



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Indagine sperimentale multi-scala su conglomerati porosi con leganti ad attivazione alcalina

*Multi-scale experimental investigation on porous concrete
with alkali-activated binders*

Relatori

Prof. Marco Bassani

Prof.ssa Paola Palmero

Ing. Luca Tefa

Candidata

Sandra Frasca

Dicembre 2018

Sommario

Introduzione	5
1 Stato dell'arte	9
1.1 Pavimentazioni porose	12
1.2 Calcestruzzo drenante	13
1.2.1 Storia e tecnologia	14
1.2.2 Costruzione di pavimentazioni porose	17
1.3 Leganti ad attivazione alcalina	19
1.3.1 L'uso dei leganti ad attivazione alcalina	21
1.3.2 Attivazione alcalina della loppa d'altoforno	22
2 Programma sperimentale	25
3 Materiali	29
3.1 Leganti	29
3.2 Aggregati lapidei	31
3.3 Additivi	32
3.3.1 Fluidificanti	32
3.3.2 Viscosizzante	33
3.3.3 Lattice	34
3.4 Soluzione alcalina	34
4 Metodi	36
4.1 Indagine preliminare	36
4.1.1 Consistenza	37
4.1.2 Prova di trazione indiretta	39
4.2 Malte	44
4.2.1 Confezionamento e stagionatura	45
4.2.2 Caratterizzazione meccanica delle malte	48
4.2.3 Curve sforzo-deformazione	52
4.3 Conglomerati porosi	56
4.3.1 Confezionamento dei provini cilindrici	57
4.3.2 Confezionamento dei provini prismatici	58
4.3.3 Caratterizzazione volumetrica	59

4.3.4	Prova di compressione sui conglomerati porosi	63
4.3.5	Prova di flessione su 4 punti sui conglomerati porosi.....	64
5	Risultati.....	66
5.1	Prove su malte	66
5.1.1	Prova di flessione su 3 punti.....	66
5.1.2	Prova di compressione	73
5.2	Prove su conglomerati	79
5.2.1	Caratterizzazione volumetrica.....	79
5.2.2	Prova di compressione	82
5.2.3	Prova di flessione su 4 punti.....	87
6	Analisi dei dati	89
6.1	Analisi dei dati sulle malte	89
6.1.1	Effetto del legante	90
6.1.2	Confronto tra provini in BFS	92
6.1.3	Effetto del lattice	95
6.1.4	Effetto dei diversi fluidificanti su malte alcali-attivate	102
6.2	Conglomerati porosi	106
6.2.1	Effetto del legante	106
6.2.2	Effetto del lattice	108
6.2.3	Effetto del fluidificante.....	114
	Conclusioni	120
	Bibliografia.....	124
	Indice delle figure	129
	Indice delle tabelle	133
	Allegati.....	135

Introduzione

L'urbanizzazione ha un impatto severo sull'ambiente e sulla qualità della vita dell'uomo. Attualmente oltre il 50% della popolazione mondiale vive in città e ambienti urbani, e le previsioni indicano che entro il 2050 la percentuale salirà al 67% nei paesi in via di sviluppo e all'86% in quelli già sviluppati. In quell'anno le città ospiteranno 6,3 miliardi di abitanti, a discapito delle aree rurali che andranno incontro a un progressivo e inesorabile spopolamento (van Leeuwen, 2015).

La crescita delle città è accompagnata da un uso massiccio di materiali da costruzione come i calcestruzzi e conglomerati bituminosi nella realizzazione di edifici ed infrastrutture. Come noto, nella loro forma comune questi materiali sono impermeabili all'acqua e il loro uso comporta una crescita delle superfici impermeabili all'interno delle città. In tali ambienti, i sistemi di captazione, trattamento e smaltimento delle precipitazioni meteoriche portano quantità maggiori di acque di pioggia verso i ricettori naturali quali canali, fiumi, laghi e mari, con uno sbilanciamento radicale della distribuzione delle acque meteoriche tra evapotraspirazione, deflusso superficiale, e infiltrazione sia superficiale sia profonda. Come mostrato in Figura I-0-1, esiste una stretta relazione fra la tipologia di copertura superficiale e la percentuale di smaltimento delle acque di precipitazione nelle diverse direzioni. Se il terreno naturale assorbe il 50% delle portate per infiltrazione (25% superficiale e 25% in profondità), e porta a un'evapotraspirazione del 40% e un deflusso superficiale di solo il 10%, lo stesso non vale per le superfici impermeabili che si possono classificare secondo diversi gradi di impermeabilità. Le superfici impermeabili del 10-20% consentono un'infiltrazione totale del 42%, un'evapotraspirazione del 38% ed un deflusso del 20%, deflusso che diventa del 30% nel caso di suolo impermeabile per il 35-50%, mentre un'impermeabilizzazione superficiale del 75-100%, tipica dell'ambiente urbano, consente un'infiltrazione totale del solo 15%, un'evapotraspirazione del 30% ed un elevato deflusso che si attesta ad una percentuale del 55%.

Per contrastare gli impatti e i fenomeni negativi derivanti dalla crescente urbanizzazione del territorio, diversi studi sono stati rivolti alla ricerca e alla promozione di pavimentazioni

stradali e sistemi di trattamento delle acque di pioggia di tipo alternativo rispetto a quelli tradizionali. Tali sistemi sono identificati con il termine di infrastrutture verdi (*Green Infrastructure, GI*) al cui interno sono comprese le *pavimentazioni permeabili*, il cui uso è coerente con l'approccio di sviluppo a basso impatto (*Low Impact Development, LID*) (Dietz, 2007). Queste pavimentazioni possono contribuire alla riduzione dei volumi di acqua destinati al deflusso superficiale a favore dell'infiltrazione, riducendone il deflusso tra il 50% e il 93% in confronto ai tradizionali sistemi (Aihablame et al., 2012). Ciò è dimostrato dalla stessa Figura I-0-1: una bassa impermeabilizzazione del suolo (pari al 10-20%) prevede un deflusso del 20% dell'acqua totale, contro il 55% conseguito in caso di superficie quasi totalmente impermeabile.

Fra le pavimentazioni stradali permeabili nell'ambito del LID vi sono quelle in *conglomerato cementizio poroso (calcestruzzo drenante)*. Queste pavimentazioni, garantiscono uno sviluppo a più basso impatto e permettono l'infiltrazione dell'acqua verso gli strati profondi, conservano al loro interno grossi volumi di acqua in attesa che questa si possa progressivamente infiltrare, contrastano i fenomeni di formazione delle isole di calore, e possono anche contribuire a ridurre il carico inquinante dell'acqua di prima pioggia se opportunamente accoppiate a sistemi di biofiltrazione.

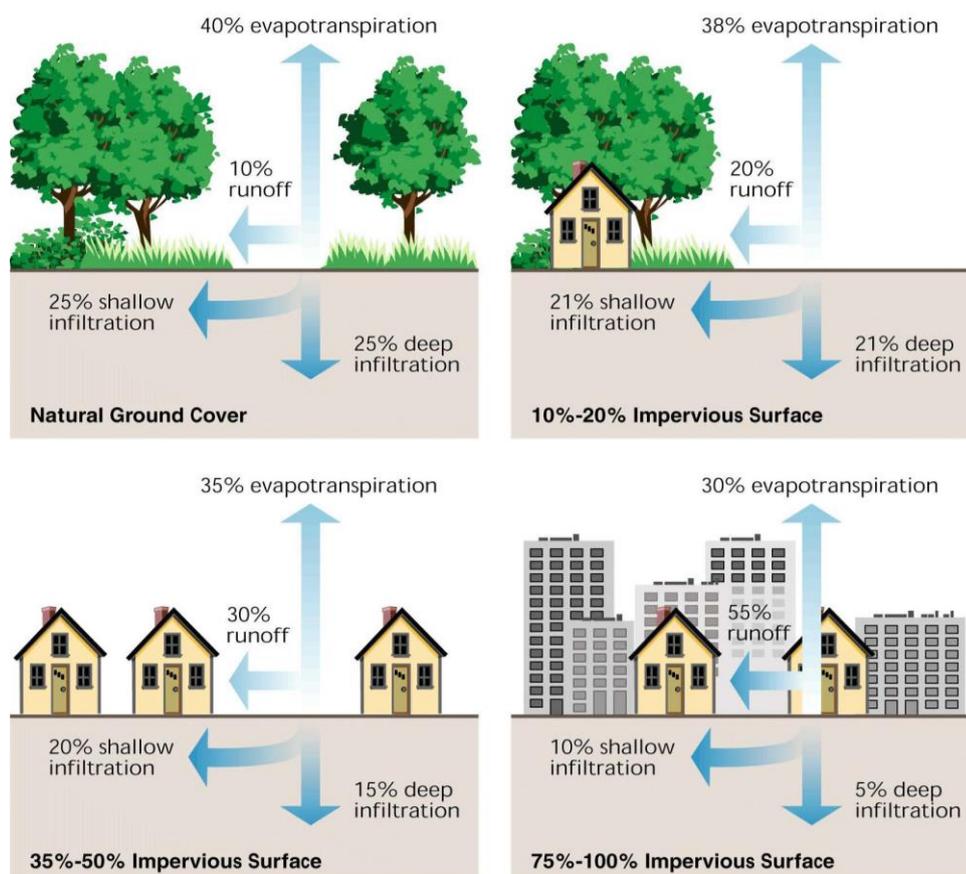


Figura I-0-1: Relazione tra copertura impermeabile e smaltimento superficiale delle acque. La percentuale di deflusso del 10% in ambiente rurale raggiunge picchi del 55% in caso di quasi totale impermeabilizzazione del suolo, con elevata riduzione dell'acqua di infiltrazione (50% nel caso di terreno naturale vs 15% in suolo totalmente impermeabile). (<https://environment.arlingtonva.us/stormwater-watersheds/>)

La *Federal Highway Administration* (FHWA) americana considera le pavimentazioni cementizie porose più economiche del 15-20% rispetto a quelle in conglomerato tradizionale (Chandrappa & Biligiri, 2016). Come spiega, infatti, anche Ferguson (2005) le pavimentazioni porose assorbono, immagazzinano e trattano l'acqua all'interno della loro struttura, riducendo, o addirittura eliminando in alcuni casi, i costi relativi ai sistemi di drenaggio e di detenzione dell'acqua piovana.

Tuttavia, l'impiego del calcestruzzo drenante presenta elementi di criticità tra cui:

- il fenomeno del *clogging* o di intasamento dei pori;
- le *basse resistenze meccaniche* raggiunte a causa dell'elevata porosità;
- l'uso del *cemento* come legante, la cui produzione prevede la cottura di materie prime quali carbonato di calcio (calcare e gesso) e silicati di alluminio (Argilla), polverizzate e cotte in forno a 1300-1500°C, che comporta l'emissione in atmosfera di ingenti quantitativi di CO₂ (si ritiene che più del 5% della produzione mondiale di biossido di carbonio sia dovuta proprio alla produzione del cemento).

Più nello specifico, l'elevata porosità non permette di raggiungere le resistenze meccaniche necessarie ad impiegare questi materiali nella formazione di pavimentazioni soggette a elevati livelli di traffico veicolare. Pertanto l'uso di questa tecnologia al momento è limitato alla realizzazione di marciapiedi e percorsi pedonali, parcheggi per veicoli leggeri e a strade locali a basso traffico. Inoltre, l'impatto ambientale associato alla produzione del cemento rende il conglomerato cementizio poroso un'alternativa poco "green" e ancora non del tutto vincente rispetto alle pavimentazioni convenzionali.

In questo quadro di riferimento si colloca il presente lavoro di tesi.

La sperimentazione condotta in questa tesi riguarda lo studio di conglomerati porosi contenenti malte geopolimeriche ad alta resistenza.

L'obiettivo della tesi è di sviluppare nuovi conglomerati porosi in grado di raggiungere resistenze meccaniche più alte di quelle possibili attraverso l'uso di cemento ordinario così da consentire l'impiego di tali materiali in pavimentazioni per strade a intenso traffico. La sperimentazione considera l'impiego di un sottoprodotto della produzione della ghisa, la loppa d'altoforno, che può essere attivata per via alcalina e reagire formando malte e conglomerati di grande resistenza e rigidità. Tale soluzione è da molti considerata sostenibile poiché impiega materie prime seconde (sfridi di lavorazione di tipo industriale) che, altrimenti, sarebbero destinate al conferimento in discarica.

L'indagine di laboratorio è stata organizzata con un approccio multi-scala. È infatti stato previsto sia il confezionamento e lo studio di malte contenenti loppa attivata (*scala delle malte*), sia il confezionamento di conglomerati porosi (*scala dei conglomerati*). In entrambi i casi è stata eseguita la caratterizzazione fisico-volumetrica e meccanica di campioni di laboratorio. Nella sperimentazione sono stati preparati analoghi campioni contenenti cemento Portland ordinario come confronto sperimentale.

L'elaborato si compone di 6 capitoli:

- il primo contiene il quadro generale di riferimento, e introduce le tematiche di riferimento relative all'ambiente urbano, ai problemi derivanti dall'urbanizzazione e alle possibili soluzioni allo stato dell'arte nel settore della ricerca;
- il secondo illustra l'obiettivo della tesi e il programma d'indagine sperimentale;
- il terzo contiene le informazioni relative ai materiali impiegati nella sperimentazione;
- il quarto illustra i metodi impiegati, con particolare riferimento alle modalità di indagine sperimentale per la caratterizzazione volumetrica e meccanica di malte e campioni in conglomerato cementizio poroso;
- il quinto e il sesto capitolo trattano rispettivamente i risultati ottenuti in laboratorio e la relativa analisi di confronto con dati dalla letteratura tecnico-scientifica.

1 Stato dell'arte

L'acqua è una risorsa per ogni città, ma in alcuni contesti e casi precipitazioni intense possono condizionare negativamente la vita e la funzionalità delle infrastrutture. Mentre il cambiamento climatico incombe, risulta quanto mai necessario sviluppare nuovi approcci volti a convertire una possibile minaccia in risorsa. Basti pensare al fenomeno delle inondazioni, particolarmente catastrofico in paesi situati in prossimità del livello del mare e legato all'impermeabilizzazione superficiale degli stessi. Se da una parte, dunque, vi sono Nazioni come i Paesi Bassi, in cui si è cercato di scongiurare i danni dovuti alle calamità naturali con la costruzione di un sistema complesso di dighe ed argini, dall'altra vi sono città in continua espansione in cui il continuo costruire determina una costante crescita delle superfici impermeabili (Gaines, 2016). Nelle città americane le pavimentazioni impermeabili risultano predominanti rispetto a quelle permeabili, presentando una percentuale di copertura superficiale tra il 65% e il 95%. Così come mostrato in Figura 1-1, strade, marciapiedi e aree di parcheggio coprono più del 50% del suolo urbano nel caso di aree commerciali e tra il 20 % e il 30 % nel caso di singole unità abitative o aree residenziali (Ferguson, 2005).

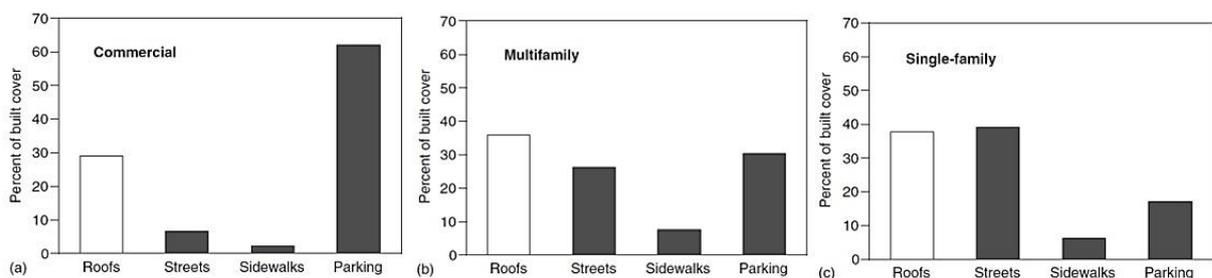


Figura 1-1: Percentuali di superfici costruite per aree commerciali, aree residenziali e singole unità abitative (Ferguson, 2005)

Le amministrazioni delle grandi città stanno considerando l'adozione delle cosiddette "Green Infrastructures", infrastrutture che consentano di raccogliere l'acqua meteorica e che permettono, dopo un opportuno trattamento, di convertirla in risorsa raccogliendola in cisterne per il successivo uso nell'irrigazione delle aree verdi, riducendo così la richiesta di acqua dolce (Ferguson, 2005).

Molti tra ricercatori e tecnici che operano nel settore sostengono la necessità di costruire infrastrutture sostenibili e coerenti con i principi del "Low Impact Development" (LID), limitando il più possibile i danni al suolo, alla vegetazione e ai sistemi acquatici (US EPA 2000, Prince George's County 1999). Analogo approccio è quello relativo alle cosiddette *Sponge Cities*, letteralmente "città spugna" di cui alla Figura 1-2. Queste sono progettate combinando varie tecnologie per il trattenimento e il trattamento delle acque meteoriche (tra queste vi sono i "fossi verdi" costituiti da tessuti assorbenti, ghiaia, terra e vegetazione, in combinazione con le pavimentazioni permeabili).

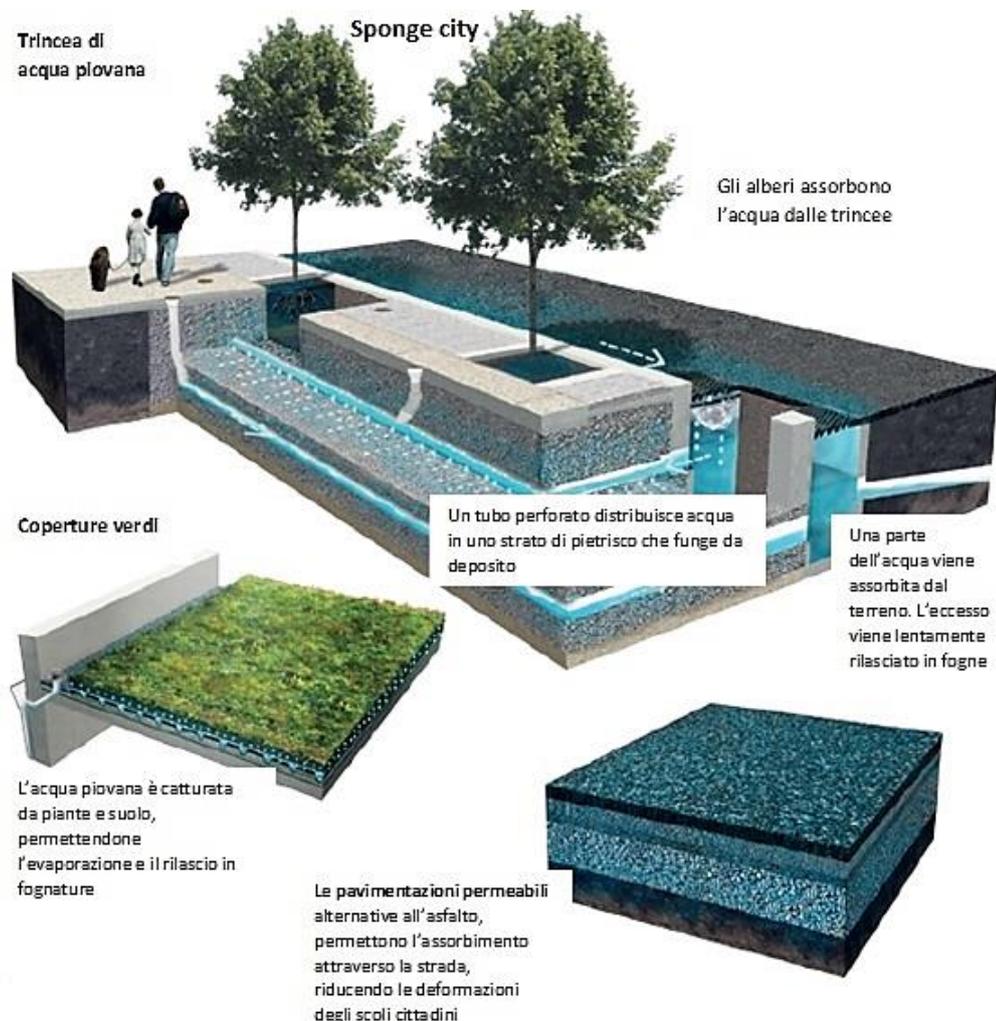


Figura 1-2: Schema "Sponge City" (Lin. et al., 2013). La tipica struttura di una "Città Spugna" prevede l'uso combinato di sistemi di drenaggio e deposito, e di pavimentazioni permeabili per l'assorbimento dell'acqua piovana.

In una *Sponge City* sono anche presenti i sistemi idraulici convenzionali, ma anche sistemi di captazione come stagni o bacini destinati a contenere parte del deflusso e serbatoi di accumulo. Questi elementi, progettati per scopi di accumulo temporaneo, ritardano il deflusso verso i corsi naturali, artificiali o in un sistema di fognatura, in modo così da distribuire le portate ed eliminare i picchi. In quest'ottica, le pavimentazioni permeabili svolgono anche il ruolo di sistemi di captazione e accumulo.

Le pavimentazioni permeabili (Figura 1-2) sono dunque un'alternativa alle pavimentazioni tradizionali chiuse in conglomerato bituminoso e calcestruzzo. Hunt e Szpir (2006) classificarono le pavimentazioni permeabili in (a) pavimentazioni porose e (b) pavimentazioni a blocchi. Le prime sono costituite da conglomerati cementizi o bituminosi (Figura 1-3) permeabili all'acqua (Figura 1-4), mentre le seconde sono realizzate con elementi in calcestruzzo, clinker, cotto, gres, pietra, pvc (polivinilcloruro) e combinate con alcune specie di vegetazione (Figura 1-5) nei giunti tra elementi che sono permeabili all'acqua.

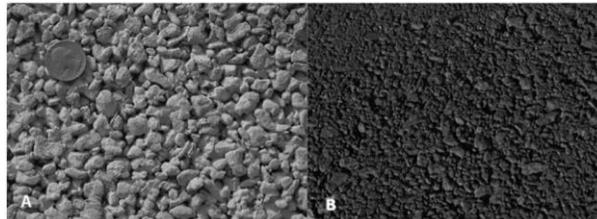


Figura 1-3: A-Conglomerato cementizio poroso, B-Conglomerato bituminoso poroso (BAE, N.C. State University)



Figura 1-4: Conglomerato cementizio poroso permeabile all'acqua. A sinistra è possibile notare il fenomeno dell'infiltrazione con mancato ruscellamento superficiale su una pavimentazione stradale, a destra si evidenzia il passaggio dell'acqua attraverso un campione in conglomerato poroso.

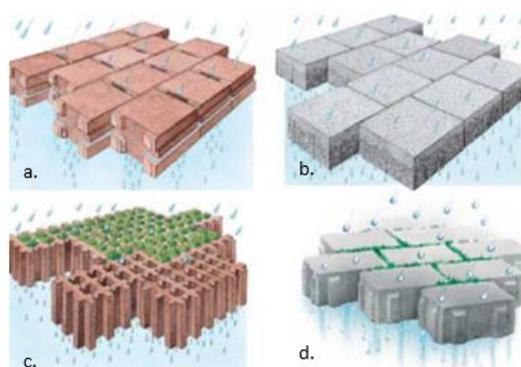


Figura 1-5: Tipologie di pavimentazioni permeabili a blocchi: a. blocchi in cotto, b. blocchi in clinker, c. grigliato in cotto con vegetazione, d. blocchi in clinker con vegetazione (Dierkes et al.,2002).

1.1 Pavimentazioni porose

Le pavimentazioni porose sono caratterizzate da un'elevata porosità che consente all'acqua di drenare fino al terreno sottostante. Le pavimentazioni in calcestruzzo poroso sono utilizzate con successo da circa 30 anni prevalentemente nel Regno Unito e negli Stati Uniti. La ricerca in questo settore si è sviluppata in modo sistematico a partire dagli anni '80 in tutto il mondo e specialmente negli Stati Uniti e in Giappone (Chindaprasirt, 2008). A seconda della stratigrafia si possono avere due diverse tipologie di sistemi: uno chiuso e uno aperto (Eisenberg, 2015) (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Il *sistema chiuso* non prevede di scaricare l'acqua direttamente nella falda sottostante l'infrastruttura. Ciò può essere necessario per la bassa permeabilità del sottosuolo, per il livello alto della falda, per la presenza di sottosuolo contaminato o per evitare la dispersione di inquinanti rilasciati dal legante usato. Si ha, quindi, uno strato "*serbatoio*" dove l'acqua è prima accumulata, poi convogliata in tubazioni di drenaggio e quindi scaricata nei sistemi di raccolta classici. I *sistemi aperti*, invece, prevedono che l'acqua infiltrata venga scaricata direttamente nella falda, così come mostrato nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** di destra.

Ciò che rende particolarmente innovative le pavimentazioni porose rispetto alle pavimentazioni impermeabili è proprio l'elevata porosità. Questa offre vantaggi sia ambientali sia di comfort e sicurezza per il guidatore.

Dal punto di vista ambientale, oltre la già citata funzione di captazione e accumulo, studi condotti da Pagotto (1995,2000) sulla circonvallazione nord dell'area metropolitana di Nantes (Francia), confermano che l'acqua filtrata attraverso le pavimentazioni porose, ha una minore concentrazione di inquinanti se paragonata a quella ricevuta e captata da altri sistemi di raccolta in pavimentazioni impermeabili. La Tabella 1-1 è relativa all'indagine svolta da Pagotto (1995,1997) sulla qualità dell'acqua defluita e filtrata paragonando la pavimentazione porosa a quella convenzionale. Ciò è dovuto al fatto che con la filtrazione parte degli inquinanti sono trattenuti, e in parte anche abbattuti con tutta probabilità grazie alla presenza di colonie batteriche che si formano naturalmente nei pori.

Dal punto di vista della sicurezza, una superficie porosa garantisce la rimozione immediata dell'acqua aumentando il coefficiente di aderenza fra pneumatico e superficie (Figura 1-7). In assenza di acqua al suolo è eliminato l'effetto spray dovuto al rotolamento e ciò garantisce una migliore visibilità, esclude il rischio di acquaplaning con ricadute positive in termini di sicurezza (Ferguson, 2005).

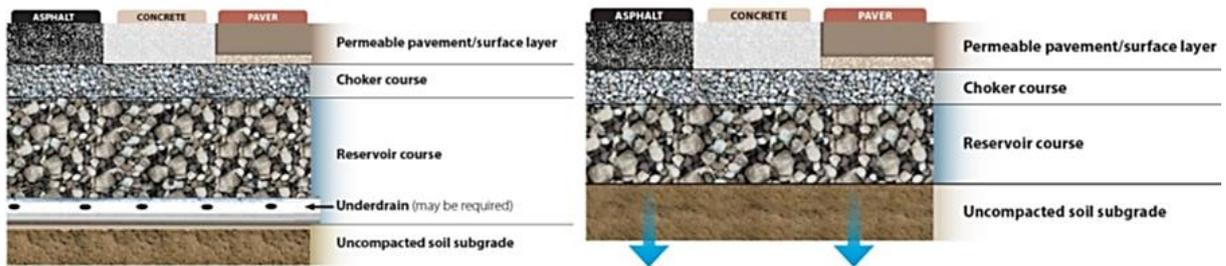


Figura 1-6: Sistema chiuso (a sinistra) e aperto (a destra) (Eisenberg P.,2015)

Tabella 1-1: Carico totale di inquinante presente nell'acqua di deflusso per i due diversi tipi di pavimentazione (Pagotto, 1995,2000)

	Conventional pavement (5 June–29 November 1995)	Porous pavement (9 June–9 November 1997)	Relative difference (%)	
DM (kg/ha)	104	6.6	-94 ^a	DM: Materiale Secco (Dry Matter)
Hc (g/ha)	85.4	6.6	-92 ^a	Hc: Idrocarburi
Pbs (mg/ha)	33.0	1.1	-97 ^a	Pb: Piombo
Cu _s (mg/ha)	5.3	0.42	-92 ^a	Cu: Rame
Cd _s (µg/ha)	0.050	0.003	-95	Cd: Cadmio
Zn _s (mg/ha)	35.2	3.8	-89	Zn: Zinco
				Pedice "s": Solido

^aSignificant at the 95% probability level.

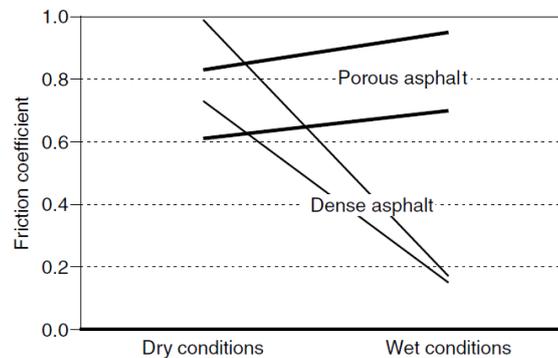


Figura 1-7: Confronto fra i coefficienti di aderenza per differenti tipologie di pavimentazioni (Diniz, 1980)

1.2 Calcestruzzo drenante

Il calcestruzzo drenante ha l'attitudine a lasciarsi permeare dai liquidi, classificandosi come un materiale da costruzione innovativo. Il suo impiego, che offre vantaggi ambientali, economici e funzionali, è incoraggiato e riconosciuto valido dall'ente per la salvaguardia dell'ambiente (EPA Environmental Protection Agency) degli Stati Uniti che gli ha attribuito il titolo di "best practice" nella gestione dell'acqua piovana (BMP Best Practice Management) in quanto può fornire anche un primo approccio alla lotta contro l'inquinamento oltre che per lo smaltimento dell'acqua piovana (Parisi, 2010). Sebbene le pavimentazioni porose soffrano il fenomeno del *clogging* (*intasamento dei pori* con conseguente riduzione di permeabilità), nelle applicazioni più comuni il conglomerato cementizio poroso ha una vita utile di 20-40 anni richiedendo scarsa manutenzione (a mezzo di idropultrici per scongiurare appunto il problema dell'intasamento dei pori) o, addirittura, nulla a differenza del più comune conglomerato bituminoso.

Il tasso di filtrazione è funzione dello stato di addensamento dello strato sottostante e l'evaporazione dell'acqua dopo la pioggia contribuisce al recupero di capacità di accumulo del sistema stesso.

L'EPA (Agenzia Statunitense per la Protezione dell'Ambiente) ha assegnato al calcestruzzo poroso la certificazione "BMP6" per la prevenzione dell'inquinamento proveniente dall'acqua di pioggia. La certificazione LEED 6.1 (Leadership in Energy and Environmental Design) riconosce nell'utilizzo del calcestruzzo drenante un titolo preferenziale nelle gare d'appalto e nella richiesta di permessi a costruire da parte di *General Contractors* e progettisti. Tale titolo preferenziale è dovuto a benefici ambientali come:

- la riduzione degli effetti dell'isola di calore;
- la capacità di consentire un riciclo delle acque;
- il fatto che per la sua realizzazione non richiede l'impiego di materiali con particolari caratteristiche fisico-meccaniche, ma possono essere usati quelli locali .

Per quanto concerne la riduzione degli effetti legati all'isola di calore, grazie al colore chiaro e alla struttura porosa, le pavimentazioni in conglomerato cementizio assorbono meno radiazioni solari rispetto alle pavimentazioni in conglomerato bituminoso.

Tutti i vantaggi "ambientali" appena illustrati possono essere tradotti anche in termini economici (Ferguson, 2005). Nella maggior parte delle regioni del Nord America, infatti, il conglomerato poroso senza alcun tipo di rinforzo risulta essere il materiale di pavimentazione meno costoso (compreso il conglomerato bituminoso convenzionale). Questa affermazione risulta valida per qualsiasi tipologia di pavimentazione porosa aperta, poiché anche se si usassero materie prime più costose del calcestruzzo drenante, si ridurrebbero i costi relativi ai sistemi di drenaggio e serbatoi, necessari nel caso di pavimentazioni impermeabili.

1.2.1 Storia e tecnologia

Sono numerosi i casi studio di pavimentazioni in calcestruzzo ad elevata porosità, realizzati per la viabilità minore negli Stati Uniti, in Germania, Belgio e Svizzera. Queste sono scelte proprio per i benefici legati al reintegro dell'acqua di falda e alla riduzione dell'afflusso, inteso come spessore di acqua sulla superficie pavimentata (Figura 1-8).

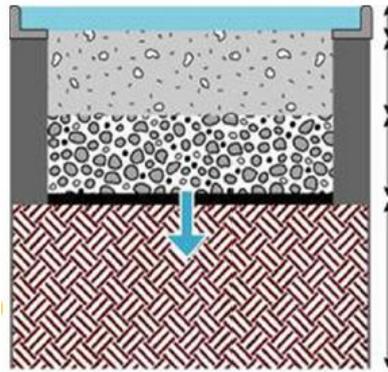


Figura 1-8: Meccanismo di trasferimento dell'acqua al sottosuolo

Generalmente, viene realizzato uno strato superficiale con una porosità compresa tra il 15% e il 25% del volume del calcestruzzo indurito. Tale valore di porosità comporta portate di acqua filtrata intorno a 200 L/m²/min, anche se in test di laboratorio sono state attestate portate superiori (Parisi, 2010). Sebbene il basso contenuto di sabbia (circa l'1%) e l'alta porosità riducano la resistenza meccanica rispetto alle miscele cementizie convenzionali, è comunque garantita una sufficiente resistenza per molte applicazioni nel campo delle pavimentazioni stradali e pedonali.

Dalla letteratura relativa alle indagini sperimentali, si apprende come una buona lavorabilità venga ottenuta con rapporti d'acqua/cemento fra lo 0,27 e 0,30, con aggiunta di prodotti chimici additivi. La relazione fra le resistenze e il rapporto sopracitato non è ben chiara, perché a differenza del calcestruzzo convenzionale, quello permeabile richiede un contenuto totale di malta inferiore al contenuto effettivo dei vuoti fra gli aggregati. Pertanto rendere la malta più forte potrebbe non sempre condurre ad una maggiore resistenza complessiva (Kevern, 2005). La densità risulta un aspetto chiave perché potrebbe influire sulla resistenza e sulla rigidità, inoltre questa dipende dalle proprietà e dalle proporzioni dei materiali impiegati e dal metodo di posa e compattazione in sito. Generalmente in sito si raggiunge una densità dell'ordine di 1600-2000 kg/m³.

Per valutare la consistenza dell'impasto fresco di un calcestruzzo convenzionale si esegue lo *slump test* utilizzando il cono di Abrams. Tale metodo prevede di valutare l'abbassamento dell'impasto, dovuto al peso proprio, quando viene privato del recipiente che lo sostiene.

Dalla misura dell'abbassamento relativo (o slump) si deduce la classe di consistenza dell'impasto. Secondo le norme UNI EN 206 – 2006 e UNI 11104:2004 in base al risultato dello slump test, si individuano 5 classi di consistenza, da *S1 consistenza umida* fino *S5 consistenza superfluida*.

Per il calcestruzzo poroso la corretta consistenza è valutata in modo empirico come indicato in Figura 1-9. Un campione di miscela fresco viene chiuso all'interno di una mano e se il contenuto d'acqua è adeguato, la pasta cementizia tende rimanere attaccata all'aggregato senza aderire al guanto.



Figura 1-9: Valutazione visiva della consistenza della miscela fresca di un calcestruzzo poroso: (a) eccesso di fase legante, (b) consistenza ottimale, (c) miscela sciola (Tennis, 2004)

Come nel calcestruzzo convenzionale, gli aggregati devono essere nella condizione di saturazione e superficie asciutta per non modificare i rapporti acqua/cemento della miscela. Un modo per incrementare la resistenza meccanica del conglomerato poroso è quello di accrescere la superficie di contatto tra malta e aggregati, poiché è noto che la resistenza alle sollecitazioni avviene tramite la distribuzione delle azioni ai punti di contatto fra gli aggregati, ove tali punti di contatto sono rivestiti dalla malta stessa.

Per quanto riguarda la resistenza a compressione e a flessione, cioè lo sforzo massimo sopportato prima che avvenga la rottura, rispettivamente a seguito di uno sforzo monoassiale o di un momento flettente, solitamente si hanno valori più bassi rispetto a quelli relativi ad un calcestruzzo convenzionale. Nel caso dei calcestruzzi porosi la resistenza a compressione dopo 28 giorni è molto variabile, rimanendo comunque nell'intervallo di valori compresi tra 3,5 e 35,0 MPa (Tennis et al., 2004). Sempre a 28 giorni la resistenza a flessione varia tra 1,0 MPa e 3,8 MPa in base alla compattazione, alla porosità e al rapporto acqua/cemento.

A causa dell'elevata porosità, dunque, le pavimentazioni porose raggiungono resistenze relativamente basse (Yang & Jiang, 2003), che ne limitano il campo di applicazione. Tuttavia l'impiego di aggregati selezionati e additivi funzionali potrebbero estenderne l'uso (Huang, 2010).

Per ottenere un'adeguata porosità e una buona lavorabilità generalmente si introducono nell'impasto additivi superfluidificanti (SP) ed eventualmente anche additivi viscosizzanti in modo da favorire l'adesione della pasta di cemento alle particelle lapidee (Chindaprasirt, 2008).

In letteratura si riportano test volti al miglioramento della resistenza della miscela indurita. Esempi bibliografici (Yang, 2003) riportano l'impiego di alcuni additivi come fumi di silice (SF), etilene vinil acetato (EVA) o soluzione di alcool polivinilico formaldeide (PAF). Secondo Chindaprasirt (2008), l'introduzione di polimeri quali l'EVA o il PAF garantisce anche un'ottima durabilità all'abrasione e ai cicli di gelo-disgelo. Altri additivi maggiormente impiegati sono i ritardanti, i fluidificanti o gli stabilizzanti. Fra questi risulta particolarmente importante il lattice, che è stato impiegato anche nella presente sperimentazione.

I polimeri di lattice (*styrene-butadiene-rubber*) conducono a:

- un aumento della resistenza all'abrasione e a trazione (Shu,2011);
- una riduzione del rapporto acqua/legante rispetto a una miscela priva di lattice e studiata a parità di condizioni (Wang, 2006);
- un incremento dell'energia di rottura proporzionalmente al rapporto lattice/legante (Wang, 2006 & Wang, 2010);
- un miglioramento del legame sabbia-cemento (Ukrainczyk, 2013);
- miglioramento della consistenza (Kevern, 2005);
- incremento dell'energia di rottura (*toughness*) all'aumentare del rapporto lattice/legante (Wang, 2010);
- diminuzione della densità all'aumentare del contenuto di lattice sia sull'impasto fresco che su quello indurito (Wang, 2010);

Tra gli aspetti negativi si possono identificare:

- una diminuzione della porosità (Wang, 2010) poiché rende la miscela più densa;
- riduzione della permeabilità fino al 50% rispetto ad una miscela priva di lattice (Shu, 2011);
- nessun vantaggio nello sviluppo della resistenza a compressione (Wang, 2010).

1.2.2 Costruzione di pavimentazioni porose

Il processo costruttivo e manutentivo delle pavimentazioni in calcestruzzo poroso prevede le seguenti fasi (Tennis, 2004):

- preparazione del sottofondo e dello strato di fondazione tramite compattazione (fino al raggiungimento di una densità del secco pari al 90-95% di quella massima ottenuta in laboratorio);
- trasporto e miscela dei componenti;
- getto (che avviene in maniera continua e rapida);
- costipamento meccanico e/o manuale (evitando la vibrazione);
- finitura superficiale con rullo di acciaio;
- messa in opera dei giunti;
- stagionatura con nebulizzazione di acqua seguita dall'apposizione di un telo di plastica almeno per 7 giorni;
- manutenzione periodica per prevenire l'ostruzione dei pori della pavimentazione (*clogging*), con trattamenti di potenti getti di acqua pulita.

La compattazione generalmente viene effettuata tramite rullo compattante in acciaio, nella maggior parte dei casi movimentato manualmente (Figura 1-10), in modo da evitare un'eccessiva chiusura dei pori e/o una eventuale rottura dell'aggregato superficiale.

Subito dopo segue la maturazione, generalmente realizzata con una pellicola protettiva. La struttura aperta e la superficie rugosa del calcestruzzo permeabile espone più superficie di

pasta di cemento all'evaporazione ma l'acqua dell'impasto è necessaria affinché si sviluppino adeguatamente le reazioni di idratazione. La pellicola protettiva (Figura 1-10) consente, quindi, di mantenere l'umidità dell'impasto in modo da rallentare il processo di evaporazione dell'acqua (Tennis, 2004).

Un articolo scientifico di Parisi (2010) riporta le caratteristiche principali del calcestruzzo drenante da porre in opera per la costruzione dello strato superficiale delle pavimentazioni drenanti, ovvero lo strato di usura (Tabella 1-2). Questo è la parte superficiale della struttura di una pavimentazione ed è quella che riceve il carico veicolare e gli effetti dell'abrasione dovuti al traffico. Al fine di garantire prestazioni funzionali e strutturali, lo strato in esame deve soddisfare alcuni requisiti, analizzati in fase di progettazione. Infatti, deve garantire una capacità portante sufficiente in base al volume di traffico atteso, tenendo conto che una pavimentazione porosa è caratterizzata da un indice dei vuoti alto, che compromette la resistenza del materiale indurito.



Figura 1-10: a. Messa in opera, b. compattazione e c. applicazione dei teli in fase di maturazione per prevenire l'eventuale perdita di umidità (foto di Banka da Tennis, 2004)

Tabella 1-2: Proprietà indicative del calcestruzzo drenante

Proprietà	Valori tipici
Slump	20 mm
Densità	1600 2000 kg/m ³
Tempo di posa	1 h ³
Porosità	15% ÷ 25% del volume
Permeabilità	120 ÷ 320L/m ² /min (0,2 ÷ 0,54 cm/sec ⁴)
Resistenza a compressione	3.5 ÷ 28MPa
Resistenza a flessione	1 3.8 MPa
Ritiro	200 x 10 ⁻⁶

1.3 Leganti ad attivazione alcalina

Il termine “Geopolimero”, introdotto da Davidovits nel 1979, indica una classe di materiali formati da polimeri inorganici, ovvero catene a base di alluminati e silicati di metalli alcalini e intesi come sottoinsieme della classe più ampia dei leganti attivati alcalinamente.

Il processo di formazione dei geopolimeri è il prodotto della reazione chimica tra allumino-silicati ed una soluzione acquosa altamente basica, tipicamente a base di idrossido e silicato di sodio.

Secondo Duxon (2005, 2007) la presenza di allumino-silicati, rappresenta la caratteristica fondamentale di un geopolimero, che lo rende chimicamente e strutturalmente confrontabile con rocce naturali, conferendogli da una parte proprietà di durezza, stabilità chimica e longevità confrontabili alle rocce naturali e dall'altra una struttura atomica amorfa simile a quella del vetro. I geopolimeri sono costituiti infatti da allumino silicati tridimensionali amorfi o semi-cristallini dove l'unità fondamentale è il “silicio osso alluminato”, o poli-sialato, $(-Si-O-Al-O)_n$, con n grado di polimerizzazione.

Così come spiegato in Figura 1-11 il termine “sialato” indica proprio la struttura alluminosilicata dei geopolimeri, “poli-sialato” indica le catene e gli anelli dei polimeri con Si^{4+} e Al^{3+} , legati a 4 atomi di ossigeno (Davidovits, 2002).

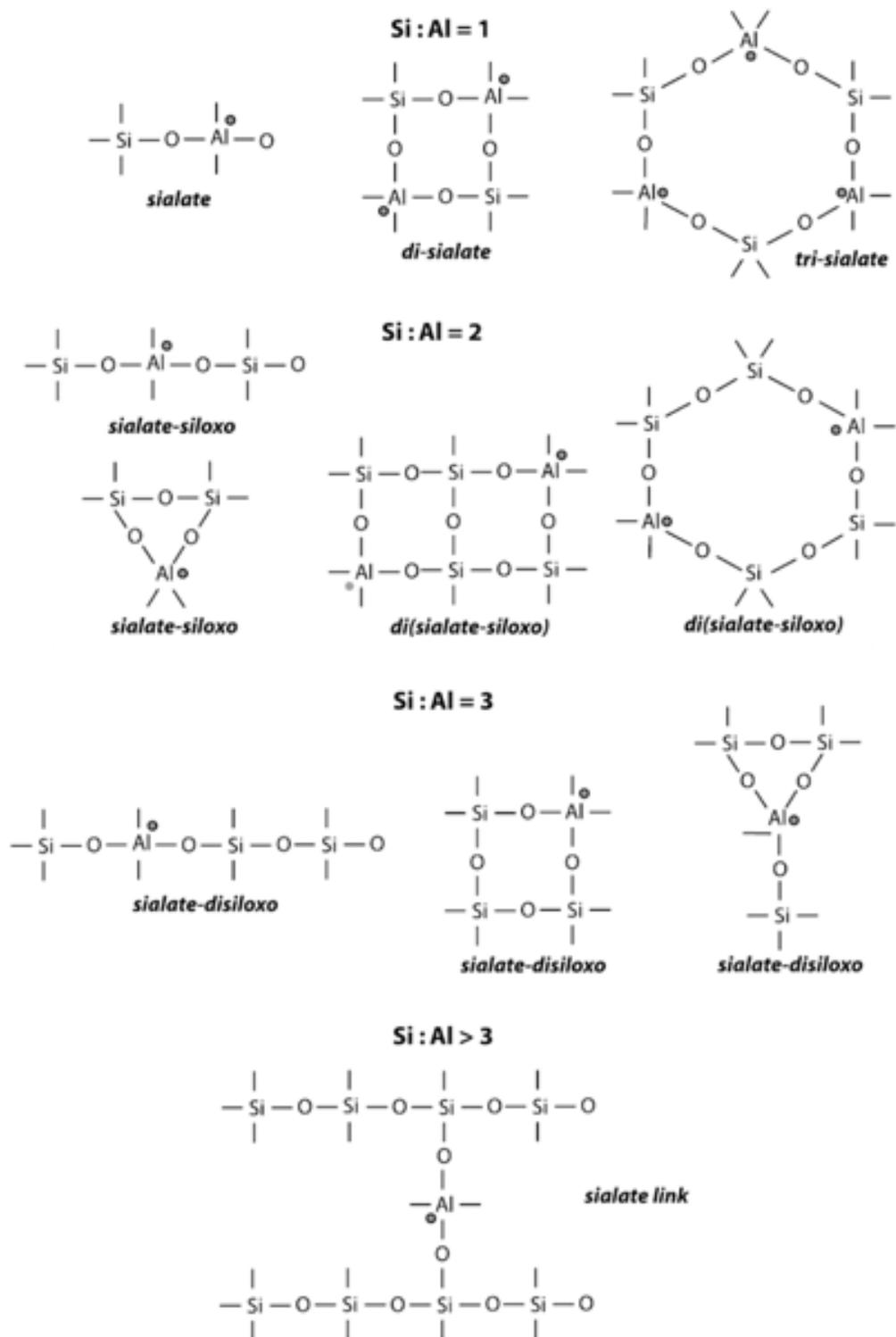


Figura 1-11: Strutture tridimensionali di silico-alluminati (Davidovits, 2002)

1.3.1 L'uso dei leganti ad attivazione alcalina

I campi di applicazione dei geopolimeri sono molteplici: vengono usati come materiali refrattari (resistenti alle alte temperature), rocce per ricostruzione di beni culturali, riparazioni per strutture in cemento e per rendere inerti sostanze pericolose (Davidovits, 2008). **InErrore. 'origine riferimento non è stata trovata.** è riportato il *diagramma di Ashby*, che mostra come i materiali geopolimerici abbiano caratteristiche intermedie ai cementi, ceramici non tecnici e materiali compositi a base polimerica (Leonelli, 2013).

L'uso di geopolimeri porta con sé il grande vantaggio di non dover ricorrere ai più comuni leganti idraulici, come il cemento Portland. Quest'ultimo richiede un elevato dispendio ed emissioni di CO₂ a causa del processo di calcinazione innescato ad altissime temperature e con uso di carburante fossile.

Il processo di calcinazione a temperature prossime ai 1500°C è assente nella *geopolimerizzazione*, in cui le uniche risorse richieste si riducono ai costi di acquisto delle sostanze chimiche, poiché la *sintesi dei geopolimeri* si attiva a temperature poco più elevate rispetto a quelle ambientali (Gartner, 2004; Palmero et al., 2004). In altre parole le polveri di partenze per la creazione di leganti ad attivazione alcalina non hanno bisogno di alcun trattamento termico preliminare, ad eccezione del metacaolino che ha la necessità, già in fase preliminare, di essere trattato ad elevate temperature.

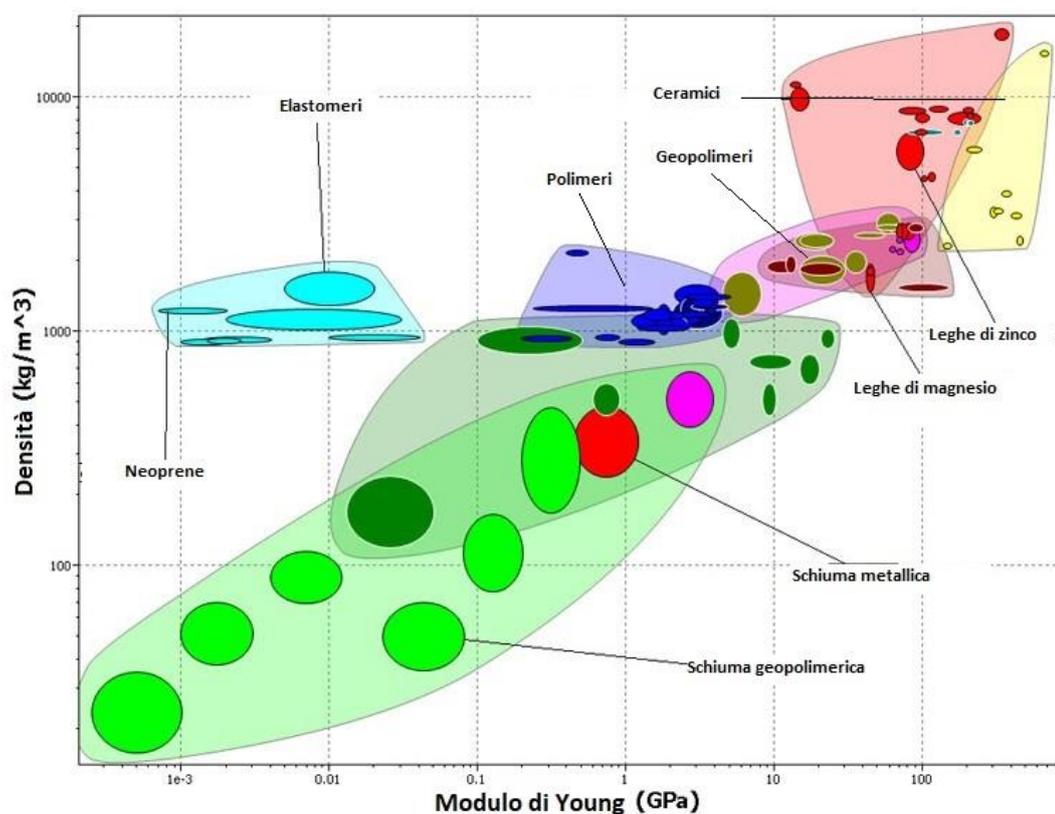


Figura 1-12: Diagramma di Ashby che rappresenta le differenti classi di materiali in funzione della resistenza a compressione e densità

Tuttavia l'influenza delle alte temperature risulta anche per i geopolimeri molto importante nella fase dell'attivazione. Per polveri poco reattive o particolari applicazioni strutturali, il trattamento ad alte temperature porta le reazioni chimiche ad un maggior stadio di avanzamento, con incremento delle resistenze meccaniche, soprattutto per temperature superiori ai 75 °C (Hardjito, 2004). Si è inoltre studiato (Kumar et al., 2004) come temperature di stagionatura prossime a 27°C su miscele contenenti ceneri volanti e loppa granulata d'altoforno conducano ad una reazione dominata dall'attivazione della loppa, con piccola interazione con le ceneri volanti. Alle alte temperature (60°C circa) si innesca la formazione di prodotti di reazione di calcio-silicati-idrati (C-S-H) e alluminio-silicati-idrati (A-S-H), dovuti alla presenza nella loppa dell'ossido di calcio. Si è inoltre osservato come provini geopolimerici a base di loppa granulata e ceneri volanti stagionati a temperatura ambiente sviluppino resistenze in maniera graduale e crescente nel tempo, mentre sottoponendoli a temperature prossime ai 60 °C per 24 ore raggiungano alte resistenze a compressione subito dopo 3 giorni.

Con l'attuale crescita della domanda di nuovi materiali da costruzione a basse emissioni di gas serra associati alla loro produzione, i *conglomerati geopolimerici* potrebbero essere usati su ampia scala in sostituzione dei conglomerati a base di cemento Portland.

1.3.2 Attivazione alcalina della loppa d'altoforno

Durante il processo di produzione della ghisa, si genera uno scarto sotto forma di scoria liquida di composizione in prevalenza calcio-alluminio-silicatica, chiamato comunemente *loppa d'altoforno* (o *Blust Furnace Slag, BFS*). La scoria acquista caratteristiche idrauliche se all'uscita dall'altoforno viene raffreddata bruscamente, dunque trasformata in granuli porosi a struttura vetrosa. Se questi granuli non vengono macinati si comportano da materiale inerte, invece se macinati finemente in modo da massimizzare l'area superficiale reattiva, si ottiene la scoria di altoforno granulata macinata (*ground granulated blast furnace slag, GGBFS*) di finezza paragonabile a quella del cemento. La loppa può essere aggiunta al Portland in quantità percentuali superiori alla pozzolana (Portland minimo 5%), inoltre la loppa ha potenziali proprietà idrauliche e ha bisogno di alcali (es. calce idrata), per attivare (catalizzare) la reazione di idratazione. Esistono diversi cementi d'altoforno a seconda del contenuto di loppa:

- Cementi siderurgici: loppa fino al 35 %
- Cementi d'altoforno: loppa 35-85 %
- Cementi di loppa al clinker: oltre 85% loppa

La loppa possiede, dunque, un'attività idraulica latente, ovvero presenta proprietà idrauliche quando viene attivata opportunamente. Nel dettaglio, se macinata finemente e se a contatto con piccole quantità di calce, la loppa è in grado di innescare un rapido processo di indurimento. Inoltre la differenza di reattività tra le scorie dipende dalla quantità di fase

vetrosa, dalla distribuzione granulometrica e dalla finezza. In media, la quantità di Al_2O_3 è compresa tra 9 e il 12 % in peso della massa totale, mentre la quantità complessiva di $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$ è tra il 44 e il 47%, la quale consente una *reattività geopolimerica* costante. Le scorie contengono inoltre ossido di calcio (CaO) ed ossido di manganese (MgO) per il 5-15%. Il calcio che, in forma di ossido (CaO), favorisce il consolidamento idraulico e la rimozione dell'acqua libera, mostra anche comportamento pozzolanico, una bassa reattività geopolimerica e viene attivato grazie all'alcalinizzazione (Davidovits, 2008). L'attivazione alcalina della loppa o BFS (Blust Furnace Slag) risulta ampiamente studiata (Glukhovskij, 1983)

Deb et al. (2014) hanno studiato una miscela geopolimerica contenente loppa granulata e ceneri volanti attivate tramite una soluzione alcalina di silicato di sodio e idrossido di sodio e stagionata a temperatura ambiente. Hanno osservato che la lavorabilità, valutata con lo slump test (ASTM-C143-12) decresce all'aumentare del contenuto di loppa (a causa della reazione accelerata del calcio), mentre la resistenza a compressione aumenta all'aumentare del contenuto di loppa.

I più comuni attivatori alcalini impiegati sono idrossidi, solfati, carbonati e silicati alcalini come NaOH e KOH, silicati di sodio e potassio (Khale, 2007). Le soluzioni acquose di silicati alcalini vengono prodotte dissolvendo i silicati nella soluzione dell'idrossido alcalino. Inoltre il pH della soluzione alcalina è il fattore che più influisce sulla resistenza meccanica del prodotto finito, infatti al suo aumentare si ottiene una riduzione del tempo di indurimento e della viscosità con un conseguente miglioramento della lavorabilità (o consistenza) (Phair, 2001).

La loppa d'altoforno può essere dunque impiegata nel confezionamento di malte e di conglomerati porosi a completa sostituzione del cemento. Il suo utilizzo nella costruzione di infrastrutture conduce non solo a benefici ambientali, poiché si tratta di un sottoprodotto dell'industria metallurgica che altrimenti andrebbe smaltito in discarica, ma mostra risultati interessanti anche in termini di sviluppo di resistenze.

Molteplici sono le differenze che si riscontrano fra la loppa e il cemento, ad esempio si è osservato come la loppa granulata, inserita con altri costituenti (come ad esempio metacaolino o ceneri volanti) quale materia prima a formare i geopolimeri, porti oltre ai tipici prodotti della geopolimerizzazione, quali poli(sialati), poli(silosso-sialati) e poli(disilosso-sialati), anche a geli di C-(A)-S-H, ove i rapporti Ca/Si risultano inferiori a quelli innescati per l'idratazione del cemento Portland (Ismail, 2014).

Altra differenza fra la loppa e il cemento riguarda il fenomeno dell'indurimento. Mentre i tempi di indurimento per i cementi risultano elevati, poiché l'acqua necessita di opportune reazioni per passare da neutra a basica; la geopolimerizzazione richiede sin dall'inizio un pH fortemente basico che si abbassa rapidamente durante le reazioni (Ismail, 2014).

È interessante, inoltre, sottolineare dei punti in comune fra loppa e cemento. Così come accade nel cemento, anche per la loppa attivata alcalinamente un eccessivo contenuto di fase acquosa determina una diminuzione delle prestazioni. Nel caso dei geopolimeri questa è attribuita all'eccessiva diluizione della soluzione alcalina e ad un'incompleta geopolimerizzazione degli alluminosilicati (Leonelli, 2013). Altra similitudine si deve a Sarker

(2011), le cui indagini hanno dimostrato come lo schema di fessurazione dei conglomerati cementizi porosi sia simile a quello in cui si è utilizzata loppa d'altoforno, poiché in entrambi i casi risulta *fragile*.

Rispetto alle malte cementizie, quelle a base di loppa attivata alcalinamente, presentano i seguenti vantaggi:

- resistenze meccaniche superiori (Puertas et al., 2003) come mostrato in Tabella 1-3, ottenuta da test effettuati su campioni prismatici di malte cementizie e a base di loppa;
- minore calore di idratazione;
- maggiore resistenza all'attacco chimico;
- maggiore resistenza al fuoco (Zhao & Sanjayan, 2011).

Fra gli svantaggi:

- presa rapida e indurimento precoce;
- alto tasso di restringimento con formazione di micro fessure (Wang, 2010);
- uso obbligato di soluzione alcalina in sostituzione all'acqua.

Tabella 1-3: Valori resistenze meccaniche su differenti malte cementizie e a base di loppa d'altoforno (Puertas et al., 2003). La tabella mostra come a 28 giorni la resistenza a compressione per malte a base di loppa superi del 40% quella relativa a malte cementizie

Resistenze meccaniche (MPa)				
Malte	2 giorni		28 giorni	
	Flessione	Compressione	Flessione	Compressione
Scorie	7.2	59.5	7.8	89.5
Cemento	6.3	39.1	7.8	53.0

2 Programma sperimentale

La tesi si pone l'obiettivo di sperimentare conglomerati porosi di nuova formulazione, ottenuti mediante l'attivazione alcalina di loppa d'altoforno allo scopo di raggiungere elevate resistenze, superiori, se possibile, a quelle raggiungibili con l'impiego del comune cemento Portland. Ciò allo scopo di estendere quanto più possibile il campo di applicazione di questo materiale nella formazione di pavimentazioni sollecitate da traffico più pesante di quello transitante su strade locali o residenziali.

Nei conglomerati cementizi porosi la malta di cemento (o la pasta quando non sia impiegata la sabbia) ha il compito di garantire un saldo contatto tra le particelle di aggregato, poiché è in tali punti che avviene il trasferimento delle sollecitazioni interne da particella a particella. I punti di contatto sono quindi maggiormente sollecitati in quanto presenti in numero assai inferiore rispetto a un tradizionale conglomerato cementizio chiuso. È per tale ragione che la malta o la pasta da impiegare in questa specifica applicazione deve garantire prestazioni superiori rispetto a quelle tradizionali (Figura 2-1).

L'obiettivo della tesi è quindi anche quello di dimostrare le forti potenzialità della loppa d'altoforno attivata in alternativa al cemento Portland, allo scopo di valorizzare un sottoprodotto industriale che non trova ancora oggi valide e importanti applicazioni.

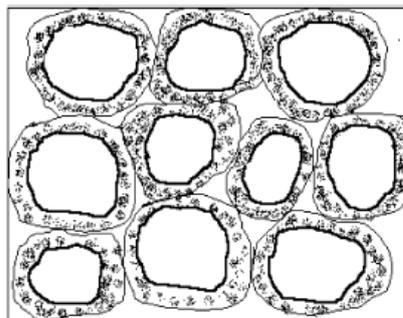


Figura 2-1: Modello schematico del conglomerato poroso. La malta riveste l'aggregato e funge da matrice per il trasferimento delle sollecitazioni (Yang & Jiang, 2000)

Questo lavoro di tesi si colloca in continuità a un precedente lavoro svolto da Isabella Gaudiuso nel corso del 2017. Il piano sperimentale di Isabella era finalizzato a comprendere le potenzialità di due leganti alternativi al cemento Portland (CEM I, secondo la classificazione europea del CEN) nella formazione di conglomerati cementizi porosi:

- il cemento d'altoforno (CEM III); e
- la loppa d'altoforno (BFS) attivata per via alcalina.

L'indagine sperimentale era limitata alla sola valutazione delle proprietà delle malte ottenute dalla miscelazione del legante, sabbia, acqua e additivi. Lo studio venne distinto in due fasi:

- nella prima furono selezionati i materiali e definito il mix-design delle tre componenti fondamentali (legante, sabbia e acqua) in base ad un criterio di consistenza; in particolare, le proporzioni dei tre costituenti furono definite per il solo CEM I e impiegate anche per le altre due tipologie di malta (CEM III e loppa d'altoforno);
- nella seconda fase furono preparate le malte e confezionati campioni sia con le proporzioni individuate nella prima fase, sia nelle proporzioni standard della norma UNI EN 196-1; le proprietà meccaniche degli impasti induriti furono confrontati per diversi tempi di maturazione (2, 7 e 28 giorni).

A partire da questa prima base di informazioni, il presente lavoro di Tesi amplia l'indagine precedente poiché sono stati investigati:

- rapporti in massa tra i costituenti di base ottimizzati per la malta geopolimerica,
- la combinazione di additivi funzionali specifici per le malte geopolimeriche,
- i conglomerati porosi ottenuti a partire dalle malte cementizie indagate sia nella precedente e sia in questa sperimentazione.

Suoi campioni in conglomerato poroso di forma cilindrica e prismatica sono state eseguite prove di caratterizzazione volumetrica e meccanica. Il *flow chart* di Figura 2-2 sintetizza i due piani sperimentali.

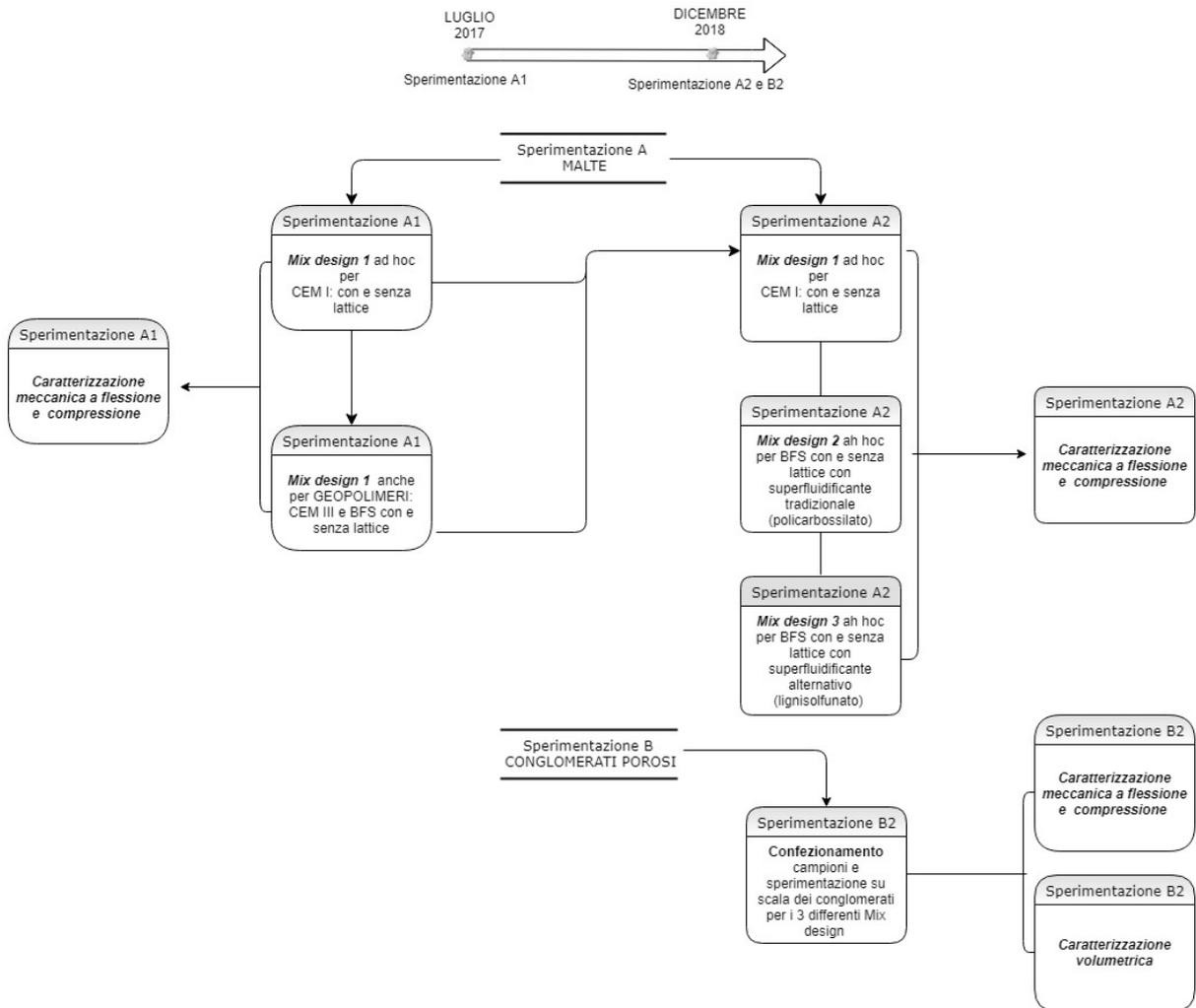


Figura 2-2: Flow chart esplicativo dello sviluppo di indagine

In questo lavoro di tesi il piano sperimentale è di tipo multi-scala: (a) la scala delle malte e (b) la scala dei conglomerati.

Analogamente a quanto svolto nella precedente tesi (Gaudiuso, 2017) la prima parte dell'indagine sperimentale ha riguardato lo *studio preliminare* di differenti *mix-design* a seconda del legante: cemento Portland o loppa attivata alcalinamente. Lo studio delle proporzioni tra i costituenti è basato principalmente sulla consistenza (o lavorabilità), valutata attraverso la "Prova del guanto" (Sezione 1.3.2) e intesa come capacità della malta di aderire alle particelle lapidee. Nello specifico il conglomerato non dovrà risultare troppo asciutto (sgretolandosi sul palmo) o troppo molle (conglomerato attaccato al guanto). Solo le migliori miscele in termini di consistenza sono state sottoposte ad una prova di trazione indiretta, per avere delle indicazioni sulle prestazioni meccaniche dei prodotti induriti. Sono stati inoltre impiegati diversi additivi: il lattice e due diversi fluidificanti, in modo da arricchire le informazioni acquisite dall'analisi bibliografica riguardo l'uso di fluidificanti differenti in dipendenza del legante adoperato. Da qui si è proceduto alla determinazione di diversi confronti fra le malte, in virtù dei rapporti tra i materiali usati nelle singole combinazioni di

mix-design, ad esempio: legante/liquido, malta/aggregato, aggregato/legante, etc., stimando come unica dipendenza interessante quella fra la resistenza a trazione indiretta e il rapporto malta/aggregato.

Successivamente si è scelto di indagare solo le malte risultate prestazionali in termini di consistenza e resistenza a trazione indiretta.

Per quanto concerne lo studio alla *scala delle malte*, sono state indagate le caratteristiche fisico-volumetriche delle malte scelte e successivamente anche quelle meccaniche. Sui vari provini prismatici di dimensioni 80x20x20 mm, sono state effettuate prove a flessione su 3 punti e a compressione per diversi tempi di maturazione (2, 7 e 28 giorni).

Passando alla *scala dei conglomerati*, sono stati confezionati cilindri (di diametro 100 mm e altezza 200 mm) e travetti (di dimensioni 500x100x100 mm) in conglomerato poroso. Anche in questo caso, la caratterizzazione delle miscele è avvenuta sia da un punto di vista fisico-volumetrico che meccanico. Un parametro di notevole importanza per questi materiali è l'indice dei vuoti. Si sono valutati i diversi indici dei vuoti considerando:

- massa geometrica;
- densità apparente (o *Bulk Density*).

Infine si è proceduto all'esecuzione di prove a compressione e a flessione su 4 punti, valutando le resistenze a diversi tempi di maturazione, considerando stagionature di 2, 7 e 28 giorni.

3 Materiali

3.1 Leganti

I leganti impiegati nella sperimentazione sono:

- Cemento Portland di tipo I (CEM I);
- Loppa granulata d'altoforno (nella letteratura anglosassone indicata con il termine *Blast furnace slag*, BFS).

Ciò che rende questi leganti estremamente diversi sono la composizione chimica e i prodotti di reazione, così come mostrato nel diagramma di Figura 3-1. Mentre le materie prime per paste cementizie sono *Cemento* ed *Acqua*, con conseguenti prodotti di reazione quali *Silicato di calcio idrato* e *Idrossido di calcio*; nel caso delle paste geopolimeriche le materie prime risultano *Polvere alluminosilicata* e *Soluzione alcalina* sotto agitazione (*Cariche*), con prodotti di reazione quali *Poli (sialati)*, *Poli (silosso-sialati)* o *Poli (disilosso-sialati)*.

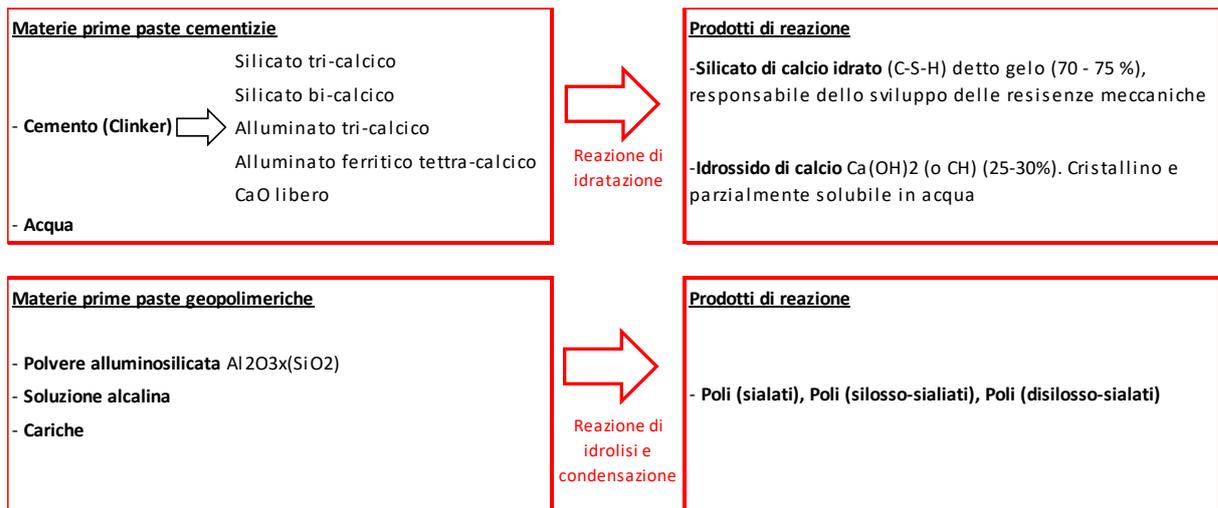


Figura 3-1: Composizione leganti usati

Secondo la normativa europea UNI-EN197-1, il cemento è una miscela di silicati e alluminati di calcio, ottenuti dalla cottura ad alta temperatura di calcare e argilla o di marna.

La classe di resistenza del cemento dipende dalla finezza di macinazione dello stesso e dalla percentuale di silicato tricalcico rispetto a quello bicalcico; maggiore è la finezza di macinazione del cemento più rapido lo sviluppo della resistenza meccanica. Per ogni classe di resistenza normalizzata si definiscono due classi di resistenza iniziale a 2 e 7 giorni: N e R, rispettivamente indicanti la resistenza iniziale ordinaria e quella elevata. Il cemento usato in questa sperimentazione è un **CEM I – 42,5 R** dove:

- **CEM I**, indica che si tratta di un cemento di tipo I costituito per almeno il 95% di clinker di cemento e per il 5% da coadiuvanti utilizzati per catalizzare la reazione del cemento (filler, additivi e solfato; mai superiori al 5% vincolo massimo fissato dalla norma europea);
- **42,5** indica la minima resistenza a compressione in MPa raggiunta da provini prismatici preparati in modo standardizzato con rapporto a/c pari a 0,5 e rapporto sabbia/cemento pari a 3. La massima resistenza a compressione per questa classe è di 62,5 MPa;
- **R** indica che si tratta della resistenza elevata raggiunta alle brevi stagionature.

La composizione dei due diversi leganti usati in questa sperimentazione è stata studiata tramite prove XRF da Gaudiuso e riportata in Tabella 3-1.

Mentre il cemento presenta percentuali di circa il 20% in peso di Al₂O₃+SiO₂ e quasi il 70% di ossido di calcio (CaO); la loppa è costituita per una percentuale di circa il 9% in peso della massa totale da Al₂O₃ e per circa il 40% dalla somma di Al₂O₃+SiO₂, che consentono una reattività geopolimerica costante. Inoltre si hanno quantità pari al 6,5 % di ossido di manganese (MgO) e 38,9% di ossido di calcio (CaO). In particolare, secondo Davidovits J.(2008), il consolidamento idraulico e il comportamento pozzolanico vengono conferiti dalla presenza di CaO, attivato grazie all'alcalinizzazione.

Per quanto riguarda la granulometria, cemento e loppa non differiscono molto, presentando grani di dimensione variabile tra i 5 e 25 μm .

Tabella 3-1: Risultati delle analisi XRF eseguite sul cemento Portland e sulla loppa macinata (Gaudiuso, 2017)

Componente	% in massa	
	Loppa	Cemento I
Al_2O_3	9,24	3,91
SiO_3	31	18,4
SO_3	1,69	3,71
K_2O	0,365	1,26
CaO	38,9	67,6
Fe_2O_3	1,07	5,07
SrO	0,0805	0,0419
CO_2	9,97	-
MgO	6,5	-
TiO_2	0,84	-
MnO	0,359	-
ZrO_2	0,0424	-

3.2 Aggregati lapidei

Gli aggregati usati nella sperimentazione sono sabbia e aggregato calcareo grossolano. La sabbia utilizzata è di tipo naturale, proveniente da cava. Si è proceduto prima all'essiccazione in forno ad una temperatura di 105 °C per 24 h (a causa dell'alto grado di umidità) e dopo opportuno raffreddamento, è stata setacciata manualmente attraverso un setaccio di apertura di 2 mm per poter escludere eventuali particelle di dimensioni superiori.

Gli aggregati di tipo calcareo, provenienti da una cava in Zandobbio (Bergamo), presentano massa volumica pari a 2773 kg/m^3 ed assorbimento pari all'1% (scheda tecnica in Allegati). Questi dopo essere stati anch'essi essiccati in forno a 105°C per 24h, sono stati sottoposti ad un'analisi granulometrica secondo la normativa UNI-EN-196-1, in modo da ottenere la distribuzione granulometrica delle particelle.

Dai risultati ottenuti è possibile ricavare la curva granulometrica in un grafico avente in ascissa la dimensione dell'apertura del setaccio espressa in scala logaritmica ed in ordinata la percentuale di passante progressivo.

In Figura 3-2 è riportata la curva granulometrica dell'aggregato lapideo calcareo utilizzato per il confezionamento dei conglomerati, oggetto della presente sperimentazione.

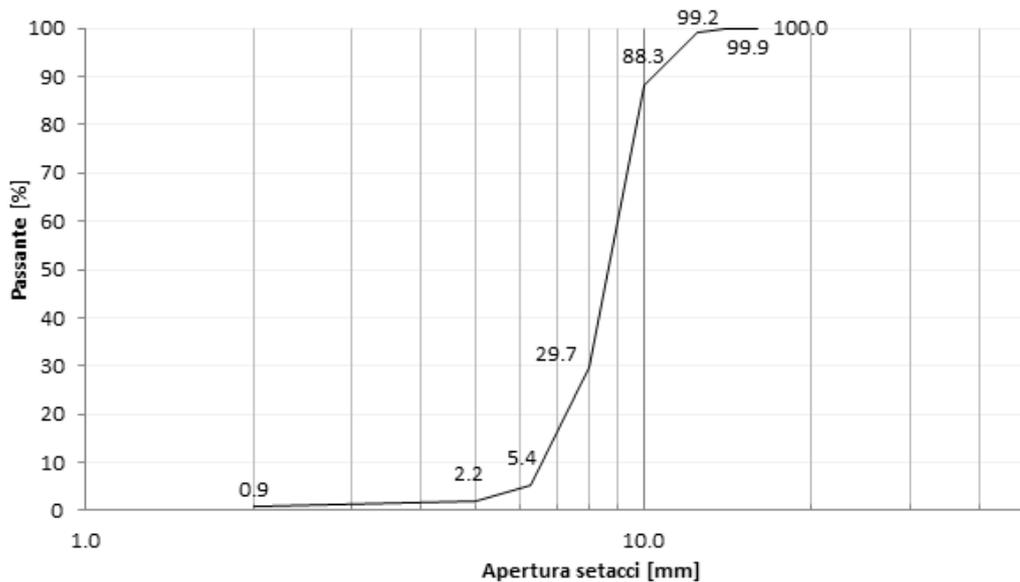


Figura 3-2 Curva granulometrica aggregato calcareo

3.3 Additivi

3.3.1 Fluidificanti

Il fluidificante è un additivo generalmente usato per aumentare la lavorabilità della pasta cementizia. In genere l'azione chimica svolta da tale additivo determina una riduzione della tensione superficiale del liquido usato nell'impasto, acqua o soluzione alcalina a seconda che si considerino malte cementizie o geopolimeriche, favorendo lo scorrimento tra i grani e quindi la fluidità dell'impasto.

Si è scelto di adoperare due fluidificanti differenti: (a) un comune superfluidificante usato per i cementi e (b) uno maggiormente prestazionale per le malte geopolimeriche. Le schede tecniche dei due fluidificanti usati sono riportate in Allegati, mentre in Tabella 3-2 se ne riportano le principali caratteristiche: peso specifico, dosaggio e valore di pH.

Secondo Bakharev et al. (1999) un fluidificante a base di riduzione d'acqua in lignisolfonato aumenta la consistenza nel caso in cui la fase liquida della malta sia costituita da soluzione alcalina. Inoltre si è dimostrato come l'uso di un comune superfluidificante (a base di naftalene o polycarbossilato) comporti un aumento della lavorabilità solo in una fase iniziale di miscelazione; mentre la presenza nel lignisolfonato di una molecola non polare, comporti una minore attrazione di Coulomb fra le particelle di loppa, fungendo da riduttore di tensione superficiale molecolare. Tuttavia la stessa indagine ha dimostrato anche come fluidificanti lignisolfonati possano causare un ritardo nello sviluppo della resistenza a compressione ed una riduzione dei valori di resistenza flessionale.

Tabella 3-2: Confronto fra i due fluidificanti usati nella sperimentazione

	Additivi Fluidificanti	
	Fluidificante 1	Fluidificante 2
	<i>SikaPlast20</i>	<i>Concretan200L</i>
Descrizione	Miscela a base di policarbossilato etere PCEs	Miscela di sali di calcio di polimeri organici solfunati , sali sodici organici e additivi tecnologici
Peso specifico (g/cm ³)	1,045 ± 0,005	1,045 ± 0,020
Dosaggio (%)	0,6 ÷ 1,2	0,7 ÷ 1,5
Valore di pH	4,7 ± 1	9,5 ± 1

Per questo motivo nel confezionamento delle malte geopolimeriche si è optato per studiare l'effetto dei due diversi fluidificanti, in modo da verificare se l'uso di lignisolfunato su malte a base di loppa, fornisce un loro miglioramento in termini di consistenza e dei valori di resistenza a compressione. Nel caso delle malte cementizie invece si è adoperato solo il primo fluidificante, quello a base di policarbossilato etere, sia perché la letteratura non fornisce dati interessanti riguardo l'uso di lignisolfunato sul cemento, sia perché i *mix-design ottimi* per le malte cementizie erano già stati determinati da Gaudioso nel 2017, usando il primo fluidificante.

3.3.2 Viscosizzante

I modificatori di viscosità (*viscosity modifying admixtures*, VMA) si presentano sotto forma di polvere chiara e si utilizzano generalmente per evitare fenomeni di segregazione (generalmente tipici per impasti molto fluidi). Il fenomeno della segregazione è causato da inadeguate proporzioni di mix-design, da errate modalità di trasporto o da insufficiente costipamento e comporta una separazione delle componenti, in quanto gli aggregati pesanti si depositano sul fondo, con affioramento dell'acqua in superficie. In questa sperimentazione è stato usato il Sika Visko i-100, che si presenta sotto forma di polvere chiara, la cui scheda tecnica è riportata in Allegati. Poiché la soluzione alcalina presenta densità e composizione chimica diversa dall'acqua (impasti meno fluidi) ed inoltre, visto che non si riscontrano in letteratura informazioni interessanti riguardo l'uso di questo additivo a miglioramento dei geopolimeri, si è deciso di impiegarlo solo nei conglomerati cementizi, con lo scopo di migliorare la coesione tra le particelle.

3.3.3 Lattice

Il lattice è un additivo formato da catene polimeriche che, se soggette a deformazione, si dispongono parallelamente tra di loro, conferendo così elevata elasticità al materiale cui è aggiunto. Il lattice impiegato in questa sperimentazione, che si presenta come un liquido bianco, ha massa volumica pari a $1,02 \text{ g/cm}^3$, pH pari ad 8 e residuo solido di 36 %.

Nel paragrafo 1.2.1 sono stati riportati i risultati delle indagini di diversi autori, relative proprio all'uso del lattice in malte e conglomerati porosi. Si è infatti confermato come l'aggiunta di polimeri di lattice (*styrene-butadiene-rubber*) nella pasta cementizia produca un aumento della resistenza a compressione, all'abrasione e a trazione; un aumento dell'energia di rottura ed una riduzione del rapporto acqua/legante. Esso si presenta come un liquido bianco e molto fluido.

Per quanto riguarda il quantitativo di lattice da aggiungere alle miscele, Kevern (2005) ha studiato gli effetti delle diverse proporzioni di lattice rispetto al legante (5%, 10% e 15% in peso) concludendo che l'utilizzo del 10% in peso è ottimale poiché le aggiunte del 5% e 15% in peso di lattice conducono ad una riduzione della resistenza a compressione.

3.4 Soluzione alcalina

L'attivazione alcalina delle particelle di loppa è avvenuta mediante una soluzione chimica attivante contenente:

- *Idrossido di sodio – NaOH* (Figura 3-3);
- *Silicato di sodio in soluzione – $\text{Na}_2\text{O} \cdot n(\text{SiO}_2)$* ;
- *Acqua distillata*.

L'idrossido di sodio, disponibile in scaglie di peso molecolare pari a 56,11, è stato inizialmente diluito in acqua distillata in concentrazione uguale a 25 M (50% di scaglie e 50% di acqua in peso). Successivamente la soluzione alcalina vera e propria è stata ottenuta miscelando, con l'ausilio di agitatori magnetici, il 20% in peso di NaOH in forma liquida e l'80% sempre in peso di silicato di sodio (già in forma liquida). Il silicato che si presenta come un liquido incolore, possiede: un pH di 11,5; concentrazione in peso pari al 36 % ed un rapporto molare $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ pari al 3,4.

Quindi per la produzione di 1 kg di soluzione alcalina si disciolgono inizialmente 100 gr di scaglie in 100 gr di acqua distillata, posti in continua agitazione grazie alla combinazione: *ancoretta magnetica + agitatore* (Figura 3-3).



Figura 3-3: A destra scaglie di soda caustica, a sinistra becker su agitatore magnetico

Successivamente raggiunta la totale dissoluzione delle scaglie in acqua, si procede con l'aggiunta graduale di 800 gr di silicato di sodio, lasciando la miscela sotto agitazione per un tempo pari alla completa dispersione di tutto il calore generato dalla reazione esotermica tra le due parti, stimato di circa un'ora. In questo modo si ottiene la soluzione alcalina: fluida, trasparente, omogenea e altamente basica, in grado di garantire buona reattività geopolimerica.

4 Metodi

4.1 Indagine preliminare

Il *mix-design*, o *progetto di miscela*, è il calcolo necessario per l'individuazione della composizione di una prefissata miscela (in questo caso: calcestruzzo o miscela a loppa attivata) da effettuare in base alle prestazioni richieste e alle materie prime utilizzate (leganti, additivi, inerti, etc.). Nell'eseguire il mix-design occorre tenere in considerazione alcuni requisiti di base, fra cui la:

- *consistenza*, intesa come capacità della malta di aderire alle particelle lapidee;
- *resistenza meccanica* (o classe di resistenza);

che dipendono entrambe dal quantitativo di liquido utilizzato per l'impasto, dagli inerti utilizzati e dalla presenza di eventuali additivi.

Il progetto di miscela è stato messo a punto per diversi tipi di conglomerato poroso a base di loppa attivata, considerando le combinazioni "con" e "senza":

1. sabbia;
2. lattice;
3. viscosizzante.

Partendo dai rapporti fra i costituenti delle miscele cementizie "ottime", determinati nella sperimentazione di Gaudiuso (Tabella 4-1), si sono elaborate diverse ricette per ogni tipo di miscela geopolimerica. In questo modo, facendo variare i rapporti tra i costituenti, è stato possibile valutarne la loro influenza sulla consistenza, parametro fondamentale per la corretta posa in opera dei conglomerati cementizi porosi, valutata tramite la *Prova del guanto*. Solo le miscele che hanno presentato ottima consistenza sono state successivamente sottoposte ad una prova di trazione indiretta, in modo da acquisire informazioni sulle proprietà meccaniche.

Tabella 4-1: Rapporti fra i costituenti dei mix-design ottimali per miscele cementizie

MISCELA CEM I							
ID Campione	w/c	a/c	flu/c	vis/c	s/a	lat/c	mal/a
CEMI_L	0.32	4.40	0.01	0.005	0.05	0.07	0.37
CEMI	0.35	4.40	0.01	0.005	0.06	-	0.37

w/c = rapporto acqua/cemento;
a/c = rapporto aggregato/cemento;
flu/c = rapporto fluidificante/cemento;
vis/c = rapporto viscosizzante/cemento;
s/a = rapporto sabbia/aggregato;
lat/c = rapporto lattice/cemento;
mal/a = rapporto malta/aggregato.

4.1.1 Consistenza

La consistenza (lavorabilità) della miscela è un parametro molto importante perché da essa dipende la facilità di esecuzione delle attività necessarie alla posa in opera dell'impasto fresco, come il trasporto e il getto. Generalmente si effettua la misura di un parametro connesso alla lavorabilità, quale la *consistenza* dell'impasto fresco. Per determinare la consistenza dell'impasto di conglomerato poroso è stato adottato un metodo sperimentale fondato su un'analisi visiva: si valuta la consistenza della ricetta appena miscelata indossando un guanto. La miscela risulta lavorabile quando si formano dei campioni di impasto che si mantengono sferici e che non sporcano eccessivamente il guanto. In Figura 4-1 si mostra come è stata effettuata la valutazione, dividendo la scala di consistenza in: PESSIMA, SCARSA, QUASI BUONA, BUONA ed OTTIMA.

In Tabella 4-2 e Tabella 4-3 si riportano i rapporti tra i costituenti dei vari progetti di miscela alcali-attivate e la relativa valutazione sul grado di consistenza.



Figura 4-1: Valutazione consistenza "A:PESSIMA; B:SCARSA; C:QUASI BUONA; D:BUONA e E:OTTIMA".

I mix-design in questione sono stati ottenuti dalla miscelazione di soluzione alcalina, loppa d'altoforno (BFS), aggregati grossi, additivo fluidificante, viscosizzante e lattice. È importante sottolineare che in questa fase preliminare è stato usato un solo fluidificante, quello a base di policarbossilato.

Si nota che tra le varie miscele preparate i rapporti variano secondo i seguenti in: soluzione/loppa tra 0,32 e 0,50; aggregato/loppa tra 4,03 e 4,97; viscosizzante/loppa tra 0,005 e 0,0011, lattice/loppa tra 0,06 e 0,08, mentre il rapporto sabbia/aggregato si mantiene costante allo 0,05.

Tabella 4-2: Rapporti fra i costituenti delle ricette studiate per miscele geopolimeriche, con lattice

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	vis/lop	s/a	lat/lop	mal/a	Consistenza al guanto
1	0.32	4.40	0.01	0.005	0.05	0.07	0.37	Pessima
2	0.50	4.40	0.01	0.005	0.05	0.07	0.41	Scarsa
3	0.47	4.18	0.01	0.005	0.05	0.07	0.42	Ottima
4	0.42	4.20	0.01	-	0.05	0.07	0.41	Quasi Buona
5	0.46	4.20	0.01	-	0.05	0.07	0.42	Ottima
6	0.34	4.20	0.01	0.005	-	0.07	0.34	Scarsa
7	0.42	4.20	0.01	0.005	-	0.07	0.36	Scarsa
8	0.40	4.03	0.01	0.005	-	0.06	0.37	Pessima
9	0.34	4.20	0.01	0.005	0.05	0.08	0.39	Scarsa
10	0.38	4.20	0.01	0.005	0.05	0.08	0.40	Scarsa
11	0.42	4.20	0.01	0.005	0.05	0.08	0.41	Ottima
12	0.42	4.42	0.00	0.000	0.05	0.07	0.39	Ottima
13	0.35	4.97	0.01	0.006	0.05	0.08	0.34	Scarsa
14	0.44	4.97	0.01	0.006	0.05	0.08	0.36	Ottima
15	0.40	4.40	0.01	0.005	0.05	0.07	0.39	Quasi Buona
16	0.44	4.40	0.01	0.005	0.05	0.07	0.40	Buona
17	0.37	4.97	0.02	0.006	0.05	0.08	0.35	Pessima
18	0.37	4.97	0.03	0.006	0.05	0.08	0.35	Scarsa
19	0.37	4.97	0.04	0.006	0.05	0.08	0.35	Quasi Buona
20	0.39	4.97	0.04	0.006	0.05	0.08	0.36	Ottima

Tabella 4-3: Rapporti fra i costituenti delle ricette studiate per miscele geopolimeriche, senza lattice

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	vis/lop	s/a	mal/a	Consistenza al guanto
1	0.44	4.97	0.01	0.006	0.05	0.34	Scarsa
2	0.46	4.97	0.01	0.006	0.05	0.35	Scarsa
3	0.48	4.97	0.01	0.006	0.05	0.35	Scarsa
4	0.48	4.97	0.02	0.006	0.05	0.35	Quasi Buona
5	0.48	4.97	0.03	0.006	0.05	0.36	Quasi Ottima
6	0.48	4.97	0.03	0.011	0.05	0.36	Ottima
7	0.39	4.97	0.04	0.006	0.05	0.34	Pessima
8	0.41	4.97	0.04	0.006	0.05	0.34	Quasi Buona
9	0.41	4.97	0.04	0.011	0.05	0.34	Scarsa
10	0.44	4.97	0.04	0.011	0.05	0.35	Quasi Buona
11	0.44	4.97	0.06	0.011	0.05	0.35	Ottima

Nelle due tabelle il significato dei termini è il seguente:

- *sol/lop* è il rapporto soluzione/loppa;
- *a/lop* è il rapporto aggregato/loppa;
- *flu/lop* è il rapporto fluidificante/loppa;
- *s/a* è il rapporto sabbia/aggregato;
- *lat/lop* è il rapporto lattice/loppa;
- *mal/a* è il rapporto malta/aggregato.

Tra i diversi progetti di miscela sono stati presi in considerazione quelli che hanno mostrato migliore consistenza al guanto. Questi sono poi stati utilizzati per confezionare campioni cilindrici di conglomerato poroso (di altezza 55 mm e diametro 95 mm) da sottoporre a prova di trazione indiretta, dopo una maturazione di 7 giorni.

4.1.2 Prova di trazione indiretta

La *prova di trazione indiretta* (o prova “brasiliana”) è normata dalla UNI EN 13286-42. Viene usata per la determinazione della massima tensione di trazione indiretta su provini cilindrici legati, realizzati in laboratorio o provenienti da carotaggi. In questo caso si tratta di provini cilindrici confezionati in conglomerato poroso, aventi diametro di 95 mm e altezza di 55 mm. Nel dettaglio la prova consiste nell’applicare una sollecitazione uniassiale di compressione lungo l’altezza di un provino cilindrico (Figura 4-2).

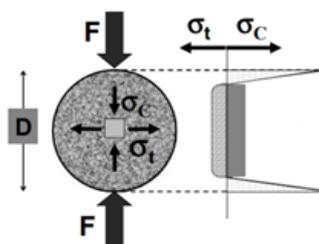


Figura 4-2: Schema della sollecitazione uniaassiale di compressione

La tensione massima di trazione indiretta viene determinata mediante la formula in (Eq. 4-1):

$$R_{it} = \frac{2F}{\pi HD} \quad (\text{Eq. 4-1})$$

dove:

- R_{it} (o σ_{it}) è la resistenza a trazione indiretta, espressa in MPa;
- F è la forza massima applicata al provino prima della rottura, espressa in kN;
- H è l'altezza del provino, espressa in mm;
- D è il diametro del provino, espresso in mm.

Per l'esecuzione della prova è stata utilizzata una pressa statica (Figura 4-3), equipaggiata con due ganasce che ospitano il provino, trasferendogli lo sforzo, e da due trasduttori per registrarne le deformazioni assiali. Il carico viene applicato dalla traversa inferiore, e misurato tramite la cella di carico montata sulla traversa superiore, che converte la forza fisica in un segnale elettrico, trasmesso poi ad un terminale, in grado di controllare i parametri di prova e registrare i dati di output (forza applicata in kN e spostamento in mm) ad intervalli di 0,2 secondi (5 Hz).

La prova può essere condotta in due diverse modalità:

- *controllo di carico*, impostando un valore fisso della forza da imporre al provino. In questo caso la velocità di spostamento cambia continuamente, in modo da mantenere uno stato di sforzo costante;
- *controllo di spostamento*, impostando un valore fisso dello spostamento. In questo caso lo spostamento della piastra inferiore avviene con velocità costante.

In questa analisi la prova è stata eseguita in controllo di spostamento con velocità pari a 0,50 mm/min.

Il campione subisce una rottura di tipo fragile, lungo la direzione di applicazione del carico (Figura 4-4).

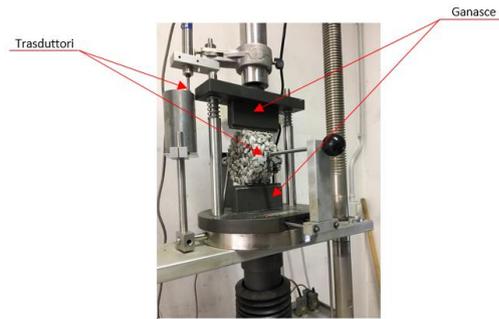


Figura 4-3: Pressa statica



Figura 4-4: Campione rotto alla prova di trazione indiretta

Scelta delle miscele da studiare

Come già spiegato, la prova di trazione indiretta è stata condotta solo per le miscele risultate “Ottime” durante la prova del guanto. Nello specifico, tra le miscele riportate in Tabella 4-2 e Tabella 4-3 si sono selezionate:

1. La miscela 5 (Tabella 4-4), considerando le varianti con viscosizzante (5_V) e senza lattice (5_NL):

Tabella 4-4: Progetto di miscela 5

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	vis/lop	s/a	lat/lop	mal/a	Consistenza al guanto
5	0.46	4.20	0.01	-	0.05	0.07	0.42	Ottima
5_V	0.46	4.20	0.01	0.005	0.05	0.07	0.42	Ottima
5_NL	0.46	4.20	0.01	0.005	0.05	-	0.40	Ottima

2. La miscela 20 (Tabella 4-5):

Tabella 4-5: Progetto di miscela 20

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	vis/lop	s/a	lat/lop	mal/a	Consistenza al guanto
20	0.39	4.97	0.04	0.006	0.050	0.08	0.36	Ottima

3. La miscela 11 (Tabella 4-6):

Tabella 4-6: Progetto di miscela 11

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	vis/lop	s/a	lat/lop	mal/a	Consistenza al guanto
11	0.42	4.20	0.01	0.005	0.05	0.08	0.41	Ottima

4. La miscela 12 (Tabella 4-7):

Tabella 4-7: Progetto di miscela 12

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	vis/lop	s/a	lat/lop	mal/a	Consistenza al guanto
12	0.42	4.42	0.00	-	0.05	0.07	0.39	Ottima

5. La miscela 14 (Tabella 4-8):

Tabella 4-8: Progetto di miscela 14

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	vis/lop	s/a	lat/lop	mal/a	Consistenza al guanto
14	0.44	4.97	0.01	0.006	0.05	0.08	0.36	Ottima

6. La miscela 6_NL, dai mix-design senza lattice (Tabella 4-9):

Tabella 4-9: Progetto di miscela 6_NL

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	vis/lop	s/a	lat/lop	mal/a	Consistenza al guanto
6	0.48	4.97	0.03	0.01	0.05	-	0.35	Ottima

7. La miscela 11_NL; dai mix-design senza lattice (Tabella 4-10):

Tabella 4-10: Progetto di miscela 11_NL

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	vis/lop	s/a	lat/lop	mal/a	Consistenza al guanto
11	0.44	4.97	0.06	0.01	0.05	-	0.35	Ottima

I risultati della prova a trazione indiretta, valutata sui campioni di miscela stagionati a 7 giorni, sono riportanti in Tabella 4-11.

Tabella 4-11: Valori di Resistenza a trazione indiretta a 7 giorni, per singole miscele

ID Campione	mal/a	R _{7gg} (MPa)
5	0.42	1.2
5_V	0.42	0.9
20	0.36	0.7
11	0.41	1.17
12	0.39	1.1
14	0.36	0.8
5_NL	0.4	1.2
6_NL	0.36	0.5
11_NL	0.35	0.5

Basandosi quindi sui dati ottenuti, si è proceduto alla determinazione della possibile dipendenza tra il valore di resistenza calcolato e le diverse frazioni di materiali usati nelle singole combinazioni di mix-design, ad esempio: legante/liquido, malta/aggregato, aggregato/legante, etc., stimando come unica dipendenza interessante quella fra la resistenza a trazione indiretta e il rapporto malta/aggregato.

Si è infatti registrata una dipendenza proporzionale *crescente* tra il rapporto malta/aggregato (mal/a) e il valore di resistenza a trazione indiretta (R_{7gg}, in MPa), come dimostrato dalla linea di tendenza in Figura 4-5.

In virtù della combinazione “Ottima consistenza” ed “Elevata resistenza a trazione indiretta” si è dunque determinato il progetto di miscela migliore. La scelta è ricaduta sul *Progetto di miscela con ID Campione 5*, che ha registrato per un rapporto malta/aggregato pari a 0,42, Ottima consistenza ed un valore di Resistenza a trazione indiretta pari a 1,2 MPa.

Da qui si è poi sviluppata l’indagine alla scala delle malte, considerando i mix-design a partire dalla Miscela 5, nella variante:

1. Fluidificante 1 (policarbossilato) - Lattice
2. Fluidificante 1 (policarbossilato) – Senza lattice
3. Fluidificante 2 (lignisolfunato) - Lattice
4. Fluidificante 2 (lignisolfunato) – Senza lattice
5. Lattice
6. Senza Lattice.

Come già detto, a partire dall’indagine su scala delle malte si è introdotto anche il secondo fluidificante, quello a base di lignisolfunato. In letteratura infatti sono stati rilevati dati interessanti sull’uso di questo tipo di fluidificante nel caso di miscele alcali-attivate (Sezione 3.3.1).

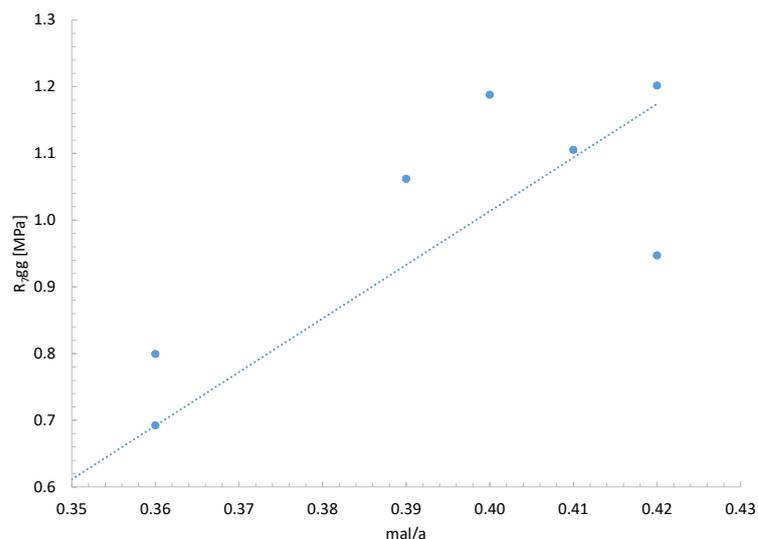


Figura 4-5: Dipendenza tra il rapporto mal/a e il valore di resistenza a trazione indiretta a 7 giorni, per singole miscele

4.2 Malte

Le malte sono costituite da legante, sabbia, acqua (o soluzione alcalina per le malte alcali-attivate) e additivi.

In questo caso, si sono confezionate malte alcali-attivate, dove il legante idraulico è la loppa d'altoforno attivata e il mix-design è stato scelto sulla base dell'*analisi preliminare* svolta. In particolare, per il confezionamento delle malte, si è adoperata la scelta di usare come additivi:

- due *fluidificanti* differenti, il primo a base di policarbossilato, il secondo a base di lignisolfonato (maggiormente prestazionale secondo alcuni autori per malte geopolimeriche, come esposto al paragrafo 3.3.1);
- il *lattice* per verificarne i vantaggi e gli svantaggi nello sviluppo delle caratteristiche meccaniche, così come riportato al paragrafo 1.2.1.

Si è dunque eliminato il viscosizzante (usato invece nel caso delle miscele cementizie studiate nella precedente sperimentazione da Gaudiuso (Tabella 4-1). Questa scelta è stata giustificata dai risultati relativi alla consistenza e alla resistenza a trazione indiretta: rispetto alla miscela scelta (Miscela 5), la stessa con aggiunta di viscosizzante (Miscela 5_V) non presentava alcun miglioramento sostanziale nella consistenza, sviluppando un valore di resistenza più basso ($R_{7gg}(5_V) = 0,9$ MPa; $R_{7gg}(5) = 1,2$ MPa (Tabella 4-11).

Le malte studiate sono state in tutto 6:

1. BFS_F1_L;
2. BFS_F1;

3. BFS_F2_L;
4. BFS_F2;
5. BFS_L;
6. BFS.

dove:

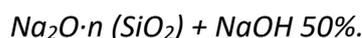
- *BFS* indica il legante idraulico *Blust Furnace Slag* (loppa d'altoforno), specificando si tratti di *malte alcali-attivate*;
- *F1* il fluidificante a base di polycarbossilato;
- *F2* il fluidificante a base di lignisolfunato;
- *L* il lattice.

Partendo dai rapporti in massa tra i componenti della Miscela 5, quelli per le malte alcali-attivate risulteranno quelli riportati in

Tabella 4-12: Rapporti in massa tra i componenti delle malte alcali-attivate

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	s/a	lat/lop	mal/a
BFS_F_L	0.46	4.20	0.01	0.05	0.07	0.42
BFS_F	0.46	4.20	0.01	0.05	0.00	0.42
BFS_L	0.46	4.20	-	0.05	0.07	0.42
BFS	0.46	4.20	-	0.05	0.00	0.42

Dove la composizione chimica della soluzione alcalina usata per l'attivazione della malta, risulta:



4.2.1 Confezionamento e stagionatura

Confezionamento dei provini

Il confezionamento dei campioni di malte ha previsto le fasi di preparazione, miscelazione, colatura in stampi e compattazione.

Durante la fase di preparazione gli stampi in plexiglass di dimensioni 80 x 20 x 20 mm (Figura 4-6) sono stati unti con il disarmante (scheda tecnica in Allegati), usato per facilitare la perfetta operazione di sformatura dei provini. Successivamente si sono pesate le frazioni di loppa, soluzione, sabbia e additivi (quando previsti). Le quantità da miscelare sono state calcolate in modo da ottenere circa 4/5 provini di malta, per ciascun periodo di maturazione (ovvero per

ogni tipo di malta è stato necessario confezionare in totale almeno 15 provini), così da avere un'opportuna quantità di dati a disposizione.

Le malte sono state miscelate meccanicamente, tramite mescolatrice (Figura 4-6), finché l'impasto non risulta uniforme e ben amalgamato.

Subito dopo si confezionano i provini, colando la miscela all'interno degli stampi. Questo procedimento deve avvenire nel minor tempo possibile, in modo da evitare l'indurimento della malta appena preparata ed inoltre richiede molta cura. Ci si può, infatti, servire di una paletta, sia per facilitare l'idoneo ricoprimento del fondo e delle pareti dello stampo, sia per eliminare l'eventuale eccesso di malta, che dovrà risultare allo stesso livello dello stampo (Figura 4-7).

Dopo aver riempito gli stampi, i provini sono stati compattati a mezzo di un apparecchiatura a scosse, infliggendo circa 50 colpi, in modo da eliminare le bolle d'aria presenti (Figura 4-7).



Figura 4-6: A sinistra stampi per provini prismatici di 80x20x20 mm, a destra mescolatrice costituita da planetaria e da paletta in acciaio inossidabile



Figura 4-7: A sinistra provini finiti, a destra apparecchiatura a scosse per la compattazione dei provini in malta

Stagionatura e sformatura dei provini

La *stagionatura* (detta anche *curing*) dei provini è l'insieme delle condizioni (di umidità e temperatura) alle quali si sottopone la miscela appena colata negli stampi al fine di assicurare l'idratazione del legante, garantendo il raggiungimento delle caratteristiche di durabilità e resistenza meccanica.

In questa sperimentazione la stagionatura è avvenuta a temperatura ambiente e non è stato previsto un trattamento a temperature differenti da essa, in modo da simulare le condizioni operative in cantiere.

Immediatamente dopo la compattazione è avvenuto il condizionamento di tutti i provini (prima della sformatura) collocando ciascuno stampo in un ambiente isolato (tipo un cassone o una teca, con un telo di ricoprimento) e mantenuto in umidità mediante un contenitore d'acqua all'interno.

Dopo 24 ore dal confezionamento, i provini sono stati rimossi dal cassero mediante un estrusore (Figura 4-8).

Dopo questa fase, la stagionatura dei campioni è continuata in ambiente umido isolato, con le stesse modalità di condizionamento prima descritte per i provini non ancora sformati (Figura 4-8).

I tempi di stagionatura dei campioni per le prove di resistenza meccanica sono stati calcolati, impostando come *tempo zero* il momento della miscelazione. Le prove di resistenza meccanica sono state effettuate per tre diversi periodi di stagionatura, pari a 2, 7 e 28 giorni.



Figura 4-8: A: Estrusore; B: Ambiente umido per stagionatura dei provini

Preparazione dei provini dopo stagionatura

Prima di effettuare le prove meccaniche i provini sono stati levigati con carta vetro per rendere lisce le superfici del provino, ponendo maggiore attenzione per le due superfici parallele al getto, poiché andranno a contatto con l'apparecchio di prova.

Ciascun provino è stato contrassegnato con un codice alfanumerico, dove la sigla indica il tipo di miscela, secondo la nomenclatura presentata all'inizio del paragrafo 4.2, e il numero il particolare campione facente parte di una stessa miscela. Ad esempio per indicare il primo campione della miscela a base di loppa, con aggiunta di fluidificante lignisolfonato e lattice si scriverà: BFS_F2_L_1.

Per ogni campione si è inoltre effettuata la pesatura e la misurazione delle tre dimensioni con il calibro: spessore, lunghezza e larghezza, in modo da determinarne la densità.

4.2.2 Caratterizzazione meccanica delle malte

La caratterizzazione meccanica delle malte indurite tramite prove statiche è stata effettuata con la stessa apparecchiatura (pressa statica costituita da traversa mobile e fissa) con la quale si era eseguita la prova di trazione indiretta. In questo caso però anziché montare il sistema di ganasce e trasduttore trasversale, sono stati usati due kit diversi a seconda della prova da svolgere: a flessione su 3 punti o a compressione (Figura 4-9).

Il carico viene applicato dalla traversa inferiore, e misurato tramite la cella di carico montata sulla traversa superiore, che converte la forza fisica in un segnale elettrico. La deformazione viene letta tramite un trasduttore di deformazione connesso alla traversa fissa (Figura 4-10).

La pressa è collegata ad un terminale tramite il quale è possibile controllare i parametri di prova e registrare ogni 0,2 secondi (pari a 5 Hz) i dati di output (forza applicata in kN e spostamento in mm), da rielaborare per il calcolo delle tensioni e delle deformazioni.

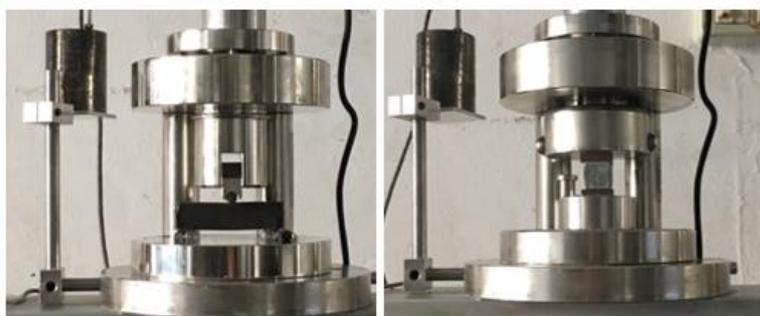


Figura 4-9: A sinistra kit di prova per la flessione su 3 punti, a destra kit di prova per la prova a compressione

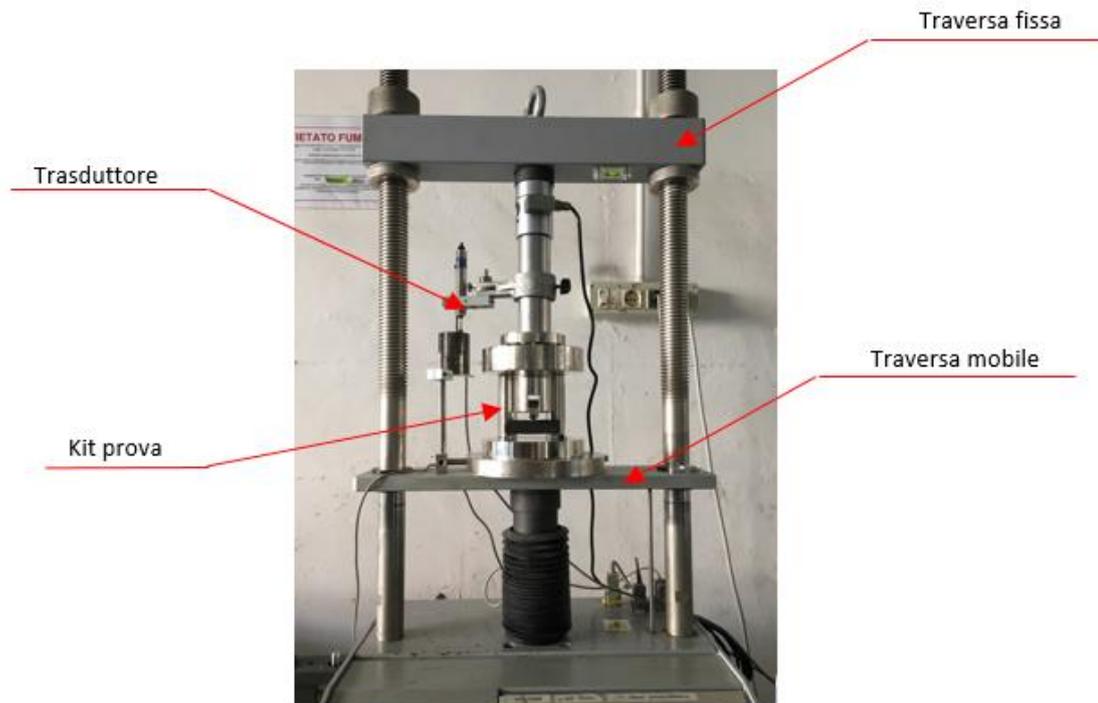


Figura 4-10: Pressa statica

Test di flessione su 3 punti

La prova di flessione su tre punti di un provino prismatico permette di quantificare la resistenza a trazione per flessione di materiali fragili. Nella configurazione a 3 punti i provini vengono vincolati con due appoggi nella parte inferiore e caricati in mezzeria.

Il dispositivo di flessione consiste in un penetratore superiore con connettore, e una tavola di flessione inferiore con due supporti e una flangia di connessione.

Il campione è stato collocato nella macchina di prova in modo da poggiare sui supporti le facce parallele alla superficie di getto e con asse longitudinale perpendicolare ai supporti (Figura 4-11).

Il carico è stato applicato (a mezzo della cella di carico) verticalmente sulla faccia laterale opposta del prisma, tramite due piatti di compressione, su cui sono fissati rispettivamente il penetratore (a quello superiore) e i due supporti (a quello inferiore)). Per ogni campione rotto a flessione si sono ottenuti due monconi, nominati *A* e *B*, testati successivamente a compressione (Figura 4-12).

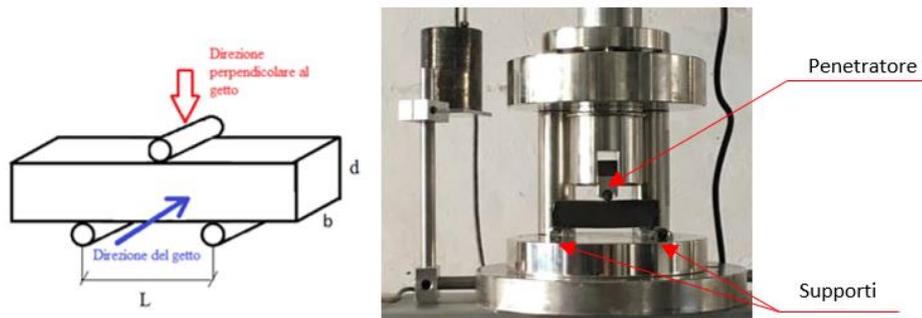


Figura 4-11: Schema posizionamento provino sui supporti di flessione del test di flessione su 3 punti



Figura 4-12: Provini della stessa malta, rotti a flessione generando due monconi

Ciascuna prova è stata eseguita in *controllo di spostamento*, con una velocità costante di 0,25 mm/min, con un valore di precarico pari a 25 N. La rottura dei provini è avvenuta in mezzeria producendo due monconi.

Il software Tecnotest restituisce i risultati della prova in termini di spostamento (mm) e forza (kN) registrati con una frequenza di 0,2secondi (5Hz).

La resistenza a trazione per flessione è stata calcolata secondo l'equazione (Eq. 4-2):

$$\sigma = \frac{3 FL}{2 bd^2} \cdot 1000 [MPa] \quad (\text{Eq. 4-2})$$

dove:

- b è la larghezza del provino, espressa in mm;
- d è lo spessore del provino in mm,
- L è la distanza tra gli appoggi inferiori in mm, fissa e pari a 57 mm;
- F è la forza applicata in kN.

La deformazione in percentuale è stata calcolata con la formula (Eq. 4-3):

$$\varepsilon = 6 \frac{d}{L^2} y \cdot 100 (\%) \quad (\text{Eq. 4-3})$$

dove:

- d è lo spessore del provino in mm;
- y è lo spostamento in mezzeria (freccia), valutato dall'apparecchiatura;
- L è la distanza tra gli appoggi inferiori in mm, fissa e pari a 57 mm.

Dall'elaborazione dei dati, effettuata tramite l'uso delle formule sopracitate, si sono ricavate: le curve sforzo-deformazione σ - ε , la resistenza massima e i moduli elastici tangente e secante per ciascun provino.

Test di compressione

Il test di compressione semplice è un metodo per valutare la resistenza a compressione di un materiale coesivo e le sue proprietà elastiche e di frattura. Il test di compressione è stato effettuato sui due monconi derivati dal travetto rotto durante la prova a flessione.

Il kit di compressione è composto da due piatti di compressione che servono a generare un carico di compressione uniforme. Il campione è stato collocato nella macchina di prova con la faccia parallela alla direzione del getto a contatto con il supporto e con l'asse longitudinale del provino parallelo alle piastre dell'elemento adattatore. Il campione è stato centrato lateralmente rispetto alle piastre e longitudinalmente in modo che la faccia terminale del prisma sporga rispetto ai piatti (Figura 4-13). Il carico è stato applicato verticalmente (con precarico di 25 N) e trasferito dal piatto superiore all'apparecchio adattatore e poi sul campione.

La prova è stata eseguita in *controllo di spostamento*, con una velocità costante di 0,50 mm/min. Trattandosi di una prova non confinata, la rottura dei provini comporta un'espansione laterale degli stessi, come mostra la Figura 4-14.

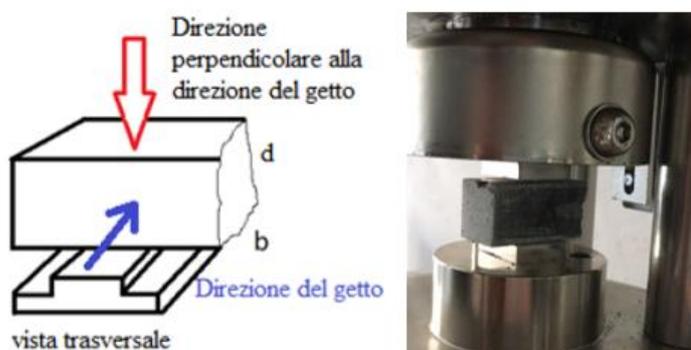


Figura 4-13: Schema posizionamento provino sul supporto per la prova a compressione



Figura 4-14: Espansione laterale del provino rotto e moncone rotto a compressione

Dai dati di output forniti dal software di controllo della prova, che risultano essere gli stessi della prova a flessione su 3 punti, si è calcolato il valore di resistenza a compressione in (Eq. 4-4) come:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot d} \cdot 1000 \text{ (MPa)} \quad (\text{Eq. 4-4})$$

dove:

- b è la larghezza del provino in mm;
- d è lo spessore del provino in mm;
- F è la forza in kN.

Si sono dunque ricavate: le curve sforzo-deformazione σ - ϵ , la resistenza massima e i moduli elastici tangente e secante per ciascun provino.

4.2.3 Curve sforzo-deformazione

Le curve di sforzo-deformazione che si ottengono per la prova a flessione e a compressione sono come quelle riportate in Figura 4-15:

In entrambi i casi il tratto iniziale del grafico non risulta lineare, questo perché il provino e le teste dei supporti non risultano in perfetto contatto. Queste curve verranno denominate “Curve non corrette”.

Per la determinazione delle “Curve corrette”, si è dunque scelto di eliminare il primo tratto del grafico. In questo modo, per entrambe le prove, si sono ottenute curve più verosimili al comportamento reale del materiale e valori corretti dei moduli di elasticità secante, tangente ed energia di rottura. Si è proceduto determinando per ogni curva il tratto lineare individuato dai punti 1 e 2 di coordinate: (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , calcolandone il coefficiente angolare e il termine noto della retta come segue in (Eq. 4-5) e (Eq. 4-6):

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (\text{Eq. 4-5})$$

$$q = y - mx \quad (\text{Eq. 4-6})$$

Il tratto lineare è stato prolungato sull'asse delle ascisse, come mostrato nella Figura 4-16 in modo da determinare il valore di ε_0 secondo la formula in (Eq. 4-7):

$$\varepsilon_0 = \frac{q}{m} \quad (\text{Eq. 4-7})$$

Con ε_u , invece, si è indicata la deformazione ultima. Poiché il procedimento di linearizzazione ed estrapolazione della *Curva corretta* risulta analogo sia per flessione che per compressione, si sintetizza la trattazione riportando di seguito le immagini relative solo al caso della curva di compressione.

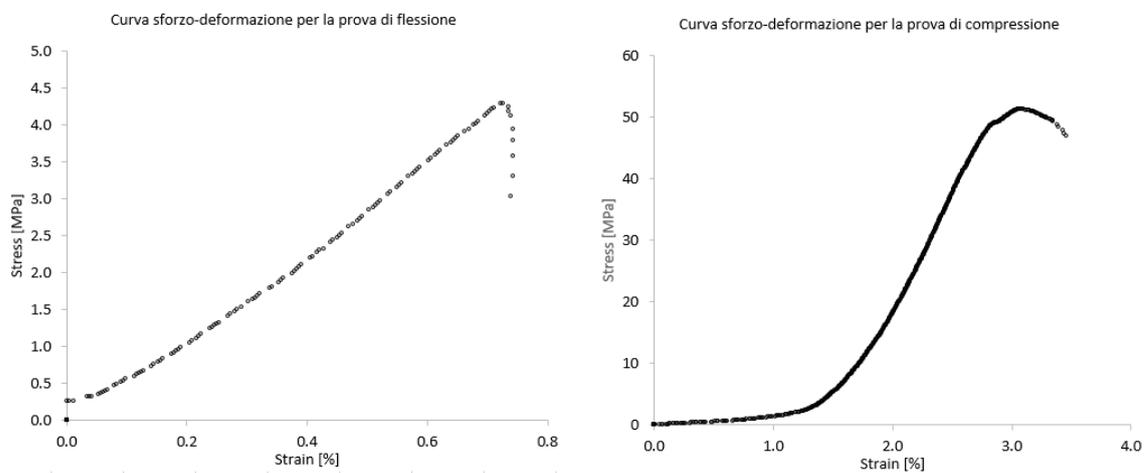


Figura 4-15: Grafici delle curve sforzo-deformazione ottenute come output dalla pressa statica

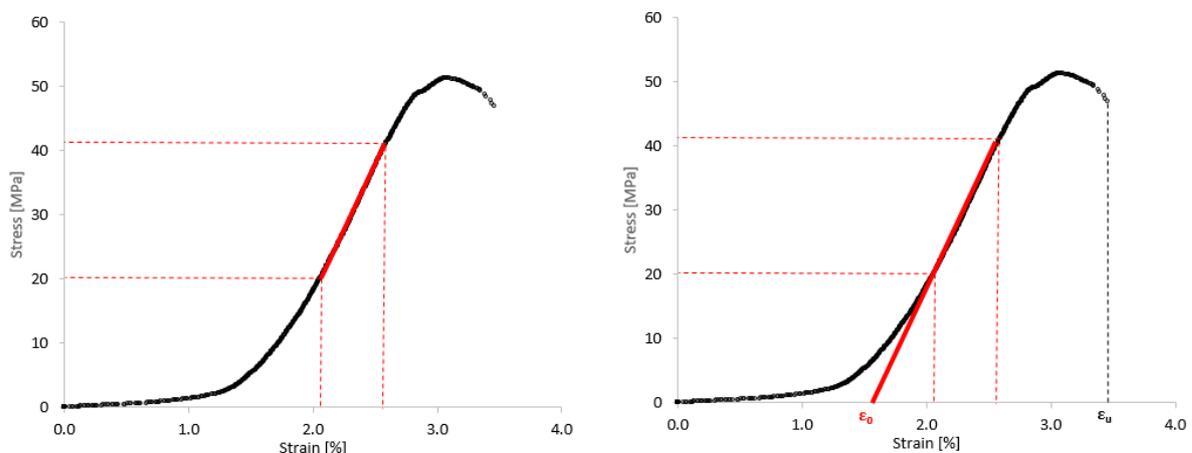


Figura 4-16: Prolungamento del tratto lineare sull'asse x per la determinazione di ε_0

Infine, la *Curva Corretta* è stata ottenuta trasladando verso sinistra la nuova curva, limitata inferiormente dal nuovo tratto lineare, della quantità ϵ_0 in modo da far coincidere il punto iniziale del tratto lineare con l'origine degli assi. In questo modo la deformazione ultima delle *Curve corrette* risulta essere $\epsilon_u - \epsilon_0$.

Una volta determinata la *Curva corretta*, si è passati all'individuazione del valore del modulo tangente, del modulo secante ed infine a quello dell'energia di rottura (Figura 4-17). Il modulo elastico tangente E_{tan} , rappresenta il comportamento elastico a compressione per bassi valori di tensione prossimi allo zero e risulta appunto tangente alla curva σ - ϵ nel punto di origine. Questo è stato individuato come la pendenza iniziale della *Curva corretta* (m). Il modulo elastico secante E_{sec} invece rappresenta il comportamento elastico della miscela nel campo di lavoro ordinario e risulta la pendenza della secante passante per l'origine e per il punto di massima tensione ed è stato determinato come il rapporto tra la tensione massima e la deformazione corretta alla massima tensione appunto ($\epsilon_{\sigma_{max}} - \epsilon_0$).

L'energia di rottura invece è la capacità che ha un materiale di mostrare deformazioni plastiche prima che avvenga la rottura. Essa è l'area sottesa alla *Curva corretta* dall'origine fino al punto di massima tensione (Figura 4-18). In entrambe le prove la *Curva corretta* è stata approssimata con una curva di tendenza polinomiale del sesto ordine e l'energia di rottura è stata ottenuta dall'integrale definito tra "zero e deformazione alla massima tensione" della curva di tendenza.

La curva di tendenza del sesto ordine ha equazione (Eq. 4-8):

$$y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx \quad (\text{Eq. 4-8})$$

Dove a, b, c, d e, f sono i coefficienti della curva approssimata.

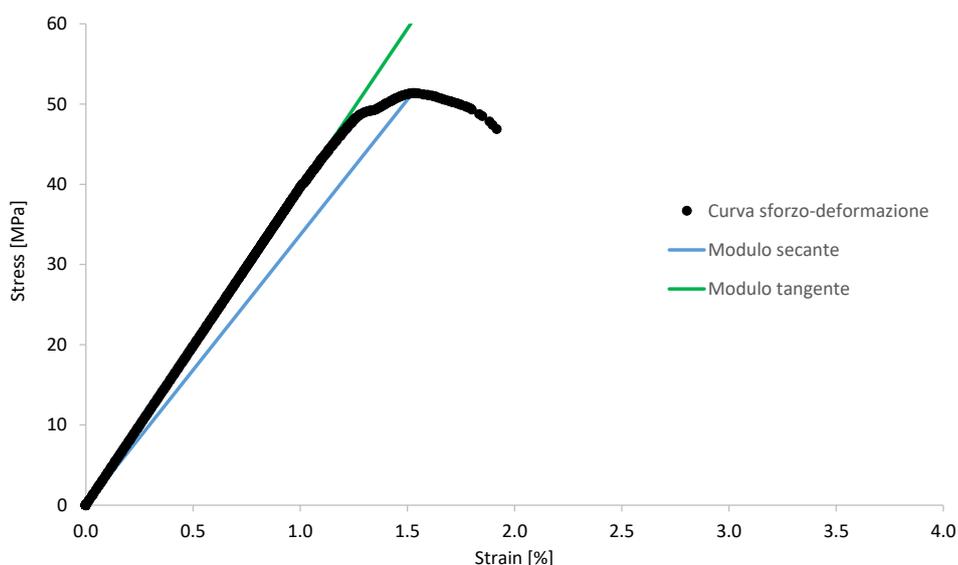


Figura 4-17: Modulo tangente e secante sulla *Curva corretta*

Mentre l'energia di rottura, espressa in (MPa mm/mm), sarà secondo l' (Eq. 4-9) :

$$\int_0^{\varepsilon_{\sigma_{\max}}} y = \frac{a}{7}x^7 + \frac{b}{6}x^6 + \frac{c}{5}x^5 + \frac{d}{4}x^4 + \frac{e}{3}x^3 + \frac{f}{2}x^2 \quad (\text{Eq. 4-9})$$

dove x è la *Deformazione corretta* corrispondente alla tensione massima $\varepsilon_{\sigma_{\max}} - \varepsilon_0$ (Figura 4-18).

L'elaborazione delle *Curve corrette* di sforzo-deformazione risulterà la medesima anche nel caso delle prove meccaniche su conglomerati porosi.

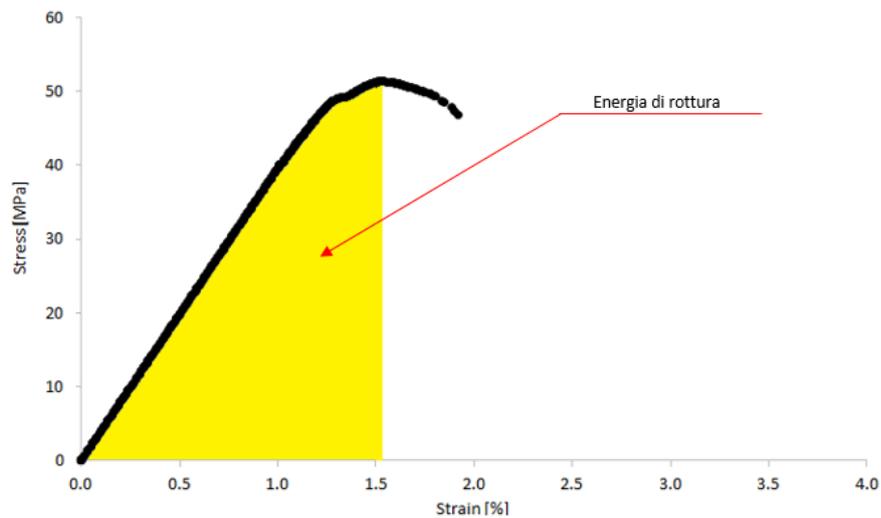


Figura 4-18: Energia di deformazione

4.3 Conglomerati porosi

I conglomerati porosi sono costituiti da miscele di legante, fase liquida (acqua nel caso del cemento, soluzione alcalina nel caso geopolimerico), aggregati fini (sabbia) e grossi (ghiaia) e con l'aggiunta, secondo le necessità, di additivi che ne influenzano le prestazioni e le caratteristiche fisico-chimiche. Generalmente in sito presentano una densità dell'ordine di 1600-2000 kg/m³ con percentuale dei vuoti compresa nell'intervallo del 15-25%, perciò detti *porosi*.

I rapporti fra i costituenti dei conglomerati porosi *cementizi* e *geopolimerici* risultano quindi uguali a quelli già visti nella trattazione dell'*indagine preliminare* basata sullo studio del progetto di miscela e presentati in Tabella 4-13 e Tabella 4-14:

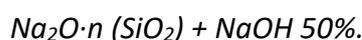
Tabella 4-13: Ricetta conglomerato cementizio poroso

ID Campione	w/c	a/c	flu/c	vis/c	s/a	lat/c	mal/a
CEMI_L	0.32	4.40	0.01	0.005	0.05	0.07	0.37
CEMI	0.35	4.40	0.01	0.005	0.06	0.00	0.37

Tabella 4-14: Ricetta conglomerato poroso alcali-attivato

ID Campione	sol/lop	a/lop	flu/lop	s/a	lat/lop	mal/a
BFS_F_L	0.46	4.20	0.01	0.05	0.07	0.42
BFS_F	0.46	4.20	0.01	0.05	0.00	0.42
BFS_L	0.46	4.20	-	0.05	0.00	0.42
BFS	0.46	4.20	-	0.05	0.00	0.42

Dove la composizione chimica della soluzione alcalina usata per l'attivazione della loppa sarà sempre:



In totale le tipologie di conglomerato studiate sono state 6:

7. BFS_F1_L;
8. BFS_F1;
9. BFS_F2_L;
10. BFS_F2;
11. CEMI_L;
12. CEMI.

dove:

- CEMI indica il cemento Portland;

- *BFS* indica il legante idraulico *Blust Furnace Slag* (Loppa d'altoforno), specificando si tratti di *malte alcali-attivate*;
- *F1* il fluidificante a base di polycarbossilato;
- *F2* il fluidificante a base di lignisolfunato;
- *L* il lattice.

Lo studio dei conglomerati porosi si è sviluppato secondo una caratterizzazione volumetrica, in modo da provare se fossero rispettati i range di densità e contenuto dei vuoti sopracitati, ed una caratterizzazione meccanica per la determinazione della resistenza a compressione e a flessione. Per la prova a compressione sono stati confezionati cilindri di diametro 100 mm e altezza 200 mm, mentre per le prove a flessione su 4 punti travetti di dimensione 100 x 100 x 500 mm. In entrambi i casi le prove sono state effettuate considerando stagionature di 2, 7 e 28 giorni.

4.3.1 Confezionamento dei provini cilindrici

Il confezionamento dei campioni cilindrici ha previsto le fasi di preparazione, miscelazione, confinamento in fustella e stagionatura. Preparazione e miscelazione sono state effettuate manualmente, poiché con una mescolatrice si sarebbe rischiato di rompere l'aggregato calcareo grosso. Sono state determinate proporzioni fra i materiali tali da poter confezionare due campioni cilindrici per ciascun tipo di malta, da poter poi usare per la determinazione delle caratteristiche volumetriche e per la prova a compressione.

Il procedimento ha previsto l'uso di una grossa "ciotola" in acciaio, entro la quale sono stati miscelati legante, liquido, aggregati grossi e fini, e additivi. Dopo aver amalgamato bene i costituenti si è proceduto al confezionamento dei provini, tramite l'uso di fustelle in plastica (Figura 4-19). Queste sono state preventivamente unte con del disarmante (scheda tecnica in Allegati), in modo da facilitare la scasseratura.

Così come per le malte, anche in questo caso, il confezionamento è avvenuto in breve tempo, per evitare l'indurimento del conglomerato. È stato determinato un *Protocollo di confezionamento e costipamento* secondo il quale: il materiale è inserito dentro la fustella tramite l'uso della sessola, creando 4 strati intermedi da costipare con l'aiuto di un tubo in acciaio di diametro 19,7 mm e peso 1327,8 grammi. In particolare per ogni strato si infliggono 20 colpi del suddetto tubo. Infine l'ultimo strato (il quinto) sarà costipato tramite l'uso di un cilindro di diametro 96,0 mm e peso 4483,2 grammi, in modo da simulare il tipico costipamento con rullo che avviene in sito (Paragrafo 1.2.2) (Figura 4-19). La fase di costipamento è molto importante, poiché la superficie del provino dovrà risultare perfettamente piana, in modo da creare poi un contatto uniforme con il "piatto" della pressa statica usata per la prova a compressione. Immediatamente dopo la compattazione è avvenuto il condizionamento di tutti i provini, ancora in fustella, collocando ciascuno di essi in un ambiente (Figura 4-19) e mantenuto in umidità mediante un contenitore d'acqua all'interno, allo stesso modo con cui sono stati maturati i campioni di malte.

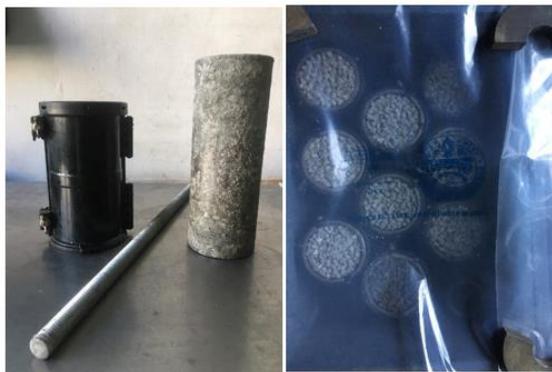


Figura 4-19: A sinistra fustella, tubo e cilindro (mini-rullo) per la compattazione manuale, a destra condizionamento dei cilindri in ambiente umido

Dopo 24 ore dal confezionamento è stata effettuata la scasseratura, avendo cura di non danneggiare i provini. In questa fase infatti alcuni degli aggregati superficiali potrebbero staccarsi dalla superficie non ancora ben indurita. A ciò segue la stagionatura in ambiente umido a temperatura media di 25°C per tempi di 2, 7 e 28 giorni a partire dal giorno di confezionamento.

4.3.2 Confezionamento dei provini prismatici

Il confezionamento dei campioni prismatici ha previsto anch'esso le fasi di preparazione, miscelazione, confinamento in fustella e stagionatura. La miscelazione questa volta è avvenuta a mezzo di una betoniera.

Sono state preparate le quantità dei materiali tali da poter confezionare due travetti di conglomerato per ciascun tipo di malta, da poter poi testare a flessione. Dopo la fase di miscelazione in betoniera, il conglomerato è stato rimosso da essa con l'aiuto di una cazzuola e confezionato determinando anche in questo caso un *Protocollo di confezionamento e costipamento*. Per il confezionamento si sono usati dei casseri prismatici in acciaio di dimensioni 100 x 100 x 500 mm preventivamente unti con il disarmante. Il conglomerato appena miscelato è stato inserito all'interno degli stampi creando 3 strati intermedi, costipati con circa 10 colpi di cazzuola, in modo da uniformare gli strati, come mostra la Figura 4-20. L'ultimo strato (il quarto) è stato costipato invece con il cilindro di diametro 96,0 mm e peso 4483,2 grammi, così come impiegato anche per lo strato superficiale dei campioni cilindrici. Anche in questo caso si è cercato di effettuare questa operazione con molta cura, in modo da creare una superficie piana e regolare (Figura 4-21).



Figura 4-20: Confezionamento provino



Figura 4-21: Costipamento strato superficiale e visualizzazione superfice piana

Così come già visto per gli altri campioni, alla fase di costipamento segue quella di condizionamento di tutti i provini, ancora nei casseri, collocando ciascuno di essi in un ambiente isolato (cassone con un telo di ricoprimento) e mantenuto in umidità mediante un contenitore d'acqua all'interno.

Dopo 24 ore dal confezionamento si è proceduto all'apertura dei casseri, aiutandosi con una chiave inglese per la rimozione dei bulloni alle estremità, evitando sempre la perdita degli aggregati grossi alle pareti. Segue dunque la stagionatura in ambiente umido isolato per tempi di 2, 7 e 28 giorni a partire dal giorno di confezionamento.

4.3.3 Caratterizzazione volumetrica

Come già enunciato, la caratteristica fondamentale del conglomerato poroso è proprio l'elevata porosità. Infatti è la presenza di un notevole numero di pori a permettere la filtrazione dell'acqua. Generalmente pavimentazioni di questo tipo presentano densità di 1600-2000 kg/m³ e una percentuale di vuoti compresa fra il 15 % e il 25%.

È stato ritenuto interessante effettuare una caratterizzazione volumetrica in modo da determinare, per ciascuna tipologia di conglomerato, ovvero per tutte le 6 combinazioni di mix-design analizzate, il valore di densità geometrica e apparente e i rispettivi contenuti dei vuoti.

L'analisi volumetrica si è composta di diversi step. Il primo ha previsto il calcolo della Massima Massa Volumica Teorica (MMVT), tramite prova con picnometri deaerati per conglomerati cementizi e geopolimerici contenenti lattice e non. I picnometri sono recipienti generalmente in vetro e chiusi da un tappo dotato di un capillare, usati per la determinazione della densità di un dato materiale.

Sono state confezionate miscele di conglomerato di circa 3 kg, sottoposte prima al test di consistenza con il guanto di lattice e poi a stagionatura in ambiente asciutto per 7 giorni (Figura 4-22).

Successivamente il materiale è stato pesato e poi inserito nel picnometro di cui è stata preventivamente valutata la tara. All'interno del picnometro è inserita acqua distillata, che successivamente verrà disaerata tramite l'utilizzo di un compressore ad aria (Figura 4-23). Dopo la completa deaerazione dell'acqua, si è proceduto al riempimento dei picnometri fino al menisco di riferimento con acqua disaerata. Infine si è proceduto ad un ulteriore pesatura (Figura 4-23).



Figura 4-22: Prova del guanto e Stagionatura in ambiente asciutto



Figura 4-23: Picnometro in fase di deaerazione e pesatura finale

A questo punto si è in possesso di tutte le quantità utili per la determinazione della densità e della percentuale dei vuoti. Si procede con la valutazione della *densità dell'acqua* ρ_w alla temperatura di prova T (°C) (Eq. 4-10):

$$\rho_w = - \frac{0,00532 \cdot T[^\circ\text{C}]^2 + 0,00759 \cdot T[^\circ\text{C}] + 1000,25205}{1000} \quad (\text{Eq. 4-10})$$

e della *massa volumica apparente del conglomerato* ρ_{mw} :

$$\rho_{mw} = \rho_w \cdot \frac{M_{P+M} - M_P}{V_p - (M_{P+M+H_2O} - M_P)} \quad (\text{Eq. 4-11})$$

In (Eq. 4-11):

- V_p corrisponde al volume del picnometro pieno d'acqua alla data temperatura di prova;
- M_P è la tara della combinazione picnometro + tappo;
- M_{P+M} indica la massa del picnometro con il materiale;
- M_{P+M+H_2O} è la massa finale del picnometro contenente interamente acqua demineralizzata e conglomerato.

Ottenuta così la massa volumica apparente del conglomerato, si procede con il calcolo della percentuale geometrica dei vuoti per ciascun campione cilindrico di diametro 100 mm e altezza 200 mm, maturato a 2, a 7 e a 28 giorni (2 campioni x 6 miscele differenti x 3 periodi di curing = 36 campioni) (Paragrafo 4.3.1). Indicando con V il volume del campione e M_D la massa del campione secco, la densità risulterà banalmente (Eq. 4-12):

$$MV_{geom} = \frac{M_D}{V} \quad (\text{Eq. 4-12})$$

Mentre la percentuale geometrica dei vuoti sarà espressa dall'(Eq. 4-13) :

$$\%v_{geom} = 1 - \frac{MV_{geom}}{\rho_{mw}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 4-13})$$

Trattandosi di conglomerato poroso per la determinazione della percentuale reale invece si dovrà ricorrere ad un'altra prova. Mentre nella caratterizzazione di pavimentazioni dense si procede direttamente alla fase della *Pesatura in acqua* dei campioni, in modo da determinare la *Massa volumica reale*, nel caso di conglomerati porosi questo non è possibile a causa dell'elevatissima permeabilità. In questo caso per determinare il volume del campione privato dei vuoti superficiali si ricorre al *Metodo Corelok*. Tramite quest'ultimo sono stati rimossi i vuoti superficiali tramite la tecnica del sottovuoto. Nello specifico ciascun sacchetto contenente il campione, una volta subito il sottovuoto, aderisce perfettamente al campione, rimarcando quindi la macrotesitura superficiale. In questo modo, il campione risulterà sigillato e non più

permeabile, rendendo possibile la pesata in acqua. Ciascuno dei 24 campioni (sono stati testati solo quelli a 7 e 28 giorni di curig) è stato pesato ed inserito all'interno di un apposito sacchetto, precedentemente pesato. Successivamente il sistema *campione + sacchetto* è stato inserito all'interno dell'*apparecchiatura Corelok*, in modo da far poggiare il campione su un cuscinetto e i bordi del sacchetto in prossimità della piastra di chiusura della macchina (Figura 4-24). Azionando la prova, l'area verrà eliminata in pochi minuti. Adesso, dopo aver nuovamente pesato il *campione + sacchetto* (post sottovuoto), si potrà procedere alla fase delle *Pesate in acqua* così come accade convenzionalmente per i materiali stradali densi ed impermeabili. Se il peso inizia ad oscillare velocemente occorre stoppare subito la prova poiché è indice della rottura del sacchetto e di conseguenza del *fallimento* della prova.

Dopo la determinazione di tutti i pesi in acqua si è calcolata la densità apparente secondo la formula in (Eq. 4-14):

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{(m_2 - m_3/\rho_{wm}) - (m_2 - m_1/\rho_{sm})} \quad (\text{Eq. 4-14})$$

dove:

- ρ_{bsea} è la massa volumica apparente sigillata, in kg/m^3 ;
- m_1 è la massa del provino asciutto in grammi;
- m_2 è la massa del provino sigillato asciutto espressa in grammi;
- m_3 è la massa del provino sigillato in acqua, in grammi;
- ρ_{wm} è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova, in $0,1 \text{ kg/m}^3$;
- ρ_{sm} è la massa volumica del materiale sigillante alla temperatura di prova, in kg/m^3 con l'approssimazione di 10 kg/m^3 .

E la percentuale dei vuoti (Eq. 4-15) reale pari a:

$$\%v_{reale} = \frac{\rho_{mw} - \rho_{bsea}}{\rho_{bsea}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 4-15})$$

Nel Paragrafo 5.2.1 si riporterà la tabella dei valori di densità e di percentuale dei vuoti ottenuti per questa indagine.

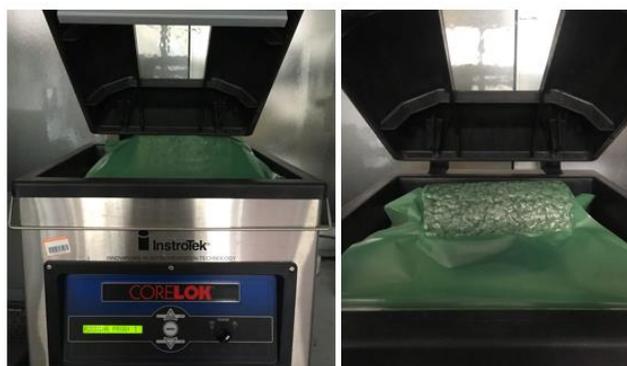


Figura 4-24: Posizionamento campione dentro l'apparecchiatura Corelok e Campione dopo deaerazione

4.3.4 Prova di compressione sui conglomerati porosi

La prova di compressione per i conglomerati porosi è stata effettuata sui campioni cilindrici di diametro 100 mm e altezza 200 mm. In questo caso è stata impiegata una macchina di prova (Zwick Roell) dotata di una cella di carico da 500 kN e composta da una traversa mobile superiore, connessa ad una cella di carico ed una traversa inferiore fissa (Figura 4-25).

Ciascun provino cilindrico, dopo essere stato pesato per determinarne la densità, è stato posto sotto il piatto della pressa, come mostrato in Figura 4-25.

Il carico viene applicato dalla traversa superiore e misurato tramite la cella di carico montata su di essa, che converte la forza fisica in un segnale elettrico. La deformazione viene letta tramite un trasduttore di deformazione connesso alla traversa mobile. La rottura è di tipo fragile e avviene lungo un piano di rottura inclinato a 45 gradi (Figura 4-25).

I dati output vengono trasferiti ad un terminale dal quale si possono controllare i parametri di prova e registrare i dati con il software *TestXpert II*. Questo restituisce i risultati della prova in termini di deformazione in percentuale e forza in N registrati con una frequenza di 10 Hz (0,1 secondo). In particolare l'output fornisce i seguenti dati utili:

- curva Forza(N)- Deformazione (%) e i corrispondenti valori;
- F_{\max} (N);
- σ_{\max} (MPa);
- spostamento a F_{\max} (mm);

La resistenza massima in MPa risulterà calcolata come in (Eq. 4-16):

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \cdot D^2 / 4} \quad (\text{Eq. 4-16})$$

con F forza convertita in kN e D diametro del provino in mm. La velocità di prova è stata impostata a 0,50 mm/min ed il precarico a 500 N. Dai dati di output sono state ottenute curve sforzo-deformazione, trattate come per i provini di malta. Si rimanda dunque al Paragrafo 4.2.3.



Figura 4-25: a. apparecchiatura Zwick Roell, b. corretta posizione di prova del provino e c. campione cilindrico rotto a compressione

4.3.5 Prova di flessione su 4 punti sui conglomerati porosi

La prova di flessione su 4 punti invece si è effettuata sui travetti in conglomerato poroso di 100 x 100 x 500 mm. In questo caso è adoperata la pressa statica Tecnotest, già vista per la prova di trazione indiretta e per la caratterizzazione meccanica delle malte. Adesso però è stato montato un altro kit completamente diverso dai precedenti, costituito appunto da 2 appoggi e da 2 penetratori. Il campione è stato collocato nella macchina di prova in modo da poggiare sui supporti le facce parallele alla superficie di getto e con asse longitudinale perpendicolare ai supporti. Il carico è stato applicato (a mezzo della cella di carico) verticalmente sulla faccia laterale opposta del prisma e trasmesso al campione dai due penetratori (Figura 4-26).

La prova è stata eseguita in *controllo di spostamento*, con una velocità costante di 0,25 mm/min e con un valore di prearico pari a 50 N. La rottura dei provini è avvenuta in prossimità della mezzeria producendo due monconi (Figura 4-27).

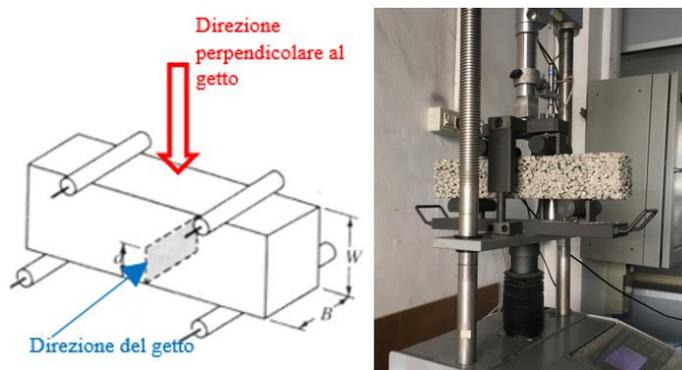


Figura 4-26: Schema posizionamento provino sui supporti di flessione del test di flessione su 4 punti

Il software restituisce i risultati della prova in termini di spostamento (mm) e forza (kN) registrati con una frequenza di 0,2 secondi (5 Hz).

La resistenza a trazione per flessione, espressa in MPa, è stata calcolata secondo l'(Eq. 4-17):

$$\sigma = \frac{3 FL}{4 bd^2} \cdot 1000 \quad (\text{Eq. 4-17})$$

con:

- b è la larghezza del provino, pari a 100 mm;
- d è lo spessore del provino, pari a 100 mm,
- L è la distanza tra gli appoggi inferiori in mm, fissa e pari a 300 mm;
- F è la forza applicata in kN.



Figura 4-27: Monconi prodotti dalla rottura a flessione del travetto

5 Risultati

Nel presente capitolo sono riportati i risultati ottenuti dalle prove volumetriche e meccaniche eseguite sia sui campioni in malta alcali-attivata che su quelli in conglomerato cementizio e a base di loppa.

5.1 Prove su malte

Le prove effettuate sui campioni prismatici di malta sono state di caratterizzazione meccanica e in particolare sono state la prova di flessione su 3 punti e quella a compressione eseguita sui vari monconi ottenuti a seguito alla rottura di ogni singolo campione a flessione.

5.1.1 Prova di flessione su 3 punti

Di seguito si esporranno i risultati delle prove a flessione per ciascun tipo di malta e divise per tempo di stagionatura, sotto forma di curve sforzo-deformazione, elaborate come già spiegato al paragrafo 4.2.3. Da queste risulta evidente come campioni stagionati per un numero maggiore di giorni presentino un andamento più ripido, a conferma dell'indurimento e infragilimento del materiale. Altra osservazione interessante risulta in relazione all'aggiunta del lattice, quest'ultimo permette il raggiungimento di valori più elevati in termini di deformazioni (Tabella 5-1, Tabella 5-2 e Tabella 5-3).

Tabella 5-1: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di flessione su campioni prismatici di BFS, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura

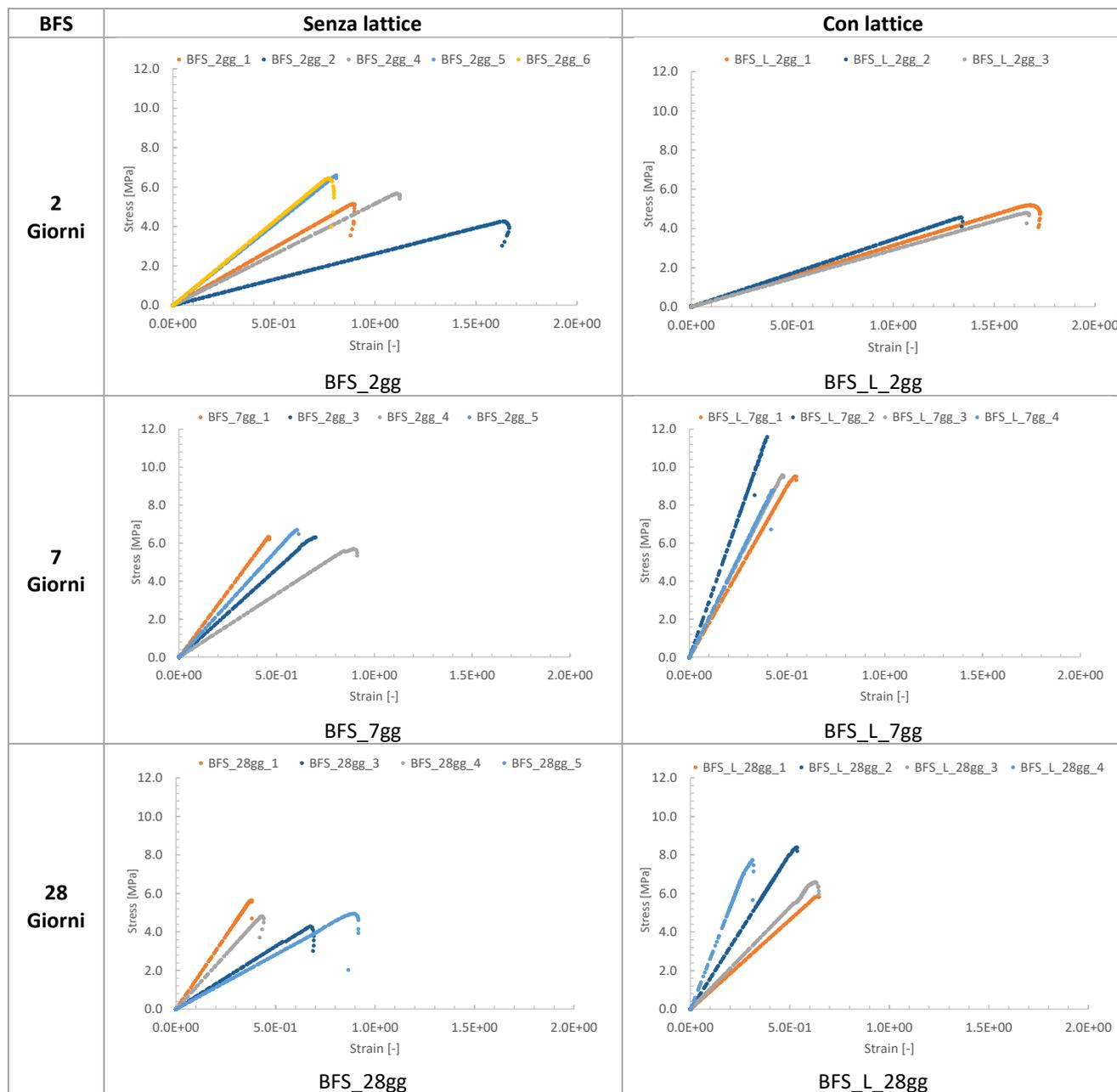


Tabella 5-2: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di flessione su campioni prismatici di BFS_F1, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura

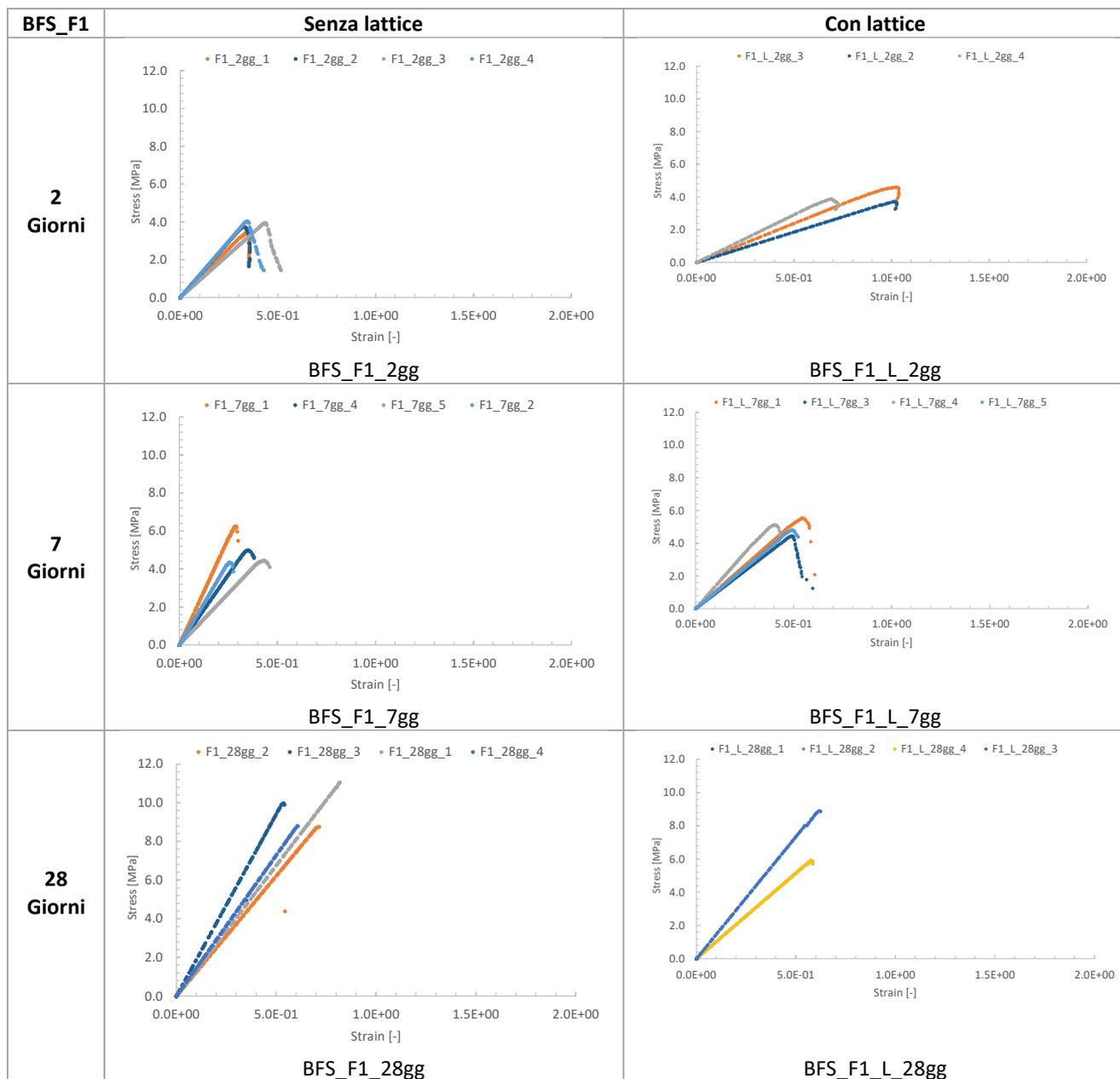
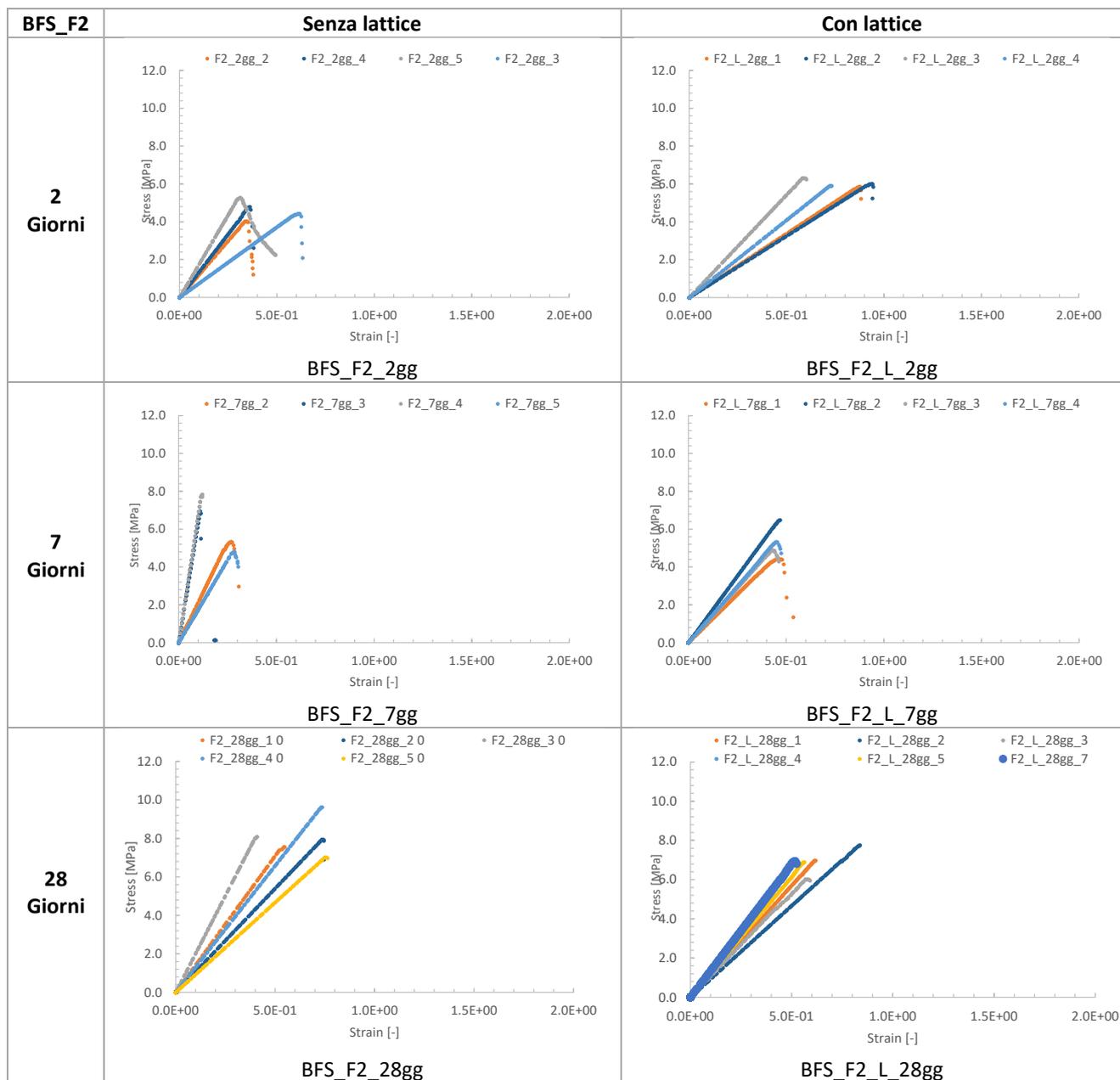


Tabella 5-3: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di flessione su campioni prismatici di BFS_F2, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura



I risultati ottenuti dalle prove a flessione sui provini di ciascuna delle sei miscele studiate, saranno riportati nelle Tabella 5-4, Tabella 5-5 e Tabella 5-6, raggruppati per tempi di stagionatura, valutandoli in termini di media, scarto quadratico medio e coefficiente di variazione dei parametri misurati sui campioni appartenente alla stessa tipologia di malta.

Le grandezze che si riportano per ciascuna tipologia di miscela sono la densità geometrica, la resistenza massima a flessione σ_{max} , la deformazione corrispondente alla massima forza registrata a flessione, il modulo secante E_{sec} , il modulo tangente E_{tan} e l'energia di rottura (o energia di rottura).

Lo scarto quadratico medio (o deviazione standard) è un indice di dispersione statistico, vale a dire una stima della variabilità di una popolazione su N unità statistiche o di una variabile casuale e viene calcolato come segue (Eq. 5-1):

$$S. Q. M. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (Eq. 5-1)$$

Dove $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ è la media aritmetica di X.

Il coefficiente di variazione (o deviazione standard relativa) indicato con CV, è un indice di dispersione che permette di confrontare misure di fenomeni riferite a unità di misura differenti, in quanto si tratta di un numero adimensionale. E' un indice della precisione di una misura. Viene definito per un dato campione, come il rapporto tra la sua deviazione standard (σ) e il valore assoluto della sua media aritmetica (\bar{x}) (Eq. 5-2):

$$CV = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \quad (Eq. 5-2)$$

Nelle seguenti tabelle è interessante considerare le densità. Queste risultano più basse per campioni prismatici contenenti lattice, a conferma di quanto asserito da Wang (2010) in relazione alla diminuzione della densità dei campioni di malte proporzionalmente all'aggiunta del lattice.

Tabella 5-4: Risultati prove di flessione su provini di malta stagionati 2 giorni

Risultati prove a flessione									
Curing	ID MALTA	Numero campioni		Densità (kg/m ³)	σ_{max} (MPa)	$\epsilon(F_{max})$ (-)	E_{sec} (MPa)	E_{tan} (MPa)	Energia di rottura T (kPa*mm/mm)
2 giorni	BFS_2gg	5	MEDIA	2144	5.6	0.022	601	606	28.27
			S.Q.M.	36.143	0.864	0.002	213.141	215.207	0.004
			CV (%)	1.69	15.35	8.79	35.45	35.53	15.48
	BFS_L_2gg	3	MEDIA	2005	4.9	0.022	314.04	316	38.16
			S.Q.M.	28.248	0.260	0.001	21.755	21.550	0.006
			CV (%)	1.41	5.37	5.77	6.93	6.82	14.99
	BFS_L_F1_2gg	3	MEDIA	1960	4.1	0.010	459	478	19.28
			S.Q.M.	9.927	0.387	0.001	79.916	86.411	0.005
			CV (%)	0.51	9.53	10.82	17.41	18.08	23.86
	BFS_F2_2gg	4	MEDIA	2046	4.6	0.005	1236	1258	9.50
			S.Q.M.	69.076	0.456	0.001	346.128	358.151	0.003
			CV (%)	3.38	9.84	27.45	28.00	28.47	28.13
	BFS_L_F2_2gg	4	MEDIA	2041	6.0	0.018	803	808	23.60
			S.Q.M.	12.855	0.178	0.004	174.588	172.922	0.004
			CV (%)	0.63	2.96	24.24	21.75	21.41	16.72
	BFS_F1_2gg	4	MEDIA	2112	3.8	0.006	1064	1088	6.99
			S.Q.M.	14.486	0.223	0.002	113.925	115.301	0.001
			CV (%)	0.69	5.87	29.33	10.71	10.60	15.61

Tabella 5-5: Risultati prove di flessione su provini di malta stagionati 7 giorni

Risultati prove a flessione									
Curing	ID MALTA	Numero campioni		Densità (kg/m ³)	σ_{max} (MPa)	$\epsilon(F_{max})$ (-)	E_{sec} (MPa)	E_{tan} (MPa)	Energia di rottura T (kPa*mm/mm)
7 giorni	BFS_7gg	4	MEDIA	2149	6.3	0.020	1009	1028	21.45
			S.Q.M.	32.576	0.358	0.001	272.729	264.553	0.004
			CV (%)	1.52	5.72	4.89	27.03	25.72	16.66
	BFS_L_7gg	4	MEDIA	2035	9.9	0.020	2191	2214	22.77
			S.Q.M.	17.308	1.046	0.004	435.496	429.379	0.002
			CV (%)	0.85	10.59	18.58	19.88	19.40	10.70
	BFS_F1_7gg	4	MEDIA	2143	5.0	0.005	1588	1638	8.41
			S.Q.M.	56.407	0.796	0.000	307.484	317.659	0.002
			CV (%)	2.63	15.93	8.48	19.37	19.39	20.25
	BFS_L_F1_7gg	4	MEDIA	2017	5.0	0.010	1046	1082	12.33
			S.Q.M.	22.073	0.405	0.002	140.226	168.314	0.002
			CV (%)	1.09	8.14	18.50	13.40	15.56	15.60
	BFS_F2_7gg	4	MEDIA	2093	6.2	0.004	4111	4260	5.90
			S.Q.M.	41.351	1.222	0.000	2274.959	2327.841	0.002
			CV (%)	1.98	19.64	8.15	55.34	54.64	25.82
	BFS_L_F2_7gg	4	MEDIA	1891	5.3	0.008	1167	1193	12.24
			S.Q.M.	4.610	0.755	0.001	145.470	138.363	0.002
			CV (%)	0.24	14.29	11.18	12.47	11.60	15.65

Tabella 5-6: Risultati prove di flessione su provini di malta stagionati 28 giorni

Risultati prove a flessione									
Curing	ID MALTA	Numero campioni		Densità (kg/m ³)	σ_{max} (MPa)	$\epsilon(F_{max})$ (-)	E_{sec} (MPa)	E_{tan} (MPa)	Energia di rottura T (kPa*mm/mm)
28 giorni	BFS_28gg	4	MEDIA	2189	4.8	0.009	952	967	14.70
			S.Q.M.	26.473	0.562	0.002	380.704	384.417	0.005
			CV (%)	1.21	11.71	17.74	39.98	39.75	31.80
	BFS_L_28gg	4	MEDIA	2059	7.1	0.012	1513	1565	18.87
			S.Q.M.	36.362	0.983	0.005	622.827	679.911	0.004
			CV (%)	1.77	13.76	40.23	41.17	43.45	20.96
	BFS_F1_28gg	4	MEDIA	2097	9.6	0.014	1470	1484	32.70
			S.Q.M.	38.388	0.949	0.001	236.948	242.978	0.007
			CV (%)	1.83	9.84	4.72	16.11	16.37	22.70
	BFS_L_F1_28gg	3	MEDIA	2037	7.2	0.012	1320	1341	19.94
			S.Q.M.	27.183	1.269	0.002	209.526	219.882	0.005
			CV (%)	1.33	17.72	14.65	15.87	16.40	27.20
	BFS_F2_28gg	5	MEDIA	2076	8.0	0.011	1337	1353	25.68
			S.Q.M.	54.953	0.872	0.001	360.138	371.221	0.006
			CV (%)	2.65	10.84	10.75	26.93	27.44	25.06
	BFS_L_F2_28gg	5	MEDIA	1933	6.9	0.011	1139	1147	21.82
			S.Q.M.	57.021	0.550	0.002	145.271	140.809	0.006
			CV (%)	2.95	7.96	17.92	12.76	12.27	25.75

5.1.2 Prova di compressione

In questo paragrafo si riportano i risultati delle prove a compressione in termini di curve sforzo-deformazione, elaborate anch'esse come spiegato al paragrafo 4.2.3. Così come osservato per le curve ottenute nel caso della prova a flessione su 3 punti, anche nel caso della prova di compressione risulta evidente come campioni stagionati per un numero maggiore di giorni presentino un andamento più ripido e come l'aggiunta del lattice permetta il raggiungimento di valori più elevati in termini di deformazioni (Tabella 5-7, Tabella 5-8 e Tabella 5-9).

Tabella 5-7: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni prismatici di BFS, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura

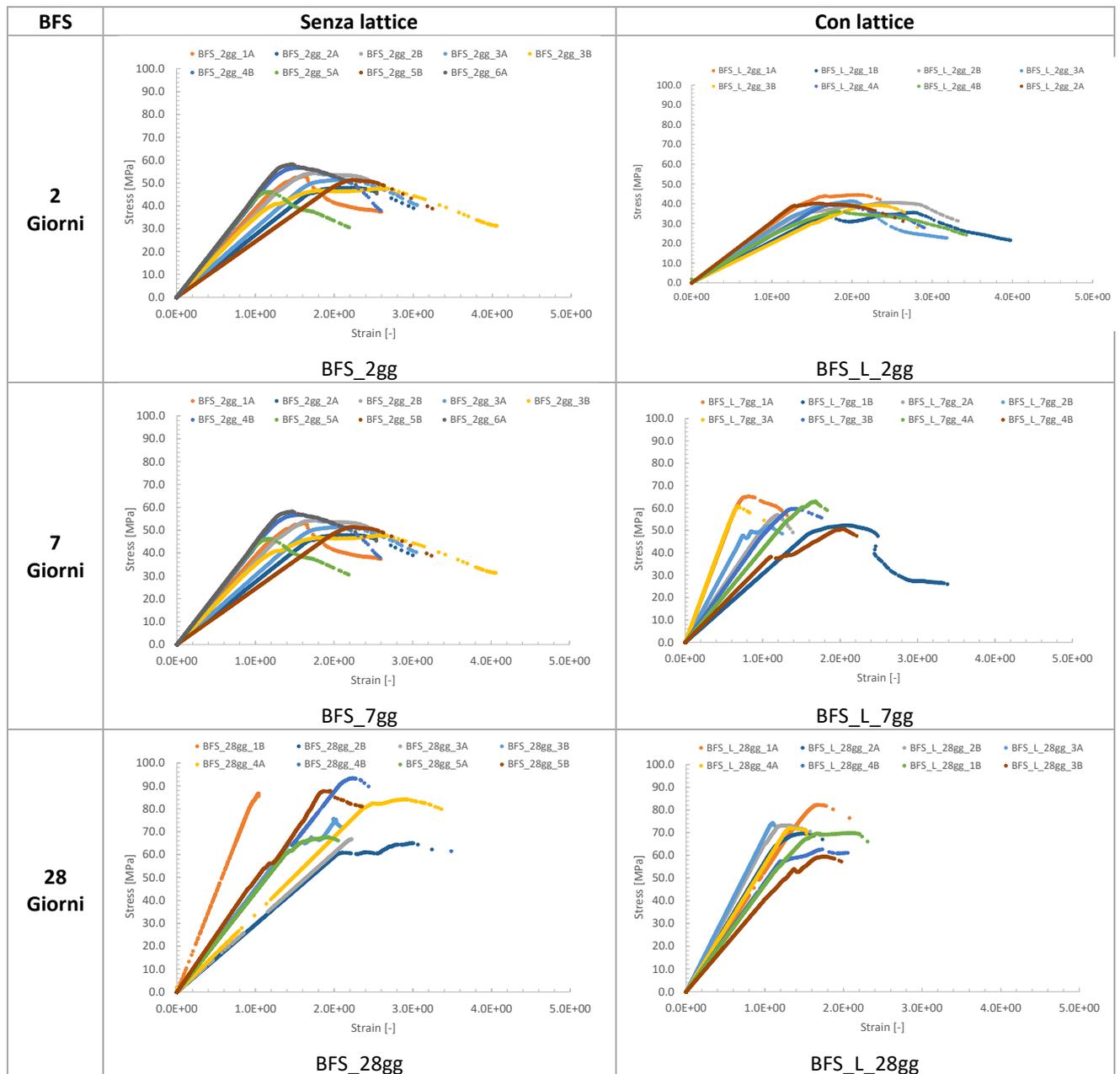


Tabella 5-8: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni prismatici di BFS_F1, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura

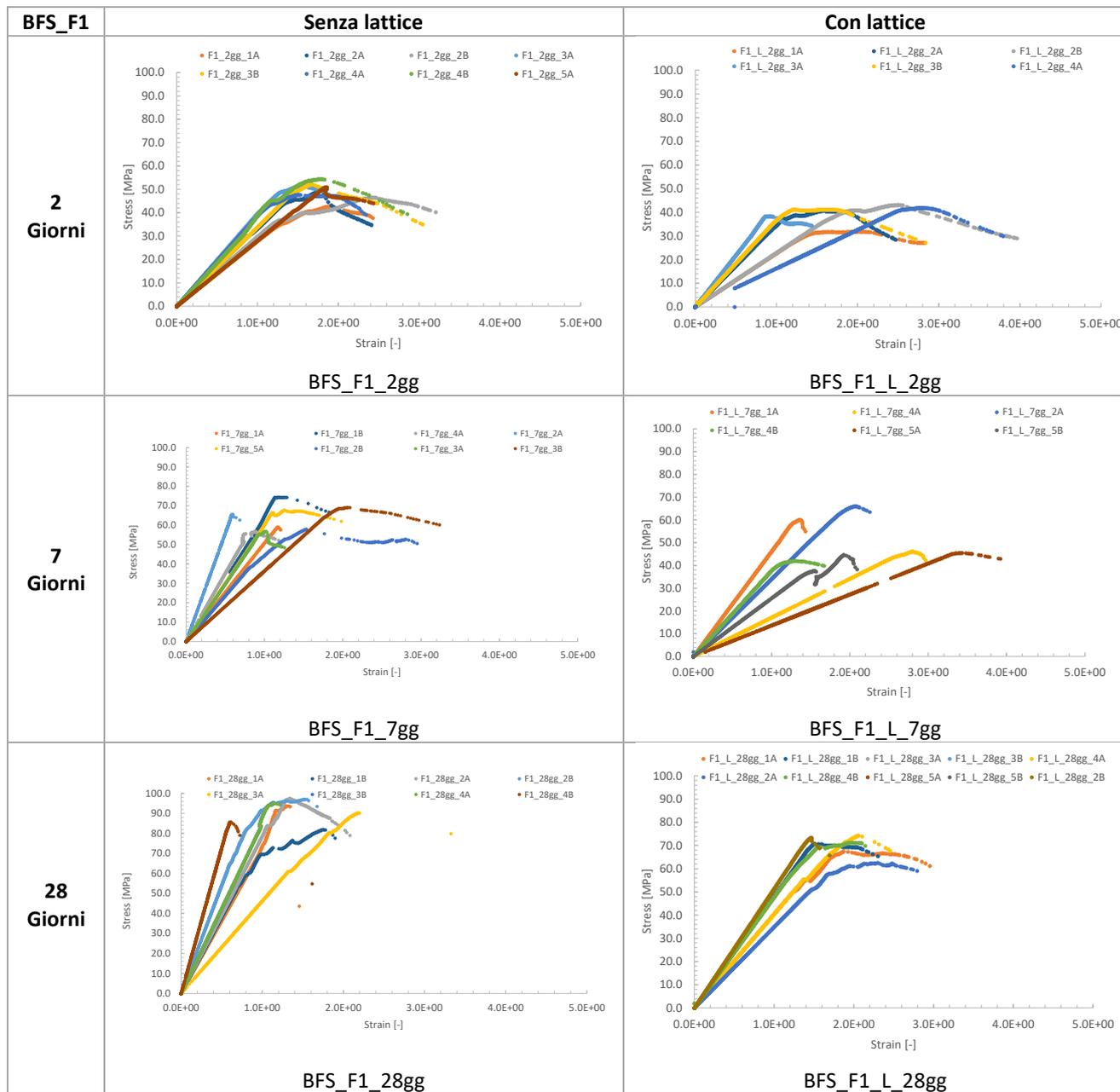
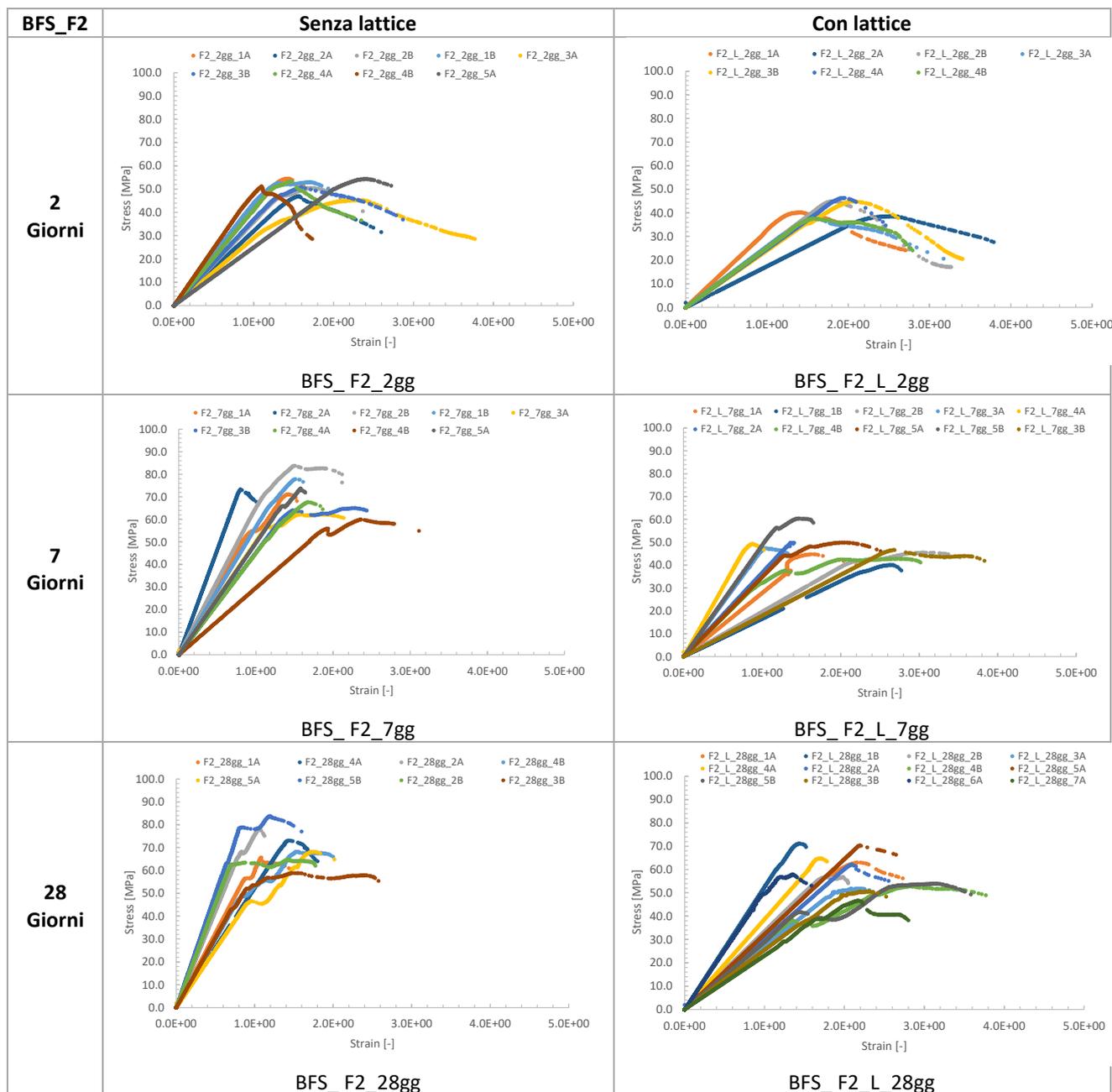


Tabella 5-9: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni prismatici di BFS_F2, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura



Si riportano inoltre i risultati per ciascun tipo di malta e per ogni tempo di stagionatura in termini di media aritmetica, scarto quadratico medio e coefficiente di variazione dei parametri misurati sui campioni appartenente alla stessa tipologia di malta.

Le grandezze che si riportano per ciascuna tipologia di miscela sono la densità geometrica, la resistenza a compressione σ_{max} , la deformazione corrispondete alla massima forza registrata a compressione, il modulo secante E_{sec} , il modulo tangente E_{tan} e l'energia di rottura (o tenacità T).

Anche in questo caso il valore di coefficiente di variazione ritenuto rappresentativo nell'analisi dei dati è stato principalmente quello relativo alla resistenza ultima, poiché alti valori di dispersione per i valori dei moduli elastici e di energia di rottura potrebbero essere ricondotti alla linearizzazione apportata per le singole curve sforzo-deformazione, come spiegato alla Sezione 4.2.3. Per questo motivo si è cercato di eliminare dalla popolazione i campioni per i quali fossero stati registrati ed elaborati dati troppo diversi da quelli della stessa tipologia di malta di appartenenza. In particolare si è cercato di mantenere il coefficiente di variazione minore al valore del 20%.

I valori ottenuti per le prove a compressione saranno riportati in Tabella 5-10, Tabella 5-11 e Tabella 5-12 raggruppati per tipologia di malta e per tempi di stagionatura.

Tabella 5-10: Risultati prove di compressione su provini di malta stagionati 2 giorni

Risultati prove a compressione								
Curing	ID MALTA	Numero campioni		σ_{max} (MPa)	$\epsilon(F_{max})$ (-)	E_{sec} (MPa)	E_{tan} (MPa)	Energia di rottura T (kPa*mm/mm)
2 giorni	BFS_2gg	9	MEDIA	51.9	0.034	2975	3596	558.50
			S.Q.M.	3.925	0.005	740.285	686.733	0.152
			CV (%)	7.57	15.46	24.88	19.09	27.25
	BFS_L_2gg	9	MEDIA	39.6	0.044	1936	2550	499.80
			S.Q.M.	2.660	0.010	355.563	357.187	0.105
			CV (%)	6.71	22.85	18.36	14.01	20.94
	BFS_F1_2gg	8	MEDIA	49.4	0.031	2799	3364	512.61
			S.Q.M.	3.446	0.006	462.224	438.088	0.143
			CV (%)	6.98	18.94	16.51	13.02	27.90
	BFS_L_F1_2gg	6	MEDIA	39.5	0.022	2494	2951	423.62
			S.Q.M.	3.72	0.01	1000.41	955.77	0.18
			CV (%)	9.42	27.79	40.12	32.38	41.70
	BFS_F2_2gg	9	MEDIA	51.0	0.026	3168	3723	477.36
			S.Q.M.	3.010	0.004	758.556	725.088	0.128
			CV (%)	5.90	15.09	23.94	19.47	26.82
	BFS_L_F2_2gg	7	MEDIA	41.5	0.037	2302	2504	414.59
			S.Q.M.	3.501	0.012	370.535	403.812	0.088
			CV (%)	8.44	31.49	16.09	16.13	21.25

Tabella 5-11: Risultati prove di compressione su provini di malta stagionati 7 giorni

Risultati prove a compressione								
Curing	ID MALTA	Numero campioni		σ_{max} (MPa)	$\epsilon(F_{max})$ (-)	E_{sec} (MPa)	E_{tan} (MPa)	Energia di rottura T (kPa*mm/mm)
7 giorni	BFS_7gg	8	MEDIA	67.4	0.040	3421	3931	815.66
			S.Q.M.	4.409	0.007	1412.907	1595.517	0.262
			CV (%)	6.55	17.46	41.30	40.59	32.12
	BFS_L_7gg	8	MEDIA	57.6	0.029	4943	5717	439.57
			S.Q.M.	5.122	0.013	2224.901	2308.463	0.149
			CV (%)	8.90	44.64	45.01	40.38	33.95
	BFS_F1_7gg	8	MEDIA	63.4	0.024	5865	6236	368.03
			S.Q.M.	6.293	0.005	2203.032	2105.798	0.195
			CV (%)	9.93	22.63	37.56	33.77	52.96
	BFS_L_F1_7gg	7	MEDIA	51.1	0.034	2596	2993	643.88
			S.Q.M.	8.360	0.003	991.139	1081.200	0.255
			CV (%)	16.36	7.96	38.18	36.12	39.58
	BFS_F2_7gg	9	MEDIA	70.5	0.027	4783	5520	648.97
			S.Q.M.	7.185	0.005	1827.345	1668.364	0.183
			CV (%)	10.19	18.86	38.20	30.23	28.24
	BFS_L_F2_7gg	10	MEDIA	47.7	0.034	2953	3440	519.27
			S.Q.M.	5.207	0.005	1394.161	1382.231	0.209
			CV (%)	10.93	13.36	47.22	40.19	40.24

Tabella 5-12: Risultati prove di compressione su provini di malta stagionati 28 giorni

Risultati prove a compressione								
Curing	ID MALTA	Numero campioni		σ_{max} (MPa)	$\epsilon(F_{max})$ (-)	E_{sec} (MPa)	E_{tan} (MPa)	Energia di rottura T (kPa*mm/mm)
28 giorni	BFS_28gg	8	MEDIA	78.4	0.033	4053	4553	897.85
			S.Q.M.	10.4	0.006	1771.8	1733.8	0.246
			CV (%)	13.22	18.03	43.71	38.08	27.44
	BFS_L_28gg	8	MEDIA	70.4	0.028	4717	5449	624.18
			S.Q.M.	6.6	0.005	1128.9	881.4	0.151
			CV (%)	9.34	18.23	23.94	16.18	24.20
	BFS_F1_28gg	7	MEDIA	91.5	0.026	7419	8720	667.84
			S.Q.M.	5.5	0.006	3061.9	2897.2	0.328
			CV (%)	5.99	23.30	41.27	33.22	49.05
	BFS_L_F1_28gg	6	MEDIA	70.0	0.029	3874	4379	719.81
			S.Q.M.	4.0	0.006	758.5	562.9	0.132
			CV (%)	5.68	20.46	19.58	12.85	18.35
	BFS_F2_28gg	8	MEDIA	70.1	0.026	5320	7048	578.90
			S.Q.M.	7.4	0.004	1273.8	1730.0	0.124
			CV (%)	10.59	16.90	23.95	24.54	21.42
	BFS_L_F2_28gg	12	MEDIA	58.5	0.032	2948	3370	658.47
			S.Q.M.	7.5	0.004	946.9	888.8	0.185
			CV (%)	12.86	13.55	32.12	26.37	28.09

5.2 Prove su conglomerati

Le prove di caratterizzazione sui conglomerati sono state di due tipi, determinazione delle caratteristiche:

- volumetriche (percentuale geometrica e reale dei vuoti);
- meccaniche (resistenza a flessione e a compressione).

5.2.1 Caratterizzazione volumetrica

Per la determinazione della Massima Massa Volumica Teorica (MMVT), della densità geometrica e della percentuale geometrica dei vuoti sono state testate miscele contenenti sia loppa che cemento, in tutte le combinazioni di mix-design e per tutti i tempi di stagionatura, per un totale di 36 valori.

Per quanto concerne invece la densità apparente e la percentuale dei vuoti reali, si sono testati solo i conglomerati stagionati a 7 e 28 giorni, poiché in caso di fallimento della procedura di *Pesatura dei campioni in acqua*, i cilindri da testare a 2 giorni non avrebbero avuto il tempo di asciugare completamente, con il pericolo di falsare la prova di compressione.

Dai risultati ottenuti e riportati nelle Tabella 5-13, Tabella 5-14 e Tabella 5-15 è possibile vedere come si rispettino perfettamente i valori standard di densità riportati in letteratura, secondo i quali, per conglomerati porosi di questo tipo la densità debba attestarsi tra i valori di 1600 e 2000 kg/m³, mentre per quanto riguarda la percentuale dei vuoti reale questa non risulta sempre rispettata. Infatti i dati riportati in letteratura prevedono che la percentuale massima dei vuoti sia del 25%, mentre in laboratorio si sono registrate percentuali anche superiori al 35%.

Tabella 5-13: Determinazione % vuoti geometrica per miscele indurite 2 giorni

Curing	ID CAMPIONE		MV _{geom}	ρ_{mw}	%v _{geom}
			kg/m ³	kg/m ³	(%)
2 giorni	BFS_L_F1	A	1941	2850	31.911
		B	1944	2850	31.797
	BFS_L_F2	A	1946	2850	31.734
		B	1925	2850	32.462
	BFS_F1	A	1855	2850	34.904
		B	1870	2850	34.388
	BFS_F2	A	1851	2850	35.038
		B	1897	2850	33.423
	CEM I_L	A	1976	2890	31.633
		B	2032	2890	29.672
	CEM I	A	1820	2890	37.021
		B	1938	2890	32.952

Tabella 5-14: Caratterizzazione volumetrica delle miscele stagionate 7 giorni

Curing	ID CAMPIONE		MV _{geom}	ρ_{mw}	%v _{geom}	ρ_{bsea}	%v _{reale}
			kg/m ³	kg/m ³	(%)	kg/m ³	(%)
7 giorni	BFS_L_F1	A	2039	2850	28.5	2106	26.1
		B	2040	2850	28.4	2023	29.0
	BFS_L_F2	A	2022	2850	29.1	2100	26.3
		B	2036	2850	28.6	2115	25.8
	BFS_F1	A	2019	2850	29.2	1990	30.2
		B	1978	2850	30.6	2124	25.5
	BFS_F2	A	1954	2850	31.4	1895	33.5
		B	1932	2850	32.2	2017	29.2
	CEM I_L	A	2031	2890	29.7	2051	29.0
		B	2026	2890	29.9	2092	27.6
	CEM I	A	1940	2890	32.9	2035	29.6
		B	1968	2890	31.9	2039	29.4

Tabella 5-15: Caratterizzazione volumetrica delle miscele stagionate 28 giorni

Curing	ID CAMPIONE		MV _{geom}	ρ_{mw}	%v _{geom}	ρ_{bsea}	%v _{reale}
			kg/m ³	kg/m ³	(%)	kg/m ³	(%)
28 giorni	BFS_L_F1	A	2003	2850	29.7	2080	27.0
		B	1987	2850	30.3	2070	27.4
	BFS_L_F2	A	2000	2850	29.8	1997	29.9
		B	1991	2850	30.1	2075	27.2
	BFS_F1	A	1962	2850	31.2	2061	27.7
		B	1936	2850	32.1	1879	34.1
	BFS_F2	A	1928	2850	32.4	1997	29.9
		B	1932	2850	32.2	2000	29.8
	CEM I_L	A	2008	2890	30.5	2068	28.4
		B	1966	2890	32.0	2014	30.3
	CEM I	A	1981	2890	31.5	1725	40.3 (*)
		B	1918	2890	33.6	1994	31.0

(*) prova fallita

5.2.2 Prova di compressione

La trattazione dei risultati delle prove di compressione per conglomerati è analoga a quella relative alle malte. In Tabella 5-16, Tabella 5-17 e Tabella 5-18 si riportano le curve sforzo – deformazione per i campioni cilindrici testati a compressione.

Tabella 5-16: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni cilindrici di conglomerato a base di BFS_F1, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura

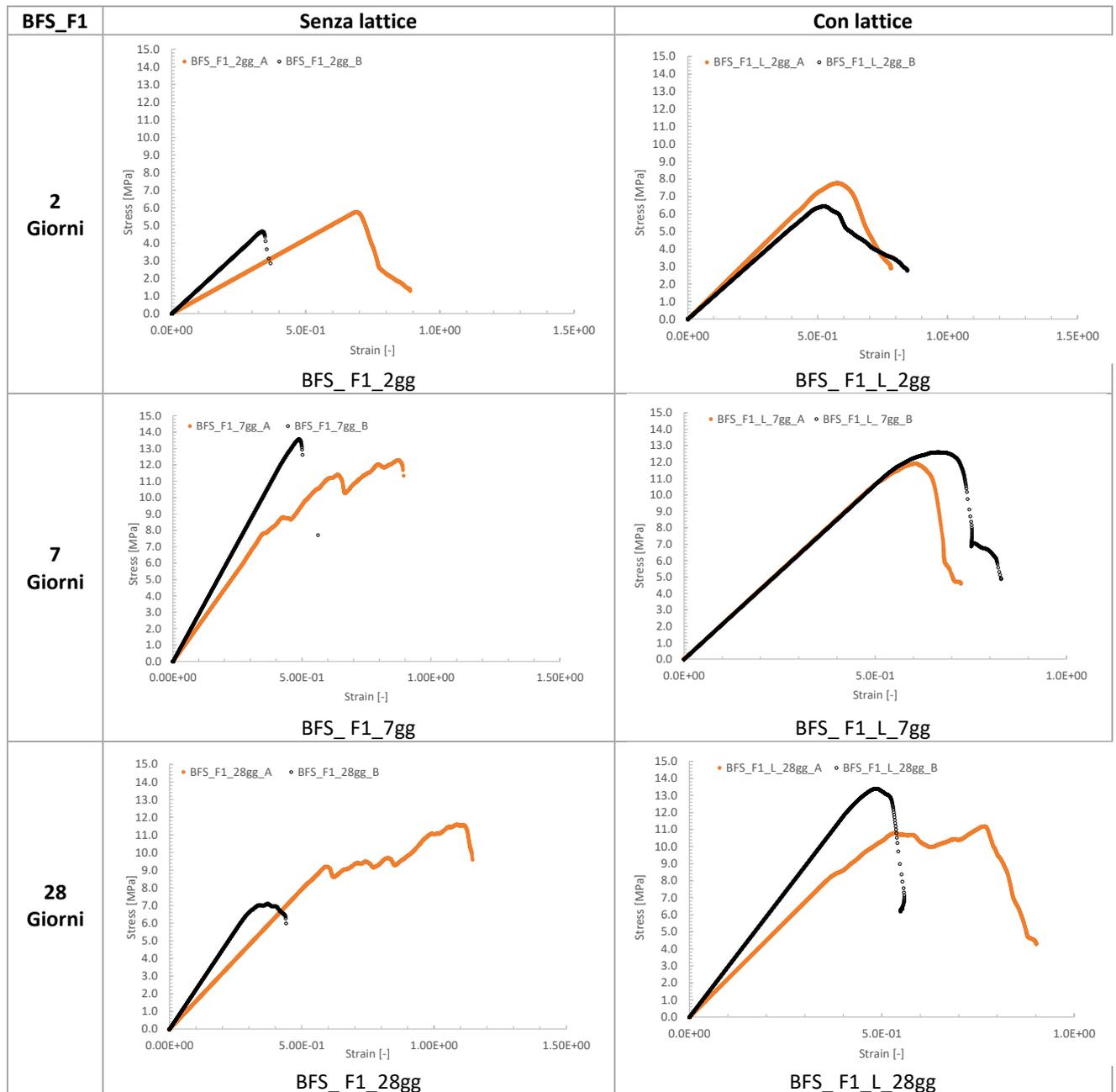


Tabella 5-17: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni cilindrici di conglomerato a base di BFS_F2, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura

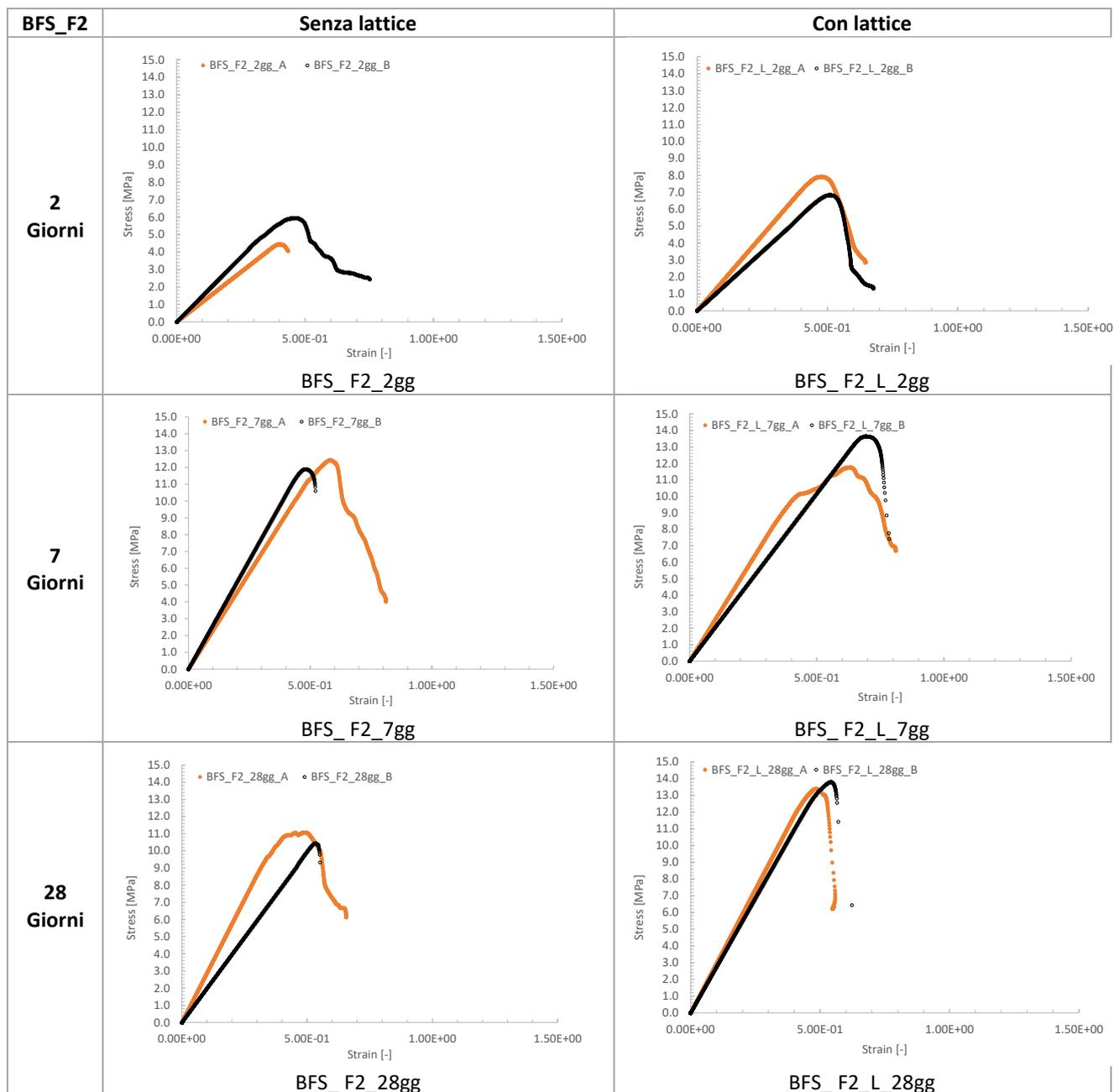
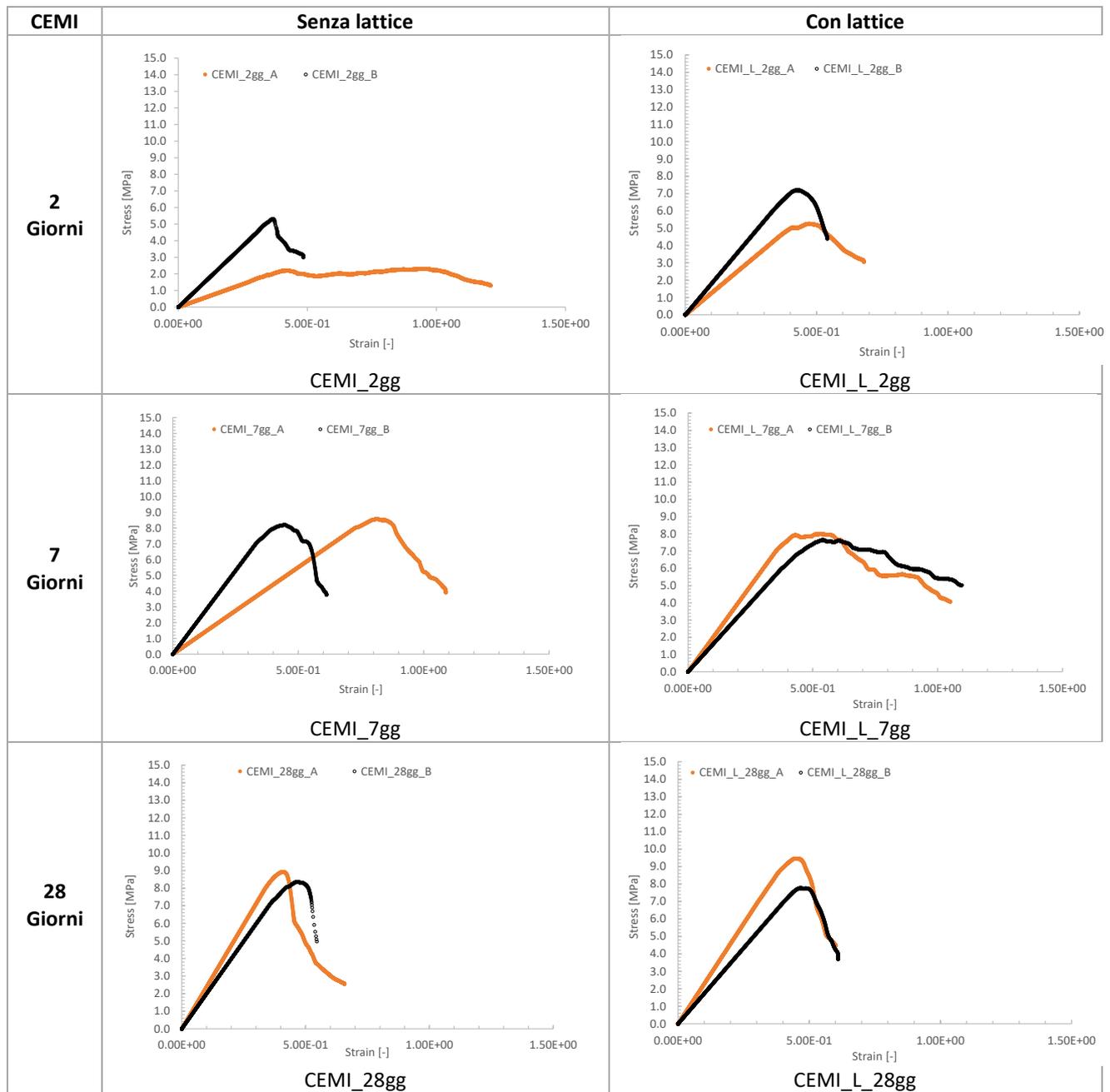


Tabella 5-18: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni cilindrici di conglomerato a base di CEMI, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura



Si riporteranno di seguito dunque le tabelle relative a ciascuna tipologia di miscela, raggruppate per giorni di stagionatura e contenenti densità, resistenza a compressione σ_{max} , deformazione corrispondete alla massima forza registrata a compressione, modulo secante E_{sec} , modulo tangente E_{tan} ed energia di rottura (o tenacità T) (Tabella 5-19, Tabella 5-20 e Tabella 5-21).

Di queste quantità sono state calcolate: la media geometrica e la variazione percentuale calcolata come in (Eq. 5-3):

$$\Delta/\bar{x} (\%) = \frac{|x_1 - x_2|}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5-3})$$

Tabella 5-19: Risultati prove di compressione su conglomerati stagionati 2 giorni

Risultati prove a compressione									
Curing	ID CAMPIONE	Numero campioni		Densità (kg/m ³)	σ_{\max} (MPa)	$\epsilon(F_{\max})$ (-)	E_{sec} (MPa)	E_{tan} (MPa)	Energia di rottura T (kPa*mm/mm)
2 giorni	BFS_F1_2gg	2	MEDIA	1863	5.2	0.007	1107	1122	13.98
			Δ/m (%)	0.79	21.36	34.24	48.56	49.47	85.91
	BFS_F1_L_2gg	2	MEDIA	1942	7.1	0.006	1296	1386	20.67
			Δ/m (%)	0.17	18.54	15.90	9.71	10.72	27.21
	BFS_F2_2gg	2	MEDIA	1874	5.2	0.006	1198	1311	12.27
			Δ/m (%)	2.46	28.81	20.71	13.63	25.67	52.08
	BFS_F2_L_2gg	2	MEDIA	1935	7.4	0.006	1499	1591	19.25
			Δ/m (%)	1.07	14.56	4.79	21.29	24.19	10.49
	CEMI_L_2gg	2	MEDIA	2004	6.2	0.006	1409	1536	14.89
			Δ/m (%)	2.83	31.13	3.77	41.52	35.17	16.20
	CEMI_NL_2gg	2	MEDIA	1879	3.8	0.008	848	1016	12.80
			Δ/m (%)	6.26	78.84	61.56	143.03	90.88	45.01

Tabella 5-20: Risultati prove di compressione su conglomerati stagionati 7 giorni

Risultati prove a compressione									
Curing	ID CAMPIONE	Numero campioni		Densità (kg/m ³)	σ_{max} (MPa)	$\epsilon(F_{max})$ (-)	E_{sec} (MPa)	E_{tan} (MPa)	Energia di rottura T (kPa*mm/mm)
7 giorni	BFS_F1_2gg	2	MEDIA	1998	12.9	0.008	2095	2546	51.26
			Δ/m (%)	2.05	9.79	48.98	65.62	26.61	67.13
	BFS_F1_L_2gg	2	MEDIA	2039	12.3	0.009	1937	2132	42.28
			Δ/m (%)	0.05	5.63	1.48	3.97	0.63	17.89
	BFS_F2_2gg	2	MEDIA	1943	12.2	0.008	2312	2441	34.01
			Δ/m (%)	1.15	4.41	8.39	15.10	12.09	25.57
	BFS_F2_L_2gg	2	MEDIA	2029	12.7	0.008	1918	2264	46.75
			Δ/m (%)	0.72	14.88	7.44	5.65	20.39	8.83
	CEMI_L_2gg	2	MEDIA	2029	7.8	0.007	1464	1794	24.79
			Δ/m (%)	0.22	4.53	5.68	5.81	21.74	17.24
	CEMI_NL_2gg	2	MEDIA	1954	8.4	0.007	1448	1610	28.56
			Δ/m (%)	1.39	4.53	47.78	54.42	63.00	56.72

Tabella 5-21: Risultati prove di compressione su conglomerati stagionati 28 giorni

Risultati prove a compressione									
Curing	ID CAMPIONE	Numero campioni		Densità (kg/m ³)	σ_{max} (MPa)	$\epsilon(F_{max})$ (-)	E_{sec} (MPa)	E_{tan} (MPa)	Energia di rottura T (kPa*mm/mm)
28 giorni	BFS_F1_2gg	2	MEDIA	1949	9.3	0.008	1486	1916	0.04
			Δ/m (%)	1.30	48.23	82.58	56.34	34.40	131.82
	BFS_F1_L_2gg	2	MEDIA	1995	12.3	0.007	2111	2598	0.04
			Δ/m (%)	0.84	17.97	32.99	61.72	26.87	46.55
	BFS_F2_2gg	2	MEDIA	1930	10.8	0.008	2116	2423	0.03
			Δ/m (%)	0.18	5.78	51.97	14.12	36.79	14.71
	BFS_F2_L_2gg	2	MEDIA	1995	13.6	0.007	2653	2843	0.04
			Δ/m (%)	0.44	3.01	22.73	8.22	7.36	14.30
	CEMI_L_2gg	2	MEDIA	1987	8.6	0.006	1894	2013	0.02
			Δ/m (%)	2.08	19.62	21.13	24.51	27.69	16.30
	CEMI_NL_2gg	2	MEDIA	1949	8.6	0.005	1995	2179	0.02
			Δ/m (%)	3.24	6.57	26.09	19.41	17.50	6.14

5.2.3 Prova di flessione su 4 punti

Per la prova a flessione su 4 punti si riporteranno le Tabella 5-22, Tabella 5-23 e Tabella 5-24, relative a ciascuna tipologia di miscela, raggruppate per giorni di stagionatura e contenenti densità, resistenza ultima a flessione σ_{\max} determinandone la media geometrica e la variazione percentuale, calcolata come nel paragrafo precedente (5.2.2).

Tabella 5-22: Risultati prove di flessione su conglomerati stagionati 2 giorni

Risultati prove a flessione					
Curing	ID CAMPIONE	Numero campioni		Densità (kg/m ³)	σ_{\max} (MPa)
2 giorni	BFS_F1_2gg	2	MEDIA	1880	1.3
			Δ/m (%)	5.81	32.80
	BFS_F1_L_2gg	2	MEDIA	1921	1.2
			Δ/m (%)	0.28	24.87
	BFS_F2_2gg	2	MEDIA	1880	1.3
			Δ/m (%)	5.81	13.75
	BFS_F2_L_2gg	2	MEDIA	1858	0.9
			Δ/m (%)	4.55	7.41
	CEMI_L_2gg	2	MEDIA	1994	1.6
			Δ/m (%)	2.16	23.65
	CEMI_2gg	2	MEDIA	1833	1.0
			Δ/m (%)	2.93	24.60

Tabella 5-23: Risultati prove di flessione su conglomerati stagionati 7 giorni

Risultati prove a flessione					
Curing	ID CAMPIONE	Numero campioni		Densità (kg/m ³)	σ_{max} (MPa)
7 giorni	BFS_F1_2gg	2	MEDIA	1891	1.9
			Δ/m (%)	1.06	30.13
	BFS_F1_L_2gg	2	MEDIA	1845	1.3
			Δ/m (%)	6.48	30.09
	BFS_F2_2gg	2	MEDIA	1943	2.1
			Δ/m (%)	2.32	28.86
	BFS_F2_L_2gg	2	MEDIA	1857	1.7
			Δ/m (%)	0.68	8.73
	CEMI_L_2gg	2	MEDIA	1994	1.7
			Δ/m (%)	2.16	16.31
	CEMI_2gg	2	MEDIA	1904	1.8
			Δ/m (%)	2.72	1.70

Tabella 5-24: Risultati prove di flessione su conglomerati stagionati 28 giorni

Risultati prove a flessione					
Curing	ID CAMPIONE	Numero campioni		Densità (kg/m ³)	σ_{max} (MPa)
28 giorni	BFS_F1_2gg	2	MEDIA	2045	1.7
			Δ/m (%)	16.09	42.58
	BFS_F1_L_2gg	2	MEDIA	2135	2.7
			Δ/m (%)	1.13	38.27
	BFS_F2_2gg	2	MEDIA	1957	2.0
			Δ/m (%)	4.95	34.83
	BFS_F2_L_2gg	2	MEDIA	2197	3.3
			Δ/m (%)	1.16	3.24
	CEMI_L_2gg	2	MEDIA	2033	2.5
			Δ/m (%)	1.70	16.67
	CEMI_2gg	2	MEDIA	2009	2.4
			Δ/m (%)	2.96	5.78

6 Analisi dei dati

Nell'analisi dei dati sono stati valutati i risultati ottenuti sulla *scala delle malte* e quelli sulla *scala dei conglomerati*. Risulta di grande interesse effettuare anche un confronto fra i dati ottenuti a scale differenti, in modo da valutare se le resistenze meccaniche registrate per le malte riescano ad esplicarsi anche quando queste si trovano a lavorare con l'aggregato. Per quanto concerne le prestazioni del conglomerato poroso, infatti, queste non dipendono solo dalla tipologia di aggregato usato e dalle proprietà della malta, ma anche dal grado di consistenza (legato alla lavorabilità) e di come la pasta di malta riesca a ricoprire bene l'aggregato, in modo da creare una solida matrice fra i grani, attraverso la quale si trasmettono gli sforzi.

6.1 Analisi dei dati sulle malte

L'analisi dei dati sulle malte è stata condotta sulle miscele ottenute dai mix-design indagati in questa sperimentazione ed effettuando anche un confronto con i valori relativi alle malte studiate nella Tesi di Gaudiuso. Si ricorda infatti che mentre in quel lavoro di tesi si era definito un mix-design selezionato per il cemento Portland e poi lo stesso era stato applicato alle malte geopolimeriche, in questa sperimentazione invece sono stati confezionati mix-design ottimali anche per malte a base di loppa alcali-attivata.

Si sono analizzati gli effetti sui parametri meccanici dovuti alla scelta del legante, alla presenza del lattice, e all'effetto del fluidificante e della stagionatura.

6.1.1 Effetto del legante

Gli istogrammi di Figura 6-1, Figura 6-2, Figura 6-3 e Figura 6-4 pongono a confronto i due diversi leganti impiegati, in termini di resistenza massima raggiunta a flessione e a compressione. I valori relativi al CEMI presentano un asterisco perché derivanti dalla sperimentazione svolta da Gaudiuso.

È immediato constatare come i maggiori valori di resistenza si ottengono impiegando nel confezionamento dei campioni prismatici di malta, la loppa attivata alcalinamente piuttosto che il cemento Portland. In particolare per i valori a flessione per malte con lattice, la massima resistenza è raggiunta a 7 giorni dalla BFS_L, con valore pari a 9,88 MPa, quasi il doppio (percentuale del 54 %) del rispettivo valore di resistenza raggiunto testando le malte cementizie e pari a 4,50 MPa (Figura 6-1).

Nel caso delle malte senza lattice, il valore massimo si ha a 28 giorni per la malta BFS_F1 che a 28 giorni raggiunge valori di resistenza massima pari a 9,64, superando il rispettivo valore di resistenza ottenuto impiegando il cemento di una percentuale prossima al 32 % (Figura 6-2).

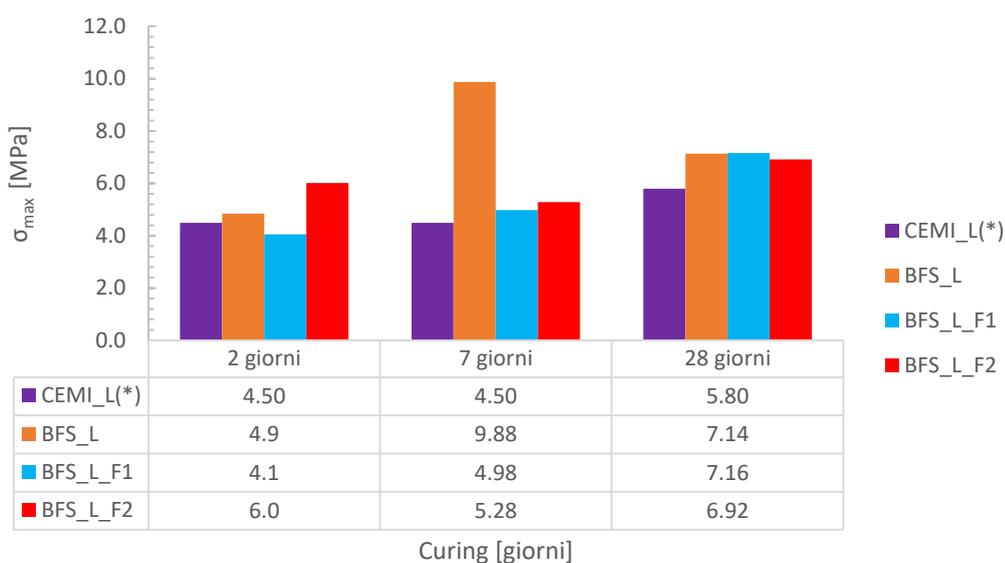


Figura 6-1: Effetto del legante sulla resistenza a flessione per malte con lattice. (*) Dati ottenuti dalla tesi di Gaudiuso

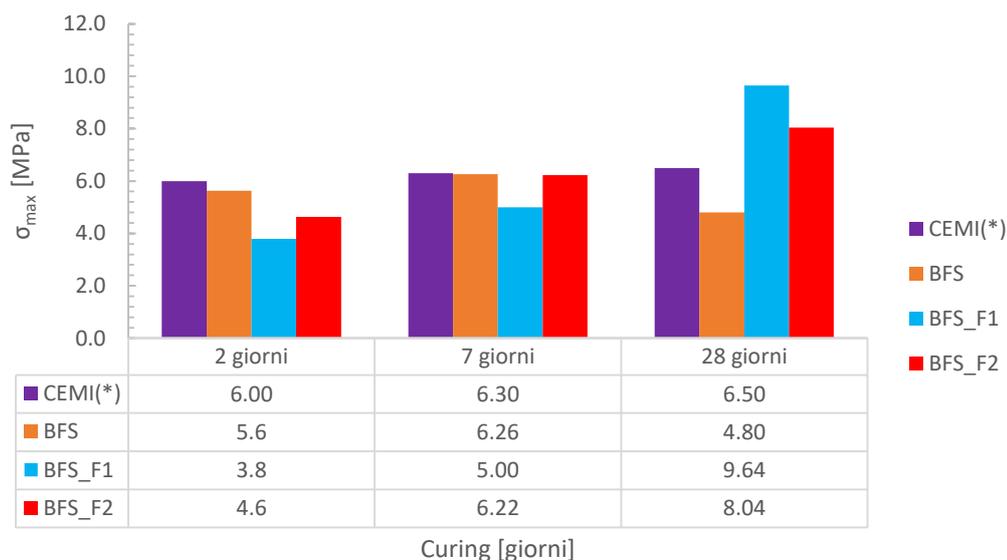


Figura 6-2: Effetto del legante sulla resistenza a flessione per malte senza lattice. (*) Dati ottenuti dalla tesi di Gaudiuso

Anche per la prova di compressione, le massime resistenze raggiunte sono da ricondursi all'impiego della loppa alcali-attivata e non del cemento Portland. Questa differenza si accentua con la stagionatura, in quanto provini stagionati 2 giorni raggiungono pressoché le stesse resistenze a compressione, indipendentemente dal legante utilizzato. Nello specifico per malte con lattice la resistenza di malte geopolimeriche stagionate 28 giorni pari a 70.43 MPa, è maggiore del 41 % della resistenza sviluppata dalle rispettive malte cementizie, prossima a 40 MPa (Figura 6-3). Nel caso delle malte cementizie senza lattice la massima resistenza a compressione si raggiunge a 28 giorni, con valore pari a 56.40 MPa, inferiore del quasi 40 % al massimo valore raggiunto testando malte geopolimeriche (BFS_F1 raggiunge a 28 giorni resistenza massima a compressione prossima ai 90 MPa), come mostrato in Figura 6-4.

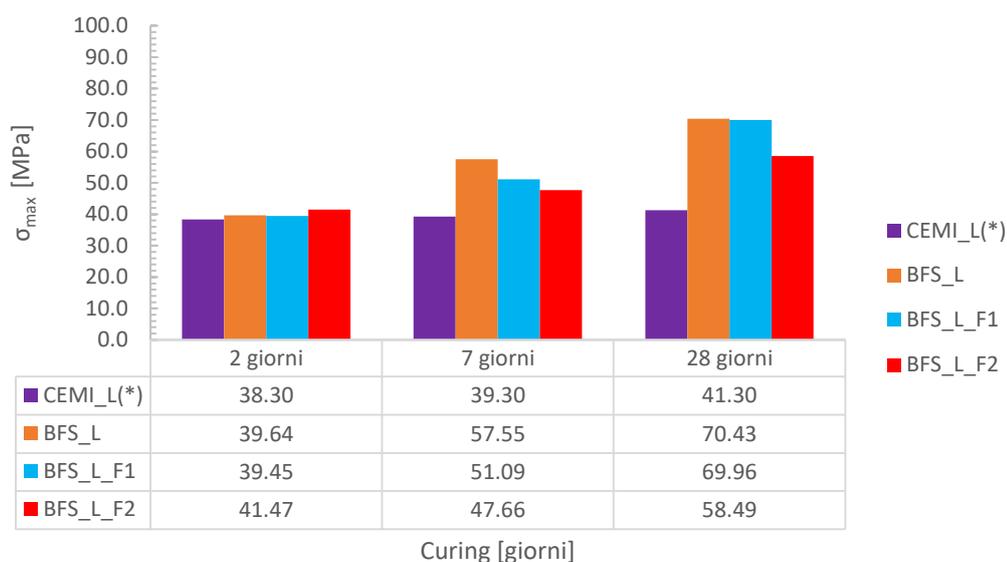


Figura 6-3: Effetto del legante sulla resistenza a compressione per malte con lattice. (*) Dati ottenuti dalla tesi di Gaudiuso

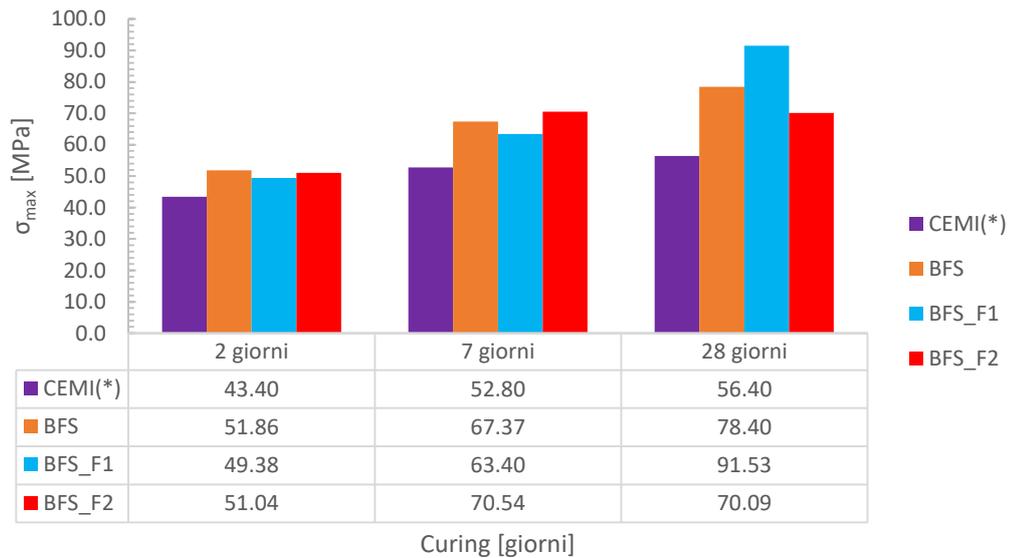


Figura 6-4: Effetto del legante sulla resistenza a compressione per malte senza lattice. (*) Dati ottenuti dalla tesi di Gaudiuso

6.1.2 Confronto tra provini in BFS

In questo lavoro di Tesi sono stati indagati mix-design ottimali per miscele geopolimeriche, a differenza di quanto fatto nella sperimentazione di Gaudiuso, come già esposto al Capitolo 2. Si è scelto di confrontare i valori di resistenza massima raggiunta a flessione e a compressione dai provini confezionati nella precedente sperimentazione con i valori di resistenza sviluppati dai campioni confezionati in questa indagine. In particolare è stato eseguito un confronto tra le miscele a base di loppa, confezionate seguendo la stessa ricetta selezionata per il cemento Portland (Gaudiuso, 2017), denominate *LOP_DES* “con” e “senza” lattice, e quelle sempre a base di loppa però confezionate con progetti di miscela ottimali in termini di consistenza per le malte a base di loppa attivata, sempre “con” e “senza” lattice, senza l’impiego di altri additivi. In Tabella 6-1 si riportano i rapporti fra i costituenti delle miscele in questione.

Tabella 6-1: Rapporti tra i costituenti delle malte geopolimeriche studiate precedentemente e in questa indagine

Mix-design	sol/lop	sab/lop	lat/lop
LOP_DES_LATEX	0.32	0.22	0.07
LOP_DES_NOLATEX	0.35	0.26	-
BFS_L	0.46	0.21	0.07
BFS	0.46	0.21	-

Dai diagrammi in Figura 6-5 e Figura 6-6 si nota come, a parte una piccola eccezione per le malte con lattice a 7 giorni, i valori di resistenza raggiunti dalla *LOP_DES* siano più alti di quelli ottenuti per le miscele confezionate in questa indagine.

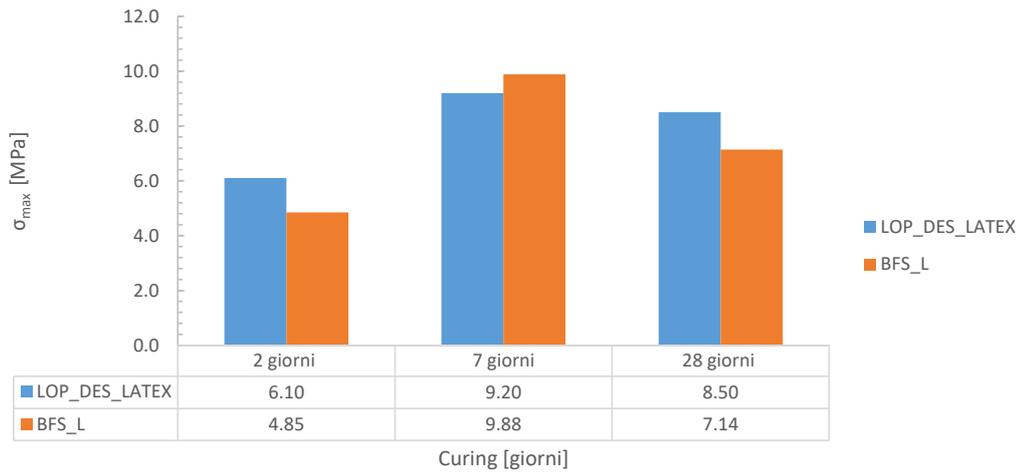


Figura 6-5: Confronto resistenze a flessione tra miscela LOP_DES e BFS con lattice

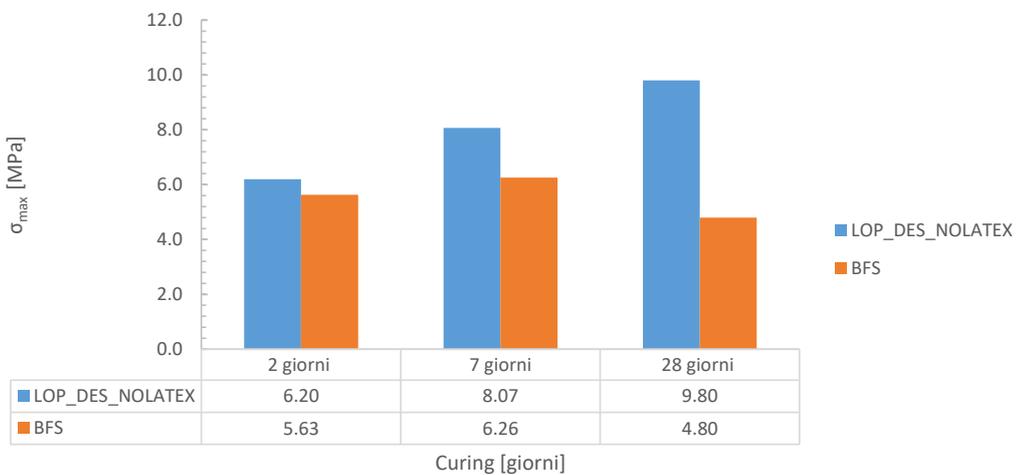


Figura 6-6: Confronto resistenze a flessione tra miscela LOP_DES e BFS senza lattice

Lo stesso non vale per le resistenze a compressione, che invece risultano maggiori per le malte geopolimeriche confezionate con rapporti ottimali fra i costituenti, ovvero quelle con nomenclatura BFS.

Dai valori riportati in Figura 6-7 e Figura 6-8 è possibile vedere che con l'indurimento (curing a 28 giorni), le malte studiate in questa indagine raggiungono valori di resistenza a compressione ultimi prossimi a quelli di Gaudiuso nel caso delle miscele contenenti lattice, e invece valori superiori senza alcun additivo.

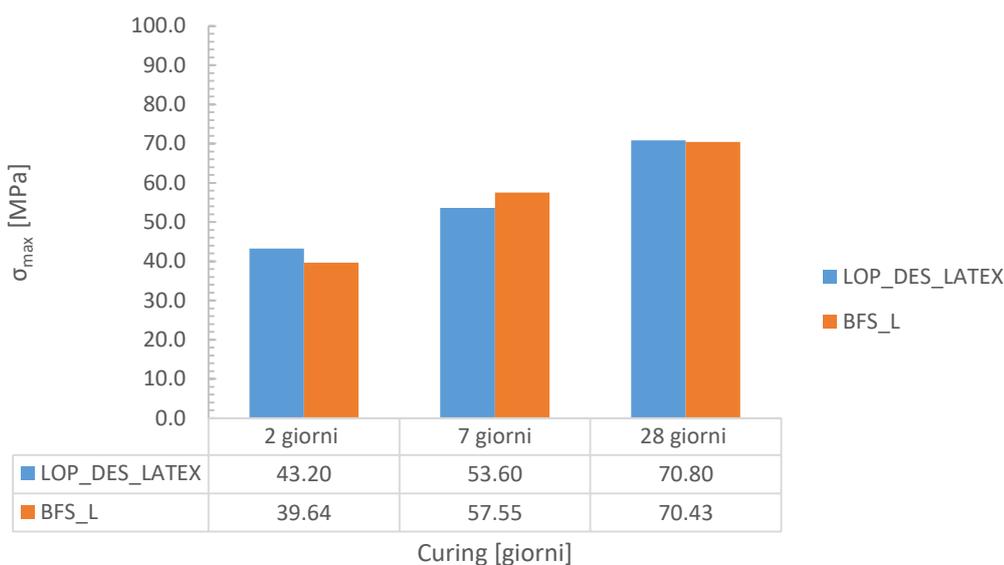


Figura 6-7: Confronto resistenze a compressione tra miscela LOP_DES e BFS con lattice

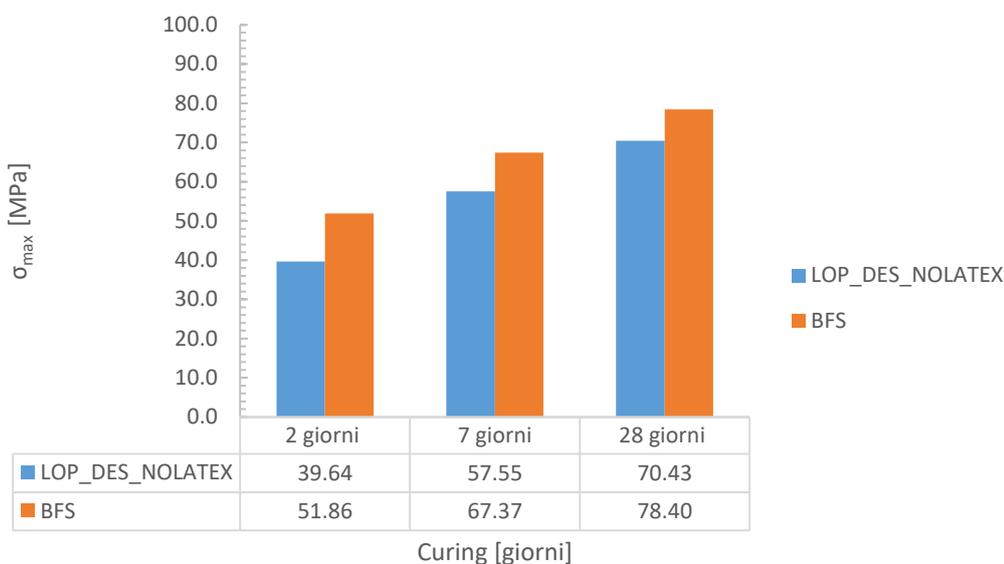


Figura 6-8: Confronto resistenze a compressione tra miscela LOP_DES e BFS senza lattice

Le ottime resistenze ottenute dai test svolti durante la precedente indagine sono da ricondursi al più basso rapporto liquido/legante e alla maggiore quantità di sabbia, che conferiscono alla malta maggiore rigidità (Tabella 6-1). E' stato infatti comprovato da indagini svolte da Meininger et al. (1988), come una piccola quantità di sabbia comporti un aumento anche del 70% nel valore di resistenza della malta cementizia.

Tuttavia le malte confezionate da Isabella Gaudioso presentavano scarsi livelli di affinità malta-aggregato. Come già esposto precedentemente, le alte resistenze meccaniche delle miscele, non sempre conducono alla malta migliore da usare nel confezionamento del conglomerato poroso. Occorre infatti rispettare, in primis, i risultati ottenuti dalle prove sulla consistenza (con il metodo del guanto), in quanto malte "Pessime" non riuscirebbero

comunque ad essere impiegate a causa della mancata adesione fra aggregati grossi. L'affinità malta-aggregato, infatti, risulta una caratteristica di fondamentale importanza per lo sviluppo delle resistenze nei campioni in conglomerato poroso.

6.1.3 Effetto del lattice

Nel paragrafo 1.2.1 sono stati esposti i possibili effetti dell'aggiunta di additivi nel confezionamento delle malte. In particolare si è visto come dalle indagini svolte da Wang (2010), il lattice comporti una diminuzione della densità, oltre che ad una migliore consistenza e lavorabilità. Quest'ultima è stata verificata durante lo svolgimento della prova del guanto nella *fase preliminare* di questa sperimentazione, durante la quale per miscele contenenti lattice si è riscontrata una maggiore capacità della malta di avvolgere l'aggregato, rispetto a miscele con stessi rapporti fra i costituenti ma senza lattice (vedi paragrafo 4.1.1).

Si analizza di seguito l'effetto del lattice nello sviluppo delle resistenze meccaniche. Per quanto concerne la resistenza a flessione si osservano comportamenti completamente diversi per miscele contenenti fluidificante e non. Mentre infatti l'aggiunta del lattice contribuisce allo sviluppo di una maggiore resistenza a flessione per provini di malta BFS a 7 e a 28 giorni, lo stesso non vale nel caso delle malte BFS_F1 e BFS_F2 (Figura 6-9, Figura 6-10 e Figura 6-11 rispettivamente). Nei casi con aggiunta di fluidificante, infatti, si osserva come la presenza del lattice comporti una diminuzione della resistenza.

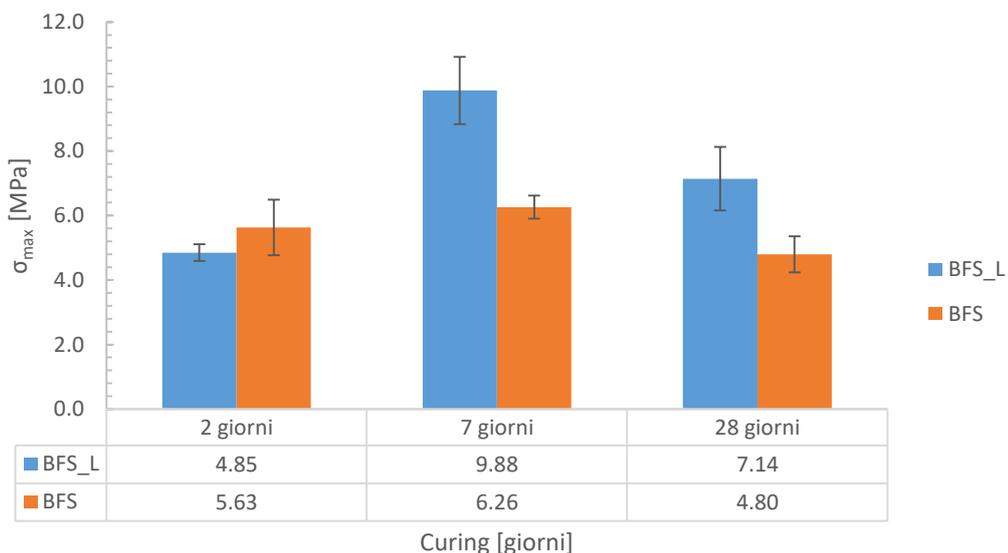


Figura 6-9: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a flessione per provini di malta BFS

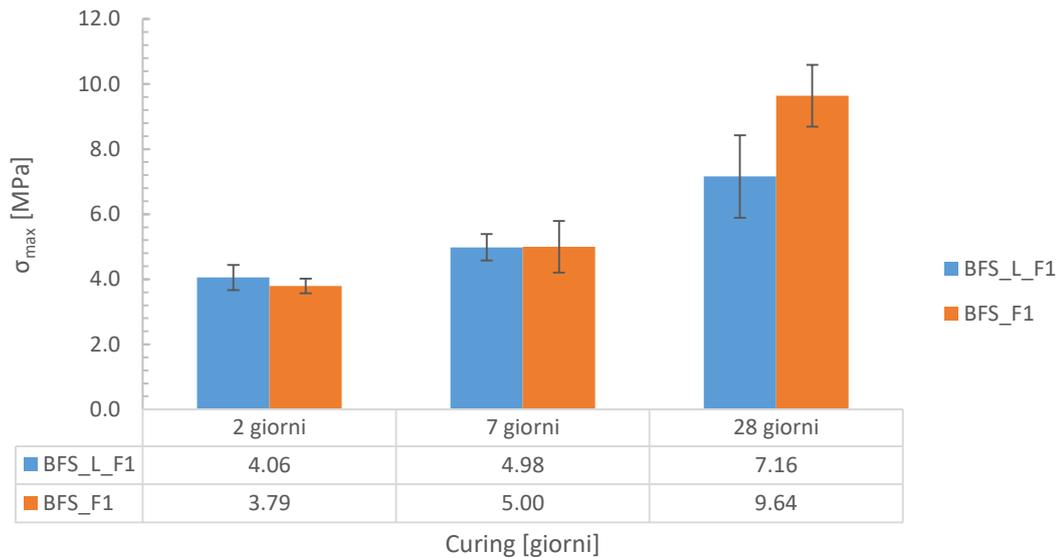


Figura 6-10: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a flessione per provini di malta BFS con aggiunta di fluidificante a base di policarbossilato etere

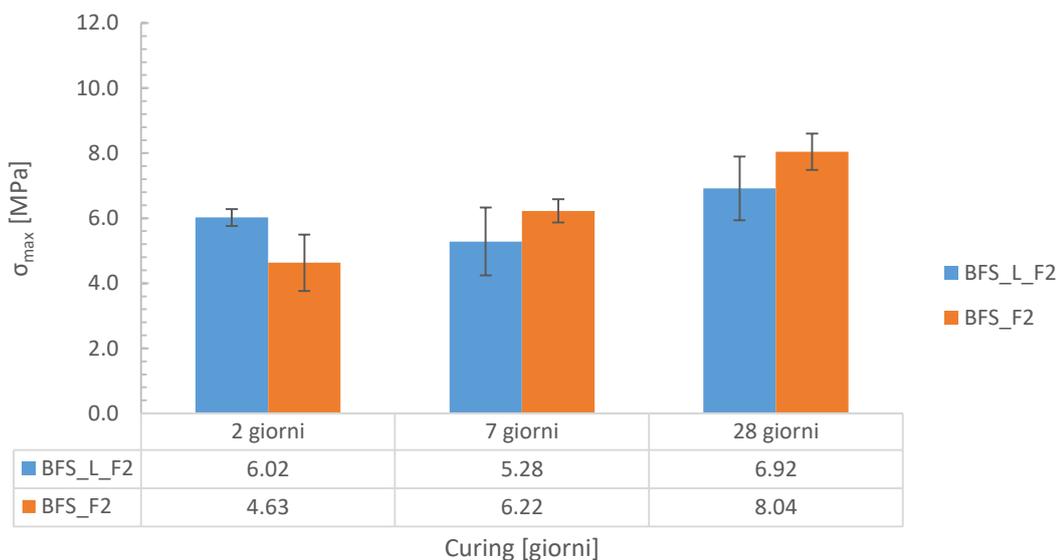


Figura 6-11: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a flessione per provini di malta BFS con aggiunta di fluidificante a base di lignisolfunato

Le osservazioni fatte per i valori di resistenza a flessione sono esattamente riproducibili nel caso della prova a compressione. Le malte maggiormente prestazionali a compressione sono infatti quelle confezionate con aggiunta solo di fluidificante, senza l'additivo lattice. Questo è provato anche dalle informazioni riportate in letteratura: Wang nel 2010 dimostrò come l'aggiunta di lattice non contribuisse allo sviluppo della resistenza a compressione.

Il massimo valore di resistenza a compressione registrato per BFS con aggiunta di fluidificante è quello relativo alla BFS_F1 stagionata a 28 giorni e pari a 93,5 MPa, mentre per miscele contenenti lattice il valore massimo è 70,4 MPa sia nel caso di BFS_L che con aggiunta di fluidificante F2 a base di riduzione in acqua di lignisolfunato. Inoltre è interessante

sottolineare come l'effetto della *stagionatura*, comporti in qualsiasi caso un aumento della resistenza, confermando quanto logicamente ci si aspetta dall'indurimento dei campioni.

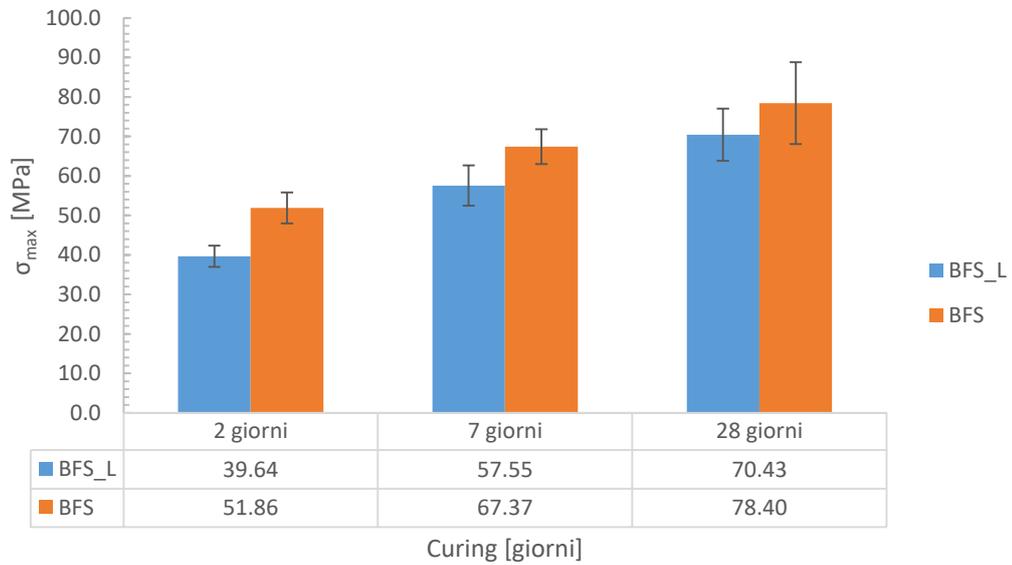


Figura 6-12: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a compressione per provini di malta BFS

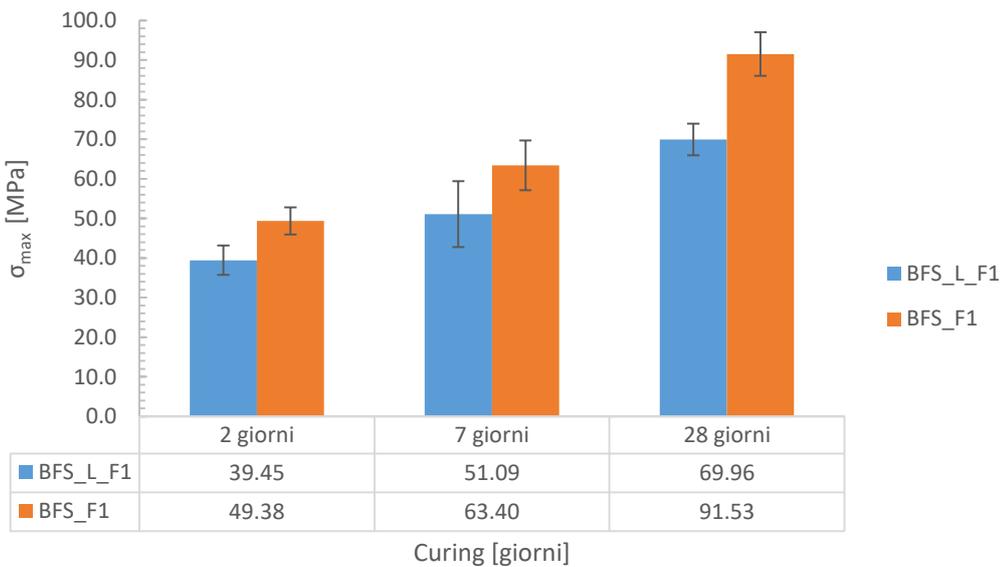


Figura 6-13: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a compressione per provini di malta BFS con aggiunta di fluidificante a base di polycarbossilato etere

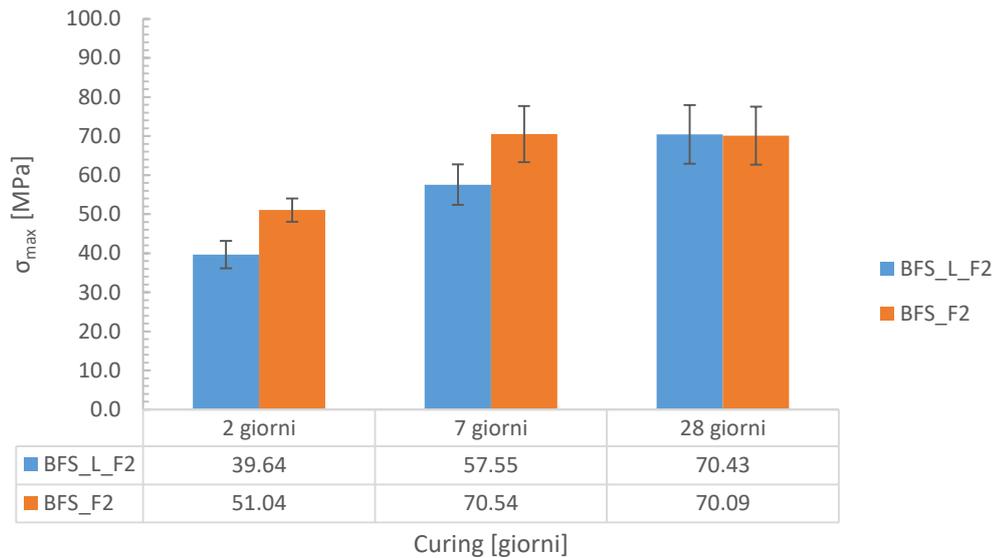


Figura 6-14: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a compressione per provini di malta BFS con aggiunta di fluidificante a base di lignisolfonato

Wang (2010) restituì anche dati interessanti relativi all'effetto del lattice sull'aumento dell'energia di rottura. Tuttavia applicando la stessa analisi ai dati relativi alle malte studiate, si riesce a confermare quanto detto in letteratura solo per il mix-design BFS e BFS_L, ovvero quello in cui non è stato usato alcun tipo di fluidificante. Si è studiato l'effetto del lattice sull'energia di rottura registrata sia per prove a flessione che a compressione, conducendo a valutazioni differenti.

Dalle curve sforzo-deformazione ottenute a flessione, nel caso delle malte con aggiunta di fluidificante si registra un aumento della energia di rottura con la presenza del lattice solo a brevi periodi di stagionatura e non a 28 giorni. In termini di energia di rottura i valori migliori si hanno comunque per miscele di loppa e lattice senza altri additivi, per i quali si ottiene un valore massimo di energia di rottura, valutata a 2 giorni di stagionatura, pari a 400 kPa mm/mm.

Di seguito si riportano i diagrammi ottenuti dall'analisi sull'energia di rottura registrata testando i provini di malta a flessione, divisi per tipologia di miscela studiata e indagandone il comportamento ai tre differenti periodi di curing. Inoltre mentre nel caso di miscele senza fluidificanti (BFS e BFS_L) si ha una diminuzione dell'energia di rottura con l'aumento del curing, riconducibile al fatto che il materiale più indurito conduce anche ad un infragilimento, nel caso delle miscele con aggiunta di additivi fluidificanti si registra il comportamento inverso. Si potrebbe dunque concludere che l'aggiunta di fluidificanti migliora la energia di rottura a flessione delle miscele all'aumentare del tempo di stagionatura, se non in presenza di lattice (Figura 6-15, Figura 6-16 e Figura 6-17), mentre quanto enunciato da Wang (2010) trova conferma nei test a flessione solo per malte geopolimeriche senza additivi fluidificanti.

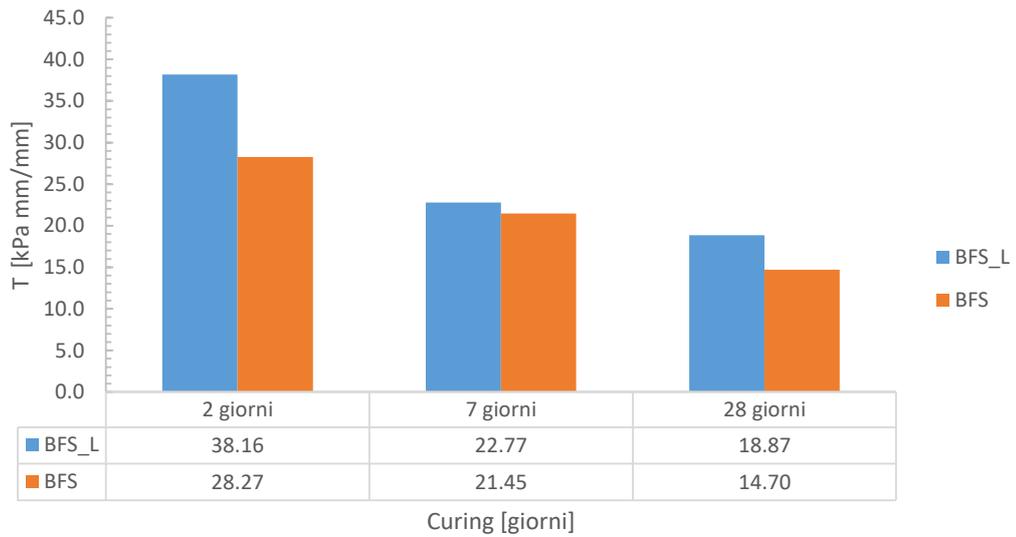


Figura 6-15: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a flessione per malte a base di loppa BFS

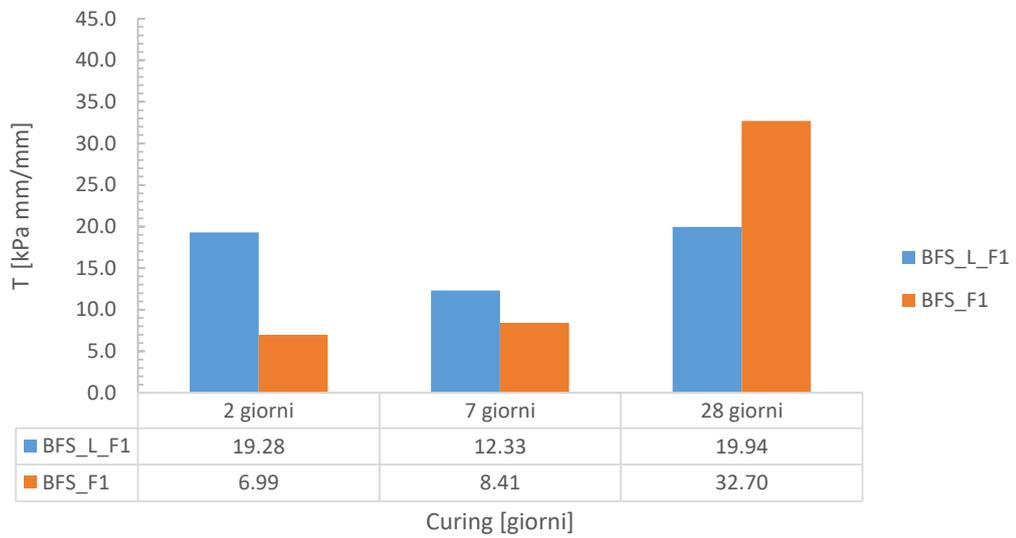


Figura 6-16: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a flessione per malte a base di loppa BFS con aggiunta del fluidificatore a base di polycarbossilato etere

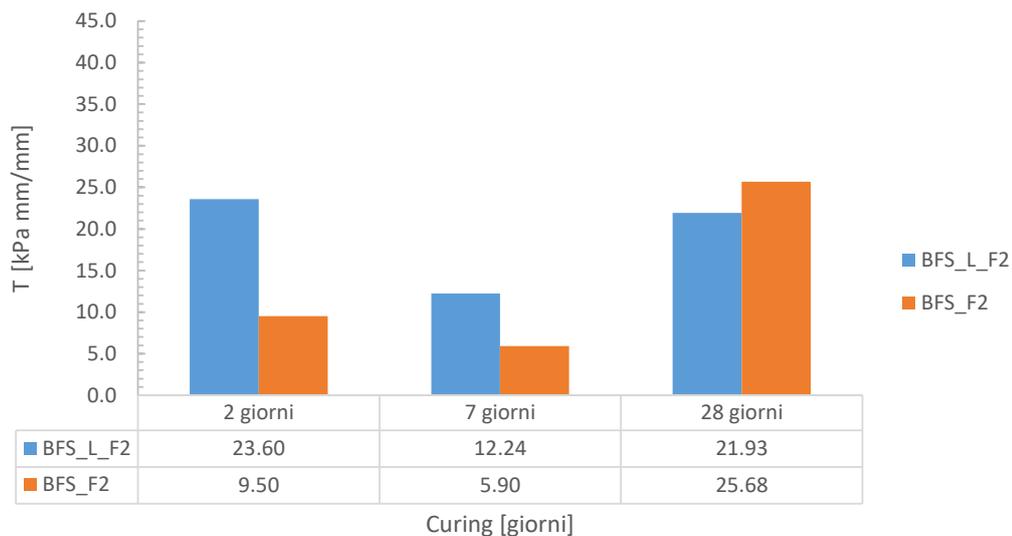


Figura 6-17: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a flessione per malte a base di loppa BFS con aggiunta del fluidificante a base di lignisolfunato

Tuttavia, come già accennato, non si può effettuare la stessa valutazione per i dati estrapolati dalle curve sforzo-deformazione ottenute dalla prova a compressione. Per queste infatti si ha un comportamento completamente diverso, se non opposto. Si registra un aumento dell'energia di rottura a compressione con l'aumentare dell'indurimento dei provini e questo si può spiegare poiché essendo materiali geopolimerici con comportamento prossimo alle malte "cementizie" (dunque resistenti a compressione e non a trazione), con la stagionatura si esplica maggiormente la capacità del campione di resistere alle sollecitazioni accumulando deformazioni prima di arrivare a rottura. La maggiore resistenza a compressione si può spiegare anche in termini di energia di rottura, poiché l'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione è maggiore per test di compressione che di flessione e questo si può ricondurre al raggiungimento di valori di resistenza più alti per la compressione che non per la flessione.

Si registra anche un comportamento anomalo, rispetto a quanto visto nei test di flessione per i provini di malta senza l'aggiunta di fluidificante, come mostrato in Figura 6-18. Questi infatti hanno esplicitato valori di energia di rottura più alti in assenza di lattice (con il raggiungimento del valore massimo di energia a rottura per provini in BFS pari a 898 kPa mm/mm), mentre nel caso di miscele con additivi fluidificanti ed elevati periodi di stagionatura (28 giorni) si registra un aumento dello sviluppo della energia di rottura se si considera l'aggiunta del lattice (Figura 6-19 e Figura 6-20).

Si può dunque concludere dicendo che a differenza di quanto visto per la flessione, quanto riportato in letteratura trova conferma nei test a compressione per malte con aggiunte di fluidificanti.

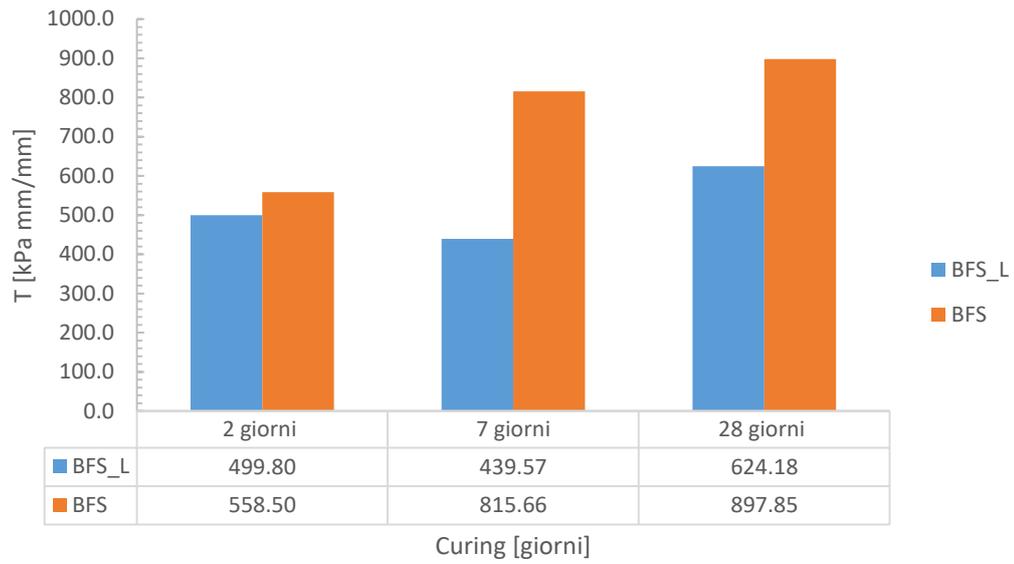


Figura 6-18: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a compressione per malte a base di loppa BFS

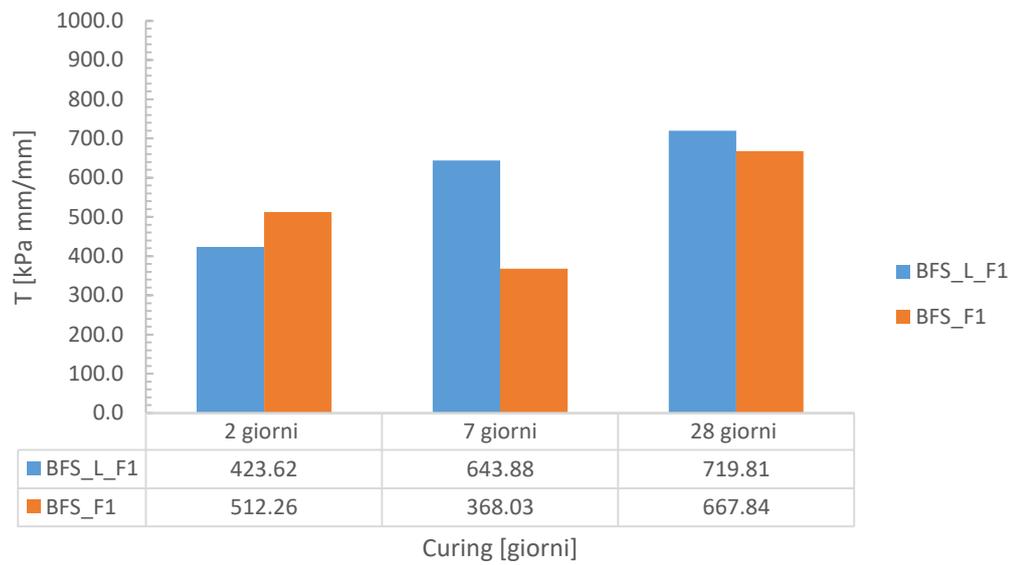


Figura 6-19: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a compressione per malte a base di loppa BFS con aggiunta del fluidificante a base di polycarbossilato etere

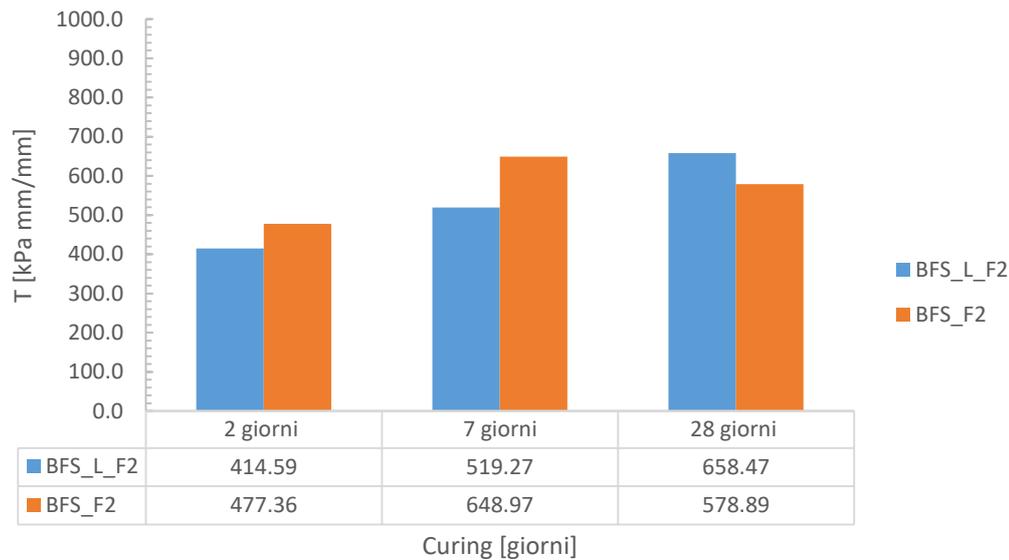


Figura 6-20: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a compressione per malte a base di loppa BFS con aggiunta del fluidificanti a base di lignisolfunato

Occorre aggiungere che gli studi effettuati e riportati in letteratura sull'aggiunta del lattice alle malte, riguardano principalmente miscele cementizie, quindi qualsiasi anomalia o stranezza potrebbe essere ricondotta alla tipologia di legante usato: la *loppa attivata alcalinamente*.

6.1.4 Effetto dei diversi fluidificanti su malte alcali-attivate

Dallo studio bibliografico effettuato prima del confezionamento delle malte a base di loppa alcali-attivata è risultato particolarmente utile il contributo degli studi di Bakharev et al. (1999). Questi infatti ha eseguito delle indagini sulla scelta di fluidificanti ad hoc nel confezionamento di malte geopolimeriche. Nello specifico l'indagine eseguita da Bakharev et al. (1999) ha condotto ad affermare che un fluidificante a base di riduzione d'acqua in lignisolfunato aumenti la consistenza nel caso in cui la fase liquida della malta sia costituita da soluzione alcalina. Inoltre si è dimostrato come l'uso di un comune superfluidificante (a base di naftalene o policarbossilato) comporti un aumento della consistenza solo in una fase iniziale di miscelazione e che, di contro, fluidificanti lignisolfunati possano causare un ritardo nello sviluppo della resistenza a compressione ed un'iniziale riduzione dei valori di resistenza flessionale.

Quanto affermato sulla consistenza è stato subito confermato dalla *prova del quanto* sulle varie miscele scelte. Miscele contenenti il fluidificante F2, a base di lignisolfunato, hanno presentato una consistenza più che ottima, conferendo alla malta una capacità di legare gli aggregati mai raggiunta con il fluidificante F1, quello a base di policarbossilato etere. Tuttavia se dal punto di vista della consistenza il secondo fluidificante conduca ad una sua scelta ovvia

nel confezionamento delle malte, occorre anche provare se è vero che implichi una riduzione dei valori di resistenza a flessione e di ritardo nello sviluppo di quella a compressione.

Da quanto riportato in letteratura dunque ci si aspettano dati meno prestazionali testando le malte con il secondo fluidificante rispetto a quelle con F1, ma anche risultati meccanici migliori testando poi i rispettivi conglomerati porosi, a causa della migliore aderenza della malta all'aggregato ovvero ad una migliore consistenza dei conglomerati.

Di seguito vengono restituiti i confronti eseguiti sui dati ottenuti a flessione e a compressione, per tutte le tipologie di malte geopolimeriche, suddivise in gruppi "con" e "senza" lattice.

Dai grafici in Figura 6-21 e Figura 6-22 si nota come effettivamente l'uso del fluidificante a base di riduzione in lignisolfunato conduca a resistenze minori rispetto all'altra miscela su lunghi tempi di stagionatura (si registra una differenza percentuale tra i dati pari al 19%), mentre risulta maggiormente funzionale a 2 e 7 giorni nel caso sia di miscele senza lattice (Figura 6-21) che nel caso di miscele con il lattice, come possibile vedere in Figura 6-22. Inoltre in questo caso si registra un dato di resistenza pressoché simile al primo fluidificante anche per stagionatura a 28 giorni, con differenza percentuale del solo 4%.

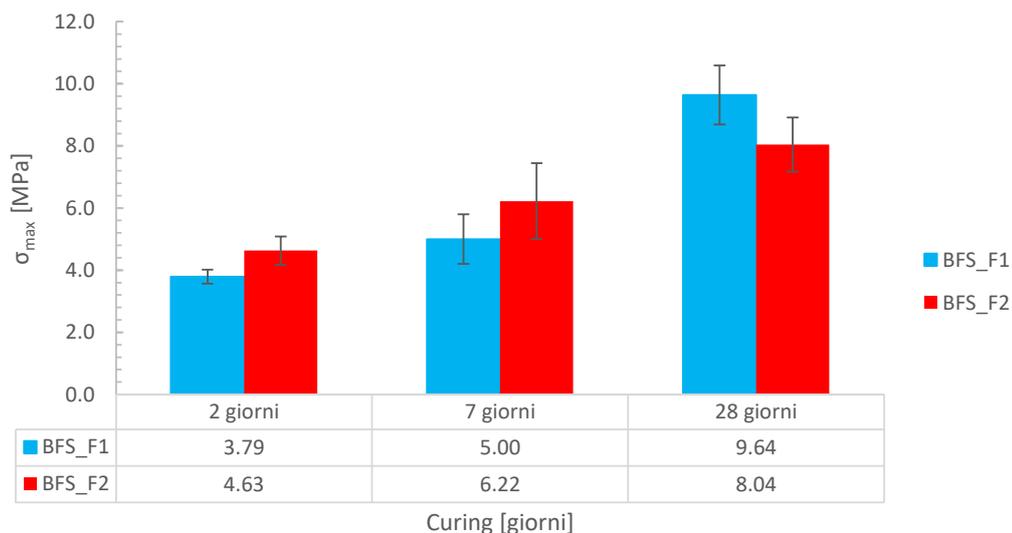


Figura 6-21: Effetto dei diversi fluidificanti sulla resistenza a flessione, i per miscele di loppa senza lattice

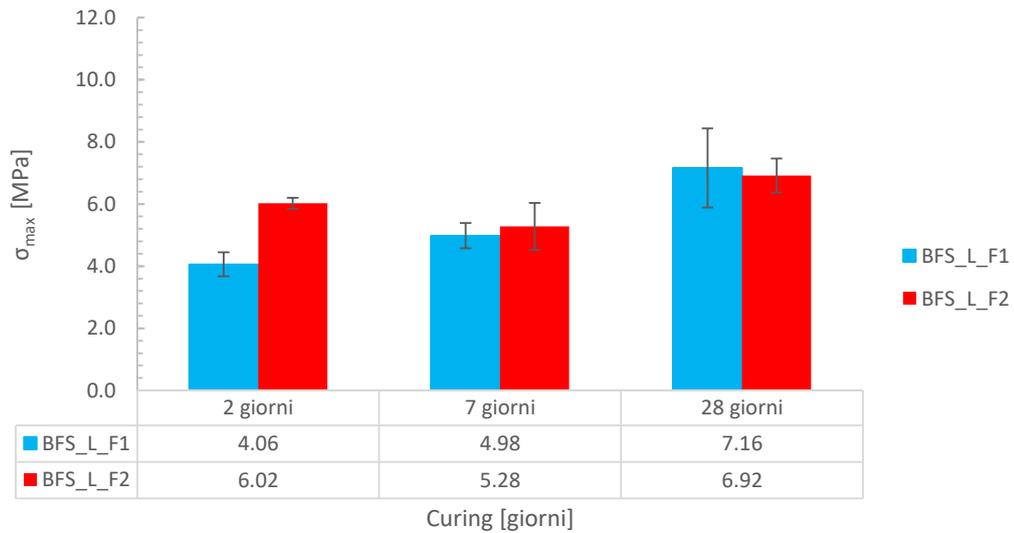


Figura 6-22: Effetto dei diversi fluidificanti sulla resistenza a flessione, per miscele di loppa con lattice

Per quanto riguarda i valori di resistenza a compressione, l'uso di uno o dell'altro fluidificante non comporta grandi differenze ((Figura 6-23) e (Figura 6-24)), tranne che per miscele non contenenti lattice a 28 giorni di stagionatura, per cui si sviluppano resistenze maggiori con l'aggiunta del fluidificante 1.

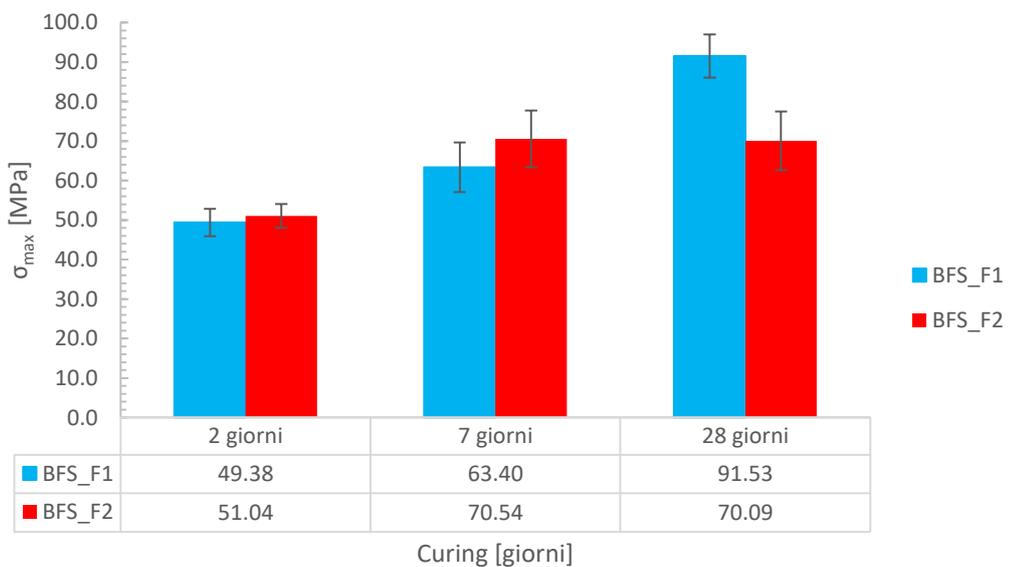


Figura 6-23: Effetto dei diversi fluidificanti sulla resistenza a compressione, per miscele di loppa senza lattice

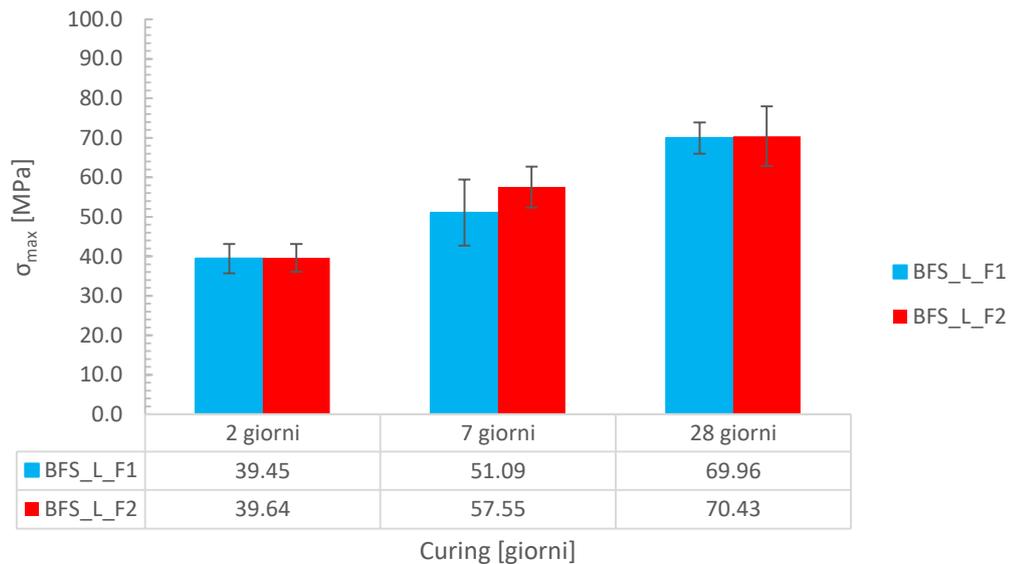


Figura 6-24: Effetto dei diversi fluidificanti sulla resistenza a compressione, per miscele di loppa con lattice

A conclusione dell'analisi sui dati ottenuti dalle prove effettuate su malta, occorre sottolineare come i valori di resistenza a 28 giorni superino alcuni dei valori proposti in letteratura per malte geopolimeriche. Infatti, secondo Khalifa et al. (2011) il valore di resistenza a compressione a 28 giorni per malte a base di loppa, ma in cui la frazione liquida risulta acqua e non soluzione alcalina, raggiunge un massimo di 35,0 MPa. Da studi condotti da Puertas et al. (2003) si nota come impiegando loppa attivata alcalinamente nel confezionamento delle malte sono stati ottenuti valori di resistenza a flessione e compressione pari rispettivamente a 7,8 MPa e 89,5 MPa. Mentre Islam et al. (2013) per malte contenente loppa e ceneri di olio di Palma hanno conseguito valori di resistenza a flessione pari a 6,0 MPa e a compressione di 66 MPa. Con la miscela BFS_F1, studiata in questa indagine, sono state raggiunte prestazioni superiori con percentuali del 20% per la resistenza a flessione e del 3% per quella a compressione, e valori pari rispettivamente a 9,64 MPa e 91,53 MPa (Tabella 6-2). Nella suddetta tabella non si riporteranno dati relativi a malte cementizie, per le quali ad esempio Yang & Jiang (2003) avevano registrato valori di resistenza massima a compressione a 28 giorni pari a 50 MPa, quindi inferiori a quelle sviluppate dalla malta geopolimerica confezionata BFS_F1 del 45 %.

Tabella 6-2: Confronto tra valori di resistenza riportati in letteratura e valori ottenuti dall'indagine svolta su malte geopolimeriche

Curing	ID Malta	Legante	$\sigma_{\max, \text{FLEX}}$ (MPa)	$\sigma_{\max, \text{COMPR}}$ (MPa)
28 GIORNI	<u>Khalifa et al</u>	<u>Loppa</u>	-	<u>35</u>
	<u>Puertas et al.</u>	<u>Loppa</u> <u>attivato alcalinamente</u>	<u>7.8</u>	<u>89.5</u>
	<u>Islam et al</u>	<u>Loppa (70%) +</u> <u>Cenere di olio di palma</u> <u>(30%)</u>	<u>6.0</u>	<u>66.0</u>
	BFS	Loppa attivato alcalinamente	4.8	78.4
	BFS_L	Loppa attivato alcalinamente	7.14	70.4
	BFS_F1	Loppa attivato alcalinamente	9.64	91.5
	BFS_F1_L	Loppa attivato alcalinamente	7.16	69.9
	BFS_F2	Loppa attivato alcalinamente	8.04	70.1
	BFS_F2_L	Loppa attivato alcalinamente	6.92	58.5

6.2 Conglomerati porosi

L'analisi dei dati è stata condotta secondo due scale di indagine differenti, così come è sviluppato l'intero piano sperimentale di questa Tesi. Per quanto riguarda i dati ottenuti sui conglomerati, questi verranno analizzati secondo gli stessi aspetti delle malte, quindi effetto del legante e della maturazione, del lattice e degli additivi fluidificanti. Dall'obiettivo della tesi posto, si auspica di ottenere valori maggiormente prestazionali, o quantomeno confrontabili, in termini meccanici con l'uso della loppa attivata piuttosto che del cemento Portland.

6.2.1 Effetto del legante

Per il confezionamento dei conglomerati si sono usate sia malte cementizie che geopolimeriche. Nelle Figura 6-25 e Figura 6-26 è visualizzato il confronto tra i valori di resistenza a flessione per miscele con e senza lattice. Per i conglomerati senza lattice a flessione (a 28 giorni) risulta maggiormente prestazionale il cemento, ma con l'aggiunta del

lattice il valore migliore si raggiunge a 28 giorni con la miscela BFS_F2_L e questo conferma anche quanto atteso in relazione all'uso del fluidificante 2 in aggiunta alla loppa.

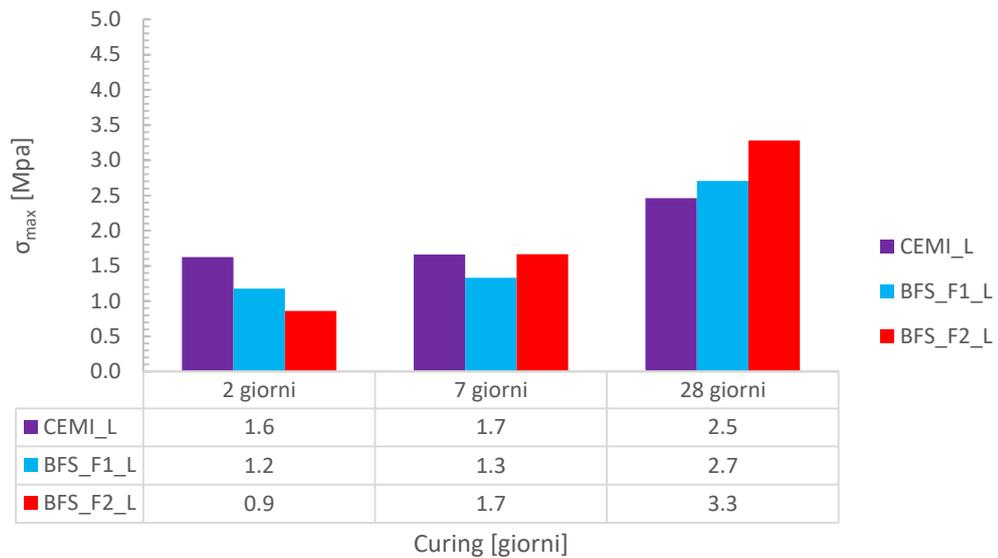


Figura 6-25: Effetto del legante sulla resistenza a flessione per miscele con lattice

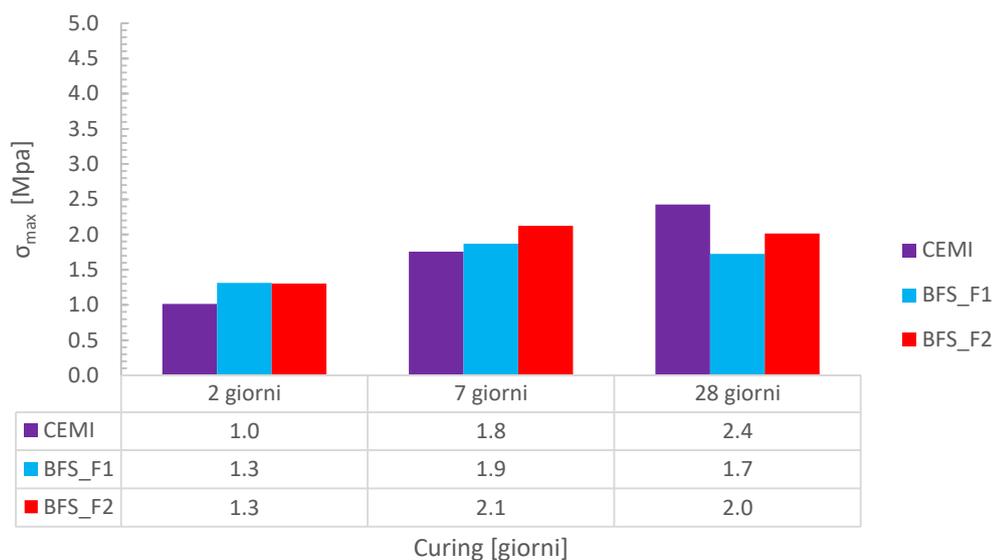


Figura 6-26: Effetto del legante sulla resistenza a flessione per miscele senza lattice

Per quanto riguarda i valori di resistenza a compressione si registra un graduale aumento della resistenza con il tempo di maturazione ed in particolare, a parte un'unica eccezione dovuta alla miscela BFS_F1 a 7 giorni, il conglomerato con migliori valori di resistenza a compressione risulta essere proprio quello con aggiunta del fluidificante 2 sia con sia senza lattice, con una percentuale che varia dal 10% al 29 % di resistenza in più rispetto alle altre miscele (Figura 6-27 e Figura 6-28).

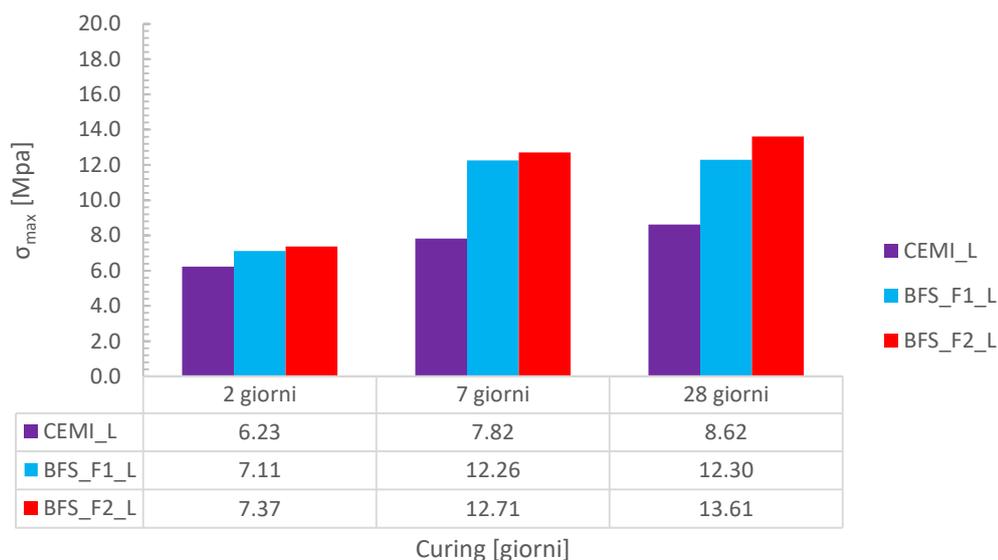


Figura 6-27: Effetto del legante sulla resistenza a compressione per miscele con lattice

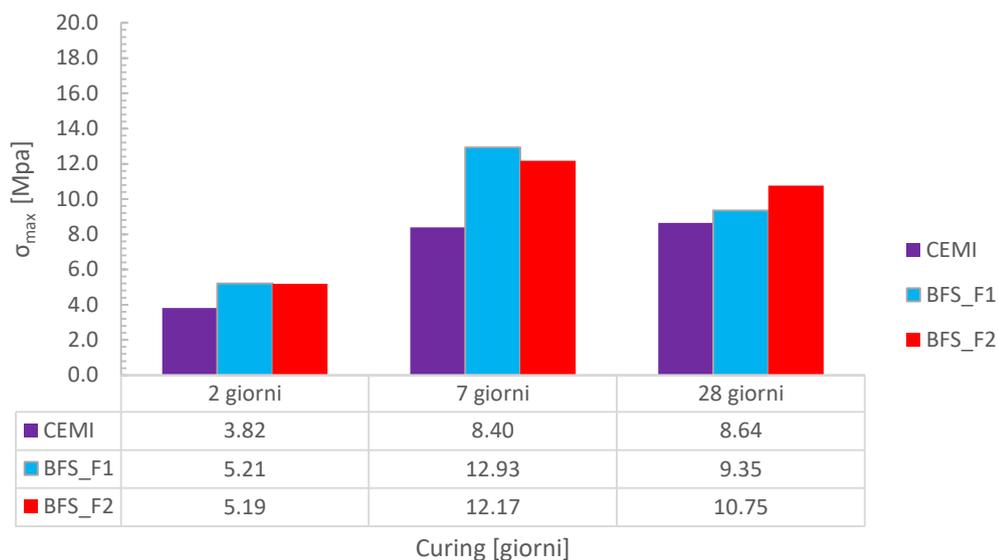


Figura 6-28: Effetto del legante sulla resistenza a compressione per miscele senza lattice

Volendo fornire una valutazione generale in termini di resistenze meccaniche, il migliore legante risulta essere la loppa alcali-attivata e, nello specifico, per questa sperimentazione la miscela ottimale è la BFS_F2_L con resistenza massima a flessione pari a 3,3 MPa e a compressione pari a 13,61 MPa.

6.2.2 Effetto del lattice

L'effetto del lattice è studiato in relazione ai valori di resistenza massima raggiunta sia a flessione che a compressione e all'energia di rottura. Non si indaga sui valori della densità,

poiché i campioni di conglomerato poroso sono stati confezionati manualmente, con un metodo di costipazione anch'esso manuale, quindi ne segue che i valori di densità risultino tutti pressoché simili sia nel caso di miscela senza lattice che con, proprio perché si è cercato di confezionare provini quanto più simili tra loro. I dati di densità ottenuti sono stati già riportati al capitolo 5.

Nello sviluppo delle resistenze, l'aggiunta del lattice conduce ad un aumento della resistenza a 28 giorni, sia a flessione che a compressione, per entrambe le tipologie di conglomerato (cementizio e geopolimerico). Nelle Figura 6-29, Figura 6-30 e Figura 6-31 sono riportati i dati per le prove a flessione su 4 punti dei travetti in conglomerato poroso, registrando i valori massimi a 28 giorni di stagionatura nel caso di aggiunta di lattice, con una differenza fino al 40% rispetto ai risultati ottenuti senza lattice.

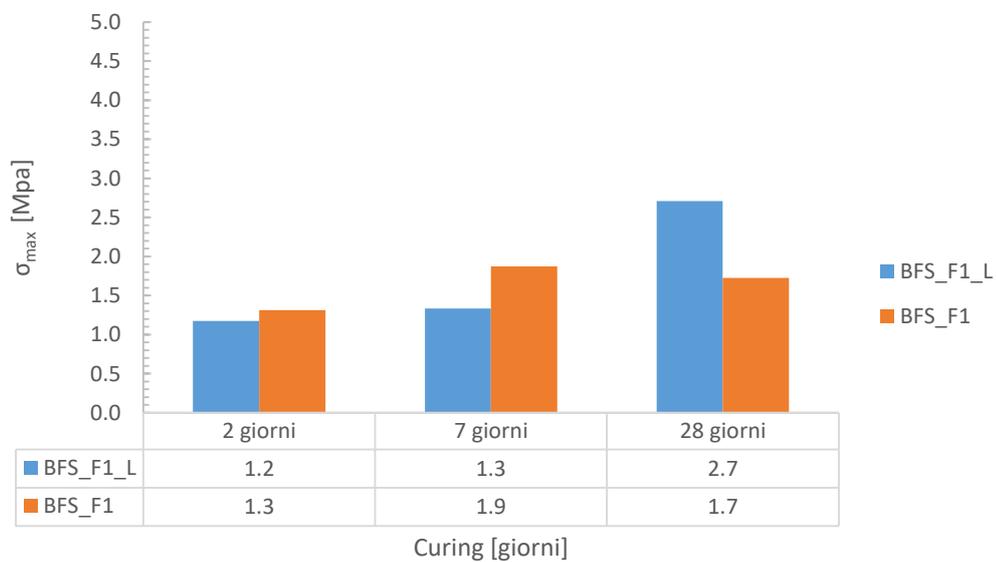


Figura 6-29: Effetto del lattice sulla resistenza a flessione per conglomerato BFS_F1

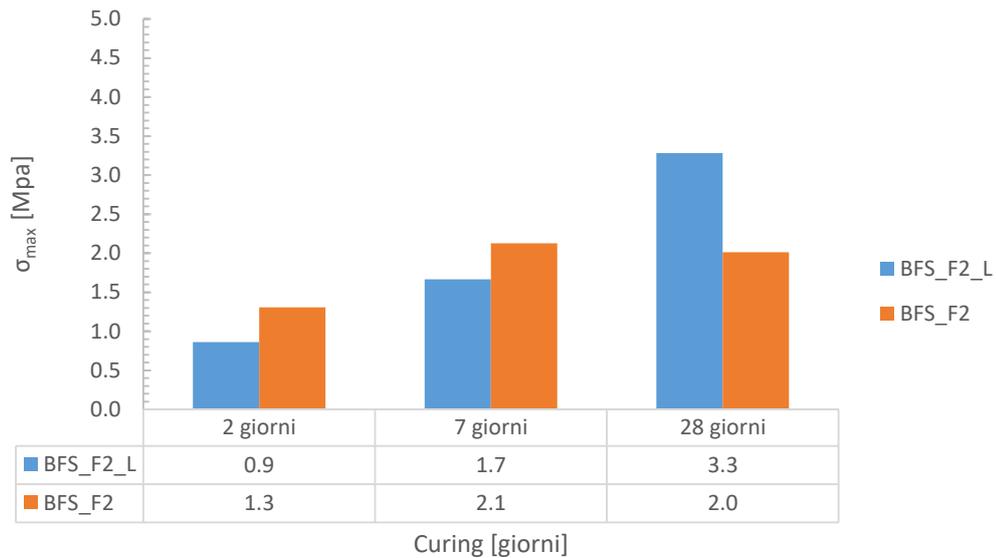


Figura 6-30: Effetto del lattice sulla resistenza a flessione per conglomerato BFS_F2

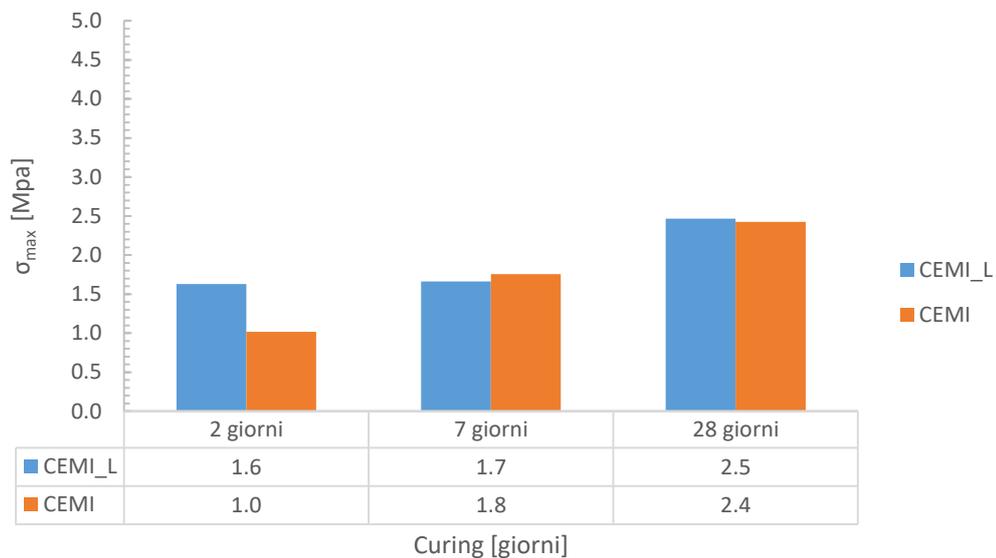


Figura 6-31: Effetto del lattice sulla resistenza a flessione per conglomerato CEMI

Di seguito si riportano invece i dati relativi alla resistenza a compressione determinata con le prove su campioni cilindrici. Anche in questo caso il lattice comporta un aumento fino al 20% della resistenza a 28 giorni di maturazione rispetto a campioni in cui esso non è presente (Figura 6-32, Figura 6-33 e Figura 6-34). Tuttavia gli effetti più visibili si ottengono sia a flessione che a compressione sulle miscele geopolimeriche, mentre i valori di resistenza a 28 giorni per miscele cementizie, testate sia a flessione che a compressione, risultano pressoché invariati con la presenza del lattice.

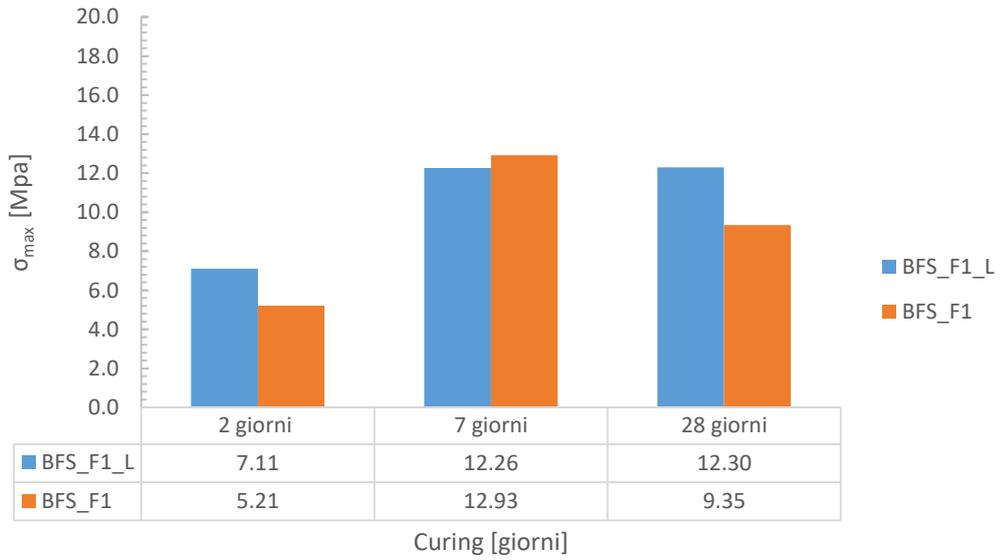


Figura 6-32: Effetto del lattice sulla resistenza a compressione per conglomerato BFS_F1

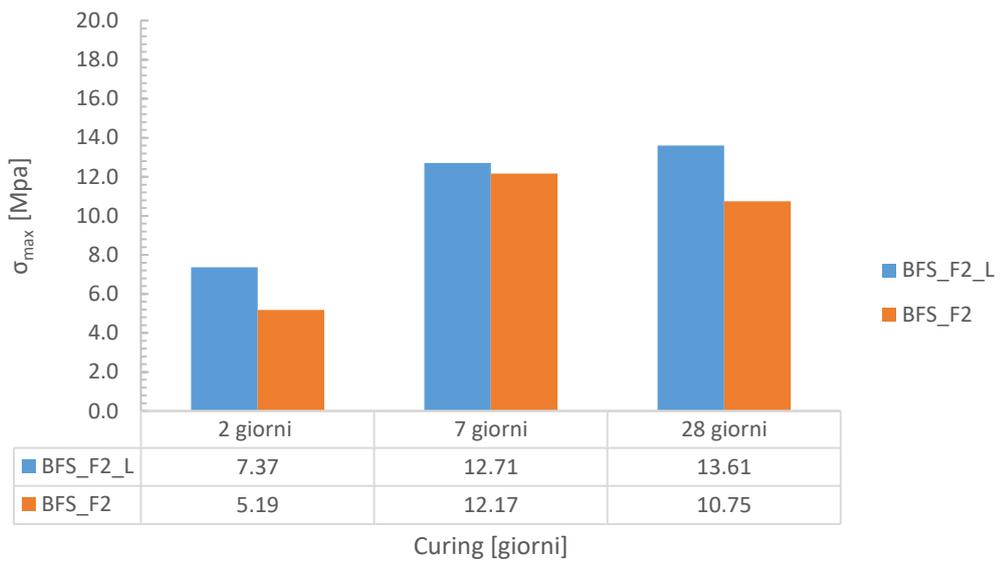


Figura 6-33: Effetto del lattice sulla resistenza a compressione per conglomerato BFS_F2

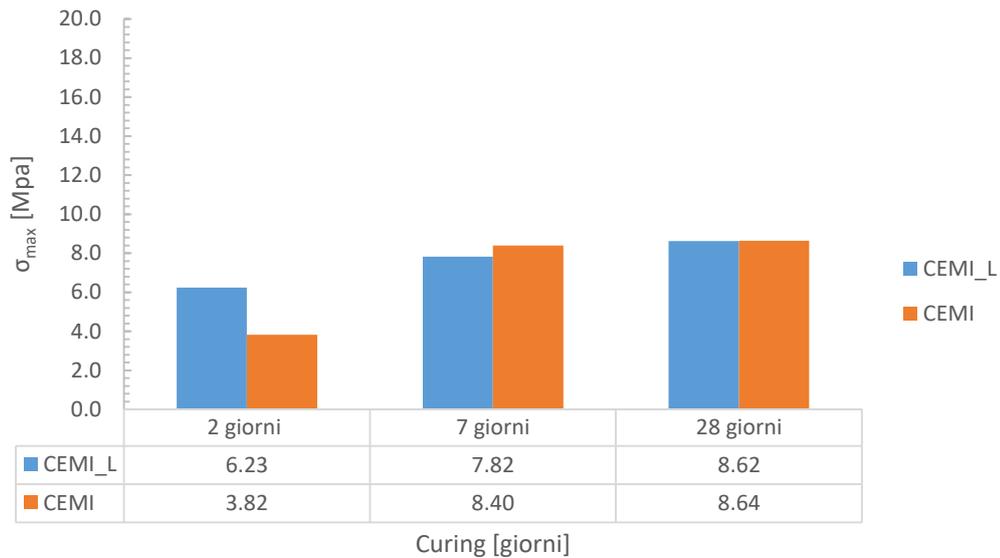


Figura 6-34: Effetto del lattice sulla resistenza a compressione per conglomerato CEMI

Successivamente è stato analizzato l'effetto del lattice in relazione all'energia di rottura ottenuta dalle curve sforzo-deformazione a compressione. Come è possibile vedere dai dati riportati nella Figura 6-35, Figura 6-36 e Figura 6-37 il lattice provoca un aumento della energia di rottura sia per conglomerati geopolimerici a base di loppa attivata che cementizi. Tranne per due eccezioni: quella relativa alla miscela BFS_F1 e al CEM I, entrambe stagionate a 7 giorni. Quanto detto tuttavia non entra in contrasto con quanto affermato in letteratura, secondo cui l'energia di rottura aumenta con l'aggiunta del lattice nel lungo termine, quindi trova conferma nei dati a 28 giorni di stagionatura. È interessante sottolineare che il conglomerato a base di loppa attivata alcalinamente raggiunge valori di energia di rottura superiori a quello a base di cemento Portland, superiori anche del 50%. Tuttavia i bassi valori di energia di rottura che si visualizzano nel complesso, si nota come il valore massimo raggiunto si attesti intorno ai 50 kPa·mm/mm, sono dovuti al fatto che si sta comunque lavorando con un materiale fragile e che quindi esplica bassissime riserve plastiche prima di arrivare a frattura.

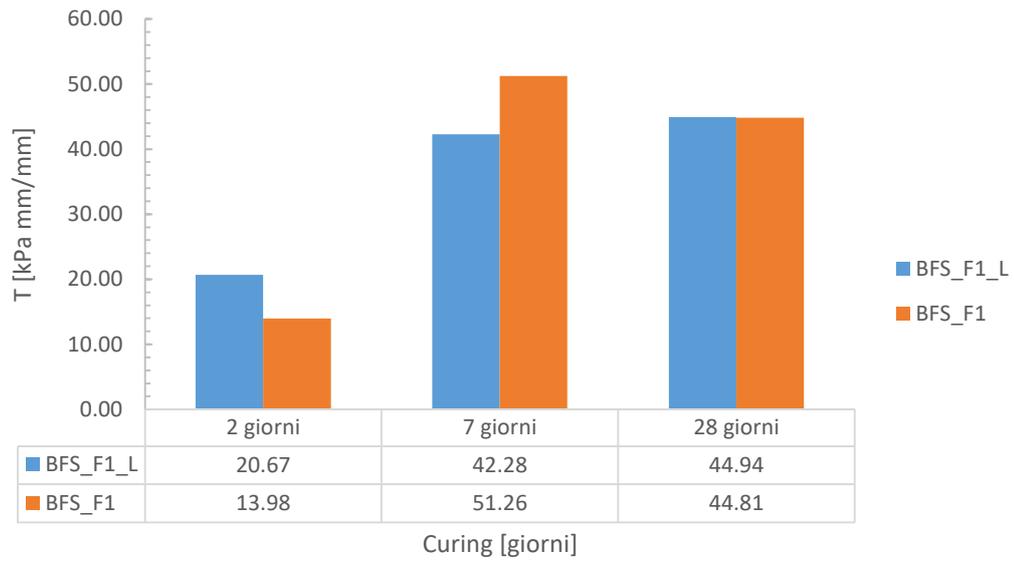


Figura 6-35: Effetto del lattice sull'energia di rottura per conglomerati in BFS_F1

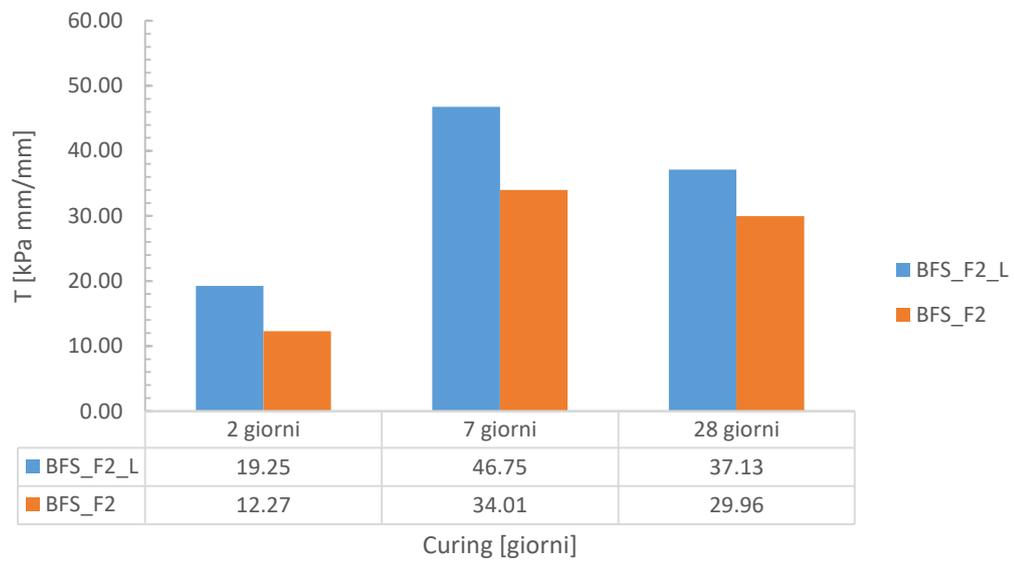


Figura 6-36: Effetto del lattice sull'energia di rottura per conglomerati in BFS_F2

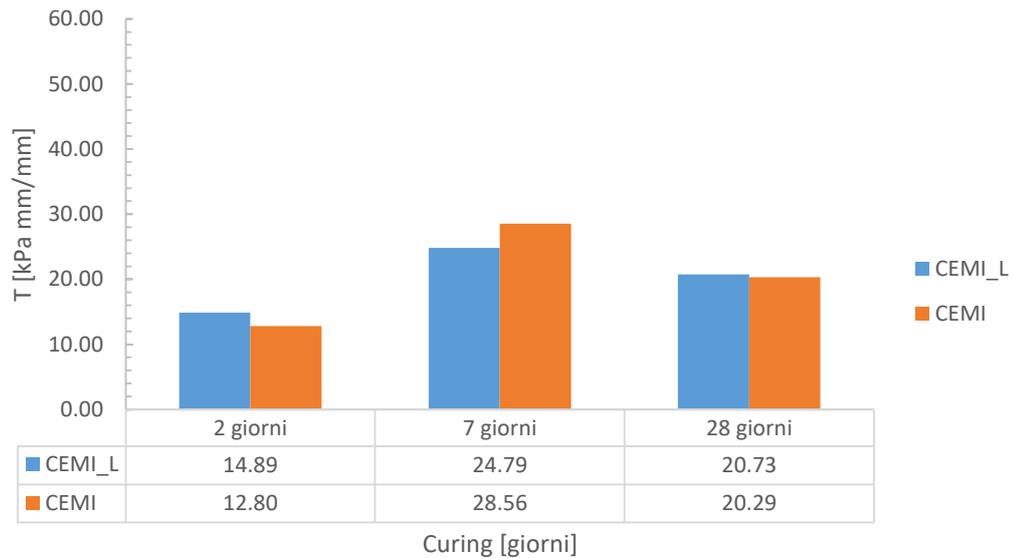


Figura 6-37: Effetto del lattice sull'energia di rottura per conglomerati in CEMI

6.2.3 Effetto del fluidificante

Come per le malte, anche in questo caso si è indagata quale tipologia di fluidificante conducesse a valori meccanici migliori. Nello specifico è stato studiato se il fluidificante a base di riduzione in acqua di lignisolfunato portasse al raggiungimento di migliori prestazioni rispetto a quelle ottenute con additivo a base di policarbossilato etere, confutando dunque gli aspetti negativi noti in letteratura alla scala delle malte e testati in questa stessa indagine.

Nelle Figura 6-38 e Figura 6-39 si ha un riscontro positivo in merito alle predette supposizioni. Il miglioramento della consistenza indotto dall'uso del fluidificante a base di lignisolfunato conduce anche ad un miglioramento della resistenza a flessione rispetto il conglomerato in cui si è impiegato il fluidificante 1. Inoltre è stato registrato un aumento in termini percentuali superiori al 18%.

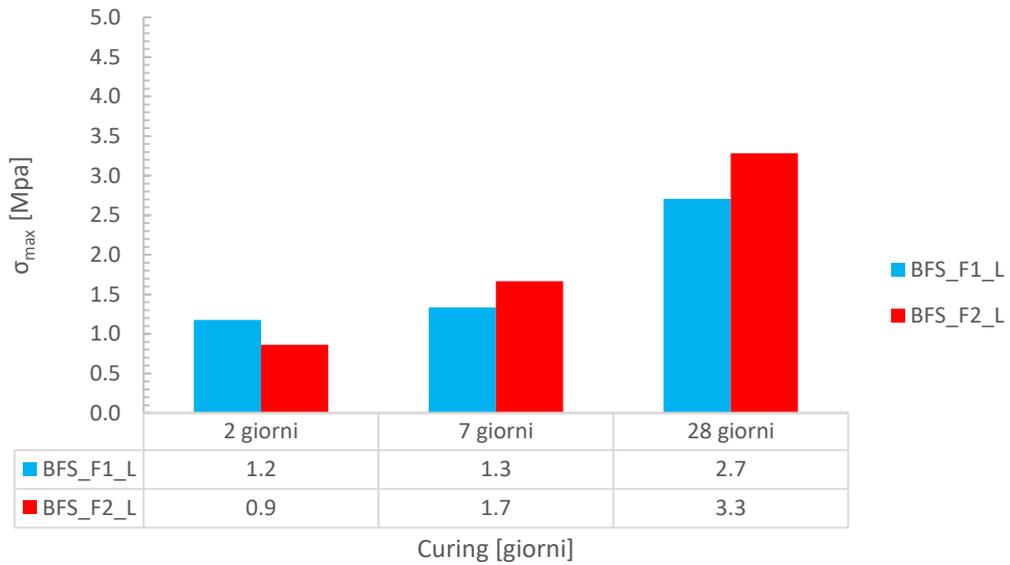


Figura 6-38: Effetto dei due fluidificanti differenti sulla resistenza a flessione in malte geopolimeriche con aggiunta di lattice

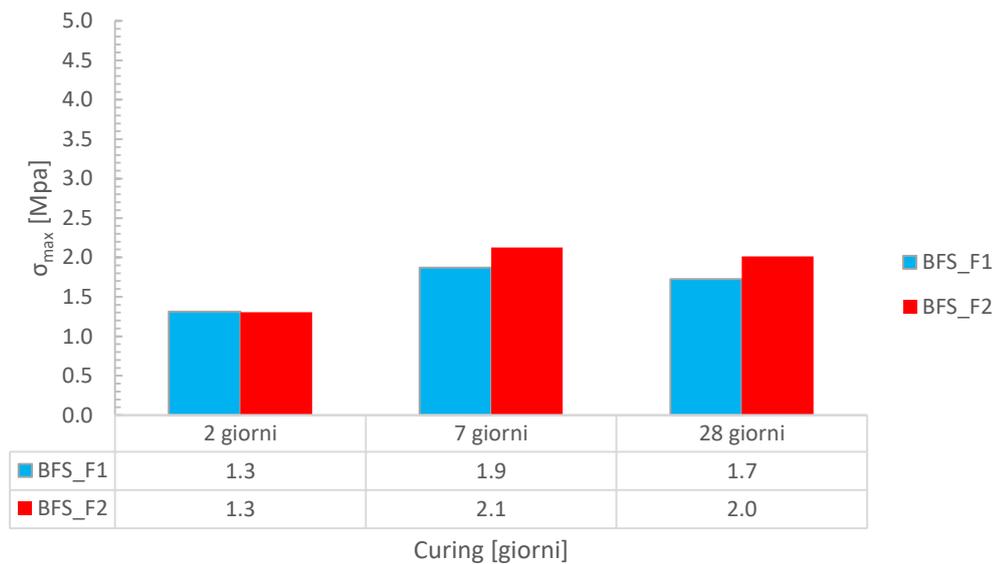


Figura 6-39: Effetto dei due fluidificanti differenti sulla resistenza a flessione in malte geopolimeriche senza lattice

Lo stesso vale tendenzialmente anche per i dati a compressione, che registrano con l'uso del fluidificante 2, un aumento percentuale di resistenza prossimo al 10 %.

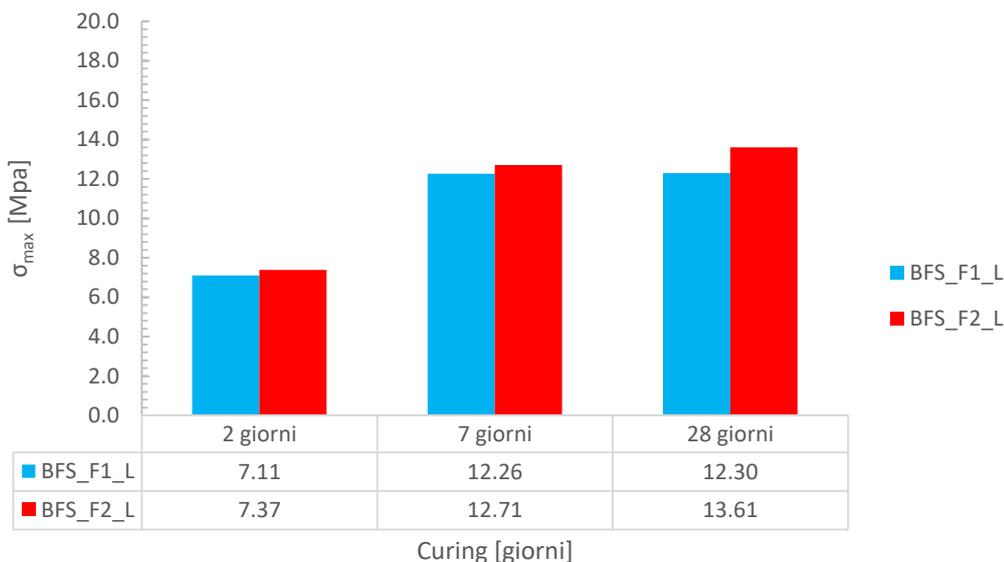


Figura 6-40: Effetto dei due fluidificanti differenti sulla resistenza a compressione in malte geopolimeriche con aggiunta di lattice

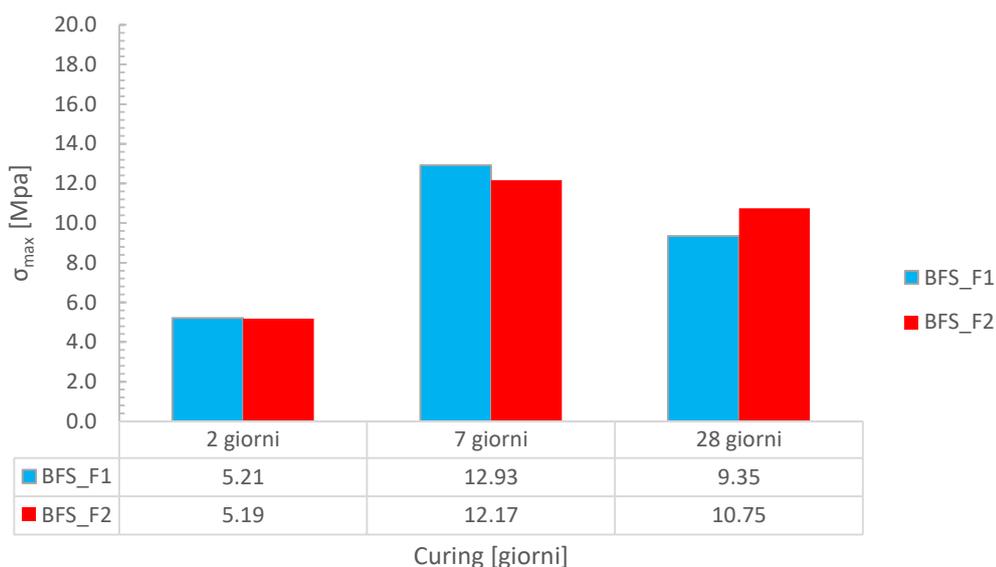


Figura 6-41: Effetto dei due fluidificanti differenti sulla resistenza a compressione in malte geopolimeriche senza lattice

È di grande importanza evidenziare che i conglomerati confezionati a temperatura ambiente in questa sperimentazione risultano ottime alternative, in termini di resistenza sia a flessione che a compressione sviluppate a 28 giorni di stagionatura, se confrontati con alcuni dei valori noti in letteratura e relativi a provini meno porosi (quindi con minore percentuale di vuoti).

Dall'analisi bibliografica infatti risulta che per calcestruzzi porosi secondo Tennis et al. (2004) la resistenza a compressione dopo 28 giorni è molto variabile, rimanendo comunque nell'intervallo di valori compresi tra 3,5 e 35,0 MPa, mentre quella a flessione varia tra 1,0 MPa e 3,8 MPa, in base alla compattazione, alla porosità e al rapporto acqua/cemento. Altri (Parisi, 2018) citano intervalli di resistenza a compressione pari a 3,5 ÷ 28,0 MPa e a flessione pari a

1,0 ÷ 3,8 MPa. Per conglomerati a base di legante attivato alcalinamente (nello specifico fly-ash soggetto a geopolimerizzazione, a 60°C per 48h) gli intervalli di resistenza a compressione e a flessione nel lungo termine sono risultati rispettivamente 5,4 ÷ 11,4 MPa e 0,7 ÷ 1,4 (Tawatchai et al., 2012). Infine Patil e Murnal (2014) hanno analizzato il comportamento di conglomerati a base di cemento con diverse percentuali di aggiunta di fly-ash, raggiungendo con il 70% di fly-ash e il 30% di cemento valori massimi a flessione pari a 3,3 MPa e a compressione pari a 21,4 MPa. In Tabella 6-3 è visualizzato il suddetto confronto, in cui si riportano anche le percentuali di vuoti. La percentuale dei vuoti ottenuta nel confezionamento dei campioni risulta molto importante, poiché è intuitivo pensare che campioni più compatti e con meno vuoti sviluppino ovviamente resistenze maggiori. Quanto detto è stato anche provato da Bhutta et al. (2011) che svolgendo uno studio sulla relazione fra lo sviluppo della resistenza meccanica per diversi campioni in conglomerato poroso e la percentuale dei vuoti ha provato l'esistenza una relazione lineare decrescente, confermando che ad un aumento dei vuoti si registra anche una diminuzione della resistenza meccanica.

Tabella 6-3: Confronto tra i valori di resistenza a compressione e flessione standard e di progetto ottenuti per campioni in conglomerato poroso stagionato 28 giorni

Curing	ID Conglomerato	Legante	$\sigma_{\max, \text{FLEX}}$	$\sigma_{\max, \text{COMPR}}$	%vuoti
			(MPa)	(MPa)	(%)
28 GIORNI	<u>Tennis et al.</u>	<u>Cemento</u>	<u>1.0 ÷ 3.5</u>	<u>3.5 ÷ 35</u>	<u>15 ÷ 25</u>
	<u>Tawatchai</u>	<u>Fly-ash attivato alcalinamente</u>	<u>0.7 ÷ 1.4</u>	<u>5.4 ÷ 11.4</u>	<u>18 ÷ 35</u>
	<u>Parisi</u>	<u>Cemento</u>	<u>1.0 ÷ 3.8</u>	<u>3.5 ÷ 28.0</u>	<u>15 ÷ 25</u>
	<u>Patil & Murnal</u>	<u>Cemento</u>	<u>1.5 ÷ 3.1</u>	<u>4.5 ÷ 20.2</u>	<u>15 ÷ 16</u>
	<u>Patil & Murnal</u>	<u>Cemento + Fly ash</u>	<u>1.9 ÷ 3.3</u>	<u>8.4 ÷ 21.4</u>	<u>15 ÷ 16</u>
	BFS_F1_L	Loppa attivato alcalinamente	2.7	12.3	25 ÷ 35
	BFS_F1	Loppa attivato alcalinamente	1.7	9.35	25 ÷ 35
	BFS_F2_L	Loppa attivato alcalinamente	3.3	13.61	25 ÷ 35
	BFS_F2	Loppa attivato alcalinamente	2	10.75	25 ÷ 35
	CEMI_L	Cemento	2.4	8.62	25 ÷ 35
	CEMI	Cemento	2.5	8.64	25 ÷ 35

Analisi visiva su campioni in conglomerato rotti

Da un'analisi visiva effettuata sui campioni di conglomerato rotti a compressione e flessione su 4 punti si è constatato come la rottura sia avvenuta con frattura dell'aggregato, conducendo alla valutazione che la malta ben si è prestata alla trasmissione delle sollecitazioni (Figura 6-42).

La rottura infatti è avvenuta "lato aggregato" e ciò significa che se al posto dell'aggregato calcareo si fosse utilizzato un aggregato più forte e resistente, si sarebbero potuti raggiungere valori di resistenza ultima più elevati di quelli registrati in questa indagine.

La scelta di utilizzare un aggregato di tipo calcareo, anziché uno derivante da rocce basalti è da ricondursi al colore chiaro. Nell'analisi visiva effettuata sulle superfici di rottura dei campioni in conglomerato, utilizzare un aggregato di colore bianco uniforme è servito a distinguere la parte *lapidea* da quella *legante* sulla superficie di rottura.

Inoltre l'utilizzo di un aggregato calcareo, meno forte rispetto ad uno tipicamente derivante da rocce basalti, potrebbe spiegare le basse resistenze ottenute testando i cilindri e i travetti in conglomerato. Tuttavia un'altra spiegazione in relazione sempre allo sviluppo contenuto delle resistenze è da ricondursi alla percentuale dei vuoti, che per alcuni campioni di questa sperimentazione risulta raggiungere addirittura il 35 %.



Figura 6-42: Superfici di rottura: a destra campione cilindrico rotto a flessione, a sinistra campione prismatico rotto a flessione su 4 punti. L'aggregato non si sgretola per cedimento della malta ma si spezza sotto effetto del carico di prova, a dimostrazione della bassa resistenza.

Confronto tra i risultati delle prove su malte e conglomerati porosi

Così come detto all'inizio di questo capitolo, le malte migliori in termini di resistenze meccaniche non sempre conducono alla stessa valutazione quando usate nel confezionamento dei conglomerati porosi. Questo perché la malta deve essere studiata anche in riferimento alla costituzione della matrice interna ai conglomerati stessi e in riferimento alle modalità con cui questa prende parte nell'unione tra gli aggregati. I dati sopra esposti dimostrano come tutte le ipotesi di partenza, fatte combinando i risultati di *consistenza* e di *resistenza* conducano ad affermare che la miscela migliore sia quella a base di loppa attivata con aggiunta di fluidificante 2, ovvero a base di riduzione in acqua di lignisolfunato, la BFS_F2_L. I valori di resistenza riportati per stagionatura di 28 giorni nel caso della BFS_F2_L risultano pari a 3,3 MPa a flessione e 13,61 MPa a compressione, confermando dunque come *migliore legante*, dal punto di vista delle resistenze per conglomerati porosi, la loppa attivata alcalinamente a discapito del più comune cemento Portland.

Conclusioni

L'obiettivo posto alla Tesi è stato quello di contribuire allo sviluppo di leganti alternativi al cemento Portland nel confezionamento di conglomerati porosi ad uso stradale. In particolare, è stata indagata l'attivazione alcalina della loppa di altoforno (*blast furnace slag*, BFS) sottoprodotto del processo industriale di produzione della ghisa.

Dall'analisi bibliografica è stata evidenziata l'assenza di studi in merito all'utilizzo della loppa d'altoforno per il confezionamento di conglomerati porosi, sebbene l'attivazione alcalina della loppa abbia già riscosso largo interesse, portandola a classificarsi come un legante alternativo a tutti gli effetti.

Lo studio svolto si è basato su un'indagine multi-scala comprendente le malte e i conglomerati cementizi porosi contenenti le medesime malte.

Sono state effettuate prove di caratterizzazione fisico-volumetrica su tutte le miscele, in modo da rilevarne la porosità, e prove di flessione e compressione per ottenere dati sulle resistenze meccaniche sia delle malte che dei conglomerati porosi stessi.

Sono stati studiati dapprima gli opportuni mix-design per le malte geopolimeriche e successivamente tra queste sono state scelte quelle maggiormente prestazionali in termini di consistenza e resistenza a trazione indiretta, usate poi per il confezionamento di provini in malta e conglomerato poroso. Nello specifico, lo studio è stato ripartito in scale di analisi differenti, in modo da ottenere prima dati sperimentali sulle malte scelte e successivamente sui conglomerati porosi, entrambi confezionati e testati a temperatura ambiente.

Basandosi sulle informazioni riportate in letteratura, è stato studiato l'effetto dei diversi leganti (cemento e loppa d'altoforno) e dei diversi additivi (lattice, fluidificante a base di polycarbossilato etere o a base di riduzione in acqua di lignisolfunato) sullo sviluppo delle resistenze e della rigidità del materiale.

I campioni prismatici di malta che hanno sviluppato resistenze meccaniche superiori sono stati quelli a base di loppa attivata. Dai dati di confronto tra i provini a base di malta cementizia con quelli a base geopolimerica, è risultato evidente come questi ultimi abbiano sviluppato resistenze superiori anche del 40 %.

Successivamente si è indagato l'effetto del lattice nel confezionamento dei provini di malta. I risultati delle prove a compressione confermano quanto riportato in bibliografia relativamente al mancato contributo di tale additivo allo sviluppo della resistenza a compressione. I test di laboratorio, infatti, hanno evidenziato come le malte con più elevati valori di resistenza a compressione risultino proprio quelle senza lattice.

L'analisi bibliografica ha anche evidenziato come l'aggiunta del lattice comporti un calo della densità (confermata anche dalle prove di questa indagine) e un aumento dell'energia di rottura. In relazione alla prova di flessione, quanto affermato sull'energia di rottura per malte contenenti lattice trova conferma solo nel caso di miscele geopolimeriche senza fluidificante (BFS e BFS_L). È stato provato, infatti, che l'aggiunta di lattice in miscele con presenza di fluidificanti migliori la capacità di sviluppare resistenze plastiche a flessione solo nel breve periodo, ma la peggiori a 28 giorni.

Dall'analisi combinata della letteratura e dei dati sperimentali è emerso, inoltre, che l'impiego di un fluidificante a base di riduzione in acqua di lignisolfonato (fluidificante 2), in miscela la cui frazione liquida è costituita da soluzione alcalina e non da acqua, garantisce una migliore consistenza rispetto ad uno a base di policarbossilato etere (fluidificante 1), ma non migliora le prestazioni meccaniche. Dai test svolti in laboratorio, infatti, i dati più interessanti in termini di resistenze ultime sono stati ottenuti usando la combinazione del legante geopolimerico (loppa) e del fluidificante a base di policarbossilato etere, individuando come migliore malta la BFS_F1, le cui resistenze a flessione e a compressione ottenute sono state rispettivamente pari a 9,64 MPa e 93,53 MPa. Le valutazioni, fatte sin qui hanno riguardato solo l'analisi alla scala delle malte. Tuttavia i risultati ottenuti in termini di consistenza, già durante l'indagine preliminare, hanno fatto ben sperare sull'utilizzo del lattice combinato al secondo fluidificante, poiché sebbene la migliore miscela sia risultata la BFS_F1 (senza lattice e con fluidificate 1), le elevate resistenze delle malte non sempre si esplicano quando queste lavorano insieme all'aggregato a costituzione del conglomerato. Questo perché quando si studiano le malte occorre che siano confezionate nelle stesse proporzioni tra costituenti in cui lavorano all'interno dei conglomerati cementizi, tenendo conto non solo delle resistenze meccaniche che queste riescono a raggiungere ma anche delle funzioni in termini di adeguata consistenza.

Alla scala di indagine superiore dei conglomerati sono stati confezionati conglomerati porosi con cemento e con loppa attivata, valutandone le caratteristiche volumetriche e meccaniche.

Le prove volumetriche hanno confermato che sia i conglomerati con cemento, che quelli con loppa attivata, presentano valori di *densità* e di *percentuale dei vuoti reale* conformi a quanto riportato in letteratura: valori di densità tra 1800 – 2300 kg/m³ e di percentuale dei vuoti compresi tra il 25% e il 35%. Inoltre si è riuscito a determinare livelli di addensamento

confrontabili sebbene sia stato utilizzato un sistema di confezionamento e di costipamento non ripetibile.

Studiando l'effetto del legante, così come per le malte anche per i conglomerati porosi sono risultati migliori i campioni confezionati con loppa alcali-attivata, piuttosto che in cemento Portland, raggiungendo nei primi resistenze a flessione e a compressione superiori ai secondi del 24 % e quasi del 38%, rispettivamente.

L'aggiunta del lattice nella realizzazione dei provini in conglomerato poroso ha generalmente migliorato le resistenze meccaniche di quest'ultimi, a differenza di quanto ottenuto per le malte. Ciò è dovuto al fatto che, come già detto, l'uso del lattice migliora la consistenza della miscela con la malta che più aderente all'aggregato. Ciò ne ha migliorato le resistenze grazie all'ottimo rivestimento dell'aggregato. In particolare, nel lungo tempo l'uso del lattice ha migliorato le prestazioni di tutti i conglomerati geopolimerici. Oltre le resistenze si sono valutate anche i valori di energia di rottura. In questo modo si è osservato come il lattice contribuisca allo sviluppo di deformazioni plastiche prima di arrivare a rottura; sebbene, in generale, i valori di energia di rottura per qualsiasi tipo di conglomerato siano risultati molto bassi e ciò indica che il materiale si comporta prettamente in modo *fragile*.

L'ipotesi fatta in seguito alle prove di consistenza sulle miscele, relativa all'uso ottimale combinato del fluidificante 2 e del lattice nella costituzione dei provini di conglomerato poroso, ha trovato perfetto riscontro nei dati di laboratorio.

Il conglomerato migliore infatti, in termini di resistenza sia a flessione sia a compressione, risulta essere proprio il BFS_F2_L, che a 28 giorni ha raggiunto resistenza massima pari a 3,3 MPa a flessione e 13,61 MPa a compressione, superando i minimi valori di resistenza noti in letteratura per questa tipologia di conglomerato.

I dati ottenuti in questa sperimentazione condurrebbero, dunque, alla promozione della loppa attivata alcalinamente a sostituzione del cemento Portland nella realizzazione di pavimentazioni stradali porose. Nello specifico sono stati ottenuti risultati incoraggianti inerenti:

- le elevate resistenze raggiunte per le malte geopolimeriche a base di loppa attivata;
- le elevate resistenze sviluppate dagli stessi conglomerati a base di loppa alcali-attivata;
- i rapporti in massa tra i costituenti di base ottimizzati per la malta geopolimerica;
- le prestazioni offerte dagli additivi funzionali specifici per le malte geopolimeriche.

Risultano tuttavia necessari:

- una procedura di confezionamento e costipamento che sia ripetibile e in grado di accrescere la densità dei campioni;
- ulteriori prove su campioni confezionati impiegando un aggregato "più forte" rispetto a quello di origine calcarea;
- test sulla permeabilità;

- test sulla durabilità;
- test sulla lisciviazione di elementi inquinanti (*leaching*);

che potrebbero, in futuro, avvalorare maggiormente i risultati ottenuti in questa sperimentazione e condurre ad interessanti impieghi del conglomerato poroso anche ad infrastrutture soggette a più elevati livelli di severità del traffico veicolare.

Bibliografia

- Ahiablame L.M., Engel, B.A., & Chaubey, I. 2012. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(7), 4253–4273.
- Bakharev T, Sanjayan JG, Cheng Y. Alkali activation of Australian slag cements. *Cem Concr Res* 1999; 29(1):113–20.
- Bakhareva T.,*, J.G. Sanjayana, Y.-B. Cheng; Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete, 2000; pagg. 1367-1374.
- Bassani M., Tefa L., Comino E., Rosso M. & Giurca F., Environmental and engineering performance assessment of biofilters and retention systems for pavement stormwater, *Transport Infrastructure and Systems*, pagg.160-161.
- Bhutta Amer Rafique M., K. Tsurutab, J. Mirza, Evaluation of high-performance porous concrete properties 2011, 67-73.
- Chandrappa A. K., Biligiri K. P., Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review, 262-274.
- Chindaprasirt P., Hatanaka S., Chareerat T., Mishima N. & Yuasa Y. "Cement paste characteristics and porous concrete properties." *Construction and Building Materials*, 2008: 22(5), 894-901.
- Davidovits J., "Geopolymers - Chemistry and Applications." Ed. *Institute Géopolymère, St. Quentin, France*, 2008: ISBN-13:9782951482012.
- Deb P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. "The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of

- geopolymer concrete cured at ambient temperature." *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 2014: 32-39.
- Dierkes Kuhlmann, & Kandasamy (2002). Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements. *Proc. 9th International conference on urban drainage, global solutions for urban drainage*.
- Dietz M.E., Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, air, and soil pollution*, 2007, 186(1-4), 351-363.
- Diniz Elvidio V., (1980). Porous Pavement, Phase 1 — Design and Operational Criteria, EPA-600/2-80-135, Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency Municipal, Environmental Research Laboratory; downloadable at www.epa.gov/ednrmrl/repository/abstrac2/abstra2.htm.
- Duran Atış, C., Bilim, C., Çelik, Ö. & Karahan, O. " Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar." *Construction and Building Materials*, 23(1), 2009: 548-555.
- Duxson P., J. L. Provis, Grant C. Lukey, Jannie S.J. van Deventer. "The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'." *Cement and Concrete Research* 37 1590-1597., 2007.
- Eisenberg Bethany, LEED AP, Kelly Collins Lindow, PE, David R. Smith, *Permeable Pavements, Chapter 1: Permeable Pavement System Designs*; sponsored by The Low Impact Development Committee of: The Urban Water Resources Research Council; The Environmental and Water Resources Institute and The American Society of Civil Engineers, 2015.
- Eisenberg B., Collins Lindow, K. & Smith, D.R. 2015. *Permeable Pavements*. Reston VA: American Society of Civil Engineers.
- Erdogan TY., Concrete. Ankara: Metu Press; 2003 (in Turkish).-5 ACI Committee 116, 1 16R-90, Cement and Concrete Terminology, ACI Manual of Concrete Practice, 1994.
- Escalante García J. I., Campos-Venegas, K., Gorokhovskiy, A., & Fernández, A. " Cementitious composites of pulverised fuel ash and blast furnace slag activated by sodium silicate: effect of Na₂O concentration and modulus." *Advances in Applied Ceramics*, 105(4), 2006: 201-208.
- Ferguson B.K., 2005. *Porous pavements*. CRC Press. Gilbert, J.K. & Clausen, J.C. 2006. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut. *Water Research*, 40(4), 826-832.
- Ferna'ndez-Jime'nez A., Palomo J.G., Puertas F., Alkali-activated slag mortars. Mechanical strength behaviour, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1313- 1321.

- Ferna'ndez-Jime'nez A., Cementos de escorias activadas alcalinamente: influencia de las variables y modelizacio'n del proceso, Doctoral Thesis,UAM, 2000.
- Gaines James M., Water Potential, Outlook Urban Health and Well-being, Macmillan Publishers Limited, 17 March 2016, Vol 531, Nature S54,S5.5.
- Gaudiuso I., Conglomerati per pavimentazioni stradali porose. Indagine di laboratorio sul comportamento tenso-deformativo di malte cementizie e geopolimeriche, 2017.
- Gartner E., (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO2" cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489–1498.
- Glukhovskij V., Y. Zaitsev, V. Pakhomow, Slag-alkaline cements and concretes—Structures, properties, technological and economical aspects of the use, *Silic. Ind.* 10 (1983) 197–200.2-6.
- Hardjito D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. "Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. ." *Civil engineering dimension*, 6(2), 2004: 88.
- <https://environment.arlingtonva.us/stormwater-watersheds/>, Arlingtonva - Web Page
- <https://www.inconcreto.net/6916-il-calcestruzzo-drenante-caratteristiche-green-e-principali-impieghi>, inCONCRETO –Web page
- <http://sviluppoeconomico.gov>, Sviluppo economico - Web page
- <http://www.bae.ncsu.edu/topic/permeable-pavement>, AE Permeable Pavement Research - Web page
- Hunt W., Szpir L., Permeable pavements, green roofs, and cisterns stormwater treatment practices for low-impact development (2006).
- Islam Azizul, Alengaram U. Johnson, Jumaat Mohd Zamin, Bashar Iftekhair Ibnul, The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar, 2013, 833-841.
- Ismail I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. J. "Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash." *Cement and Concrete Composites*, 45, 2014: 125-135.
- Khale D., R. Chaudhary. "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review." *J. Mater. Sci. Vol. 42(9)*, 2007: 729-46.
- Khalifa S. Al-Jabri *, Abdullah H. Al-Saidy, Ramzi Taha, Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete, 933-938, 2011.
- Khurd V.G., Nitish M. Patil, Experimental Study of Properties of Pervious Concrete as a Pavement Material, International Journal of Advanced Engineering and Nano Technology (IJAENT), ISSN: 2347-6389, Volume-2 Issue-9, August 2015.

- Kumar S., Kumar, R., & Mehrotra, S. P. "Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer." *Journal of Materials Science*, 45(3), 2010: 607-615.
- Leonelli C., Romagnoli M. *Geopolimeri: Polimeri inorganici chimicamente attivati, a cura di C. Leonelli e M. Romagnoli*. Bologna: I.Cer.S., 2013.
- Lian C., Y. Zhuge, Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation, Elsevier Ltd, 2010.
- Lin N., Emanuel, K., Oppenheimer, M. & Vanmarcke, E. *Nature Clim. Change* 2, 462–467 (2012); Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J. & Corfee- Morlot, J. *Nature Clim. Change* 3, 802–806 (2013); Rotzoll, K. & Fletcher, C. H. *Nature Clim. Change* 3, 477–481 (2013).
- Meininger Richard C., "No-Fine Pervious Concrete for Paving", *Concrete International*, vol.10, 1988, pp. 20-27.
- Pagotto C., and Legret M. (1999) An attempt to modelize the pollutant loadings in runoff water from motorway pavement (in French). Proceedings of the International Conference Novatech 98, 4±6 May 1998, Lyon, France, Vol. 1. pp. 47±55.
- Palmero P., Formia, A., Tulliani, J.-M., & Antonaci, P. (2014). Processing and applications of geopolymers as sustainable alternative to traditional cement. *5th International Conference on Development, Energy, Environment, Economics (DEEE '14)*, 213–221.
- Parisi C., *Il Calcestruzzo drenante, caratteristiche "green" e principali impieghi*, <https://www.ingenio-web.it/6779-il-calcestruzzo-drenante-caratteristiche-green-e-principali-impieghi>, 9/08/2018.
- Patil, Praveenkumar & Murnal, Santosh M, *Study on the Properties of Pervious Concrete*, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3 Issue 5, May 2014, pp. 819-822.
- Phair J.W., J.S.J. Van Deventer. "Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers".
- Puertas F., T. Amat, A. Fernández-Jime'nez, T. Va'zquez, *Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres*; Eduardo Torroja Institute (CSIC), P.O. Box 19002, 28080, Madrid, Spai Received 1 August 2002; accepted 27 June 2003.
- Rossetti V., *Il calcestruzzo – Materiali e tecnologia*, Mc Graw-Hill, Milano, 2003.
- Sarker, P. K. (2011). Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete. *Materials and Structures*, 44(5), 1021–1030.
- Shu X., Huang B., Wu H., Dong Q., Burdette E.G. "Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures." *Construction and building materials.*, 2011: 25(8),3187–3192.

-
- Tawatchai Tho-in, Vanchai Sata, Prinya Chindaprasirt, Chai Jaturapitakkul, *Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete*, 2012, 366-371.
- Tennis Paul, D.; Leming, Michael, L.; and Akers, David, J., *Pervious Concrete Pavements*, EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2004, 36 pages.
- US EPA (US Environmental Protection Agency) 1999. *Stormwater technology fact sheet. Porous pavement*. Washington, D.C: Office of Water, EPA 832-F-99-023.
- van Leeuwen K., 2015. Too little water in too many cities. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(1), 171–173.
- Wang K., Schaefer, V. R., Kevern, J. T., & Suleiman, M. T. "Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete." *In Proceedings of the 2006 NRMCA Concrete Technology Forum—Focus on Pervious Concrete.*, 2006.
- Wang R., Wang, P. "Function of styrene-acrylic ester copolymer latex in cement mortar." *Materials and Structures*, 2010: 43(4), 443–45.
- Wang S. D., X.C. Pu, K.L. Scrivener, P.L. Pratt, Alkali-activated cement and concrete. A review of propertie and problems, *Adv. Cem. Res.* 7 (27) (1995) 93– 102.
- Yang J., & Jiang G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement material. *Cement and concrete research* 33, 381-386.
- Zhao R., & Sanjayan, J. G. (2011). Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. *Magazine of Concrete Research*, 63(3), 163–173.

Indice delle figure

Figura I-0-1: Relazione tra copertura impermeabile e smaltimento superficiale delle acque. La percentuale di deflusso del 10% in ambiente rurale raggiunge picchi del 55 % in caso di quasi totale impermeabilizzazione del suolo, con elevata riduzione dell'acqua di infiltrazione (50% nel caso di terreno naturale vs 15% in suolo totalmente impermeabile). (https://environment.arlingtonva.us/stormwater-watersheds/).....	6
Figura 1-1: Percentuali di superfici costruite per aree commerciali, aree residenziali e singole unità abitative (Ferguson, 2005)	9
Figura 1-2: Schema "Sponge City" (Lin. et al., 2013). La tipica struttura di una "Città Spugna" prevede l'uso combinato di sistemi di drenaggio e deposito, e di pavimentazioni permeabili per l'assorbimento dell'acqua piovana.	10
Figura 1-3: A-Conglomerato cementizio poroso, B-Conglomerato bituminoso poroso (BAE, N.C. State University).....	11
Figura 1-4: Conglomerato cementizio poroso permeabile all'acqua. A sinistra è possibile notare il fenomeno dell'infiltrazione con mancato ruscellamento superficiale su una pavimentazione stradale, a destra si evidenzia il passaggio dell'acqua attraverso un campione in conglomerato poroso.	11
Figura 1-5: Tipologie di pavimentazioni permeabili a blocchi: a. blocchi in cotto, b. blocchi in clinker, c. grigliato in cotto con vegetazione, d. blocchi in clinker con vegetazione (Dierkes et al.,2002).	11
Figura 1-6: Sistema chiuso (a sinistra) e aperto (a destra) (Eisenberg P.,2015).....	13
Figura 1-7: Confronto fra i coefficienti di aderenze per differenti tipologie di pavimentazioni (Diniz, 1980).	13
Figura 1-8: Meccanismo di trasferimento dell'acqua al sottosuolo.....	15
Figura 1-9: Valutazione visiva della consistenza della miscela fresca di un calcestruzzo poroso: (a) eccesso di fase legante, (b) consistenza ottimale, (c) miscela sciola (Tennis, 2004).....	16

Figura 1-10: a. Messa in opera, b. compattazione e c. applicazione dei teli in fase di maturazione per prevenire l'eventuale perdita di umidità (foto di Banka da Tennis, 2004) ..	18
Figura 1-11: Strutture tridimensionali di silico-alluminati (Davidovits, 2002)	20
Figura 1-12: Diagramma di Ashby che rappresenta le differenti classi di materiali in funzione della resistenza a compressione e densità	21
Figura 2-1: Modello schematico del conglomerato poroso. La malta riveste l'aggregato e funge da matrice per il trasferimento delle sollecitazioni (Yang & Jiang, 2000).....	25
Figura 2-2: Flow chart esplicativo dello sviluppo di indagine	27
Figura 3-1: Composizione leganti usati	30
Figura 3-2 Curva granulometrica aggregato calcareo	32
Figura 3-3: A destra scaglie di soda caustica, a sinistra becker su agitatore magnetico	35
Figura 4-1: Valutazione consistenza "A:PESSIMA; B:SCARSA; C:QUASI BUONA; D:BUONA e E:OTTIMA"	37
Figura 4-2: Schema della sollecitazione uniassiale di compressione	40
Figura 4-3: Pressa statica	41
Figura 4-4: Campione rotto alla prova di trazione indiretta	41
Figura 4-5: Dipendenza tra il rapporto mal/a e il valore di resistenza a trazione indiretta a 7 giorni, per singole miscele	44
Figura 4-6: A sinistra stampi per provini prismatici di 80x20x20 mm, a destra mescolatrice costituita da planetaria e da paletta in acciaio inossidabile	46
Figura 4-7: A sinistra provini finiti, a destra apparecchiatura a scosse per la compattazione dei provini in malta.....	46
Figura 4-8: A: Estrusore; B: Ambiente umido per stagionatura dei provini	47
Figura 4-9: A sinistra kit di prova per la flessione su 3 punti, a destra kit di prova per la prova a compressione	48
Figura 4-10: Pressa statica	49
Figura 4-11: Schema posizionamento provino sui supporti di flessione del test di flessione su 3 punti.....	50
Figura 4-12: Provini della stessa malta, rotti a flessione generando due monconi	50
Figura 4-13: Schema posizionamento provino sul supporto per la prova a compressione	51
Figura 4-14: Espansione laterale del provino rotto e moncone rotto a compressione	52
Figura 4-15: Grafici delle curve sforzo-deformazione ottenute come output dalla pressa statica	53
Figura 4-16: Prolungamento del tratto lineare sull'asse x per la determinazione di ϵ_0	53
Figura 4-17: Modulo tangente e secante sulla Curva corretta.....	54
Figura 4-18: Energia di deformazione	55
Figura 4-19: A sinistra fustella, tubo e cilindro (mini-rullo) per la compattazione manuale, a destra condizionamento dei cilindri in ambiente umido	58
Figura 4-20: Confezionamento provino.....	59
Figura 4-21: Costipamento strato superficiale e visualizzazione superficie piana	59
Figura 4-22: Prova del guanto e Stagionatura in ambiente asciutto.....	60
Figura 4-23: Picnometro in fase di deaerazione e pesatura finale.....	60

Figura 4-24: Posizionamento campione dentro l'apparecchiatura Corelok e Campione dopo deaerazione	62
Figura 4-25: a. apparecchiatura Zwick Roell, b. corretta posizione di prova del provino e c. campione cilindrico rotto a compressione	64
Figura 4-26: Schema posizionamento provino sui supporti di flessione del test di flessione su 4 punti.....	64
Figura 4-27: Monconi prodotti dalla rottura a flessione del travetto.....	65
Figura 6-1: Effetto del legante sulla resistenza a flessione per malte con lattice. (*) Dati ottenuti dalla tesi di Gaudioso.....	90
Figura 6-2: Effetto del legante sulla resistenza a flessione per malte senza lattice. (*) Dati ottenuti dalla tesi di Gaudioso	91
Figura 6-3: Effetto del legante sulla resistenza a compressione per malte con lattice. (*) Dati ottenuti dalla tesi di Gaudioso	91
Figura 6-4: Effetto del legante sulla resistenza a compressione per malte senza lattice. (*) Dati ottenuti dalla tesi di Gaudioso	92
Figura 6-5: Confronto resistenze a flessione tra miscela LOP_DES e BFS con lattice	93
Figura 6-6: Confronto resistenze a flessione tra miscela LOP_DES e BFS senza lattice	93
Figura 6-7: Confronto resistenze a compressione tra miscela LOP_DES e BFS con lattice	94
Figura 6-8: Confronto resistenze a compressione tra miscela LOP_DES e BFS senza lattice.....	94
Figura 6-9: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a flessione per provini di malta BFS	95
Figura 6-10: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a flessione per provini di malta BFS con aggiunta di fluidificante a base di policarbossilato etere	96
Figura 6-11: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a flessione per provini di malta BFS con aggiunta di fluidificante a base di lignisolfunato	96
Figura 6-12: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a compressione per provini di malta BFS	97
Figura 6-13: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a compressione per provini di malta BFS con aggiunta di fluidificante a base di policarbossilato etere.....	97
Figura 6-14: Effetto del lattice sullo sviluppo della resistenza massima a compressione per provini di malta BFS con aggiunta di fluidificante a base di lignisolfunato.....	98
Figura 6-15: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a flessione per malte a base di loppa BFS.....	99
Figura 6-16: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a flessione per malte a base di loppa BFS con aggiunta del fluidificate a base di policarbossilato etere.....	99
Figura 6-17: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a flessione per malte a base di loppa BFS con aggiunta del fluidificate a base di lignisolfunato.....	100
Figura 6-18: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a compressione per malte a base di loppa BFS	101
Figura 6-19: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a compressione per malte a base di loppa BFS con aggiunta del fluidificate a base di policarbossilato etere.....	101
Figura 6-20: Effetto del lattice sull'energia di rottura ottenuta dalle curve σ - ϵ a compressione per malte a base di loppa BFS con aggiunta del fluidificate a base di lignisolfunato	102

Figura 6-21: Effetto dei diversi fluidificanti sulla resistenza a flessione, i per miscele di loppa senza lattice	103
Figura 6-22: Effetto dei diversi fluidificanti sulla resistenza a flessione, per miscele di loppa con lattice	104
Figura 6-23: Effetto dei diversi fluidificanti sulla resistenza a compressione, per miscele di loppa senza lattice	104
Figura 6-24: Effetto dei diversi fluidificanti sulla resistenza a compressione, per miscele di loppa con lattice	105
Figura 6-25: Effetto del legante sulla resistenza a flessione per miscele con lattice.....	107
Figura 6-26: Effetto del legante sulla resistenza a flessione per miscele senza lattice	107
Figura 6-27: Effetto del legante sulla resistenza a compressione per miscele con lattice	108
Figura 6-28: Effetto del legante sulla resistenza a compressione per miscele senza lattice .	108
Figura 6-29: Effetto del lattice sulla resistenza a flessione per conglomerato BFS_F1	109
Figura 6-30: Effetto del lattice sulla resistenza a flessione per conglomerato BFS_F2	110
Figura 6-31: Effetto del lattice sulla resistenza a flessione per conglomerato CEMI.....	110
Figura 6-32: Effetto del lattice sulla resistenza a compressione per conglomerato BFS_F1 .	111
Figura 6-33: Effetto del lattice sulla resistenza a compressione per conglomerato BFS_F2 .	111
Figura 6-34: Effetto del lattice sulla resistenza a compressione per conglomerato CEMI	112
Figura 6-35: Effetto del lattice sull'energia di rottura per conglomerati in BFS_F1	113
Figura 6-36: Effetto del lattice sull'energia di rottura per conglomerati in BFS_F2	113
Figura 6-37: Effetto del lattice sull'energia di rottura per conglomerati in CEMI.....	114
Figura 6-38: Effetto dei due fluidificanti differenti sulla resistenza a flessione in malte geopolimeriche con aggiunta di lattice	115
Figura 6-39: Effetto dei due fluidificanti differenti sulla resistenza a flessione in malte geopolimeriche senza lattice.....	115
Figura 6-40: Effetto dei due fluidificanti differenti sulla resistenza a compressione in malte geopolimeriche con aggiunta di lattice	116
Figura 6-41: Effetto dei due fluidificanti differenti sulla resistenza a compressione in malte geopolimeriche senza lattice.....	116
Figura 6-42: Superfici di rottura: a destra campione cilindrico rotto a flessione, a sinistra campione prismatico rotto a flessione su 4 punti. L'aggregato non si sgretola per cedimento della malta ma si spezza sotto effetto del carico di prova, a dimostrazione della bassa resistenza.....	118

Indice delle tabelle

Tabella 1-1: Carico totale di inquinante presente nell'acqua di deflusso per i due diversi tipi di pavimentazione (Pagotto, 1995,2000)	13
Tabella 1-2: Proprietà indicative del calcestruzzo drenante	18
Tabella 1-3: Valori resistenze meccaniche su differenti malte cementizie e a base di loppa d'altoforno (Puertas et al.,2003). La tabella mostra come a 28 giorni la resistenza a compressione per malte a base di loppa superi del 40% quella relativa a malte cementizie .	24
Tabella 3-1: Risultati delle analisi XRF eseguite sul cemento Portland e sulla loppa macinata (Gaudiuso, 2017)	31
Tabella 3-2: Confronto fra i due fluidificanti usati nella sperimentazione.....	33
Tabella 4-1: Rapporti fra i costituenti dei mix-design ottimali per miscele cementizie	37
Tabella 4-2: Rapporti fra i costituenti delle ricette studiate per miscele geopolimeriche, con lattice	38
Tabella 4-3: Rapporti fra i costituenti delle ricette studiate per miscele geopolimeriche, senza lattice	39
Tabella 4-4: Progetto di miscela 5	41
Tabella 4-5: Progetto di miscela 20	41
Tabella 4-6: Progetto di miscela 11	42
Tabella 4-7: Progetto di miscela 12	42
Tabella 4-8: Progetto di miscela 14	42
Tabella 4-9: Progetto di miscela 6_NL.....	42
Tabella 4-10: Progetto di miscela 11_NL.....	42
Tabella 4-11: Valori di Resistenza a trazione indiretta a 7 giorni, per singole miscele.....	43
Tabella 4-12: Rapporti in massa tra i componenti delle malte alcali-attivate	45
Tabella 4-13: Ricetta conglomerato cementizio poroso	56
Tabella 4-14: Ricetta conglomerato poroso alcali-attivato.....	56
Tabella 5-1: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di flessione su campioni prismatici di BFS, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura.....	67

Tabella 5-2: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di flessione su campioni prismatici di BFS_F1, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura.....	68
Tabella 5-3: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di flessione su campioni prismatici di BFS_F2, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura.....	69
Tabella 5-4: Risultati prove di flessione su provini di malta stagionati 2 giorni.....	71
Tabella 5-5: Risultati prove di flessione su provini di malta stagionati 7 giorni.....	72
Tabella 5-6: Risultati prove di flessione su provini di malta stagionati 28 giorni.....	73
Tabella 5-7: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni prismatici di BFS, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura.....	74
Tabella 5-8: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni prismatici di BFS_F1, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura.....	75
Tabella 5-9: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni prismatici di BFS_F2, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura.....	76
Tabella 5-10: Risultati prove di compressione su provini di malta stagionati 2 giorni	77
Tabella 5-11: Risultati prove di compressione su provini di malta stagionati 7 giorni	78
Tabella 5-12: Risultati prove di compressione su provini di malta stagionati 28 giorni	79
Tabella 5-13: Determinazione % vuoti geometrica per miscele indurite 2 giorni	80
Tabella 5-14: Caratterizzazione volumetrica delle miscele stagionate 7 giorni.....	81
Tabella 5-15: Caratterizzazione volumetrica delle miscele stagionate 28 giorni.....	81
Tabella 5-16: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni cilindrici di conglomerato a base di BFS_F1, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura	82
Tabella 5-17: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni cilindrici di conglomerato a base di BFS_F2, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura	83
Tabella 5-18: Curve sforzo-deformazione ottenute dalle prove di compressione su campioni cilindrici di conglomerato a base di CEMI, con e senza lattice, a diversi tempi di stagionatura	84
Tabella 5-19: Risultati prove di compressione su conglomerati stagionati 2 giorni	85
Tabella 5-20: Risultati prove di compressione su conglomerati stagionati 7 giorni	86
Tabella 5-21: Risultati prove di compressione su conglomerati stagionati 28 giorni	86
Tabella 5-22: Risultati prove di flessione su conglomerati stagionati 2 giorni	87
Tabella 5-23: Risultati prove di flessione su conglomerati stagionati 7 giorni	88
Tabella 5-24: Risultati prove di flessione su conglomerati stagionati 28 giorni	88
Tabella 6-1: Rapporti tra i costituenti delle malte geopolimeriche studiate precedentemente e in questa indagine	92
Tabella 6-2: Confronto tra valori di resistenza riportati in letteratura e valori ottenuti dall'indagine svolta su malte geopolimeriche.....	106
Tabella 6-3: Confronto tra i valori di resistenza a compressione e flessione standard e di progetto ottenuti per campioni in conglomerato poroso stagionato 28 giorni	117

Allegati

Indice degli allegati

A.1 Scheda tecnica del cemento	136
A.2 Scheda tecnica dell'aggregato	137
A.3 Scheda tecnica fluidificante 1	138
A.4 Scheda tecnica fluidificante 2	140
A.5 Scheda tecnica lattice	142
A.6 Scheda tecnica viscosizzante	145
A.7 Scheda tecnica disarmante	146
A.8 Scheda tecnica silicato	148
A.9 Scheda tecnica soda caustica.....	149

A.1 Scheda tecnica del cemento

 Buzzi Unicem			
SCHEDA TECNICA PRODOTTO			
Cemento Tipo/Classe:	I 42,5 R	Standard di Riferimento	UNI EN 197-1
Stabilimento di:	Robilante	Marchatura CE	0970-CPR-0155/CE/0202
CARATTERISTICHE CHIMICHE			
Determinazioni:	Unità di misura	Metodo di prova	Valori Tipici di Riferimento
Perdita al fuoco	(%)	UNI EN 196-2	2,8
Residuo insolubile	(%)		0,9
Solfati	(%)		2,5
Cloruri	(%)		0,090
Cromo VI solubile in acqua	(%)	UNI EN 196-10	<0,0002
Saggio pozzolanicità		UNI EN 196-5	-
CARATTERISTICHE FISICHE			
Stabilità di volume	(mm)	UNI EN 196-3	0
Tempo di inizio presa	(min)		180
Spandimento	(%)	UNI 7044	85
Superficie specifica	(cm ² /g)	UNI EN 196-6	3850
RESISTENZE MECCANICHE			
Resistenze a compressione dopo:		UNI EN 196-1	
2 giorni	(MPa)		30,5
7 giorni	(MPa)		-
28 giorni	(MPa)	51,0	
CARATTERISTICHE AGGIUNTIVE			
Contenuto:		UNI EN 196-6	
Densità	(g/cm ³)		3,11

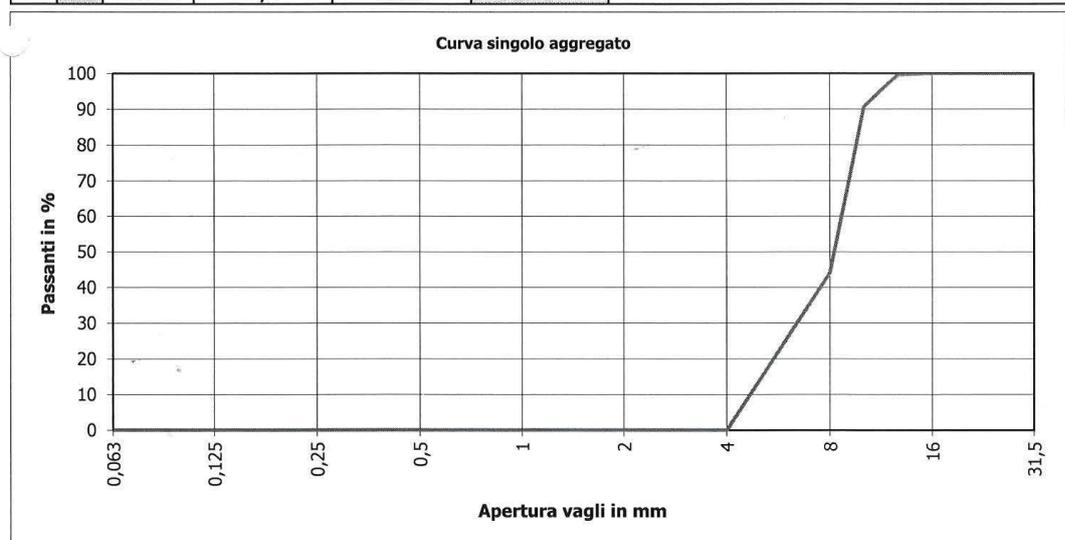
A.2 Scheda tecnica dell'aggregato



SCHEDA SINGOLO AGGREGATO

Cliente	LEIDI	Data Analisi	21/06/2012
Tipo Aggregato	CALC4 4-16 mm	Provenienza	ZANDOBBIO
Codice aggregato	145	valori	Caratteristiche - UNI EN 12620:2003 / UNI 8520-1 e 2:2005
Natura			SE ≥ 80 per agg. non frantumati e ≥ 70 per agg. frantumati. Per filler MB $\leq 12\text{g/kg}$ - Per SE <80 e MB $>1,2\text{g/kg}$ possono essere utilizzati ma MB deve essere dichiarato per prendere precauzioni.
SE equivalente in sabbia	UNI EN 933-8		>70 o 80%
MB valore di blu	UNI EN 933-9		$< 1,2\text{g/kg}$
MV massa volumica	UNI EN 1097-6	2773	la massa volumica deve essere $>$ di 2300 kg/m^3
Sostanza umica	UNI EN 1744-1		il colore della soluzione deve essere inferiore al riferimento del vetrino n°3
Assorbimento	UNI EN 1097-6	0,1	se l'assorbimento è $< 1\%$ l'aggregato può essere considerato non gelivo
Passante a 0.063	UNI EN 933-2	0,7	gr.nat. o fr.dep. alluvionale $\leq 1,5$ gr.fr.roccia ≤ 4
FM Modulo di Finezza	UNI EN 12620	6,6	sabbia nat. ≤ 3 s.fr.dep.all. ≤ 10 s.fr.roccia ≤ 16 misto 0/8 naturale ≤ 3 misto 0/D nat. o fr.dep. alluvionale ≤ 3 misto 0/D fr. roc. ≤ 10 per le sabbie da 4,0 a 2,4 CF - da 2,8 a 1,5 MF - da 2,1 a 0,6 FF

	Setacci UNI	tratt. Parz. g	tratt.comul. g	Passante %	Verifica granulometrica UNI EN 12620:2003		
					diametro	range	conformità
aggregato grosso	M	mm					
	46	31,5			2 D	100	
	45	25			1,4 D	da 98 a 100	
	44	20			D	da 85 a 99	
	43	16			d	da 0 a 20	
	42	12,5	3,0	3	99,7	d/2	da 0 a 5
aggregato fine	41	10	89,5	92,5			
	40	8	465,5	558	44,2	D/d	$>$ di 2
	37	4	441,0	999	0,1	D/1,4	da 25 a 70
	34	2		999	0,1	D/2	da 25 a 70
	31	1		999	0,1		
	27	0,5		999	0,1	Tipo aggregato	
	25	0,25		999	0,1	granulometria	
	22	0,125		999	0,1	Note:	
	19	0,063		999	0,1		
		Fondo	1,0	1000			



A.3 Scheda tecnica fluidificante 1

Costruzioni

Bozza di Scheda Tecnica
Edizione 23.04.10

Sika®Plast 20 (VP)

Sika®Plast 20 (VP)

Additivo superfluidificante a base di policarbossilato etere (PCEs) per calcestruzzo preconfezionato in clima estivo

General Information

Descrizione Sika®Plast 20 (VP) è un additivo esente da formaldeide e da donori, a base di policarbossilato etere (PCEs), per ottenere miscele cementizie ad alte prestazioni ed estesa lavorabilità.
Grazie all'azione superfluidificante Sika®Plast 20 consente una forte riduzione del rapporto acqua cemento rispetto ad un calcestruzzo non additivato, ed un conseguente forte incremento delle resistenze iniziali e finali.
Sika®Plast 20 (VP) è un liquido perfettamente solubile nell'acqua d'impasto, innocuo nei confronti delle barre d'armatura. Esso rispetta le norme UNI EN 934-2.
Sika®Plast 20 (VP) è indicato per climi estivi.

Campi di applicazione Sika®Plast 20 (VP) è particolarmente adatto alla produzione di calcestruzzo gettato in opera.
Sika®Plast 20 (VP) assicura l'ottimizzazione della produzione del calcestruzzo, specialmente riguardo alla durabilità e all'alta resistenza meccanica.
Grazie alla sensibile capacità di riduzione del rapporto A/C e ad un migliore rapporto aggregato/cemento, Sika®Plast 20 (VP) assicura una forte riduzione del ritiro idraulico e della deformazione viscosa.

Vantaggi Sika®Plast 20 (VP) è la soluzione ideale per prevenire il rischio di successive deleterie aggiunte d'acqua in sito, in quanto esso favorisce il mantenimento della classe di lavorabilità richiesta per almeno 60 minuti, senza variare i tempi di stagionatura e lo sviluppo delle resistenze meccaniche della miscela indurita anche a breve stagionatura.
Sika®Plast 20 (VP) è specifico per produrre miscele cementizie in accordo con le prescrizioni delle EN 206-1 2006 e delle UNI 11104 (recepimento italiano delle EN 206), relative alla limitazione del massimo rapporto A/C per classe di esposizione.
Sika®Plast 20 (VP) conferisce particolari caratteristiche di omogeneità e coesione alla miscela, atte ad evitare o minimizzare il rischio di segregazione e incrementare l'aspetto estetico e la pompabilità

Caratteristiche Tecniche

Forma, colore	liquida, ambrato torbido
Descrizione	additivo superfluidificante a base di policarbossilato etere (PCEs)
Confezioni	Bidoni in plastica da 25 kg - fusti in acciaio da 220 kg - megacupac da 1100 kg - sfuso
Conservazione	Negli imballi originali sigillati, protetto dal gelo e dal contatto diretto con il sole e con temperatura compresa tra +5 e +35°C: almeno 12 mesi



1
Sika®Plast 20 (VP) 1/2

Dati tecnici	
Peso specifico	1,045 ± 0,005 kg/L
Dosaggio	SilurPrest 20 (VP) è un additivo molto versatile, pertanto è ammesso un dosaggio nell'intervallo tra 0,8 e 1,2 kg di prodotto per 100 kg di cemento; differenti dosaggi possono essere adottati per specifiche esigenze prestazionali.
Valore di pH	4,7 ± 1
Contenuto di solidi	14,5 % ± 1% in peso.
Condizioni di applicazione	
Modalità d'impiego	SilurPrest 20 (VP) può essere aggiunto contemporaneamente all'acqua d'impasto; per un migliore effetto sul mantenimento della fluidità del calcestruzzo nel tempo è preferibile l'aggiunta del prodotto a impasto di calcestruzzo già iniziato, avendo l'avvertenza di mescolare alla massima velocità di rotazione per almeno 5' dopo l'aggiunta.
Compatibilità	SilurPrest 20 (VP) è compatibile con tutti i cementi rispondenti alla UNI EN 197 e non dimostra effetti di negativo e indesiderato inglobamento d'aria nel calcestruzzo. SilurPrest 20 (VP) è compatibile con: <ul style="list-style-type: none"> ■ Plastiment VZ, fluidificante e ritardante di presa ■ SiluAer, aeranti ■ SiluFume, additivi a reazione pozzolanica ■ SiluRapid 2, accelerante d'indurimento ad alta prestazione ■ Sigunit L ed L22, acceleranti di presa alcalini per il calcestruzzo protetto ■ Sigunit 48AF e 80AF, acceleranti di presa privi di alcali per il calcestruzzo protetto ■ SiluVisco I-100, omogeneizzante per calcestruzzo ■ SiluLightcrete I-500, schiumogeno per calcestruzzi leggeri ■ FerroGard 801, additivo inibitore di corrosione <p>Nel caso di doppia additivazione si consiglia l'abbinamento con prodotti a base di nitrato/solfonato in presenza del quale si potrebbe avere una minore efficacia del prodotto. I mescolatori spruzchi di nitrato/solfonato devono essere ben lavati prima dell'impiego di SilurPrest 20 (VP).</p>
Misure di sicurezza	
Precauzioni	Per informazioni e consigli sulla norme di sicurezza e per l'utilizzo e conservazione di prodotti chimici, l'utilizzatore deve far riferimento alla più recente Scheda di Sicurezza, contenente i dati fisici, tossicologici ed altri dati relativi in tema di sicurezza.
Riciclaggio	Non disperdere nell'ambiente il prodotto e i contenitori vuoti. Consultare la più recente Scheda di Sicurezza per ulteriori informazioni.
Note legali	I consigli tecnici relativi all'impiego, che nel frattempo verifichiamo e per iscritto sono assistenze al cliente e all'applicatore in base alle nostre esperienze, corrispondenti alle state norme delle conoscenze scientifiche e pratiche, non sono ingiurabili e non costituiscono alcuna relazione legale con l'utente né abbiamo conoscenza del verdetto di compatibilità. Essi non dispensano l'utente dalle proprie responsabilità di provare personalmente i nostri prodotti per quanto esamino in loro termini relativamente stesso prodotto. Per il solo caso valido in campo applicativo commercializzato. Il contenuto delle presente scheda si ritiene vincolante per quanto sopra al fine della validità del contratto, solo se corredato di appositi timbri e di verifiche apposite presso la sede o del personale delegato a questa opera. Differenza dell'originale prodotto per contratto che l'utente non ingloba né stessa responsabilità da parte della società Sika. Il cliente è inoltre tenuto a verificare che le presenti schede di OLI EVENTUALI VALORI RISPETTATI siano validi per la parte di prodotto al suo possesso e non siano superati in quanto stabiliti da ulteriori successive ESO NUCLEO FORMULAZIONI DEL PRODOTTO. Nel dubbio, consultare preventivamente il nostro Ufficio Tecnico.



Sika Italia S.p.A.
Via L. Einaudi 6 - 20084 Pogliano Rosso (MI)
Tel. +39 02 84778.111 - Fax +39 02 84778.119
Rappresentanza di Corsica
Via G. Garibaldi - 22189 Corsica (CO)
www.sika.it - info@tika.it

ADMIRA CON SISTEMA DI GESTIONE
PER LA QUALITÀ CERTIFICATO DA DNV
UNI EN ISO 9001:2008

Solo Certificato Emblema di Corsica
ADMIRA CON SISTEMA DI GESTIONE
AMBIENTALE CERTIFICATO DA DNV
UNI EN ISO 14001:2004



A.4 Scheda tecnica fluidificante 2







CONCRETAN 200L

Superfluidificante



Il materiale

CONCRETAN 200L è un additivo liquido a base di polimeri naturali e di sintesi, scelti con una distribuzione del peso molecolare in un range molto ristretto in modo da aumentare la lavorabilità del calcestruzzo anche a bassi rapporti A/C. CONCRETAN 200L, per la sua proprietà di ridurre l'acqua di impasto, conferisce al calcestruzzo buona impermeabilità ed elevata resistenza agli agenti aggressivi. L'impiego di CONCRETAN 200L migliora l'omogeneità degli impasti consentendo una maggiore riproducibilità nello sviluppo delle resistenze meccaniche. L'eliminazione della segregazione e la riduzione del bleeding facilitano l'ottenimento di calcestruzzi faccia a vista. La compattezza e la ridotta porosità consentono di ottenere calcestruzzi di grande qualità estetica e di lunga durabilità.

Le proprietà

L'aggiunta di CONCRETAN 200L al calcestruzzo permette di confezionare impasti a consistenza variabile, secondo le necessità di impiego.

In particolare, a pari rapporto A/C, l'aggiunta di CONCRETAN 200L permette di:

- incrementare la fluidità del calcestruzzo, facilitando la messa in opera;
- incrementare le resistenze meccaniche alle brevi stagionature;
- mantenere a lungo il medesimo valore dello slump senza perdere in coesione;
- omogeneizzare lo sviluppo delle resistenze meccaniche;
- incrementare la fluidità del calcestruzzo anche negli impasti carenti di parti fini senza determinare segregazione nell'impasto;
- ridurre i tempi di compattazione;
- favorire la pompabilità rendendo l'impasto più omogeneo.

A pari consistenza, l'aggiunta di CONCRETAN 200L consente di:

- ridurre il pericolo di fessurazioni da ritiro idraulico;
- ridurre la porosità del calcestruzzo incrementandone la durabilità;
- ridurre il dosaggio di cemento, a pari prestazioni di resistenze meccaniche, rispetto all'impasto non additivato.

I campi di applicazione

Per il confezionamento e la messa in opera di:

- calcestruzzi di buona qualità per il preconfezionato;
- getti in cimi caldi;
- calcestruzzi pompabili.



**Conforme alla norma
EN 934-2 T 11.1-11.2.**

Secondo regolamento CE 606/2006, la presente etichetta soddisfa i requisiti di legge per i prodotti. L'etichetta di sicurezza è fornita separatamente. Per informazioni visitate il sito www.ruredil.it.

Le informazioni contenute in questa scheda di lavoro sono basate sulle nostre conoscenze ed esperienze; non possono quindi implicare una garanzia da parte nostra, né responsabilità circa l'impiego dei nostri prodotti, non essendo le condizioni di utilizzo sotto il nostro controllo. Ruredil è un marchio di Ruredil S.p.A. Via B. Buozzi, 1 20097 San Donato Milanese (MI) Tel. +39 02 5276.041 Fax +39 02 5272.185 info@ruredil.it www.ruredil.it



Soluzioni e tecnologie per l'edilizia

1/2

A.5 Scheda tecnica lattice



MAPEI

Planicrete

nuova formula

Lattice di gomma sintetica per migliorare l'adesione di impasti cementizi

CAMPI DI APPLICAZIONE

- Come additivo per migliorare le caratteristiche meccaniche e di adesione di impasti cementizi per massetti, intonaci e rasature di basso spessore.
- Come additivo per boiacche cementizie ad alta adesività usate come ponti di adesione.

Alcuni esempi di applicazione

- Massetti cementizi ad alta resistenza, all'esterno ed all'interno.
- Boiaccia cementizia per la posa di pietre naturali con il sistema **Mapestone**.
- Intonaci cementizi ad alta resistenza, all'esterno ed all'interno.
- Boiaccia cementizia per migliorare l'adesione di massetti aderenti tradizionali oppure realizzati con l'impiego di **Mapecem Pronto** o **Topcem Pronto**.
- Boiaccia di adesione da confezionare con **Mapecem** o **Topcem** per migliorare l'adesione dei massetti aderenti che saranno realizzati con gli stessi leganti.
- Realizzazione di rinzafo per l'aggrappo degli intonaci.
- Malte cementizie per il riempimento di fori, ricostruzione di parti danneggiate e finitura superficiale di manufatti e prefabbricati in calcestruzzo.
- Malte cementizie per la finitura di superfici soggette a forte abrasione (pavimenti industriali, rampe, canali) e per riporti in piccolo spessore su pavimentazioni erose.

CARATTERISTICHE TECNICHE

Planicrete è una dispersione acquosa ad elevata stabilità di uno speciale elastomero sintetico resistente alla saponificazione alcalina e caratterizzato da una bassa temperatura di transizione vetrosa. Questo speciale elastomero, a base di gomma stirene-butadiene (styrene-butadiene rubber, SBR), ha inoltre la proprietà

di essere stabile nei confronti dell'invecchiamento. Le catene polimeriche che costituiscono questo elastomero hanno la caratteristica di essere collegate tra loro da una fitta maglia di legami chimici. Questa importante proprietà fa sì che queste catene, quando soggette a deformazione, si dispongano parallele tra di loro conferendo così all'elastomero un'elevata elasticità.

Planicrete si presenta come un lattice di colore bianco molto fluido che, aggiunto ad impasti di cemento ed aggregati, ne migliora l'adesione, la plasticità, la tixotropia, la ritenzione d'acqua e la lavorabilità in generale. Gli impasti cementizi modificati con **Planicrete**, dopo presa ed indurimento finale possiedono le seguenti proprietà:

- migliore adesione al supporto;
- maggiori prestazioni meccaniche sia a compressione che a flessione;
- migliore resistenza all'abrasione;
- maggiore impermeabilità;
- migliore resistenza ai cicli di gelo-disgelo;
- migliore resistenza chimica agli alcali diluiti, alle soluzioni saline ed agli oli.

AVVISI IMPORTANTI

- Non usare **Planicrete** puro come primer o ponte di adesione: miscelarlo sempre con cemento o, se necessario, con **Mapecem** o con **Topcem**.
- Non usare impasti contenenti **Planicrete** a temperature inferiori a +5°C o superiori a +40°C.
- In caso di condizioni ambientali molto calde o ventose, proteggere adeguatamente le superfici dopo l'applicazione da un'essiccazione troppo rapida.
- L'uso di **Planicrete** nelle malte e nei calcestruzzi non dispensa dalla stretta osservanza di tutte le norme valide per una buona esecuzione dei lavori, in



Planicrete



Rinzaffo additivato con Planicrete



Intonaco cementizio con Planicrete.
Cantiera Tunnel autostradale Vile Marie Montreal - Canada



Massetto cementizio esterno additivato con Planicrete.
Cantiera Vieux Port, Quebec, Canada

TABELLA DOSAGGI E CONSUMI

IMPIEGO	Rapporto Planicrete: Acqua	Rapporto cemento: aggregati (in peso)	Aggregato assortito in curva granulometrica	Consumo Planicrete (g/m ² /mm di spessore)
Mazzetti aderenti (spessore da 10 a 25 mm)	1 : 3	1 : 4	0-8 mm	40-50
Mazzetti galleggianti (spessore > 35 mm)	1 : 4	1 : 5	0-8 mm	30-40
Intonaci	1 : 4	1 : 3,6	0-3 mm	60-70
Intonaci con Nivoplan	1 : 5	-	-	70-80
Rinzaffo per intonaci	1 : 1	1 : 1	0-2 mm	220-230
Malte da riempimento	1 : 2,5	1 : 3	0-3 mm	50-60
Bolassa di adossione	1 : 1	-	-	300-310

N.B.: I rapporti di diluizione di Planicrete con acqua si riferiscono al caso in cui gli inerti siano asciutti. Pertanto nel caso in cui gli inerti siano umidi e bagnati, tenere conto riducendo la soluzione composta da acqua e Planicrete.

di indossare guanti e occhiali protettivi e di utilizzare le consuete precauzioni per la manipolazione dei prodotti chimici. Per ulteriori e complete informazioni riguardo l'utilizzo sicuro del prodotto si raccomanda di consultare l'ultima versione della Scheda Dati Sicurezza.

PRODOTTO PER USO PROFESSIONALE.

AVVERTENZA

Le informazioni e le prescrizioni sopra riportate, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e dovranno essere confermate da esaurienti applicazioni

pratiche; pertanto, prima di adoperare il prodotto, chi intenda farne uso è tenuto a stabilire se esso sia o meno adatto all'impiego previsto e, comunque, si assume ogni responsabilità che possa derivare dal suo uso.

Fare sempre riferimento all'ultima versione aggiornata della scheda tecnica, disponibile sul sito www.mapei.com

Le referenze relative a questo prodotto sono disponibili su richiesta e sul sito www.mapei.it e www.mapei.com

VOCE DI PRODOTTO

Lattice di gomma sintetica, di colore bianco, resistente alla saponificazione alcalina in grado di migliorare la lavorabilità, l'adesione a tutte le superfici, la flessibilità, e in generale le prestazioni meccaniche di malte cementizie (tipo Planicrete della Mapei S.p.A.). Il prodotto, aggiunto agli impasti cementizi in parziale sostituzione dell'acqua, dovrà consentire di migliorare la resistenza chimica agli alcali diluiti, la plasticità, la ritenzione d'acqua, l'impermeabilità e la resistenza ai cicli di gelo disgelo delle malte cementizie.

Il prodotto dovrà avere le seguenti caratteristiche:

Consistenza:	liquido fluido
Colore:	bianco
Massa volumica (g/cm ³):	1,02
pH:	5
Residuo solido (%):	36
Composizione della malta:	Cemento: Tipo 32,5 R I/A-I 800 g inerte: sabbia normalizzata 2700 g Additivo: Planicrete 112,5 g Acqua: 282,5 g
Massa volumica dell'impasto (kg/m ³):	2.000
Resistenza a compressione (EN 12190) (MPa):	
- 1 giorno:	7
- 7 giorni:	25
- 28 giorni:	33
Adesione al supporto (EN 1542) (MPa):	2,0

IL PARTNER MONDIALE DEI COSTRUTTORI

La riproduzione di testi, foto e illustrazioni di questa pubblicazione è vietata senza permesso scritto dalla Mapei

701-6-2015 (I)

di cemento leggermente inferiore, per cui il dosaggio suggerito diviene:

Planicrete	30 kg	35 kg
Acqua	120 kg	140 kg
Cemento	300 kg	350 kg
Aggregati (0-8 mm)	1600 kg	1550 kg

Il tempo di maturazione di questi massetti è di almeno 2 settimane in condizioni normali di temperatura ed umidità.

N.B.: Questo impasto può anche essere usato per la posa in tradizionale di piastrelle ceramiche, eventualmente adattando la granulometria dell'aggregato allo spessore desiderato.

Preparazione di intonaci

Planicrete può anche essere impiegato come additivo per la preparazione di intonaci murali a base cementizia, sia per interni che per esterni. L'aggiunta di Planicrete all'impasto consente di migliorare la tiosotropia e l'impermeabilità all'acqua della malta conferendo ad essa, inoltre, un'ottima adesione al supporto ed una maggiore resistenza agli agenti atmosferici.

Il dosaggio consigliato è:

Planicrete	1 kg
acqua	4 kg
cemento	5,5 kg
aggregati (0-3 mm)	20 kg

Al fine di uniformare l'assorbimento del supporto e migliorare l'adesione della malta, si consiglia di realizzare, prima dell'intonaco, uno strato di rinzaffo costituito da:

Planicrete	1 kg
acqua	1 kg
cemento	3,5 kg
aggregati (0-2 mm)	3,5 kg

Qualora si voglia utilizzare un intonaco premiscelato, può essere impiegato Nivoplan, malta livellante per pareti, bianca o grigia, premiscelata, composta da cemento, aggregati selezionati e speciali resine sintetiche, applicabile in uno spessore di 2 cm per mano. In questo caso Nivoplan dovrà essere miscelato con Planicrete diluito 1:5 con acqua.

Preparazione di malte per il riempimento di cavità

Planicrete può essere vantaggiosamente impiegato come additivo per la preparazione di malte da riempimento. Il prodotto conferisce alla malta un'ottima tiosotropia che ne facilita la posa in opera sia su superfici verticali che a soffitto. Inoltre, l'aggiunta di Planicrete consente di migliorare l'adesione e le prestazioni meccaniche della malta. Per questo tipo di applicazione il dosaggio consigliato è:

Planicrete	1 kg
acqua	2,5 kg
cemento	8 kg
aggregati (0-3 mm)	16-24 kg

Preparazione di boiacche di adesione

Planicrete è particolarmente adatto per la formazione della boiacca di ancoraggio da applicare prima del getto di massetti o rasature sui vecchi supporti cementizi.

Il massetto o la rasatura dovranno essere realizzati quando la boiacca è ancora fresca (applicazione fresco su fresco).

N.B. La boiacca a base di Planicrete è adatta anche quale ponte di adesione per la realizzazione di massetti aderenti tradizionali oppure realizzati con Mapecem Pronto o Topcem Pronto.

Utilizzare per la preparazione della boiacca di adesione lo stesso legante che sarà utilizzato per realizzare il massetto.

Il dosaggio consigliato è:

Planicrete	1 kg
acqua	1 kg
cemento	4 kg

Nel caso di massetti realizzati con Mapecem o Topcem rispettare i dosaggi riportati nella tabella seguente:

	Topcem	Mapecem
Planicrete (kg)	1	1
Acqua (kg)	1	1
Legante (kg)	3	2

Miscelazione

Diluire Planicrete con l'acqua nel rapporto scelto per la specifica applicazione in un recipiente adatto, quindi versare tale soluzione nella betoniera ed aggiungere cemento ed aggregati, meglio se già miscelati fra di loro almeno parzialmente per evitare grumi difficili da disperdere. Mescolare per 2-3 minuti fino a completa omogeneità senza sovrariscaldare. Il tempo di presa degli impasti additivati con Planicrete non varia sensibilmente; si nota in generale un leggero allungamento del tempo di lavorabilità.

NORME DA OSSERVARE DOPO LA MESSA IN OPERA

Dopo l'applicazione, specie in giornate molto calde o ventose, le malte additivati con Planicrete devono essere stagionate con cura per evitare l'evaporazione rapida dell'acqua che può causare fessurazioni superficiali dovute a ritiro plastico; nebulizzare acqua sulla superficie durante le prime ore di indurimento o proteggere con teli idrorepellenti.

Pulizia

Le attrezzature impiegate per la preparazione e la messa in opera delle boiacche o delle malte additivati con Planicrete possono essere pulite con acqua prima dell'inizio della presa. Dopo l'indurimento possono essere pulite solo meccanicamente.

CONFEZIONI

Planicrete è disponibile in fustini da 25 - 10 - 5 kg e confezioni da 12x1 kg.

IMMAGAZZINAGGIO

24 mesi in imballi originali non aperti. Teme il gelo.

ISTRUZIONI DI SICUREZZA PER LA PREPARAZIONE E LA MESSA IN OPERA

Planicrete non è considerato pericoloso ai sensi delle attuali normative sulla classificazione delle miscele. Si raccomanda



Rappazzo di pavimento: applicazione boiacca



Rappazzo di pavimento: applicazione malta



Rappazzo di pavimento: rasatura finale

A.7 Scheda tecnica disarmante



MAPEI

Disarmante DMA 2000

Disarmante universale ad azione chimico-fisica

CAMPI DI APPLICAZIONE

Per il trattamento antiodessivo di casseforme in ferro, alluminio e in materiale plastico (resine epossidiche, fenoliche, poliestere, polipropilene).

Alcuni esempi di applicazione:

- per facilitare il disarmo del calcestruzzo di prefabbricazione;
- per facilitare il disarmo del calcestruzzo sottoposto a maturazione a vapore;
- per consentire il disarmo del calcestruzzo gettato in casseforme di plastica;
- per favorire il disarmo di calcestruzzi gettati in casseforme di cemento o gesso;
- per consentire il disarmo di calcestruzzi gettati in opera in casseforme metalliche.

CARATTERISTICHE TECNICHE

Disarmante DMA 2000 è costituito da una miscela di oli selezionati, inibitori di corrosione e particolari additivi secondo una formula sviluppata nei Laboratori di Ricerca & Sviluppo MAPEI.

Disarmante DMA 2000 deve la sua efficacia ad un'azione fisica propria dei disarmanti tradizionali (permea l'adesione del calcestruzzo alle casseforme) ed inoltre reagisce con la pasta di cemento del calcestruzzo a contatto con il cassetto creando una finissima pellicola isolante. Quest'ultima proprietà è in assoluto la più efficace ai fini della separazione fra i due elementi.

I vantaggi che derivano dall'impiego del Disarmante DMA 2000 sono i seguenti:

- Migliore finitura del getto a vista.
- Assenza di polvere superficiale.
- Assenza di macchie di unto anche nel caso di utilizzo cementi bianchi.
- Riduzione delle operazioni di pulizia delle casseforme.
- Applicazione semplice ed economica.

AVVITI IMPORTANTI

- Non diluire Disarmante DMA 2000 con acqua.
- Non diluire Disarmante DMA 2000 con solventi o con altri oli.
- Su casseforme in legno grasso è preferibile l'utilizzo del Disarmante DMA 1000.

MODALITÀ DI APPLICAZIONE

Disarmante DMA 2000 è pronto all'uso.

Applicazione

Stendere Disarmante DMA 2000 con una pompa dotata di nebulizzatore su cassetti puliti ed asciutti. Raccomandiamo, per la buona riuscita del disarmo, di non superare il consumo consigliato; una eccessiva quantità di prodotto può infatti provocare una leggera polvere superficiale che altera l'aspetto finale della superficie del getto a vista.

Pulizia

Gli attrezzi utilizzati per le misure del Disarmante DMA 2000 possono essere lavati con un solvente (alcol etilico, trielina ecc.).

consumo

Casseforme metalliche: 20-25 g/m².

**Diserzante
DMA 2000**

DATI TECNICI (valori tipici)

DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO

Consistenza	liquida
Colore	giallo ambra
Massa volumica	0,97 ± 0,01 kg/l a -20°C
Azione diserzante	struttura-flessa

DATI APPLICATIVI

Preparazione	pronta all'uso
Applicazione	pompa spruzzo di nebulizzatore a bassa pressione

Cassaforme in materiale plastico: 20-25 g/m².
Cassaforme in legno: 30-40 g/m².

IMBALLAZIONE

Diserzante DMA 2000 si conserva per 12 mesi in recipienti chiusi.

COMPOSIZIONE

Diserzante DMA 2000 è disponibile sfuso, in cassetta da 1.000 l, fusti da 200 l, toniche da 20-4,5 kg.

ISTRUZIONI DI SICUREZZA PER LA PREPARAZIONE E LA MISCELA IN OPERA
Diserzante DMA 2000 non è considerato pericoloso ai sensi delle attuali normative sulla classificazione delle miscele. Si raccomanda di indossare guanti e occhiali protettivi e di utilizzare le consuete precauzioni per la manipolazione dei prodotti chimici.

Per ulteriori e complete informazioni riguardo l'utilizzo sicuro del prodotto si raccomanda di consultare l'ultima versione della Scheda Dati Sicurezza.

PRODOTTO PER USO PROFESSIONALE.

AVVERTENZA

Le informazioni e le precauzioni sopra riportate, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e dovranno essere confermate da eventuali applicazioni pratiche; pertanto, prima di adoperare il prodotto, chi intende fare uso è tenuto a stabilire se esso sia o meno adatto all'impiego previsto e, comunque, si assume ogni responsabilità che possa derivare dal suo uso.

Fare sempre riferimento all'ultima versione aggiornata della scheda tecnica, disponibile sul sito www.mapei.com

Le referenze relative a questo prodotto sono disponibili su richiesta e sul sito www.mapei.it e www.mapei.com

La responsabilità di tutti, info, utilizzatori di questo prodotto, è di usare il prodotto in modo sicuro e secondo le istruzioni di lettura.

792-5-2014 (0)

MAPEI
IL PARTNER IDEALE DEI COSTRUTTORI

A.8 Scheda tecnica silicato


INGESSIL S.r.l. Industria Silicati

 stabilimento: via dei Peschi, 13 - 37141 Montorio - Verona
 tel.+39.045.8840.505-045.8840.542 ; fax +39.045.8840638
 web site: www.ingessil.com ; e-mail: ingessil@ingessil.com

 documento n. : CoA 17-14
 data di emissione : 09-01-17

Certificato di Analisi e conformità

Cliente : POLITECNICO DI TORINO
 Dpt. of Environment, Land and Infrastructures Engineering
 Corso Duca degli Abruzzi, 24. Torino, 10129, Italy
 Dr. Luca Tefa

Tipologia prodotto : sodio silicato 38/40Bé

Lotto di produzione : free sample, 25 litri

Stabilimento di produzione : Ingessil S.r.l. - Montorio, Verona

Identificazione sostanza

Denominazione chimica : *sale sodico dell'acido silicico*
 CAS n. : 1344-09-8
 EINECS n. : 215-687-4
 Formula bruta : $Na_2O \cdot n(SiO_2)$
 Peso molecolare ($n=3,4$) : 266

Valori analitici

Caratteristiche chimico-fisiche	Unità di misura	Dati analitici
<i>Aspetto a 25°C</i>	-	liquido viscoso privo di impurezze macroscopiche
<i>odore</i>	-	inodore
<i>Rapporto ponderale SiO_2/Na_2O</i>	-	3,29
<i>Rapporto molare SiO_2/Na_2O</i>	-	3,39
<i>SiO_2</i>	%	27,65
<i>Na_2O</i>	%	8,40
<i>Densità relativa a 20°C</i>	g/ml	1,369
<i>Densità in equivalenti Baumè</i>	°Bè	39,11
<i>pH (soluzione tal quale, 20°C)</i>	-	11,5
<i>Titolo in sodio silicato</i>	%	36,06

A.9 Scheda tecnica soda caustica

Scheda tecnica SODA CAUSTICA SCAGLIE

CLASSIFICAZIONI PRODOTTO	
N° CAS:	1310-73-2
N° CE:	215-185-5
N° Indice:	011-002-00-6
CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE	
Formula Chimica:	NaOH
Peso Molecolare:	56,11
Nichel (Valore medio):	< 2 ppm
Ferro:	< 15 ppm
Silice:	< 50 ppm
Solfato di Sodio:	< 20 ppm
Cloruro di Sodio:	< 150 ppm
Carbonato di Sodio:	< 0,3 % p/p
Aspetto:	scaglie traslucide
INFORMAZIONI DI SICUREZZA	
Classe:	ADR 8, 41° b)
N° ONU:	1823
Simboli:	C - Corrosivo
Frase di Rischio:	R35
Consigli di Prudenza:	S1/2-26-37/39-45
GARANZIE DI VENDITA PRODOTTO	
Titolo	> 98 % p/p



CHIMICA STROLA s.a.s. - Torino

Ringraziamenti

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura della tesi con suggerimenti, critiche ed osservazioni: a loro va la mia gratitudine.

Ringrazio anzitutto il mio Relatore, il Professore Marco Bassani, per avermi trasmesso la passione per la Sua materia, per le numerose ore dedicate alla mia tesi e per la Sua umanità. Così come ringrazio i mie Correlatori: la Professoressa Paola Palmero per la disponibilità e l'Ingegnere Luca Tefa, sempre attento, comprensivo e disponibile a dirimere i miei dubbi durante il lavoro svolto, sia in laboratorio che durante la stesura del presente elaborato.