseguono prove di compressione monoassiale ai 28 giorni.

Per le prove penetrometriche campioni di 40 mm x 40 mm x 160 mm sono prodotti versando la malta bicomponente in colata dentro lo stampo di polistirolo immediatamente dopo che il componente A è stato versato all'interno del bicchiere con l'accelerante e viceversa. Per ogni campione 3-4 prove distribuite lungo la superficie di getto del provino-vengono eseguite, l'uso di scraper o di tavole vibranti non è consentito dato il breve tempo di solidificazione della malta. L'apparecchio utilizzato per misurare la resistenza è un dinamometro modello calibro digitale SAUTER attrezzato con disco sagomato (Figura 32). Questo dispositivo misura la forza richiesta per penetrare il campione per 5mm (F_p). Questo consente di calcolare la resistenza a compressione superficiale come mostrato di seguito:

$$f'_c = \frac{F_p}{A_d}$$

con:

f'_c è la resistenza a compressione

F_p è la forza di picco

A_d è la superficie del disco

Si poggia lo strumento perpendicolarmente alla superficie del provino e si applica manualmente una pressione; viene misurata la forza di picco che consente di penetrare di 5 mm nella malta bicomponente (Figura 32).

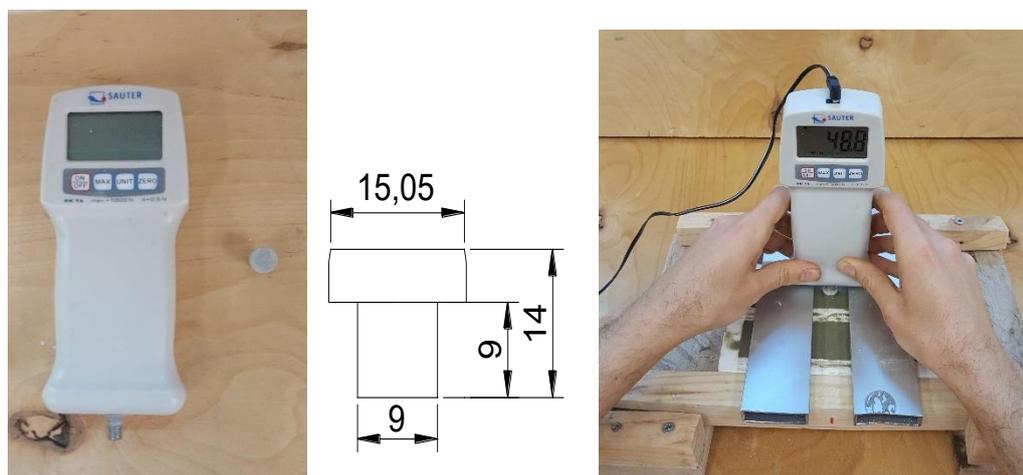


Figura 32 - Dettagli prova

Dinamometro

Disco sagomato (mm)

Prova penetrometrica in corso

Lo stampo in polistirolo è circondato da una struttura in legno in grado di evitare gli eventuali spancamenti dovuti all'applicazioni del carico del penetrometro in modo da impedire le deformazioni del cassero. Inoltre, due guide in acciaio sono utilizzate per evitare che durante la prova il disco possa penetrare il campione oltre i 5 mm.

I test di compressione monoassiali vengono eseguiti su campioni con tempi di maturazione diversi: 3, 24 ore e 28 giorni. Le prove di compressione eseguite secondo la UNI EN 196-1 sono facili da applicare per campioni trattati a 28 giorni mentre per campioni con tempo di indurimento di sole 24 ore, non è possibile dividerli per flessione su tre punti a causa della debolezza superficiale. Un tempo di indurimento di 24 ore, infatti, non è sufficiente a fornire una resistenza sufficiente al campione di malta bicomponente indurito, pertanto, le forze applicate dal test di flessione di tre punti causerebbero l'indentazione degli strumenti all'interno dei campioni, senza flessione. Per questa limitazione tecnica, al fine di ottenere semi-campioni richiesti dalla UNI EN 196-1, si utilizza preventivamente una lama da taglio. Per campioni con tempo di maturazione di 3 ore, non è possibile applicare direttamente la UNI EN 196-1 e inoltre non è possibile ottenere i due semi-campioni tagliandoli. Per ovviare al problema, uno speciale stampo è stato progettato con uno strato plastificante impermeabile situato sui terzi della lunghezza del campione, al fine di ottenere 3 campioni compatibili all'uso del compressore previsto dalla UNI EN 196-1 (Figura 33).



Figura 33 - Stampi speciali per test a compressione a $t=3h$

Una volta ottenuti i campioni, la campagna di prova di compressione uniassiale è avviata utilizzando una macchina per prove di compressione non confinata. Per eseguire il test è stata utilizzata una pressa Wykeham-Ferrance (Figura 34A): per campioni maturati 3 ore essa avanza con una velocità di compressione compresa di 0,25 mm/min, invece una velocità di 0,5 mm / min per campioni maturati 24 ore e 28 giorni. Sono state utilizzate piastre 40x40 mm per distribuire il carico sul campione, esso si applica attraverso una piastra di distribuzione di 1 cm di spessore collegata alla struttura con un giunto sferico (Figura 34B).



Figura 34 - Pressa ed accessori

(A): pressa Wykeham-Ferrance

(B):piastre distribuzione carichi

La resistenza a compressione può essere calcolata come segue:

$$f'_c = \frac{F_p}{A}$$

con:

f'_c è la resistenza a compressione

F_p è la forza di picco

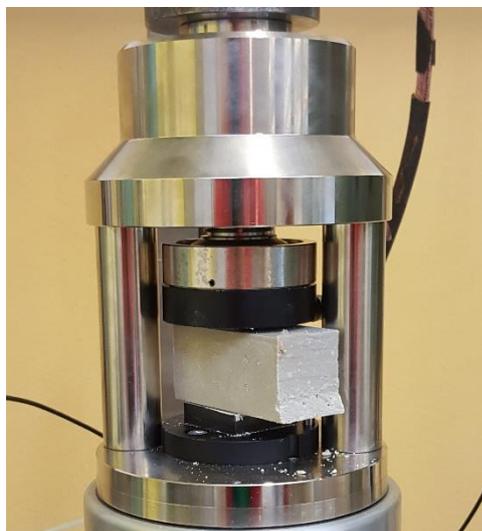
A_d è la superficie del provino

Come già detto il campione 160x40x40mm maturato 28 giorni viene sottoposto a flessione su tre punti (Figura 35A) da cui si ricavano i semi-campioni da sottoporre a compressione (Figura 35A'). Per alcune prove di compressione si è potuto utilizzare un compressitore apposito (Figura 35B) che consente una maggiore precisione nella determinazione della curva tensioni-deformazioni.



(A)

(A')



(B)

Figura 35 - (A): flessore su 3 punti (A'): realizzazione semi-campioni (B) compressore

5.4.3 Prove di taglio

Per le prove di taglio si fa riferimento alle norme ISO 17892 – 10 del 2018 valide per campioni indisturbati, rimodellati, ricompattati o ricostruiti. Generalmente tre o più campioni vengono testati a pressioni verticali differenti. L'altezza minima del campione deve essere non inferiore ai 20 mm, le superfici del campione devono essere piane e perpendicolari. Bisogna inoltre prestare attenzione al contenuto d'acqua, il provino deve essere sempre essere protetto dalla disidratazione (Figura 36).

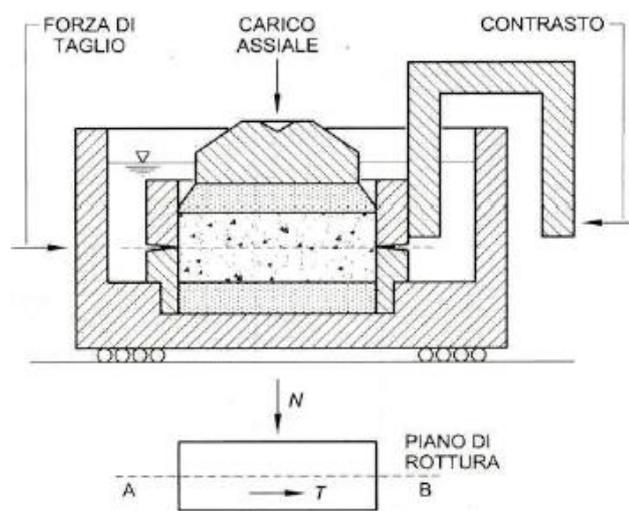


Figura 36 - Prova di taglio diretto

I campioni possono essere preparati in fustelle oppure direttamente all'interno della scatola di taglio. Nel primo caso se il materiale da testare è rigido la fustella deve essere più grande di 1 o 2 mm in modo da permetterne la rimozione sicura della fustella stessa, nel secondo caso bisogna immediatamente pesare scatola più provino.

Alcune misurazioni sono effettuate prima del test:

- pesare la scatola di taglio con tutti i dischi che si intende utilizzare con una approssimazione di 0,01 g in modo da determinare la massa iniziale del provino;
- calcolare l'altezza iniziale H_0 del provino e l'area A dello stesso (con precisione di 0,1 mm);
- calcolare il contenuto d'acqua w_0 .

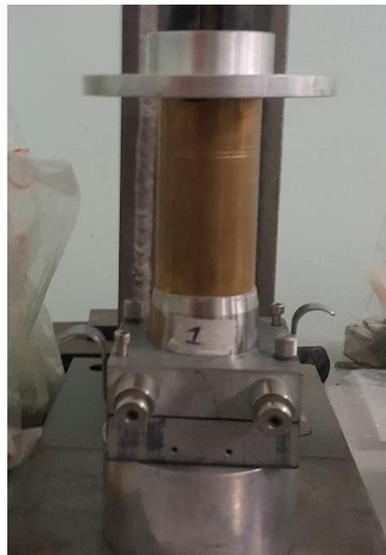
Quando si inserisce il provino all'interno della scatola di taglio le due metà devono essere bloccate. Se il provino non è stato preparato all'interno della scatola, adattarlo spingendo all'interno della scatola, dunque misurare il peso della fustella per conoscere m_0 (Figura 37).

Si lavora generalmente con provini sommersi in acqua. Se si usano i dischi porosi, bisogna rimuovere l'acqua di superficie in eccesso dal campione prima di montare su di esso i dischi.



(A)

(B)



(C)

Figura 37 - Fase preliminari prova di taglio

(A): Pesatura (B): Scatola di taglio e fustella (C) Fase di inserimento nella scatola

Prima di procedere alla prova di taglio si effettua una fase di consolidazione: essa consiste nell'applicare una pressione verticale ad un provino cilindrico di terreno in condizione di espansione laterale impedita, in modo da permettere il drenaggio dell'acqua nella sola direzione verticale attraverso due pietre porose. Dall'istante di applicazione della pressione verticale vengono misurati i cedimenti verticali che ne conseguono, da cui si può stimare il tempo di prima consolidazione t_c . Dopodiché si calcola il minimo tempo di rottura t_f ossia il tempo per mobilitare la massima resistenza a taglio del campione:

$$t_f = 13 t_c$$

Si può stimare la deformazione orizzontale di rottura a taglio s_f utilizzando valori presenti in letteratura se non si hanno conoscenze del materiale che si sta testando; nel caso in esame si stima per la malta bicomponente una s_f uguale ad un millimetro.

Si calcola la massima velocità a cui può essere eseguita la prova di taglio in condizioni drenate:

$$v_{max} = \frac{s_f}{t_f}$$

Durante la prova di taglio il carico verticale deve essere mantenuto costante, si eseguono prove con σ'_v di 50, 100, 200, 300 kPa (si considera nel computo del carico verticale il peso dato dalla parte della macchina che poggia sul piano di taglio). Prima di iniziare la prova di taglio si sbloccano le due metà della scatola tramite un sistema di viti e si alza leggermente la parte superiore in modo da rendere possibile la formazione di un piano di rottura orizzontale ed evitando la fuoriuscita di materiale. La velocità durante la prova è mantenuta costante, si sceglie una velocità inferiore alla velocità massima prima calcolata.

Durante la prova si effettuano letture di: spostamento orizzontale, spostamento verticale, sforzo di taglio (per provini fragili andrebbe registrato il valore di sforzo di taglio e di spostamento orizzontale in maniera più fitta possibile). Alla fine del test il picco è chiaramente determinato e una deformazione del 10% è stata raggiunta (5 mm di spostamento orizzontale).



Figura 38 - Macchina e scatola di taglio

Per il calcolo del valore residuo una volta terminata la prova, si riporta il provino nella posizione iniziale e si ripete la prova n-volte finché il valore di sforzo residuo si assesta. Si rimuove al termine della prova l'acqua in cui il provino era immerso.

Le prove di taglio sono state eseguite sul mix design 2 con tempi di maturazione di 1, 3, 24 ore e 28 giorni. La maturazione è avvenuta nelle fustelle fino a 24 ore, poi usciti dalle fustelle e immersi in acqua fino ai 28 giorni.

5.5 Risultati preliminari

Come detto, le proporzioni e i prodotti da utilizzare sono stati forniti dal committente (Tabella 13). Si riportano di seguito i risultati misurati in cantiere dallo stesso committente in termini di densità, fluidità e bleeding della componente A, gel time e resistenza a compressione (con penetrometro e con pressa) della malta bicomponente indurita (Tabella 14, Tabella 15, Tabella 16, Tabella 17, Tabella 18, Tabella 19, Tabella 20, Tabella 21).

Tabella 14 - Densità attesa

densità (kg/l)
1,2

Tabella 15 - Fluidità attesa

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	34
24	33
48	37
72	47

Tabella 16 - Bleeding atteso

tempo di maturazione (h)	bleeding (%)
1	0,60
3	1,39
24	4,88

Tabella 17 - Gel time atteso

TEST	Comp A (g)	Comp B (g)	% B/A	t gel (s)	t gel medio (s)
1	423	31	6,5	8,3	8,7
2	423	31	6,5	9,2	

Tabella 18 - Resistenza a compressione con penetrometro attesa (a t=1h)

Determinazioni con penetrometro a t= 1 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
53,0	0,30	0,31
47,0	0,26	
55,5	0,31	
66,0	0,37	

Tabella 19 - Resistenza a compressione con penetrometro attesa (a t=3h)

Determinazioni con penetrometro a t = 3 h(N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
173,0	0,97	0,94
164,0	0,92	
162,5	0,91	

Tabella 20 - Resistenza a compressione con pressa attesa (a t=24h)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	1630,9	1,02	1,04
2	1790,3	1,12	
3	1643,2	1,03	
4	1667,7	1,04	
5	1606,4	1,00	

Tabella 21 - Resistenza a flessione e compressione con pressa attesa (a t=28gg)

Prova n°	Forza di picco misurata per flessione (N)	Resistenza a flessione (MPa)	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	153	0,36	2812	1,76	1,78
			2969	1,86	
2	137	0,32	2533	1,58	
			2916	1,82	
3	152	0,36	2992	1,87	
			2240	Provino non ritenuto valido per danneggiamento esterno	

5.5.1 Eliche diverse

Noto il mix design e nota la procedura di miscelazione ‘standard’ sono state eseguite tre campagne prove complete con tre eliche diverse (Figura 26). Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Densità (Tabella 22, Tabella 23, Tabella 24)

- Elica standard

Tabella 22 - Densità ottenuta con elica standard

densità (kg/l)	1,14
	1,20
	1,18
media (kg/l)	1,17

- Elica con due alette mobili

Tabella 23 - Densità ottenuta con elica con due alette mobili

densità (kg/l)	1,24
	1,17
	1,17
media (kg/l)	1,19

- Elica con rettangolare e 3 fori

Tabella 24 - Densità ottenuta con elica rettangolare e 3 fori

densità (kg/l)	1,17
	1,18
	1,19
media (kg/l)	1,18

I risultati ottenuti sono simili e non si discostano molto dal valore ricavato in situ.

Fluidità (Tabella 25, Tabella 26, Tabella 27)

- Elica standard

Tabella 25 - Fluidità ottenuta con elica standard

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	35
24	41
48	43
72	51

- Elica con due alette mobili

Tabella 26 - Fluidità ottenuta con elica con due alette mobili

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	30
24	32
48	28
72	31

- Elica con rettangolare e 3 fori

Tabella 27 - Fluidità ottenuta con elica rettangolare e 3 fori

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	30
24	33
48	34
72	34

Dai risultati ottenuti si nota come il mix realizzato con l'elica standard rispecchia la fluidità richiesta, la miscela infatti diminuisce la sua capacità di fluire passando dai 34 secondi della miscela appena realizzata ai circa 50 secondi dopo 72 ore di maturazione.

Nei valori di fluidità dei mix realizzati con l'elica a due alette mobili e con l'elica rettangolare a 3 fori si nota una sostanziale costanza dei tempi di efflusso nell'intorno dei 30 secondi. Questo dato suggerisce una possibile cattiva miscelazione dei componenti.

Bleeding (Tabella 28, Tabella 29, Tabella 30)

- Elica standard

Tabella 28 - Bleeding ottenuta con elica standard

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	0,8	0,03	0,30
3	3	0,11	1,04
24	6	0,21	2,09

- Elica con due alette mobili

Tabella 29 - Bleeding ottenuta con elica con due alette mobili

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	28	97,22	9,72
3	40	138,89	13,89
24	69	239,58	23,96

- Elica con rettangolare e 3 fori

Tabella 30 - Bleeding ottenuta con elica rettangolare e 3 fori

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	12	41,67	4,17
3	18	62,50	6,25
24	47	163,19	16,32

Il valore del bleeding, oltre ad essere un chiaro indice riguardo la buona realizzazione o meno della componente A, deve rispettare il limite dell'8% in volume dopo 24 ore poiché la separazione e la segregazione dei componenti genera complicazioni operative in cantiere. A tal proposito si nota come nel mix realizzato con l'elica a due alette questo limite viene superato già dopo un'ora mentre con l'elica rettangolare a 3 fori l'8% viene avvicinato dopo 3 ore per essere più che doppiato dopo 24 ore. Si può sintetizzare che queste due eliche non consentono un'opportuna miscelazione e data l'importanza della stessa queste soluzioni sono da escludere.

I valori ottenuti in laboratorio con l'elica standard sono parecchio inferiori a quelli ottenuti in cantiere; il dato è da considerarsi positivo, a vantaggio di sicurezza ed è dovuto alle differenti condizioni ambientali: infatti in laboratorio si è in condizioni del tutto controllate e si può mantenere facilmente costante la temperatura di prova a 25 °C, al contrario in sito il test è stato eseguito in pieno inverno in condizioni non semplici; per concludere la temperatura gioca un ruolo importante nella caratterizzazione della malta bicomponente.

Prove penetrometriche (Tabella 31, Tabella 32, Tabella 33, Tabella 34)

Si riportano ugualmente i risultati delle prove penetrometriche.

- Elica con due alette mobili

Tabella 31 - Prova penetrometrica t=1h ottenuta con elica con due alette mobili

TEST	1	2	3	4	5
CARICO (N)	74	65	95	/	/
RESISTENZA A COMPRESSIONE (MPa)	0,42	0,37	0,53	/	/
Resistenza media (Mpa)	0,44				

Tabella 32 - Prova penetrometrica t=3h ottenuta con elica con due alette mobili

TEST	1	2	3	4	5
CARICO (N)	270	306	308	275	/
RESISTENZA A COMPRESSIONE (MPa)	1,52	1,72	1,73	1,55	/
Resistenza media (Mpa)	1,63				

- Elica con rettangolare e 3 fori

Tabella 33 - Prova penetrometrica t=1h ottenuta con elica rettangolare a 3 fori

TEST	1	2	3	4	5
CARICO (N)	91,50	85,00	107,90	/	/
RESISTENZA A COMPRESSIONE (MPa)	0,51	0,48	0,61	/	/
Resistenza media (Mpa)	0,53				

Tabella 34 - Prova penetrometrica t=3h ottenuta con elica rettangolare a 3 fori

TEST	1	2	3	4	5
CARICO (N)	277,00	282,50	260,00	226,00	233,50
RESISTENZA A COMPRESSIONE (MPa)	1,56	1,59	1,46	1,27	1,31
MEDIA (Mpa)	1,44				

Dai risultati ottenuti si evince che una cattiva miscelazione non compromette la resistenza della malta bicomponente.

5.5.2 Procedure di miscelazione differenti

Una volta definita l'elica di riferimento si è dimostrato come la procedura di miscelazione incide in maniera preponderante sulle caratteristiche della malta bicomponente. A riguardo si sono definite due procedure: la procedura A e la procedura B

La procedura A prevede:

- aggiunta della bentonite all'acqua in agitazione ad una velocità di 800 rpm
- agitazione del composto per 7 minuti a 2000 rpm
- aggiunta del ritardante ed agitazione per 2 minuti a 2000 rpm
- aggiunta del cemento ed agitazione per 3 minuti a 2000 rpm

La procedura B, invece, prevede:

- aggiunta di bentonite all'acqua in agitazione ad una velocità di 800 rpm,
- agitazione del composto per 7 minuti a 2000 rpm,
- aggiunta del cemento e agitazione per 3 minuti a 2000 rpm,
- aggiunta del ritardante e agitazione per 2 minuti a 2000 rpm.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Fluidità (Tabella 35, Tabella 36)

Tabella 35 - Fluidità ottenuta con procedura A

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	43
24	54
48	Non fluisce
72	Non fluisce

Tabella 36 - Fluidità ottenuta con procedura B

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	34,5
24	41
48	43
72	51

Ci si è limitati alla determinazione della fluidità poiché i risultati mostrano chiaramente che seguendo la procedura A dopo 48 ore la componente A non scorre più tramite il cono di

Marsh; ciò in cantiere significherebbe l'intasamento delle linee e l'immediata interruzione dei lavori. La responsabilità della perdita di fluidità può essere attribuita alla minor attivazione della bentonite e all'aggiunta anticipata del ritardante. In definitiva si sottolinea ancora una volta l'importanza del processo di realizzazione della malta e come esso venga fortemente influenzata da molti fattori; da adesso si farà riferimento esclusivo alla procedura B.

5.5.3 Mix design diversi

Stabilita sia l'elica sia la procedura di miscelazione più performanti si indaga sui componenti della malta bicomponente. A partire dal mix design fornito dal committente (mix design 2) sono stati sviluppati i mix design 3 e 4 utilizzando lo stesso tipo di cemento ad alta resistenza (Buzzi CEM I 54.5 R) e bentonite di sodio (Clariant) cambiando per ogni miscela le quantità di cemento, bentonite, ritardante (CBS1 Mapei), accelerante (CBS3 Mapei) rimanendo nell'intorno del mix design 2. Il mix design 1 invece è lo stesso del mix di base ma utilizza un tipo di bentonite fornito da un fornitore diverso (Mapei) (Tabella 37).

Tabella 37 - Mix design sperimentati (*: bentonite fornito da Mapei)

MIX DESIGN	Cemento (kg)	Bentonite (kg)	Acqua (kg)	Ritardante (kg)	Accelerante (kg)
1	230	30*	853	3,5	81
2	230	30	853	3,5	81
3	230	28	819	5,0	90
4	260	28	819	2,5	80

Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Densità (Tabella 38)

Tabella 38 - Densità dei mix design

MIX DESIGN	DENSITA' (kg/l)
1	1,15
2	1,17
3	1,19
4	1,22

Le prove hanno dimostrato che la densità del componente A è relativamente costante per tutti e quattro i mix ed è principalmente influenzata dalla quantità di cemento nella miscela e dal rapporto acqua-cemento.

Fluidità (Tabella 39)

Tabella 39 - Fluidità dei mix design

MIX DESIGN	tempo di maturazione (h)			
	0	24	48	72
	Valori del tempo di efflusso (s)			
1	32	36	39	43,8
2	34.5	41	43	51
3	38	40	40	42
4	36	60	82	non fluisce

Il mix design 4 mostra problematicità tant'è che a 72 ore non è stato possibile effettuare il test, questo dipende dal rapporto acqua-cemento inferiore. Lo stesso mix ha tempi di efflusso molto più alti rispetto agli altri tre mix che a 24 ore mostrano un comportamento molto simile.

Bleeding (Tabella 40)

Tabella 40 - Bleeding dei mix design

MIX DESIGN	BLEEDING (%) t=3h	BLEEDING (%) t=24h
1	0,52	2,80
2	1,04	2,09
3	0,70	2,40
4	1,21	8,50

Per quanto riguarda il bleeding mentre i valori a breve termine (3 ore) sono quasi gli stessi per tutti i mix, anche se con valori leggermente più alti per i disegni 2 e 4, a lungo termine (24 ore) il mix design 4 mostra un bleeding molto più alto di tutti gli altri. Questo, ancora una volta, dipende dal rapporto acqua-cemento inferiore.

Gel time (Figura 39)

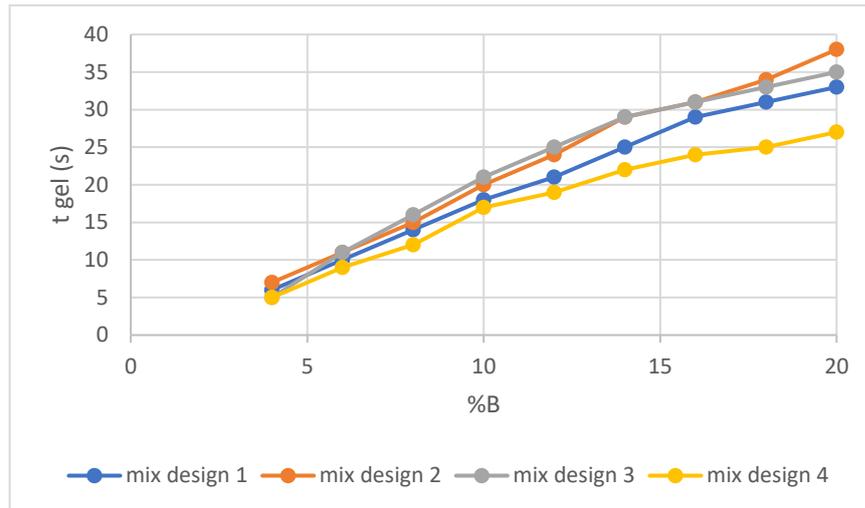


Figura 39 - Gel time dei mix design

Il gel time è stato valutato sia per il valore di progetto fornito dal committente (accelerante pari al 6% della miscela) sia per valori diversi, al fine di studiare l'influenza della percentuale del componente B sulla variazione del tempo di gelificazione. Questa informazione è molto importante per la gestione del lavoro in cantiere, dove stabilire il gel time è di fondamentale importanza per il corretto equilibrio tra evitare l'intasamento delle linee e ottenere una rapida presa della malta. È possibile vedere che aumentando la quantità di componente B si ha un aumento importante del tempo di gelificazione e che questo comportamento è più o meno simile per tutti i progetti di mix (Figura 5.14). È interessante osservare che l'effetto dell'accelerante è meno efficace sul mix design 4 che è anche quello con più cemento e meno acqua.

Resistenza a compressione (Figura 40)

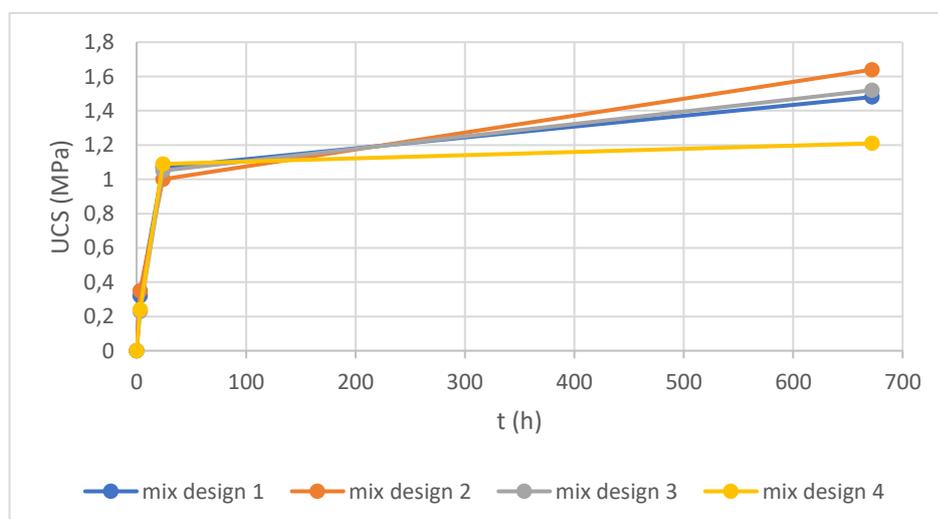


Figura 40 - Valori medi della resistenza a compressione monoassiale per i mix design

I test di compressione monoassiale mostrano che tutte i mix design raggiungono una resistenza a compressione di circa 1 MPa in 24 ore. Ai 28 giorni di maturazione i mix 1, 2 e 3 raggiungono 1,5 MPa invece il mix 4 non mostra crescita di resistenza rispetto a quella misurata alle 24 ore.

5.6 Risultati mix design 2

Si è detto quella che è l'elica da utilizzare, la procedura più performante, si è testato l'intorno del mix design fornito dal committente. Adesso si è esegue una intera campagna prove sul mix design 2. Si riportano i risultati ottenuti.

Densità (Tabella 41)

Tabella 41 - Densità del mix design 2

densità (kg/l)	1,14
	1,20
	1,18
media (kg/l)	1,17

Fluidità (Tabella 42)

Tabella 42 - Fluidità del mix design 2

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	34,5
24	41
48	43
72	51

Bleeding (Tabella 43)

Tabella 43 - Bleeding del mix design 2

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	0,8	0,03	0,30
3	3,0	0,11	1,04
24	6,0	0,21	2,09

Gel time (Tabella 44)

Tabella 44 - Gel time del mix design 2

t_{gel} (s)	8,5
t_{gel} (s)	7,5
t_{gel} (s)	8,0
media (s)	8,0

Resistenza a compressione

Prove penetrometriche (Tabella 45, Tabella 46)

Tabella 45 - Resistenza a compressione con penetrometro (a t=1h)

Determinazioni con penetrometro a t= 1 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
130	0,97	1,00
140	1,04	
138	1,02	
132	0,98	

Tabella 46 - Resistenza a compressione con penetrometro (a t=3h)

Determinazioni con penetrometro a t = 3 h(N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
186	1,38	1,37
177	1,31	
193	1,43	

Prove con pressa (Tabella 47, Tabella 48, Tabella 49)

Tabella 47 - Resistenza a compressione con pressa (a t=3h)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	699,0	0,33	0,35
2	760,3	0,36	
3	699,0	0,36	

Tabella 48 - Resistenza a compressione con pressa (a t=24h)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	2256,3	1,04	1,05
2	1974,3	1,03	
3	2256,3	1,06	

Tabella 49 - Resistenza a flessione e compressione con pressa (a t=28h)

Prova n°	Forza di picco misurata per flessione (N)	Resistenza a flessione (MPa)	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	130,3	0,31	2417	1,70	1,64
			2786	1,51	
2	188,5	0,44	2786	1,74	
			2694	1,68	
3	159	0,37	2871	1,79	
			2254	1,41	

La densità ottenuta è in linea con quella misurata in sito, inoltre anche i valori di fluidità misurati ai diversi tempi di prova sono congrui così come i tempi di gelificazione,

I valori di bleeding ottenuti in laboratorio sono inferiori a quelli ottenuti in cantiere; il dato è da considerarsi positivo, a vantaggio di sicurezza ed è dovuto alle differenti condizioni ambientali: infatti in laboratorio si è in condizioni del tutto controllate e si può mantenere facilmente costante la temperatura di prova a 25 °C, al contrario in sito il test è stato eseguito in pieno inverno in condizioni non semplici; per concludere la temperatura gioca un ruolo importante nella caratterizzazione della malta bicomponente.

I risultati delle prove penetrometriche a 1 e a 3 ore sono rispettivamente 1 MPa e 1,37 MPa. Sono resistenze più alte rispetto a quelle ottenute in cantiere, ovvero 0,31 MPa a 1 ora e 0,94 MPa a 3 ore. La risposta è dovuta alle condizioni di prova, maggiormente controllate in laboratorio e al fatto che sono state utilizzati penetrometri diversi. In definitiva le resistenze ottenute sono da considerarsi più che sufficienti.

Le resistenze ottenute con le prove di pressa sono 0,35 MPa a 3 ore, 1,05 MPa a 24 ore e 1,78MPa a 28 giorni. I risultati sono quelli attesi; si nota una importante differenza tra la resistenza a 3 ore ottenuta con il penetrometro e quella con la pressa dovuta alla differenza tra le due prove: l'idea è di trovare una correlazione tra i valori con penetrometro e quelli con pressa studiando il comportamento della malta bicomponente nell'intorno tra un'ora e tre ore.

Prove di taglio

Le prove sono state effettuate con il provino sommerso in acqua per evitare la disidratazione dello stesso e si è scelta una velocità di prova in grado di consentire che fosse eseguita in condizioni drenate.

Si riportano ora i risultati delle prove di taglio, a cominciare dalle prove effettuate su provini di malta bicomponente maturata 1 ora (Figura 41, Figura 42) (Tabella 50).

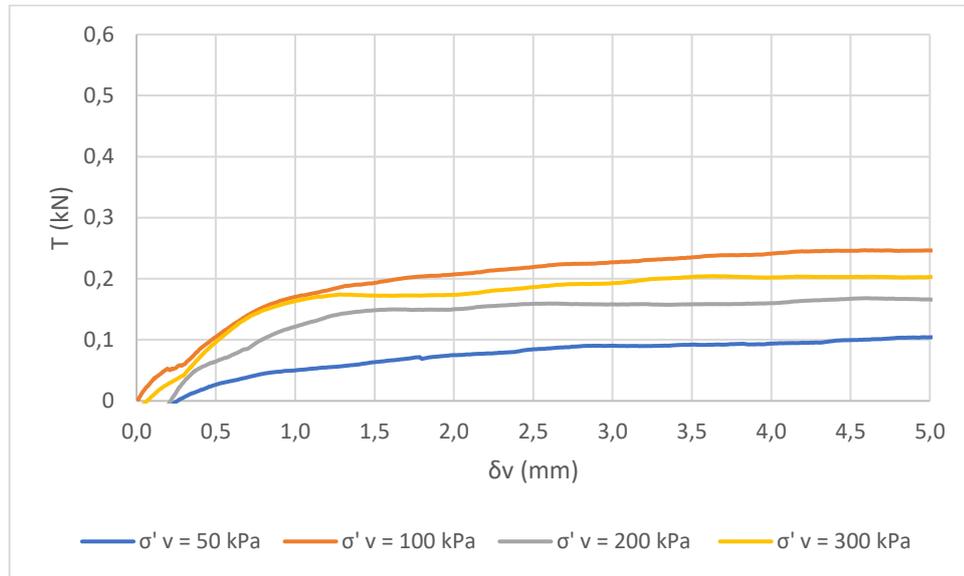


Figura 41 - Prova di taglio al variare di σ'_v su mix design 2 maturato 1 ora

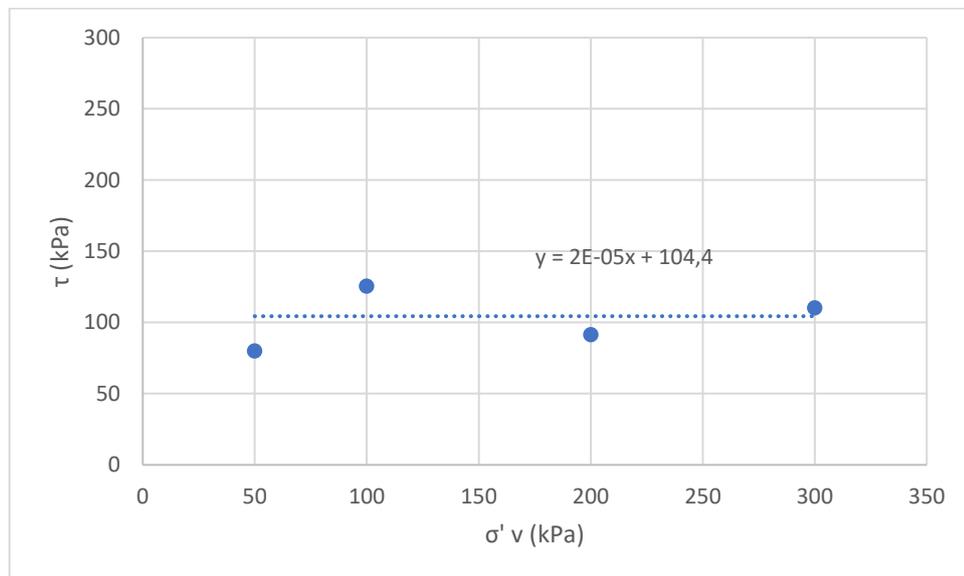


Figura 42 - Involuppo a rottura mix design 2 maturato 1 ora

Tabella 50 - Parametri di resistenza mix design 2 maturato 1 ora

c' (kPa)	ϕ' (°)
104,4	0,0

Si riportano i risultati sul mix maturato 3 ore (Figura 43Figura 44) (Tabella 51).

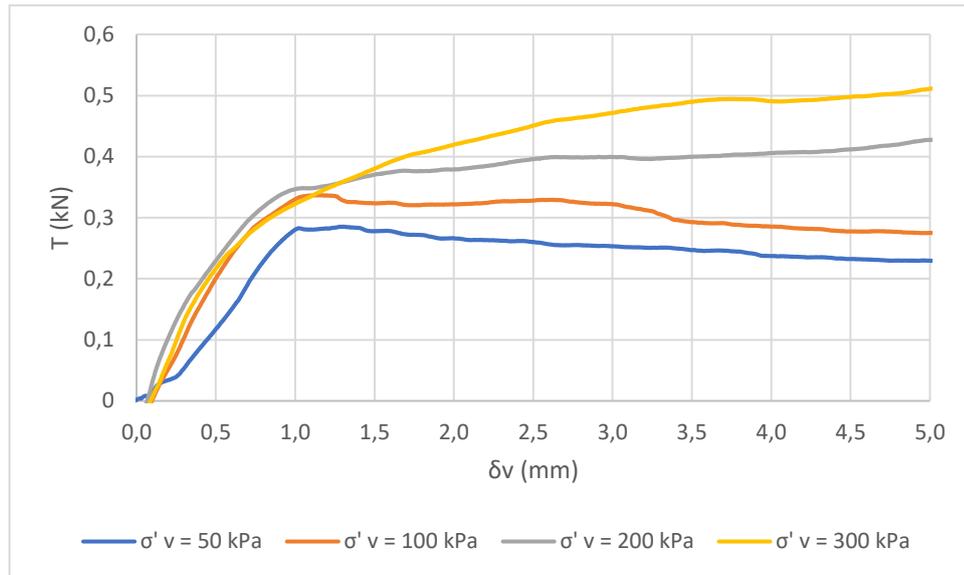


Figura 43 - Prova di taglio al variare di σ'_v su mix design 2 maturato 3 ore

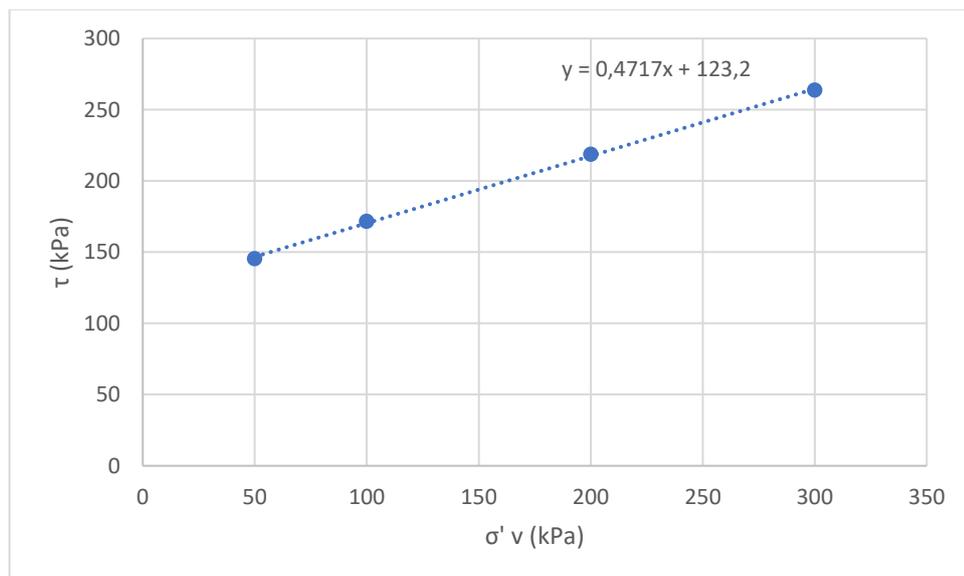


Figura 44 - Involuppo a rottura mix design 2 maturato 3 ore

Tabella 51 - Parametri di resistenza mix design 2 maturato 3 ore

c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)
123,2	25,3

Si riportano i risultati sul mix maturato 24 ore (Figura 45, Figura 46) (Tabella 52 - Parametri di resistenza mix design 2 maturato 24 ore).

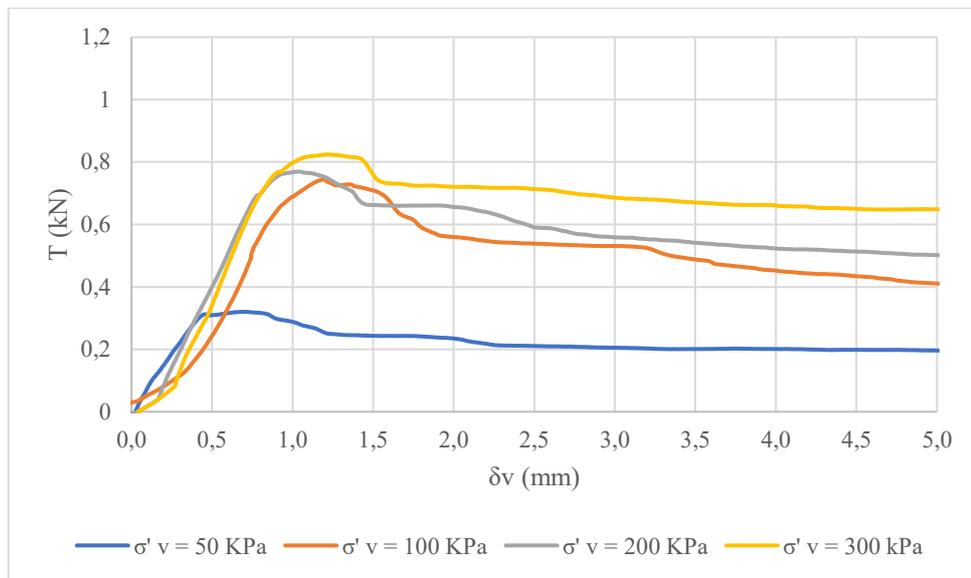


Figura 45 - Prova di taglio al variare di σ'_v su mix design 2 maturato 24 ore

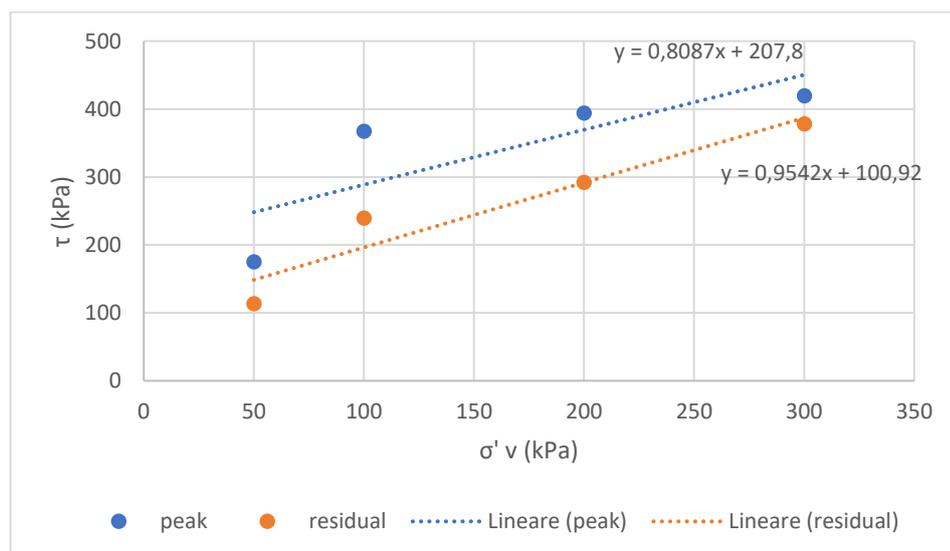


Figura 46 - Involuppo a rottura mix design 2 maturato 24 ore

Tabella 52 - Parametri di resistenza mix design 2 maturato 24 ore

c' (kPa)	ϕ' p(°)
207,8	39,0
c' r(kPa)	ϕ' r(°)
100,9	43,7

Si riportano i risultati sul mix maturato 28 giorni (Figura 47, Figura 48) (Tabella 53).

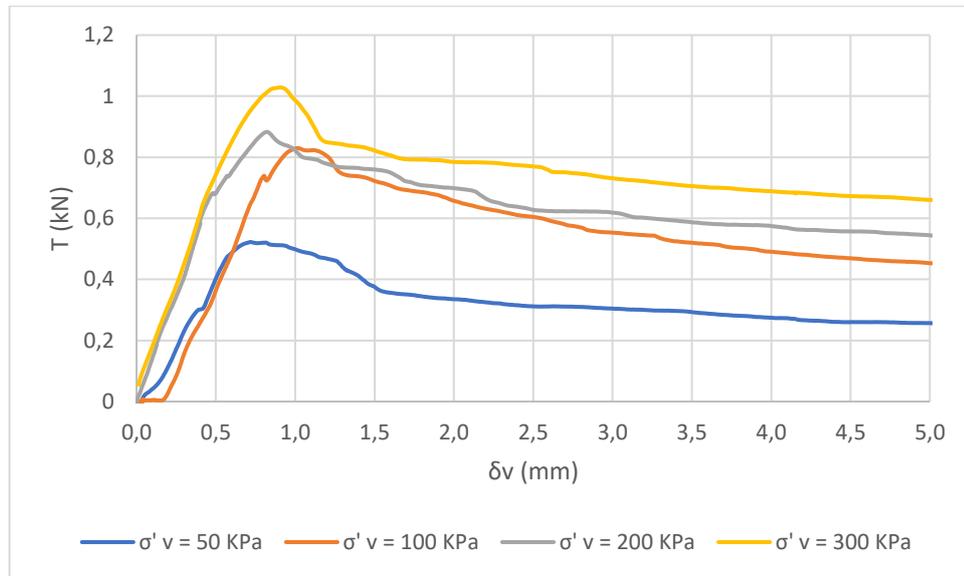


Figura 47 - Prova di taglio al variare di σ'_v su mix design 2 maturato 28 giorni

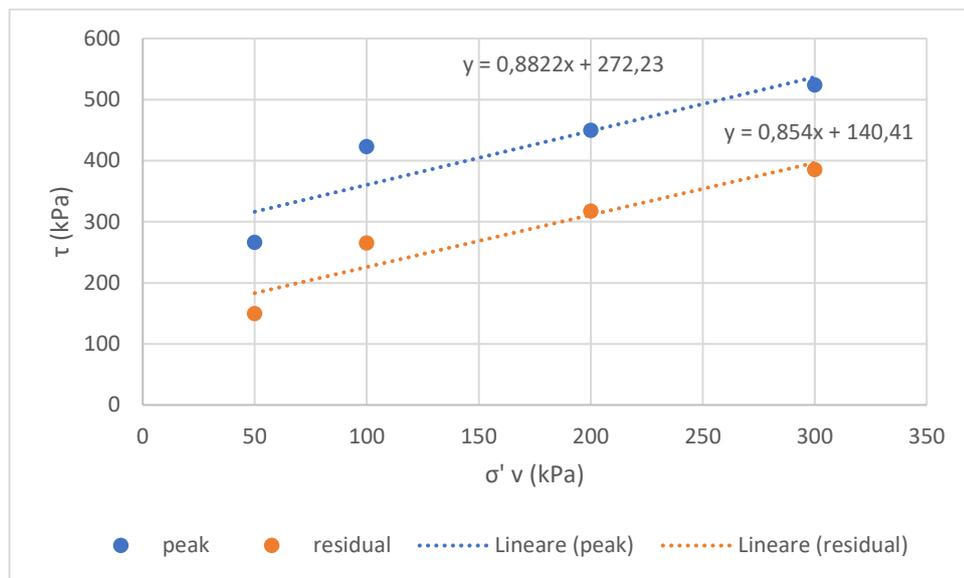


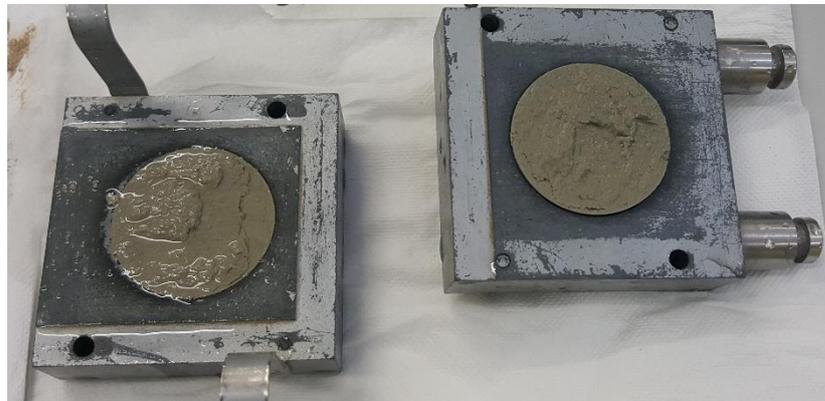
Figura 48 - Involuppo a rottura mix design 2 maturato 28 giorni

Tabella 53 - Parametri di resistenza mix design 2 maturato 28 giorni

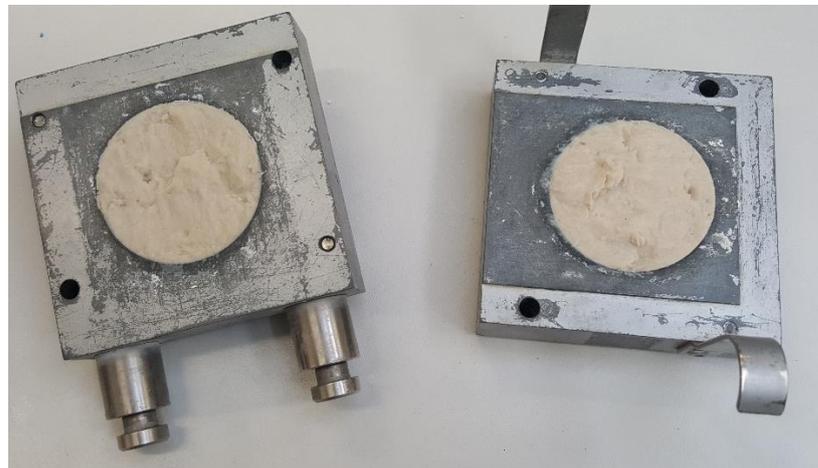
c' (kPa)	ϕ' p(°)
272,2	41,4
c' r(kPa)	ϕ' r(°)
140,41	40,5

Si può notare come la maturazione della malta influisca in modo importante sui parametri di resistenza, sia sulla coesione che sull'angolo di resistenza a taglio. Mentre le miscele maturate 1 ora e 3 ore raggiungono il valore massimo asintotico, i mix maturati 24 ore e 28 giorni mostrano prima un valore di picco e infine un valore 'residuo' (con picchi più marcati

per i provini a 28 giorni). [Per residuo, in questo lavoro, si intende la tensione raggiunta ad una deformazione del 10% ovvero 5 millimetri di spostamento orizzontale; a rigore il valore residuo si ottiene con altra procedura; al più si può determinare il valore a volume costante quando non c'è più variazione di volume ovvero quando gli spostamenti verticali diventano costanti]. Il motivo di questi differenti andamenti principalmente è dovuto ai tempi di maturazione: al passare del tempo, a parità di tensione normale, la malta raggiunge valori più alti di tensioni tangenziali, inoltre, a breve termine la malta è più debole ragion per cui la banda di taglio si forma più facilmente poiché le asperità vengono a rompersi piuttosto che scavalcate (Figura 49).



(a)



(b)

Figura 49 - (a): malta maturata 3 ore (b) malta maturata 28 giorni

Dagli involucri a rottura si nota invece come passando da 3 ore alle 24 ore c'è un aumento dei parametri di resistenza: da una coesione di circa 120 KPa ad un valore superiore ai 200 kPa e da un angolo di resistenza a taglio di 25° ad uno di circa 40°. Altro aspetto da sottolineare come non ci siano grosse variazioni dei parametri di resistenza tra un provino

maturato 24 giorni e uno maturato 28 giorni: c'è un aumento di coesione e una sostanziale costanza del angolo di resistenza, questo risultato conferma, assieme alle prove di compressione monoassiale, che la malta bicomponente dopo 24 ore ha già raggiunto circa i due terzi della resistenza finale.

Per ciò che riguarda l'involuppo a rottura del provino maturato 1 ora il criterio trovato è quello di Tresca con resistenza al taglio individuata dal valore della resistenza non drenata; la prova è stata effettuata in condizioni non drenate (elevata velocità di prova) poiché il provino nelle prime due ore cambia il suo comportamento istante per istante. Ciò è probabilmente dovuto all'effetto lubrificante del liquido in pressione interno alla malta.

5.7 Risultati mix con bentonite al 99% di montmorillonite

Si sostituisce la bentonite Clariant fornita dal committente con una bentonite con una percentuale di montmorillonite del 99% e si esegue una campagna prove. La bentonite usata si presenta di un colore più scuro, marrone, che ha conferito al componente A delle sfumature rossastre. Si riportano i risultati ottenuti.

Densità (Tabella 54)

Tabella 54 - Densità del mix con bentonite al 99% di montmorillonite

densità (kg/l)	1,15
	1,18
	1,19
media (kg/l)	1,17

Fluidità (Tabella 55)

Tabella 55 - Fluidità del mix con bentonite al 99% di montmorillonite

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	31
24	34
48	34
72	34

Bleeding (Tabella 56)

Tabella 56 - Bleeding del mix con bentonite al 99% di montmorillonite

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	0,5	1,74	0,17
3	2,0	6,94	0,69
24	14,0	48,61	4,86

Gel time (Tabella 57)

Tabella 57 - Gel time del mix con bentonite al 99% di montmorillonite

t _{gel} (s)	7,7
t _{gel} (s)	8,2
t _{gel} (s)	8,1
media (s)	8,0

Resistenza a compressione

Prove penetrometriche (Tabella 58, Tabella 59)

Tabella 58 - Resistenza a compressione con penetrometro (a t=1h)

Determinazioni con penetrometro a t= 1 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
19	0,11	0,25
55	0,31	
57	0,32	
50	0,28	

Tabella 59 - Resistenza a compressione con penetrometro (a t=3h)

Determinazioni con penetrometro a t = 3 h(N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
273,5	1,54	1,53
260	1,46	
284	1,60	

Prove con pressa (Tabella 60, Tabella 61)

Tabella 60 - Resistenza a compressione con pressa (a t=24h)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	1472	0,92	0,95
2	1552	0,97	
3	1488	0,93	
4	1568	0,98	

Tabella 61 - Resistenza a flessione e compressione con pressa (a t=28h)

Prova n°	Forza di picco misurata per flessione (N)	Resistenza a flessione (MPa)	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	130,8	0,31	2570	1,61	1,48
			2384	1,49	
2	215,0	0,5	2450	1,53	
			2469	1,54	
3	185,9	0,44	2202	1,38	
			2093	1,31	

I risultati ottenuti con l'utilizzo di bentonite al 99% di montmorillonite sono incoraggianti, infatti per il bleeding i valori misurati sono al di sotto del limite dell'8% e per la fluidità il valore massimo di efflusso ottenuto è di 34 secondi, Inoltre, sia la densità che il gel time non cambiano rispetto al mix design 2.

Per ciò che riguarda le resistenze: i valori ottenuti (circa 1 MPa a 24 ore, 1,5 MPa ai 28 giorni) sono in linea con le aspettative e garantirebbero alla malta la resistenza necessaria. In definitiva l'utilizzo di una bentonite al 99% naturale non cambia le caratteristiche della malta bicomponente ragion per cui laddove si ponesse la questione ambientale l'utilizzo di una bentonite environmental-friendly potrebbe essere la soluzione.

5.8 Risultati mix con cemento*

Si utilizza ora un cemento di egual resistenza (CEM I 54.5 R) proveniente da un nuovo bancale; tale cemento è stato denominato cemento*. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Bleeding (Tabella 62)

Tabella 62 - Bleeding del mix con bentonite al 99% di montmorillonite

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	18,0	60,81	7,83
3	25,0	84,46	10,87
24	61,0	206,07	26,52

Gel time (Tabella 63)

Tabella 63 - Gel time del mix con bentonite al 99% di montmorillonite

t _{gel} (s)	6,0
t _{gel} (s)	5,5
t _{gel} (s)	5,0
media (s)	5,5

Si osservano risultati in termini di bleeding e gel time completamente diversi rispetto a quelli ottenuti dal mix design 2: già dopo un'ora il bleeding ha raggiunto il limite dell'8%, inoltre il tempo di gelificazione è talmente basso da non consentire al mix di ben posizionarsi attorno ai conci. Ciò dimostra come la malta bicomponente sia affetta da grande variabilità, basta infatti cambiare bancale di cemento per rischiare la separazione dei componenti della malta. In cantiere dunque c'è la necessità di controllare ogni fase per evitare ad esempio l'intasamento delle linee: dalla fornitura e stoccaggio dei materiali fino alla miscelazione e alla conservazione della malta.

5.9 Mix con FR10

Per venire incontro alle esigenze di alcuni cantieri in cui risultava difficile l'approvvigionamento della bentonite (Lima, 2018) il tentativo è quello di sostituire la bentonite con un polimero definito FR10. Si riporta il mix design di partenza (Tabella 64)

Tabella 64 - Mix design con FR10

Componente A	Acqua (kg)	859
	Mapedrill FR10 (kg)	5
	Cemento (kg)	230
	Ritardante (kg)	3,5
Componente B	Accelerante (kg)	81

Il completamento al m³ viene sempre effettuato mediante l'aggiunta di acqua, in laboratorio si ottengono 3 litri di miscela (Tabella 5.38).

Tabella 65 - Tre litri di componente A con 5 kg/m³ di FR10

Acqua (g)	2577
Mapedrill FR10 (g)	15
Cemento (g)	690
Ritardante (g)	11

La procedura di miscelazione con il polimero FR10 è la seguente:

- si prepara il quantitativo d'acqua da mix design;
- si aggiunge all'acqua la corretta quantità di polimero, con una agitazione di 800rpm;
- si alza la velocità a 2000 rpm, e si mantiene per 7 minuti;
- si aggiunge il cemento e si miscela per 3 minuti alla velocità di 2000 rpm;
- si aggiunge il ritardante e si miscela per 2 minuti alla velocità di 2000 rpm.

La sostituzione avviene secondo le regole classiche, ossia, bisogna individuare il minimo dosaggio dell'FR10 tale da garantire le richieste di capitolato, in particolare al valore limite del bleeding (Tabella 66).

Tabella 66 - Bleeding del mix con 5 kg/m³ di FR10

5kg/m³ FR10	tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
	1	1	3,48	0,35
	3	60	209,06	20,91
	24	137	477,35	47,74

Passate 24 ore quasi la metà della miscela si è separata, occorre dunque aumentare la percentuale di polimero nel mix: si eseguono prove con 6, 7, 8, 9 e 10 kg/m³ di FR10, si riportano i mix design (Tabella 67)

Tabella 67 - Tre litri di componente A con differenti kg/m^3 di FR10

	FR10				
	6 kg^3	7 kg^3	8 kg^3	9 kg^3	10 kg^3
Acqua (g)	2575	2572	2570	2568	2565
Mapedrill FR10 (g)	18	21	24	27	30
Cemento (g)	690	690	690	690	690
Ritardante (g)	11	11	11	11	11

Si riportano ora i risultati (Tabella 68).

Tabella 68 - Bleeding del mix con differenti kg/m^3 di FR10

6 kg/m^3 FR10	tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
		1	2	7,33
	3	28	102,56	10,26
	24	93	340,66	34,07
7 kg/m^3 FR10	tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
	1	2	7,04	0,70
	3	20	70,42	7,04
	24	80	281,69	28,17
8 kg/m^3 FR10	tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
	1	1	3,48	0,35
	3	11	38,32	3,83
	24	56	195,1	19,51
9 kg/m^3 FR10	tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
	1	1,0	3,48	0,35
	3	6,0	20,90	2,09
	24	30,8	107,31	10,73
10 kg/m^3 FR10	tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
	1	0,5	1,74	0,17
	3	2,0	6,96	0,70
	24	10,4	36,23	3,62

Le performance del componente A in termini di bleeding migliorano di volta in volta rispetto al dosaggio ottenuto con 5 kg/m^3 , passando da un 34% del mix con 6 kg/m^3 fino a meno del 4% della miscela con 10 kg/m^3 .

Si riportano inoltre i risultati in termini di densità (Tabella 69) e resistenza a compressione (Tabella 70, Tabella 71, Tabella 72, Tabella 73, Tabella 74, Tabella 75) per comprendere al meglio le caratteristiche della malta ottenuta.

Tabella 69 - Densità del mix con differenti kg/m^3 di FR10

densità media (kg/l)	FR10					
	5 kg/m^3	6 kg/m^3	7 kg/m^3	8 kg/m^3	9 kg/m^3	10 kg/m^3
	1,12	1,14	1,12	1,15	1,13	1,11

Tabella 70 - Resistenza a compressione con pressa mix con 5 kg/m^3 ($t=28\text{gg}$)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	1323	0,83	0,88
2	1248	0,78	
3	1536	0,96	
4	1280	0,8	
5	1680	1,05	
6	1376	0,86	

Tabella 71 - Resistenza a compressione con pressa mix con 6 kg/m^3 ($t=28\text{gg}$)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	1280	0,80	0,77
2	1344	0,84	
3	1216	0,76	
4	1216	0,76	
5	1088	0,68	
6	1216	0,76	

Tabella 72 - Resistenza a compressione con pressa mix con 7 kg/m³ (a t=28gg)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	1232	0,77	0,75
2	1264	0,79	
3	1024	0,64	
4	1040	0,65	
5	1360	0,85	
6	1248	0,78	

Tabella 73 - Resistenza a compressione con pressa mix con 8 kg/m³ (a t=28gg)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	960	0,60	0,65
2	1152	0,72	
3	1072	0,67	
4	880	0,55	
5	992	0,62	
6	928	0,58	

Tabella 74 - Resistenza a compressione con pressa mix con 9 kg/m³ (a t=28gg)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	1168	0,73	0,70
2	1488	0,93	
3	688	0,43	
4	1168	0,73	
5	960	0,60	
6	1200	0,75	

Tabella 75 - Resistenza a compressione con pressa mix con 10 kg/m³ (a t=28gg)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	880	0,55	0,72
2	1104	0,69	
3	1184	0,74	
4	1168	0,73	
5	1312	0,82	
6	1264	0,79	

I risultati in termini di densità variano tra 1,11 e 1,15 kg/l a seconda della concentrazione di FR10 e comunque risultano essere più bassi del valore ottenuto con il mix design 2 ovvero 1,17 kg/l. Ciò è dovuto alla presenza dell'aria inglobata all'interno della malta (Figura 50).



Figura 50 - Bolle d'aria inglobate all'interno della malta

I valori di resistenza determinati con prove di pressa a 28 giorni sono anch'essi influenzati dalla presenza delle bolle al suo interno (Figura 51) con valori che non superano mai 0,90 MPa, risultato al di sotto delle aspettative. L'unica miscela che ha superato la prescrizione di capitolato dell'8% massimo di bleeding è quella con 10 kg/m³, si riportano di seguito i risultati ottenuti non ancora riportati.

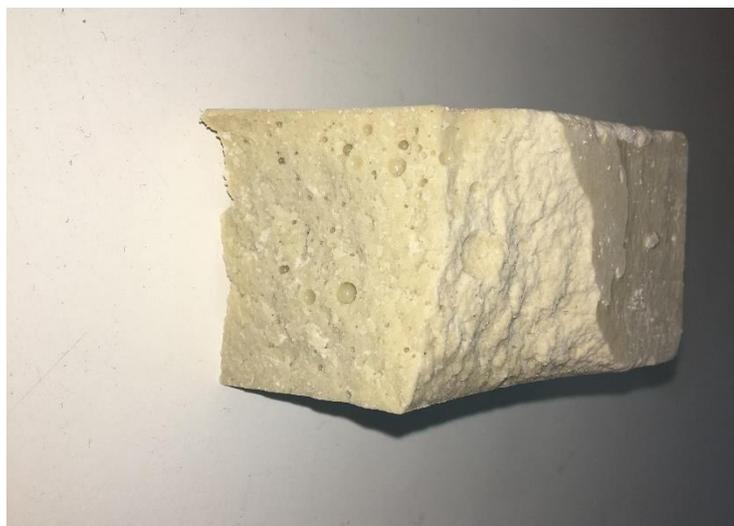


Figura 51 - Bolle d'aria inglobate all'interno dei campioni maturati

Fluidità (Tabella 76)

Tabella 76 - Fluidità del mix con 10 kg/m³ di FR10

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	32
24	34
48	34
72	34

Gel time (Tabella 77)

Tabella 77 - Fluidità del mix con 10 kg/m³ di FR10

t _{gel} (s)	6,0
t _{gel} (s)	6,6
t _{gel} (s)	6,3
media(s)	6,3

Prove penetrometriche (Tabella 78, Tabella 79)

Tabella 78 - Resistenza a compressione del mix con 10 kg/m³ con penetrometro (a t=1h)

Determinazioni con penetrometro a t= 1 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
4	0,02	0,02
4,5	0,03	
4,5	0,03	
3,5	0,02	

Tabella 79 - Resistenza a compressione del mix con 10 kg/m³ con penetrometro (a t=3h)

Determinazioni con penetrometro a t = 3 h(N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
25	0,14	0,16
28,5	0,16	
34	0,19	

Prove di pressa (Tabella 80)

Tabella 80 - Resistenza a compressione del mix con 10 kg/m³ con pressa (a t=3h)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	40,8	0,026	0,027
2	43,2	0,027	
3	44,8	0,028	
4	41,6	0,026	

I risultati riportati confermano che l'utilizzo di FR10 al posto della bentonite incide in maniera importante sulla resistenza della malta anche a breve termine; si nota come, con un tempo di maturazione di 3 ore, la prova penetrometrica fornisce risultati di resistenza 5 volte più grandi rispetto al provino testato con pressa.

Per ovviare al problema dell'aria inglobata all'interno della malta che, come si è visto, incide sulle proprietà della malta, il fornitore del polimero ha provveduto a due nuove versioni dello stesso: un FR10 liquido contenente un agente antischiuma, chiamato FR10* e un polimero FR10 in polvere.

5.10 Mix con FR10*

Si riporta il mix design di partenza relativo a 3 litri di miscela (Tabella 81)

Tabella 81 - Tre litri di componente A con differenti kg/m^3 di FR10*

	FR10	
	7 kg/m^3	8 kg/m^3
Acqua (g)	2581	2579
Mapedrill FR10* (g)	21	24
Cemento (g)	690	690

Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Densità (Tabella 82 Tabella 83)

Tabella 82 - Densità del mix con 7 kg/m^3 di FR10*

densità (kg/l)	1,14
	1,15
	1,14
	1,16
media (kg/l)	1,15

Tabella 83 - Densità del mix con 8 kg/m^3 di FR10*

densità (kg/l)	1,16
	1,16
	1,17
media (kg/l)	1,16

Fluidità (Tabella 84, Tabella 85)

Tabella 84 - Fluidità del mix con 7 kg/m³ di FR10*

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	30
24	33
48	32
72	32

Tabella 85 - Fluidità del mix con 8 kg/m³ di FR10*

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	30
24	35
48	35
72	36

Bleeding (Tabella 86, Tabella 87)

Tabella 86 - Bleeding del mix con 7 kg/m³ di FR10*

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	0,5	1,74	0,17
3	2,0	6,94	0,69
24	16,5	57,29	5,73

Tabella 87 - Bleeding del mix con 8 kg/m³ di FR10*

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	0,1	0,35	0,03
3	0,5	1,74	0,17
24	4,0	13,94	1,39

Gel time (Tabella 88, Tabella 89)

Tabella 88 - Gel time del mix con 8 kg/m³ di FR10*

t _{gel} (s)	12
t _{gel} (s)	12
t _{gel} (s)	12
media (s)	12

Tabella 89 - Gel time del mix con 8 kg/m³ di FR10*

t _{gel} (s)	9
t _{gel} (s)	9
t _{gel} (s)	9
media (s)	9

Resistenza a compressione

Prove penetrometriche (Tabella 90, Tabella 91, Tabella 92, Tabella 93)

Tabella 90 - Resistenza a compressione del mix con 7 kg/m³ di FR10* con penetrometro (a t=1h)

Determinazioni con penetrometro a t= 1 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
40	0,22	0,23
40.5	0.23	
39.5	0.22	
42,5	0,24	

Tabella 91 - Resistenza a compressione del mix con 8 kg/m³ di FR10* con penetrometro (a t=1h)

Determinazioni con penetrometro a t= 1 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
21,5	0,12	0,11
19	0,11	
18	0,10	
19	0,11	

Tabella 92 - Resistenza a compressione del mix con 7 kg/m³ di FR10* con penetrometro (a t=3h)

Determinazioni con penetrometro a t = 3 h(N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
140	0,79	0,77
129	0,73	
142,5	0,80	

Tabella 93 - Resistenza a compressione del mix con 8 kg/m³ di FR10* con penetrometro (a t=3h)

Determinazioni con penetrometro a t = 3 h(N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
103,5	0,58	0,61
/	/	
110	0,62	

Prove con pressa (Tabella 94, Tabella 95; Tabella 96 Tabella 97)

Tabella 94 - Resistenza a compressione del mix con 7 kg/m³ di FR10* con pressa (a t=24h)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	813,2	0,51	0,55
2	911,6	0,57	
3	921,2	0,58	
4	902,1	0,56	

Tabella 95 - Resistenza a compressione del mix con 8 kg/m³ di FR10*con pressa (a t=24h)

Prova numero	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	647,78	0,40	0,44
2	748,44	0,47	
3	644,14	0,42	

Tabella 96 - Resistenza a flessione e compressione del mix con 7 kg/m³ di FR10*con pressa (a t=28h)

Prova n°	Forza di picco misurata per flessione (N)	Resistenza a flessione (MPa)	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	83,4	0,2	1431	0,89	0,85
			1465	0,92	
2	82,3	0,19	1352	0,84	
			1341	0,84	
3	108,9	0,26	1271	0,79	
			1332	0,83	

Tabella 97 - Resistenza a flessione e compressione del mix con 8 kg/m³ di FR10*con pressa (a t=28h)

Prova n°	Forza di picco misurata per flessione (N)	Resistenza a flessione (MPa)	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	115	0,27	1313	0,82	0,89
			1508	0,94	
2	/	/	/	/	
			/	/	
3	/	/	1464	0,91	
			1408	0,88	

Con l'utilizzo di un FR10 con agente antischiuma si osserva un netto miglioramento del comportamento della malta bicomponente. Il valore di bleeding scende drasticamente sia per il mix contenente 7 kg/m³ (alle 24 ore passa dal 28% con FR10 a meno del 6% con FR10*) che per il mix con 8 kg/m³ (alle 24 ore passa dal 20% circa con FR10 a meno di 1,5% con FR10*). Per ciò che riguarda densità, fluidità, gel time i valori sono nella norma.

La resistenza a compressione invece non presenta grandi miglioramenti rispetto alla miscela standard di FR10, infatti a 28 giorni sia per il mix con 7 che per quello con 8 kg/m³ non vanno oltre 0,9 MPa. Questo valore è circa la metà del valore di resistenza ottenuto con il mix design 2 ovvero laddove c'è la bentonite al posto del polimero FR10.

5.11 Mix con FR10 in polvere

Si riporta il mix design di partenza relativo a 3 litri di miscela (Tabella 98)

Tabella 98 - Tre litri di componente A con differenti kg/m³ di FR10 polvere

	FR10	
	2,5 kg/m ³	3 kg/m ³
Acqua (g)	2585,4	2584,7
Mapedrill FR10 polvere (g)	7,5	9,0
Cemento (g)	690	690
Ritardante (g)	10,5	10,5

Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Densità (Tabella 99, Tabella 100)

Tabella 99 - Densità del mix con 2,5 kg/m³ di FR10 liquido

Densità (kg/l)	1,15
	1,15
	1,15
media (kg/l)	1,15

Tabella 100 - Densità del mix con 3,0 kg/m³ di FR10 liquido

densità (kg/l)	1,16
	1,15
	1,16
media (kg/l)	1,16

Fluidità (Tabella 101, Tabella 102)

Tabella 101 - Fluidità del mix con 2,5 kg/m³ di FR10 liquido

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	32
24	35,5
48	35,5
72	36,5

Tabella 102 - Fluidità del mix con 3,0 kg/m³ di FR10 liquido

Tempo di esecuzione della prova (h)	Valori del tempo di efflusso (s)
0	33,5
24	37
48	37
72	37

Bleeding (Tabella 103, Tabella 104)

Tabella 103 - Bleeding del mix con 2,5 kg/m³ di FR10 liquido

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	0,3	1,05	0,10
3	0,6	2,09	0,21
24	5,5	19,16	1,92

Tabella 104 - Bleeding mix con 3,0 kg/m³ di FR10 liquido

tempo (h)	acqua essudata (mm)	acqua essudata (ml)	bleeding (%)
1	0,1	0,35	0,04
3	2,0	7,04	0,70
24	3,0	10,56	1,06

Gel time (Tabella 105, Tabella 106)

Tabella 105 - Gel time del mix con 2,5 kg/m³ di FR10 liquido

t _{gel} (s)	11
t _{gel} (s)	10
t _{gel} (s)	10
media (s)	10

Tabella 106 - Gel time del mix con 3,0 kg/m³ di FR10 liquido

t _{gel} (s)	11
t _{gel} (s)	10
t _{gel} (s)	10
media (s)	10

Resistenza a compressione

Prove penetrometriche (Tabella 107, Tabella 108, Tabella 109, Tabella 110)

Tabella 107 - Resistenza a compressione del mix con 2,5 kg/m³ di FR10 liquido con penetrometro (a t=1h)

Determinazioni con penetrometro a t= 1 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
11	0,06	0,06
11,5	0,06	
12	0,07	
/	/	

Tabella 108 - Resistenza a compressione del mix con 3,0 kg/m³ di FR10 liquido con penetrometro (a t=1h)

Determinazioni con penetrometro a t= 1 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
14	0,08	0,08
14	0,08	
14	0,08	
12,5	0,07	

Tabella 109 - Resistenza a compressione del mix con 2,5 kg/m³ di FR10 liquido con penetrometro (a t=3h)

Determinazioni con penetrometro a t= 3 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
84	0,47	0,46
81,5	0,46	
79,5	0,45	
82	0,46	

Tabella 110 - Resistenza a compressione del mix con 3,0 kg/m³ di FR10 liquido con penetrometro (a t=3h)

Determinazioni con penetrometro a t= 3 h (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Resistenza a compressione media (MPa)
57	0,32	0,33
54	0,30	
58	0,33	
63,5	0,36	

Prove con pressa (Tabella 111, Tabella 112)

Tabella 111 - Resistenza a flessione e compressione del mix con 2,5 kg/m³ di FR10 liquido con pressa (a t=28h)

Prova n°	Forza di picco misurata per flessione (N)	Resistenza a flessione (MPa)	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	128,8	0,3	1184	0,74	0,75
			1128	0,71	
2	138,8	0,33	1232	0,77	
			1239	0,77	
3	125,8	0,29	1224	0,76	
			1204	0,75	

Tabella 112 - Resistenza a flessione e compressione del mix con 3,0 kg/m³ di FR10 liquido con pressa (a t=28h)

Prova n°	Forza di picco misurata per flessione (N)	Resistenza a flessione (MPa)	Forza di picco misurata (N)	Resistenza a compressione (MPa)	Media (MPa)
1	100,9	0,24	1144	0,72	0,74
			1136	0,71	
2	89,9	0,21	1184	0,74	
			1098	0,69	
3	98,4	0,23	1298	0,81	
			1180	0,74	

L'utilizzo di un mix con FR10 in polvere consente di ottenere una buona malta bicomponente, essa non presenta le bolle che possedeva la prima versione dello stesso prodotto e che portava a scadenti prestazioni. Il valore di bleeding alle 24 ore è limitato per il mix contenente 3 kg/m³ a circa l'1% e per il mix con 2,5 kg/m³ a meno del 2%. Si sottolinea

che si riesce ad ottenere questi valori con percentuali di FR10 molto bassi, cosa gradita perché c'è un risparmio economico non indifferente.

Per ciò che riguarda densità, fluidità, gel time i valori sono nella norma.

La resistenza a compressione invece non presenta grandi miglioramenti rispetto alla miscela standard di FR10, infatti a 28 giorni sia per il mix con 2,5 che per quello con 3,0 kg/m³ non vanno oltre 0,75 MPa. Questo valore è meno della metà del valore di resistenza ottenuto con il mix design 2. Una soluzione per ottenere valori di resistenza più elevati è usare un mix che abbia al suo interno sia FR10 in polvere che bentonite.

6 Conclusioni e futuri sviluppi

L'elaborato tratta dell'utilizzo della malta bicomponente per le operazioni di riempimento del gap creatosi dietro ai conci durante uno scavo meccanizzato con TMB scudata. Sono stati analizzati i casi studio nei quali la tecnologia è stata utilizzata e si è approfondito la conoscenza delle prestazioni in termini di stabilità, lavorabilità e fluidità per la componente A e le caratteristiche in termini di gelificazione e di resistenza per ciò che riguarda la bicomponente A+B.

Per le applicazioni di backfilling la malta bicomponente ha dimostrato di possedere proprietà difficilmente raggiungibili da qualsiasi altra tecnologia; ragion per cui il suo utilizzo in cantiere è cresciuto in maniera esponenziale ed è pressoché impossibile optare per una scelta differente.

Dall'altra parte la malta bicomponente ha mostrato di possedere grande variabilità, si è visto come cambiare procedura di miscelazione conduce a risultati completamente differenti: la fluidità, ad esempio, mostra chiaramente che seguendo la procedura A dopo 48 ore la componente A non scorre più tramite il cono di Marsh; la responsabilità della perdita di fluidità può essere attribuita alla minor attivazione della bentonite e all'aggiunta anticipata del ritardante. Così come la scelta dell'elica incide pesantemente nelle prestazioni del prodotto finale: si è mostrato come nel mix realizzato con l'elica a due alette il limite dell'8% di bleeding è stato superato già dopo un'ora mentre con l'elica rettangolare a 3 fori l'8% viene avvicinato dopo 3 ore per essere più che doppiato dopo 24 ore.

Grande mutevolezza di risultati si è vista anche cambiando mix design: al diminuire del rapporto acqua-cemento aumenta il tempo di efflusso tramite il cono Marsh finché alle 72 ore il mix 4 non fluisce; stesso discorso vale per il bleeding: all'aumentare del quantitativo del cemento nel mix cresce il suo valore.

Si è sostituito il cemento con uno proveniente da un altro bancale con egual resistenza oppure è stata utilizzata un'altra bentonite con altissima concentrazione di montmorillonite ovvero con impatto ambientale nullo: i risultati sono incoraggianti, ad esempio la resistenza a compressione alle 24 ore è di circa 1 MPa e di 1,5 MPa ai 28 giorni.

Si è provveduto a sostituire la bentonite con un prodotto innovativo, il polimero FR10, cosa che può avere risvolti positivi nei cantieri dove l'approvvigionamento della bentonite è complesso oppure laddove ci sono vincoli di carattere ambientale. I risultati ottenuti con la prima versione del prodotto hanno evidenziato problemi in termini di separazione dei componenti con valori di bleeding non accettabili se non usando una concentrazione molto

alta, cosa non consigliata sia per motivi economici che ambientali: si passa da un valore di bleeding alle 24 ore di quasi il 50% per un mix contenente 5 kg/m³ di FR10, passando al 34% del mix con 6 kg/m³ fino a meno del 4% della miscela con 10 kg/m³. Inoltre, la resistenza a compressione non supera per nessun mix 0,90 MPa, circa la metà del valore ottenuto con un mix contenente bentonite.

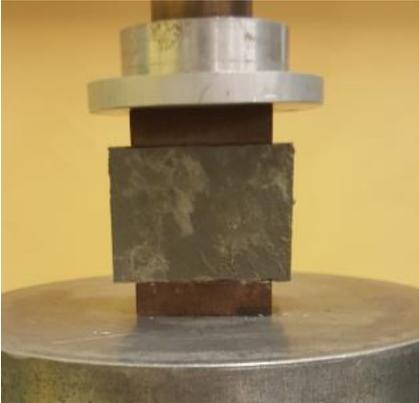
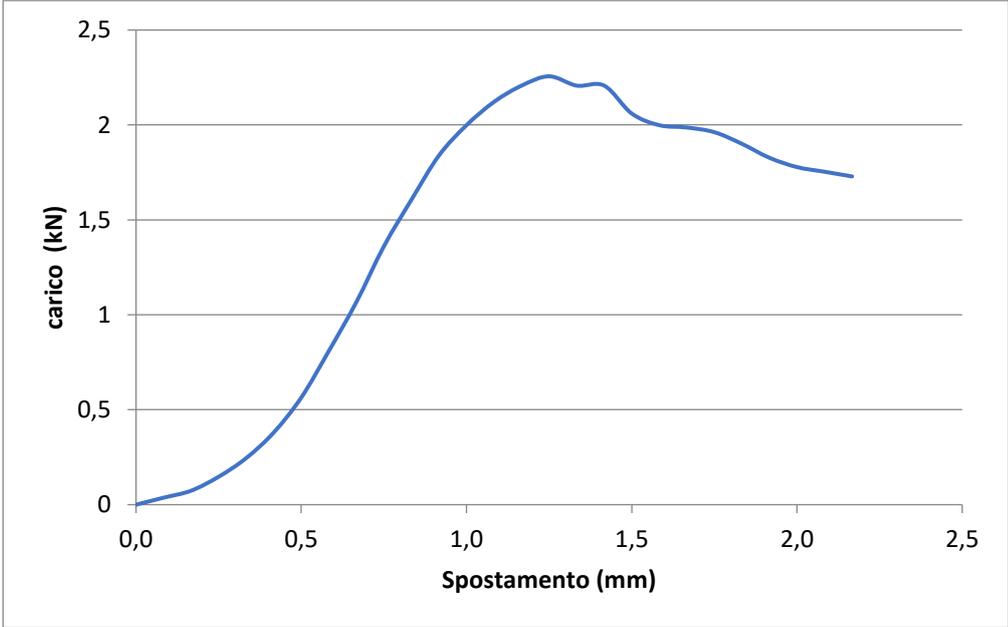
La versione con FR10 liquida con agente antischiuma e quella con FR10 in polvere hanno provveduto a risolvere i problemi legati alla lavorabilità, pompabilità e stabilità del componente A. Non ci sono miglioramenti nei confronti della resistenza rispetto alla prima versione: anche in questo caso la malta raggiunge valori più bassi fino al 50 % rispetto a quelli raggiunti con la bentonite; con l'FR10* si raggiunge 0,9 MPa ai 28 giorni, 0,8 MPa con l'FR10 in polvere. Dunque, l'utilizzo di questa soluzione è legato alle prestazioni richieste dal committente in termini di resistenza. Una soluzione plausibile è usare una malta bicomponente con bentonite e polimero FR10 assieme.

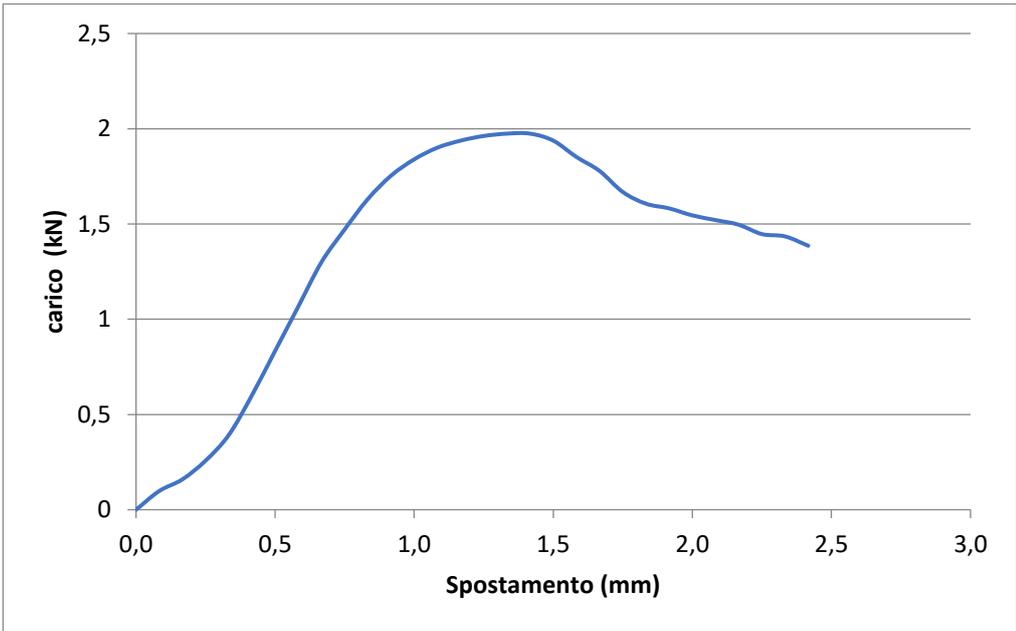
Inoltre, si è testata la malta bicomponente (mix design 2) in una campagna di prove di taglio diretto. I risultati ottenuti hanno consentito di determinare coesione e angolo di resistenza a taglio (la bicomponente, specialmente a breve termine, può essere vista come un terreno più che una malta). Si tratta di prove del tutto sperimentali poiché non è presente in letteratura nessun riscontro; si è cautamente soddisfatti dei risultati ottenuti: dagli involucri a rottura si nota come passando da 3 ore alle 24 ore c'è un aumento dei parametri di resistenza, da una coesione di circa 120 KPa ad un valore superiore ai 200 kPa e da un angolo di resistenza a taglio di 25° ad uno di circa 40°. Altro aspetto da sottolineare: non ci sono grosse variazioni dei parametri di resistenza tra un provino maturato 24 giorni e uno maturato 28 giorni, si riscontra un aumento di coesione e una sostanziale costanza del angolo di resistenza.

Per concludere, la conoscenza della malta bicomponente in tutti i suoi aspetti è, ad oggi, di fondamentale importanza nel contesto dello scavo meccanizzato di gallerie in quanto dalla sua corretta progettazione dipende il raggiungimento dei risultati nei tempi previsti.

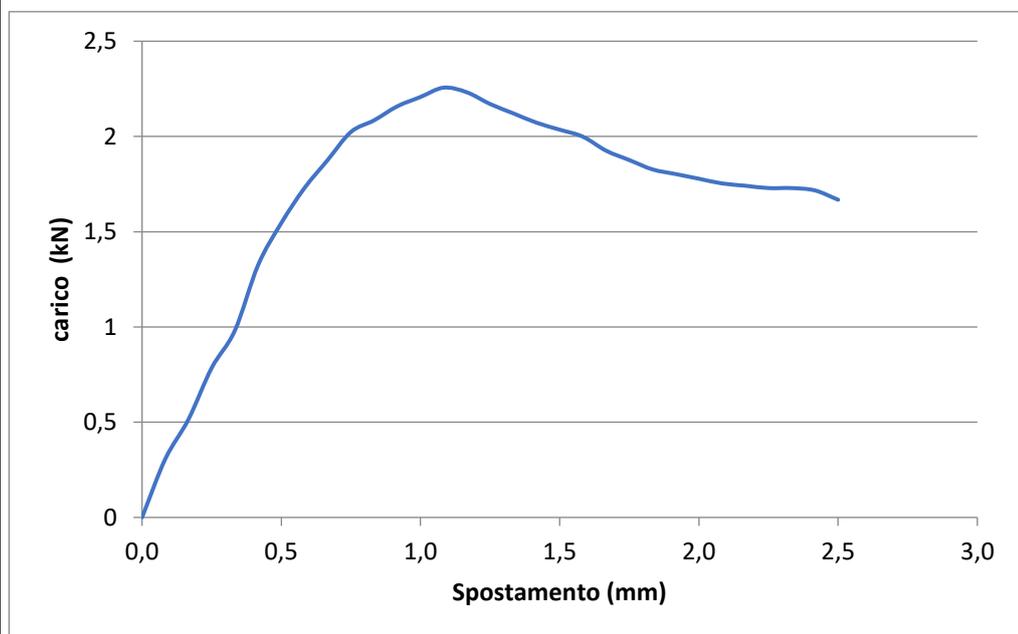
Allegato A

Resistenza a compressione uniassiale di campioni maturati 24 ore

Mix design 2		
NOME PROVINO	C1_M24H_MD2	
DIMENSIONI (mm)	40x54x40	
AREA (mm ²)	2160	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	1.04	
		

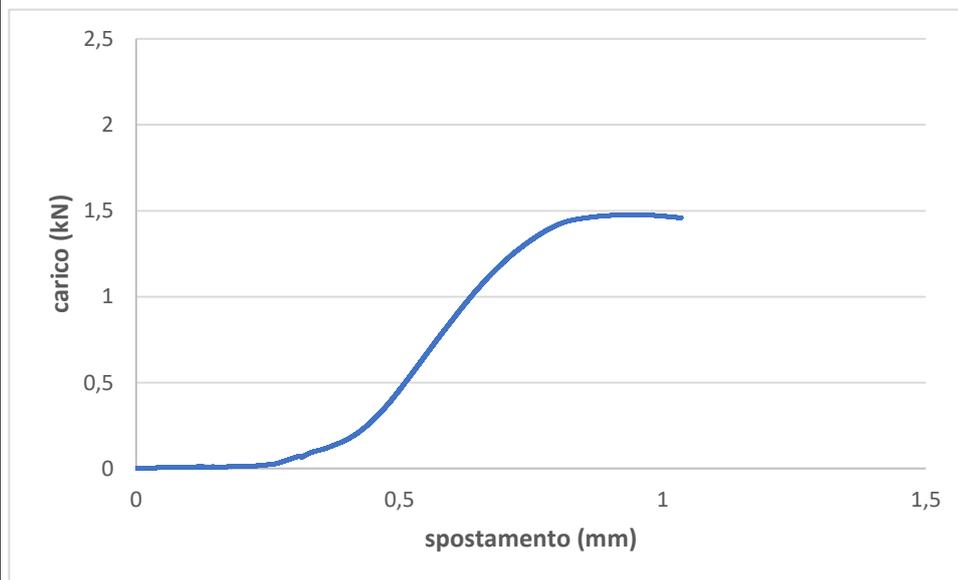
Mix design 2		
NOME PROVINO	C2_M24H_MD2	
DIMENSIONI (mm)	40x54x40	
AREA (mm ²)	2160	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	1.04	
		

Mix design 2		
NOME PROVINO	C3_M24H_MD2	
DIMENSIONI (mm)	40x54x40	
AREA (mm ²)	2160	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.04	



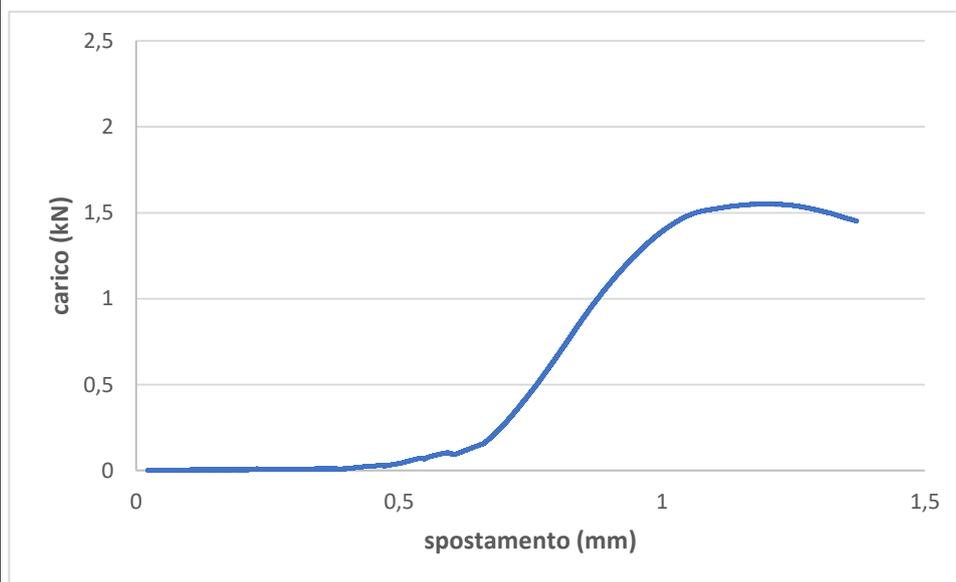
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C1_M24H_BENT_NIC	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	54	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.92	



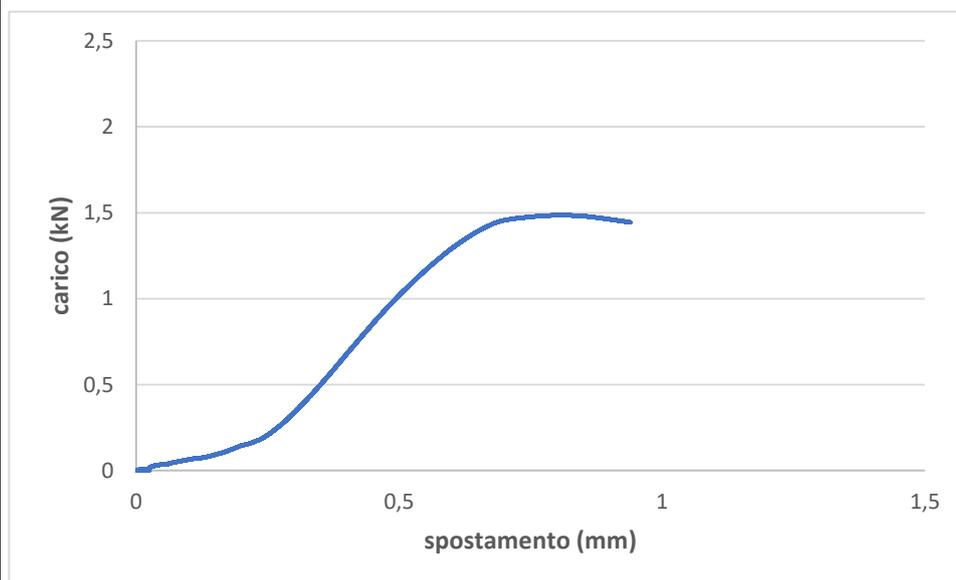
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C2_M24H_BENT_NIC	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	54	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.97	



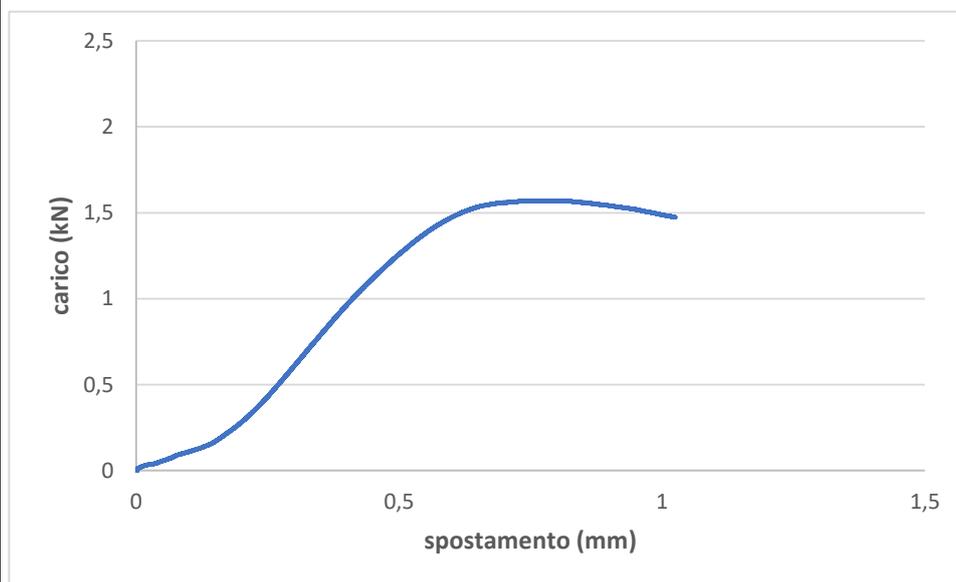
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C3_M24H_BENT_NIC	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.93	



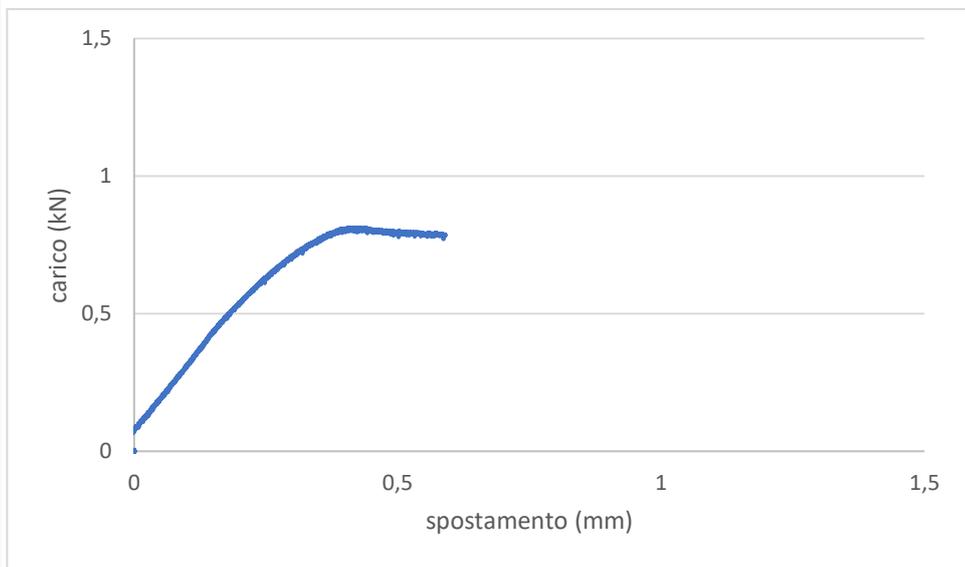
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C4_M24H_BENT_NIC	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.98	

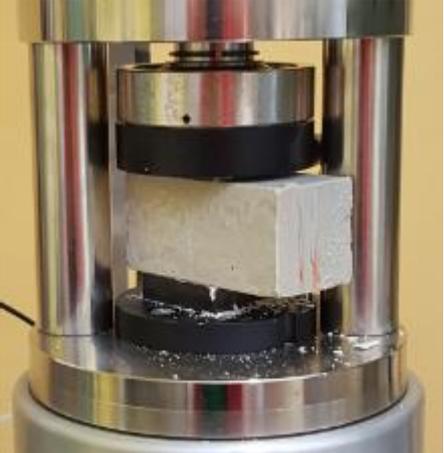


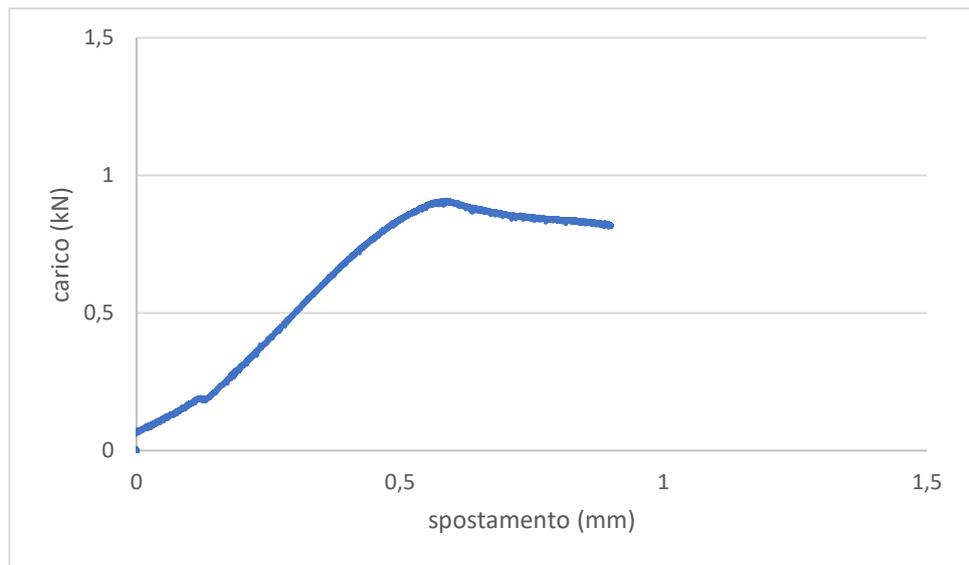
Mix con 7 kg/m³ di FR10 *

NOME PROVINO	C1_M24H_7kg_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.51	

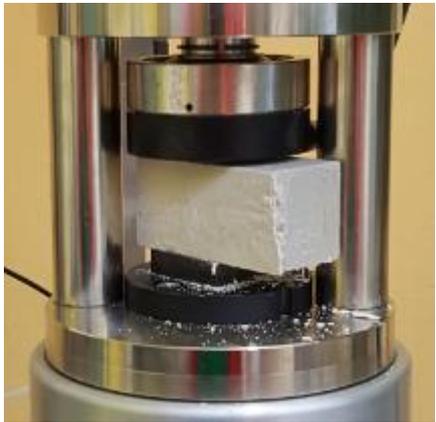


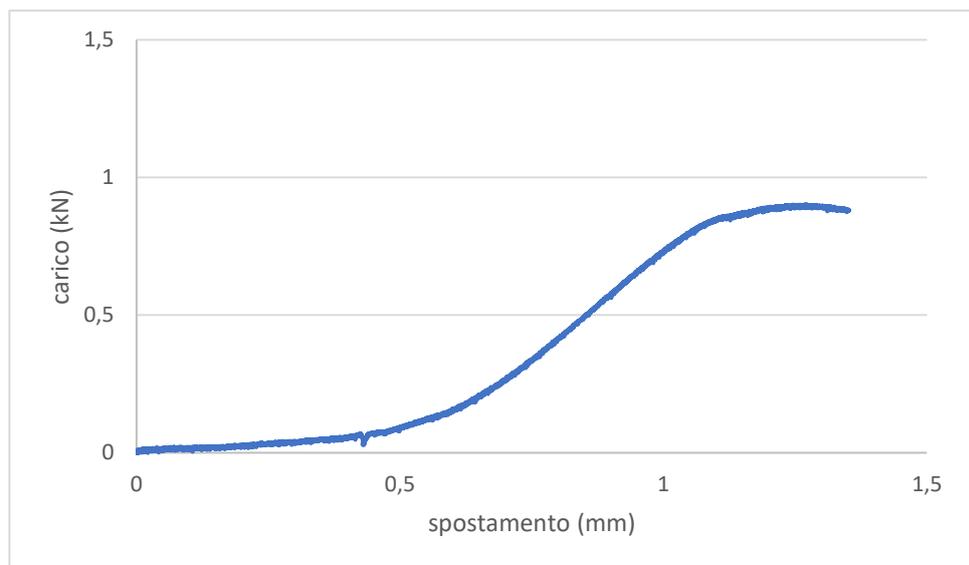
Mix con 7 kg/m³ di FR10 *

NOME PROVINO	C2_M24H_7kg_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.57	

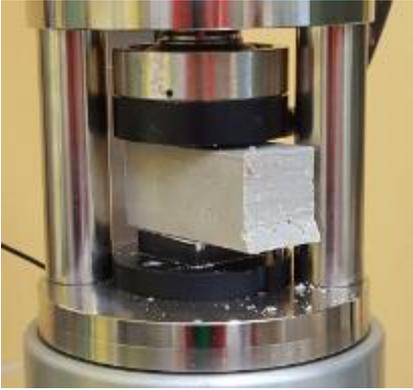
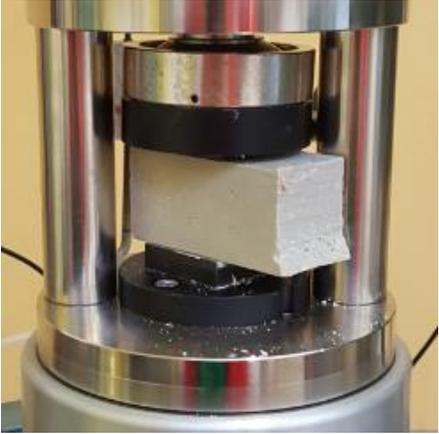


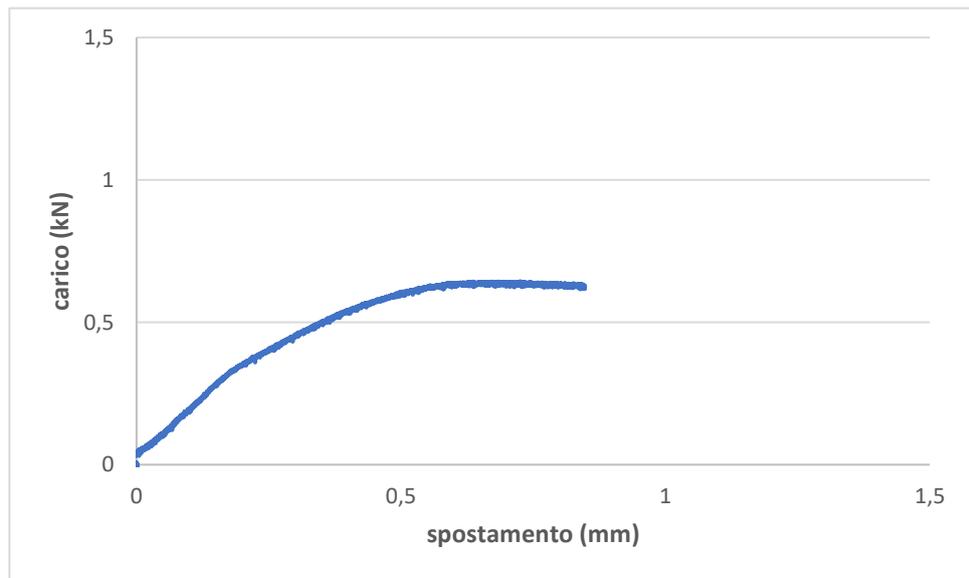
Mix con 7 kg/m³ di FR10 *

NOME PROVINO	C4_M24H_7kg_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.56	

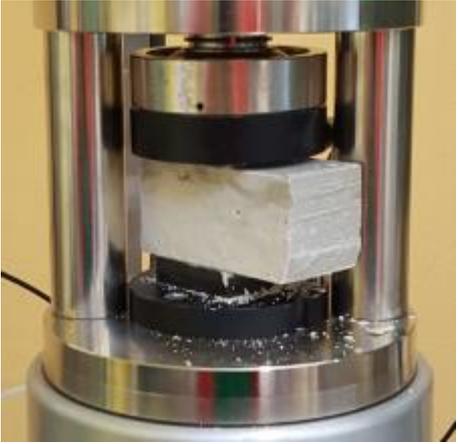
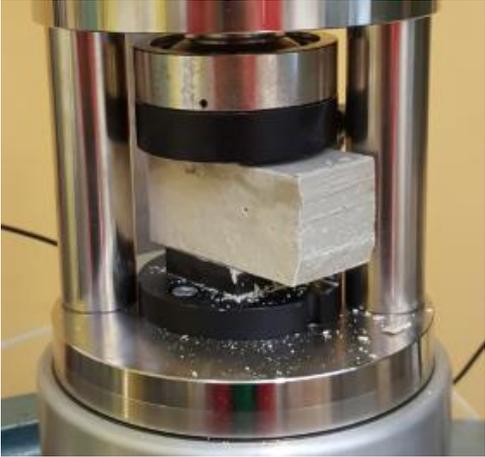


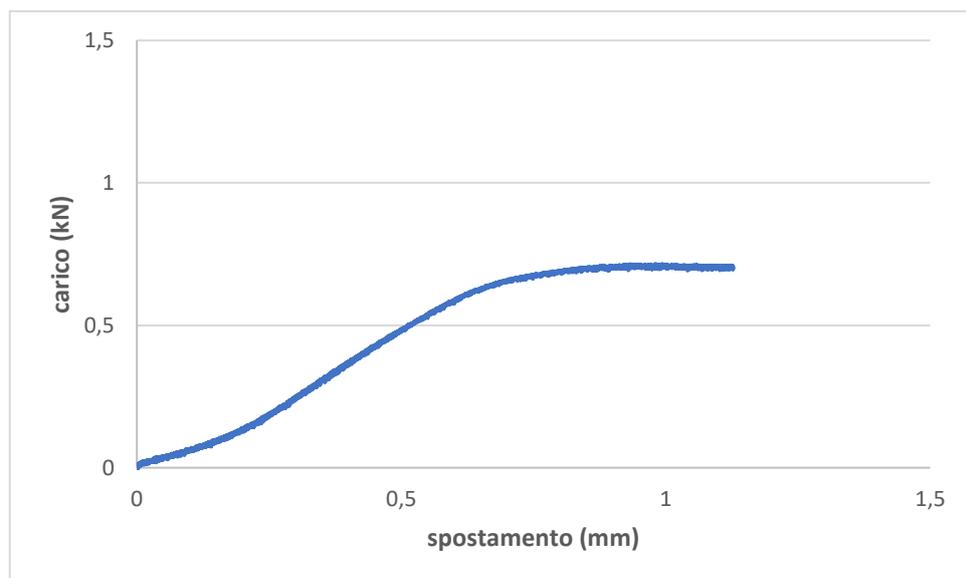
Mix con 8 kg/m³ di FR10 *

NOME PROVINO	C3_M24H_8kg_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1520	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.42	



Mix con 8 kg/m³ di FR10 *

NOME PROVINO	C4_M24H_8kg_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (h)	24	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.45	

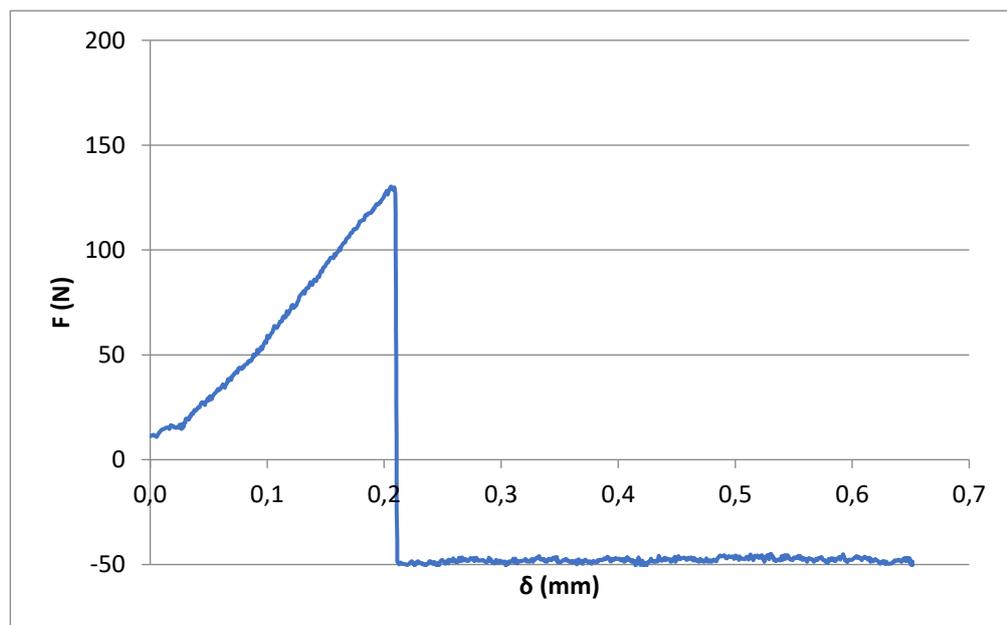


Allegato B

Resistenza a flessione di campioni maturati 28 giorni

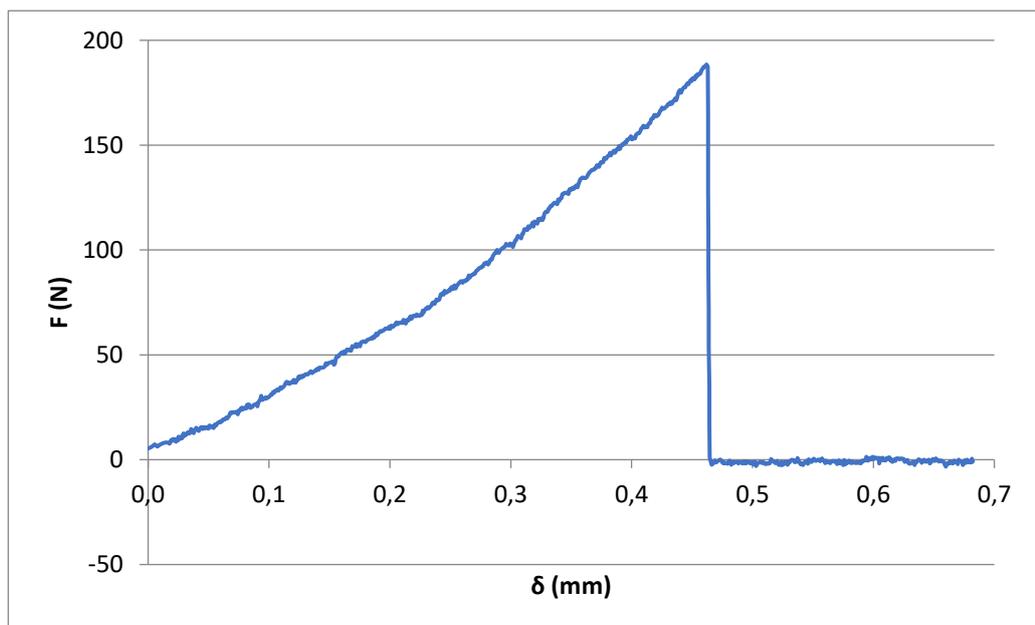
Mix design 2

NOME PROVINO	C1_M28G_FLE X_MD2	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.31	



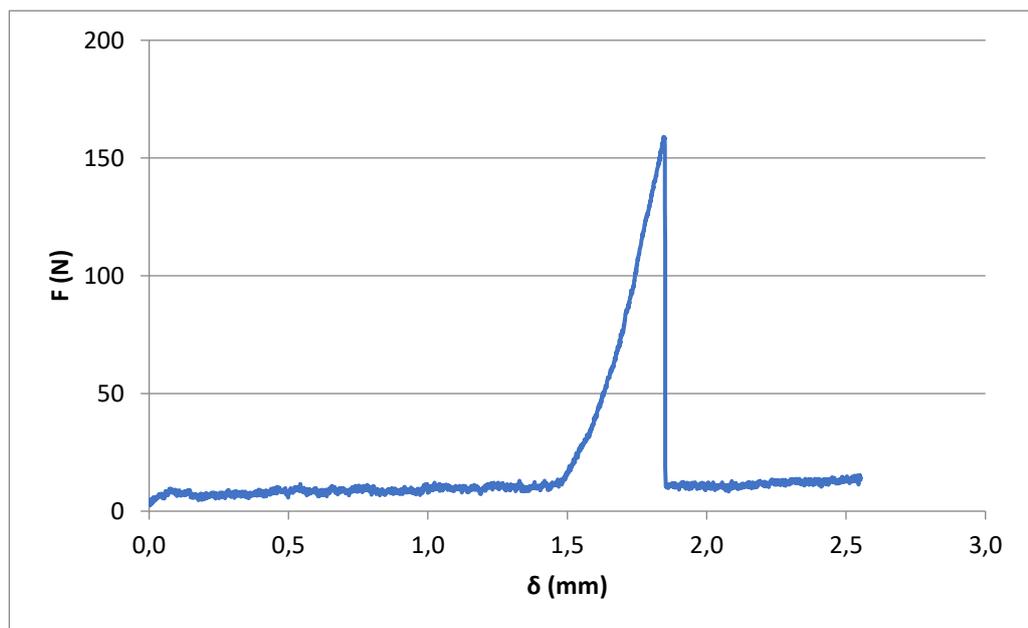
Mix design 2

NOME PROVINO	C2_M28G_FLE X_MD2	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.44	

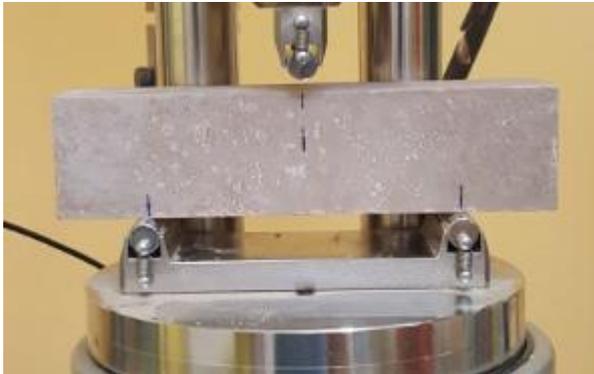


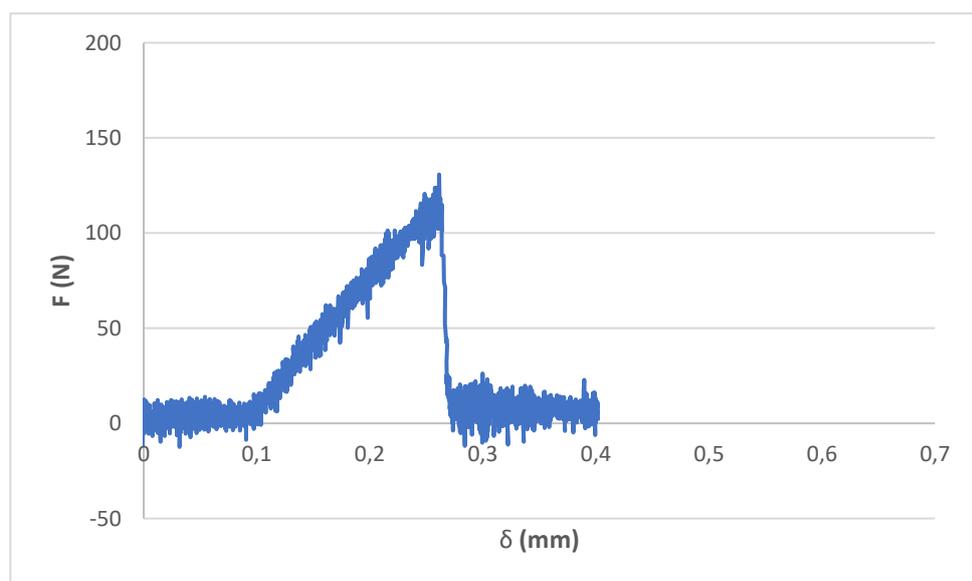
Mix design 2

NOME PROVINO	C3_M28G_FLE X_MD2	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.37	



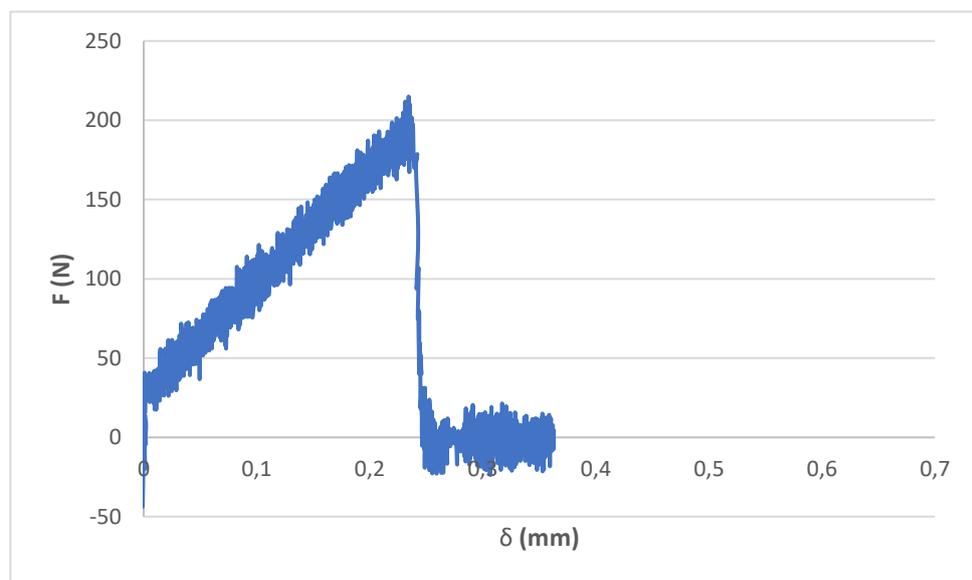
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C1_M28G_FLE X_BENT_NIC	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.31	

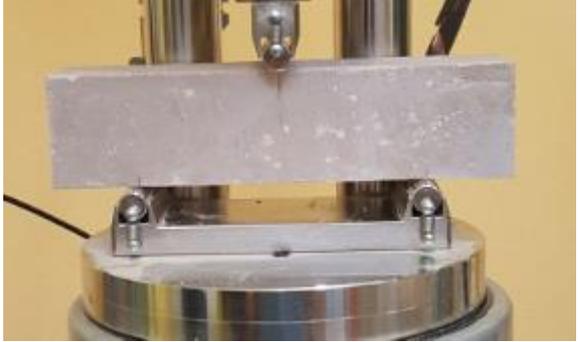
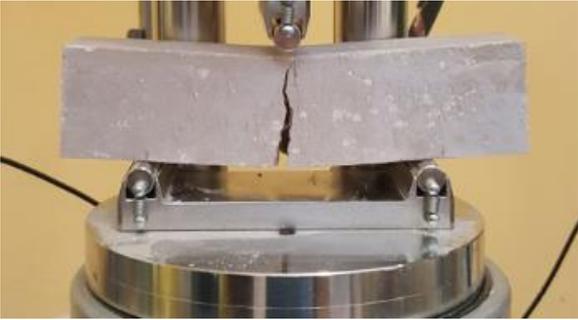


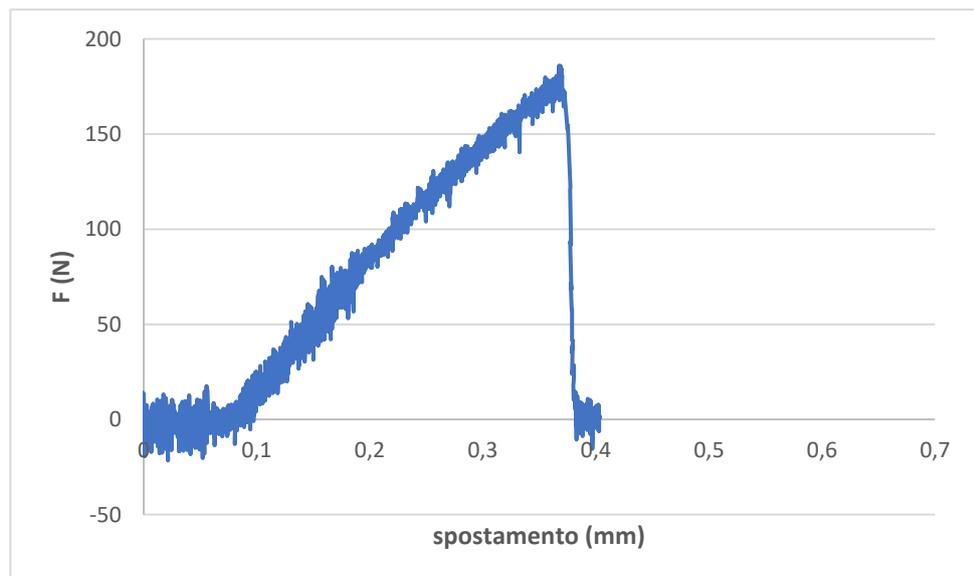
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C2_M28G_FLE X_BENT_NIC	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.50	



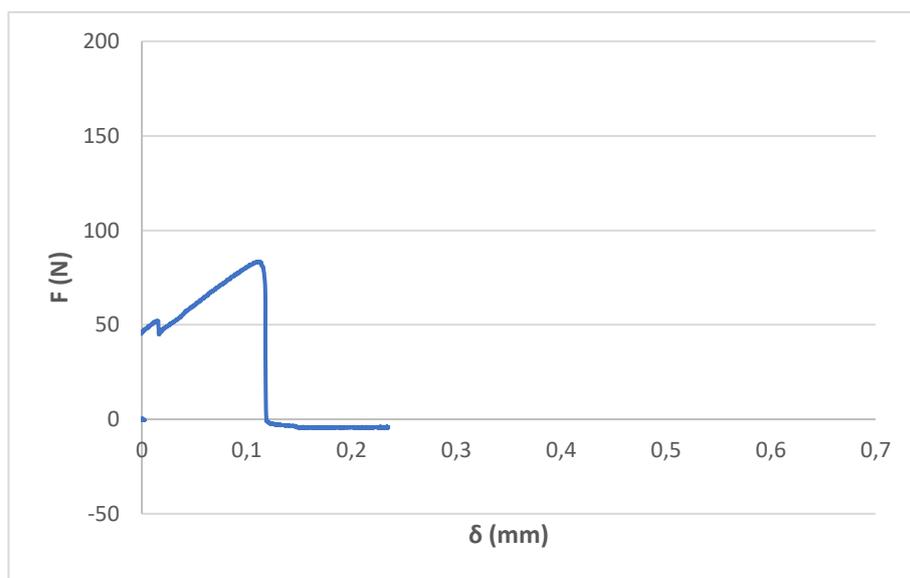
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C3_M28G_FLE X_BENT_NIC	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.44	

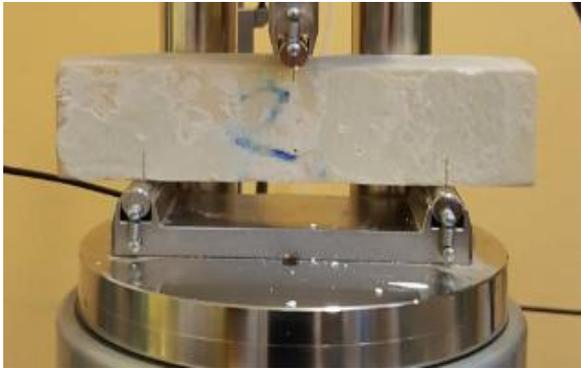
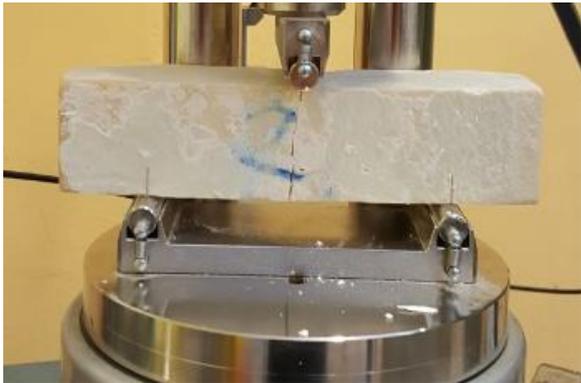


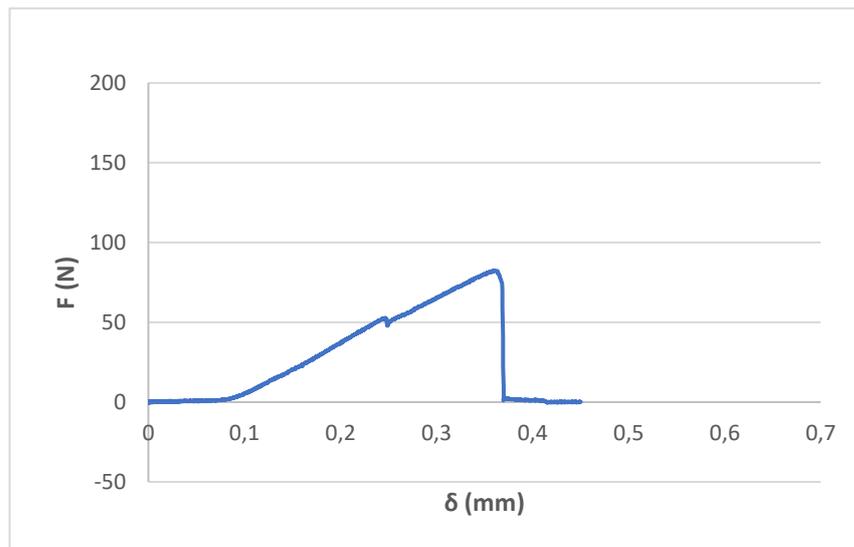
Mix con 7 kg/m³ di FR10*

NOME PROVINO	C1_M28G_FLE X_7KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.20	

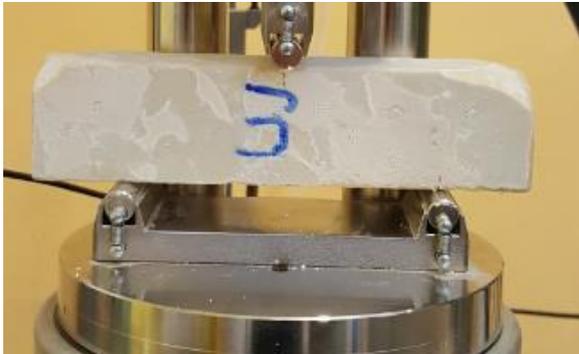
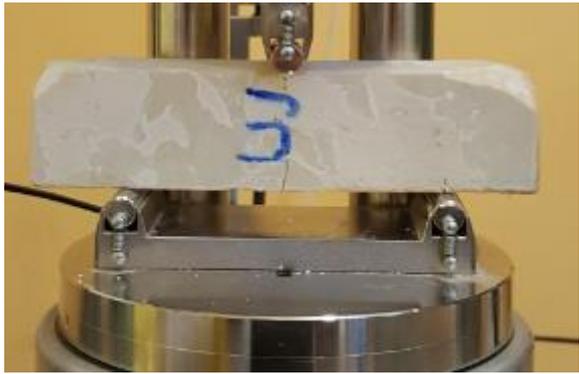


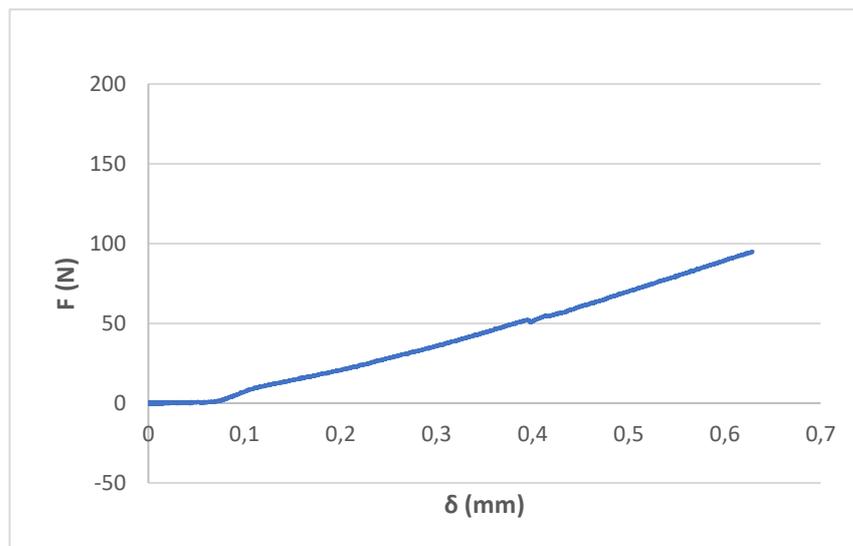
Mix con 7 kg/m³ di FR10*

NOME PROVINO	C2_M28G_FLE X_7KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.19	

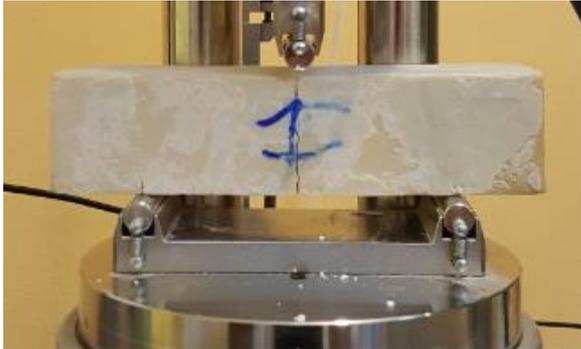


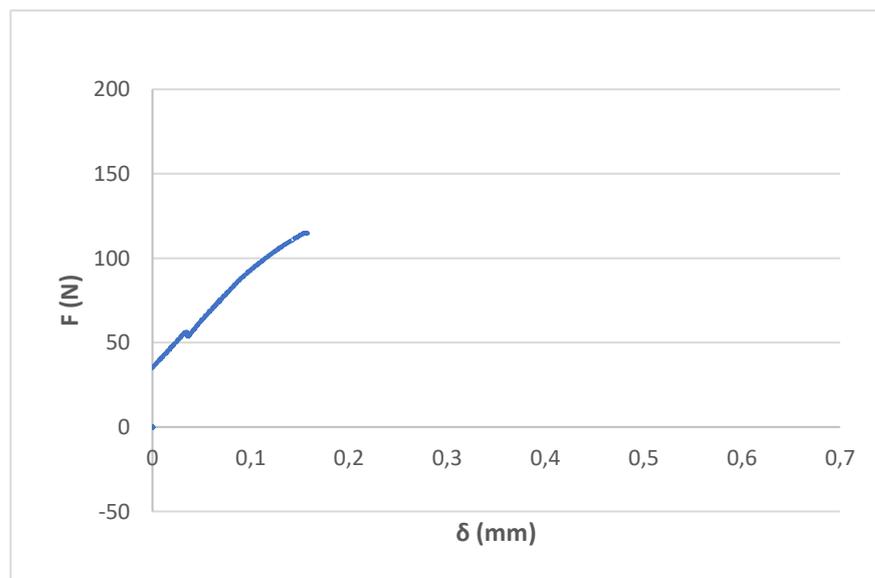
Mix con 7 kg/m³ di FR10*

NOME PROVINO	C3_M28G_FLE X_7KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.22	

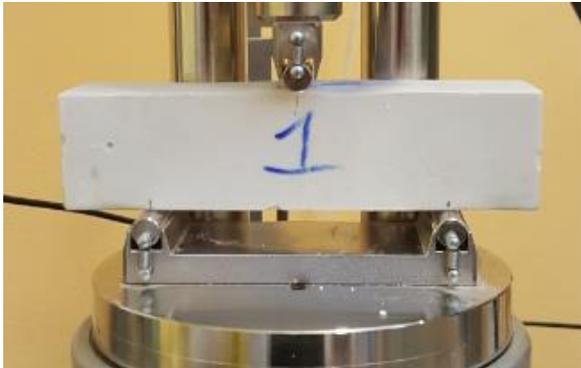


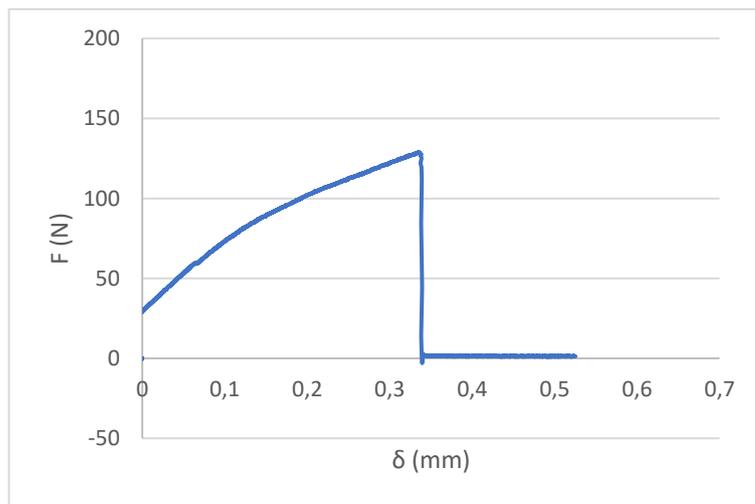
Mix con 8 kg/m³ di FR10*

NOME PROVINO	C1_M28G_FLE X_8KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.27	

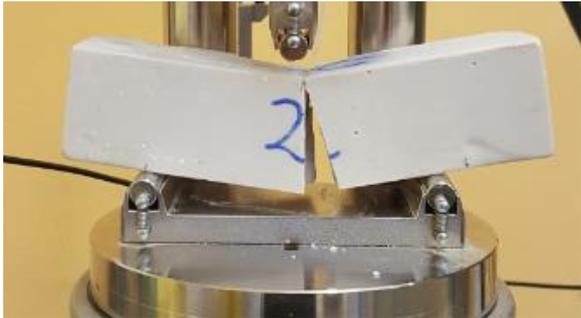


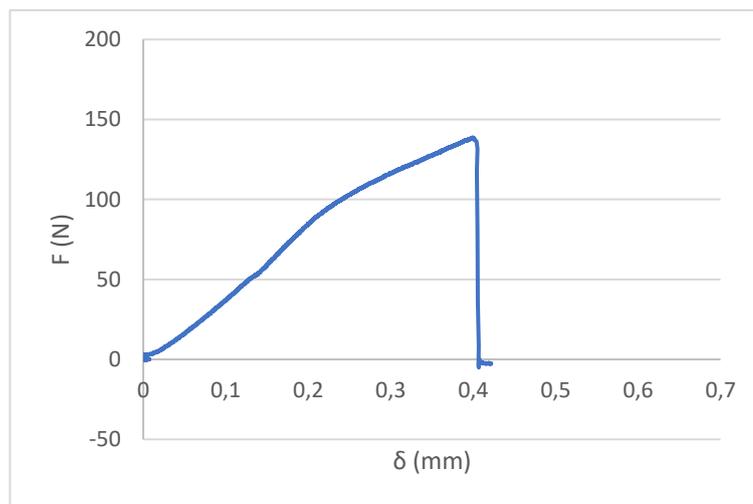
Mix con 2,5 kg/m³ di FR10 in polvere

NOME PROVINO	C1_M28G_FLE X_2,5KG_FR1 0P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.30	

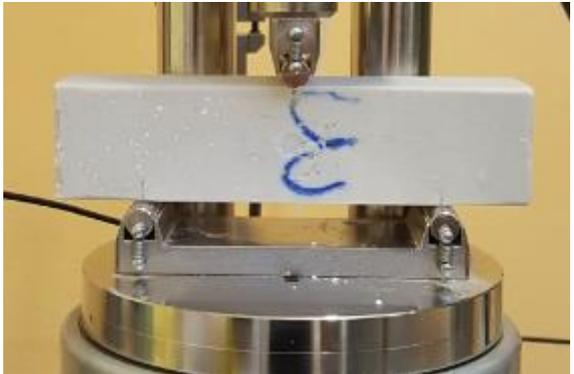
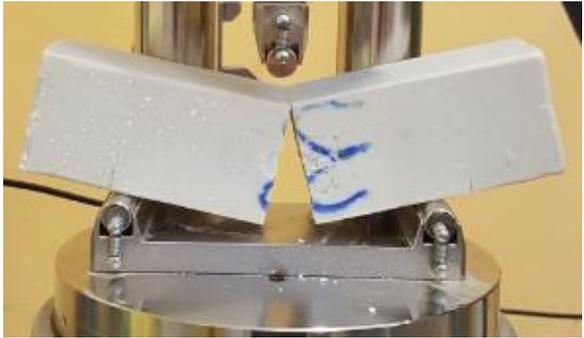


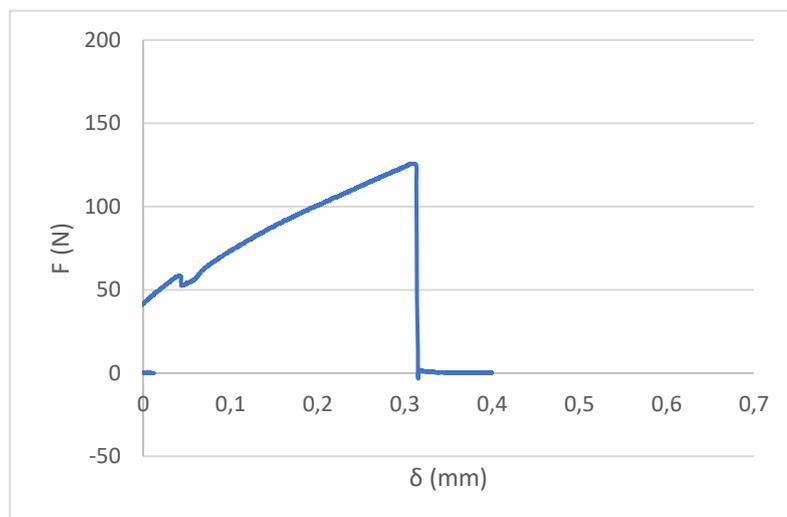
Mix con 2,5 kg/m³ di FR10 in polvere

NOME PROVINO	C2_M28G_FLE X_2,5KG_FR1 0P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.33	

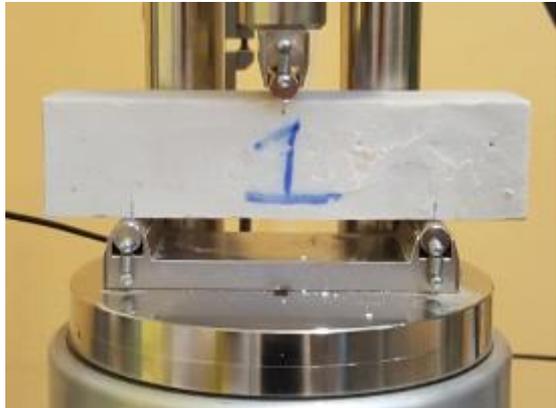
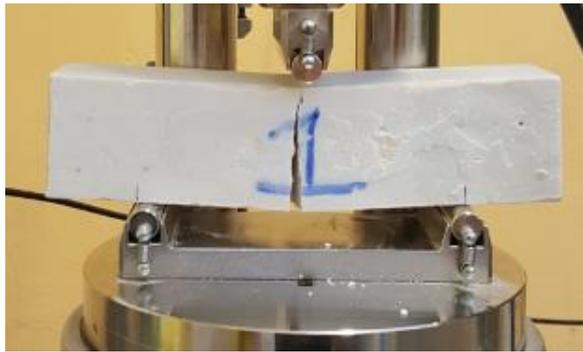


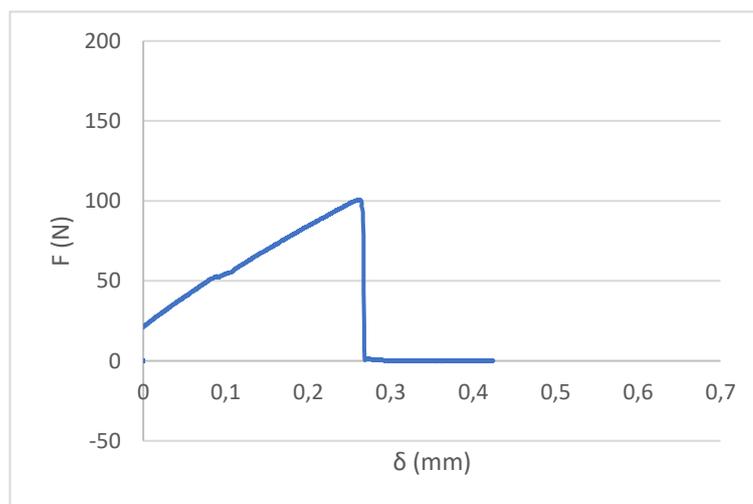
Mix con 2,5 kg/m³ di FR10 in polvere

NOME PROVINO	C3_M28G_FLE X_2,5KG_FR1 0P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.29	

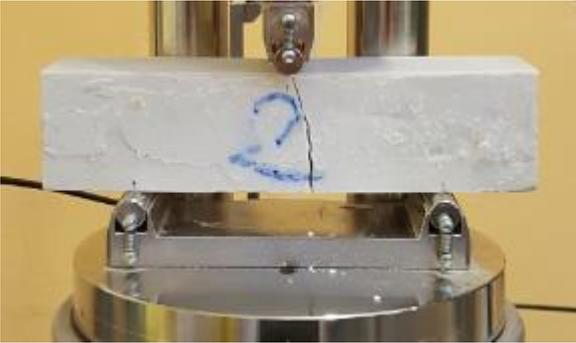


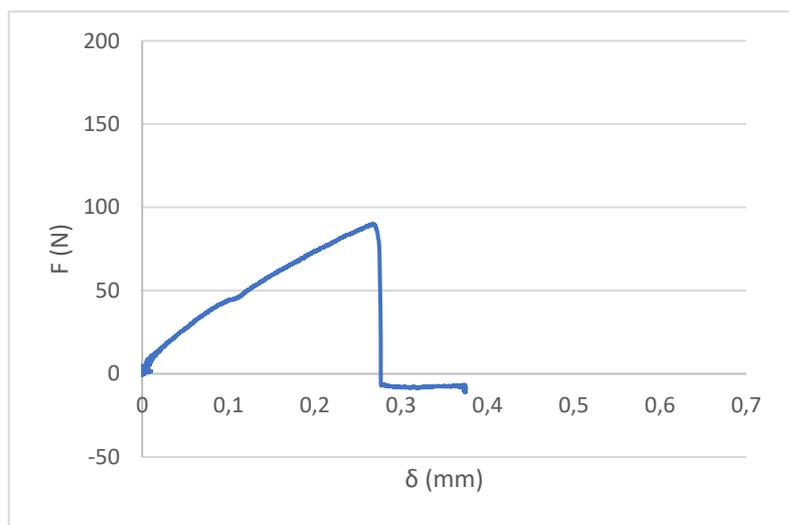
Mix con 3,0 kg/m³ di FR10 in polvere

NOME PROVINO	C1_M28G_FLE X_3KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.24	

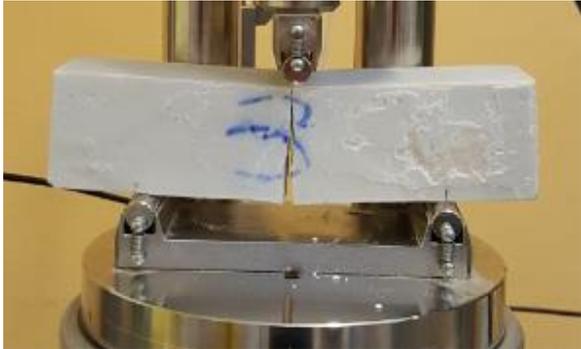


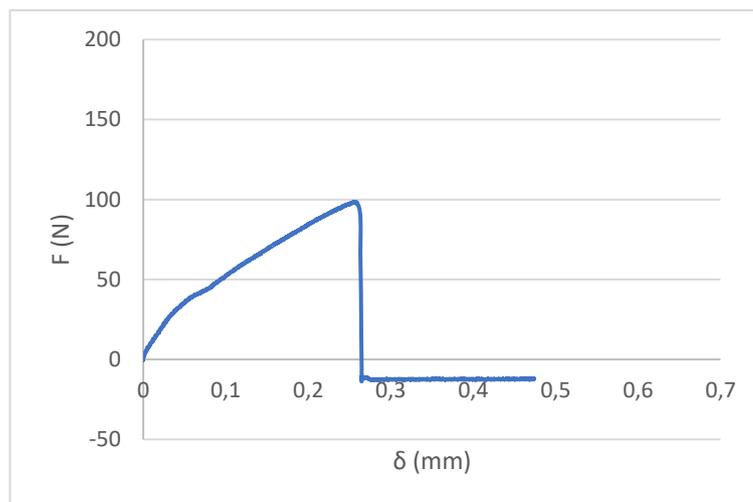
Mix con 3,0 kg/m³ di FR10 in polvere

NOME PROVINO	C2_M28G_FLE X_3KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.21	



Mix con 3,0 kg/m³ di FR10 in polvere

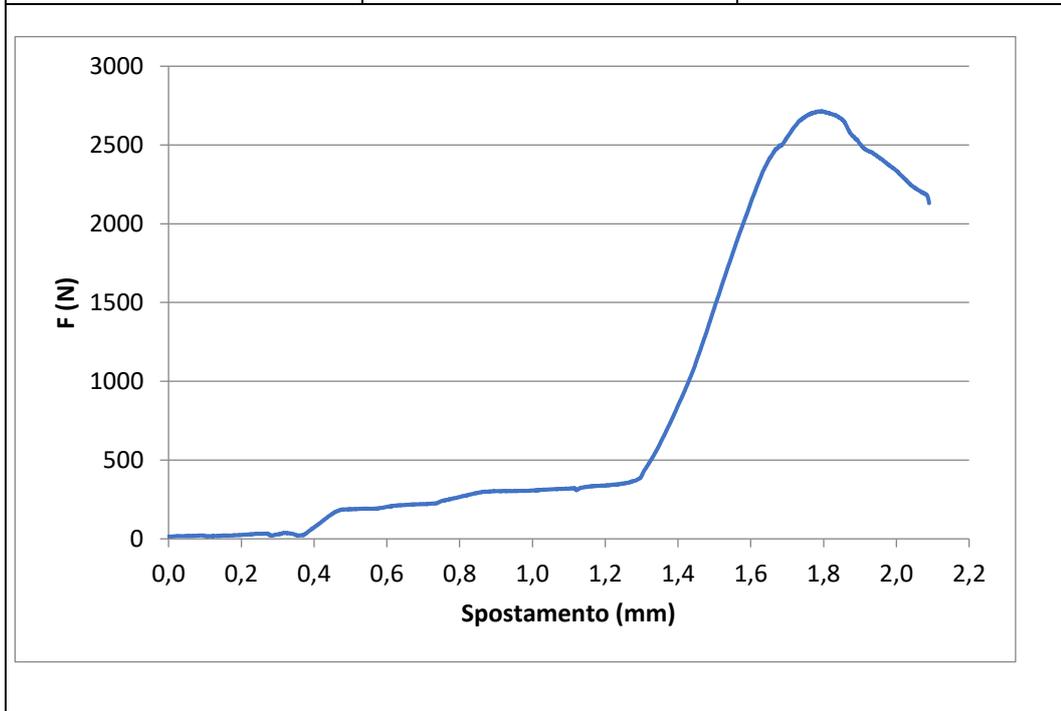
NOME PROVINO	C3_M28G_FLE X_3KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x160	
AREA (mm ²)	1600	
DISTANZA TRA LAME (mm)	100	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (kMPa)	0.23	



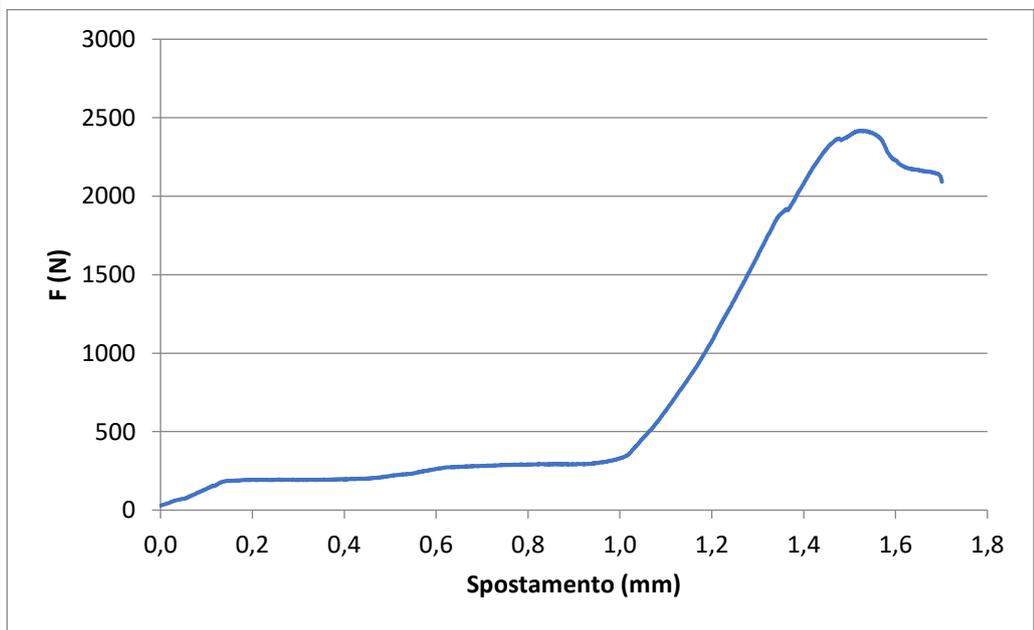
Allegato C

Resistenza a compressione uniassiale di campioni maturati 28 giorni

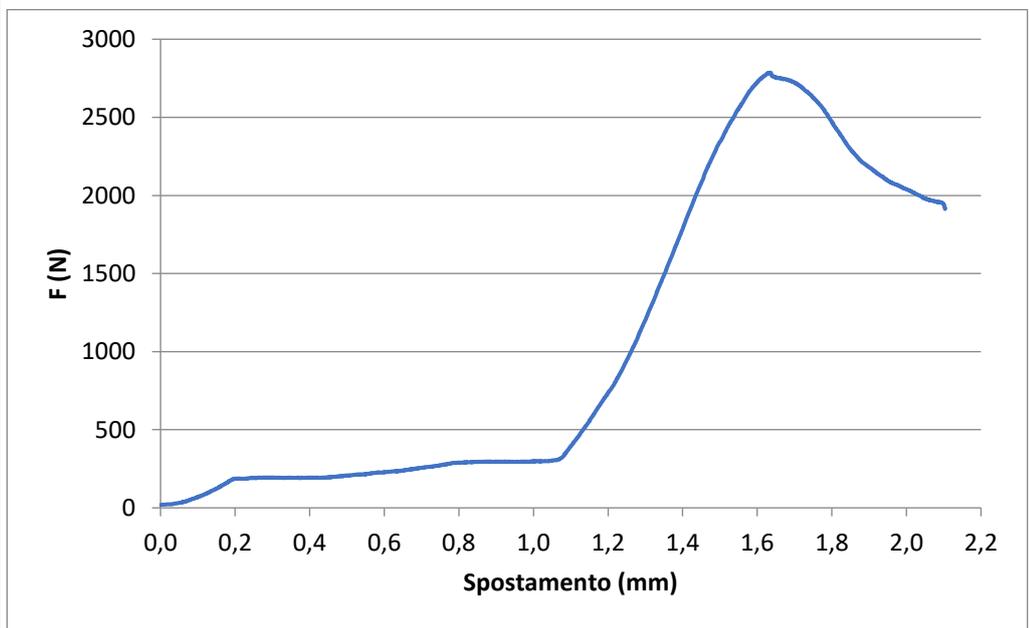
Mix design 2		
NOME PROVINO	C1A_M28G_MD2	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.70	



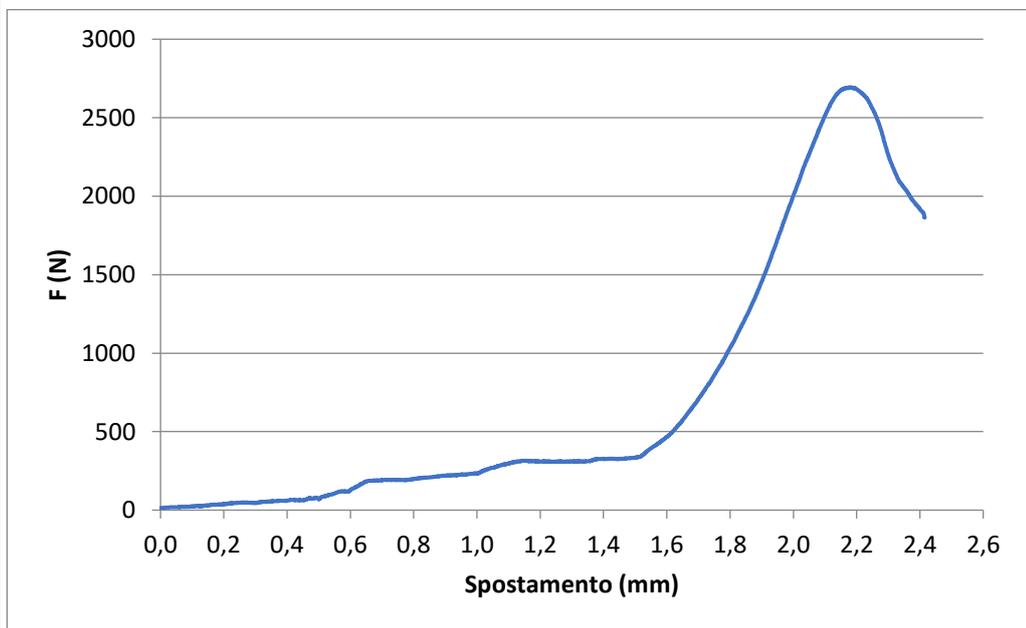
Mix design 2		
NOME PROVINO	C1B_M28G_MD2	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.51	



Mix design 2		
NOME PROVINO	C2A_M28G_MD2	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.74	



Mix design 2		
NOME PROVINO	C2B_M28G_MD2	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.68	



Mix design 2		
NOME PROVINO	C3A_M28G_MD2	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.79	

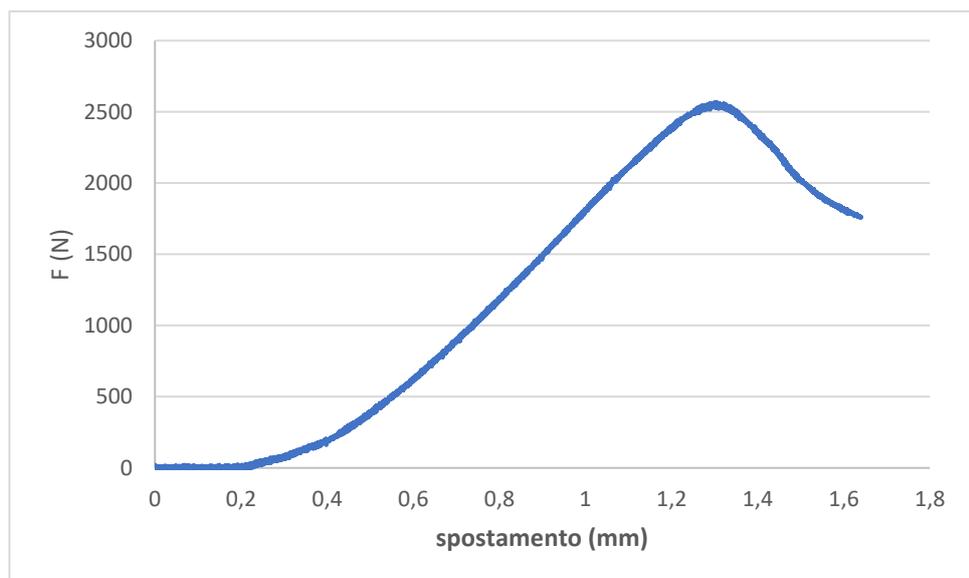
The graph displays the relationship between Force (F) in Newtons (N) on the y-axis and Displacement (Spostamento) in millimeters (mm) on the x-axis. The y-axis ranges from 0 to 3000 N with major ticks every 500 N. The x-axis ranges from 0.0 to 2.2 mm with major ticks every 0.2 mm. The curve starts at (0,0), remains near zero until approximately 1.1 mm, then rises sharply to a peak of about 2800 N at 1.7 mm, before decreasing to approximately 2300 N at 1.9 mm.

Spostamento (mm)	F (N)
0.0	0
0.2	100
0.4	150
0.6	200
0.8	250
1.0	300
1.2	500
1.4	1200
1.6	2500
1.7	2800
1.8	2600
1.9	2300

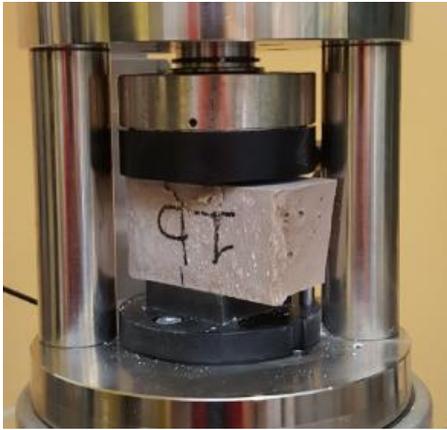
Mix design 2																																
NOME PROVINO	C3B_M28G_MD2	NO PHOTO																														
DIMENSIONI (mm)	40x40x80																															
AREA (mm ²)	1600																															
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO																														
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28																															
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.41																															
<p>The graph plots Force F (N) on the y-axis (0 to 3000) against Displacement Spostamento (mm) on the x-axis (0.0 to 2.8). The curve shows an initial linear elastic region up to about 1.6 mm, followed by a steep increase to a peak of ~2250 N at 2.2 mm, and then a gradual decrease.</p> <table border="1"> <caption>Approximate data points from the Force-Displacement graph</caption> <thead> <tr> <th>Spostamento (mm)</th> <th>Force F (N)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>10</td></tr> <tr><td>0.4</td><td>20</td></tr> <tr><td>0.6</td><td>30</td></tr> <tr><td>0.8</td><td>40</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>50</td></tr> <tr><td>1.2</td><td>60</td></tr> <tr><td>1.4</td><td>70</td></tr> <tr><td>1.6</td><td>80</td></tr> <tr><td>1.8</td><td>1000</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>1800</td></tr> <tr><td>2.2</td><td>2250</td></tr> <tr><td>2.4</td><td>2000</td></tr> <tr><td>2.6</td><td>1800</td></tr> </tbody> </table>			Spostamento (mm)	Force F (N)	0.0	0	0.2	10	0.4	20	0.6	30	0.8	40	1.0	50	1.2	60	1.4	70	1.6	80	1.8	1000	2.0	1800	2.2	2250	2.4	2000	2.6	1800
Spostamento (mm)	Force F (N)																															
0.0	0																															
0.2	10																															
0.4	20																															
0.6	30																															
0.8	40																															
1.0	50																															
1.2	60																															
1.4	70																															
1.6	80																															
1.8	1000																															
2.0	1800																															
2.2	2250																															
2.4	2000																															
2.6	1800																															

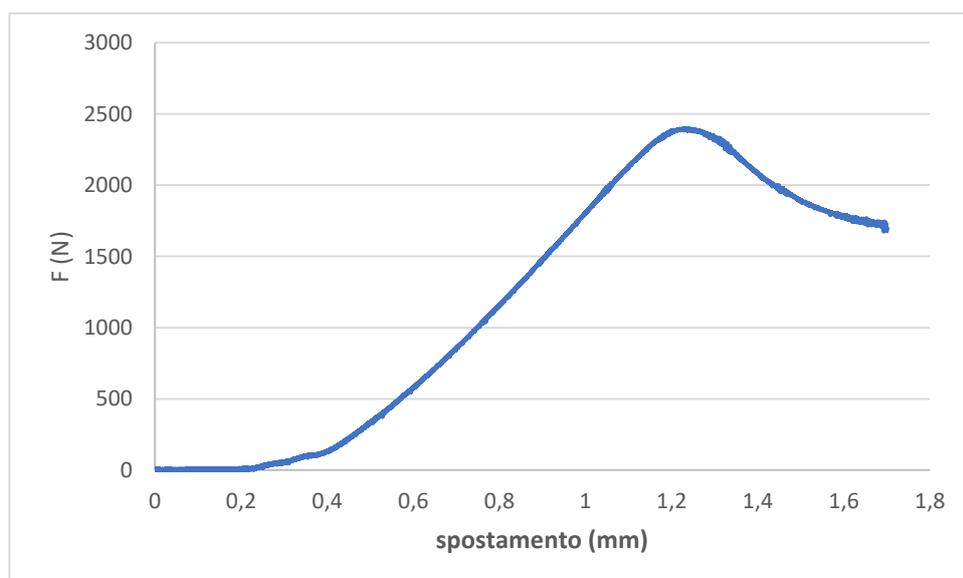
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C1A_M28G_BENT_NIC	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.61	

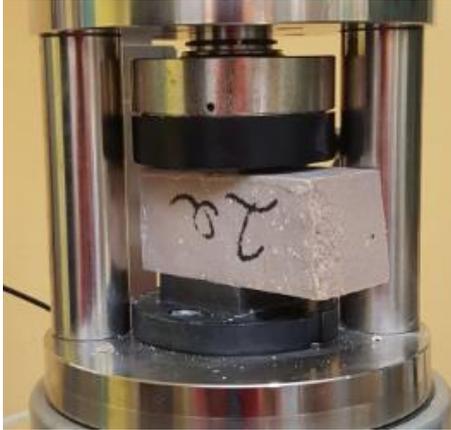


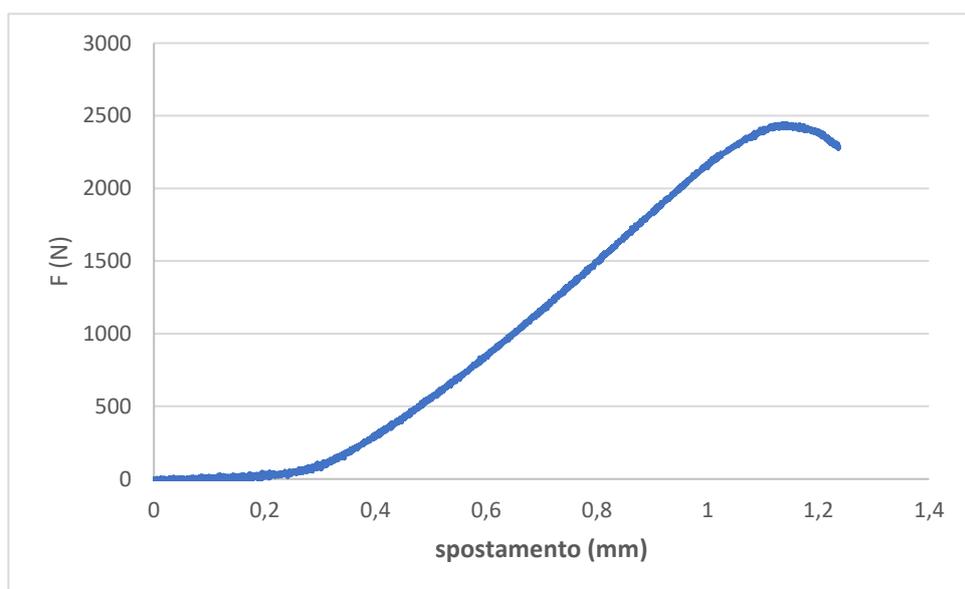
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C1B_M28G_BENT_NIC	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.49	

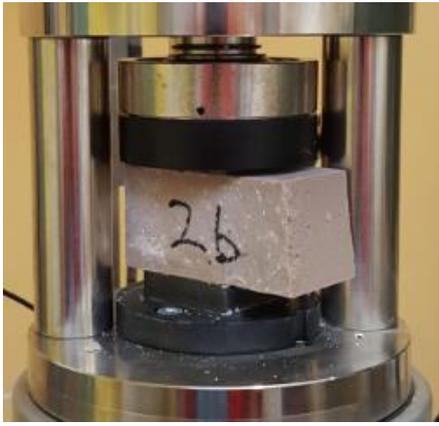
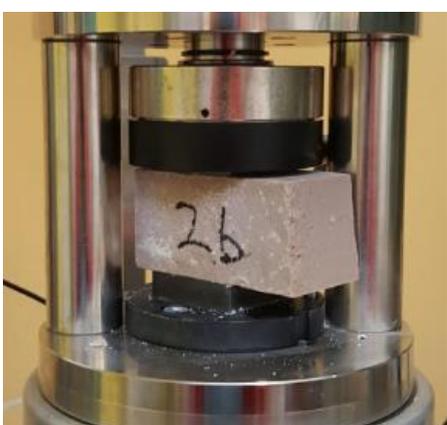


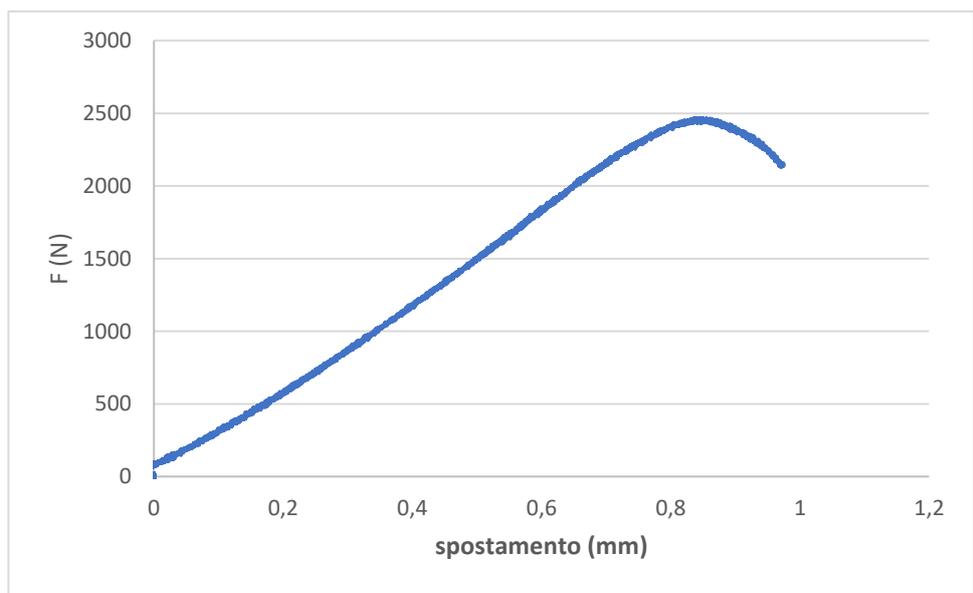
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C2A_M28G_BENT_NIC	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.53	

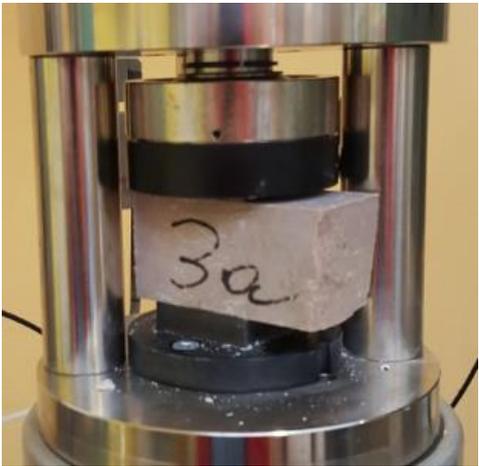


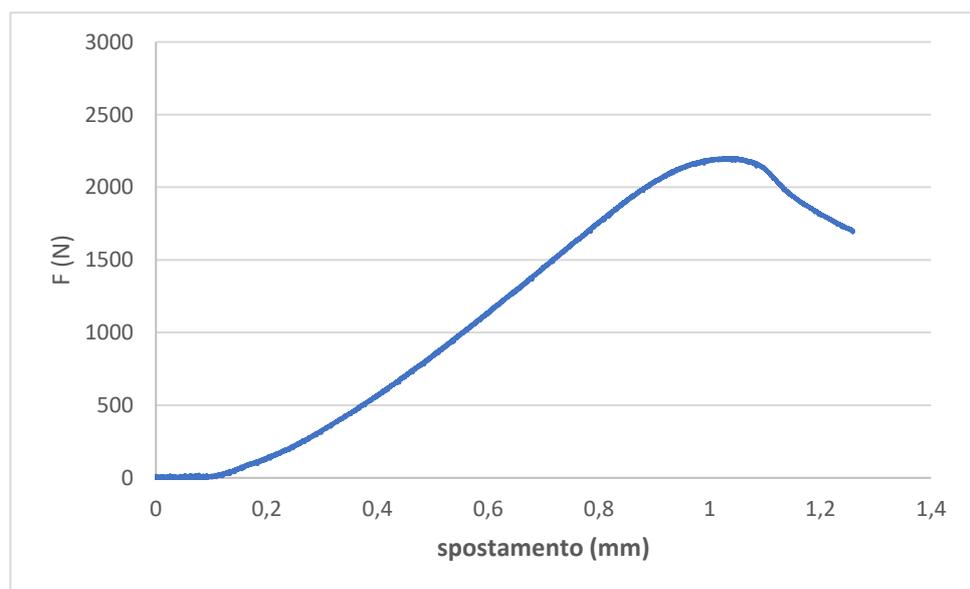
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

NOME PROVINO	C2B_M28G_BENT_NIC	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.54	

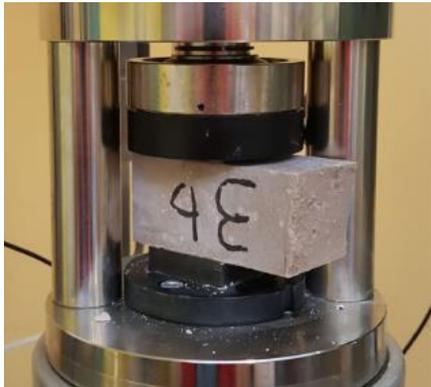
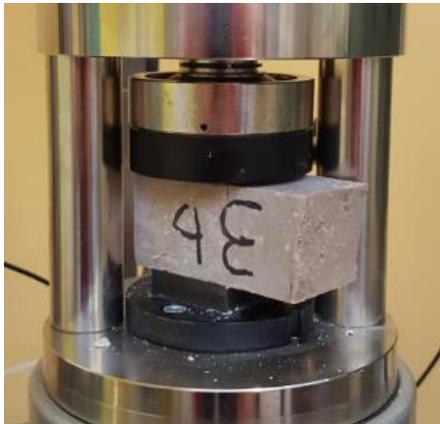


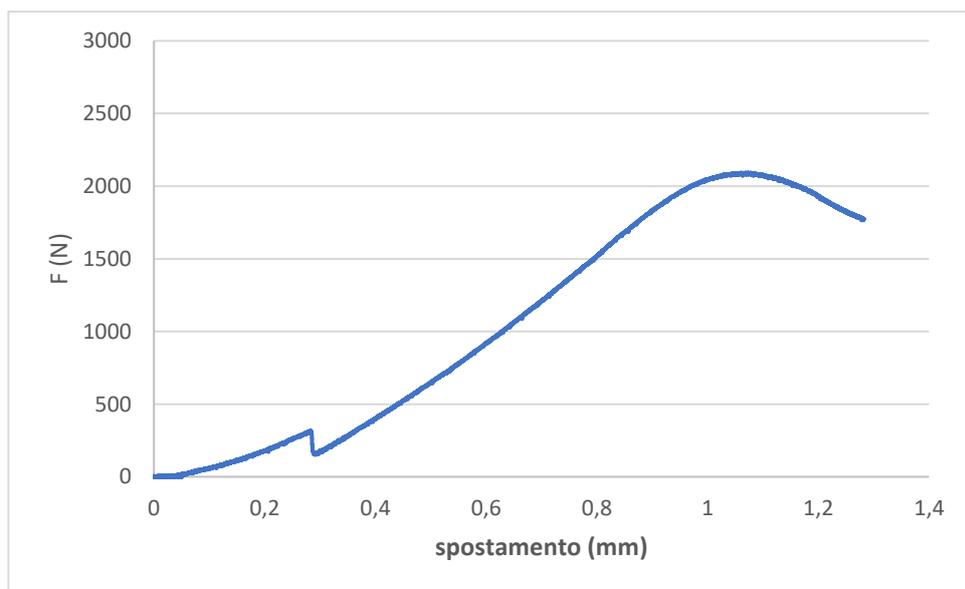
Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

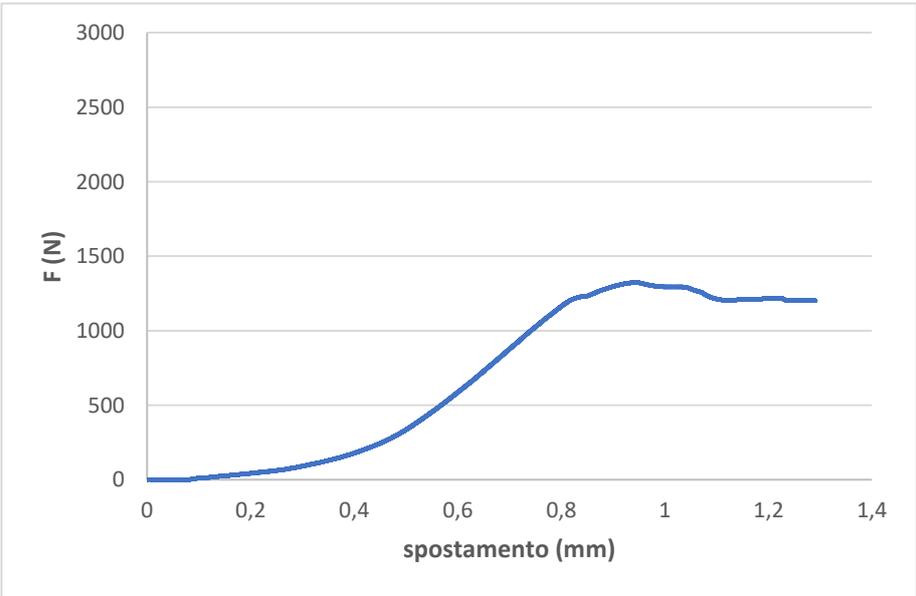
NOME PROVINO	C3A_M28G_BENT_NIC	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.38	



Mix con bentonite al 99% di montmorillonite

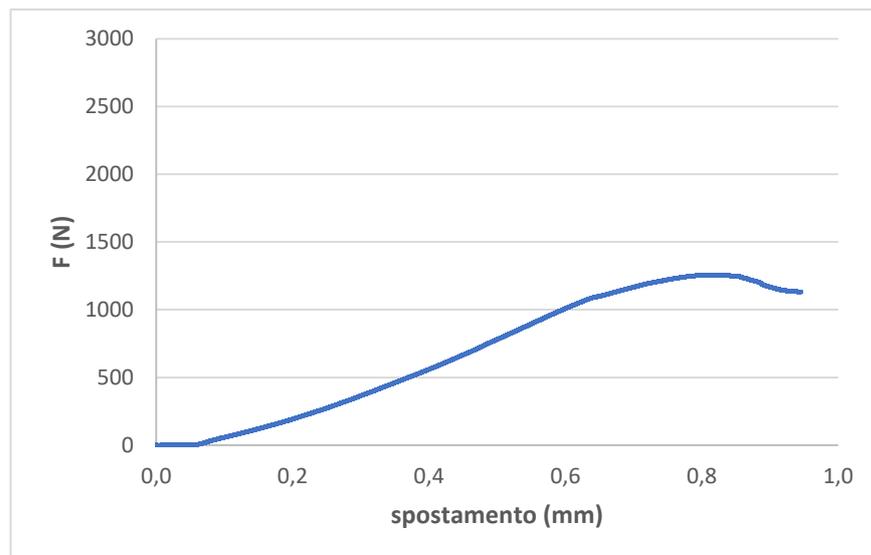
NOME PROVINO	C3B_M28G_BENT_NIC	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.31	



Mix con 5 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C1A_M28G_5KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.83	
		

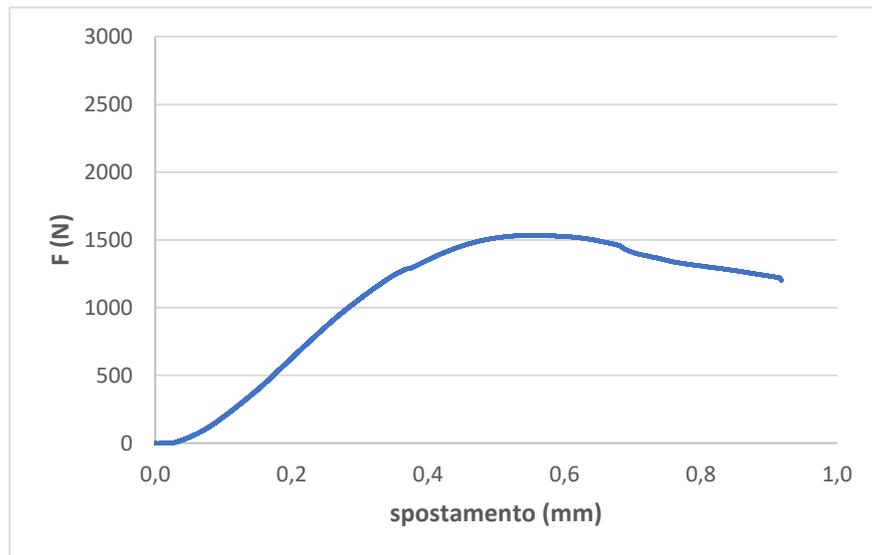
Mix con 5 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C1B_M28G_5KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.78	



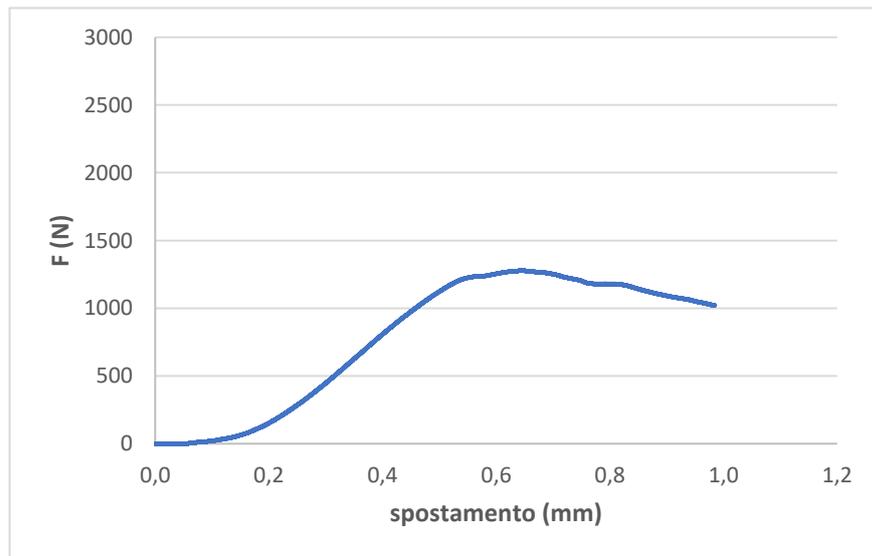
Mix con 5 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C2A_M28G_5KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.96	



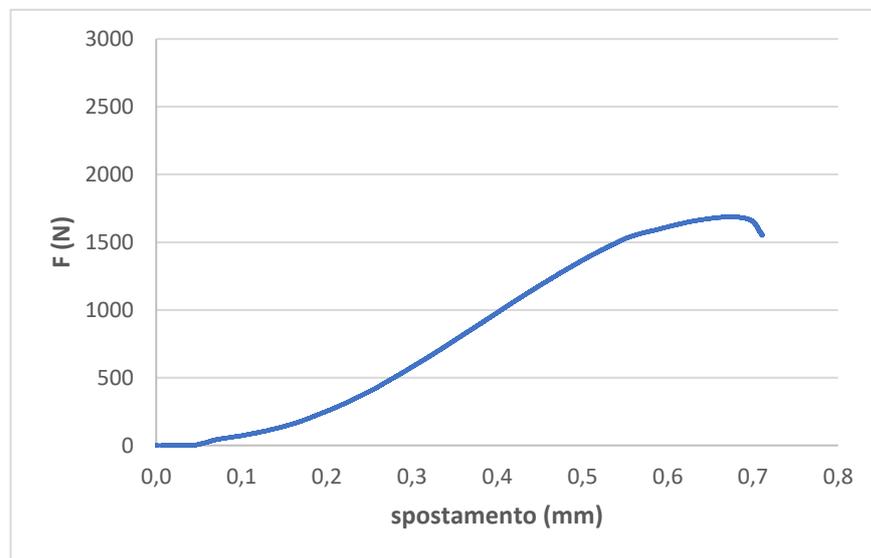
Mix con 5 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C2B_M28G_5KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.80	



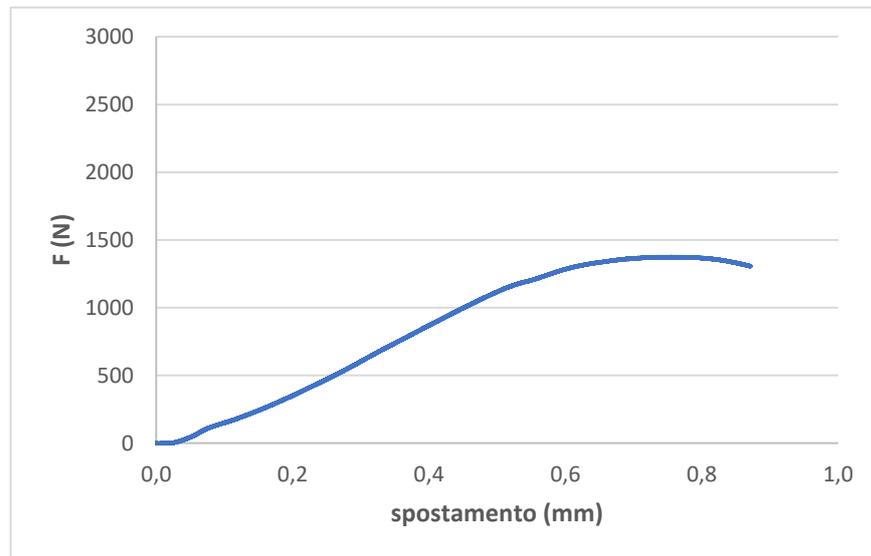
Mix con 5 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C3A_M28G_5KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	1.05	



Mix con 5 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C3B_M28G_5KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.86	



Mix con 6 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C1A_M28G_6KG_FR10	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.80	

spostamento (mm)	F (N)
0,0	0
0,1	200
0,2	500
0,3	900
0,4	1200
0,5	1300
0,6	1250
0,7	1150
0,8	1000

Mix con 6 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C1B_M28G_6KG_FR10	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.84	

spostamento (mm)	F (N)
0.0	0
0.2	200
0.4	700
0.6	1300
0.7	1350
0.8	1200

Mix con 6 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C2A_M28G_6KG_FR10	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.76	

spostamento (mm)	F (N)
0.0	0
0.2	100
0.4	400
0.6	1000
0.7	1200
0.8	1100
0.85	1000

Mix con 6 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C2B_M28G_6KG_FR10	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.76	

spostamento (mm)	F (N)
0,0	0
0,1	100
0,2	300
0,3	600
0,4	900
0,5	1200
0,6	1150
0,7	1050
0,75	1000

Mix con 6 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C3A_M28G_6KG_FR10	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.68	

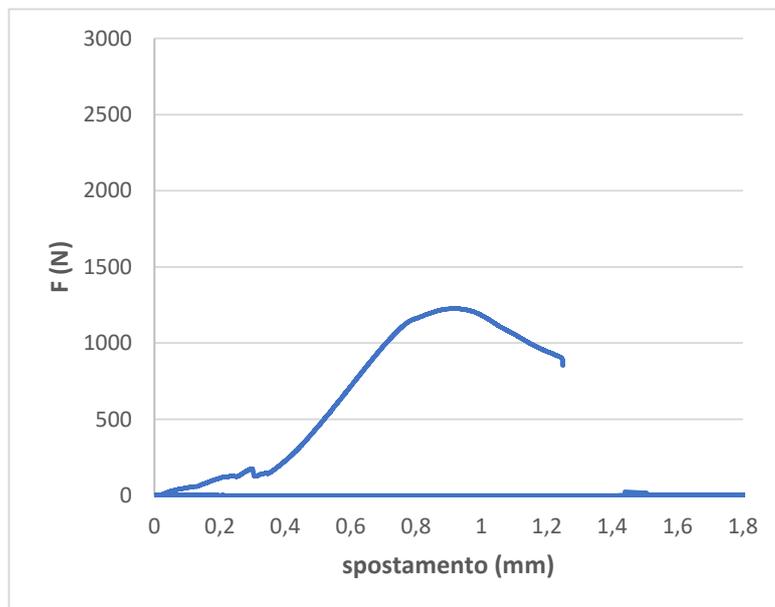
spostamento (mm)	F (N)
0.0	0
0.1	100
0.2	200
0.3	400
0.4	600
0.5	800
0.6	1000
0.7	1100
0.75	1100
0.8	1000
0.9	950
1.0	900

Mix con 6 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C3B_M28G_6KG_FR10	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.76	

spostamento (mm)	F (N)
0,0	0
0,1	300
0,2	550
0,3	850
0,4	1100
0,45	1200
0,5	1150
0,6	1100
0,65	1050

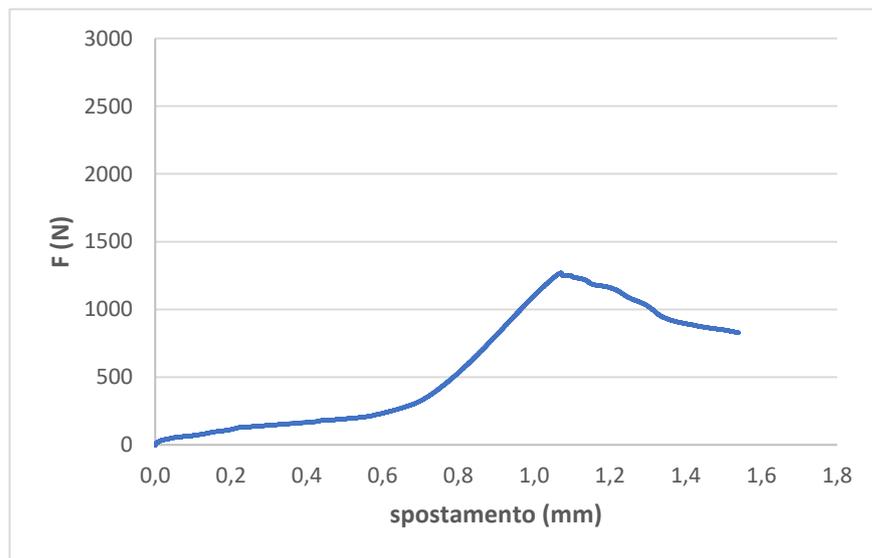
Mix con 7 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C1A_M28G_7KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.77	

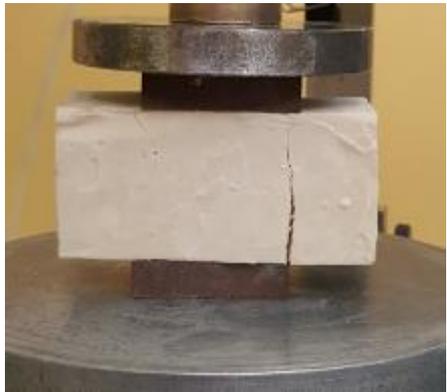


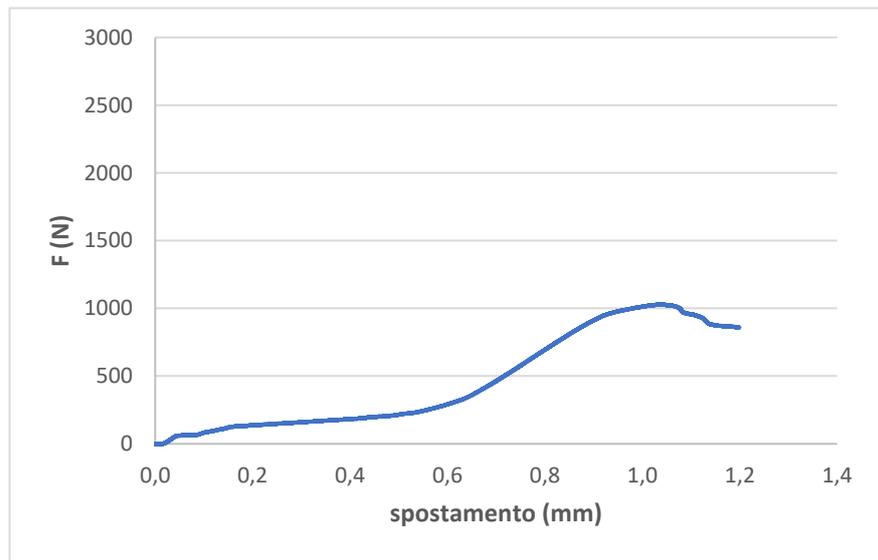
Mix con 7 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C1B_M28G_7KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.79	



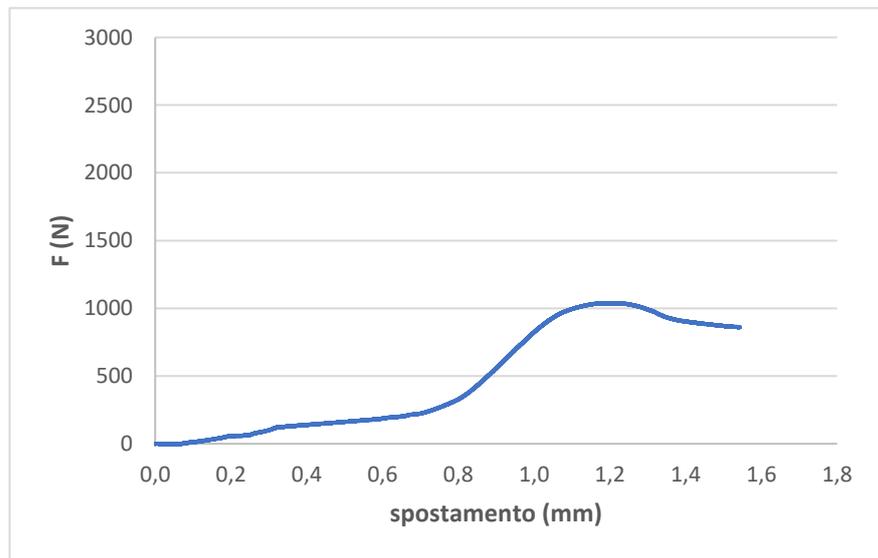
Mix con 7 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C2A_M28G_7KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.64	

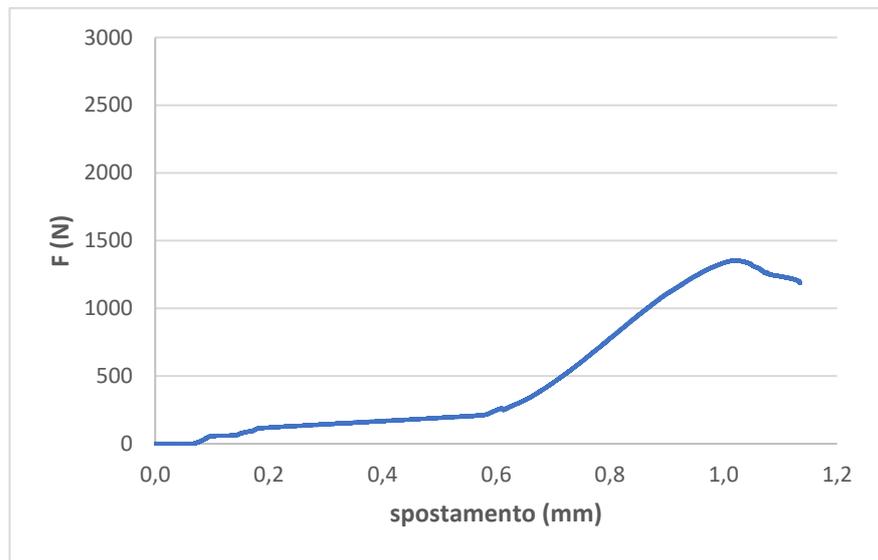


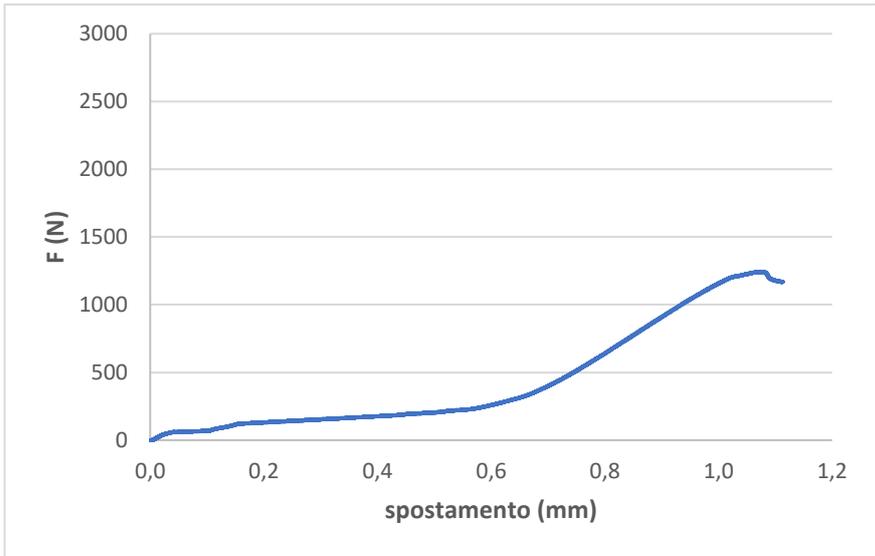
Mix con 7 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C2B_M28G_7KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.65	



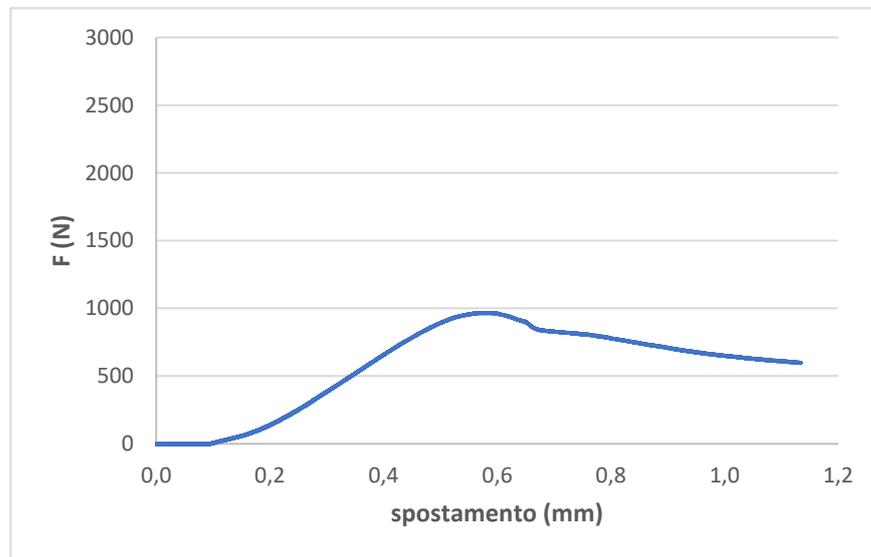
Mix con 7 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C3A_M28G_7KG_FR10	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.85	



Mix con 7 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C3B_M28G_7KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.78	
		

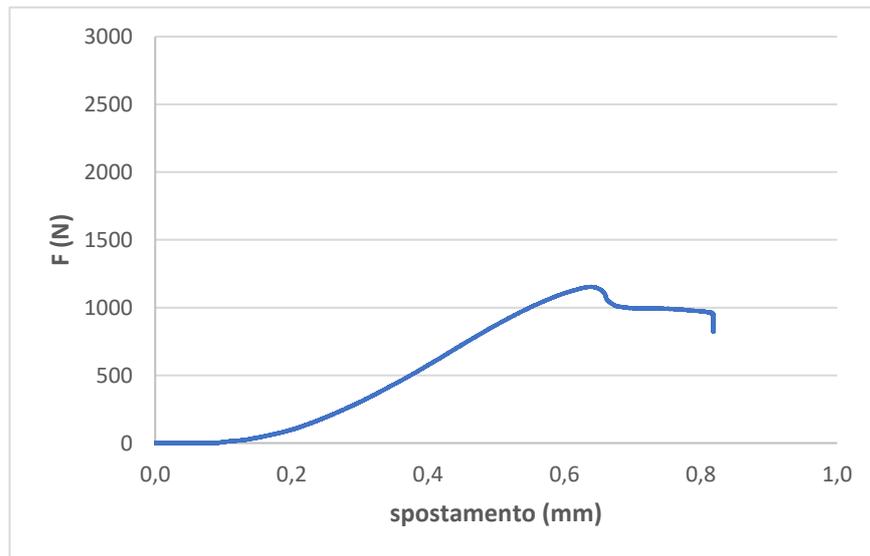
Mix con 8 kg/m³ FR10

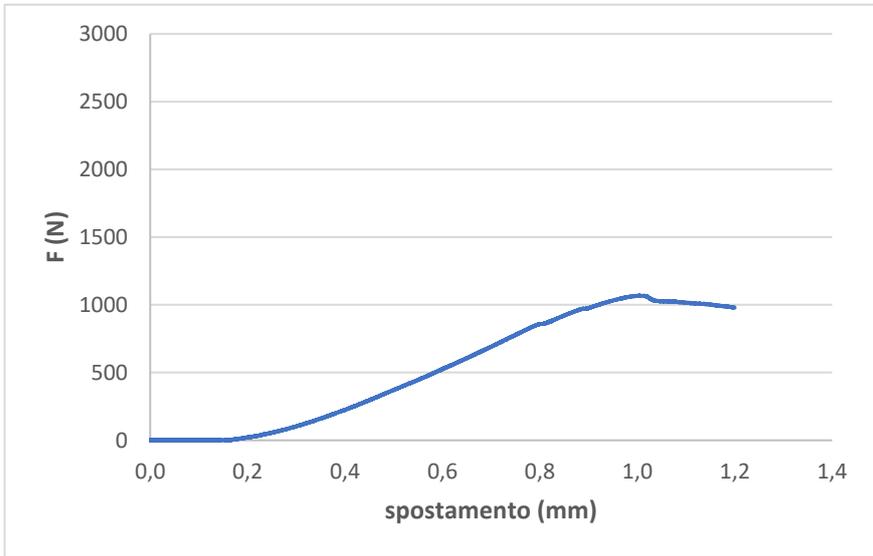
NOME PROVINO	C1A_M28G_8KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.60	



Mix con 8 kg/m³ FR10

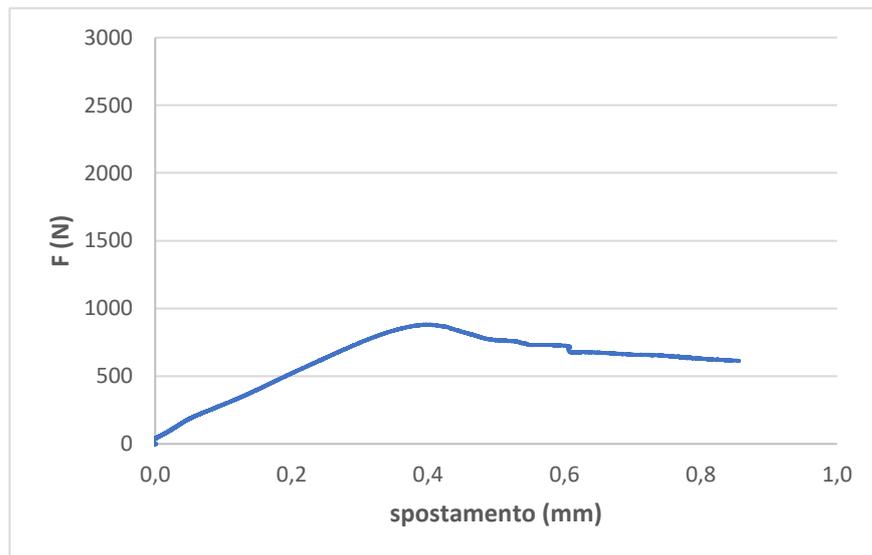
NOME PROVINO	C1B_M28G_8KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.72	



Mix con 8 kg/m³ FR10		
NOME PROVINO	C2A_M28G_8KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.67	
		

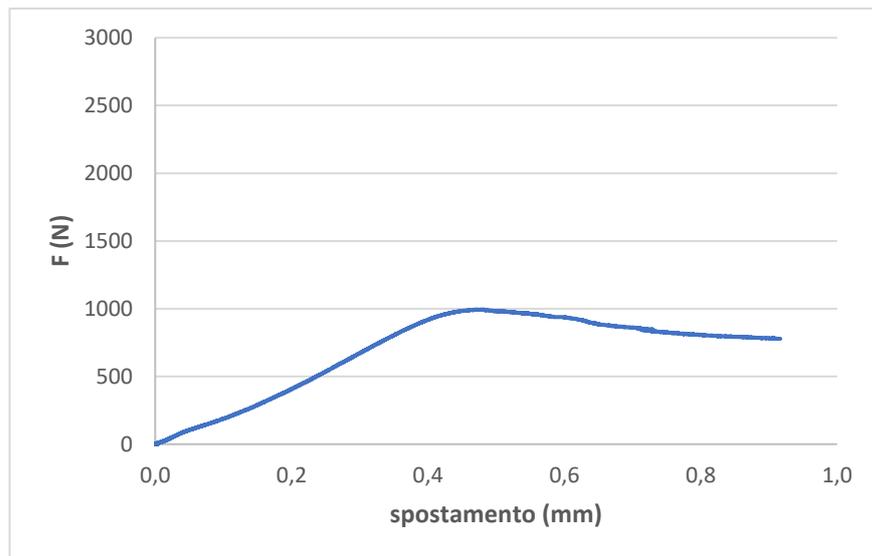
Mix con 8 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C2B_M28G_8KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.55	



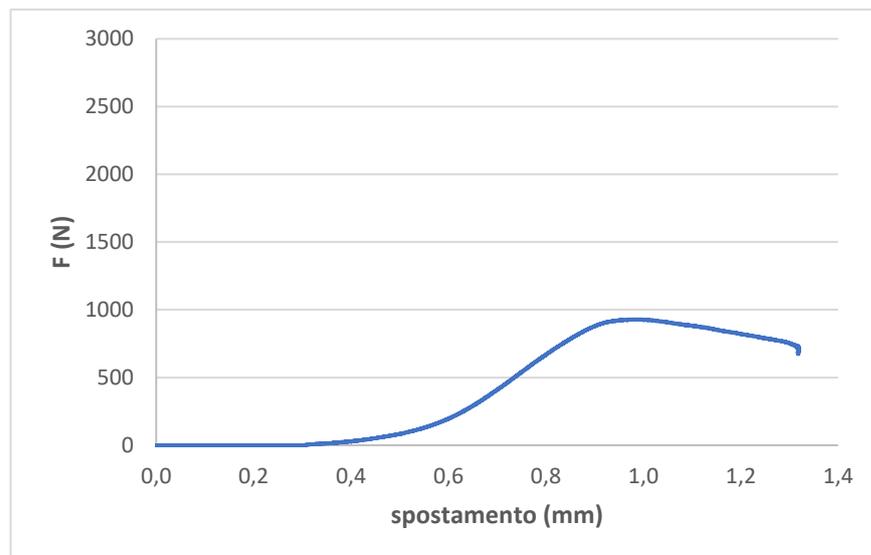
Mix con 8 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C3A_M28G_8KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.62	



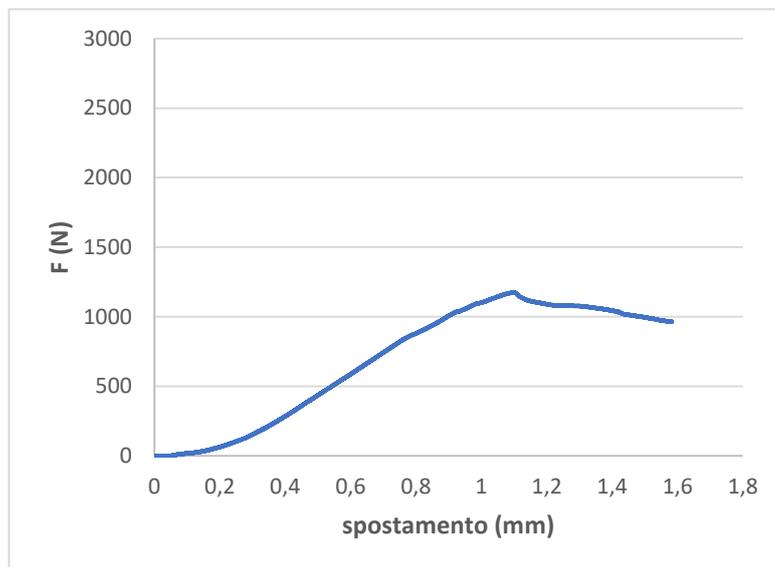
Mix con 8 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C3B_M28G_8KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.58	



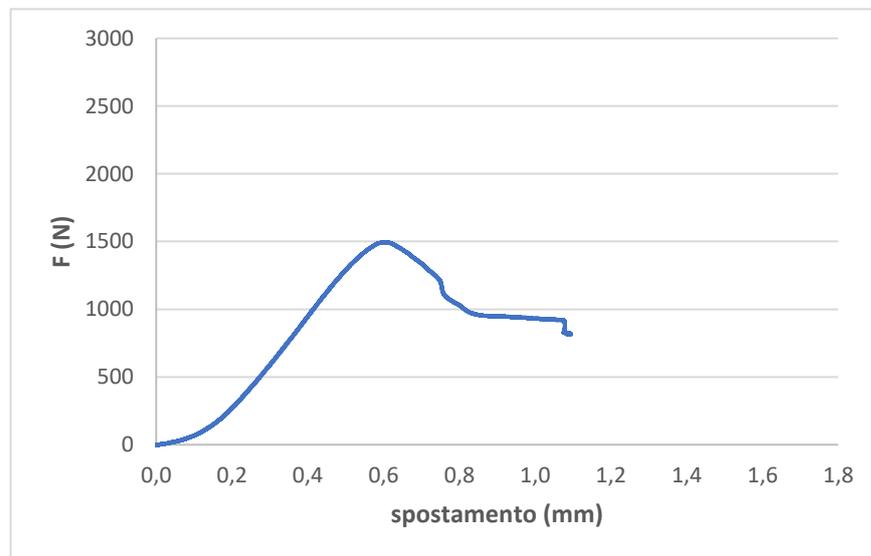
Mix con 9 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C1A_M28G_9KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.73	



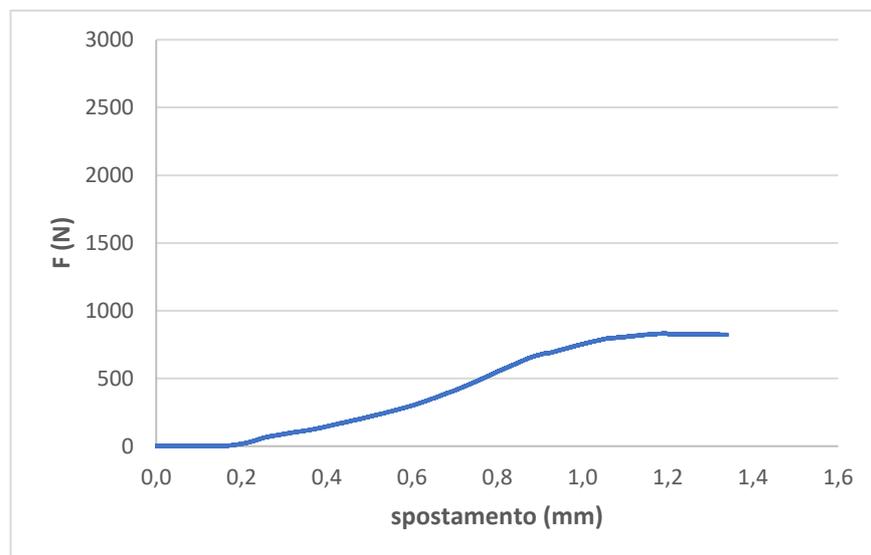
Mix con 9 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C1B_M28G_9KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.93	

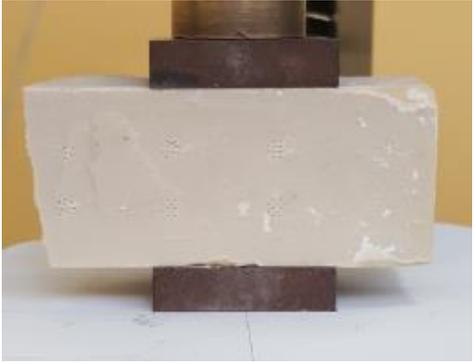


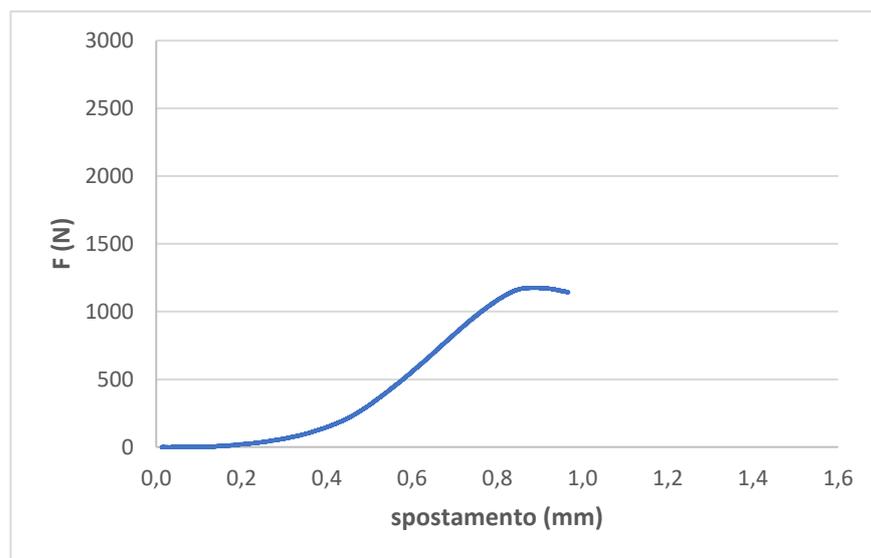
Mix con 9 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C2A_M28G_9KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.43	



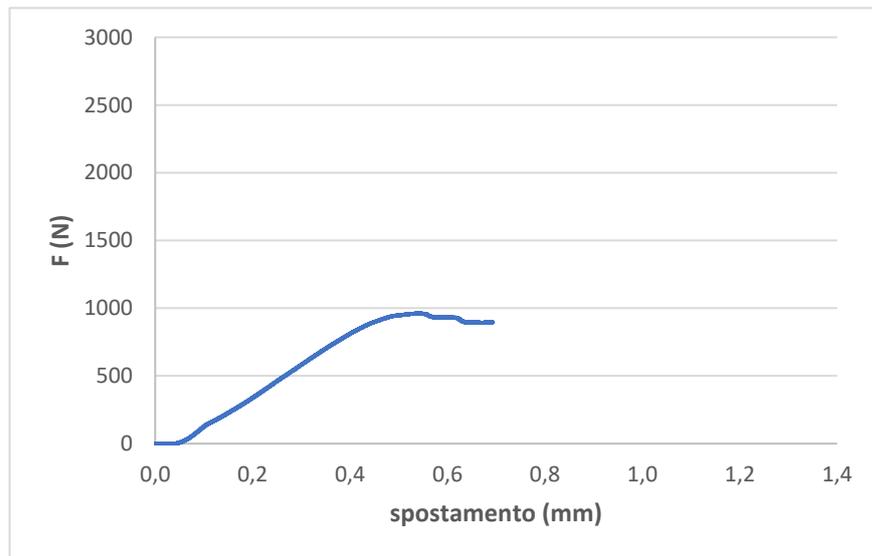
Mix con 9 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C2B_M28G_9KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.73	

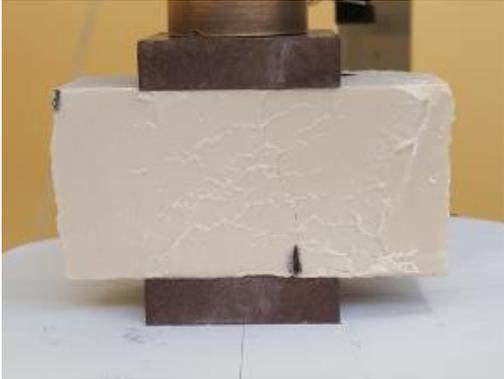


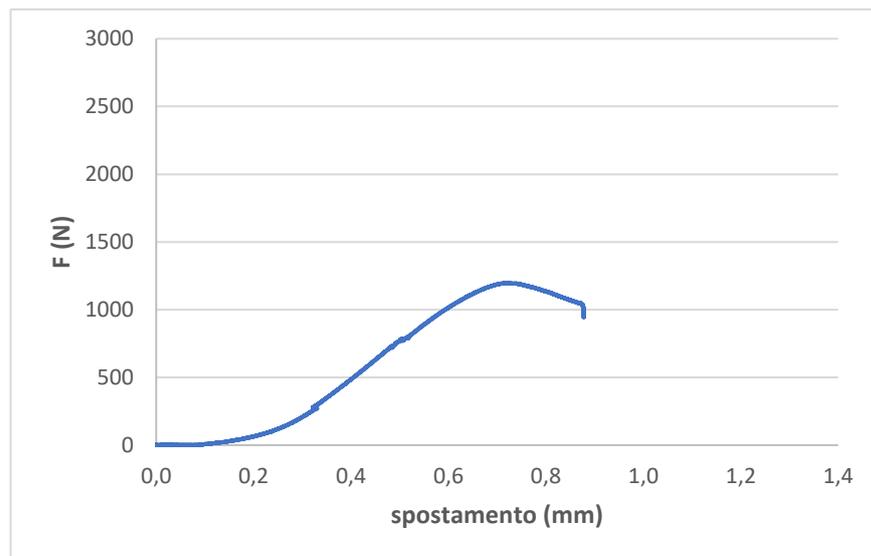
Mix con 9 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C3A_M28G_9KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.60	



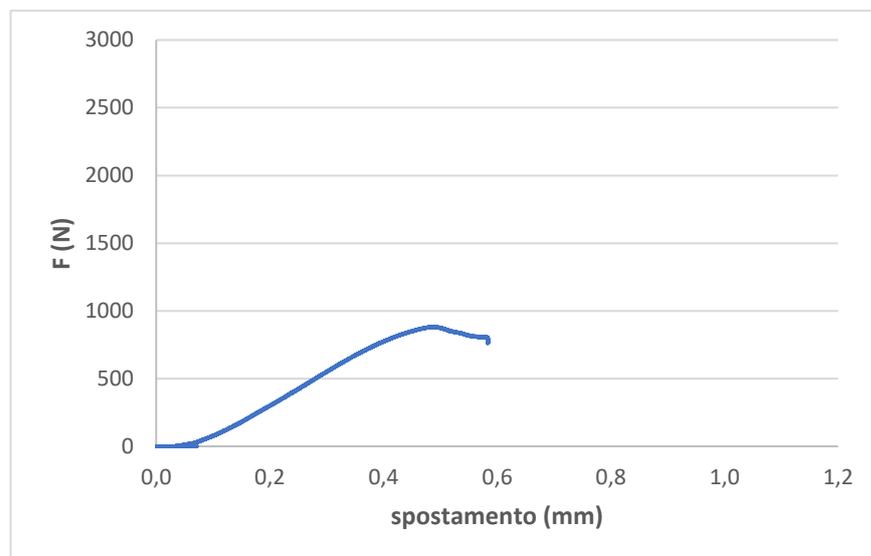
Mix con 9 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C3B_M28G_9KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.75	



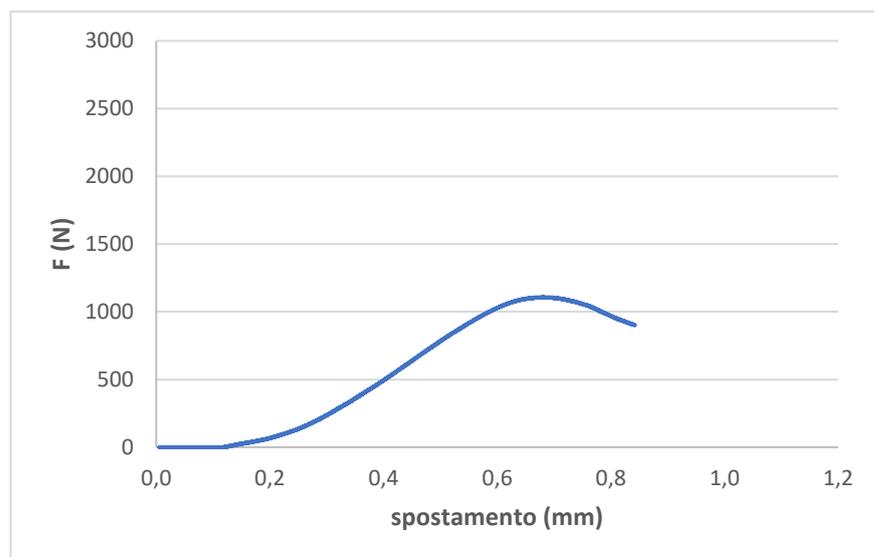
Mix con 10 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C1A_M28G_10KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.55	



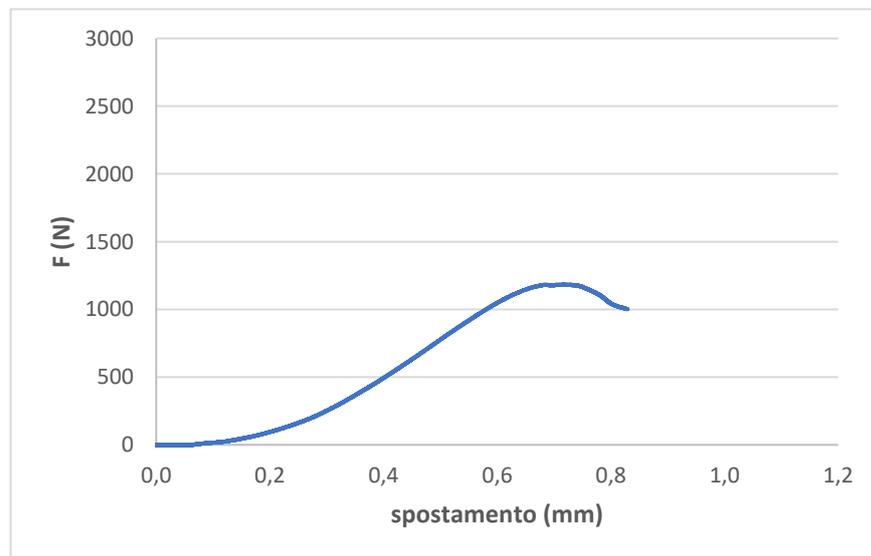
Mix con 10 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C1B_M28G_10KG_FR1 0	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.69	



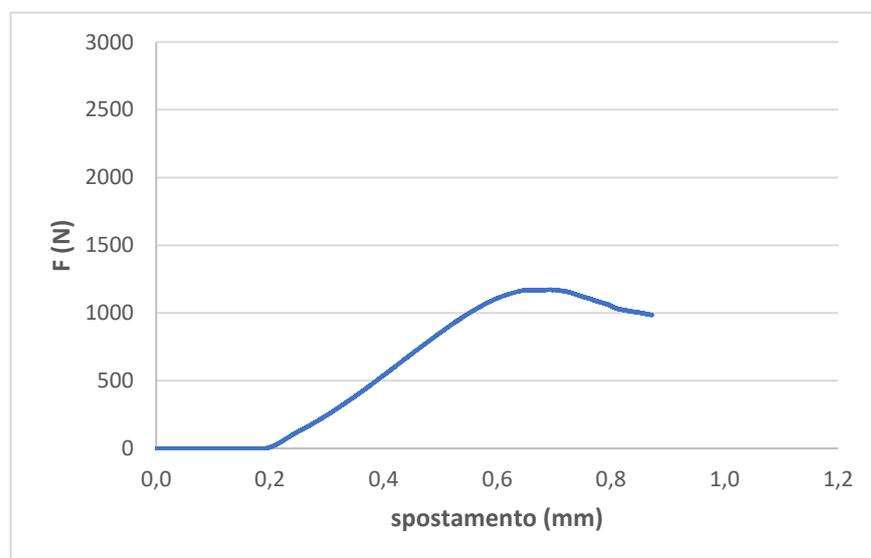
Mix con 10 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C2A_M28G_10KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.74	



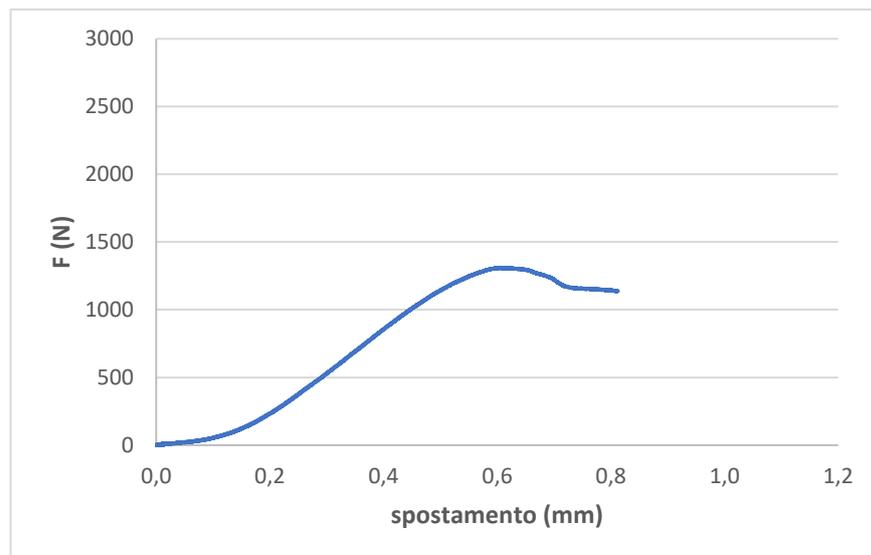
Mix con 10 kg/m³ FR10

NOME PROVINO	C2B_M28G_10KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.73	



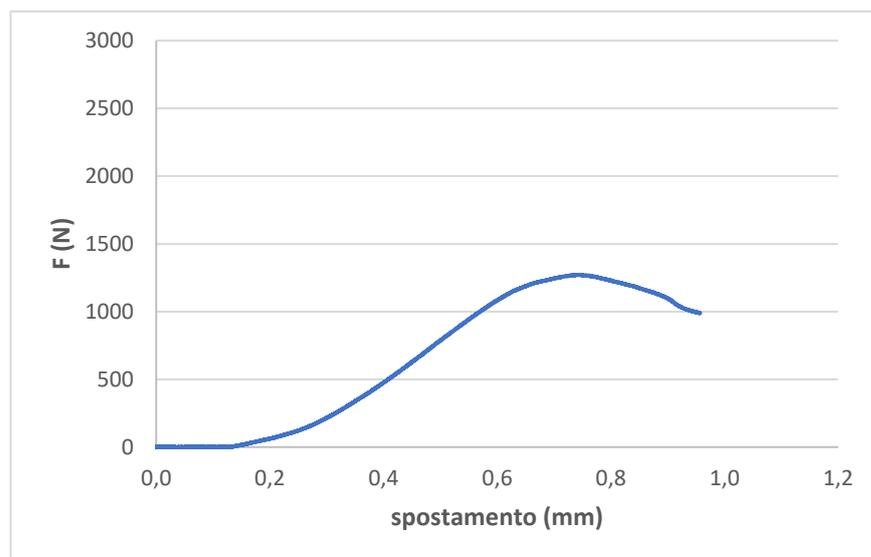
Mix con 10 kg/m³ FR10

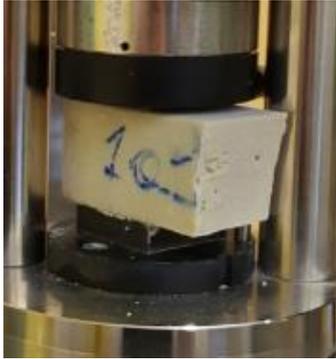
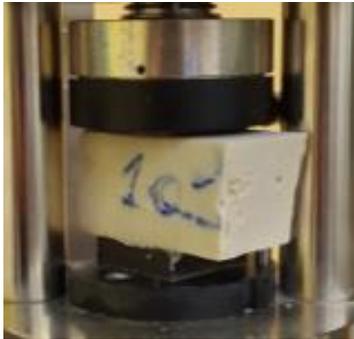
NOME PROVINO	C3A_M28G_10KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.82	

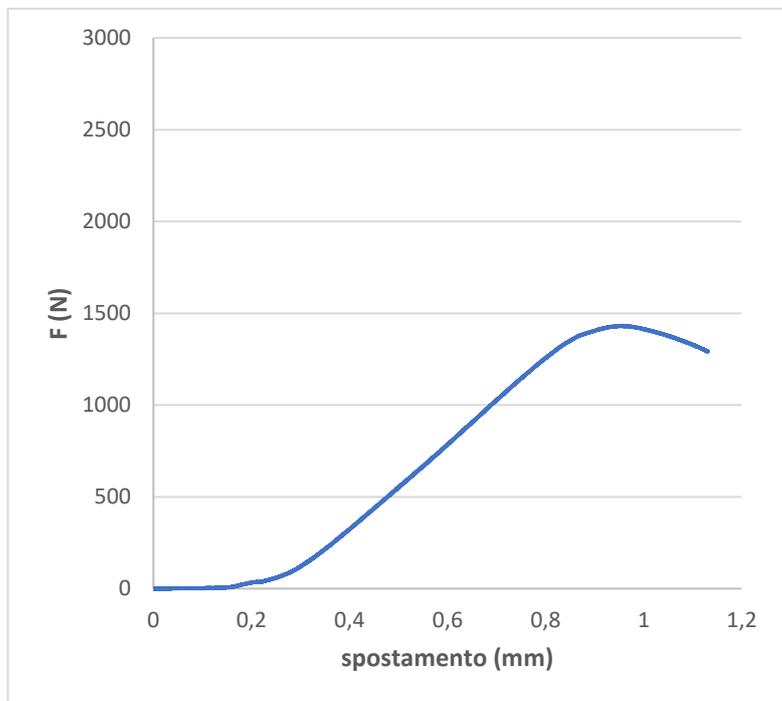


Mix con 10 kg/m³ FR10

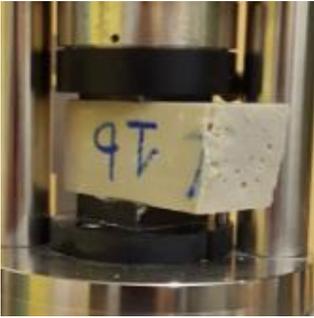
NOME PROVINO	C3B_M28G_10KG_FR10	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.79	

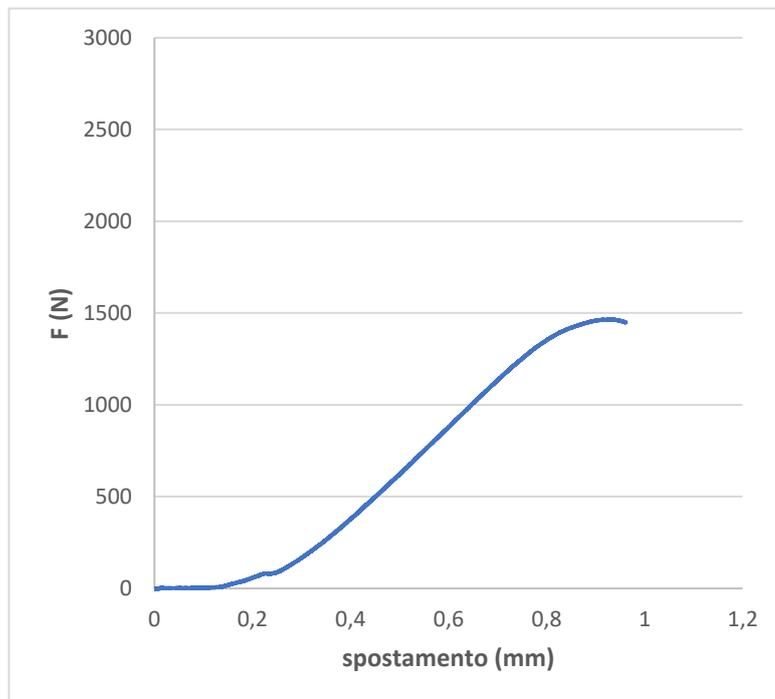


Mix con 7 kg/m³ FR10*		
NOME PROVINO	C1A_M28G_7KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.89	

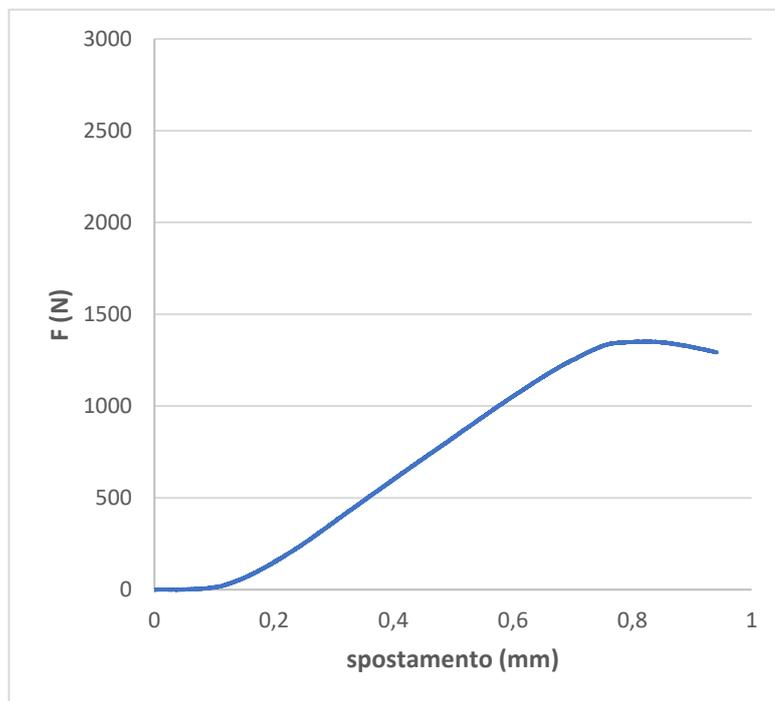


Mix con 7 kg/m³ FR10*

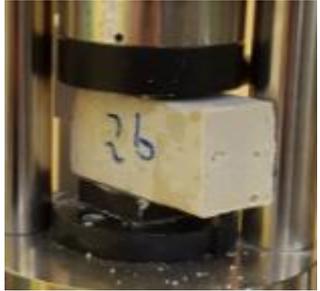
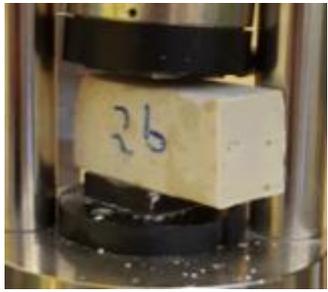
NOME PROVINO	C1B_M28G_7KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.92	

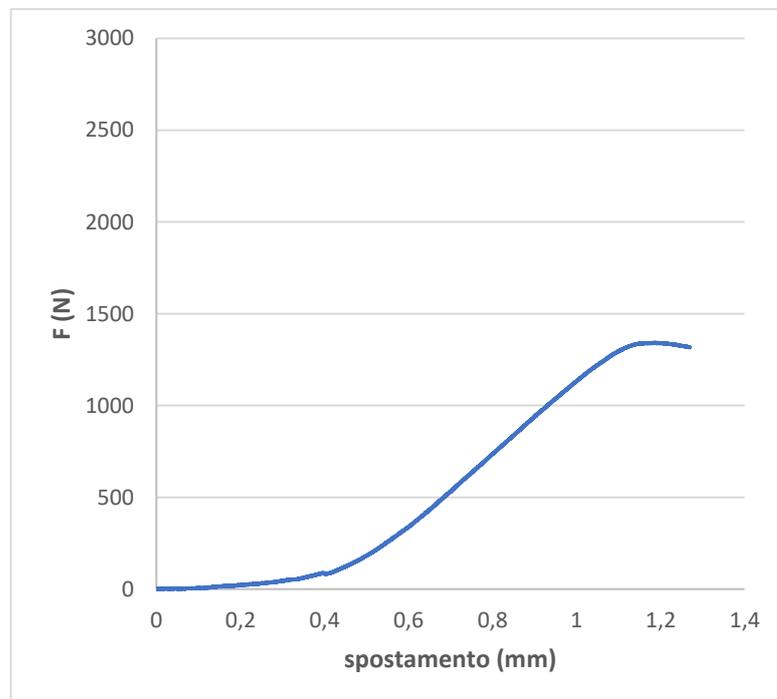


Mix con 7 kg/m³ FR10*		
NOME PROVINO	C2A_M28G_7KG_FR10*	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.84	

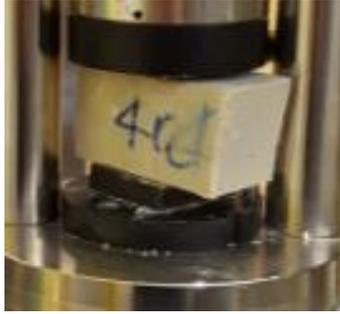


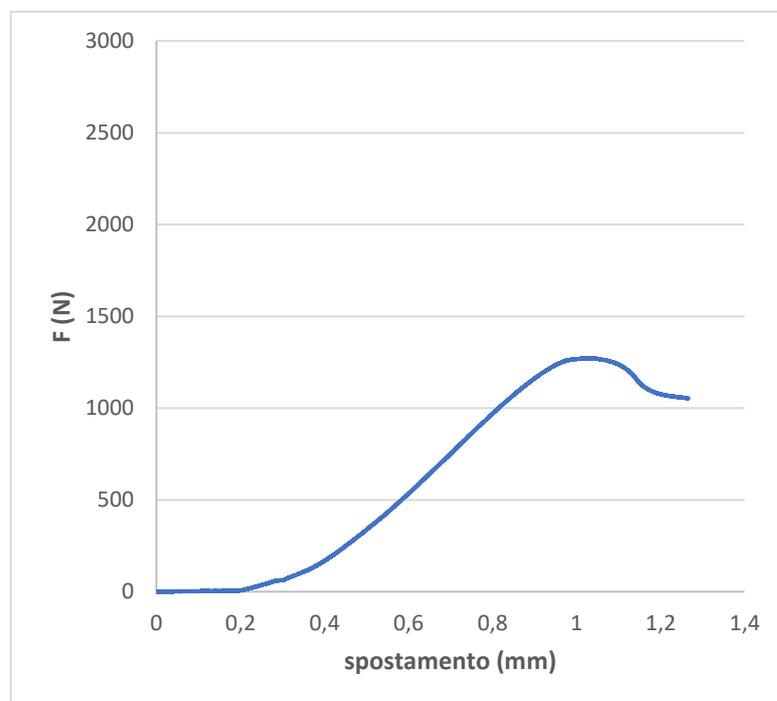
Mix con 7 kg/m³ FR10*

NOME PROVINO	C2B_M28G_7KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.84	

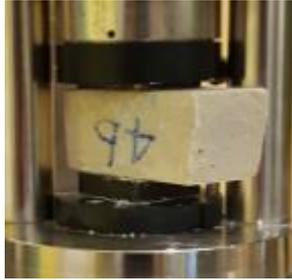


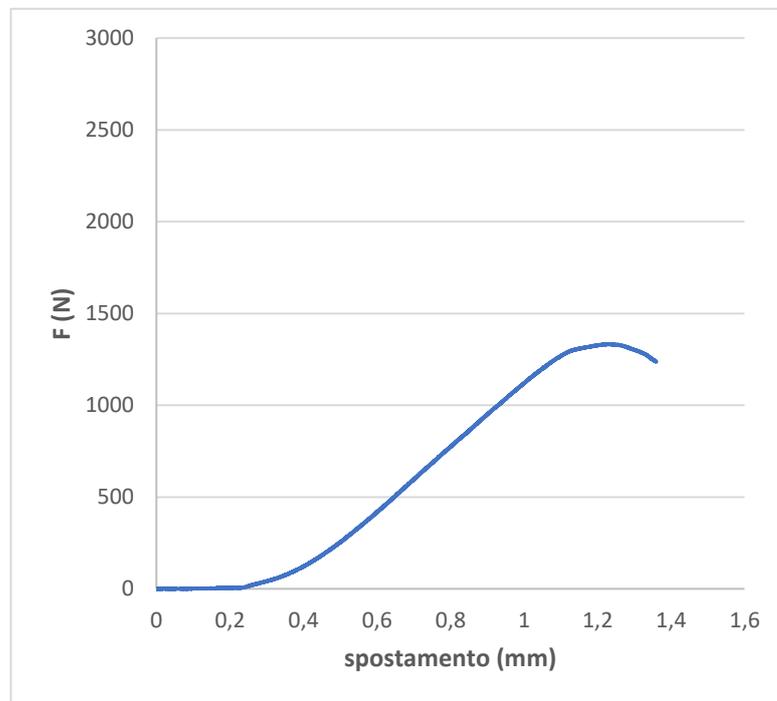
Mix con 7 kg/m³ FR10*

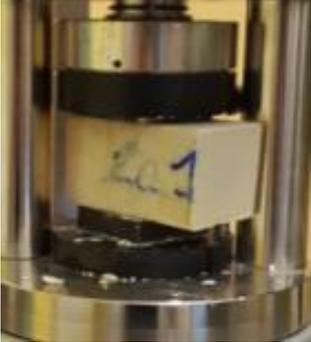
NOME PROVINO	C4A_M28G_7KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.79	

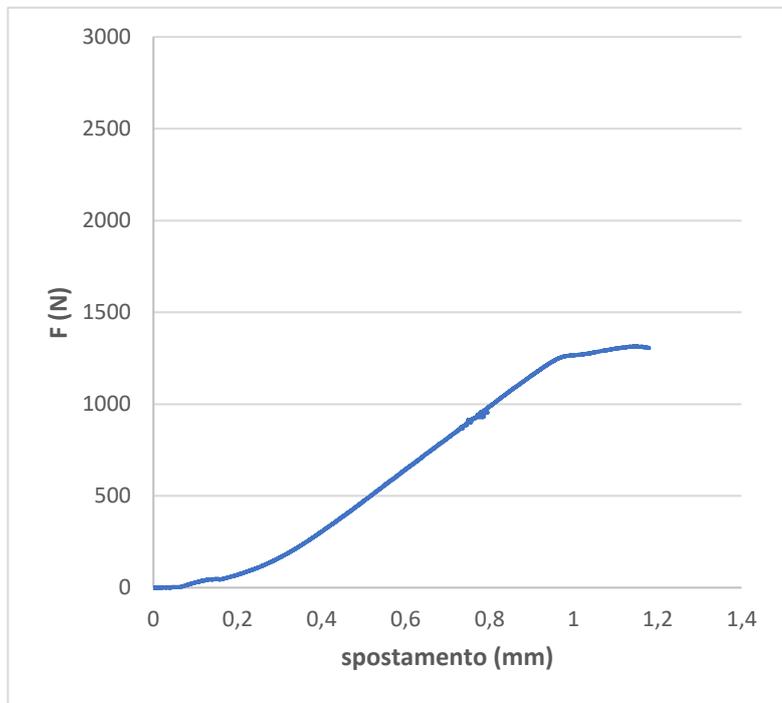


Mix con 7 kg/m³ FR10*

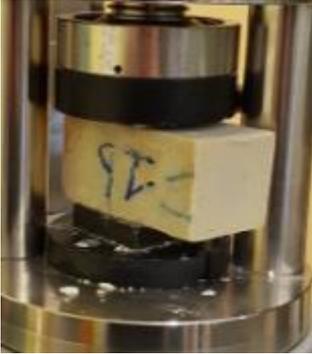
NOME PROVINO	C4B_M28G_7KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.83	

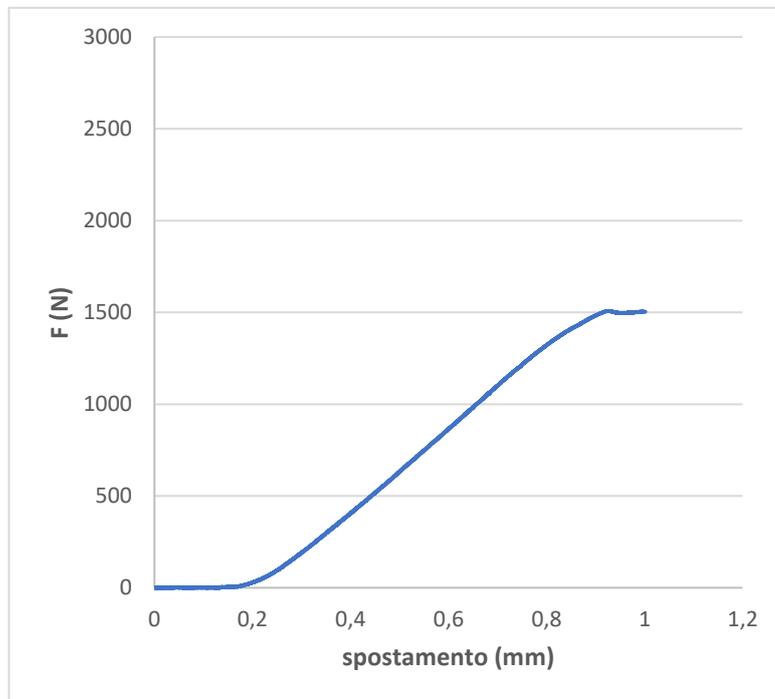


Mix con 8kg/m³ FR10*		
NOME PROVINO	C1A_M28G_8KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.82	

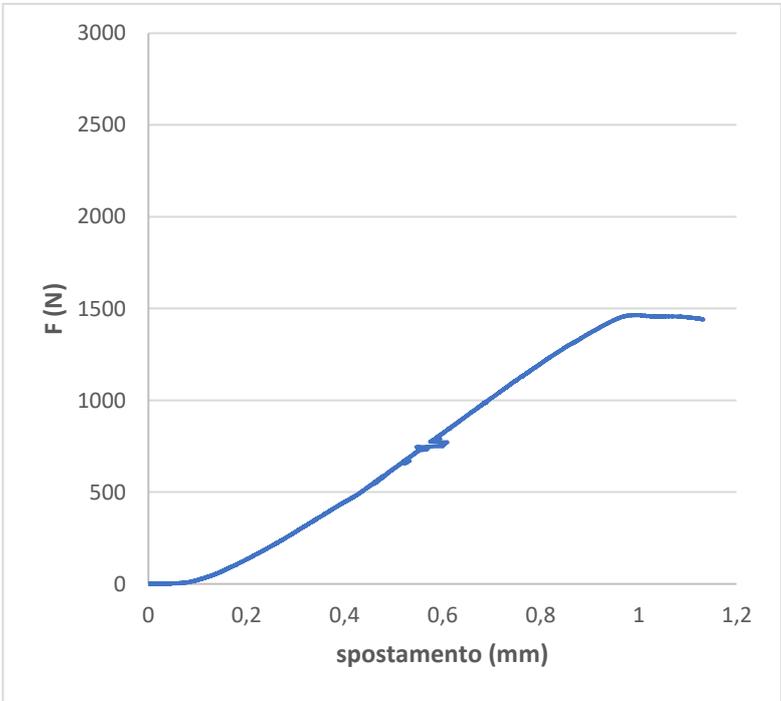


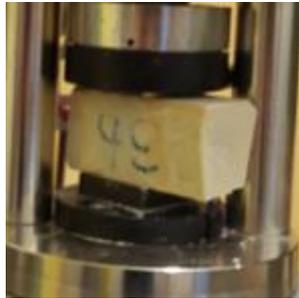
Mix con 8kg/m³ FR10*

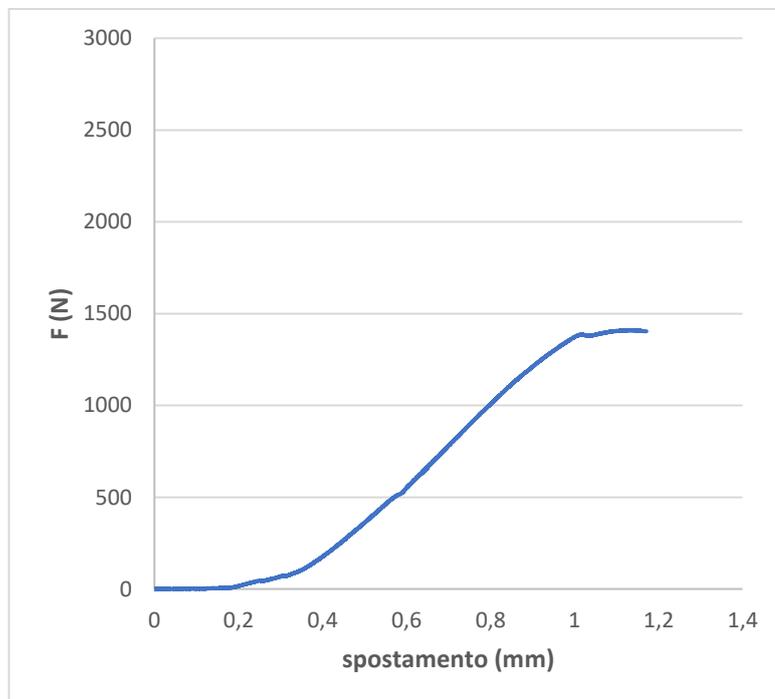
NOME PROVINO	C1B_M28G_8KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.94	



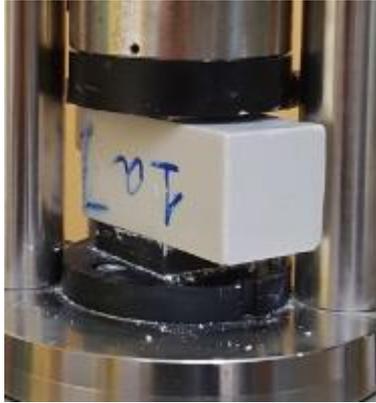
Mix con 8kg/m³ FR10*		
NOME PROVINO	C3A_M28G_8KG_FR10*	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.92	

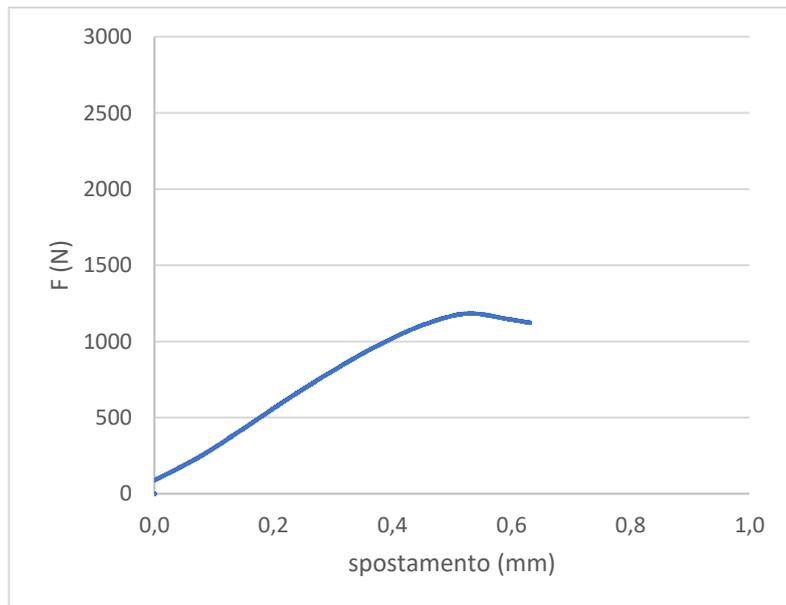


Mix con 8kg/m³ FR10*		
NOME PROVINO	C3B_M28G_8KG_FR10*	NO PHOTO
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.88	



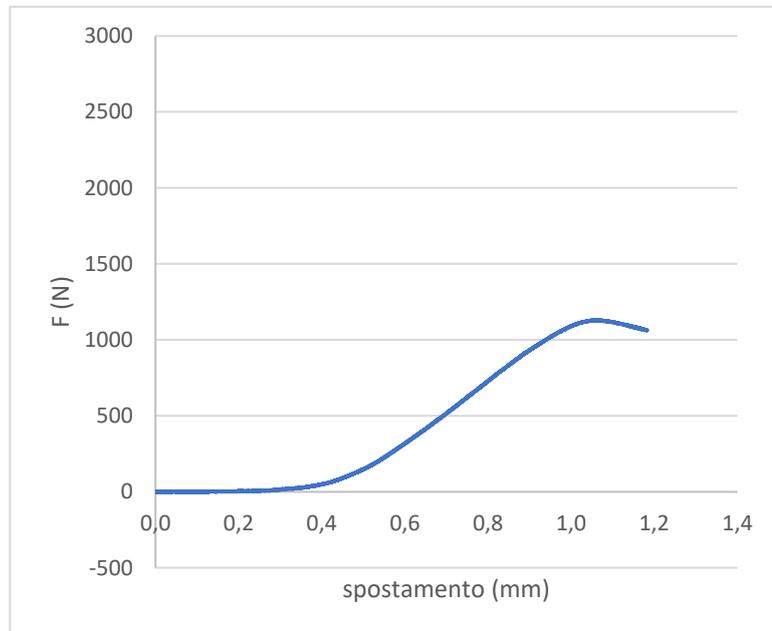
Mix con 2,5 kg/m³ FR10 in polvere

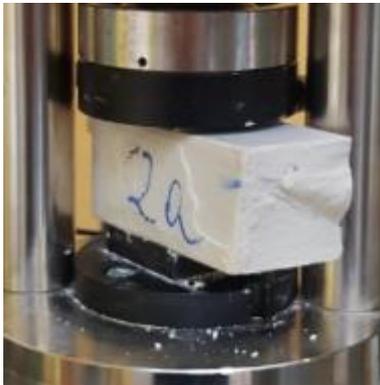
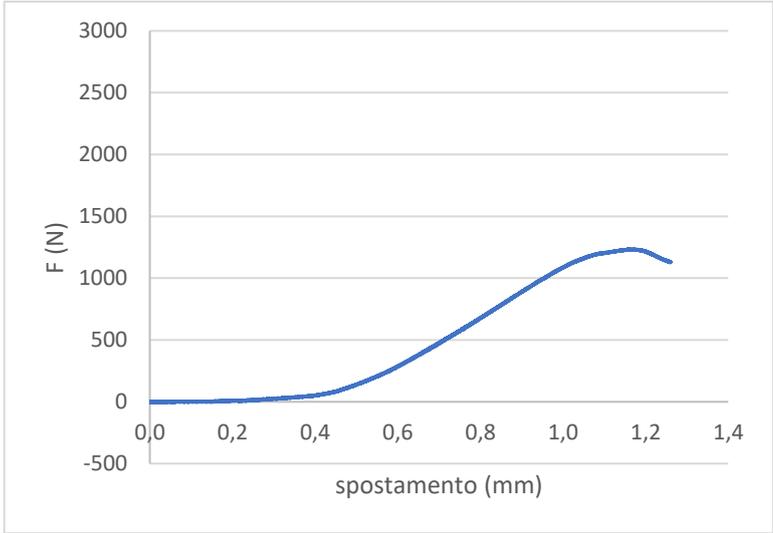
NOME PROVINO	C1A_M28G_2,5KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.74	



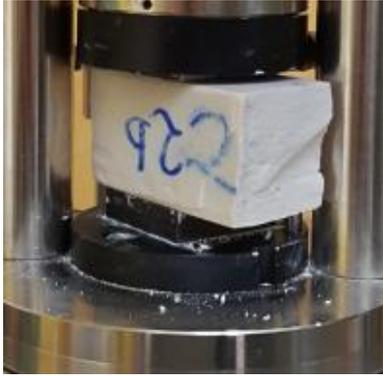
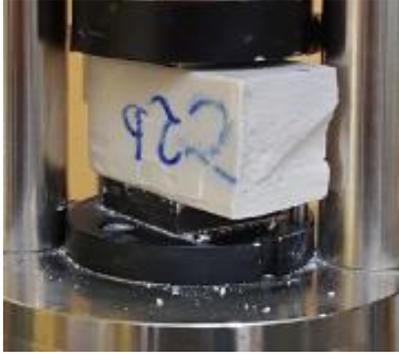
Mix con 2,5 kg/m³ FR10 in polvere

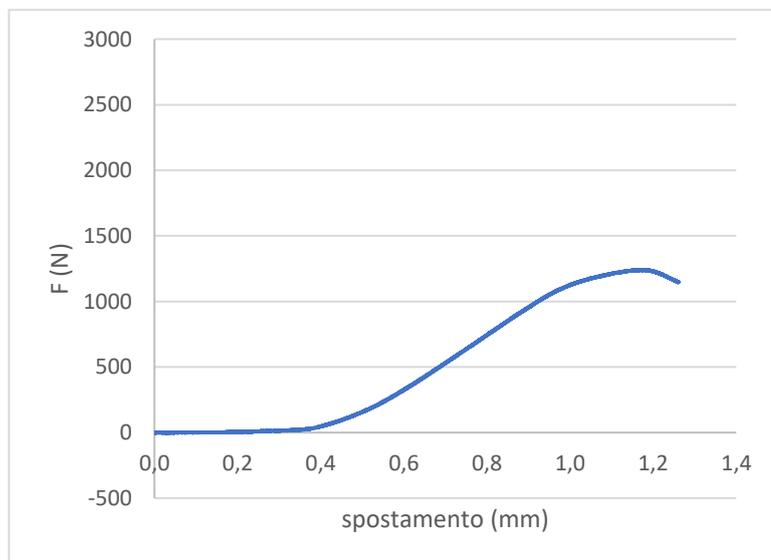
NOME PROVINO	C1B_M28G_2,5KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.71	



Mix con 2,5 kg/m³ FR10 in polvere		
NOME PROVINO	C2A_M28G_2,5KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.77	
		

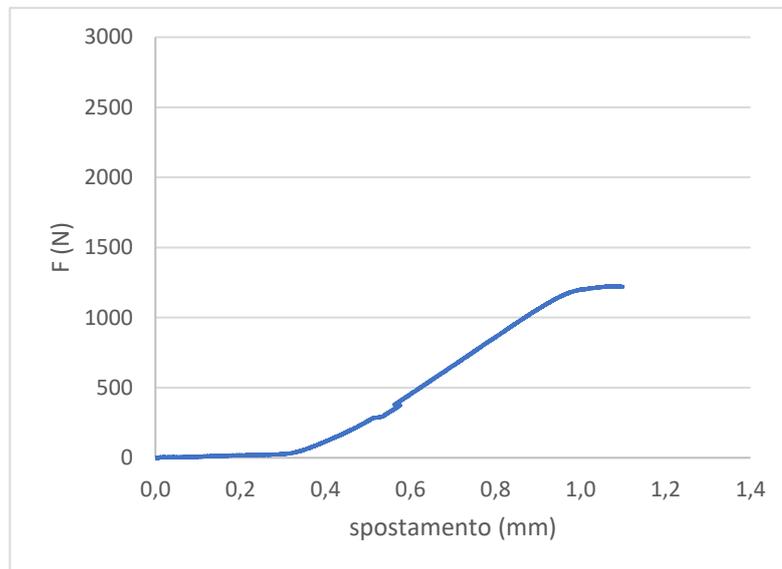
Mix con 2,5 kg/m³ FR10 in polvere

NOME PROVINO	C2B_M28G_2,5KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.77	



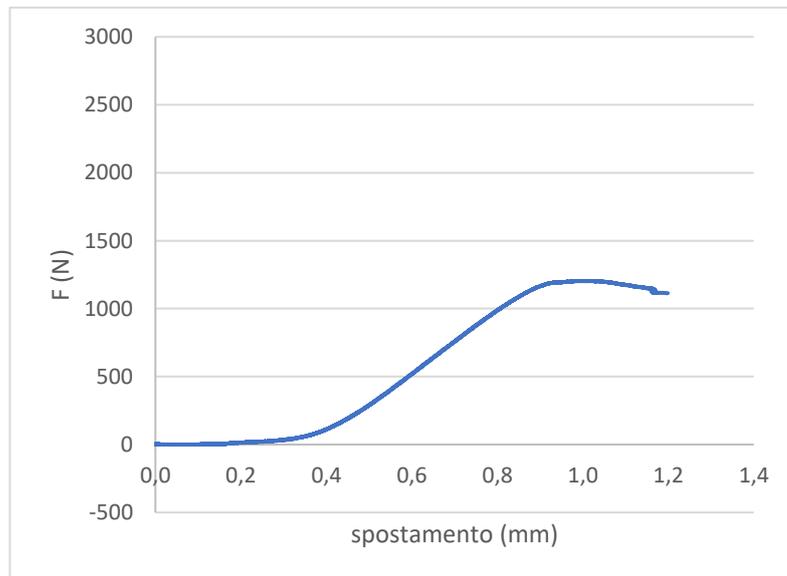
Mix con 2,5 kg/m³ FR10 in polvere

NOME PROVINO	C3A_M28G_2,5KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.76	

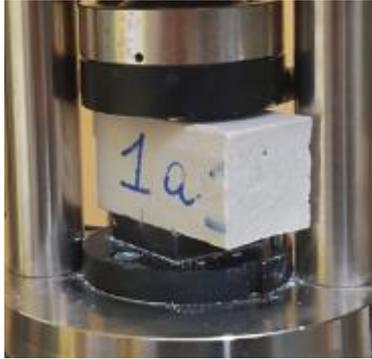
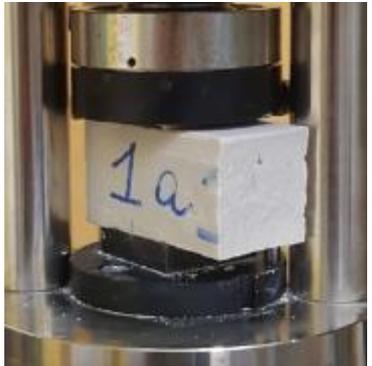


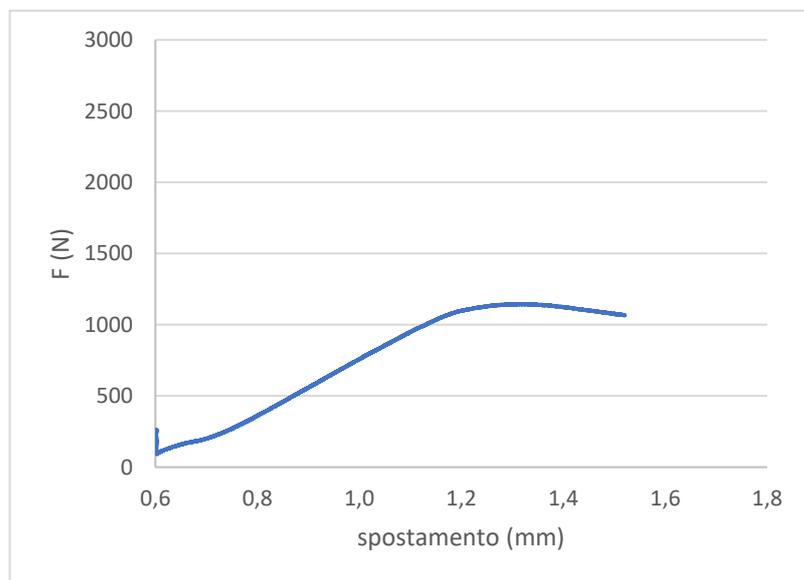
Mix con 2,5 kg/m³ FR10 in polvere

NOME PROVINO	C3B_M28G_2,5KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	NO PHOTO
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.75	



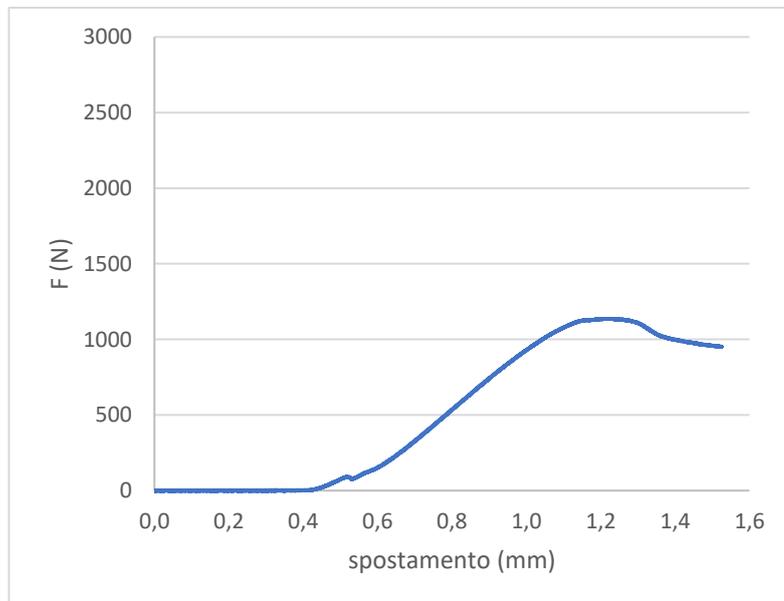
Mix con 3,0 kg/m³ FR10 in polvere

NOME PROVINO	C1A_M28G_3KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.72	

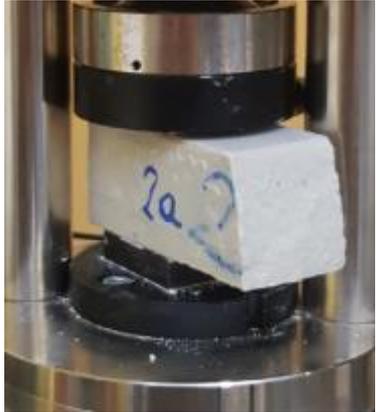


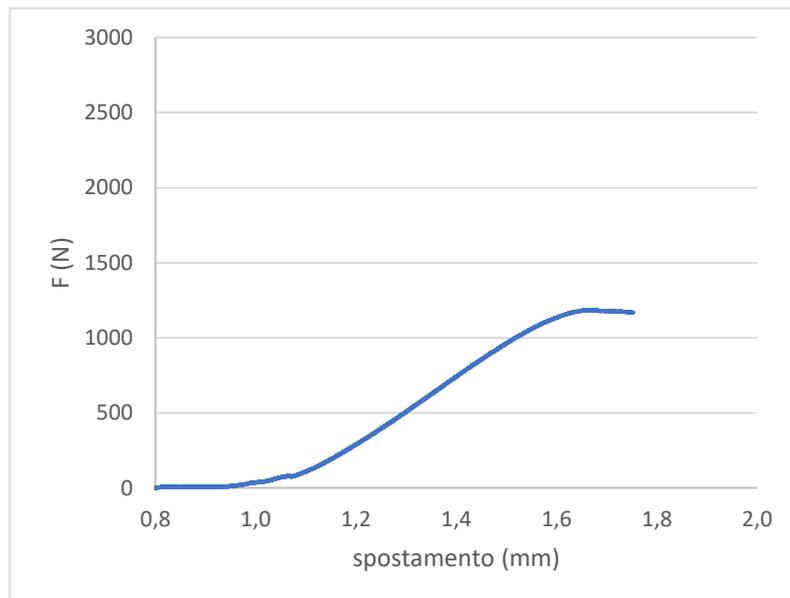
Mix con 3,0 kg/m³ FR10 in polvere

NOME PROVINO	C1B_M28G_3KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.71	



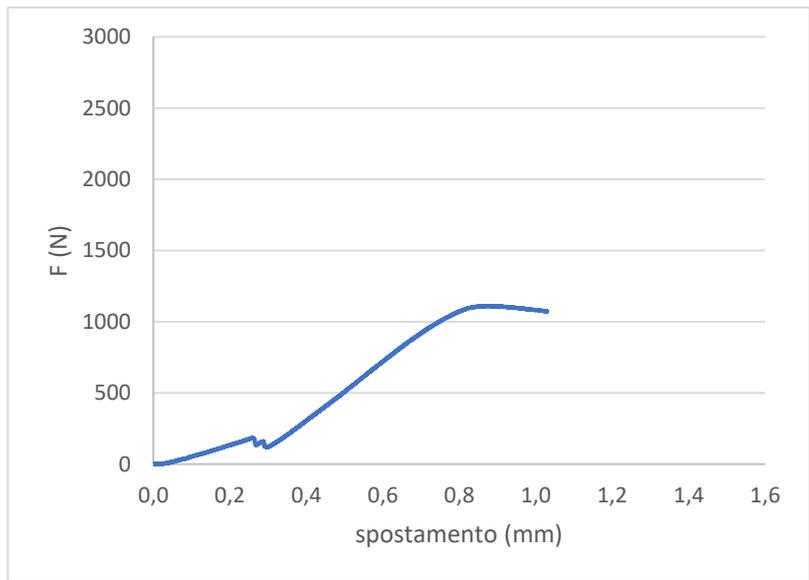
Mix con 3,0 kg/m³ FR10 in polvere

NOME PROVINO	C2A_M28G_3KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.74	



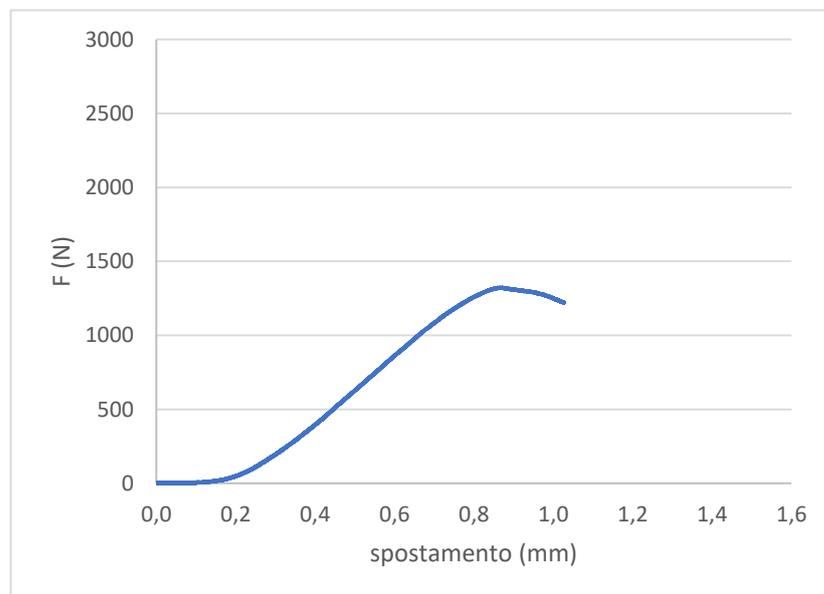
Mix con 3,0 kg/m³ FR10 in polvere

NOME PROVINO	C2B_M28G_3KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	<p align="center">NO PHOTO</p>
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.69	

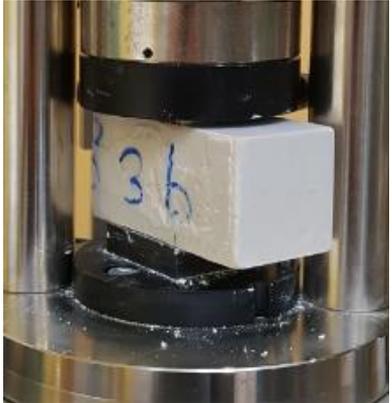
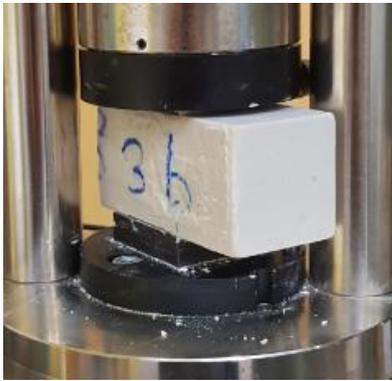


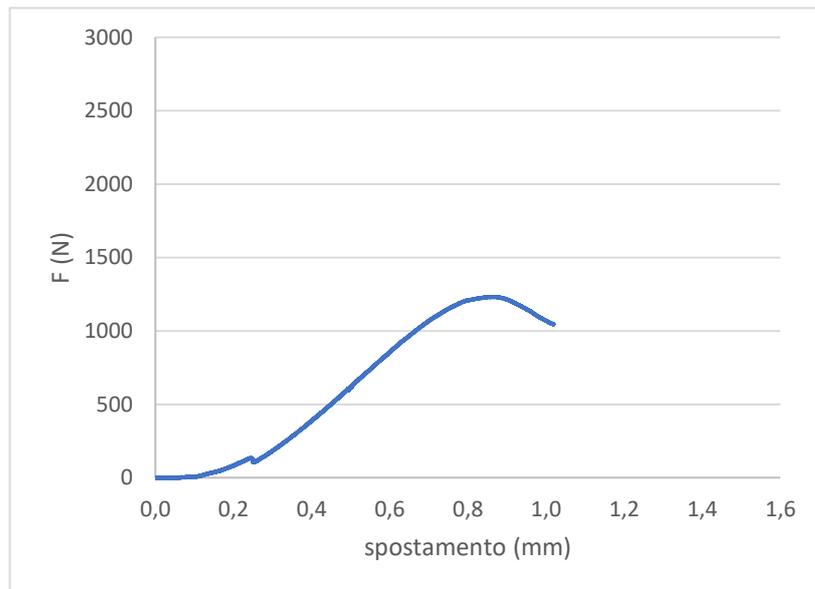
Mix con 3,0 kg/m³ FR10 in polvere

NOME PROVINO	C3A_M28G_3KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.81	



Mix con 3,0 kg/m³ FR10 in polvere

NOME PROVINO	C3B_M28G_3KG_FR10P	
DIMENSIONI (mm)	40x40x80	
AREA (mm ²)	1600	
ALTEZZA (mm)	40	
TEMPO DI MATURAZIONE (gg)	28	
MASSIMA PRESSIONE (MPa)	0.74	



Bibliografia

- Antunes, P. 2012. Testing Procedures for Two-Component Annulus Grouts. *North American Tunneling Proceedings 2012*.
- Boscaro, A., Barbanti, M., Dal Negro, E., Plescia, E. & Alexandrowicz, M. 2015. The first successful experience in Poland of tunnel excavation with EPB for the Metro Warsaw. In *ITA WTC World Tunnel Congress 2015, Dubrovnik (HR), 22-28 May 2015*.
- Cámara, J. 2018. Use of two-component mortar in the precast lining Backfilling of mechanized tunnels in rock formations. In *ITA WTC World Tunnel Congress 2018, Dubai (UAE), 21-26 April 2018*.
- Dal Negro, E., Boscaro, A., Barbero, E. & Darras, J. 2017. Comparison between different methods for backfilling grouting in mechanized tunneling with TBM: technical and operational advantages of the two-component grouting system. In *AFTES International Congress 2017, Paris (FR), 13-16 November 2017*.
- Garshol, K. F. 2003. Pre-excavation grouting in rock tunneling. *MBT International Underground Construction Group*.
- ITATech Activity Group Excavation. 2014. ITAtech Guidelines on Best Practices For Segment Backfilling. *ITAtech report n°4 – May 2014*. N° ISBN: 978-2-9700858-5-0.
- Ivantchev, A. & Del Rio, J. 2015. Two-component Backfill Grouting for Double Shield TBMs. In *ITA WTC World Tunnel Congress 2015, Dubrovnik (HR), 22-28 May 2015*.
- Kovari, K. and Ramoni, M. 2004. Urban tunneling in soft ground using TBM. In *Proceedings of the International Congress on Mechanized Tunneling: Challenging Case Histories*.
- Mäner, D. & Hausmann, M. 2017. New Development of an Annular Gap Mortar for Mechanized Tunneling. In *AFTES International Congress 2017, Paris (FR), 13-16 November 2017*.
- Myrdal, R. 2007. Accelerating admixtures for concrete. state of the art. *SINTEF Report N SBF BK A, 7025*.
- Novin, A., Tarighazali, S., Forughi, M., Fasihi, E. & Mirmehrabi, S. 2015. Comparison between simultaneous backfilling methods with two components and single component grouts in EPB shield tunneling. In *ITA WTC World Tunnel Congress 2015, Dubrovnik (HR), 22-28 May 2015*.
- Peila, D. 2016. Soft ground mechanized tunnelling.

- Peila, D., Borio, L. & Pelizza, S. 2011. The behaviour of a two-component backfilling grout used in a Tunnel-Boring Machine. *ACTA GEOTECHNICA SLOVENIKA* 1: 5-15. ISSN 1854-0171. <http://hdl.handle.net/11583/2435575>.
- Pelizza, S., Peila, D., Sorge, R. & Cignitti, F. 2012. Backfill grout with two component mix in EPB tunneling to minimize surface settlements: Rome Metro—Line C case history.
- Pelizza, S., Peila, D., Borio, L., Dal Negro, E., Schulkins, R. & Boscaro, A. 2010. Analysis of the Performance of Two Component Backfilling Grout in Tunnel Boring Machines Operating under Face Pressure. In *ITA-AITES World Tunnel Congress 2010, Vancouver (CA), 14-20 May 2010*. <http://hdl.handle.net/11583/2370602>.
- Pellegrini, L. & Perruzza, P. 2009. Sao Paulo Metro Project – Control Of Settlements In Variable Soil Conditions Through EPB Pressure And Bicomponent Backfilling Grout. In *Rapid Excavation & Tunneling Conference 2009, Las Vegas, Nevada (US), 14-17 June, 2009*.
- Petrowikiorg. 2016a. Cement slurry accelerators.
- Petrowikiorg. 2016b. Cement slurry retarders.
- Reschke, A. & Noppenberger, C. 2011. Brisbane Airport Link Earth Pressure Balance Machine Two Component Tailskin Grouting – A New Australian Record. *14th Australasian tunneling conference/Auckland, New Zeland, 8-10 March 2011*.
- Thewes, M. & Budach, C. 2009. Grouting of the annular gap in shield tunneling – an important factor for minimisation of settlements and production performance. *Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress*.
- Todaro C., Boscaro A., Peila D., Luciani A., Carigi A. & Martinelli D. 2018. Two component backfilling in shield tunneling: laboratory procedure and results of a test campaign.
- Xinggao Li, Dajun Yuan, Yuhai Guo & Zhiyong Cai, 2016. Use of a 10.22 m diameter EPB shield: a case study in Beijing subway construction.
- Yamamoto, Y. 1972. Retarders for concrete and their effects on setting time and shrinkage: Interim report. NA.
- Youn B., Shulte-Schrepping C. & Breitenbucher R. 2016. Properties and Requirements of Two-Component Grouts in Mechanized Tunneling. In *ITA WTC World Tunnel Congress 2016, San Francisco (US), 22-28 April*
- Zarrin, A., Zare, S. & Jalali, S.M.E. 2015. Backfill grouting with two-component grout – Case study Tehran metro line 7 east-west lot. In *ITA WTC World Tunnel Congress 2015, Dubrovnik (HR), 22-28 May 2015*.