



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE E ARCHITETTURA

**VALORIZZAZIONE DI ARGILLA E FILLER
CALCAREO NELLO SVILUPPO DI LEGANTI
ALTERNATIVI AL CEMENTO PORTLAND**

Valorization of clay and limestone filler in the development
of alternative binders to Portland Cement

Relatrice:

Prof.ssa Francesca Tittarelli

Correlatore:

Prof. Francesco Clementi

Tesi di Laurea di:

Sara Parlani

A.A. 2022/2023

SOMMARIO

Introduzione.....	7
Impatto ambientale dell'industria del cemento.....	7
Il consumo di cemento a livello globale.....	8
Il consumo di cemento in Italia.....	12
Lo stato dell'arte.....	14
Cemento, calce e gesso nei tempi passati.....	14
I componenti del cemento.....	18
Il calcare.....	18
La marna.....	19
Il ciclo produttivo del cemento.....	20
La frantumazione:.....	20
La cottura:.....	21
La macinazione del clinker:.....	24
Sostenibilità e normative (Italia-Europa).....	26
Definizione di sostenibilità.....	26
Il quadro normativo italiano.....	32
I nuovi cementi.....	34
Materiali utilizzati.....	43
L'inerte.....	44
La sabbia.....	45

Il filler calcareo	46
L'acqua	46
Superfluidificante.....	48
Il legante	50
Cemento Portland	50
La loppa d'altoforno.....	51
L'argilla.....	52
Caratterizzazione della reattività.....	53
Caratterizzazione chimica.....	57
LC2	61
LC3	66
Mix design	70
Preparazione dei provini.....	75
Lavorabilità e consistenza	76
Confezionamento e stagionatura dei provini	80
Misura del modulo elastico dinamico	82
Caratterizzazione meccanica	85
Resistenza meccanica a flessione	86
Resistenza meccanica a compressione	89
Prova del tempo di presa.....	92
Calcestruzzo LC3.....	105

Mix design	108
Punto 1: lavorabilità	110
Punto 2: Rck	111
Punto 3: durabilità	111
Punto 4: c	111
Punto 5: V_{cls}	111
Punto 6: V_d'	112
Punto 7: V_i	112
Punto 8 : peso	113
Punto 9: α^*	114
Preparazione dei provini.....	115
Caratterizzazione meccanica	117
LCA delle miscele	124
Definizione degli obiettivi e campo di applicazione	127
Analisi di inventario ed analisi degli impatti.....	128
Interpretazione e miglioramento	129
Progetto strutturale con i calcestruzzi LC3.....	133
Normativa di riferimento.....	133
Localizzazione geografica	133
Vita Nominale e classi d'uso	134
Caratteristiche generali del concept strutturale.....	134

Predimensionamento degli elementi strutturali.....	134
Analisi dei carichi	139
Analisi del solaio di copertura:.....	139
Analisi del solaio di piano tipo:.....	140
Dimensionamento degli elementi strutturali	142
Impatti ambientali delle strutture realizzate con i calcestruzzi lc3.....	149
Conclusioni	154
Bibliografia.....	156

INTRODUZIONE

IMPATTO AMBIENTALE DELL'INDUSTRIA DEL CEMENTO

Uno dei temi più considerati degli ultimi anni è sicuramente quello dell'ecosostenibilità.

Il settore delle costruzioni è fra i più impattanti a livello ambientale. Il comparto edile, infatti, oltre a provocare il divoramento del territorio, immette nell'atmosfera tonnellate di anidride carbonica ed altri inquinanti. Ciò accade sia indirettamente, quando si opta per materiali da costruzione ricavati ad alte temperature e con procedimenti complessi che comportano dispendio di energia, sia durante la fase di utilizzo dell'edificio stesso. Grazie alla ricerca sono stati scoperti (o riscoperti, come nel caso dell'argilla calcinata) materiali la cui creazione comporta un inferiore dispendio energetico rispetto a quelli tradizionali. Alcuni di questi sono già utilizzabili, e stanno prendendo piede nel mercato perché anche più economicamente convenienti.

Tuttavia, non è sempre possibile far subentrare in toto i nuovi prodotti a quelli tradizionali; si pensi alle opere infrastrutturali come ponti, strade e gallerie, ai grandi edifici e a tutte le grandi opere. Parliamo di infrastrutture e di grandi opere che devono necessariamente raggiungere le elevate prestazioni meccaniche e che il Cemento Portland è sempre stato in grado di garantire.

A fronte della nuova idea di architettura e di ingegneria sostenibile risulta quindi doveroso intraprendere anche un percorso di studio e ricerca che porti a rendere più sostenibili i materiali da costruzione da sempre utilizzati.

In quest'ottica possiamo citare i cementi LC3, che rientrano nella normativa UNI EN 197-1 del 2021 e prevedono miscele cementizie in cui metà del Cemento Portland è sostituita da argilla calcinata e calcare.

In questo modo, considerando comunque l'alta prestazione garantita dalla frazione cementizia, riusciremmo a ridurre del 40% l'emissione di CO₂ nell'atmosfera¹.

Il consumo di cemento a livello globale

Come afferma il World Business Council for Sustainable Development, il cemento rappresenta la seconda materia utilizzata al mondo dopo l'acqua².

Rispetto ai livelli del 2020, l'energia consumata dal settore delle costruzioni è cresciuta del 4% e la relativa emissione di CO₂ è aumentata del 5%, raggiungendo approssimativamente le 10 Gt di CO₂. Si tratta di un aumento che supera i livelli pre-pandemia del 2019. Questo dimostra sia la riapertura dell'economia a seguito della chiusura a causa della pandemia, ma anche la carenza di cambiamenti effettivi che possano ridurre la decarbonizzazione del mercato edilizio. L'industria edile sfrutta il 37% dell'energia globale.

¹ United Nations, Global Status Report for Buildings and Construction, 2022

² World Business Council for Sustainable Development, Toward a Sustainable Cement Industry, 2022

Il quantitativo di area edificata è cresciuto dell'1% rispetto al 2021. Parlando in termini numerici si tratta di 242 miliardi di metri quadrati di area edificata in più rispetto all'anno precedente. Mantenendo questo andamento, si ipotizza che entro il 2030 verranno edificati altri 225 milioni di metri quadri.

Ovviamente la nuova edificazione porta con sé il problema delle emissioni causate dal materiale utilizzato, soprattutto in fase di produzione.

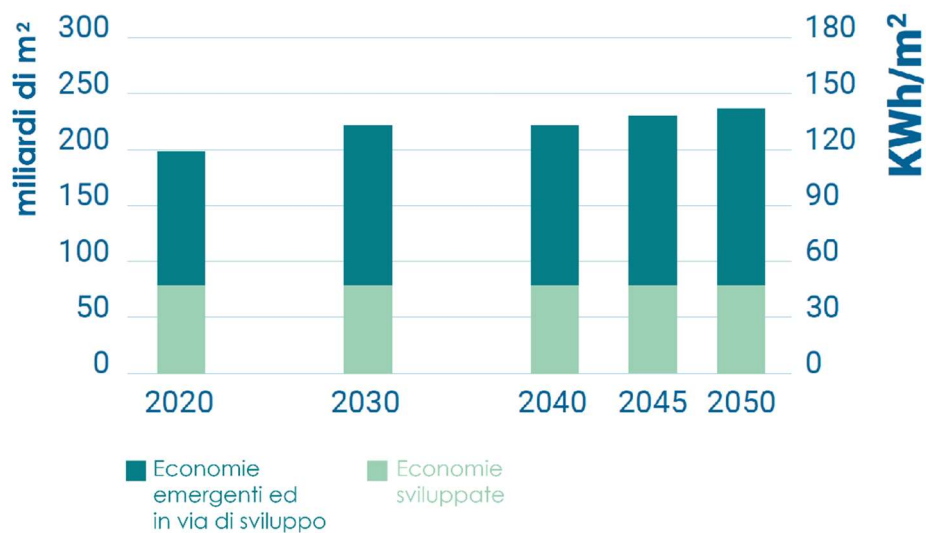


Figura 1 , quantitativo di miliardi di m² di nuova edificazione annui

Il settore delle costruzioni è in continua crescita a livello globale, e ciò ha come conseguenza un forte aumento della richiesta di materie prime in tutto il mondo. Il calo subito nel 2020 visibile come un gomito all'interno del grafico sottostante rappresenta il blocco del comparto edile causato dalla pandemia.

Questa forte ripresa visibile in tutti gli stati analizzati dunque, non va vista in chiave forzosamente negativa, poiché conferma in ogni caso la ripresa del mercato, che deve comunque mirare ad una progettazione consapevole.

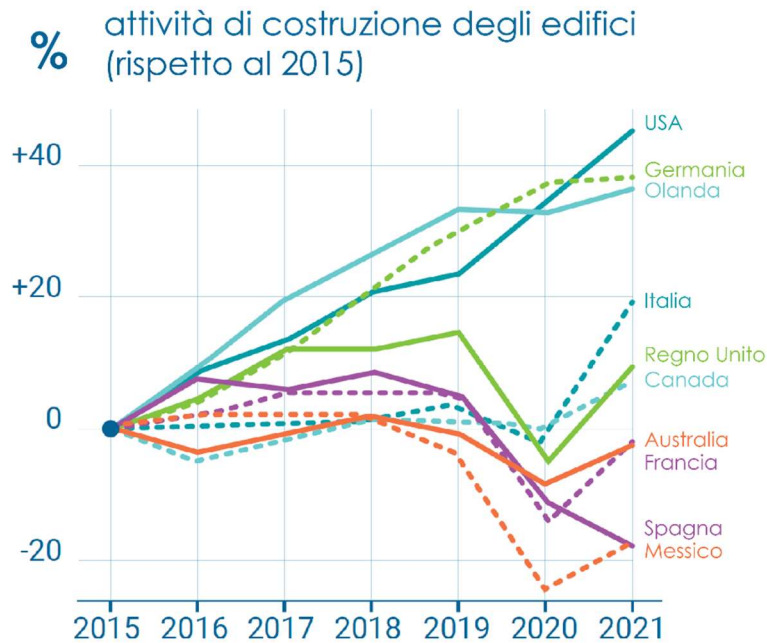


Figura 2, incremento in % dell'attività di costruzione degli edifici rispetto al 2015

La domanda di "operational energy" per gli edifici è aumentata nel biennio 2019-2020 a causa delle quarantene imposte a livello mondiale, causando una crescita notevole dell'utilizzo degli edifici stessi. A parte questo, l'energia utilizzata per produrre cemento, acciaio ed alluminio ha comunque subito un incremento, arrivando a costituire il 4% della domanda totale di energia del comparto edilizio globale.

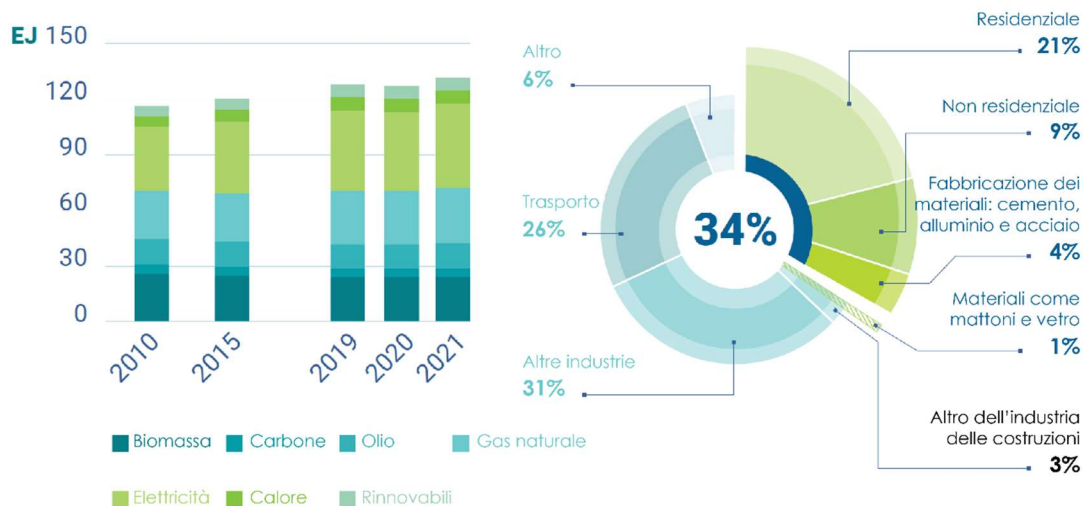


Figura 3, Richiesta annua in termini prestazionali dell'energia richiesta per i diversi settori

Le emissioni di CO₂ legate agli edifici, comprendendo sia le emissioni causate dall'utilizzo degli stessi che quelle dovute alla creazione dei materiali utilizzati per la loro edificazione, sono cresciute rispetto al 2020. L'industria delle costruzioni costituisce il 37% delle emissioni globali di CO₂. Questa percentuale considera sia la CO₂ emessa per l'utilizzo delle costruzioni sia l'emissione della stessa per la creazione dei materiali³.

Lo scopo di questa tesi non è tanto quello di andare a modificare concezione ed utilizzo delle costruzioni, ma di creare un materiale che a parità di prestazioni meccaniche riesca a ridurre le emissioni di CO₂.

³ United Nations, Global Status Report for Buildings and Construction, 2022

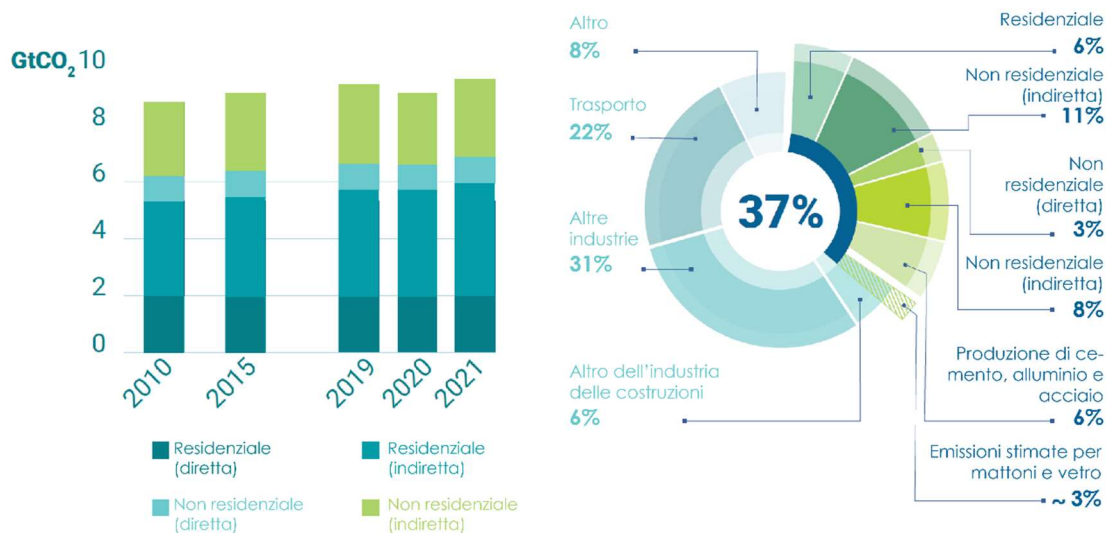


Figura 4, Emissioni annue mondiali di CO₂ espresse in Gt

La sola produzione di cemento porta all'emissione di 600 kg di CO₂ per tonnellata di prodotti, quindi è necessario effettuare dei cambi sostanziali per far sì che gli obiettivi dell'Accordo di Parigi del 2015 siano quantomeno raggiungibili.

Il consumo di cemento in Italia

Nel 2016 l'Italia si è classificata tra i primi quattro produttori di calcestruzzo in Europa e tra i primi venti a livello globale, con una produzione di quasi 30 milioni di metri cubi. I dati riportati da "Il Sole 24 ore" ad Aprile 2018 informano che l'Italia ha presentato un aumento di emissioni di CO₂ di circa il 3,2%, rappresentando così più del 10% di emissioni relative a tutta l'Europa.

Il grafico in figura 2 dimostra la continua crescita del settore delle costruzioni. Concentrandoci sull'Italia, rispetto al 2020 assistiamo ad un aumento del 23% delle attività di costruzione degli edifici.

Stando quindi ai dati analizzati, è evidente come sia di primaria importanza intervenire alla radice di queste problematiche, focalizzando l'attenzione sulla riduzione delle materie prime e sul consumo di combustibili naturali.

Tenendo come obiettivo principale quello di ridurre le emissioni di CO₂ del mercato, le vie di miglioramento della situazione attuale risultano tre:

- Agire sulla composizione della miscela cementizia, riducendo il quantitativo di cemento Portland al suo interno;
- Agire sulla chimica del cemento e del calcestruzzo adottando ingredienti CO₂-free, cioè che riducano notevolmente o eliminino del tutto l'emissione di anidride carbonica durante la produzione e l'utilizzo;
- Progettare con calcestruzzi ad alte prestazioni meccaniche che, in forza delle loro caratteristiche, consentano di ridurre volume di calcestruzzo e quantitativo di ferro necessario per la realizzazione dell'opera.

Questo lavoro di tesi mira a soddisfare il primo obiettivo. Si andranno ad analizzare nuovi cementi che impiegano basse percentuali di cemento Portland, cercando comunque di mantenere le prestazioni meccaniche paragonabili a quelle delle miscele tradizionali.

LO STATO DELL'ARTE

CEMENTO, CALCE E GESSO NEI TEMPI PASSATI

Calce e gesso sono materiali utilizzati per scopi edili sin dall'antichità. Il gesso è stato sfruttato in ogni tempo come legante adatto alla confezione delle malte; con questo scopo fu utilizzato dagli Egizi per la costruzione della piramide di Cheope, aggiungendolo alla calce e mescolandolo con acqua.

I Romani lo sfruttarono fino al XVIII secolo, utilizzato con la calce bianca come malta e per rivestimento di pareti e soffitti. La calce invece, dopo essere stata spenta in apposite fosse, era finalizzata alla creazione di malta.

I Romani inoltre erano soliti impiegare una malta di calce e pozzolana per rivestimenti impermeabili di cisterne, condutture d'acqua e cloache, avendo intuito le proprietà idrauliche di questo materiale.

Andrea Palladio, autore di "I quattro libri dell'Architettura" (Venezia, 1570) nel libro I, capitolo IV e V, dopo aver indicato le modalità di scelta delle pietre da calce e aver spiegato lo spegnimento e la stagionatura di questa, riferisce che nei dintorni di Padova si trova una pietra da calce con evidenti proprietà idrauliche, cioè con la capacità di indurire sia all'aria che in acqua. La calce ottenuta da tale pietra indurisce immediatamente e si può adoperare per lavori in cui vengono previste edificazioni sott'acqua o periodicamente bagnate.

A partire dalla seconda metà del XVII secolo le ricerche nel campo della fabbricazione dei leganti furono ampiamente trattate in Europa e si cercarono materiali capaci di sostituire la pozzolana. Fu in quel momento che si riconobbe la proprietà idraulica della polvere di laterizi, che in futuro si sarebbe scoperto dipendere dal quantitativo di argilla presente al loro interno.

Nel 1756 l'ingegnere Smeaton venne chiamato a dirigere la ricostruzione del faro d'Eddystone presso Plymouth. Si trovò nella condizione di dover ottenere una malta idraulica (cioè una malta capace di indurire sia all'aria che sott'acqua), dato l'ambiente aggressivo in cui sarebbe sorta la costruzione. Dopo alcuni tentativi riuscì ad ottenere una malta idraulica della miglior qualità possibile. Smeaton si domandò in seguito perché le diverse calce da lui sperimentate avessero generato resistenze differenti, ed arrivò alla conclusione che era il tenore dell'argilla contenuta nella calce a determinare la resistenza della malta.

Tuttavia gli sfuggiva ancora la connessione di cause tra l'azione dell'argilla contenuta nel calcare e cotta insieme ad esso e l'argilla cotta aggiunta sotto forma di polvere di laterizi. All'epoca non si sapeva ancora che l'indurimento non era dovuto all'argilla ma alla silice messa in libertà per la cottura dell'argilla stessa.

Fu Vicat a riprendere con approccio scientifico lo studio sulle calce idrauliche, mettendo in evidenza il ruolo dell'argilla.

Gli studi di Vicat possono essere riassunti nelle seguenti leggi fondamentali:

- Perché il calcare dia con la cottura una calce idraulica è necessario e sufficiente che esso contenga una certa quantità di argilla intimamente disseminata nella sua massa.
- L'elemento essenziale dell'idraulicità è la silice.
- Si possono fabbricare delle calce idrauliche mescolando un'argilla qualunque con calce grassa o con carbonato di calcio in proporzione determinata e facendo cuocere la miscela come un calcare ordinario.

Le scoperte di Vicat furono così portentose che fu chiamato dall'Ecole Polytechnique, a Parigi, dove una commissione incaricata di giudicare il suo operato gli consegnò calce ed argilla, affinché seduta stante preparasse con questi materiali della calce idraulica. Egli preparò la miscela con le proporzioni che aveva indicato nelle sue pubblicazioni, la fece cuocere e con il prodotto della cottura formò una pasta che fu inserita in alcune bottiglie riempite con acqua, che furono poi sigillate.

La commissione, composta da personaggi che sarebbero diventati celebri, come Gay-Lussac e Thénard, si dimostrò scettica riguardo la capacità di indurimento della pasta sott'acqua, ma solamente fino all'anno successivo.

Passato questo periodo di tempo, le bottiglie furono esaminate da uno dei commissari, che prese un ago e lo fece scendere lentamente all'interno di una di queste per esaminare la calce depositata sul fondo. Arrivato alla calce indurita, l'ago si arrestò senza lasciare un'impronta sulla superficie di essa. Ciò dimostrò l'impenetrabilità della calce, che aveva fatto presa ed era indurita, dimostrando l'esattezza e l'attendibilità delle tesi di Vicat.

Si arrivò alla conclusione che senza argilla la calce può dare una malta che indurisce lentamente nell'aria, ma che in presenza di acqua si scioglie perdendo la sua consistenza.

Mescolata con l'argilla, la calce sott'acqua fa presa rivelandosi un ottimo materiale da costruzione.

Vicat, dunque, si occupò di spiegare la differenza di quelle che un tempo erano chiamate calci grasse, calci magre e calci idrauliche. Le prime sono calci pure che necessitano di anidride carbonica. Le seconde contengono magnesia, non presentano qualità particolari. Le calci idrauliche invece sono prodotte da calcari argillosi, e forniscono malte che hanno capacità di indurimento.

Siamo però ancora lontani dalla nascita del Cemento Portland, che di lì a poco avrebbe monopolizzato il mercato dei materiali da costruzione escludendo le preziose scoperte sull'argilla.

Ulteriori passi verso il nuovo materiale vennero fatti da Joseph Aspidin (1779 – 1855), che brevettò nel 1824 un prodotto che battezzò Portland Cement, il cui nome nasce a ragione del suo colore, molto simile a quello di una pietra da costruzione apprezzatissima in Inghilterra, la pietra di Portland.

Fu il figlio di un operaio inglese, di nome Isac Charles Johnson (1811 – 1911) che arrivò a formulare il primo vero e proprio Cemento Portland della storia. Johnson si accorse di quanto fosse importante portare avanti la cottura fino a vetrificazione, che ritenne essenziale per ricavare un buon cemento. Fu così che ottenne nel 1844 il primo vero cemento Portland.

Da questo punto in poi inizia il vero e proprio mercato del cemento, che metterà in secondo piano lo studio dell'argilla all'interno delle miscele. Nei secoli successivi, la grande domanda di nuove costruzioni causerà il rischio di esaurimento delle materie prime, e l'alta temperatura alla quale si ottiene il clinker per la creazione del cemento renderà indispensabile la ricerca di nuove soluzioni più economiche e meno dispendiose in termini di energia. Tale esigenza si manifesterà negli studi sui nuovi materiali in sostituzione al Cemento Portland sviluppati a partire dall'inizio degli anni 2000.

I COMPONENTI DEL CEMENTO

Il cemento è in realtà formato da ossidi di calcio, silicio, alluminio e ferro. È raro che questi componenti siano presenti nella giusta proporzione in una sola materia prima, di conseguenza è necessario produrre una miscela a tal proposito. La miscela in questione dovrà essere formata da un componente ad alto tenore di calcio (componente calcareo) e da uno a basso tenore di calcio, che contenga però una percentuale maggiore di silice, allumina ed ossido di ferro (componente argilloso).

I componenti principali del cemento sono dunque il calcare e l'argilla, oppure il calcare e la marna.

Il calcare

Il carbonato di calcio (CaCO_3) è un minerale di origine sedimentaria molto comune che si può formare per mezzo di due processi: per precipitazione diretta dell'acqua, solitamente di mare, o per accumulo in un lungo periodo temporale di innumerevoli scheletri di animali microscopici. Le forme più pure

di calcare sono lo spato calcare (calcite), l'aragonite ed il marmo. La sua durezza dipende dall'era geologica: più è antica la formazione geologica, più duro risulta il calcare.

Normalmente il calcare contiene miscele di sostanze argillose che ne influenzano il colore.

La marna

I calcari con inclusione di silice, di argilla e anche di ossido di ferro sono chiamati marne. A causa della loro larga diffusione queste sono spesso impiegate per la fabbricazione del cemento. Geologicamente, le marne sono rocce sedimentarie, formatesi dalla sedimentazione contemporanea di sostanza argillosa e carbonato di calcio.

La durezza di una marna dipende dal tenore di argilla: più è elevato, minore è la sua resistenza. Il colore delle marne dipende dalle sostanze argillose che contengono, che lo fanno virare dal giallo al grigio-nero.

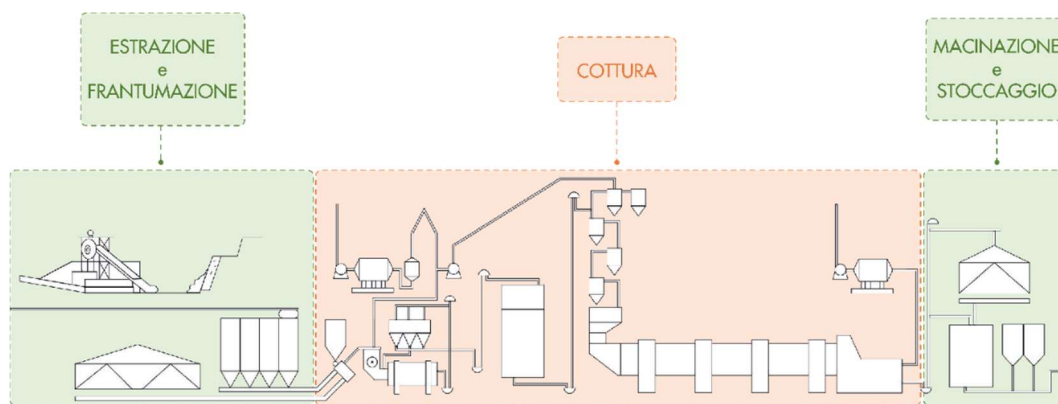
Componenti correttivi

Sono aggiunti alla miscela nel caso in cui la si debba bilanciare chimicamente. Per aumentare il tenore in silice si impiega la sabbia come correttivo. Per compensare la scarsità di ossido di ferro possiamo invece ricorrere al minerale di ferro naturale o ad esempio alle scaglie di laminazione che provengono dalla lavorazione industriale dell'acciaio.

IL CICLO PRODUTTIVO DEL CEMENTO

Gli ingredienti sopra riportati vengono quindi macinati, cotti ad alta temperatura ed addizionati con il gesso che ha la funzione di ritardante di presa. Il materiale che si ottiene alla fine di questo procedimento è denominato cemento di Portland.

Analizziamo nel dettaglio le tre fasi del ciclo produttivo del cemento:



5, Schematizzazione del ciclo produttivo del cemento

La frantumazione: per facilitare ed ottimizzare la movimentazione e lo stoccaggio delle materie prime estratte dalle cave, queste vanno ridotte di dimensioni. Per fare ciò viene utilizzato un frantoio, che permette di raggiungere una pezzatura compresa tra i 5 ed i 10 cm. La frantumazione consiste nel sottoporre i blocchi di materia prima a delle sollecitazioni d'impatto, d'attrito, di taglio o di compressione. Questo passaggio immette in ambiente l'8% delle emissioni totali di inquinanti del procedimento di produzione del cemento.

La cottura: L'impianto di cottura è costituito da tre parti, che lavorano una in seguito all'altra: torre a cicloni, forno rotante e raffreddatore a griglia.

La torre a cicloni: ogni ciclone forma uno stadio ed è collegato alla condotta ascendente del forno rotante. Tramite il ciclone la farina viene riscaldata e per mezzo del tubo di caduta dello stadio inferiore entra nel forno. Generalmente la torre è composta da 4 a 6 stadi, sovrapposti e numerati dall'alto verso il basso. Il primo stadio, il più alto, è solitamente un doppio ciclone.

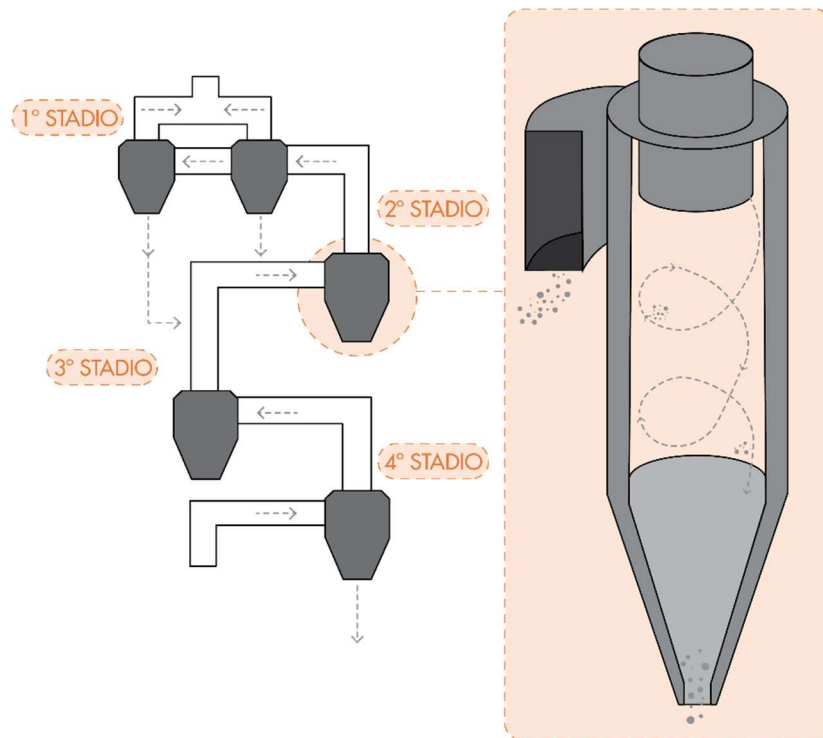


Figura 6, Schematizzazione del funzionamento della torre a cicloni

La torre a cicloni effettua un preriscaldamento, ed è all'interno di essa che si verifica la decarbonatazione della farina. È grazie a questa fase, infatti, che avviene

la separazione della CO₂ contenuta nelle materie prime sotto forma di carbonati, dagli ossidi necessari per la produzione del clinker.

Il forno rotante: Produce il clinker cuocendo la miscela di materie prime. La formazione di clinker si raggiunge solamente innalzando la temperatura al suo interno fino a 1450°C, con una temperatura di fiamma prossima ai 2000°C. Ciò rende indispensabile l'utilizzo di esose quantità di combustibile, rendendo questo il passaggio il più impattante dell'intero ciclo produttivo.

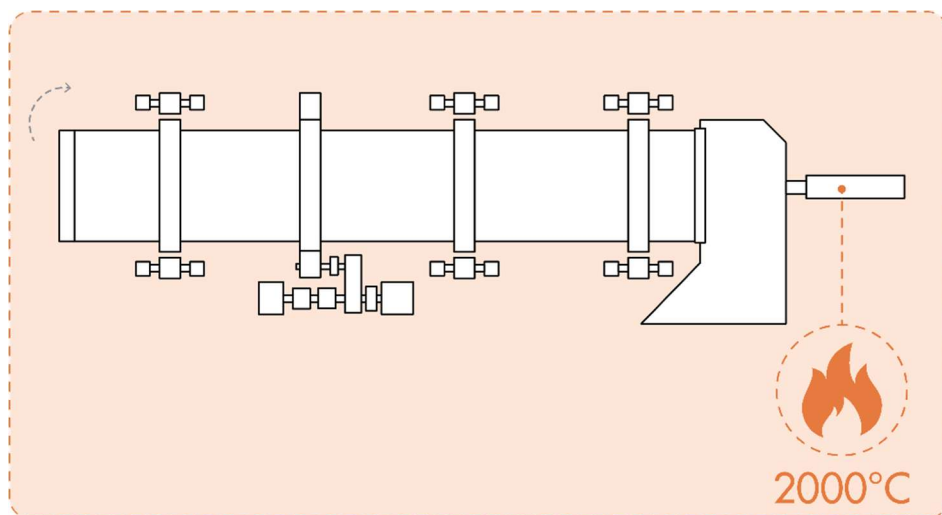
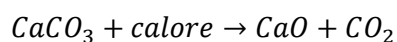


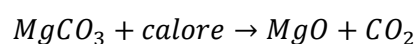
Figura 7, Schematizzazione del funzionamento del forno rotante

Nel forno rotante si verificano le seguenti fasi:

- Espulsione dell'acqua presente nella farina
- Dissociazione del carbonato di calcio secondo la reazione:

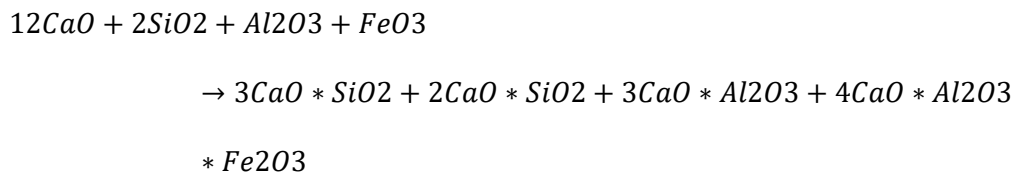


- Dissociazione del carbonato di magnesio secondo la reazione:



- Combinazione della calce con i minerali argillosi, con conseguente formazione dei quattro principali minerali del clinker, che sono rispettivamente
 - Alite ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$),
 - Belite ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$),
 - Celite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$),
 - Fase ferrica ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$),

secondo la reazione:



- Cottura del clinker

È proprio questa la fase più inquinante dell'intero processo, poiché per generare l'alta temperatura di calcinazione viene richiesto un ingente quantitativo di combustibile, ed anche perché le reazioni stesse di produzione del cemento hanno come prodotto l'anidride carbonica, che viene rilasciata in ambiente.

La creazione del clinker è in effetti il processo più inquinante del ciclo di produzione del cemento. Si stima che il rilascio in atmosfera di tonnellate di CO₂ per tonnellata di clinker sia pari a 0,84. Di questa quantità, il 62% deriva dalla decarbonatazione delle rocce calcaree ed il 38% è causato dai fumi di combustione diretta. È sicuramente indice di un materiale molto inquinante, considerato soprattutto il fatto che il comparto edile immette in ambiente più di 4 milioni di tonnellate all'anno di cemento.

Il raffreddamento del clinker: una volta uscito dal forno, il clinker necessita di essere raffreddato rapidamente per stabilizzare la propria struttura molecolare e la composizione chimica. Questo passaggio deve essere effettuato velocemente, ed influenza la struttura cristallina, la composizione chimica, la macinabilità e le caratteristiche del cemento.

La macinazione del clinker: il clinker viene trasformato in cemento vero e proprio solo una volta macinato.

È in questa fase che possono essere aggiunti alla miscela anche altri materiali, come additivi o regolatori di presa come il gesso. Nel molino del cotto viene amalgamata una miscela opportunamente dosata di clinker e gesso.

Una volta macinato, il materiale viene stoccato in attesa di essere poi trasportato al luogo di getto.

In quanto ad emissioni, la cottura è sicuramente la fase più inquinante:



Figura 8, Percentuali di emissioni di CO2 delle singole fasi del ciclo produttivo del cemento

La sola cottura immette in ambiente l'85% dell'anidride carbonica dell'intero ciclo di produzione del cemento. Per questa ragione si è rivelato necessario optare per l'utilizzo nuovi materiali, che prevedano l'impiego del minor quantitativo possibile di cemento. Si stima infatti che per tonnellata di clinker vengano rilasciate in atmosfera 0,84 tonnellate di CO₂, di cui il 62% derivante dalla decarbonatazione delle rocce calcaree utilizzate come materia prima ed il 38% dai fumi di combustione.

SOSTENIBILITÀ E NORMATIVE (ITALIA-EUROPA)

DEFINIZIONE DI SOSTENIBILITÀ

Parlare di “materiale sostenibile” sottintendendo unicamente la sostenibilità ambientale del materiale in questione, risulta troppo superficiale. È necessario comprendere cosa si intende oggi con la parola sostenibilità, soprattutto se applicata ai nuovi materiali, così detti sostenibili.

La sostenibilità si declina in tre dimensioni interdipendenti, rispettivamente:

- Sostenibilità ambientale, intendendo la capacità di mantenere qualità e riproducibilità delle risorse naturali;
- Sostenibilità economica, ovvero la capacità di generare reddito e lavoro per sostentamento della popolazione;
- Sostenibilità sociale, cioè la capacità di garantire condizioni di benessere umano (sicurezza, salute, istruzione, democrazia, partecipazione, giustizia) equamente distribuite per classi e genere;

Risulta quindi impossibile parlare di materiale sostenibile a trecentosessanta gradi senza capire il procedimento che è alla base della sua definizione, tenendo a mente che un materiale sostenibile dal punto di vista ambientale potrebbe non esserlo se lo si osserva sotto il profilo economico.

Secondo l'Enciclopedia Treccani, *“la sostenibilità è la condizione di sviluppo sociale ed economico in grado di assicurare il soddisfacimento dei bisogno della generazione presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di realizzare i propri”*.

Questa definizione è in realtà fortemente influenzata dal Rapporto Brundtland, pubblicato nel 1987. È proprio in questo documento, che prende ufficialmente il nome di “Our Common Future”, che troviamo la definizione di sviluppo sostenibile, dalla quale è stata poi estrapolata la frase sopra riportata *“Lo sviluppo sostenibile è quello sviluppo che consente alla generazione presente di soddisfare i propri bisogni senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri”*.



Figura 9, Schema rappresentativo delle componenti dello sviluppo sostenibile

Il consapevole utilizzo delle risorse a disposizione risulta quindi la chiave di lettura dello sviluppo sostenibile, in qualsiasi campo questa definizione voglia essere applicata.

Il tema della sostenibilità coinvolge le diverse le fasi di vita di un manufatto edilizio, e tocca soprattutto la scelta dei materiali utilizzati per la realizzazione del progetto, che devono essere sufficientemente prestanti per poter garantire sia la durabilità della struttura sia il comfort per l'utente che

interagisce con essa. Occorre che avvenga, come scritto precedentemente, una presa di coscienza che porti ad un concreto sviluppo sostenibile del processo edilizio, dalla progettazione alla dismissione dell'edificio. Ciò che preme è cercare di ottimizzare l'utilizzo delle materie prime già disponibili e consentire tanto la crescita dell'industria delle costruzioni quanto la conservazione del pianeta per le future generazioni.

Il rapporto Brundtland prevedeva la tutela dell'ambiente tramite la sensibilizzazione della collettività a comportamenti più responsabili nei confronti delle risorse utilizzate.

A partire da questa pubblicazione, iniziò a livello mondiale il ciclo di conferenze e congressi che vedranno come protagonista il tema della conservazione del pianeta per le generazioni future.

In breve, vengono ripercorse le date cardine per lo sviluppo di una coscienza comunitaria riguardo il tema della sostenibilità ambientale.

1991: l'economista ambientale Herman Daly introdusse il principio di equilibrio fra uomo ed ecosistema, secondo il quale:

- L'immissione di sostanze inquinanti e di scorie nell'ambiente non deve superare la capacità di carico dell'ambiente stesso;
- Lo stock di risorse non rinnovabili deve restare costante nel tempo
- Il tasso di utilizzazione delle risorse rinnovabili non deve essere superiore al loro tasso di rigenerazione

1992: Conferenza Summit della terra di Rio, Eco92.

Obiettivo: stabilire un punto di incontro fra le necessità primarie dei paesi sottosviluppati e quelle dei paesi industrializzati. Vennero prodotti molti documenti, fra i quali:

- La dichiarazione di Rio sull'ambiente e sullo sviluppo, in cui vengono definiti i 27 principi su cui è basata la relazione tra ambiente e sviluppo.
- L'agenda 21, che è volta allo Sviluppo Sostenibile come prospettiva da seguire per tutti i popoli. È un documento composto da 40 capitoli in cui vengono indicate le azioni da fare nel XXI secolo in vista di uno sviluppo sostenibile.
- Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, che anticipa la stesura del protocollo di Kyoto

1994: Conferenza Europea sulle Città Sostenibili, Aalborg, Danimarca. Venne redatta la carta di Aalborg, approvata e firmata dalle 80 amministrazioni locali ed europee partecipanti e 253 rappresentanti di organizzazioni internazionali fra governi nazionali ed istituti scientifici. Durante questa conferenza venne ribadito l'impegno nel processo d'attuazione dell'Agenda 21 a livello locale. Si parlò per la prima volta di piani locali d'azione per un modello urbano sostenibile.

1997: Tokyo, Giappone. Venne siglato un trattato internazionale riguardante il surriscaldamento globale. Il documento che ne risultò fu il celebre "Protocollo di Kyoto", un trattato internazionale, sottoscritto da più di 160 Paesi, che definisce gli obiettivi relativi ai tagli sulle emissioni di gas responsabili dell'effetto serra e del riscaldamento globale. Così i paesi industrializzati si impegnarono fare in modo che le emissioni globali di inquinanti si riducessero

di almeno il 5,2% nel periodo 2008-2012 rispetto al livello di emissioni registrata nel 1990. Affinché il trattato entrasse in vigore era necessaria l'approvazione da parte di almeno 55 nazioni (tra cui 34 Paesi industrializzati con una percentuale che rappresenta almeno il 55% delle emissioni di anidride carbonica) ed entrò ufficialmente in vigore il 16 febbraio del 2005 con l'adesione della Russia. Tra le 118 nazioni che si impegnarono in questa missione erano assenti gli Stati Uniti, che al contrario si classificarono tra i primi produttori di gas inquinanti al mondo, in quanto una riduzione di questo genere avrebbe, senza dubbio, provocato una riduzione di guadagno economico.

2001: Stoccolma, Svezia. Nacque la convenzione di Stoccolma, con l'obiettivo di ridurre l'utilizzo di POP (inquinanti organici persistenti), sostanze altamente nocive capaci di diffondersi in aria, acqua e nei terreni accumulandosi nei tessuti biologici animali ed umani.

2015: Parigi, conferenza sul clima, COP21. Diede vita ad un accordo storico per contrastare i cambiamenti climatici, coinvolgendo 196 paesi. I paesi concordarono di:

- Mantenere l'aumento medio della temperatura mondiale inferiore di 2°C rispetto ai livelli preindustriali (come obiettivo a lungo termine)
- Puntare a limitare l'aumento a 1,5 °C;
- Fare sì che le emissioni raggiungessero il livello massimo il più presto possibile, con la consapevolezza che i paesi in via di sviluppo avrebbero impiegato più tempo per raggiungere questo obiettivo;

- Procedere successivamente a rapide riduzioni in conformità con le soluzioni scientifiche disponibili, rimanendo quanto più possibile aggiornati con il mondo della ricerca;

2018: Katowice, Conferenza sul clima. Produsse delle indicazioni concrete per l'incremento della riduzione delle emissioni, e con la grande portata mediatica dell'evento si innescò nelle giovani generazioni l'urgenza di dover porre un freno alle ingenti emissioni dei paesi più industrializzati.

2021: Glasgow, conferenza delle nazioni unite sui cambiamenti climatici (COP26). Venne completato il corpus normativo dell'accordo di Parigi e venne mantenuto l'obiettivo di limitare il riscaldamento globale a 1,5 °C.

È con questa panoramica degli eventi storici riguardo la ricerca di una sostenibilità ambientale che possiamo approcciarci al corpo normativo europeo ed italiano.

IL QUADRO NORMATIVO ITALIANO

A partire dai primi anni 2000, l'Unione Europea ha cercato di mantenere paralleli ma costanti i filoni di sensibilizzazione sul problema ambientale (portato avanti con le conferenze sopra citate) e quello di ricerca e regolamentazione dei nuovi materiali.

Il Regolamento (UE) n. 305/2011 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 9 Marzo 2011, introduce importanti novità nell'ambito dei prodotti utilizzati per le opere di costruzione. Prima di quel momento un prodotto da costruzione doveva soddisfare i sei requisiti di base, ovvero:

- Resistenza meccanica e stabilità,
- Sicurezza in caso di incendio,
- Igiene e salute ambientale,
- Sicurezza e accessibilità in uso,
- Protezione contro il rumore,
- Risparmio energetico e ritenzione del calore.

Viene quindi introdotto un nuovo requisito di base (il settimo) da dover soddisfare in sede progettuale, che prende il nome di "Uso sostenibile delle risorse naturali".

Questo viene così definito: *"Le opere di costruzione devono essere concepite, realizzate e demolite in modo che l'uso delle risorse naturali sia sostenibile e garantisca in particolare quanto segue:*

- a) *Il riutilizzo o la riciclabilità delle opere di costruzione, dei loro materiali e delle loro parti dopo la demolizione;*
- b) *La durabilità delle opere di costruzione;*

c) L'uso, nelle opere di costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili."

Da qui ha inizio il ruolo di crescente importanza che acquisisce l'impiego di materie ecologicamente compatibili in sede progettuale.

L'Europa introdusse la pratica del Green Public Procurement (abbreviata con la sigla GPP, in italiano Appalti Verdi per le P.A.) nel primo decennio degli anni 2000 con la comunicazione della commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo ed al Comitato delle Regioni con il nome di "Appalti Pubblici per un ambiente migliore". Il GPP è l'approccio secondo cui le Pubbliche Amministrazioni integrano politiche ambientali nelle fasi dei processi di acquisto.

Fondamento del GPP sono i Criteri Ambientali Minimi (CAM) per prodotti e servizi.

I CAM si occupano di:

- Riportare delle indicazioni generali volte ad indirizzare l'ente verso la razionalizzazione dei consumi e degli acquisti;
- Forniscono delle considerazioni ambientali collegate alle diverse fasi delle procedure di gara;
- Forniscono indicazioni su livelli minimi di prestazione ambientale che beni e servizi devono rispettare

La commissione ha individuato dieci settori prioritari per il GPP, in cui è compreso quello che riguarda le costruzioni, includendo le materie prime utilizzate per l'edificazione.

Il Green Public Procurement è stato introdotto in Italia nel 2008 con il "Piano di azione per la sostenibilità ambientale dei consumi della pubblica

amministrazione", adottato con il Decreto Interministeriale dell'11 Aprile del 2008 ed aggiornato con il Decreto del 10 Aprile 2013, per poi diventare obbligatorio con il nuovo codice appalti (D.Lgs. n. 50/2016, modificato dal D.lgs n. 65/2017).

Il PAN ha l'obiettivo di massimizzare la diffusione del GPP presso gli enti pubblici, ne definisce gli obiettivi nazionali ed identifica le categorie di beni, servizi e lavori di intervento sulle quali vanno definiti i Criteri Ambientali Minimi.

I CAM sono i requisiti ambientali definiti per le differenti fasi del processo di acquisto, e sono volti ad individuare la soluzione progettuale migliore sotto il profilo ambientale nell'arco del ciclo di vita del prodotto, considerando anche la disponibilità di mercato. Fra le categorie merceologiche per le quali vengono individuati i CAM, c'è anche quella dell'edilizia, in cui vengono annoverati anche i materiali utilizzati per le costruzioni ed il loro impatto ambientale. Nello specifico, nella trattazione dei calcestruzzi confezionati in cantiere e pre confezionati, viene imposto che i calcestruzzi utilizzati per il progetto siano prodotti con un contenuto di materiale riciclato (sul secco) di almeno il 5% sul peso del prodotto.

I nuovi cementi

Da un punto di vista strettamente tecnico, la classificazione delle miscele cementizie viene trattata all'interno delle norme UNI EN 197-1 del 2011 e 197-5 del 2021. I parallelismi fra le due sono considerevoli, ed indirizzano all'utilizzo di materiali compositi con una matrice cementizia che include al suo interno quantitativi sempre minori di Cemento Portland, perché sostituito con leganti ad un minor impatto ambientale.

La scelta di una miscela piuttosto che un'altra deriva dalle conoscenze tecniche dell'utente progettista e dall'impiego che si fa della costruzione una volta completata. Queste norme sono state create con l'obiettivo di gettare in opera un prodotto che, se eseguito con le proporzioni indicate dalla norma, garantisce il livello di prestazione prestabilito.

La normativa UNI EN 197-1: "Composizione, specificazioni e criteri di conformità per i cementi comuni" elenca gli 8 costituenti principali dei cementi comuni che sono rispettivamente: Clinker (K), Loppa d'alltoforno (S), Fumo di silice (D), Pozzolana naturale (P) o naturale calcinata (Q), Cenere volante silicea (V) o calcarea (W), Scisto calcinato (T) e Calcare (L o LL).

È da questa varietà di costituenti che deriva il numero rilevante di tipi e sottotipi di cemento inclusi nella norma.

Viene infatti prevista la distinzione di 5 tipi di cemento, 27 sottotipi (di cui 26 contenenti almeno un secondo costituente principale oltre al Clinker K) che si differenziano in base al costituente principale ed alla percentuale di cui se ne fa uso, e 6 classi di resistenza.

I 5 tipi di cementi comuni, conformi alla norma sono:

- Cementi di tipo I (CEM I), "Cementi Portland", costituiti almeno per il 95% da clinker;
- Cementi di tipo II (CEM II), "Cementi Portland di miscela", costituiti da clinker in una percentuale compresa fra il 65% ed il 94%. La restante parte è costituita da loppa d'altoforno, fumi di silice, pozzolana, ceneri volanti, scisto calcinato o calcare. I costituenti minori possono ricadere in due range: 6-20%, al quale corrisponde la lettera A, o 21-35% cui segue la lettera B;

- Cementi di tipo III (CEM III), "Cementi d'altoforno", costituiti fino al 64% da clinker e loppa granulata d'altoforno che può essere impiegata in tre possibili range di percentuali individuate dalle lettere A, B e C;
- Cementi di tipo IV (CEM IV) "Cementi pozzolanici", costituiti da clinker per 65%-89% per il range A o tra 45%-89% per il range B, con pozzolana naturale o artificiale;
- Cementi di tipo V (CEM V) "Cementi compositi", costituiti da un ridotto contenuto di clinker (variabile in percentuale da 40%-60% fino ad arrivare al range 20%-39%) e da una miscela di loppa e pozzolana.

Tabella 1, Tabella contenuta nella normativa UNI EN 197-1

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Costituenti principali										Costituenti secondari	
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare			
						naturale	naturale calcinata	silicea	calcarea		L	LL		
						P	Q	V	W					
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cemento Portland composito	CEM II/A-M	80-88	-----12-20-----									0-5	
		CEM II/B-M	65-79	-----21-35-----									0-5	
	CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM III/B			20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/C			5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento pozzolanico	CEM IV/A	65-89	-	-----11-35-----					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	-----36-55-----					-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito	CEM V/A	40-64	18-30	-	-----18-30-----		-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	-----31-49-----		-	-	-	-	-	0-5	

Dalla norma è facilmente deducibile che la maggior parte dei cementi impiegati sul mercato europeo sono di tipo binario, cioè costituiti da clinker ed un altro costituente principale. Viene tuttavia riservato uno spazio anche a quei cementi che sono composti da un numero più elevato di costituenti (che in ogni caso raramente sono più di tre). Parliamo dei CEM II/A, CEM II/B, CEM IV e CEM V.

Come citato precedentemente, la pubblicazione e l'entrata in vigore delle norme in questione accade parallelamente al ciclo di conferenze che porta in primo piano la questione della riduzione dell'impronta di carbonio del comparto edilizio. Il comitato Tecnico di Normazione Europeo di settore (CEN/TC51) ha sviluppato una norma recente riguardo nuove composizioni di cementi ternari, la cui matrice è composta da due costituenti principali che si vanno ad aggiungere al clinker.

La norma in questione è la UNI EN 197-5 e tratta il cemento Portland composito CEM II/C-M, non trattato dalla UNI EN 197-1 ed un diverso tipo di cemento composito, il CEM VI anch'esso non considerato nella UNI EN 197-1, che si prevede di utilizzare per la preparazione di calcestruzzi e malte.

L'inclusione di altri tipi di cemento nella nuova norma è dovuta al superamento dell'ideologia che era alla base della precedente, che prevedeva l'utilizzo di miscele con una lunga esperienza d'utilizzo. È stato considerato che cementi con composizioni differenti rispetto a quelle specificate nella EN 197-1 potessero comunque presentare proprietà tali per cui le opere, se ben progettate, potessero soddisfare i sette requisiti previsti dal Regolamento (UE) 305/2011 sopra citato. L'inserimento dei nuovi cementi

è avvenuto anche e soprattutto a valle dell'intensa attività di ricerca pre-normativa, atta a verificarne l'idoneità dal punto di vista prestazionale e basata sul protocollo di prove specificate nel CEN/TR 16912.

Le nuove miscele di cemento sono state create seguendo i criteri che seguono:

- Ridurre il contenuto di clinker, il costituente che più di tutti contribuisce all'impronta di CO₂ del cemento;
- Estendere l'impiego di costituenti consistenti di materie secondarie di processi industriali, come la loppa d'altoforno o di materie con ridotta impronta di CO₂ quali la pozzolana naturale e ottenuta dalla cottura di argille, lo scisto calcinato ed il calcare;
- Sfruttare gli effetti sinergici che possono prodursi utilizzando determinate combinazioni di costituenti.

I due cementi ternari considerati dalla 197-5 sono:

- CEM II/C-M, "Cemento Portland Composito", è lo sviluppo dei cementi Portland Compositi CEM II/A e CEM II/B già esistenti. È stato ottenuto riducendo il quantitativo di clinker al 50%
- CEM VI, "Cemento Composito", contenente, oltre al clinker ed alla loppa, un altro costituente tra pozzolana, cenere volante silicea e calcarea, la cui percentuale può arrivare al 20%

Tabella 2, Composizione dei cementi indicata nella UNI EN 197-5

Tipi principali	Denominazione dei prodotti (tipi di cemento)		Costituenti principali										Costituenti secondari	
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare			
						naturale	naturale calcinata	silicea	calcarea		L	LL		
Nome	Denominazione	K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL			
CEM II	Cemento Portland-composito	CEM II / C-M	50-64	-----36-50-----										0-5
CEM VI	Cemento Composito	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	

Vedendo le composizioni dei cementi sopra riportati, appare chiara la volontà di ridurre il più possibile il quantitativo di Clinker nei nuovi cementi. In aggiunta, la nuova norma aumenta l'importanza del calcare, il cui utilizzo è previsto fino al limite del 20% in massa. Questo perché solo recentemente è aumentata la consapevolezza che il calcare potrebbe migliorare le prestazioni meccaniche a breve termine dei conglomerati grazie all'azione attivante (centro di nucleazione) sui processi di idratazione del legante soprattutto se in granulometria molto fine.

Nello specifico, per questa tesi, sono stati utilizzati quattro differenti leganti:

- CEM I utilizzato come riferimento;
- CEM II/C-M con Pozzolana naturale calcinata 1;
- CEM II/C-M con Pozzolana naturale calcinata 2;
- CEM II/C-M con Loppa d'Altoforno.

Gli ultimi tre leganti sono stati prodotti abbassando il contenuto di CEM I al 50% della massa (cioè al minimo), sostituendo il 33% con la pozzolana o la loppa a seconda della miscela considerata, e per il 17% con il calcare.

Queste miscele verranno trattate in maniera ben più approfondita all'interno del capitolo LC3.

Risulta utile visualizzare nel diagramma le aree compositive coperte dai nuovi cementi CEM II/C-M e CEM VI.

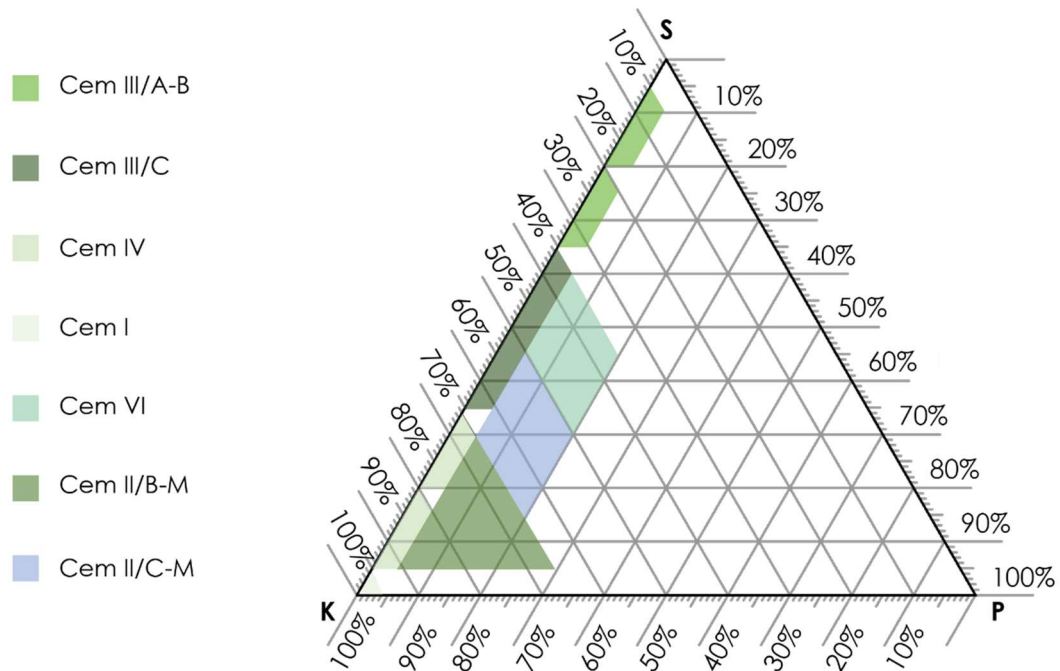


Figura 10, Confronto grafico tra le composizioni dei cementi delle due normative UNI EN 197-1 e UNI EN 197-5

Si nota immediatamente che i due nuovi cementi occupano delle aree compositive ampie, indice di una certa flessibilità nella loro composizione.

In termini di resistenza meccanica, tempi di presa, stabilità volumetrica e parametri chimici, i requisiti sono inalterati rispetto a quelli espressi nella 197-1. I cementi della 197-5 possono essere prodotti in tutte le classi di resistenza standard 32,5 , 42,5 , 52,5 nelle declinazioni L, N e R.

I valori rappresentano la resistenza normalizzata, ovvero la resistenza a compressione calcolata a 28 giorni dal getto, in conformità alla UNI EN 196-1 che prevede provini standard con rapporto inerte/cemento pari a 3 ed acqua/cemento pari a 0,5.

Per una miscela è previsto che venga verificata la resistenza a compressione a breve termine, cioè a 2 ed a 7 giorni dal getto. In ogni classe di resistenza normalizzata sono previste tre classi di resistenza iniziale: resistenza ordinaria (N), resistenza elevata (R, ovvero a rapido indurimento) e una resistenza iniziale bassa (L).

CLASSE DI RESISTENZA	Resistenza a compressione minima [N/mm ²]		
	2 giorni	7 giorni	28 giorni
32.5 L	-	12	32.5
32.5 N	-	16	
32.5 R	10	-	
42.5 L	-	16	42.5
42.5 N	10	-	
42.5 R	20	-	
52.5 L	10	-	52.5
52.5 N	20	-	
52.5 R	30	-	

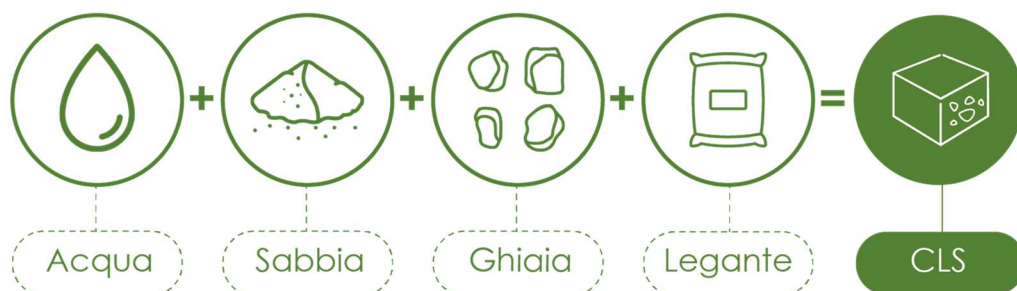
MATERIALI UTILIZZATI

Lo scopo di questo lavoro di tesi è valutare l'effetto in termini sia di proprietà meccaniche sia di sostenibilità ambientale mediante analisi LCA dell'utilizzo di nuovi cementi di miscela classificati come CEM II/C-M dalla recente normativa UNI EN 197-5 in sostituzione del tradizionale cemento Portland CEM I.

I conglomerati realizzati per ottenere questo scopo sono due, rispettivamente malta e calcestruzzo.



La malta è un conglomerato formato da legante, inerte fine con granulometria fra 0,063 e 4 mm (sabbia) ed acqua.



Il calcestruzzo è stato creato in un secondo momento, una volta verificata la resistenza meccanica della malta. Si tratta di un materiale formato da malta

alla quale è stata aggiunta la ghiaia, cioè inerti con assortimento granulometrico superiore a 4 mm.

L'INERTE

Esso ricopre una funzione di primaria importanza quando si parla di miscele cementizie, in quanto costituisce due terzi del volume del calcestruzzo. Inoltre, con la nuova normativa che consente un maggiore impiego di inerte in termini quantitativi in favore di una diminuzione della frazione di cemento impiegata, gli inerti hanno iniziato ad acquisire un ruolo di primaria importanza. Si consiglia sempre l'utilizzo di inerti dal punto di vista granulometrico il più possibile differenziato, affinché le parti più fini possano dislocarsi negli spazi interstiziali che i granuli più grossi non riuscirebbero a colmare. In questo modo si ottimizza l'omogeneità dello scheletro solido riducendo i vuoti interstiziali, che altrimenti penalizzano la durabilità e la resistenza meccanica del manufatto finale.

Gli inerti vengono classificati in base al loro diametro in:

- Filler, inerti finissimi con diametro inferiore a 0,063 mm;
- Sabbia, inerti fini con diametro che ricada fra gli 0,063 e 4 mm;
- Ghiaia, inerti grossi con diametro al di sopra dei 4 mm.

Per le sperimentazioni riportate in questa tesi si è reso necessario l'utilizzo di tutte e tre le tipologie di inerti, in quanto filler e sabbia sono state impiegate nel confezionamento delle malte, mentre la ghiaia nel confezionamento del calcestruzzo.

La sabbia

Per il confezionamento di malte è stata utilizzata una sabbia normalizzata CEN EN 196-1, con granuli di 2 mm di natura silicea, normalmente utilizzata per il confezionamento delle malte standard necessarie per classificare la classe di resistenza dei cementi. Si è scelto il suo utilizzo non solo perché ci permette di comparare i risultati ottenuti con altri studi, ma proprio perché essendo certificata e normalizzata, si ha contezza della sua granulometria e delle condizioni di umidità.

I pacchetti sigillati permettono infatti la preservazione delle condizioni s.s.a., ovvero satura a superficie asciutta. In questo modo, l'inerte non inficia sul quantitativo di acqua destinata alla miscelazione, dato che non ne sottrae e non ne rilascia.



Figura 11, Sabbia utilizzata per il confezionamento delle malte, conforme alla UNI EN 196 - 1

Il filler calcareo

Con il termine filler si intende un inerte finissimo con $d < 0.063$ mm.

Un cemento confezionato con un alto contenuto di filler a parziale sostituzione del CEM I lo rende più sostenibile sotto i punti di vista ambientale ed economico. È proprio per questi motivi che la nuova normativa sui cementi ha ampliato il range di utilizzo del filler calcareo per il confezionamento di miscele cementizie. Si tratta di un materiale naturale molto diffuso, e fornitoci in elevata quantità dall'azienda CRH che ha richiesto la realizzazione di cementi sostenibili performanti. Il calcare è inoltre economicamente conveniente, in quanto il suo processo di produzione, estrazione e macinazione compresi è molto meno dispendioso rispetto a quello per l'ottenimento del Cemento Portland.

L'ACQUA

Nella realizzazione di calcestruzzi e malte l'acqua ha sempre rivestito un ruolo cruciale. Conoscere il quantitativo di cemento o di legante da utilizzare per il confezionamento di un materiale composito è tanto importante quanto essere consapevoli della quantità di acqua di cui si farà uso. Il quantitativo di acqua usato per confezionare un certo volume noto di malta o calcestruzzo è il principale fattore che influenza le proprietà del conglomerato allo stato fresco (lavorabilità, tempo di presa) e indurito (considerando il rapporto a/c). L'acqua fa sì che il legante venga attivato, mediante la reazione di idratazione che innescano il fenomeno della presa e dell'indurimento.

Quando la miscela è ancora fresca la quantità di acqua utilizzata è responsabile anche del bleeding e della segregazione, fenomeni che portano alla separazione dell'inerte utilizzato e che riducono irrimediabilmente la resistenza meccanica e la durabilità del prodotto finale. L'acqua, durante la fase di miscelazione, bagna le particelle di cemento creando fra loro forze coesive, conferendo lavorabilità all'impasto. Tali forze coesive si formano a causa dello sviluppo dei primi idrati sulla superficie delle particelle di cemento e riducono il rischio di bleeding e segregazione; questi legami però non devono formarsi troppo velocemente, poiché si avrebbe una perdita di lavorabilità. Ciò può accadere ad esempio nel caso in cui il getto venga eseguito in condizioni ambientali a temperature elevate.

È stato impiegato un rapporto a/c pari a 0.5 poiché è il rapporto a/c per le malte standard necessarie per trovare le classi di resistenza dei cementi.

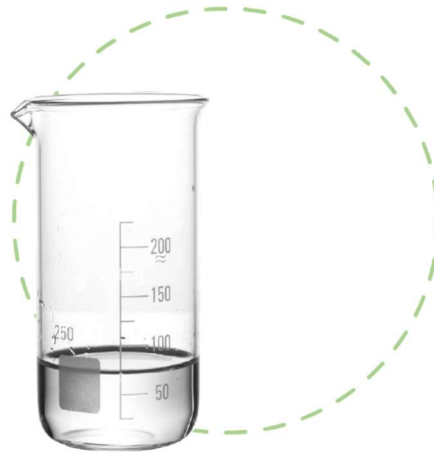


Figura 12, Contenitore graduato utilizzato per la misurazione del quantitativo di acqua inserito nelle miscele

Superfluidificante

L'aver ottenuto un impasto lavorabile non garantisce in ogni caso un corretto sviluppo delle resistenze meccaniche. Con miscele che includono materiali come le argille, che a pari lavorabilità richiedono un quantitativo d'acqua maggiore rispetto ad un mix ottenuto con solo cemento, risulta difficile raggiungere soddisfacenti prestazioni meccaniche. Incrementando il contenuto d'acqua per ottenere una buona lavorabilità, rispetto ad un cemento ordinario la resistenza meccanica subirebbe un decremento una volta indurito l'impasto, senza contare che l'indurimento avverrebbe in un lasso di tempo più prolungato. Per questi motivi si è reso necessario l'utilizzo di superfluidificanti, ovvero materiali che appartengono alla categoria degli additivi per calcestruzzo e che aumentano la fluidità (di conseguenza la lavorabilità) dell'impasto a pari contenuto d'acqua. I superfluidificanti rendono possibile il raggiungimento di un elevato livello di fluidità e lavorabilità dell'impasto grazie ad un effetto deflocculante.

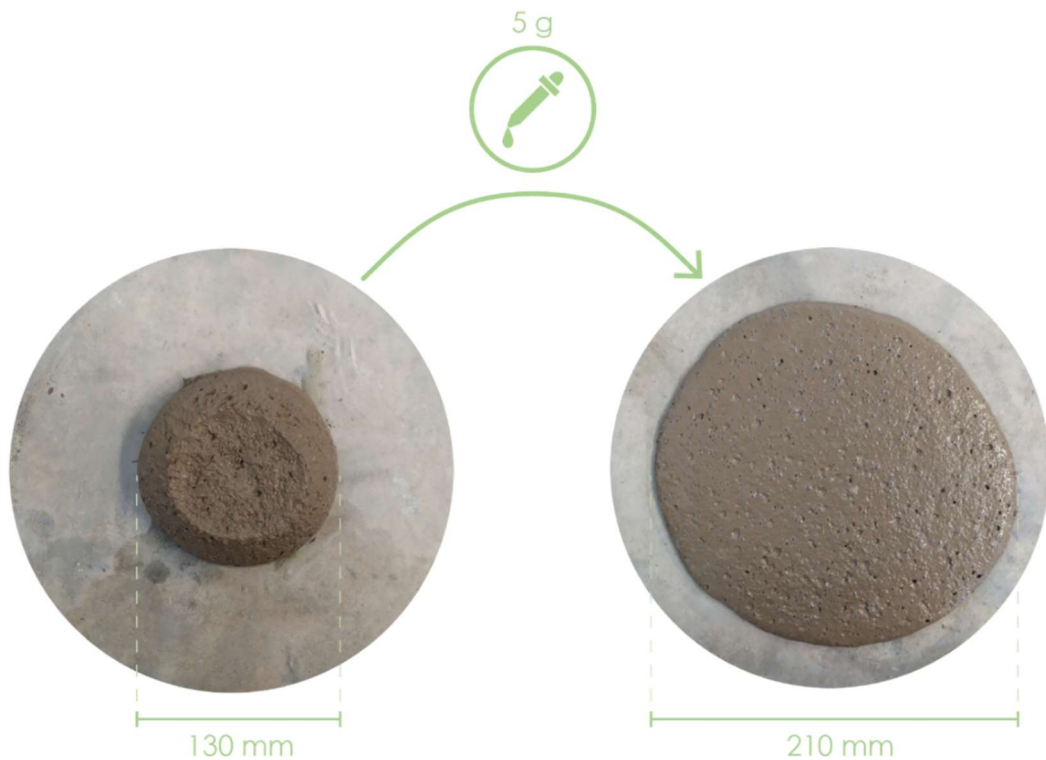


Figura 13, Miscela prima e dopo l'aggiunta di 5g di superfluidificante

In una sospensione di cemento ed acqua molto diluita acqua i granuli di cemento tendono ad agglomerarsi. Questo fenomeno si chiama flocculazione ed è dovuto all'attrazione elettrostatica tra i granuli di cemento, a seguito delle cariche elettrostatiche di segno opposto formatesi sulle superfici dei granuli per effetto della macinazione durante il processo produttivo. Se si aggiunge il superfluidificante, i granuli sono invece deflocculati, cioè dispersi nella miscela. A livello macroscopico, si assiste ad un incremento di lavorabilità a parità di contenuto di acqua.

Il superfluidificante quindi consente di:

- Migliorare la lavorabilità degli impasti a pari contenuto di acqua e cemento
- Aumentare Rck e durabilità, riducendo l'acqua e di conseguenza anche il rapporto a/c (a pari lavorabilità e pari contenuto di cemento);

- Ridurre il ritiro igrometrico, riducendo l'acqua ed il cemento, quindi a pari a/c e pari lavorabilità;

Per questo progetto è stato utilizzato il Superfluidificante di Sika, Viscocrete VC 20HE



Figura 14, Il superfluidificante utilizzato nella sperimentazione, Sika Viscocrete VC 20 HE

IL LEGANTE

Cemento Portland

In questo studio è stato utilizzato un CEM I, la cui classe di resistenza è 52.5N.



Figura 15, CEM I 52.5 N utilizzato per le sperimentazioni

La loppa d'altoforno

La loppa d'altoforno è un sottoprodotto dell'industria siderurgica. Deriva dalla macinazione delle scorie provenienti dalla fusione in altoforno di minerali di ferro. Le scorie vengono raffreddate repentinamente una volta uscite dall'altoforno, dopodiché vengono macinate finemente. Il risultato è un prodotto con finezza e proprietà idrauliche paragonabili a quelle del cemento.

Essendo considerato un materiale di scarto è stata utilizzata frequentemente nei mix design per sostituire parte del Cemento Portland, anche se ad oggi, iniziando a venire meno l'attività principale che ha come risultato questo prodotto di scarto, è un prodotto che potrebbe risultare più costoso e difficile da reperire.

Può essere effettuato un raffronto fra cementi pozzolanici e cementi con loppa d'altoforno. In termini di prestazioni, la loppa è in grado di indurire con la sola presenza di acqua, mentre la pozzolana ha bisogno anche di calce.

La loppa è inoltre lenta ad indurire, e questa caratteristica rallenta lo sviluppo iniziale della resistenza alle brevi stagionature (data dall'indurimento del clinker di Portland), anche se contribuisce ad incrementare la resistenza finale. Indurendo così lentamente, inoltre, il calore di idratazione sviluppato è molto contenuto.



Figura 16, Loppa d'Altoforno utilizzata per le sperimentazioni

L'ARGILLA

Le argille sono i materiali maggiormente utilizzati all'interno di questa sperimentazione. L'utilizzo dell'argilla per il confezionamento di miscele cementizie, sebbene porti ad un decremento drastico delle emissioni inquinanti del prodotto finito, ha presenta alcune criticità intrinseche.

Una su tutte è la notevole differenziazione in termini di composizione chimica che si ha trattando argille estratte in diverse parti del mondo. A seconda dell'ubicazione della cava le argille possiedono differenti composizioni e, di conseguenza, i materiali che se ne ricaveranno svilupperanno differenti proprietà meccaniche.

Acquisisce quindi estrema importanza la caratterizzazione delle argille, come fatto per questo lavoro di tesi, per permettere la previsione del loro comportamento all'interno di un conglomerato.

Poiché i nomi delle argille non possono essere utilizzati perché segreto industriale, verranno di seguito denominate Argilla 1 ed Argilla 2.

Caratterizzazione della reattività

Attualmente non esistono delle norme italiane per la caratterizzazione meccanica delle argille. Possiamo tuttavia fare riferimento al SAI ed alla Relative Compressive Strenght.

I provini per le classificazioni sono stati ricavati con i seguenti mix design:

Mix	Cemento (g/L)	Acqua (g/L)	Sabbia Standard (g/L)	Argilla Calcinata (g/L)	a/c
Argilla 1 (70%PC 30%Arg1)	353	252	1513	151	0.5
Argilla 2 (70%PC 30%Arg2)	355	254	1523	152	
Argilla 1 1% G (70%PC 30%Arg1)	349	252	1513	150	
Argilla 2 1% G (70%PC 30%Arg2)	352	254	1523	151	
Quarzo (70%PC 30%Quarzo)	353	252	1513	0	
PC Ref	509	254	1526	0	

Il limite inferiore è stato ricavato con una miscela in cui il 30% del cemento è stato sostituito con il quarzo, materiale che comportandosi da inerte non contribuisce allo sviluppo della resistenza meccanica.

La lavorabilità ottenuta ($a/c=0.5$) è plastica. La resistenza meccanica delle miscele è stata misurata a 2, 7, 28 e 90 giorni di stagionatura in condizioni standard ($T=20\pm 1^\circ\text{C}$ e Umidità Relativa $UR=95\pm 5\%$).

I provini ottenuti hanno le dimensioni di 40*40*160 mm, e sono stati ricavati seguendo la UNI EN 196 – 1. Il cemento utilizzato come riferimento ed in combinazione con le argille è un CEM I 52.5 N.

Vengono riportate le resistenze a compressione di ogni miscela:

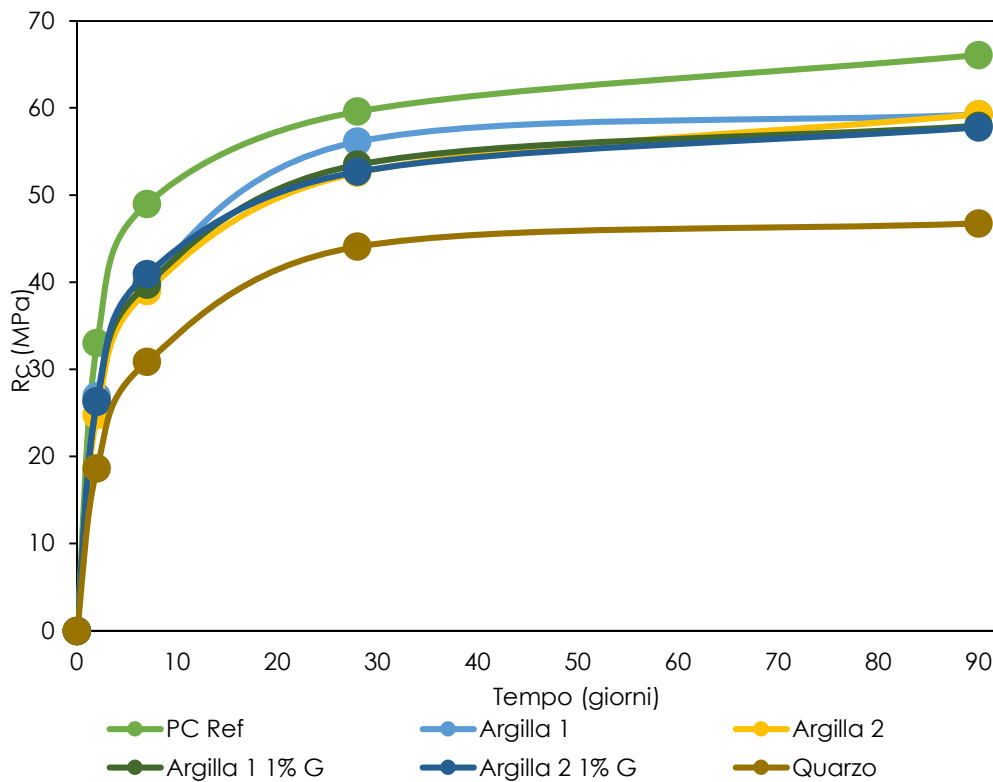


Figura 17, Grafico delle resistenze a compressione espresse in MPa dei provini utilizzati per il calcolo del SAI e dell'RSCM

È possibile dedurre dal grafico delle Rc che l'1% di gesso in peso sul legante incrementa anche se non in maniera rilevante la resistenza meccanica fino ai 7 giorni di stagionatura, cioè solo alle brevi stagionature.

SAI (Strenght Activity Index)

Si fa riferimento alla norma ASTM C618, una norma americana che consente la classificazione dei cementi testando la miscela confezionata a 7 o a 28 giorni di stagionatura.

La formula che permette la classificazione è la seguente:

$$SAI = \frac{R_{SCM}}{R_{pc}} \times 100$$

In cui:

- R_{pc} : resistenza a compressione della miscela utilizzata come riferimento;
- R_{SCM} : resistenza a compressione della miscela contenente l'argilla.

Per essere classificata come cemento, la miscela deve avere un SAI superiore o uguale al 75% a 7 giorni oppure pari all'80% a 28 giorni.

Tabella 3, Risultati della classificazione secondo il SAI

SAI	2 gg	7 gg	28 gg	90 gg
PC Ref	100	100	100	100
Argilla 1	82	81	94	90
Argilla 2	75	80	88	90
Argilla 2 1% G	80	81	90	88
Argilla 2 G	80	84	88	87
Quarzo	38	38	74	71

Tutte le miscele ottengono un SAI circa pari a 90 a 90 giorni di stagionatura, dunque risultano meno prestanti del PC Ref del 10%. Nei mix con le argille, il

cemento Portland è stato sostituito con il 30% di argilla calcinata, quindi le argille riducono di poco le prestazioni delle malte anche per questo motivo.

Relative Compressive Strength

La Relative Compressive Strength è definita nella norma RILEM TC 267-TRM phase 3, e permette di paragonare la resistenza di una miscela a quella di un riferimento.

La Relative Compressive Strength è calcolata seguendo l'equazione:

$$R_{SCM,relative(\%)} = \frac{R_{SCM} - R_{PC}}{R_{PC}} \times 100$$

In cui:

- R_{PC} : è il valore di resistenza a compressione della miscela utilizzata come riferimento;
- R_{SCM} : corrisponde alla resistenza a compressione della miscela contenente l'argilla.

Tabella 4, Risultati della classificazione secondo la Rscm

RSCM,relative	2 gg	7 gg	28 gg	90 gg
PC Ref	0	0	0	0
Argilla 1	-18	-19	-6	-10
Argilla 2	-25	-20	-12	-10
Argilla 2 1% G	-20	-19	-10	-12
Argilla 2 G	-20	-16	-12	-13
Quarzo	-43	-43	-26	-29

Bound of water

Il calcolo dell'acqua di legame è stato effettuato seguendo il Reactivity R3 test – Bound of water.

L'Argilla 2 risulta avere una perdita di acqua di legame superiore rispetto all'Argilla 1. Ad un maggior quantitativo di perdita di acqua di legame corrisponde un'alta reattività. L'Argilla 2 risulta più reattiva dell'Argilla 1. Ciononostante, entrambe le argille possono essere classificate come moderatamente reattive, dato che l'Argilla 1 ha il 65% di probabilità di essere moderatamente reattiva, mentre per l'Argilla 2 la percentuale sale al 75%.

Caratterizzazione chimica

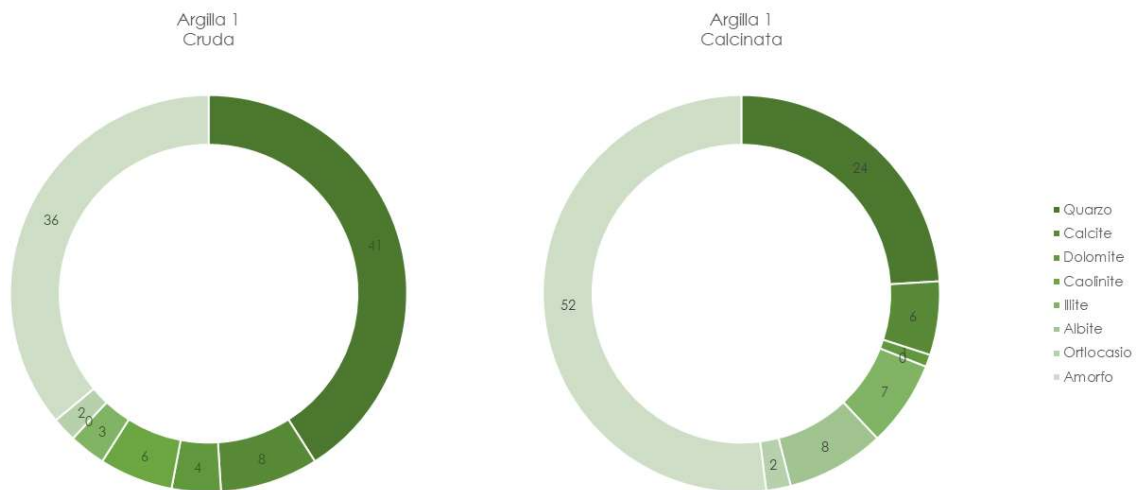
Si è rivelato necessario comprendere la composizione chimica delle argille utilizzate, con il fine di prevederne il comportamento meccanico una volta utilizzate per confezionare le miscele anche in collaborazione con l'azienda fornitrice.

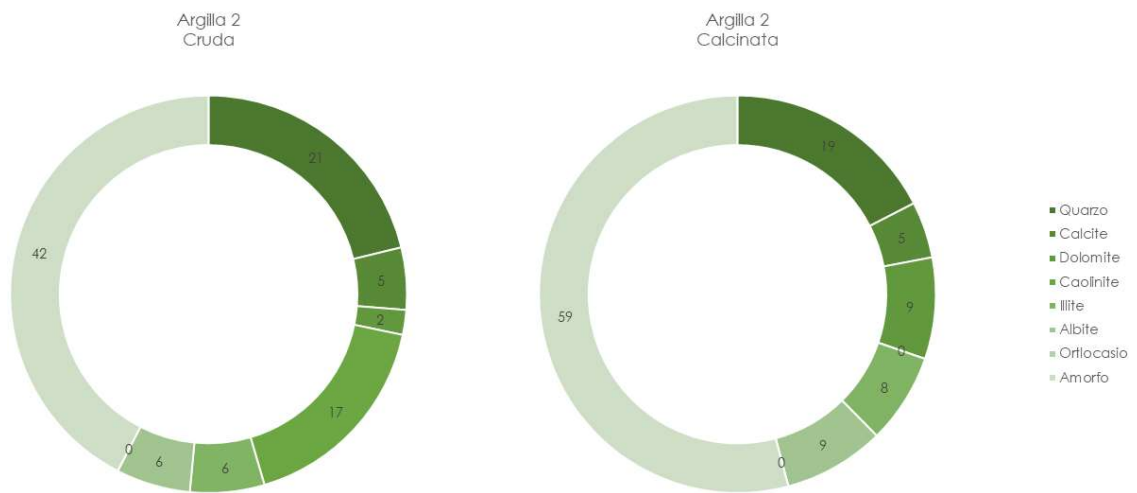
In un primo momento si è effettuata una prova analisi elementare delle argille in termini di XRF ed EDAX. I risultati di entrambe le prove sono comparabili: l'argilla 2 ha un valore più alto di Silicio ed Alluminio rispetto all'argilla 1, che in compenso ha un contenuto maggiore di calcio.

	XRF			EDAX		
Argilla 1	SiO ₂	45.25%	Si/Al=3.9 Ca=10.4	Silicio	14.53%	Si/Al=2.3 Ca=12.4
	Al ₂ O ₃	10.26%		Alluminio	6.27%	
	CaO	14.55%		Calcio	12.44%	
	SiO ₂	50.76%		Silicio	17.77%	

Argilla 2	Al ₂ O ₃	19.13%	Si/Al=2.3 Ca=3.1	Alluminio	10.63%	Si/Al=1.7 Ca=5.0
	CaO	4.3%		Calcio	5.02%	

La caratterizzazione chimica mediante diffrazione dei raggi X permette di riconoscere le principali fasi mineralogiche cristalline e di quantificare la percentuale di fase amorfa del campione analizzato. Questa caratterizzazione è stata fatta sulle argille sia prima sia dopo la calcinazione come riportato nei grafici seguenti. Di particolare importanza è quantificare la percentuale di caolinite all'interno delle argille. Ad una alta percentuale di caolino corrisponde infatti un tipo di argilla molto reattiva. Dopo la calcinazione la caolinite diventa metacaolino amorfo incrementando la fase amorfa.





Prima della calcinazione la percentuale di fase amorfa dell'Argilla 1 è pari al 36%, mentre l'Argilla 2 ha una fase amorfa del 42%.

Dopo la calcinazione la percentuale di fase amorfa per l'Argilla 1 sale al 52%, mentre l'argilla 2 raggiunge il 59%. La calcinazione riduce quindi il picco di caolinite e incrementa la fase amorfa, come preventivato.



Figura 18, Argilla 1 utilizzata nelle sperimentazioni



Figura 19, Argilla 2 utilizzata nelle sperimentazioni

LC2

Prima di effettuare dei getti delle miscele cementizie è stato analizzato il comportamento meccanico di alcune miscele di argilla e calcare attivate che nell'ambito della ricerca prendono il nome di LC2. Tale dicitura sta per Limestone Calcined Clay.

Si tratta di miscele costituite per due terzi da argilla calcinata e un terzo da calcare attivate con differenti tipologie di attivatore forniti dall'azienda, per valutare quale fosse l'attivatore migliore per ottimizzare le prestazioni meccaniche dei rispettivi conglomerati.

La preparazione dei provini e le modalità di prova sono state le stesse utilizzate per il confezionamento dei provini LC3 riportati nel capitolo successivo.

Il mix design utilizzato per 1 L di miscela è riportato nella tabella seguente:

Mixes	Cemento (g/L)	Acqua (g/L)	Sabbia Standard (g/L)	Calcare (g/L)	Argilla calcinata (g/L)	Attivatore (g/L)	a/c
Argilla 1 LC2 no attivazione	0	248	1486	165	330	0	0.5
Argilla 2 LC2 no attivazione	0	251	1508	168	335	0	
Argilla 1 M500 LC2	0	238	1428	159	317	31	
Argilla 2 M500 LC2	0	241	1449	161	322	31	
Argilla 1 P100 LC2	0	238	1428	159	317	21	
Argilla 2 P100 LC2	0	238	1428	159	317	21	

Argilla 1 P165 LC2	0	235	1410	157	313	28
Argilla 2 P165 LC2	0	235	1410	157	313	28
Argilla 1 P200 LC2	0	233	1399	156	311	32
Argilla 2 P200 LC2	0	233	1399	156	311	32

In realtà è stato preparato 1,5 L di miscela per ogni impasto per il confezionamento di 3 campioni 40*40*160 mm da caratterizzare meccanicamente rispettivamente a 2, 7, 28 giorni di stagionatura.

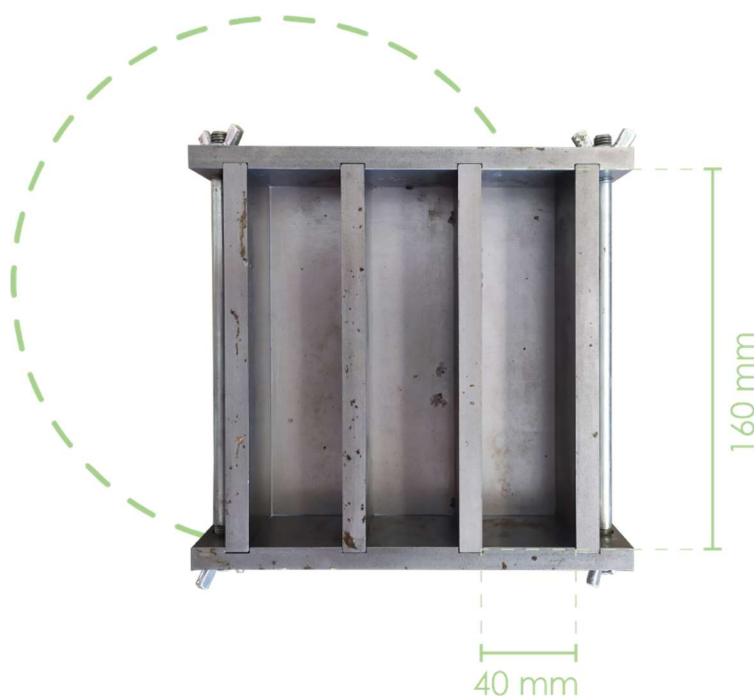


Figura 20, Una delle due tipologie di cassero utilizzate per gettare le miscele

Un campione di ogni miscela è stato depositato nello stampo tronco-conico della tavola a scosse, e se ne è analizzato lo spandimento. Per spandimento si intende il diametro raggiunto dalla miscela in condizioni libere dopo essere

stato battuto 15 colpi con la tavola a scosse. Lo spandimento è stato calcolato come una media aritmetica fra due diametri in due direzioni perpendicolari l'una all'altra. La consistenza da raggiungere era plastica, alla quale corrisponde uno spandimento medio minimo di 140 mm.



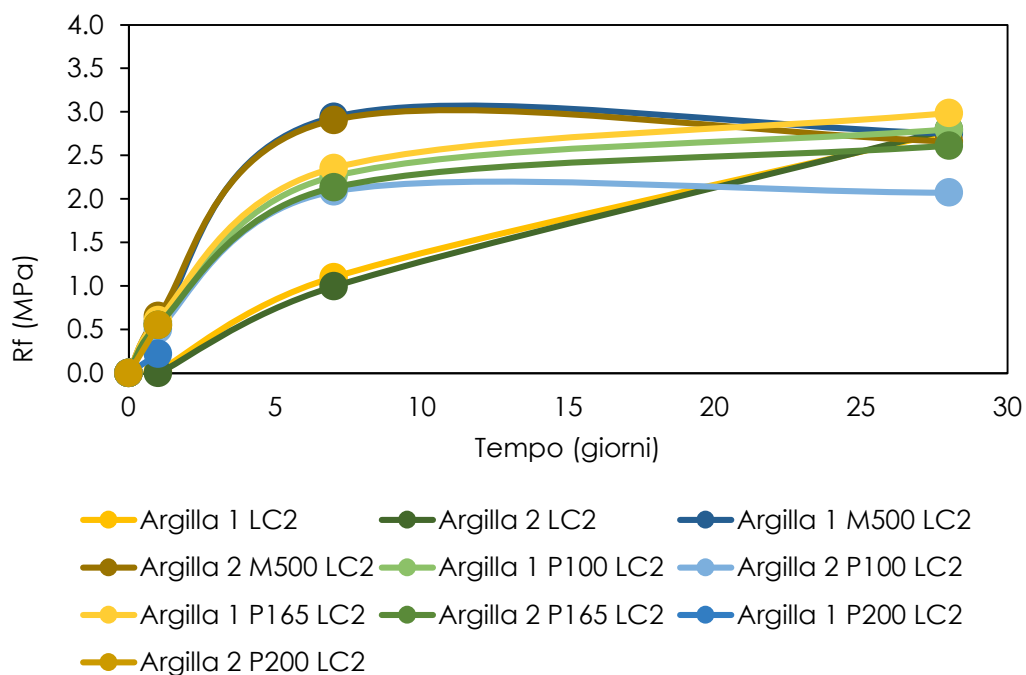
Figura 21, Prova di lavorabilità

Gli spandimenti per ogni miscela misurano rispettivamente:

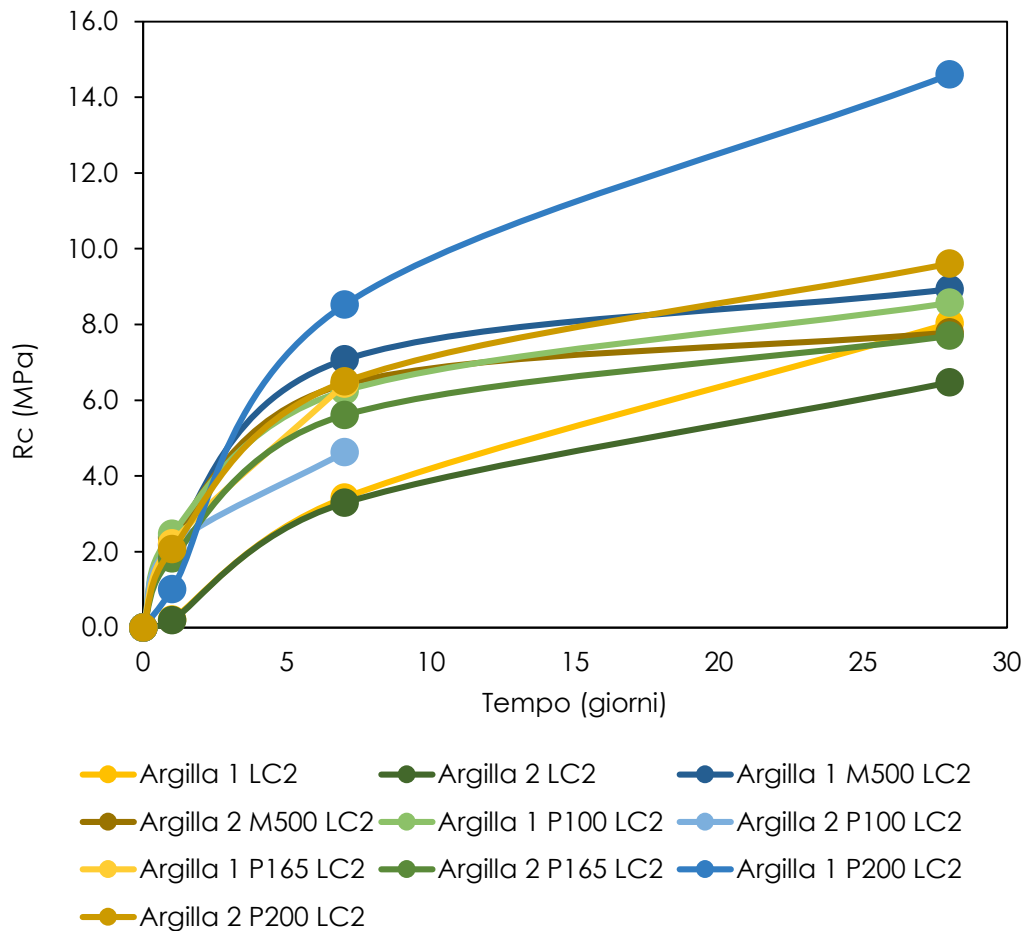
	Spandimento 1	Spandimento 2	Spandimento
Argilla 1 LC2 no attivazione	14.5	14	14.3
Argilla 2 LC2 no attivazione	14.0	14.5	14.25
Argilla 1 M500 LC2	14.5	14.5	14.5
Argilla 2 M500 LC2	14.0	14.0	14
Argilla 1 P100 LC2	14.2	14.0	14.1

Argilla 2 P100 LC2	14.2	14.5	14.35
Argilla 1 P165 LC2	12.0	12.5	12.25
Argilla 2 P165 LC2	13.5	12.5	13
Argilla 1 P200 LC2	13.5	14.5	14
Argilla 2 P200 LC2	13.5	14.0	13.75

I provini sono stati poi rotti a 2, 7 e 28 giorni. La rottura è stata effettuata sia a compressione che a flessione. Prima della diretta osservazione dei diagrammi, è necessario ricordare che non si tratta di cementi, di conseguenza le resistenze meccaniche sono notevolmente inferiori a quelle delle miscele cementizie utilizzate per edificare. Il diagramma per le resistenze a flessione:



Il diagramma per le resistenze a compressione:



Al termine della stagionatura il conglomerato più resistente è stato quello costituito dall'argilla 1 attivata con l'attivatore P200.

Le resistenze a compressione e a flessione risultano ovviamente inferiori a quelle che si avrebbero per una miscela cementizia, questo perché nel progetto della miscela è stato volutamente escluso l'impiego del cemento, per poter verificare il comportamento dei due tipi di argilla in relazione ai differenti tipi di attivatore.

LC3

La dicitura LC3 sta per Limestone Calcined Clay Cement, ovvero cementi ternari costituiti da cemento Portland, calcare ed argilla calcinata.

Questo tipo di cementi è nato con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale del settore delle costruzioni, dato che per la loro creazione viene impiegato il minimo quantitativo di clinker previsto dalla norma UNI EN 197-5.

In questa sperimentazione gli LC3 sono classificabili come CEM II C/M, ovvero come Cementi Portland Compositi.

Si tratta di cementi costituiti da:

- 50% Cemento Portland;
- 33% Argilla Calcinata
- 17% Calcare

È quindi un materiale che, utilizzando un quantitativo di cemento Portland molto inferiore rispetto alle miscele impiegate fino ad ora, ridurrebbe le emissioni di CO₂ di circa il 40%. Questo è dovuto alle differenti temperature di calcinazione dei tre materiali utilizzati. Il cemento Portland, come già spiegato, è il materiale con il maggiore rilascio di CO₂ all'interno dell'ambiente, poiché per la sua creazione è necessario il raggiungimento di 1450°C. L'argilla invece, raggiunge la calcinazione ad una temperatura di 800°C, mentre il calcare, ampiamente disponibile sul mercato, non necessita di procedimenti di cottura ad alte temperature.

Il cemento inoltre è fortemente inquinante proprio perché, oltre al gran quantitativo di carburante che serve per raggiungere la temperatura di calcinazione, produce esso stesso CO₂ durante le fasi della sua formazione, immettendolo in ambiente.

Utilizzando un cemento LC3 invece, le emissioni sarebbero ridotte proprio perché a 800°C l'argilla non produce CO₂.

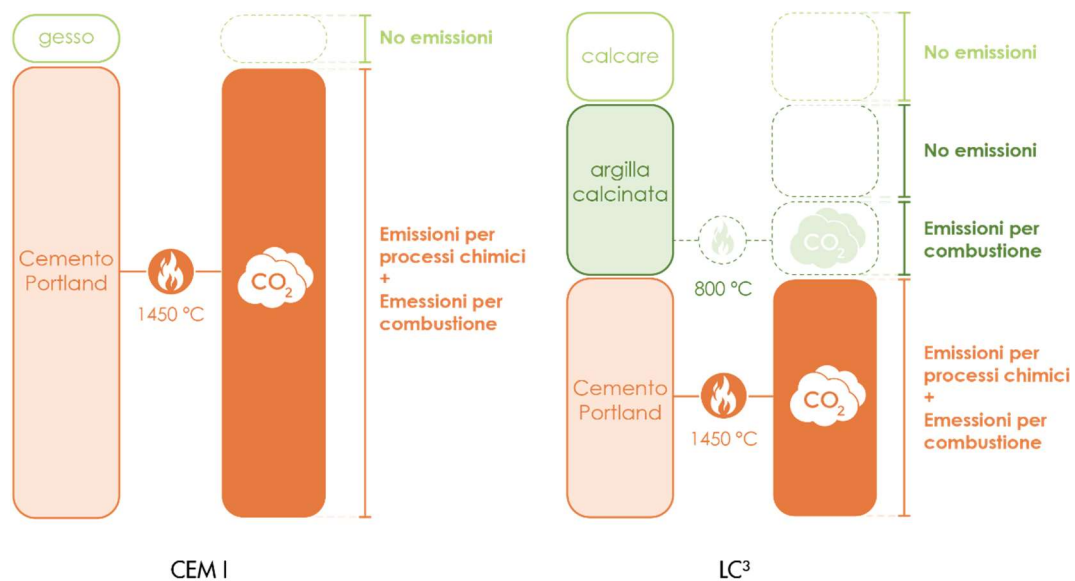


Figura 22, Paragone fra la composizione del Cemento Portland e quella dei nuovi cementi LC3

Le prime ricerche su questo legante ternario risalgono al 2015; è quindi molto recente, se si considera il tempo per il quale si è fatto ricorso al solo cemento Portland. La UNI EN 197-5, del 2021, ha poi normato questo nuovo legante permettendone l'applicazione in ambito progettuale.

Nel cemento LC3 si crea sinergia da un punto di vista meccanico tra la reazione pozzolanica dell'argilla calcinata e l'effetto riempitivo del calcare consentendo una maggiore sostituzione del clinker.

Il lato negativo dell'utilizzo dell'argilla è che le proprietà di questo materiale variano a seconda del luogo in cui questa viene estratta, e di conseguenza potrebbero variare le resistenze meccaniche del cemento che se ne ricaverebbe. Per questo motivo, prima di confezionare malte e calcestruzzi, le argille sono state analizzate chimicamente e meccanicamente.

In seguito viene riportato il procedimento per la realizzazione dei provini:

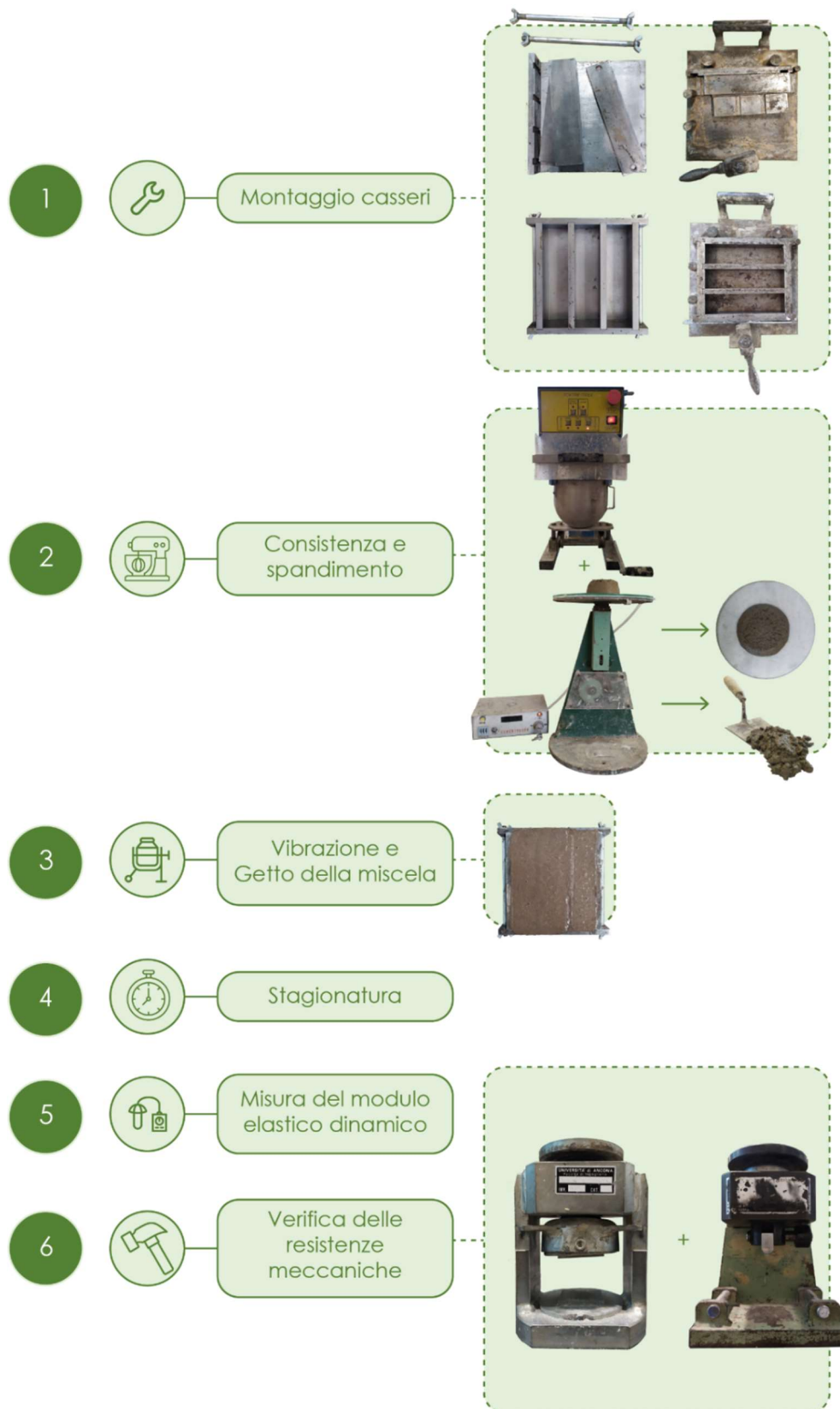


Figura 23, Fasi della sperimentazione riguardante gli LC3

MIX DESIGN

Il termine "mix design" significa letteralmente "progettazione della miscela", ovvero la determinazione dei quantitativi dei singoli materiali che andranno a comporre il materiale. In questo lavoro di sperimentazione sono stati creati mix design per le malte LC3 e per i calcestruzzi, che verranno elencati in seguito nell'apposito capitolo.

Sono state create 7 miscele per le malte, 3 di LC3 e 4 di riferimento.

Rispettivamente i nomi delle miscele LC3:

- Cornaux LC3: miscela costituita da 50% PC (Cemento Portland), 33% Argilla Cornaux e 17% Calcare;
- Opallt LC3: miscela costituita da 50% PC (Cemento Portland), 33% Argilla Opallt e 17% Calcare;
- GGBS LC3: miscela costituita da 50% PC (Cemento Portland), 33% GGBS (Loppa d'Altoforno) e 17% Calcare;

Mentre quelli delle miscele di riferimento:

- PC Ref
- Cornaux Ref
- Opallt Ref
- GGBS Ref

Abbiamo considerato anche delle miscele di solo CEM I 52.5, argilla o loppa come riferimento di confronto con le resistenze meccaniche sviluppate dai nuovi cementi LC3.

Il mix design è stato creato in un primo momento per una miscela convenzionale da 1 L, per poi essere adattato a miscele da 1,6 L. Ciò è avvenuto per ottenere i 6 standard provini necessari per la caratterizzazione meccanica che prevede la rottura di 2 di questi a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura.

Il rapporto a/c utilizzato è 0.5 mentre il rapporto i/b (ovvero il rapporto fra il cemento e gli altri materiali secchi) è di 0.3.

A seguire i mix design di ogni miscela:

ARGILLA 1 LC3	Cemento	Acqua	Sabbia Standard 0-2 mm	Argilla Calcinata Cornaux	Calcare
Materiali (g/L)	10.00	10.00	60.00	6.67	3.33
Densità (g/L)	3.10	1.00	2.63	2.64	2.70
Volume materiali (ml)	3.23	10.00	22.86	2.53	1.23
Volume materiali (ml/L)	81	251	574	63	31
Materiali per 1L (g/L)	251	251	1506	167	84

ARGILLA 2 LC3	Cemento	Acqua	Sabbia Standard 0-2 mm	Argilla Calcinata Opallt	Calcare
Materiali (g/L)	10.00	10.00	60.00	6.67	3.33
Densità (g/L)	3.10	1.00	2.63	2.98	2.70
Volume materiali (ml)	3.23	10.00	22.86	2.23	1.23
Volume materiali (ml/L)	82	253	578	56	31
Materiali per 1L (g/L)	253	253	1517	169	84

GGBS LC3	Cemento	Acqua	Sabbia Standard 0-2 mm	Loppa Altoforno	Calcare
Materiali (g/L)	10.00	10.00	60.00	6.67	3.33
Densità (g/L)	3.10	1.00	2.63	2.90	2.70
Volume materiali (ml)	3.23	10.00	22.86	2.30	1.23
Volume materiali (ml/L)	81	252	577	58	31
Materiali per 1L (g/L)	252	252	1515	168	84

PC Ref	Cemento	Acqua	Sabbia Standard 0-2 mm	Argilla calcinata	Calcare
Materiali (g/L)	20.00	10.00	60.00	0.00	0.00
Densità (g/L)	3.10	1.00	2.63	2.64	2.70
Volume materiali (ml)	6.45	10.00	22.86	0.00	0.00
Volume materiali (ml/L)	164	254	581	0	0

ARGILLA 1 Ref	Cemento	Acqua	Sabbia Standard 0-2 mm	Argilla Calcinata Cornaux	Calcare
Materiali (g/L)	0.00	10.00	60.00	20.00	0.00
Densità (g/L)	3.10	1.00	2.63	2.64	2.70
Volume materiali (ml)	0.00	10.00	22.86	7.59	0.00
Volume materiali (ml/L)	0	247	565	188	0
Materiali per 1L (g/L)	0	247	1484	495	0

ARGILLA 2 Ref	Cemento	Acqua	Sabbia Standard 0-2 mm	Argilla Calcinata Opallt	Calcare
Materiali (g/L)	0.00	10.00	60.00	20.00	0.00
Densità (g/L)	3.10	1.00	2.63	2.98	2.70
Volume materiali (ml)	0.00	10.00	22.86	6.70	0.00
Volume materiali (ml/L)	0	253	578	169	0
Materiali per 1L (g/L)	0	253	1517	506	0

GGBS Ref	Cemento	Acqua	Sabbia Standard 0-2 mm	Loppa Altoforno	Calcare
Materiali (g/L)	0.00	10.00	60.00	20.00	0.00
Densità (g/L)	3.10	1.00	2.63	2.90	2.70
Volume materiali (ml)	0.00	10.00	22.86	6.90	0.00
Volume materiali (ml/L)	0	252	575	173	0
Materiali per 1L (g/L)	0	252	1509	503	0

Dato che a pari quantitativo di materiale, l'argilla richiede più acqua per raggiungere consistenze lavorabili rispetto al cemento, si è anche reso necessario l'impiego del superfluidificante. Un'aggiunta di acqua avrebbe penalizzato troppo le proprietà meccaniche del prodotto finale.

Ecco riportati i valori in grammi per ogni componente di ogni miscela per l'ottenimento di 1.6 L di miscela:

Mix Tot	Cemento (g)	Acqua (g)	Sabbia Standard (g)	SCM (g)	Calcare (g)	Super fluidificante (g)
Argilla 1 LC3	401	401	2405	267	134	2
Argilla 2 LC3	404	404	2423	269	135	1.5
PC Ref	813	406	2438	0	0	1.96
Argilla 1 Ref	0	395	2370	790	0	8.8
Argilla 2 Ref	0	404	2423	808	0	8.77
GGBS LC3	403	403	2419	269	134	0.5
GGBS Ref	0	402	2411	804	0	0.5

PREPARAZIONE DEI PROVINI

Il modo in cui vengono miscelati gli ingredienti influisce sulla resa finale del provino. Gli ingredienti secchi, ovvero inerti e leganti, sono miscelati insieme prima di essere bagnati. L'acqua viene aggiunta in un secondo momento e, se necessario, viene aggiunto anche il superfluidificante. Poiché il quantitativo del materiale da gettare non eccedeva i 5 L, per la miscelazione è stata utilizzata una miscelatrice con frusta a foglia la cui velocità è stata fatta crescere nel progredire della miscelazione.

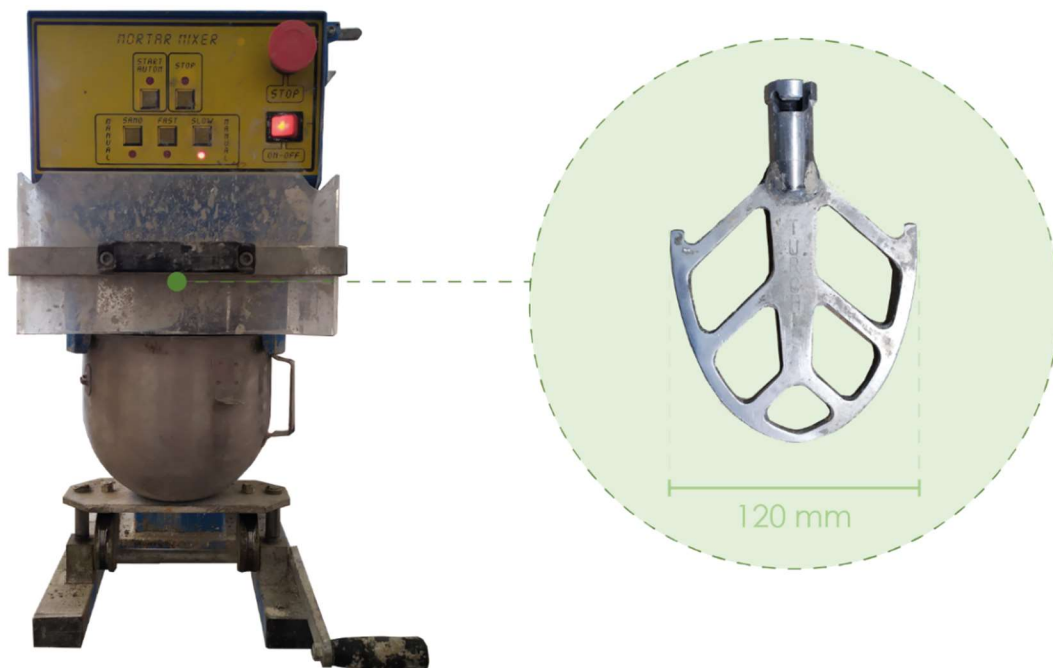


Figura 24, Impastatrice utilizzata per la miscelazione degli ingredienti

LAVORABILITÀ E CONSISTENZA

Per lavorabilità si intende la capacità che la miscela fresca ha nel muoversi senza causare segregazione degli inerti e nel compattarsi per scongiurare la presenza di bolle d'aria che ne ridurrebbero la resistenza meccanica.

La malta confezionata in laboratorio deve essere portata ad un valore di consistenza definito, ovvero la lavorabilità plastica. Nella norma UNI EN 1015-6:2007 le malte vengono classificate in tre categorie: rigida, plastica e tenera, a seconda dello spandimento (scorrimento) in mm. Una malta è plastica se il suo spandimento è superiore a 140 mm ed inferiore a 200 mm.

Tabella 5, Classificazione delle miscele in base allo scorrimento presente nella norma UNI EN 1015-6:2007

Consistenza all'atto dell'applicazione	Valore dello scorrimento mm	Procedimento
Malta rigida	<140 mm	Sottoporre a prova la malta secondo il punto 7.2.1
Malta plastica	Da 140 mm a 200 mm	Sottoporre a prova la malta secondo il punto 7.2.1 o il punto 7.2.2
Malta tenera	>200 mm	Sottoporre a prova la malta secondo il punto 7.2.3

La prova a cui si è ricorsi per la determinazione della consistenza è lo Slump Test, definito dalla UNI EN 1015-3:2007, in cui viene determinato il modo per classificare la consistenza delle malte fresche. Lo strumento utilizzato è la tavola a scosse.

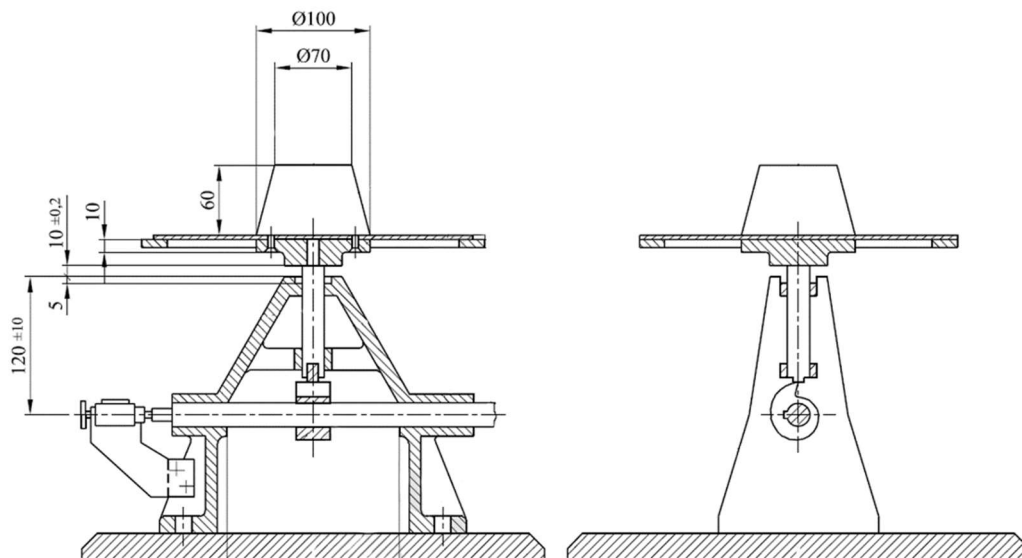


Figura 25, Sezione della tavola a scosse per la misurazione dello spandimento



Figura 26, Tavola a scosse utilizzata per verificare lo spandimento delle miscele di progetto

L'impasto è stato inserito in una forma di acciaio a tronco di cono di diametro interno pari a 70 mm in sommità e 100 mm alla base e di altezza 60 mm, posto

al centro del piatto della tavola a scosse. Lo stampo viene poi sollevato e vengono contati 15 colpi della tavola a scosse.

Così facendo la malta è in condizioni di libero spandimento. Una volta conclusi i 15 colpi, si rimuove il piatto dalla tavola a scosse e si misura lo spandimento in due direzioni, una perpendicolare all'altra. Se la media dei due valori è compresa fra i 14 ed i 20mm, allora la consistenza di quella malta sarà plastica. Si riportano gli spandimenti delle miscele LC3:



E quelli delle miscele di riferimento:

PC ref



GGBS Ref



Argilla 1 ref



Argilla 2 ref



CONFEZIONAMENTO E STAGIONATURA DEI PROVINI

Per il confezionamento dei provini sono stati utilizzati dei casseri assemblabili in acciaio. Ogni cassero può contenere tre provini, ognuno della dimensione di 160*40*40 mm. Una volta montati i casseri al loro interno la superficie è stata cosparsa con del disarmante, un emulsionante che evita la completa adesione della malta al cassero facilitando lo scassero.

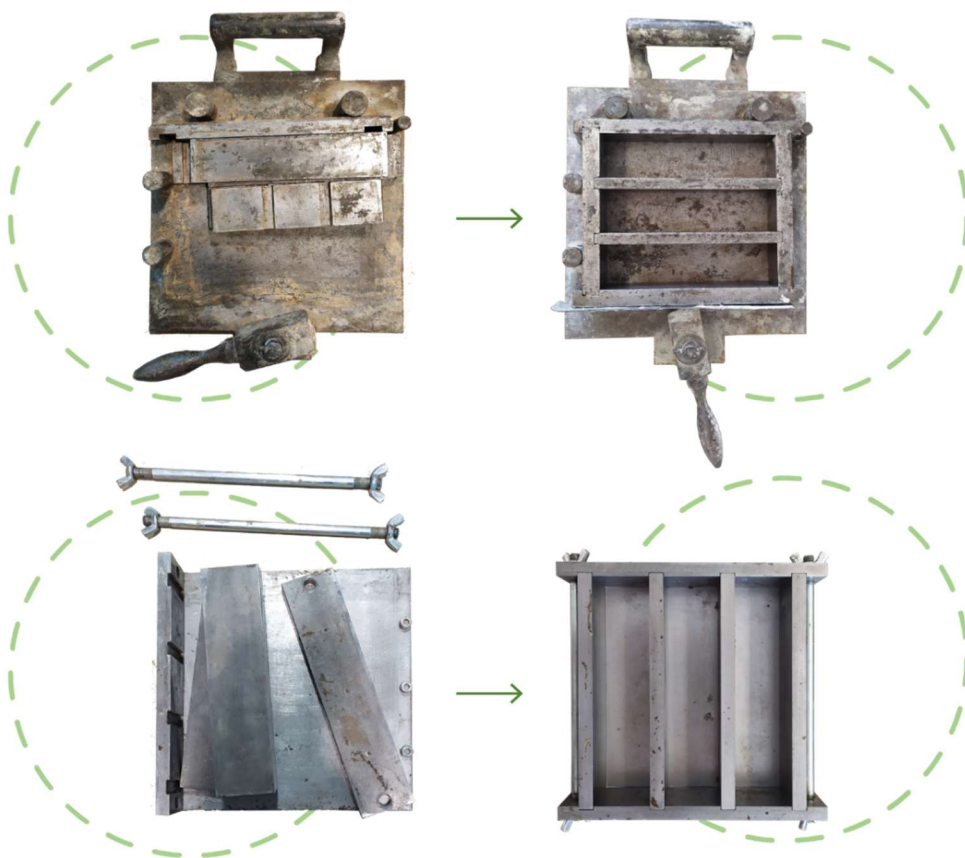


Figura 27, Le tipologie di cassero impiegate prima e dopo il montaggio

Il confezionamento di 1,6 L di miscela ci ha consentito l'ottenimento di due casseri per ogni miscela, ovvero due provini per la rottura a due giorni, due per la rottura a sette giorni e due per la rottura a 28 giorni.

Dopo aver verificato che la consistenza della malta fosse effettivamente plastica, il cassero è stato posizionato su una tavola vibrante e poi riempito con la malta. La piastra vibrante ha il compito di compattare il materiale riducendo la presenza di aria all'interno della miscela.

I provini sono stati depositati all'interno di una camera climatica, nella quale ha avuto inizio la stagionatura alle condizioni prescritte da normativa, ovvero $T=21^{\circ}\text{C}$ e $U=95\%$ ⁴.

I provini sono stati poi scasserati dopo 24 h dal getto e avvolti con pellicola trasparente, con il fine di preservare la corretta umidità di stagionatura fino a 28 giorni.

Per tutta la durata del tempo di stagionatura i provini sono stati posizionati all'interno della cella climatica, in cui non sono presenti agenti atmosferici e vi è una temperatura fissa di 21°C .

⁴ UNI EN 12390 – 2 2019: Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 2: Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza

MISURA DEL MODULO ELASTICO DINAMICO

Il modulo elastico è fondamentale nello studio di un materiale. Nel momento in cui il materiale viene sollecitato, il modulo elastico ne descrive la fase elastico-lineare nel diagramma sforzo-deformazione. Questo fornisce indicazioni sulla sua rigidità, infatti più il modulo elastico è grande più il materiale sarà rigido. Si tratta di un valore che non può essere modificato con lavorazioni successive, in quanto dipende dalla composizione chimica del materiale.

Per ottimizzare il materiale da studiare si è scelto di misurare il modulo elastico dinamico, cioè quel tipo di modulo elastico che può essere calcolato con una prova non distruttiva sul provino.

Per questa prova è stata considerata la norma UNI EN 12504-4:2021 Prove sul calcestruzzo nelle strutture – parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.

Lo strumento utilizzato è il Pundit. Il Pundit è provvisto di due sonde, una emettente e l'altra ricevente onde ultrasoniche. Il Pundit misura il quantitativo di tempo impiegato dalle onde per attraversare il campione. All'incontro con imperfezioni all'interno del provino, come porosità o intercapedini, le onde vengono riflesse ed impiegano più tempo per giungere fino alla sonda ricevente. Se ne deduce che in un provino performante, il tempo deve essere il più possibile basso.

Come specificato dal produttore, dopo aver applicato uno strato di vaselina per garantire una migliore adesione delle sonde al provino, il macchinario va

tarato dall'utente con il campione di prova fino ad ottenere il tempo di 25,3 μm .

Una volta che il macchinario è stato tarato ha inizio la prova vera e propria. Le sonde entrano in contatto con le due superfici laterali del provino di dimensioni 40*40mm, che sono state precedentemente ricoperte di vaselina.

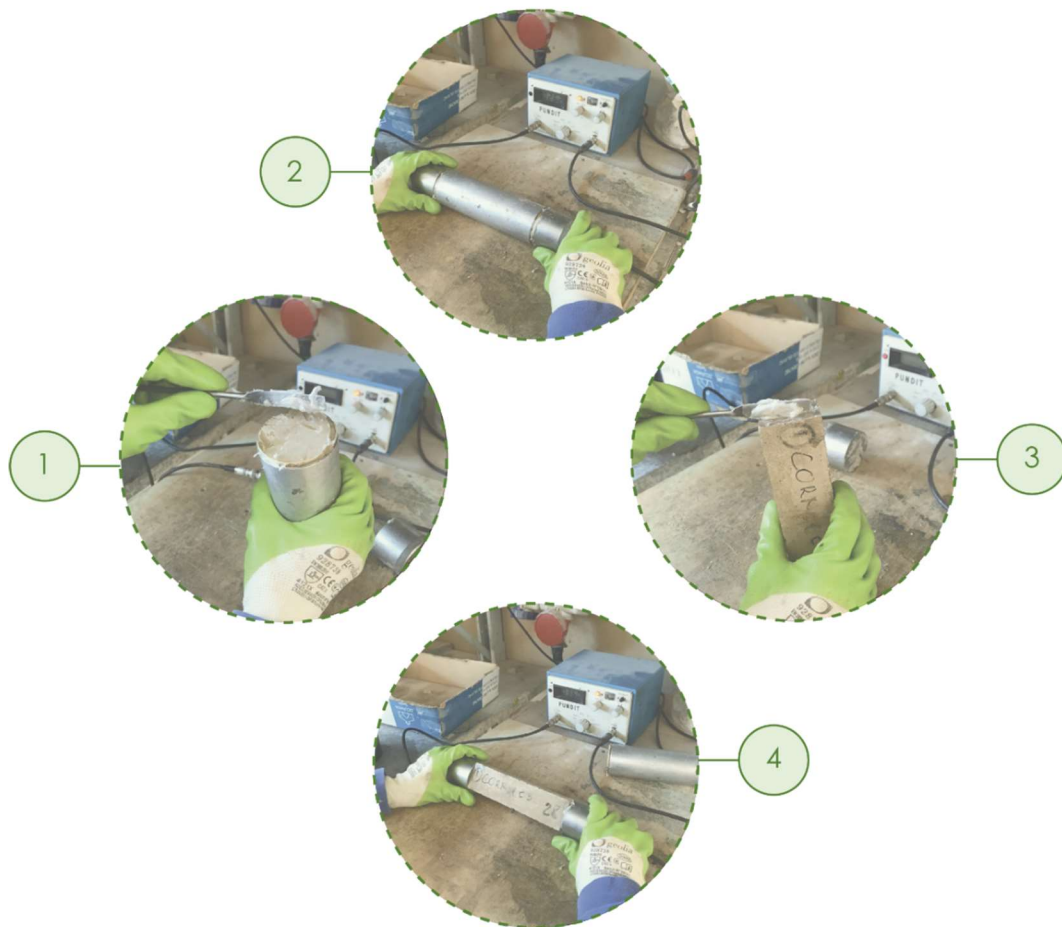


Figura 28, Procedimento per la misurazione del modulo elastico dinamico

Come detto, il Pundit ci permette di capire il tempo in cui le onde riescono ad attraversare il provino. Avendo il provino forma (e quindi lunghezza) nota, è possibile ricavare la velocità impiegata dalle onde per attraversarlo:

$$V = L / t \text{ (m/s)}$$

Dove:

- L è la lunghezza del provino;
- t è il tempo di misurato in μs .

Una volta ottenuta la velocità è possibile ricavare il modulo elastico dinamico con la formula:

$$E_{\text{din}} = \rho \cdot v^2 \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu) / (1 - \nu) \quad (\text{GPa})$$

Dove:

- ρ è la densità del provino (g/cm^3);
- v è la velocità calcolata ($\text{mm}/\mu\text{s}$);
- ν è il modulo di Poisson del calcestruzzo (= 0,2)

È stato misurato il modulo elastico dinamico solo di 6 delle poiché la miscela GGBS Ref, essendo composta dalla sola loppa, a 28 giorni non era ancora indurita.

	Tempo (μs)	Velocità ($\text{mm}/\mu\text{s}$)	Ed (GPa)
Argilla 1 LC3	35.00	4.57	41.2
Argilla 2 LC3	34.60	4.62	42.7
GGBS LC3	33.30	4.80	44.8
PC Ref	35.40	4.52	41.2
Argilla 1 Ref	43.20	3.70	25.1
Argilla 2 Ref	41.20	3.88	28.3

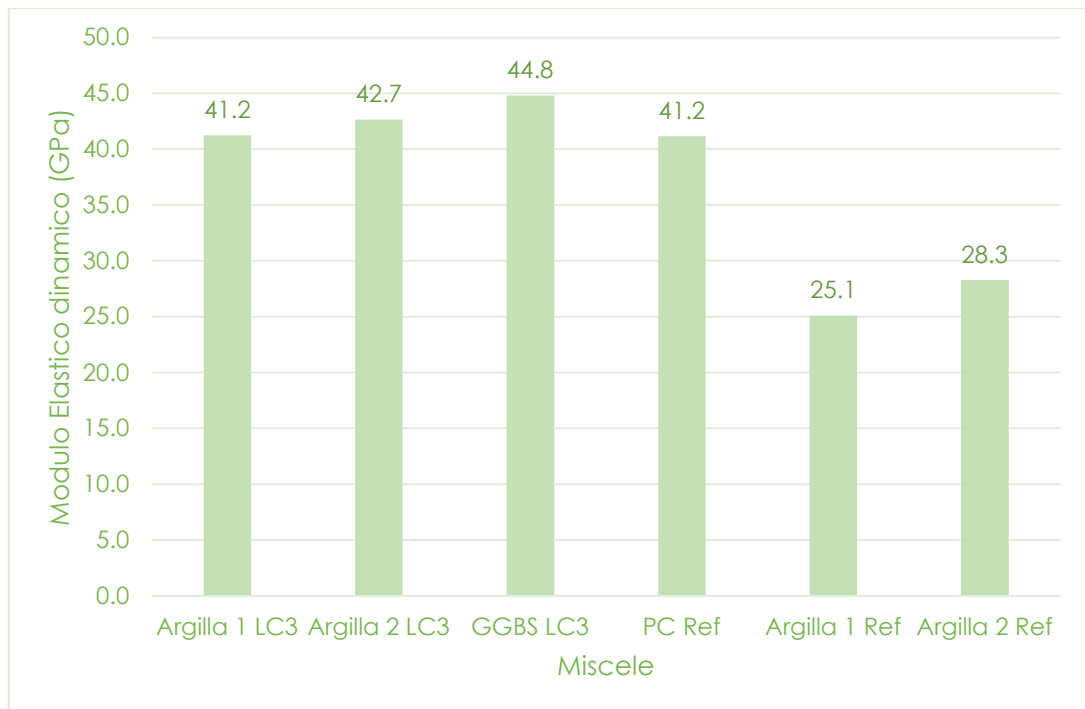


Figura 29, il modulo elastico dinamico per ogni miscela

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Nella scienza dei materiali si intende la resistenza meccanica come la grandezza della tensione unitaria massima che un corpo può sopportare prima di rompersi. Si può tradurre anche in termini di sforzo, ovvero è possibile indicare la resistenza come il massimo sforzo al quale un generico materiale può essere sottoposto prima di giungere a rottura.

Esiste ovviamente una differente resistenza meccanica per ogni tipo di sollecitazione, e può essere trovata con delle prove ben differenziate fra loro.

Si è fatto riferimento alle norme UNI EN 1015-11:2007 e UNI EN 196-1:2005. Sono state previste prove di flessione e di compressione dei materiali testati.

Le prove sono state portate avanti con una pressa idraulica automatica collegata ad un terminale, sul quale è installato un software capace di rilevare la pressione esercitata sulle facce del provino. Lo strumento è fornito di due teste intercambiabili, che grazie alla loro conformazione possono dare origine ad una rottura a flessione o a compressione. Si è scelto di effettuare prima la verifica della resistenza meccanica a flessione, poiché per tale prova era necessario un provino delle dimensioni di 160*40*40mm. Una volta rotto in due metà, entrambe le parti sono state sottoposte alla prova di compressione in quanto per questo tipo di prova è sufficiente un provino da 40*40*40 mm.

Per entrambe le prove la faccia sollecitata non è mai stata quella che durante l'indurimento nei casseri era a contatto con la pellicola, poiché la non perfetta planarità delle superfici avrebbe potuto inficiare la resistenza meccanica del materiale.

Resistenza meccanica a flessione

La testa utilizzata per questo tipo di rottura è fornita di due appoggi, sul quale va inserito il provino per il lato lungo. Sull'estremità della testa è posizionato un cuneo mobile, che mosso dal pistone della pressa andrà a rompere il provino a metà. Si tratta di una prova di flessione a tre punti.

Una volta che il provino sarà rotto, le due parti saranno utilizzate per la rottura a compressione.

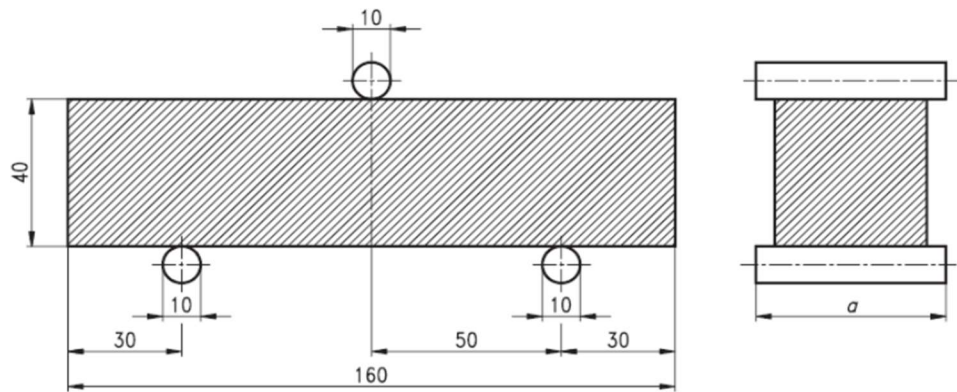


Figura 30, Disegno del funzionamento della testa utilizzata per la rottura a flessione su tre appoggi



Figura 31, Il provino inserito nella pressa all'interno della testa per la rottura a flessione su tre appoggi

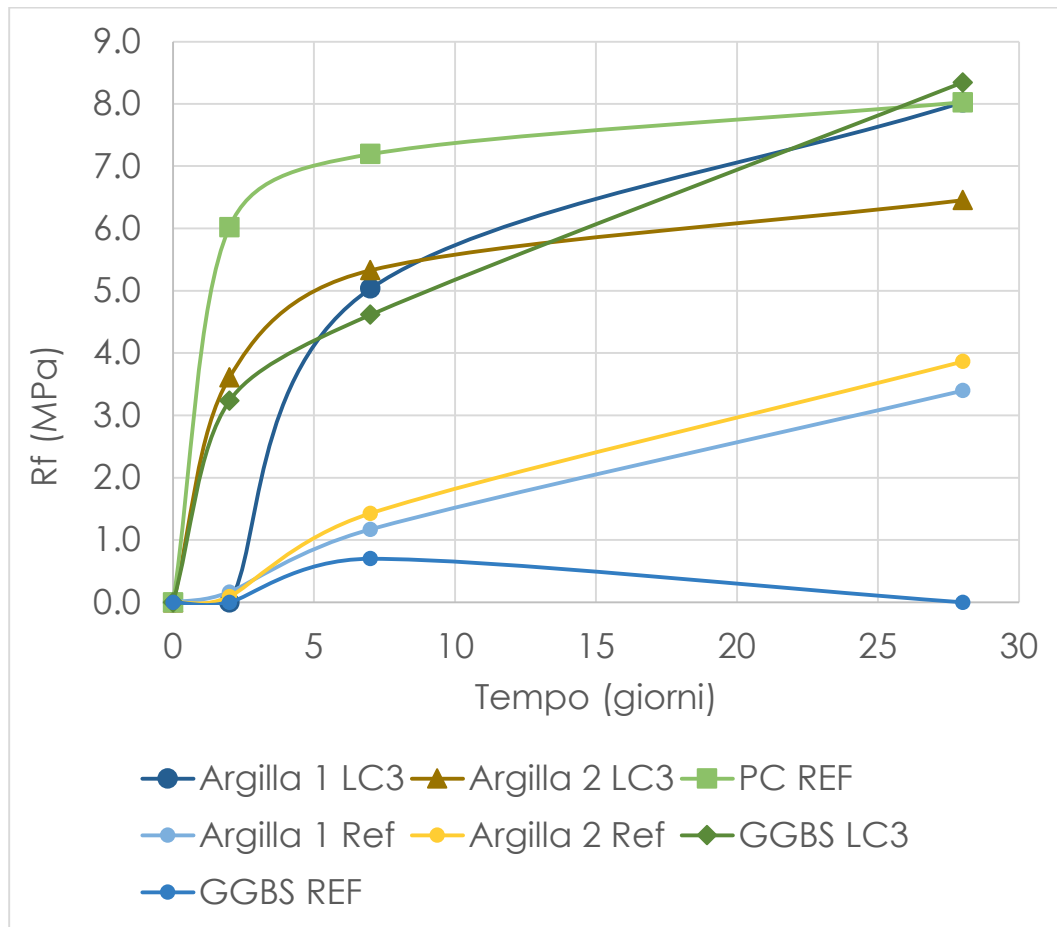
Il terminale memorizza i valori che inducono alla rottura il provino. La forza viene resa in kN, e verrà convertita in MPa con il calcolo della tensione di rottura R_f , che considera la dimensione dei provini, con la formula:

$$R_f = (1.5 \cdot F_m \cdot L) / (b \cdot d^2) \quad (\text{MPa})$$

Dove:

- F_m è la forza massima registrata dal terminale (kN);
- L è la distanza tra i due appoggi inferiori del provino, ovvero 10 mm;
- b e d sono le dimensioni della sezione del provino, 40mm e 40mm.

Vengono riportati i diagrammi delle resistenze a flessione:



Com'era prevedibile, i valori minimi sono quelli delli riferimenti.

La resistenza a flessione della loppa è pari a zero, come aspettato non essendo un legante, così come Argilla 1 Ref ed Argilla 2 Ref.

In quanto a resistenza a flessione il miglior risultato viene dato dal GGBS LC3, che a 28 giorni ha sviluppato una resistenza di 8.3 MPa.

Resistenza meccanica a compressione

La prova a compressione viene eseguita con l'ausilio del medesimo macchinario, una volta inserita la testa opportuna. La rottura, se ben eseguita, farà sì che il provino assuma la classica forma "a clessidra".

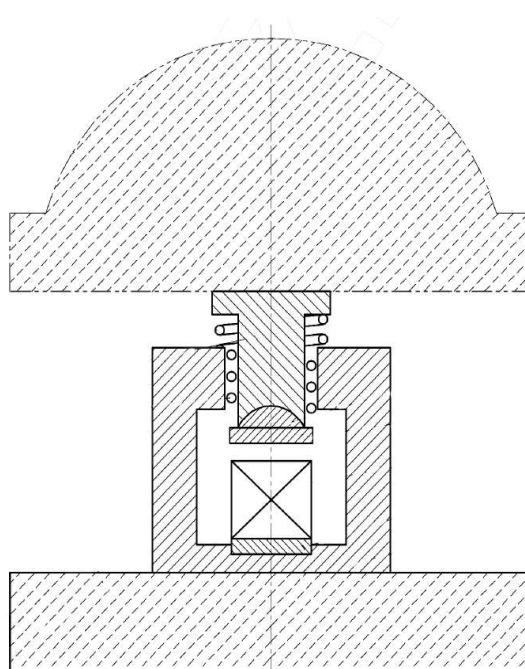


Figura 32, Schematizzazione del funzionamento della pressa con la testa utilizzata per la rottura a compressione



Figura 33, Il provino 40*40*40 inserito all'interno della pressa per la rottura a compressione



Figura 34, La " clessidra" , la tipica forma del provino dopo aver effettuato la rottura a compressione

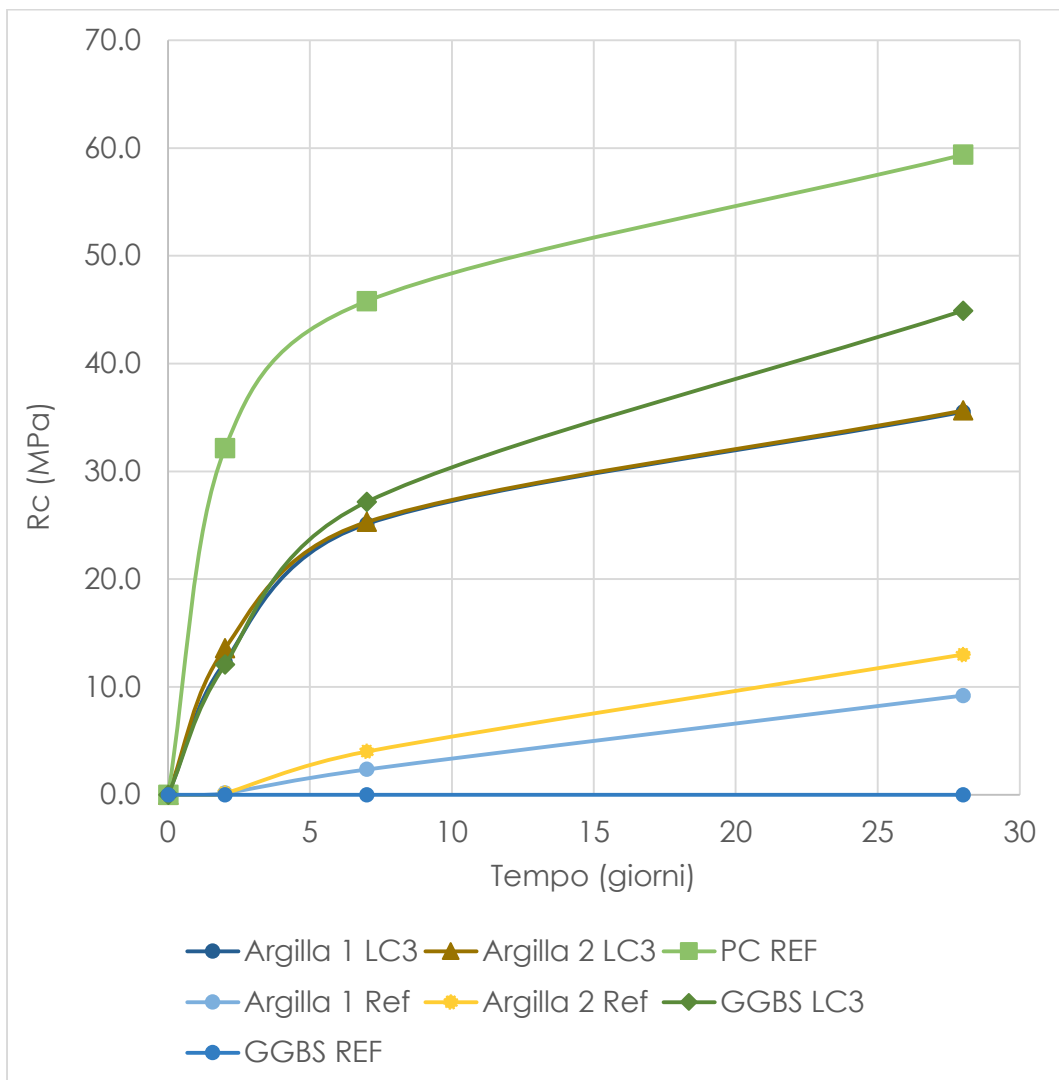
La resistenza a compressione si calcola con la seguente formula:

$$R_c = F_m / A \text{ (MPa)}$$

Dove:

- F_m è la forza massima registrata dal terminale (kN);
- A è l'area della sezione su cui si esegue la prova, 40 x 40 mm².

Per questa prova risulta interessante osservare lo sviluppo della resistenza meccanica a compressione durante la stagionatura:



E' sulla breve stagionatura che il cemento appare più performante rispetto alle miscele LC3. Tuttavia, con il passare dei giorni, si assiste ad un incremento della resistenza anche da parte dei nuovi cementi.

A 2 giorni inoltre, le miscele Argilla 1 LC3 e Argilla 2 LC3 non sembrano capaci di sviluppare una sufficiente resistenza meccanica, ma a 7 giorni sembrerebbero quasi pareggiare la resistenza fornita da GGBS LC3.

Tutte e tre le miscele cementizie sperimentate, ovvero Argilla 1 LC3, Argilla 2 LC3 e GGBS LC3, ricadono nella classe di resistenza 32.5 L secondo la classificazione riportata nella tabella 2.

Prova del tempo di presa

Sono state eseguite miscele con le proporzioni indicate dalla norma UNI EN 196 e sono state classificate sotto il punto di vista meccanico. Ciò che manca è l'analisi del loro tempo di presa, ovvero il tempo necessario a permettere l'indurimento della miscela. Secondo la norma UNI EN 186 – 3 un cemento può essere definito tale se il suo tempo di presa termina entro le 12 h dal getto.

Poiché gli LC3 di questo studio ricadono a livello compositivo nella classe CEM II/C-M dei cementi è necessario verificarne anche i tempi di presa.

Si fa riferimento alla norma UNI EN 196-3 Metodi di prova dei cementi – Parte 3: Determinazione del tempo di presa e della stabilità. La norma fa riferimento all'apparecchio di Vicat manuale per entrambe le prove, anche se non esclude la possibilità di effettuare questi test con strumentazioni automatiche. Mentre per la prova di consistenza abbiamo utilizzato un ago di Vicat

manuale, per la valutazione del tempo di presa abbiamo usato un apparecchio automatico.

Tempo di presa e consistenza sono due parametri che consentono la classificazione di una miscela come cemento, per questo motivo sono state svolte nello stesso contesto. In seguito è schematizzato il procedimento di esecuzione delle due prove:

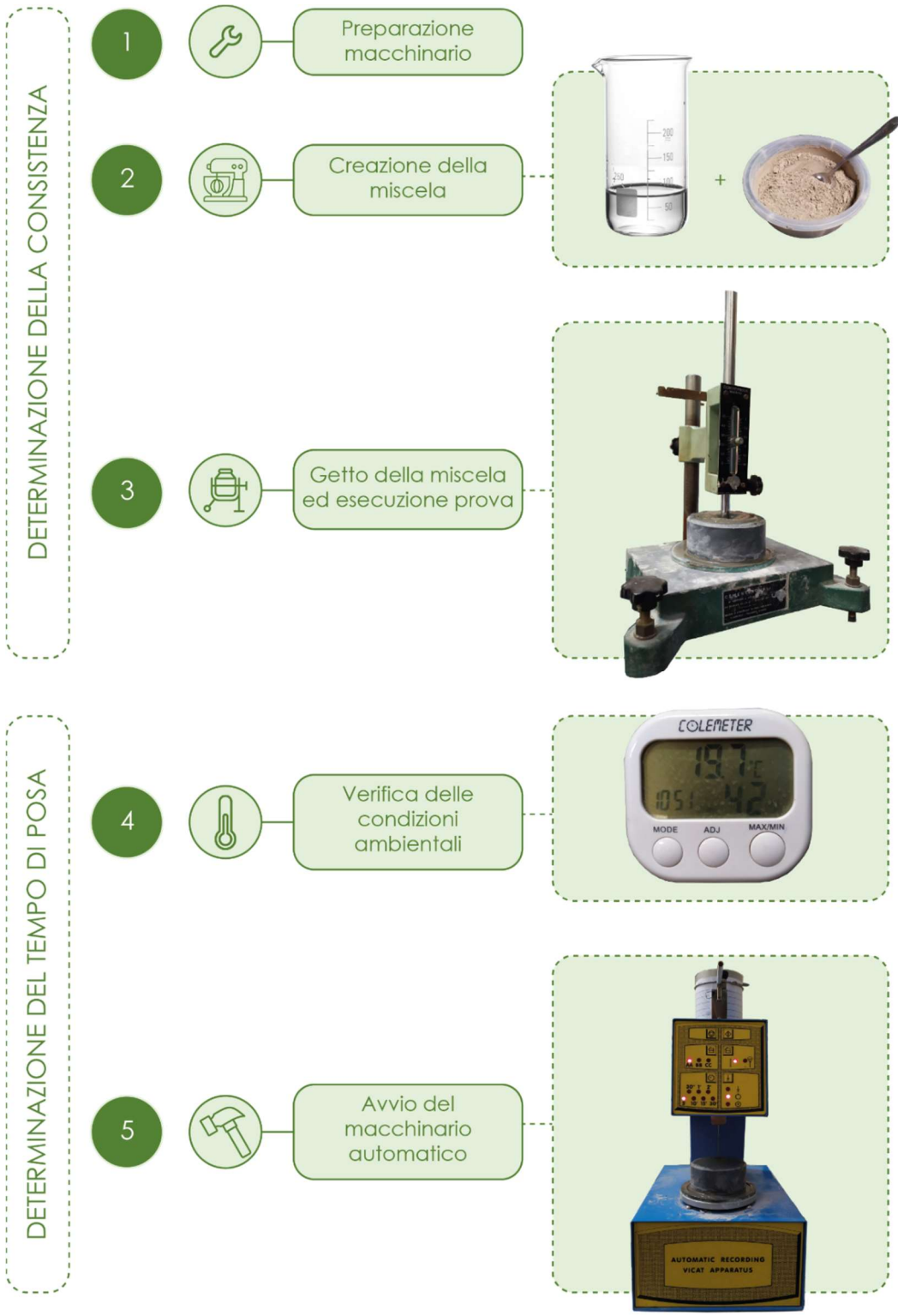


Figura 35, Schematizzazione del procedimento per la verifica della consistenza e del tempo di presa

Prova di consistenza normalizzata

Per tale prova si è utilizzata l'apparecchiatura manuale di Vicat.

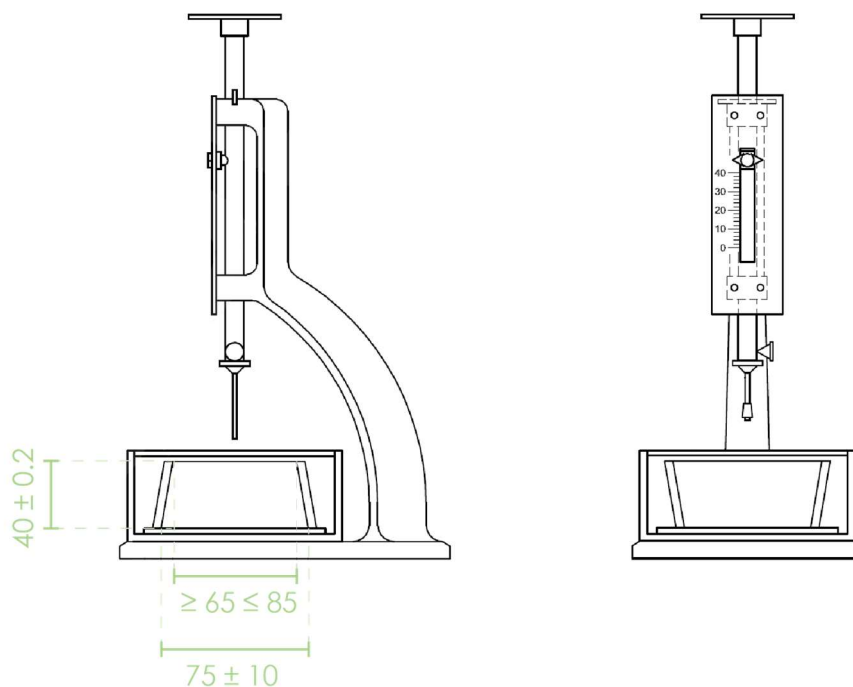


Figura 36, Apparecchiatura manuale di Vicat descritta nella UNI EN 196-3

All'apparecchio è stata apposta una sonda a forma di cilindro retto, fatta di acciaio non corrodibile.



Figura 37, Sonda descritta nella norma UNI EN 196-3

Per ogni miscela in esame, sono stati considerati 300g di polveri ed una base di 100g d'acqua (nella norma viene consentito l'aumento o la diminuzione di tale quantitativo di 1 ml). Dopo aver miscelato gli ingredienti secchi, è stata aggiunta l'acqua.

Una volta ottenuto un composto omogeneo, la pasta è stata depositata in uno stampo cilindrico di plastica di altezza 40 mm e diametro interno 75mm.



Figura 38, Determinazione della consistenza della miscela: preparazione dell'impasto

In questa fase è importante procedere velocemente con il trasferimento della pasta dal contenitore in cui è stata mescolata allo stampo, affinché non perda lavorabilità.

Una volta posizionato lo stampo al centro del piatto del macchinario di Vicat, la sonda viene abbassata fino al contatto con la superficie della pasta. Si attendono 2 s per far sì che la velocità di abbassamento della sonda non influisca sulla penetrazione della sonda, dopodiché la sonda viene fatta precipitare in caduta libera all'interno della miscela.

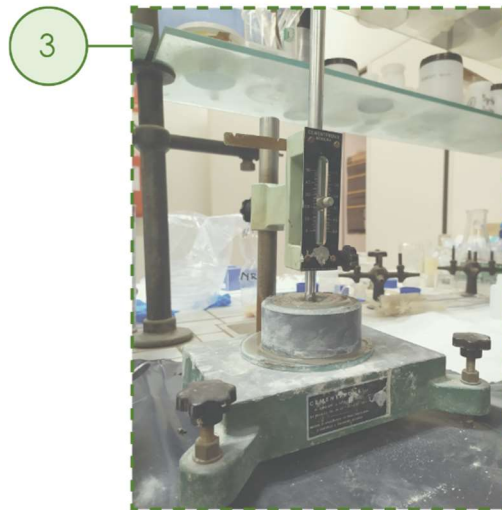


Figura 39, Determinazione della consistenza della miscela: la sonda viene lasciata cadere senza vincoli all'interno dell'impasto.

Dopo 5 secondi dalla cessazione della penetrazione avviene la lettura dello strumento.

La prova va ripetuta con paste a diverso contenuto in acqua fino a che la distanza fra la sonda e la base non giunge a 6 ± 2 mm.

Il quantitativo d'acqua impiegato viene registrato come quantità di acqua occorrente per giungere alla consistenza normalizzata.

Per ogni miscela il quantitativo d'acqua per raggiungere tale consistenza equivale a:

Pc Ref	CEM I (g)	SCMs (g)	Calcare (g)	Acqua (g)	W% (%)	Distanza sonda - base (mm)
	300	0	0	101	33.67	7

Argilla 2 LC3	CEM I (g)	Argilla 2 (g)	Calcare (g)	Acqua (g)	W% (%)	Distanza sonda - base (mm)
	150	100	50	110	44.00	7

GGBS LC3	CEM I (g)	GGBS (g)	Calcare (g)	Acqua (g)	W% (%)	Distanza sonda - base (mm)
	150	100	50	103	41.20	6

Argilla 1 Ref	CEM I (g)	Argilla 1 (g)	Calcare (g)	Acqua (g)	W% (%)	Distanza sonda - base (mm)
	0	300	0	147	49.00	4

Argilla 2 Ref	CEM I (g)	Argilla 2 (g)	Calcare (g)	Acqua (g)	W% (%)	Distanza sonda - base (mm)
	0	300	0	149	49.67	7

GGBS Ref	CEM I (g)	GGBS (g)	Calcare (g)	Acqua (g)	W% (%)	Distanza sonda - base (mm)
	0	300	0	114	38.00	8

Pc Ref	CEM I (g)	SCMs (g)	Calcare (g)	Acqua (g)	W% (%)	Distanza sonda - base (mm)
	300	0	0	101	33.67	7

Determinazione del tempo di presa

Per questa prova è stata utilizzata un'apparecchiatura di Vicat automatica, comunque validata dalla normativa UNI EN 196-3.



Figura 40, Apparecchiatura di Vicat automatica utilizzata per la prova

La sonda utilizzata è un ago di acciaio con lunghezza 45 mm e diametro 1.13mm.

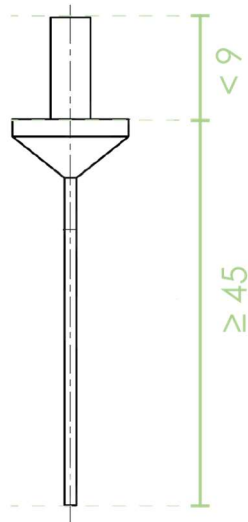


Figura 41, Sonda per la prova del tempo di presa descritta dalla norma UNI EN 196-3

DETERMINAZIONE DEL TEMPO DI INIZIO PRESA

Prima dell'inizio della prova vengono segnati i parametri di umidità relativa (UR) e di temperatura (T) dell'ambiente, per verificare che le condizioni siano adatte al corretto svolgimento della prova.



Figura 42, Termometro utilizzato per verificare le condizioni ambientali durante la prova

Lo stampo viene riempito con la pasta, dopodiché viene posizionato sulla piastra. È necessario segnarsi il "tempo zero", ovvero il punto dal quale si calcolano i tempi di inizio e fine presa.

La prova consiste in una reiterazione di cadute libere effettuate dall'ago ogni 5 min. La prova viene effettuata ripetendo la penetrazione sullo stesso provino in posizioni opportunamente distanziate, a non meno di 8 mm dal bordo dello stampo e ad almeno 10 mm dall'ultima posizione di penetrazione.

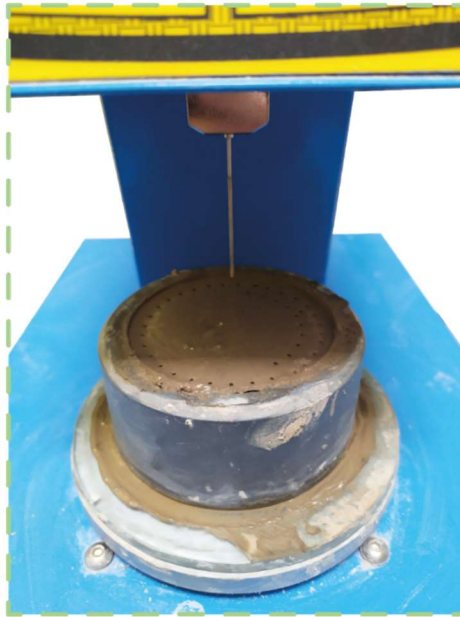


Figura 43, Solchi lasciati dall'ago durante la determinazione del tempo di presa. Si nota come l'ago sia penetrato in profondità, segno che il tempo di fine presa è ancora lontano

Il tempo di inizio presa corrisponde al tempo impiegato affinché la distanza tra l'ago e la piastra base sia 6 ± 3 mm, a partire dal "tempo zero".

Essendo stata utilizzata un'apparecchiatura automatica, la caduta è stata documentata grazie ad una matita direttamente collegata all'ago in caduta, scrivente su un foglio posto sulla sommità del macchinario. La lettura della distanza è stata effettuata sulla base della lunghezza della linea riportata.

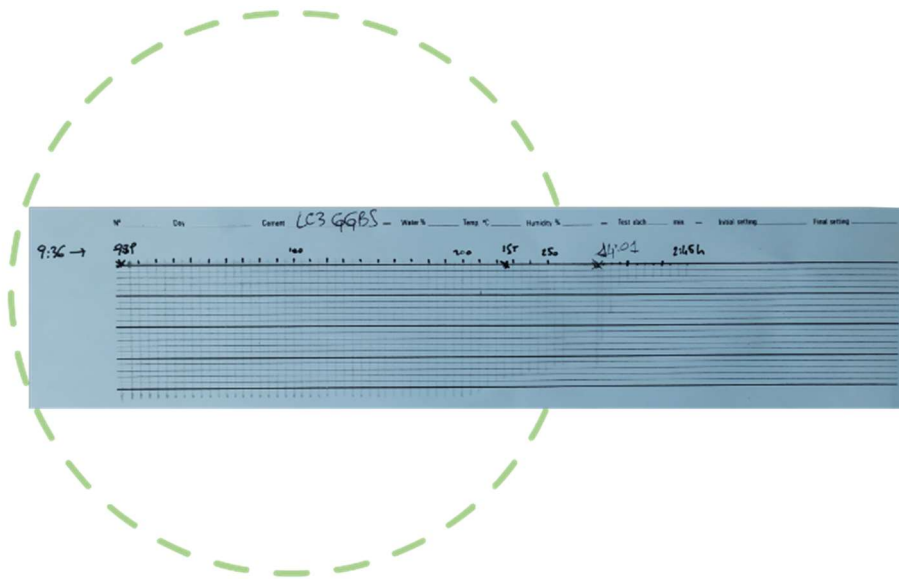
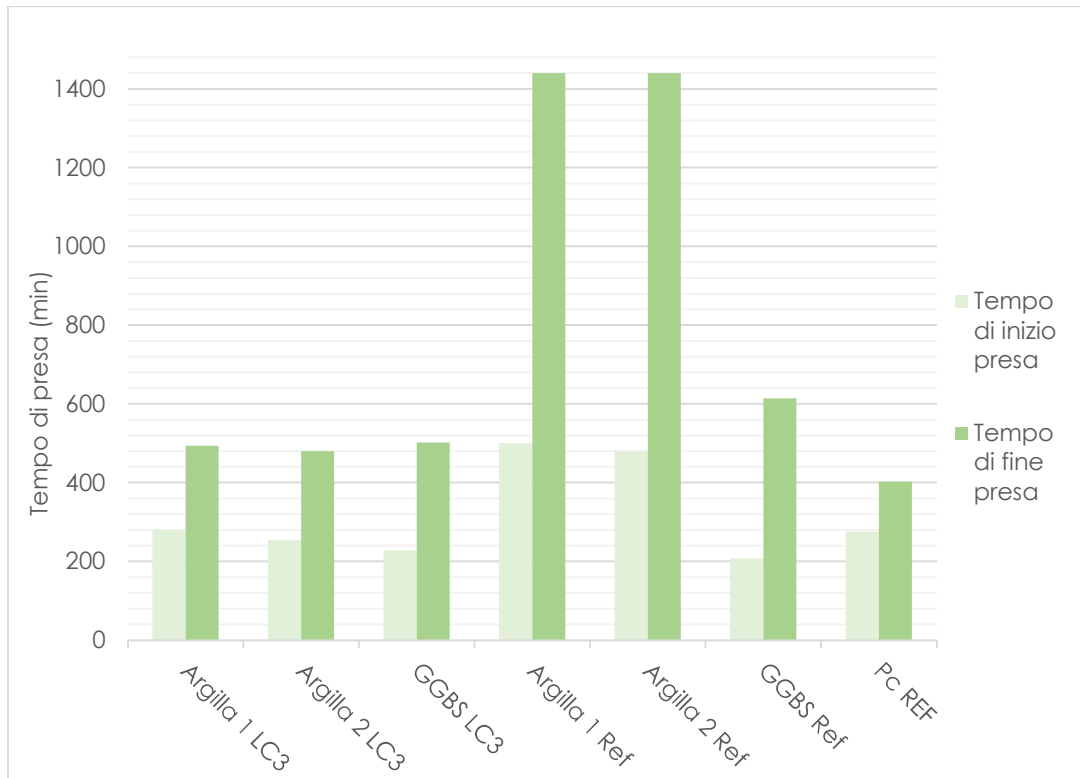


Figura 44, Il foglio posizionato sull'apparecchiatura di Vicat in cui la matita, collegata alla sonda in caduta libera, ha segnato la profondità di caduta

DETERMINAZIONE DEL TEMPO DI FINE PRESA

Il campione utilizzato per l'inizio del tempo di presa viene capovolto sulla piastra per poter eseguire le prove di fine presa sulla faccia del provino originariamente a contatto con la piastra base. Le modalità di esecuzione della prova sono quelle del tempo di inizio presa, ma la caduta libera dell'ago viene impostata con cadenza 30 minuti. Occorre registrare il tempo in cui, a partire dal "tempo zero", l'ago penetra per la prima volta solo di 0,5 mm nel provino. Tale valore corrisponde a quando l'ago per la prima volta non lascia l'impronta nel provino, e si può calcolare con esattezza riducendo l'intervallo di tempo tra una penetrazione e l'altra in prossimità del tempo di fine presa.

Di seguito sono riportati i tempi di inizio e fine presa per ogni miscela:



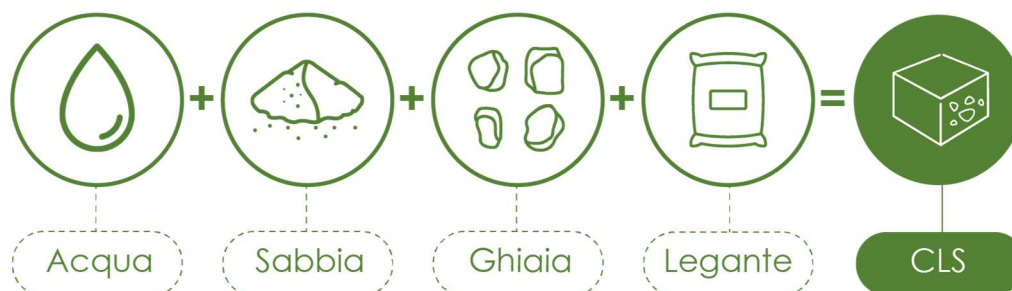
Da queste due prove si deduce che:

- GGBS LC3 ha un tempo di inizio e fine presa rispettivamente più corto e più lungo di PC Ref.
- Argilla 1 LC3 ed Argilla 2 LC3 hanno un tempo di fine presa maggiore del PC Ref perché le miscele hanno meno cemento.
- Argilla 2 LC3 ha un tempo di inizio e fine presa minori rispetto ad Argilla 1 LC3 perché l'argilla 2 è più reattiva.
- Argilla 1 Ref ed Argilla 2 Ref hanno tempi di inizio presa molto lunghi e non giungono a fine presa prima delle 24h.
- Come preventivato, GGBS LC3 ha un tempo di fine presa più lungo di PC Ref.

La conclusione più importante è però la seguente: tutti e tre gli LC3 studiati possono essere considerati cementi, poiché il loro tempo di fine presa ricade prima delle 12h.

CALCESTRUZZO LC3

Il calcestruzzo è un materiale formato da acqua, legante ed inerte di piccole e grandi dimensioni.



I cementi LC3 sono stati analizzati fino ad ora sotto forma di malte, senza l'aggiunta di inerti di maggiori dimensioni.

Il fatto che sia stato possibile classificare i nuovi leganti LC3 come cementi strutturali a tutti gli effetti, in termini sia di composizione mineralogica, di classe di resistenza (32.5 L) e di tempi di presa, ha permesso di avvicinarci alla pratica strutturale mediante il confezionamento anche di calcestruzzi. Questo è stato fatto per valorizzare ulteriormente quanto eseguito finora mediante una dimostrazione atta all'applicabilità pratica dei nuovi leganti sviluppati in questa tesi.

A tale scopo sono state progettate 6 miscele:

- CLS Argilla 1 LC3
- CLS Argilla 2 LC3
- CLS GGBS LC3
- CLS PC Ref 0.5
- CLS PC Ref 0.60

- CLS PC Ref 0.65.

Sono noti i rapporti acqua/cemento e le classi di consistenza. Si è scelto di formulare tre miscele di riferimento con rapporti a/c più alti, rispettivamente 0.6 e 0.65. Lo scopo di questa scelta era ottenere sempre con un Cemento Portland di riferimento dei calcestruzzi con una resistenza meccanica più simile a quella degli LC3, che comunque a pari a/c e tempo di stagionatura svilupperebbero una resistenza meccanica inferiore.

In seguito viene illustrato il procedimento per la realizzazione dei provini, il mix design e la caratterizzazione meccanica delle miscele, da cui dipendono i legami costitutivi.

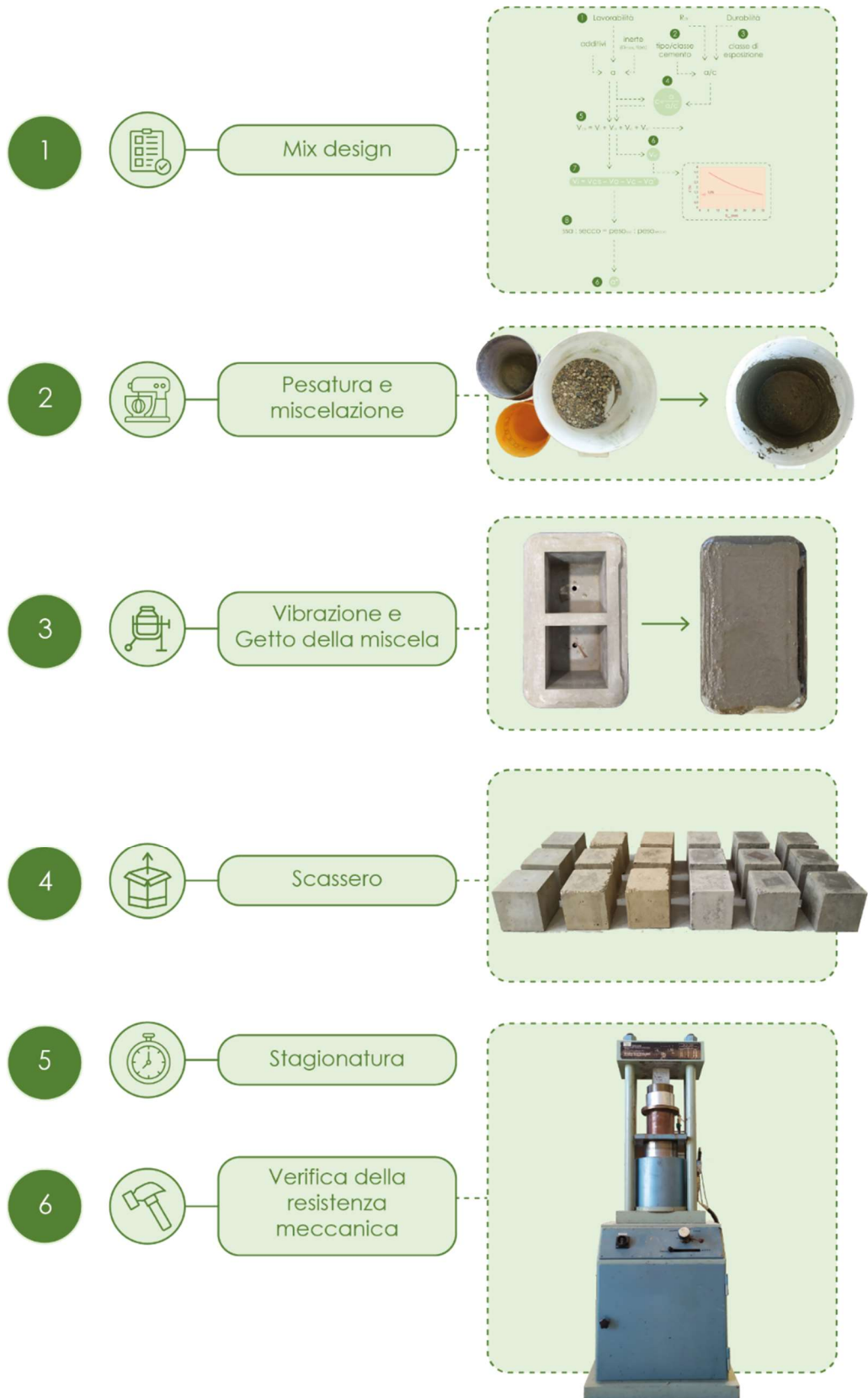


Figura 45, Schematizzazione delle fasi della realizzazione e della verifica del calcestruzzo

MIX DESIGN

Per Mix Design di un calcestruzzo si intende il calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili (cemento ed additivi).

Come anticipato, le miscele progettate sono 6:

- CLS Argilla 1 LC3
- CLS Argilla 2 LC3
- CLS GGBS LC3
- CLS PC Ref 0.5
- CLS PC Ref 0.60
- CLS PC Ref 0.65.

Il rapporto acqua/cemento (a/c) utilizzato per gli LC3 e il primo riferimento è 0.5 e la classe di consistenza scelta è S5. Si è scelto di analizzare anche il comportamento del cemento preso a riferimento aggiungendo due ulteriori miscele con un diverso rapporto acqua/cemento. Ciò è stato fatto con il fine di ottenere un calcestruzzo creato con il cemento Portland che avesse pari resistenza meccanica rispetto ai calcestruzzi creati con i nuovi cementi.

Di seguito sono riportate le correlazioni ed i passaggi per l'ottenimento del mix design della prima miscela gettata, PC Ref 0.5.

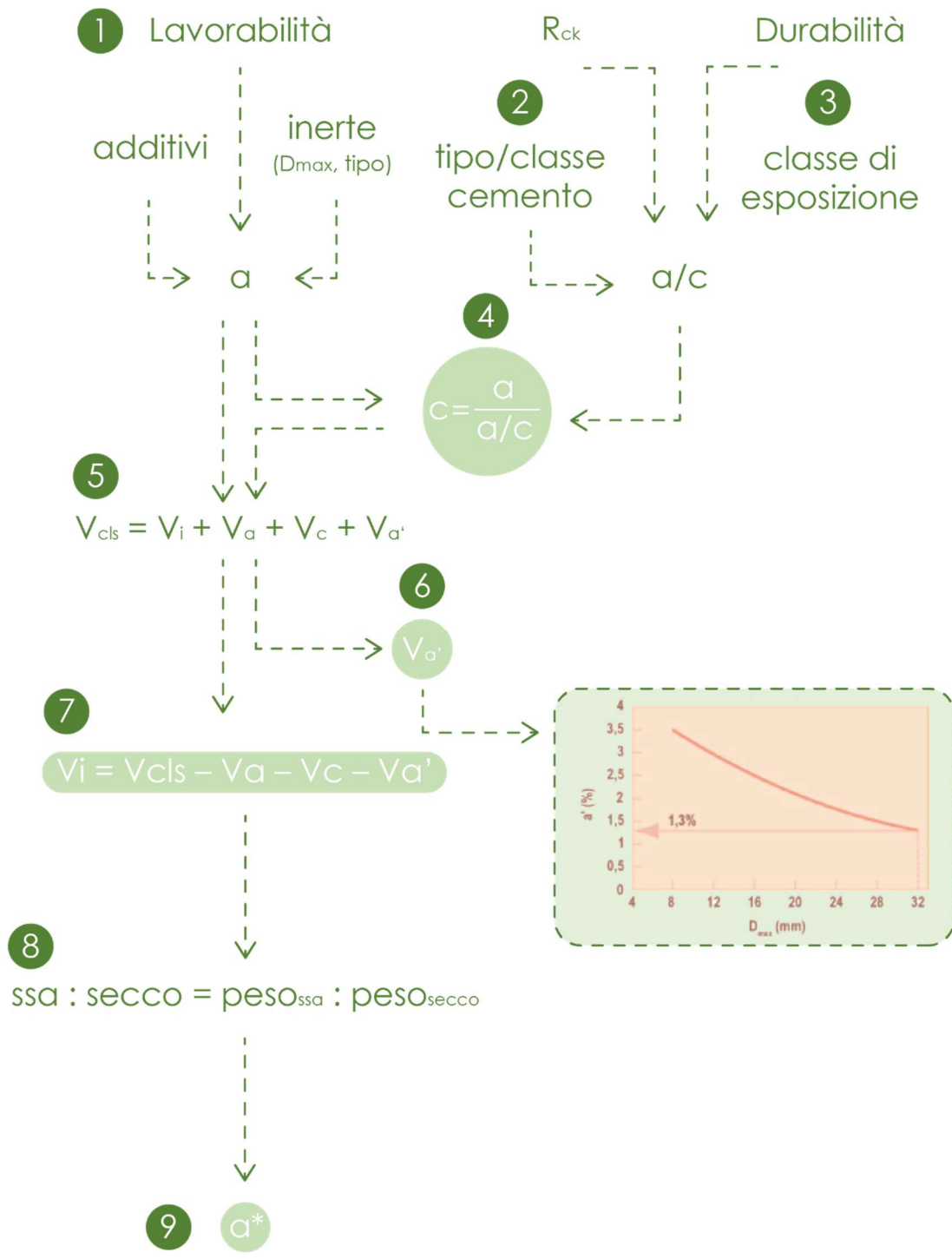


Figura 46, Procedimento del mix design

Punto 1: lavorabilità

Quantitativo di acqua a (kg/m^3). Dipende dalla lavorabilità del conglomerato, dal tipo di inerte e dalla sua dimensione e dalla presenza di additivi;

In questo caso la classe di lavorabilità che si voleva ottenere corrisponde ad una S5.

Per capire il quantitativo d'acqua necessario si richiama la tabella di Lyse. Sapendo che il massimo diametro dell'aggregato è pari a 16 e desiderando una classe di consistenza S5 dovranno essere considerati $245 \text{ kg}/\text{m}^3$ d'acqua. Tuttavia, dovendo lavorare con un inerte tondeggiante, dobbiamo diminuirne il quantitativo di $10 \text{ kg}/\text{m}^3$. Il quantitativo d'acqua da impiegare per il confezionamento del cemento sarà quindi pari a $235 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Diametro (mm)	Richiesta d'acqua per classe di consistenza (kg/m^3)				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	320	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

nota: i valori di acqua di impasto vanno ridotti di $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ per inerti alluvionali tondeggianti ed aumentati di $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ per inerti di frantumazione

Punto 2: R_{ck}

Rapporto acqua cemento a/c. E' il rapporto tra il quantitativo di acqua e quello di cemento che occorre adottare. Dipende dalla resistenza meccanica del conglomerato indurito R_{ck} e dal tipo e dalla classe del cemento.

Punto 3: durabilità

Il rapporto a/c dipende anche dalla durabilità del conglomerato indurito in relazione alla classe di esposizione.

Il rapporto a/c scelto è 0.5.

Punto 4: c

Per capire il quantitativo di cemento da utilizzare è sufficiente fare la formula inversa, inserendo anche il quantitativo d'acqua prima ricavato. Il cemento da utilizzare è pari a 470 kg/m³.

Punto 5: V_{cls}

Per determinare il volume degli inerti si è fatto ricorso alla formula utilizzata per capire il volume del calcestruzzo:

$$V_{cls} = V_i + V_a + V_c + V_a'$$

In cui:

- V_{cls}: Volume del calcestruzzo
- V_i: Volume dell'inerte
- V_a: Volume dell'acqua

- V_c : Volume del cemento
- V_a' : Volume dell'aria intrappolata all'interno della miscela
- V_a e V_c sono stati ricavati dalle corrispondenti masse volumiche (si consideri 1 kg/l per l'acqua e 3.1 kg/l per il cemento).

Punto 6: V_a'

Per il calcolo di V_a' facciamo riferimento al seguente grafico⁵:

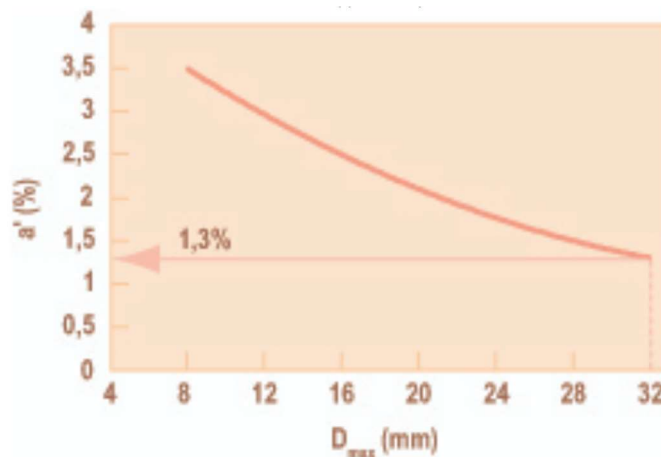


Figura 47, Grafico riportante la percentuale di aria in relazione al diametro massimo dell'aggregato

L'inerte utilizzato è di 16 mm, a cui corrisponde una percentuale di aria intrappolata del 2,4%. V_a' è espressa come il volume di aria in litri per volume unitario di calcestruzzo, pari a 10 volte la % di aria nel calcestruzzo.

Punto 7: V_i

Tornando al calcolo degli inerti, per trovarne il volume sarà sufficiente effettuare la formula inversa, quindi si otterrà:

⁵ Il nuovo calcestruzzo, Collepari Mario, Collepari Silvia, Troli Roberto, 2022 (terza edizione)

$$V_i = V_{cls} - V_a - V_c - V_a'$$

$$V_i = 589$$

Punto 8 : peso

Gli inerti sono di tre tipi, differenti a seconda del diametro, e devono essere presenti nella miscela in differenti percentuali. Il quantitativo di ogni inerte presente nella miscela sarà una percentuale di V_i .

Il valore delle masse volumiche degli inerti va determinato nella condizione di inerte saturo a superficie asciutta, cioè nella condizione in cui esso si trovano all'interno dell'impasto.

Gli ingredienti tuttavia vengono pesati in condizioni secche, quindi è necessario considerare che ci sarà un quantitativo d'acqua aggiuntivo per portare gli inerti dalle condizioni secche a quelle di s.s.a..

$$ssa : secco = peso_{ssa} : peso_{secco}$$

referendoci alla sabbia $a\% = 0.4\%$, $peso_{ssa} = 815 \text{ kg/m}^3$

$$(100 + 0.4) : 100 = 815 : peso_{secco}$$

$$peso_{secco} = 812 \text{ kg/m}^3$$

ripetendo lo stesso procedimento per ghiaio e la ghiaia, si ottiene che

$$peso_{secco,ghiaio} : 325 \text{ kg/m}^3$$

$$peso_{secco,ghiaio} : 481 \text{ kg/m}^3$$

Punto 9: α^*

Il quantitativo totale di acqua necessaria per la miscela sarà dato da:

$$\alpha^* = a + (\text{peso}_{\text{ssa,sabbia}} - \text{peso}_{\text{secco,sabbia}}) + (\text{peso}_{\text{ssa,ghiaio}} - \text{peso}_{\text{secco,ghiaio}}) + (\text{peso}_{\text{ssa,ghiaia}} - \text{peso}_{\text{secco,ghiaia}})$$

dalla quale, sostituendo:

$$\alpha^* = 235 + (815 - 812) + (328 - 325) + (484 - 481)$$

$$\alpha^* = 245 \text{ kg/m}^3$$

PREPARAZIONE DEI PROVINI

Le polveri sono state mescolate con la sabbia. In un secondo momento sono stati aggiunti gli inerti di maggiori dimensioni, e solo dopo aver miscelato tutti gli ingredienti secchi è stata aggiunta l'acqua.

La miscelazione è stata eseguita a mano, in modo omogeneo per 5 minuti, dopodiché è stato effettuato il getto della miscela.

Per il getto del calcestruzzo sono stati utilizzati dei provini cubici di plastica di lato 100 mm.



*Figura 48, I casseri di dimensioni 100*100*100 mm utilizzati per il getto delle miscele di cls*

Una volta gettata, la miscela è stata vibrata per 30s all'interno dei casseri, che sono stati avvolti con della pellicola trasparente e depositati all'interno della camera climatica alla temperatura di 20°C.

Dopo due giorni i provini sono stati scasserati:

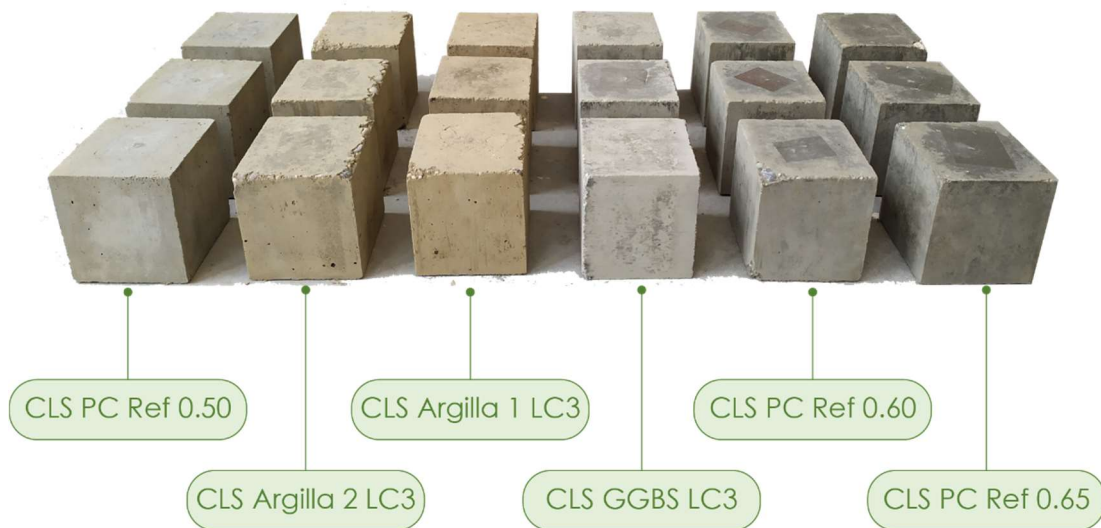


Figura 49, Tutti i provini una volta scasserati

È interessante notare la differente colorazione acquisita dai calcestruzzi formati con Argilla 1 ed Argilla 2. Anche il calcestruzzo ottenuto con GGBS LC3 alla vista risulta ben più chiaro del cemento Portland utilizzato come riferimento.

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Dopo 28 giorni di stagionatura i provini sono stati rotti a compressione.

Si è utilizzata una pressa per calcestruzzi:

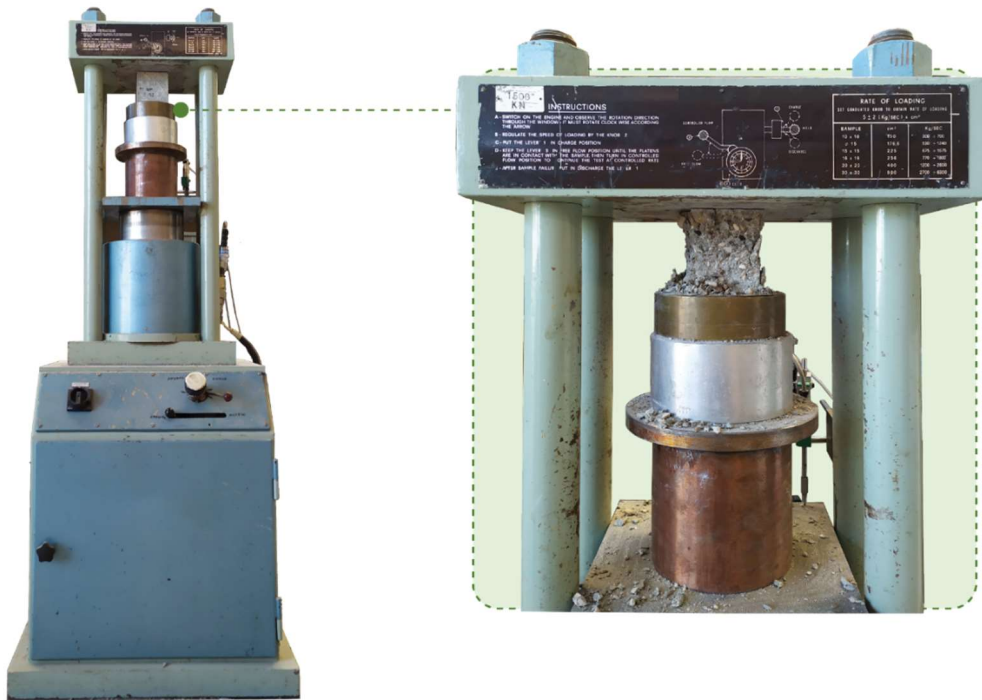


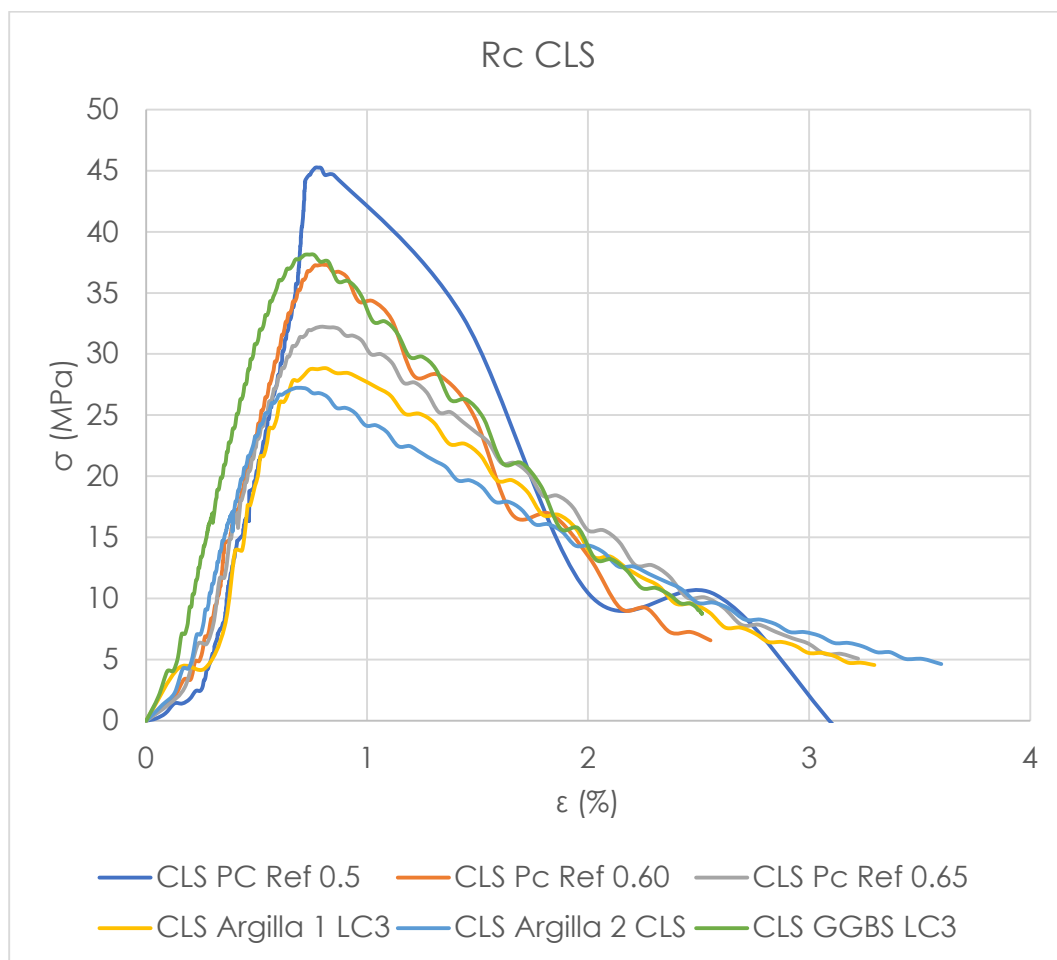
Figura 50, Pressa idraulica utilizzata per la caratterizzazione meccanica dei provini di calcestruzzo



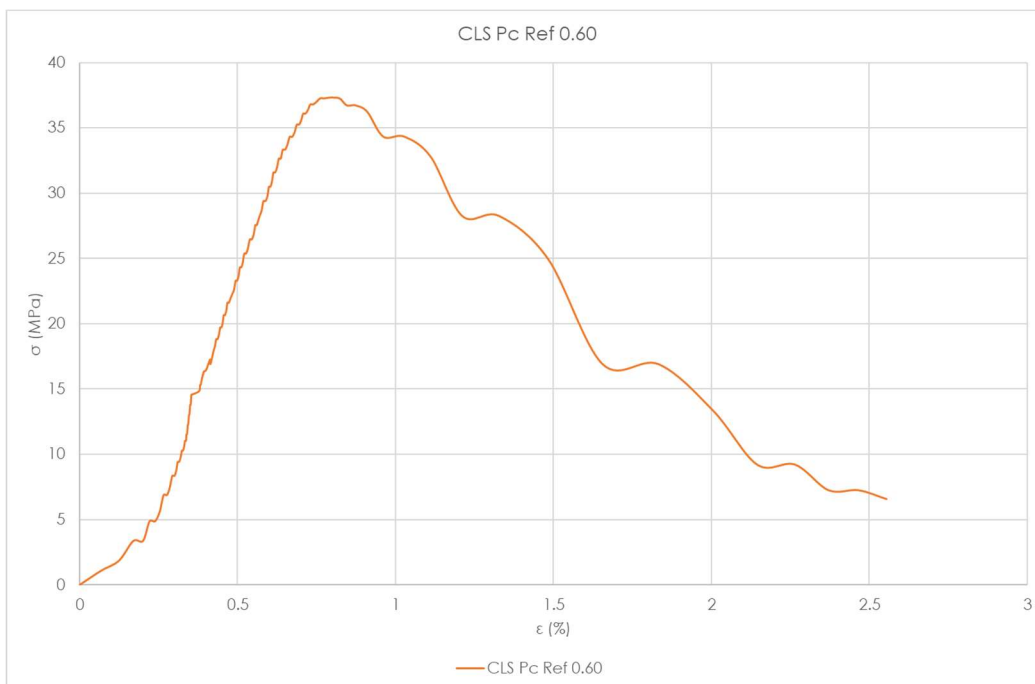
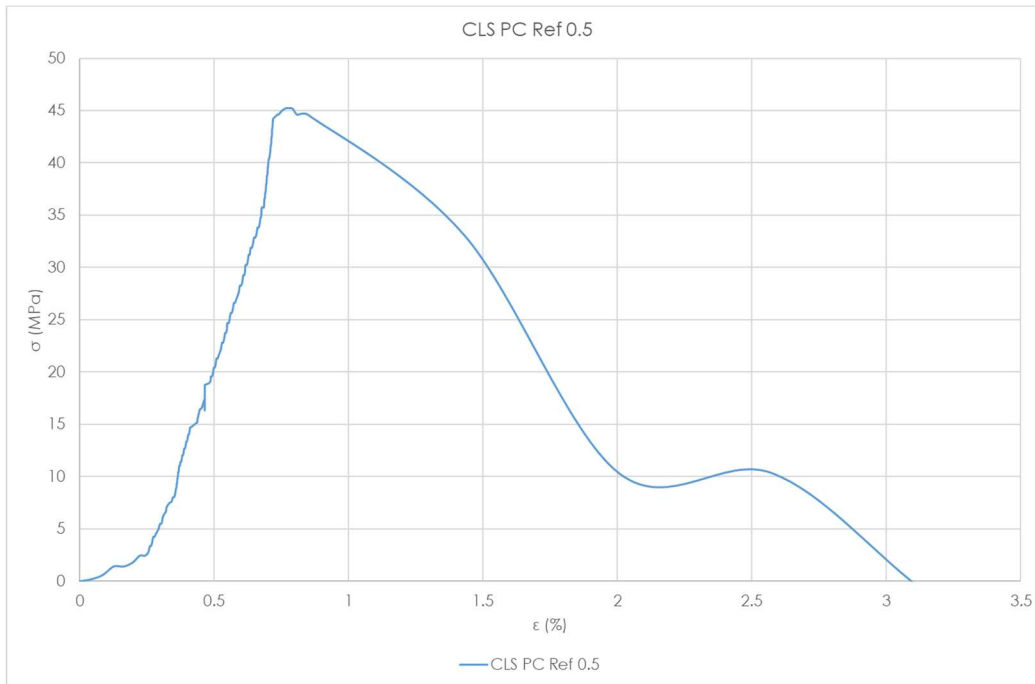
Figura 51, Il provino, dopo la rottura a compressione, acquisisce la conformazione "a clessidra"

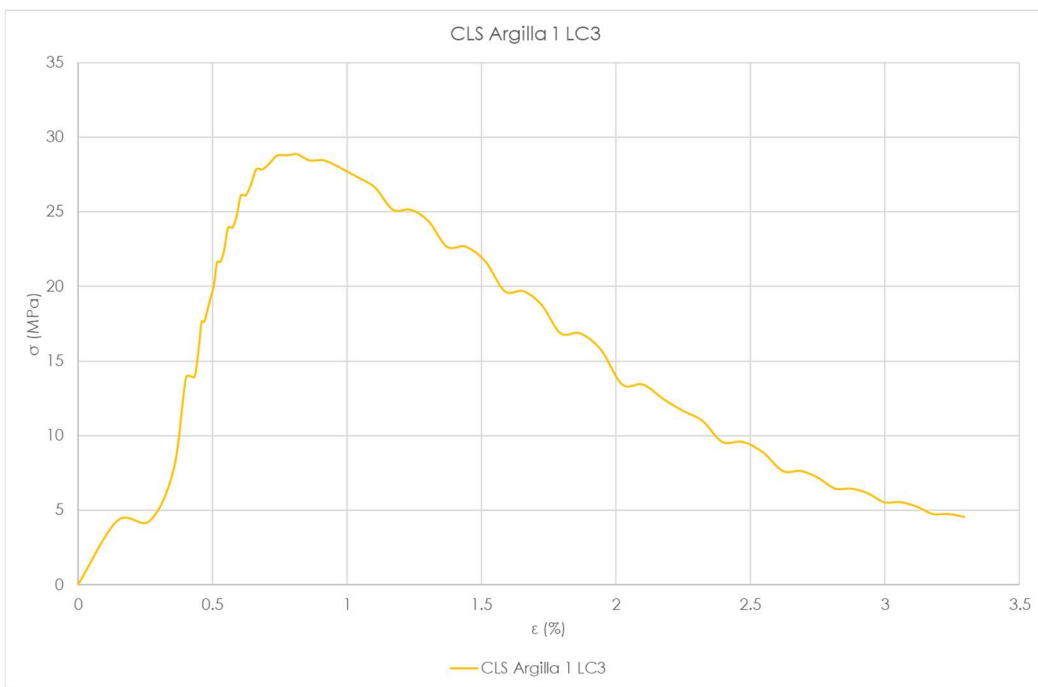
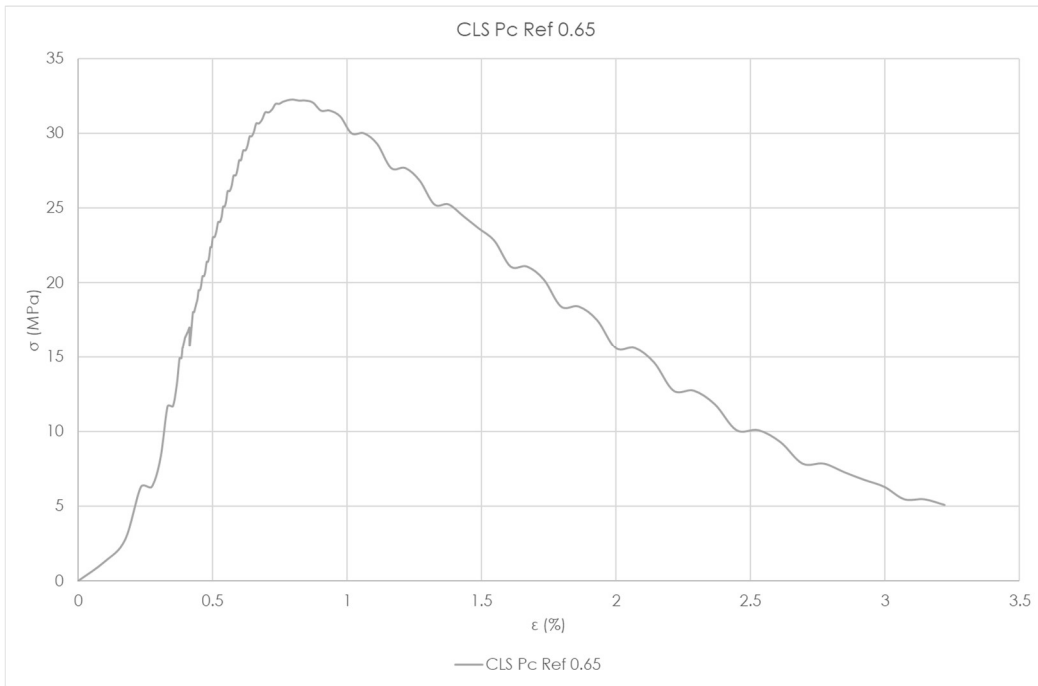
La prova è stata condotta in controllo di deformazione, con lo scopo di cogliere la resistenza massima a compressione in relazione allo spostamento imposto, misurato con un estensimetro. Ciò ha permesso di ricavare il legame costitutivo corrispondente a ogni materiale, dal quale sono stati poi ricavati dati come la deformazione ultima, la resistenza a 28 giorni e la resistenza meccanica caratteristica.

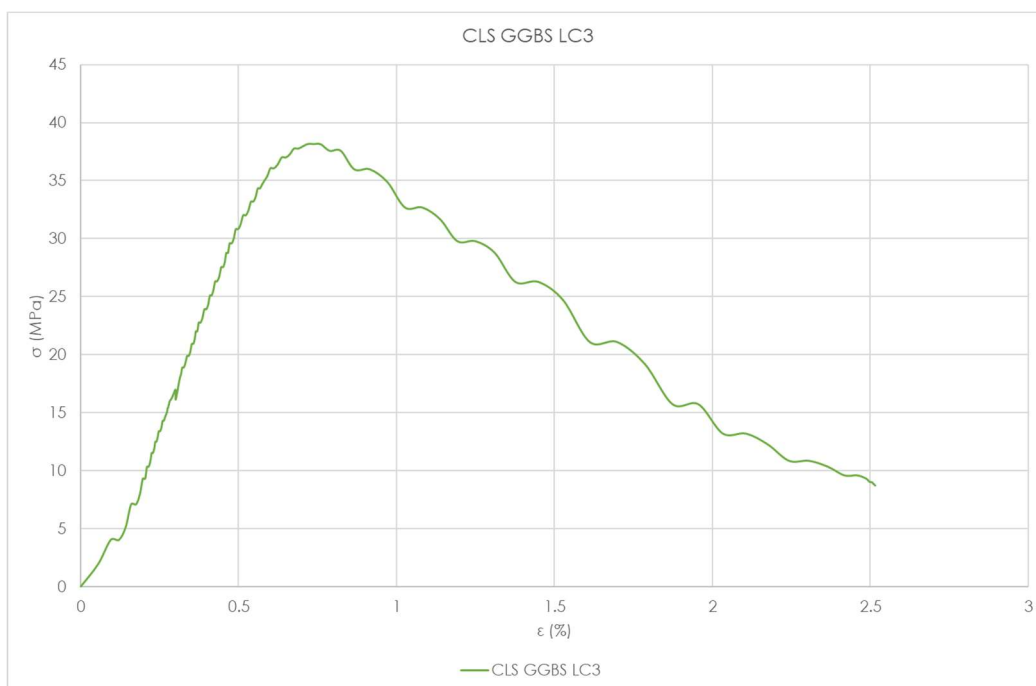
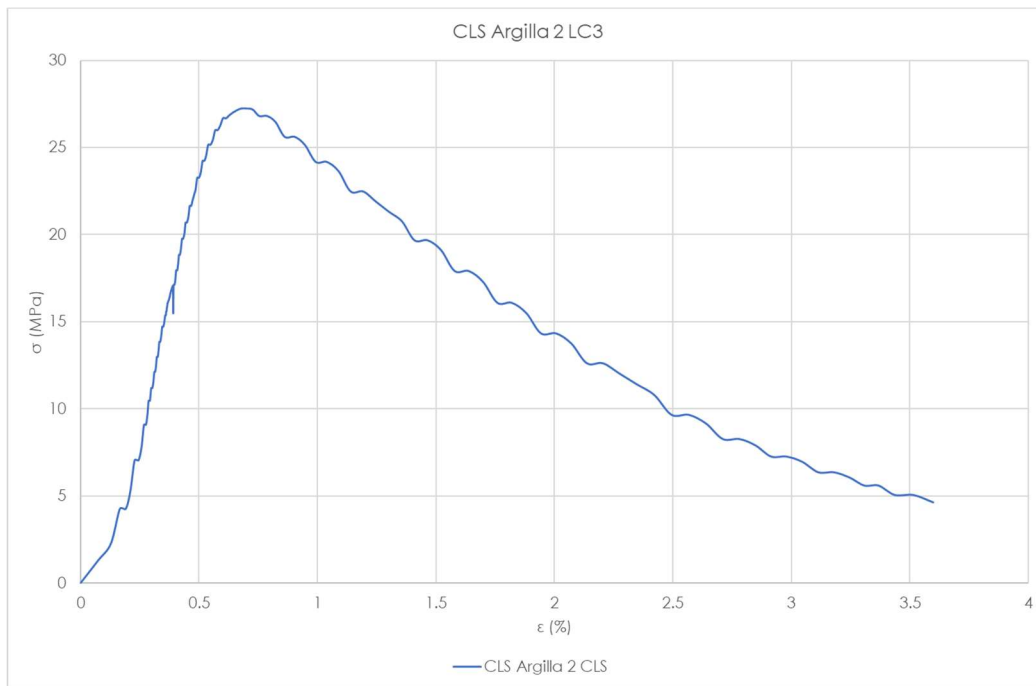
Vengono riportati i diagrammi costitutivi dei calcestruzzi:



Per chiarezza espositiva sono riportati anche i singoli legami costitutivi.







Da un punto di vista prestazionale i diagrammi dei calcestruzzi ottenuti con miscele sostenibili non differiscono da quelli dei cementi utilizzati come riferimenti. È evidente la maggiore resistenza meccanica della miscela di riferimento ottenuta con rapporto acqua/cemento pari a 0.5.

I dati che è possibile trarre da questi diagrammi sono importanti per possibili applicazioni pratiche. Da questi possiamo trarre:

- La deformazione ultima ϵ_U ;
- La resistenza meccanica a 28 giorni R_{cm28} ;
- La resistenza caratteristica cubica a compressione R_{ck} .
- La resistenza caratteristica cilindrica a compressione f_{ck} .

R_{ck} e f_{ck} sono state ricavate riferendosi al capitolo 11 delle NTC18 - Materiali e prodotti per uso strutturale.

Per il calcolo della resistenza meccanica caratteristica R_{ck} si è resa necessaria la scelta del tipo di controllo di accettazione da eseguire. I controlli di accettazione sul calcestruzzo differiscono a seconda della quantità di miscela impiegata per la realizzazione dell'opera e sono di due tipologie:

- Controlli di tipo A, eseguiti su un quantitativo di miscela omogenea di calcestruzzo non maggiore a 300 m³.
- Controlli di tipo B, utilizzati per opere che richiedono un quantitativo di calcestruzzo maggiore a 1500 m³.⁶

Per il calcolo della resistenza meccanica caratteristica si è ipotizzato di effettuare un controllo di tipo A. Per questo tipo di controlli la formula utilizzata è la seguente:

$$R_{ck} = R_{cm28} - 3.5$$

Dove:

- R_{ck} : Resistenza caratteristica cubica a compressione
- R_{cm28} : Resistenza a 28 giorni di stagionatura

⁶ NTC 18, Capitolo 11, materiali e prodotti per uso strutturale

La resistenza caratteristica cilindrica a compressione f_{ck} è stata calcolata mediante la seguente formula, anch'essa contenuta all'interno del capitolo 11 delle NTC 18:

$$f_{ck} = 0.83 \times R_{ck}$$

	CLS Pc Ref 0.5	CLS Pc Ref 0.60	CLS Pc Ref 0.65	CLS Argilla 1 LC3	CLS Argilla 2 LC3	CLS GGBS LC3
ϵ_u (%)	3.12	2.55	3.22	3.30	3.60	10.25
R_{cm28} (MPa)	45.22	37.25	32.25	28.85	27.24	38.14
R_{ck} (MPa)	41.72	33.75	28.75	25.35	23.74	34.64
f_{ck} (MPa)	34.63	28.01	23.86	21.04	19.70	28.75

LCA DELLE MISCELE

La campagna di sensibilizzazione riguardo il problema della sostenibilità ambientale ha portato alla creazione di vari metodi di analisi capaci di fornire in maniera oggettiva l'impatto ambientale di un prodotto.

In questa sperimentazione si fa riferimento all'LCA (Life Cycle Assessment) come metodo di valutazione dell'impatto ambientale dei cementi confezionati.

Per LCA (Life Cycle Assessment) si intende la valutazione ambientale del ciclo di vita di un prodotto. La definizione di LCA proposta dalla SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) è la seguente: (Per LCA si intende un) *“procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione ed il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”*.

Grazie all'LCA è possibile determinare un punteggio determinato su una scala predefinita che indica in termini matematici la sostenibilità di un prodotto nel suo ciclo di vita.

Il ciclo di vita di un materiale è caratterizzato da una serie di input, come le materie prime, l'energia, l'acqua o il suolo, che alla fine del ciclo si traducono in output, ovvero emissioni di acqua, aria, suolo e produzione di rifiuti.

Questa analisi ha l'obiettivo di fornire un quadro completo di tutte le interazioni che avvengono fra il prodotto e l'ambiente, facendo comprendere le conseguenze ambientali scaturite dalla sua produzione e, di conseguenza, permette di indicare le strategie da adottare per ottenere un miglioramento ambientale. La forza di questo tipo di analisi è la riproducibilità e il risultato numerico, che aiuta a classificare in maniera oggettiva l'impatto ambientale dei cementi e dei calcestruzzi oggetto di tesi.

In questo caso, il risultato oggettivo numerico viene espresso in termini di Global Warming Potential, anche detto potenziale di riscaldamento globale. Esprime il contributo all'effetto serra di un gas serra relativamente all'effetto della CO₂, il cui potenziale di riferimento è pari a 1. L'unità di misura in cui il GWP è espresso è il kg di CO₂ equivalente. Più il GWP di un prodotto è elevato, più questo prodotto rilascia all'interno dell'atmosfera CO₂.

Uno studio LCA è articolato in 4 fasi:

- Definizione di obiettivi e campo di applicazione (Goal and Scope Definition);
- Analisi di inventario del ciclo di vita (LCI, Life Cycle Inventory);
- Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA, Life Cycle Impact Assessment)
- Interpretazione (Life Cycle Interpretation).

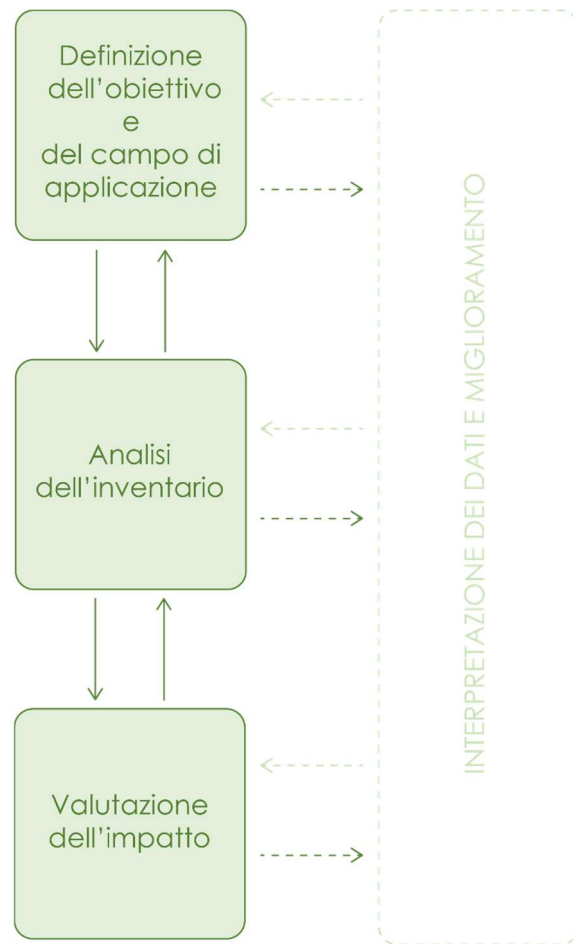


Figura 52, Schema riassuntivo del procedimento dell'analisi LCA

Le norme alle quali si fa riferimento sono la serie internazionale ISO 14040/14044, che contiene gli standard di riferimento per il LCA. Nel quadro normativo italiano sono state recepite dalle norme UNI EN ISO 14040:2021 “Gestione ambientale – valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento” e UNI EN ISO 14044:2021: “Gestione ambientale – valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida”. Nella prima norma è possibile trovare un quadro descrittivo generale del metodo, mentre all'interno della seconda sono indicate le linee guida per la valutazione vera e propria.

DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI E CAMPO DI APPLICAZIONE

“Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l'applicazione prevista. L'obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio”.

UNI EN ISO 14040.

Durante uno studio LCA acquisisce fondamentale importanza la funzione che il prodotto fornisce. È fondamentale dunque definire l'unità funzionale, ovvero la prestazione ottenuta con una determinata quantità di prodotto. L'unità funzionale consente di rapportare sistemi differenti ma funzionalmente equivalenti grazie alla determinazione dei flussi di energia e materia rapportati alla prestazione che viene richiesta al prodotto stesso.

In questo caso lo scopo dell'analisi è un confronto fra i cementi ed i calcestruzzi definiti sostenibili ed il cemento Portland. Per i cementi l'unità funzionale sarà una tonnellata di miscela, mentre per i calcestruzzi si considererà un metro cubo di miscela.



Devono poi essere definite le fasi LCA considerate. Per l'analisi che si sta conducendo i confini del sistema sono "Cradle to gate", ovvero verranno considerate le fasi dall'estrazione delle materie prime fino alla fine del ciclo produttivo del materiale, quindi fino "al cancello" dell'industria produttrice del materiale finito.

Per l'ubicazione geografica del sistema viene considerata l'Italia.

ANALISI DI INVENTARIO ED ANALISI DEGLI IMPATTI

Si tratta di quantificare tutti i flussi in ingresso ed in uscita dai confini del sistema. Per flussi in entrata si intendono i quantitativi di materie prime, energia ed acqua, mentre per flussi in uscita vengono definiti i prodotti, i coprodotti, i rifiuti solidi e le emissioni inquinanti in aria ed in acqua.

Per questa fase si è ricorsi al software della Global Cement and Concrete Association, il medesimo utilizzato dall'azienda fornitrice di materiale per

svolgere le analisi LCA. Non si tratta di un open source, ma è un programma il cui utilizzo è riservato ai dipendenti ed ai collaboratori dell'azienda CRH, dato che contiene dati sensibili circa il trasporto, la posizione delle cave e delle fabbriche, che non possono essere divulgate direttamente. Tuttavia, il software considera queste tutte queste informazioni nel calcolo dell'analisi LCA.



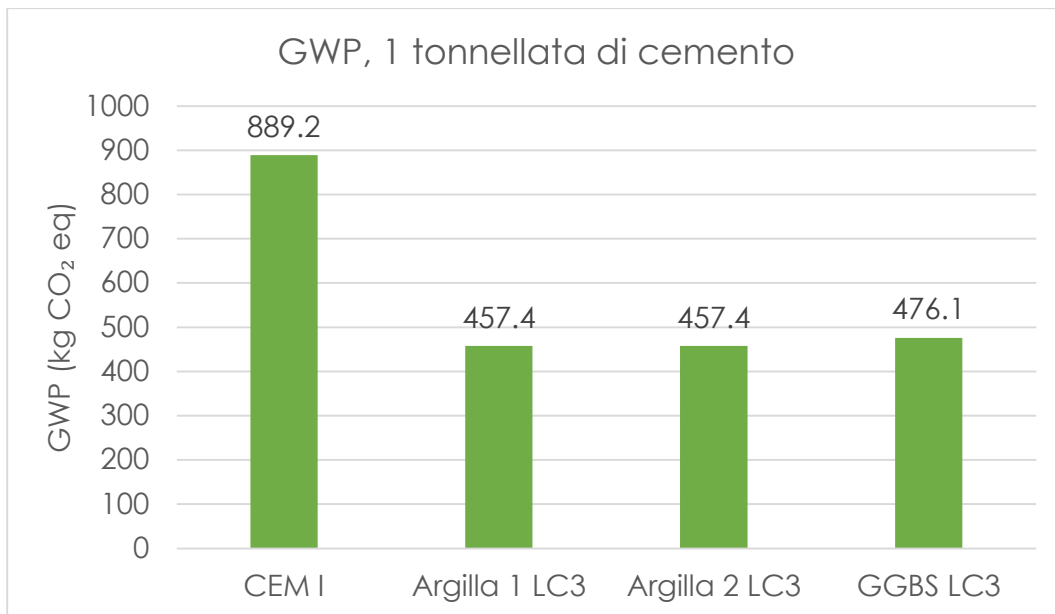
Figura 53, Logo della della Global Cement and Concrete Association

Una volta inseriti i quantitativi delle miscele, il software, attingendo alla propria banca dati, calcola in automatico i dati relativi all'impatto ambientale.

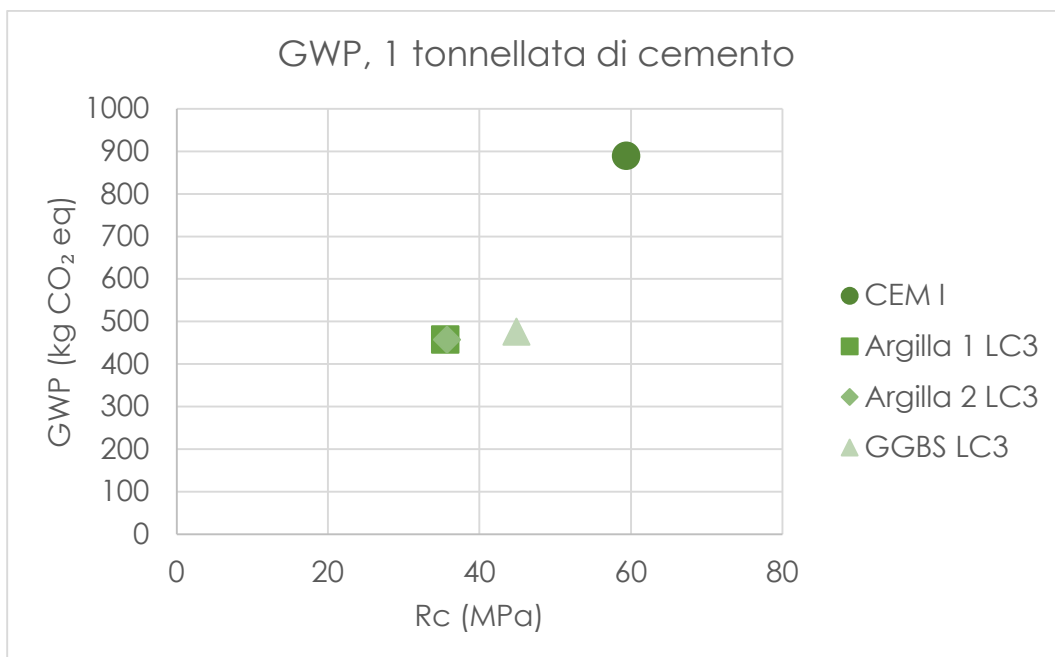
INTERPRETAZIONE E MIGLIORAMENTO

In questa fase i risultati vengono controllati e valutati per verificarne la coerenza con gli obiettivi ed il campo d'applicazione.

Per quanto riguarda l'analisi LCA condotta per il cemento:

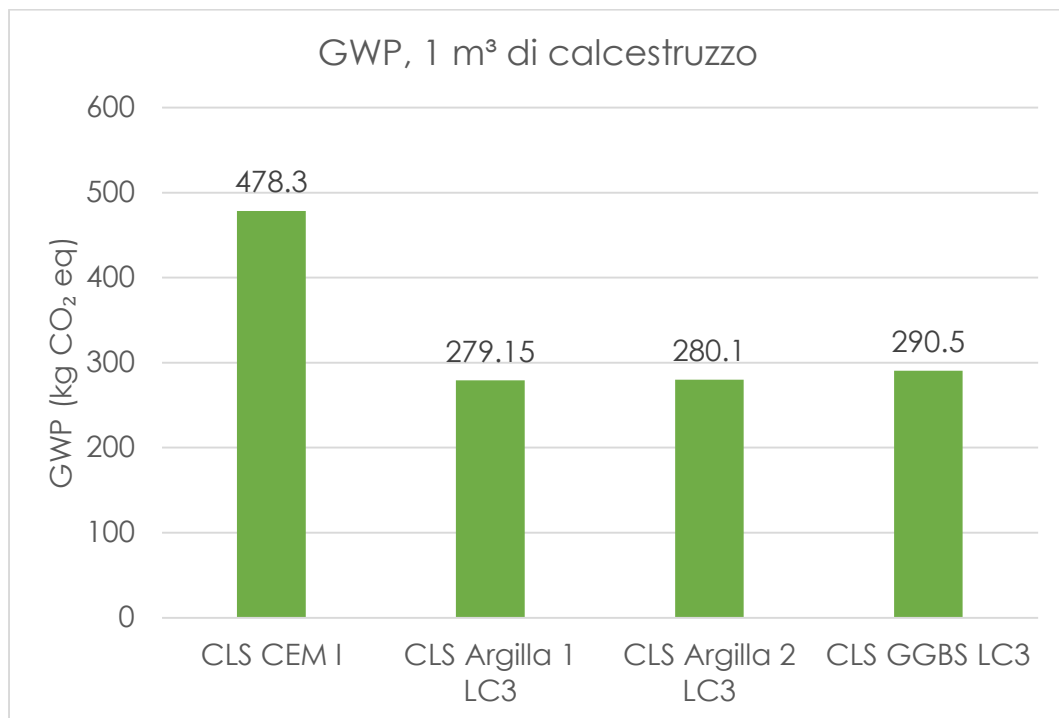


Rispetto ai nuovi cementi LC3 (che, ricordando, sono sinonimo di CEM II/C-M), il CEM I utilizzato come riferimento rilascia circa il doppio di CO₂ equivalente in più. Tra i differenti LC3 c'è una piccola riduzione di CO₂ emessa (5%) passando dalla loppa alle argille calcinate. È interessante mettere in relazione la resistenza meccanica dei leganti analizzati con il loro valore di kg di CO₂ equivalente:



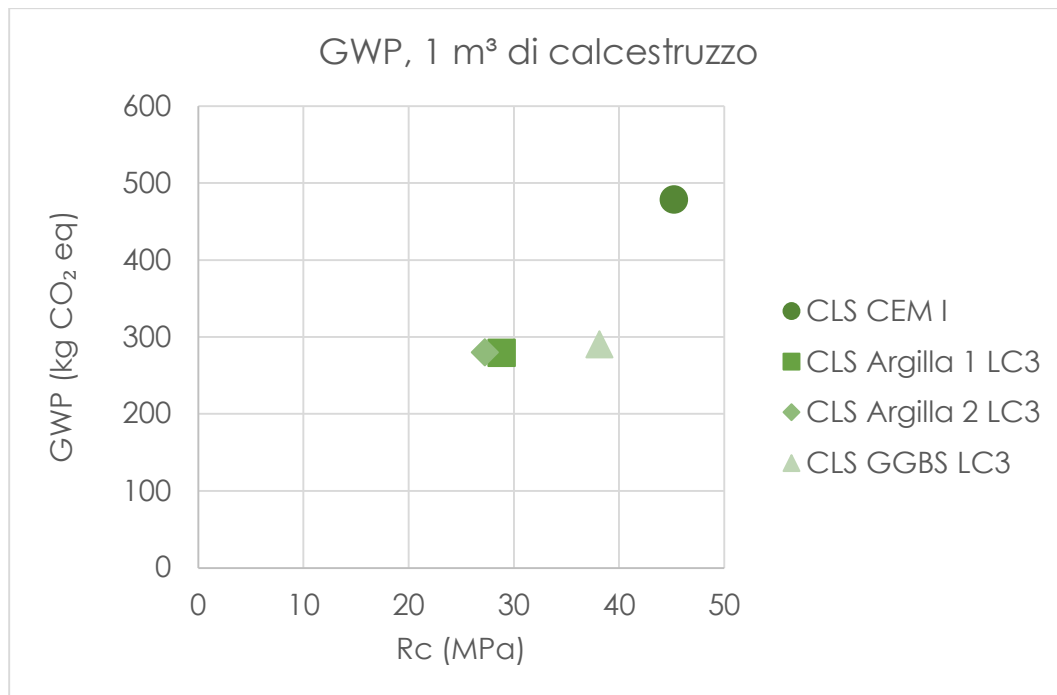
Anche in questo caso è evidente il forte impatto ambientale che ha il CEM I, pur beneficiando di una superiore resistenza meccanica. Il migliore dei quattro sembra essere il legante GGBS LC3, poiché risulta più performante degli altri due LC3 e meno inquinante del CEM I.

Per quanto riguarda il calcestruzzo invece, i risultati ottenuti avendo come unità funzionale la produzione di 1 m³ di calcestruzzo sono:



In questo caso, l'impatto di 1m³ di calcestruzzo confezionato con i nuovi cementi risulta essere più del 40% inferiore rispetto a quello confezionato con il CEM I mentre tra il calcestruzzo con la loppa d'altoforno (CLS GGBS LC3) e quello con le argille si ha un guadagno della CO₂ emessa del 4%.

Anche in questo caso il GWP è stato messo in relazione con la resistenza a compressione:



Sotto il profilo prestazionale, il CEM I utilizzato come riferimento si conferma essere il migliore, rimanendo in ogni caso il peggiore dal punto di vista delle emissioni.

Il calcestruzzo migliore osservando il profilo ambientale risulta essere il CLS GGBS LC3. Il risultato era stato preannunciato dall'analisi LCA eseguita sulla tonnellata di legante.

PROGETTO STRUTTURALE CON I CALCESTRUZZI

LC3

Nei capitoli precedenti è stata dimostrata l'affidabilità in termini di resistenza meccanica dei calcestruzzi ottenuti con gli LC3. Viene dunque proposto un progetto strutturale che ha come concept di partenza una struttura a fili fissi i cui elementi tridimensionali saranno dimensionati in base alle resistenze meccaniche dei calcestruzzi ed alla distribuzione dei carichi. Lo scopo di tale analisi è ottenere un paragone, a parità di prestazione, tra la cubatura di nuovi calcestruzzi necessaria per realizzare la struttura e quella di un calcestruzzo tradizionale.

Normativa di riferimento

Per la progettazione della struttura si è fatto riferimento alla Normativa Tecnica vigente in Italia, il D.M. 17/01/2018, "Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC18).

Localizzazione geografica

Si suppone che il sito di progetto sorga nel comune di Ancona (AN). Per la determinazione dell'azione sismica viene considerata la categoria di sottosuolo C e la superficie topografica T1, in accordo con il capitolo 3.2.2 delle NTC18, mentre per il calcolo dell'azione della neve sarà necessario considerare l'esposizione dell'edificio, come indicato al capitolo 3.4.2 delle NTC18.

Vita Nominale e classi d'uso

Si suppone una vita nominale di 50 anni ed una classe d'uso II, ovvero una costruzione senza funzioni pubbliche o sociali ma con un normale affollamento.

Caratteristiche generali del concept strutturale

L'edificio si sviluppa su 3 piani fuori terra di 3.00 m di altezza ognuno. È pensato come un telaio composto da 12 pilastrate, che scandiscono la pianta del fabbricato in tre campate in direzione y e due campate in direzione x. Le travi hanno luce di 5.00 m.

PREDIMENSIONAMENTO DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

Partendo da un concept a fili, si è reso necessario ricorrere al predimensionamento degli elementi per ottenere geometrie minime delle sezioni trasversali, con la consapevolezza che il dimensionamento vero e proprio avrebbe portato con sé una reiterazione del calcolo delle geometrie delle sezioni trasversali.

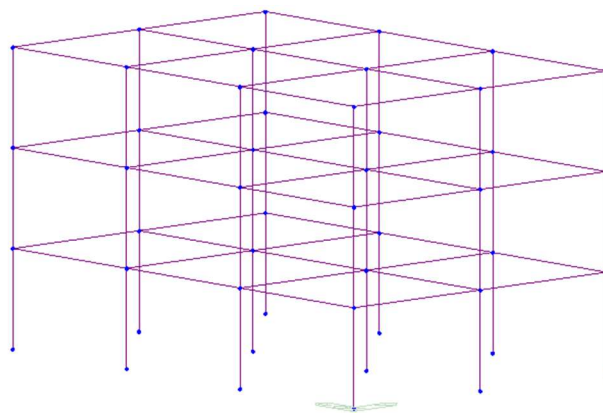


Figura 54, Il concept unifilare di partenza

Le travi sono state pre dimensionate considerando un'altezza pari a 1/10 della luce e larghezza compresa tra 0,5 e 0,7 dell'altezza della trave. In questo caso, la sezione di partenza è 30x50cm.

La sezione trasversale dei pilastri, che non deve essere inferiore a 25 cm, è stata considerata a partire dai 30 cm, per poter pareggiare lo spessore dei tramezzi interni. Nella reiterazione del processo di dimensionamento dei pilastri a seguire si è comunque considerato di non eccedere il rapporto di 4 tra l'altezza della sezione del pilastro e la sua base.

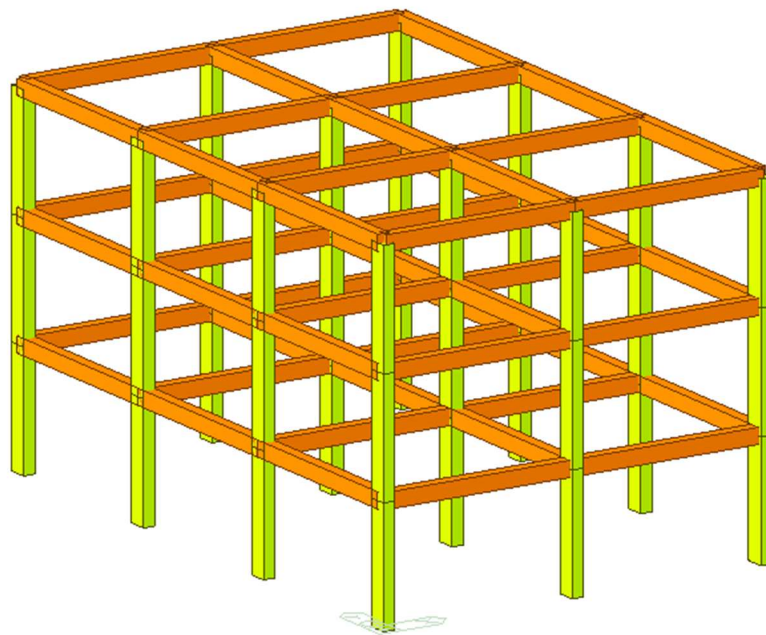


Figura 55, Modello 3D della struttura

La scelta dello spessore minimo della parte portante del solaio può essere determinato secondo le indicazioni del D.M del 6 gennaio 1996:

$$h_{min} = \frac{l}{25} = \frac{500}{25} = 2$$

Dove l è la luce del solaio.

Si prevede di impiegare un solaio latero – cementizio di spessore 20 cm con soletta collaborante pari a 4 cm (20 + 4 cm).

Si fa riferimento a quanto riportato dalla circolare del 2 febbraio 2009 riguardo i limiti dimensionali delle varie parti del solaio:

- La larghezza delle nervature non deve essere inferiore a 1/8 del loro interasse, o comunque non inferiore a 80 mm.
- L'interasse delle nervature non deve essere maggiore di 15 volte lo spessore della soletta;
- La dimensione massima del blocco in laterizio non deve superare i 529 mm.

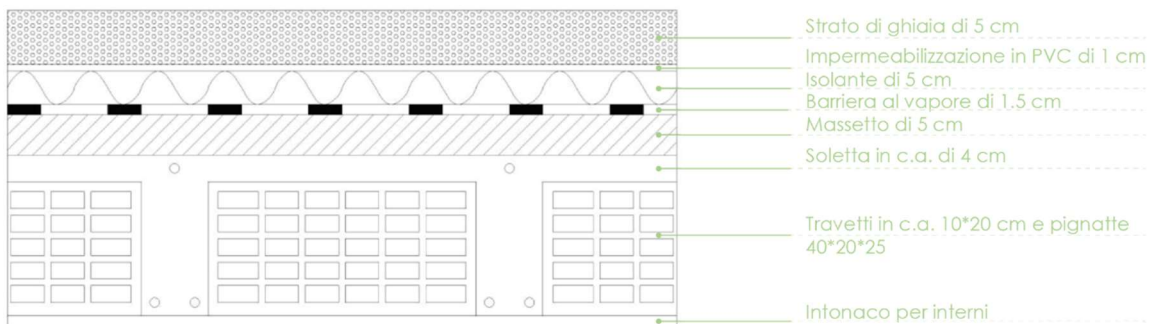
Nel rispetto di tali limitazioni vengono scelte le seguenti dimensioni:

- Interasse tra i travetti: 50 cm
- Larghezza della nervatura: 10 cm
- Larghezza della pignatta: 40 cm

Vengono poi presi in considerazione gli spessori aggiuntivi non strutturali. Per quanto riguarda il solaio di copertura, si è optato per una copertura piana accessibile per sola manutenzione, di conseguenza si prevede l'impiego di un massetto di giusta pendenza per far defluire le acque. La barriera al vapore sarà posta sopra quest'ultimo. Verrà poi steso uno strato isolante, ed infine uno strato di protezione di ghiaia.

Per la progettazione del solaio di piano, viene previsto l'impiego di un massetto le cui dimensioni considerino il passaggio delle parti impiantistiche interne. Lo strato di pavimentazione sarà posato sopra di esso.

Sezione del solaio di copertura



Sezione del solaio di piano

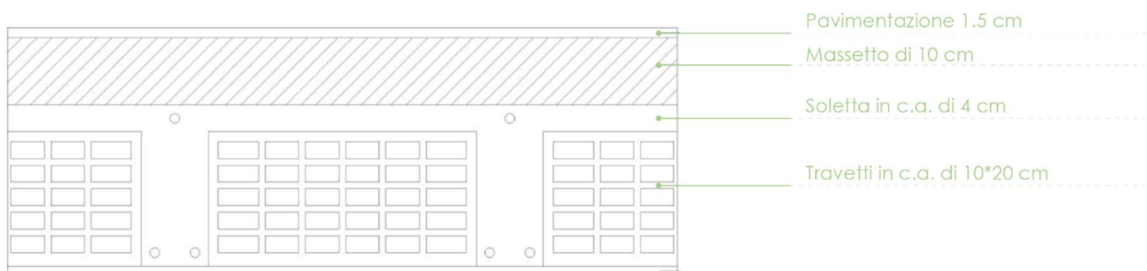


Figura 56, Rappresentazione del solaio di copertura e del solaio di piano

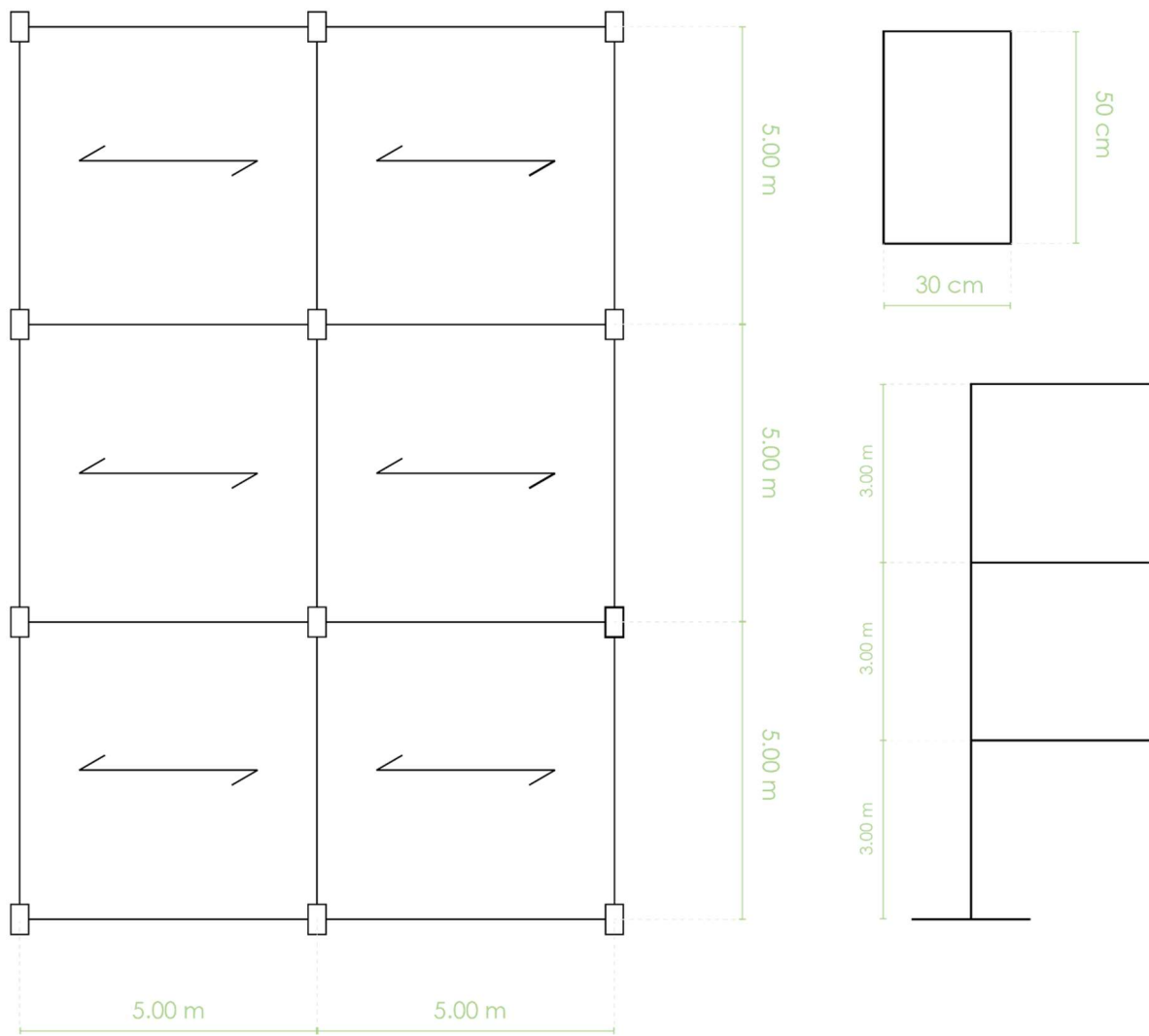


Figura 57, Schema unifilare della struttura

ANALISI DEI CARICHI

Di seguito si riportano le azioni agenti considerate per l'analisi dei carichi:

- Permanenti G; non rimovibili e costanti per tutta la vita della costruzione.
Possono essere carichi permanenti strutturali (G1) o non strutturali (G2);
- Accidentali Q.

Analisi del solaio di copertura:

Carico permanente strutturale G1:

- Soletta in c.a. : $0.04m \times 25 \frac{kN}{m^3} = 1.00 \frac{kN}{m^2}$
- Travetti in c.a.: $0.20m \times 0.40 m \times 25 \frac{kN}{m^3} = 2.00 \frac{kN}{m^2}$
- Pignatte RBT 40: $0.20m \times 0.80 m \frac{0.101}{0.20 \times 0.40 \times 0.25} \frac{kN}{m^3} = 0.81 \frac{kN}{m^2}$

$$G1 : 3.81 \frac{kN}{m^2}$$

Carichi permanenti non strutturali G2:

- Massetto: $0.05m \times 21 \frac{kN}{m^3} = 1.05 \frac{kN}{m^2}$
- Barriera al vapore di 1.5 m: $0.02 \frac{kN}{m^2}$
- Isolante in pannelli di sughero di 5 cm: $0.15 \frac{kN}{m^2}$
- Impermeabilizzazione in PVC di 1 cm: $0.03 \frac{kN}{m^2}$
- Strato di ghiaia $0.015m \times 15 \frac{kN}{m^3} = 0.23 \frac{kN}{m^2}$

$$G2: 2.68 \frac{kN}{m^2}$$

Carichi accidentali Q

- Carico di manutenzione: $0.5 \frac{kN}{m^2}$
- Carico neve: $q_s = \eta_i \times q_{sk} \times C_e \times C_t q_s = 0.8 \times 1 \times 1 \times 1.5 = 1.2$

Analisi del solaio di piano tipo:

Carico permanente strutturale G1:

- Soletta in c.a.: $0.04m \times 25 \frac{kN}{m^3} = 1.00 \frac{kN}{m^2}$
- Travetti in c.a. : $0.20m \times 0.40 m \times 25 \frac{kN}{m^3} = 2.00 \frac{kN}{m^2}$
- Pignatte: $0.20m \times 0.80 m \frac{0.101}{0.20 \times 0.40 \times 0.25} \frac{kN}{m^3} = 0.81 \frac{kN}{m^2}$

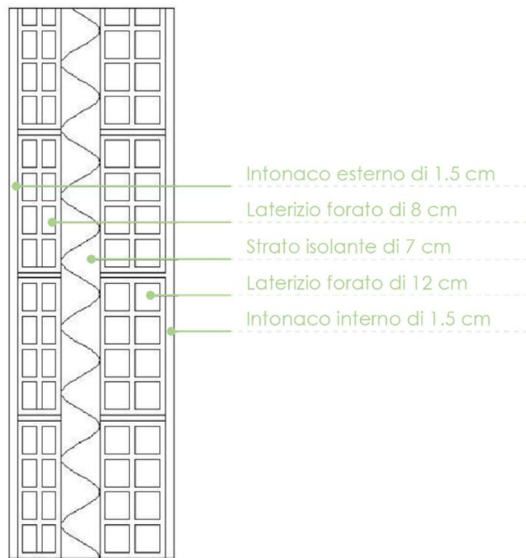
G1: $3.81 \frac{kN}{m^2}$

Carichi permanenti non strutturali G2:

- Massetto: $0.10m \times 21 \frac{kN}{m^3} = 2.10 \frac{kN}{m^2}$
- Pavimentazione (si suppone in marmo) : $0.015m \times 27 \frac{kN}{m^3} = 0.41 \frac{kN}{m^2}$
- Intonaco interno: $0.015m \times 15 \frac{kN}{m^3} = 0.23 \frac{kN}{m^2}$
- Tramezzi interni: $0.6 \frac{kN}{m^2}$

G2: $3.075 \frac{kN}{m^2}$

Sezione del tramezzo esterno



Tramezzi esterni:

- Intonaco esterno: $3.00m \times 0.015 m \times 15 \frac{kN}{m^3} = 0.675 \frac{kN}{m^2}$
- Forato di 8 cm: $3.00m \times 0.08 m \times 6 \frac{kN}{m^3} = 1.44 \frac{kN}{m^2}$
- Isolante di 7 cm: $3.00m \times 0.07 m \times 0.7 \frac{kN}{m^3} = 0.147 \frac{kN}{m^2}$
- Forato di 12 cm: $3.00m \times 0.12 m \times 6 \frac{kN}{m^3} = 2.16 \frac{kN}{m^2}$
- Intonaco interno: $3.00m \times 0.015 m \times 15 \frac{kN}{m^3} = 0.675 \frac{kN}{m^2}$

Peso tramezzi esterni: $0.675 + 1.44 + 0.147 + 2.16 + 0.675 = 5.097 \frac{kN}{m^2}$

Il peso dei tramezzi esterni sarà conteggiato solo sui telai di bordo più esterni.

Carichi accidentali Q

- Carico di civile abitazione: $2.00 \frac{kN}{m^2}$

DIMENSIONAMENTO DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

Per la modellazione ed il dimensionamento della struttura è stato utilizzato il software Midas GEN.

Gli elementi di partenza sono stati modellati sulla base delle dimensioni ottenute in fase di pre dimensionamento.



Figura 58, logo di Midas GEN

Alla struttura tipo sono stati applicati i carichi sopra riportati.

Una volta applicati, i carichi sono poi stati trasformati in masse. L'aliquota considerata per ogni massa è stata ricavata facendo riferimento alla NTC18, 2.5.3, nello specifico alla combinazione:

$$G_1 + G_2 + \Sigma_J \varphi_{2J} Q_{kj}$$

Come sopra riportato, l'edificio che si prevede di progettare sarà adibito ad uso residenziale, al quale corrisponde un coefficiente di combinazione pari a $\varphi_{2J} = 0.3$ (tab 2.5.I NTC18).

È stata quindi effettuata un'analisi modale in assenza di forzante orizzontale. Per l'inserimento dello spettro al quale associare l'analisi modale si fa riferimento ad un terreno con categoria di sottosuolo C e superficie topografica T1. Il fattore di comportamento q considerato è di 1.5, ciò significa che la struttura, nel fronteggiare l'azione sismica, manifesterà delle plasticità, ovvero delle deformazioni irreversibili.

Gli effetti dell'azione sismica sono stati combinati con il metodo CQC (complete quadratic combination).

Il modello a fili è stato poi replicato per quattro volte, una per ogni tipologia di calcestruzzo progettato in laboratorio. A questo punto si porteranno avanti quattro progetti che, a causa del materiale utilizzato, si prevede che differiscano fra loro in quanto a geometria delle sezioni e quantitativo di acciaio impiegato per l'armatura.

In ogni modello è stata inserita una delle resistenze che seguono:

	CLS Pc Ref 0.5	CLS Argilla 1 LC3	CLS Argilla 2 LC3	CLS GGBS LC3
f_{ck} (MPa)	34.63	21.04	19.70	28.75

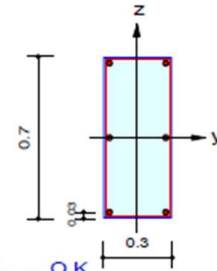
L'acciaio impiegato è un B450 C, al quale corrisponde una tensione di snervamento pari a 450 MPa.

Gli elementi della struttura sono stati progettati per sopportare le sollecitazioni allo stato limite d'esercizio e stato limite ultimo statico e sismico.

Il dimensionamento degli elementi in calcestruzzo è stato effettuato tramite la funzione Concrete Code Design di Midas GEN. Si tratta di una verifica che fornisce informazioni riguardo la corretta geometria della sezione in calcestruzzo ed il quantitativo di armature di acciaio di ogni elemento. Tale verifica è stata effettuata in maniera reiterata a seconda dell'esito.

1. Design Condition

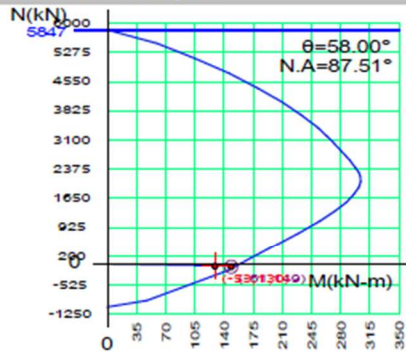
Design Code : Eurocode2:04 & NTC2018 UNIT SYSTEM kN, m
 Member Number: 33 (PM), 34, 35 (Shear-y,z)
 Material Data : $f_{ck} = 34630$, $f_{yk} = 450000$, $f_{yw} = 450000$ KPa
 Column Height : 3 m
 Section Property: pil 30*70 (No : 1)
 Rebar Pattern : 6 - 3 - P24 $A_{st} = 0.002712 \text{ m}^2$ ($p_{st} = 0.013$)



2. Axial and Moments Capacity

Load Combination : 6 (Pos : I)
 Concentric Max. Axial Load $N_{Rdmax} = 5846.81 \text{ kN}$
 Axial Load Ratio $N_{Ed} / N_{Rd} = -53.227 / 60.5738 = 0.879 < 1.000$ O.K
 Moment Ratio $M_{Ed} / M_{Rd} = 129.645 / 149.262 = 0.869 < 1.000$ O.K
 $M_{Edy} / M_{Rdy} = 68.3830 / 79.0896 = 0.865 < 1.000$ O.K
 $M_{Edz} / M_{Rdz} = 110.143 / 126.586 = 0.870 < 1.000$ O.K

M-N Interaction Diagram



N.Rd(kN)	M.Rd(kN-m)
5846.81	0.00
5137.76	105.68
4403.83	181.15
3722.90	233.67
3109.91	268.60
2600.64	291.05
2303.48	302.29
2079.12	304.76
1757.36	296.17
1346.52	273.91
786.12	229.46
-168.24	144.62
-1061.22	0.00

3. Shear Capacity

[END]	y (LCB : 11, POS : J)	z (LCB : 11, POS : J)
Applied Shear Force (V.Ed)	29.7304 kN	191.070 kN
V.Ed / V.Rdc	29.7304 / 132.616 = 0.224	191.070 / 118.608 = 1.611
V.Ed / V.Rds	29.7304 / 73.1438 = 0.406	191.070 / 196.630 = 0.972
V.Ed / V.Rdmax	29.7304 / 981.760 = 0.030	191.070 / 1044.09 = 0.183
Shear Ratio	0.224 < 1.000 O.K	0.972 < 1.000 O.K
Asw-H.req	0.00073 m ² /m, 2-P8 @120	0.00081 m ² /m, 2-P8 @120
[MIDDLE]	y (LCB : 11, POS : 1/2)	z (LCB : 11, POS : 1/2)
Applied Shear Force (V.Ed)	29.7304 kN	191.070 kN
V.Ed / V.Rdc	29.7304 / 132.616 = 0.224	191.070 / 118.608 = 1.611
V.Ed / V.Rds	29.7304 / 73.1438 = 0.406	191.070 / 196.630 = 0.972
V.Ed / V.Rdmax	29.7304 / 981.760 = 0.030	191.070 / 1044.09 = 0.183
Shear Ratio	0.224 < 1.000 O.K	0.972 < 1.000 O.K
Asw-H.req	0.00073 m ² /m, 2-P8 @120	0.00081 m ² /m, 2-P8 @120
[JOINT : Bottom]	y (LCB : 6, POS : I)	z (LCB : 6, POS : I)
Ash.req / Ash.use	0.00037 / 0.00040 = 0.917	0.00037 / 0.00040 = 0.917
Joint Ratio	0.917 < 1.000 O.K	0.917 < 1.000 O.K
Ash.jnt	2-4 P8	2-4 P8

Figura 59, L'esito della verifica di un pilastro effettuata con la funzione Concrete Code Design

La verifica è stata effettuata per ciascun elemento strutturale, e ciò ha reso possibile la redazione di un computo metrico in cui sono stati riportati i m³ di calcestruzzo ed il quantitativo di acciaio espresso in kg necessari per la realizzazione della struttura stessa.

Nella progettazione degli elementi si è monitorato il rapporto fra il quantitativo di acciaio ed i metri cubi di calcestruzzo, facendo sì che questo non fosse superiore a 150. Questo perché un'armatura troppo fitta non garantirebbe il completo avvolgimento della stessa da parte del calcestruzzo in fase di getto, rendendo difficoltoso il corretto posizionamento degli inerti in maniera omogenea all'interno del cassero. In virtù di questo ragionamento si è preferito incrementare l'area delle sezioni degli elementi, ottimizzando il rapporto kg di acciaio – metri cubi di calcestruzzo.

Vengono riportati gli esiti dei computi metrici. Il primo esprime i quantitativi appartenenti alla struttura realizzata con il calcestruzzo di riferimento:

CLS 0.5									
CALCESTRUZZO								ACCIAIO	
TRAVI								TOT m ³ cls	TOT KG acciaio:
BASE SEZIONE (m)	ALTEZZA SEZIONE (m)	AREA (m ²)	LUNGHEZZA ELEMENTO (m)	VOLUME (m ³)	NUMERO ELEMENTI	VOLUME ELEMENTI (m ³)	SOMMA (m ³)	71.7	9921
0.3	0.6	0.18	5	0.9	51	45.9	45.9		Rapporto kg acciaio/m ³ cls
PILASTRI								71.7	138.3708889
BASE SEZIONE (m)	ALTEZZA SEZIONE (m)	AREA (m ²)	LUNGHEZZA ELEMENTO (m)	VOLUME (m ³)	NUMERO ELEMENTI	VOLUME ELEMENTI (m ³)	SOMMA (m ³)		
0.3	0.75	0.225	3	0.675	24	16.2	25.8		
0.3	0.8	0.24	3	0.72	8	5.76			
0.4	0.8	0.32	3	0.96	4	3.84			

CLS GGBS LC3								ACCIAIO	
CALCESTRUZZO								TOT m³ cls	TOT KG acciaio:
TRAVI								76.98	11495
BASE SEZIONE (m)	ALTEZZA SEZIONE (m)	AREA (m²)	LUNGHEZZA ELEMENTO (m)	VOLUME (m³)	NUMERO ELEMENTI	VOLUME ELEMENTI (m³)	SOMMA (m³)		Rapporto kg acciaio/m³ cls
0.3	0.6	0.18	5	0.9	51	45.9	45.9		149.3
PILASTRI									
BASE SEZIONE (m)	ALTEZZA SEZIONE (m)	AREA (m²)	LUNGHEZZA ELEMENTO (m)	VOLUME (m³)	NUMERO ELEMENTI	VOLUME ELEMENTI (m³)	SOMMA (m³)		
0.3	0.8	0.24	3	0.72	8	5.76	31.08		
0.3	0.95	0.285	3	0.855	24	20.52			
0.4	1	0.4	3	1.2	4	4.8			

CLS ARG 1 LC3								ACCIAIO	
CALCESTRUZZO								TOT m³ cls	TOT KG acciaio:
TRAVI								84.3	12499.75343
BASE SEZIONE (m)	ALTEZZA SEZIONE (m)	AREA (m²)	LUNGHEZZA ELEMENTO (m)	VOLUME (m³)	NUMERO ELEMENTI	VOLUME ELEMENTI (m³)	SOMMA (m³)		Rapporto kg acciaio/m³ cls
0.3	0.6	0.18	5	0.9	51	45.9	45.9		148.2770276
PILASTRI									
BASE SEZIONE (m)	ALTEZZA SEZIONE (m)	AREA (m²)	LUNGHEZZA ELEMENTO (m)	VOLUME (m³)	NUMERO ELEMENTI	VOLUME ELEMENTI (m³)	SOMMA (m³)		
0.3	1	0.3	3	0.9	8	7.2	38.4		
0.3	1.2	0.36	3	1.08	24	25.92			
0.4	1.1	0.44	3	1.32	4	5.28			

CLS ARG 2 LC3								ACCIAIO	
CALCESTRUZZO								TOT m³ cls	TOT KG acciaio:
TRAVI								91.965	13918.28004
BASE SEZIONE (m)	ALTEZZA SEZIONE (m)	AREA (m²)	LUNGHEZZA ELEMENTO (m)	VOLUME (m³)	NUMERO ELEMENTI	VOLUME ELEMENTI (m³)	SOMMA (m³)		Rapporto kg acciaio/m³ cls
0.3	0.65	0.195	5	0.975	51	49.725	49.725		151.3432289
PILASTRI									
BASE SEZIONE (m)	ALTEZZA SEZIONE (m)	AREA (m²)	LUNGHEZZA ELEMENTO (m)	VOLUME (m³)	NUMERO ELEMENTI	VOLUME ELEMENTI (m³)	SOMMA (m³)		
0.3	1.2	0.36	3	1.08	8	8.64	42.24		
0.3	1.2	0.36	3	1.08	24	25.92			
0.4	1.6	0.64	3	1.92	4	7.68			

Com'è deducibile dall'area delle sezioni di travi e pilastri, le strutture realizzate con i nuovi calcestruzzi prevedono l'impegno di un maggior volume di calcestruzzo rispetto alla struttura di riferimento, ma ciò era prevedibile considerata l'inferiore resistenza meccanica dei conglomerati rispetto al Cemento Portland. La necessità di maggiori cubature di calcestruzzo si riflette

sull'esigenza di un ulteriore quantitativo di acciaio per raggiungere le stesse capacità della struttura realizzata con calcestruzzo ordinario.

Nonostante questo, viene confermata la possibilità di impiegare a fini strutturali i calcestruzzi ottenuti con i nuovi leganti.

IMPATTI AMBIENTALI DELLE STRUTTURE REALIZZATE CON I CALCESTRUZZI LC3

L'ultimo passo da eseguire per poter rendere possibile un paragone fra i leganti tradizionali ed i nuovi cementi consiste nell'analisi dell'impatto ambientale delle strutture sopra progettate.

Nei capitoli precedenti sono stati analizzati gli impatti ambientali dei calcestruzzi. L'LCA ha evidenziato una miglior prestazione sotto il profilo ambientale da parte dei nuovi materiali. Tuttavia è stata effettuata sul solo calcestruzzo, quindi si rende necessario considerare anche l'impatto ambientale dell'acciaio. Dai computi metrici sopra riportati è emerso che per la realizzazione di una struttura con i nuovi calcestruzzi, a pari prestazioni meccaniche con una struttura tradizionale, è necessario impiegare non solo un maggiore quantitativo di conglomerato cementizio, ma anche di acciaio. Proprio quest'ultimo potrebbe gravare sull'impatto ambientale delle strutture realizzate con materiali sostenibili.

Per rendere il più possibile completa l'analisi di impatto ambientale delle quattro strutture sono state prese in considerazione tre differenti provenienze del materiale acciaio, alle quali corrispondono differenti quantitativi di kg CO₂ eq in fase di analisi LCA.

L'acciaio strutturale può infatti essere di origine minerale, può essere ricavato dai rottami o può essere formato da una commistione dei due. Vengono riportati i valori di kg CO₂/kg per ogni tipo di acciaio:

kgCo2eq/kg		
acciaio medio (60% minerale 40% rottame)	acciaio minerale	acciaio da rottame
1.7	3.8	0.89

Con il termine "acciaio medio" si intende un acciaio strutturale attualmente utilizzato formato per il 60% da acciaio minerale ed il 32% da acciaio da rottame. È stato calcolato l'impatto ambientale delle strutture per tutte le tipologie di acciaio strutturale sopra riportate:

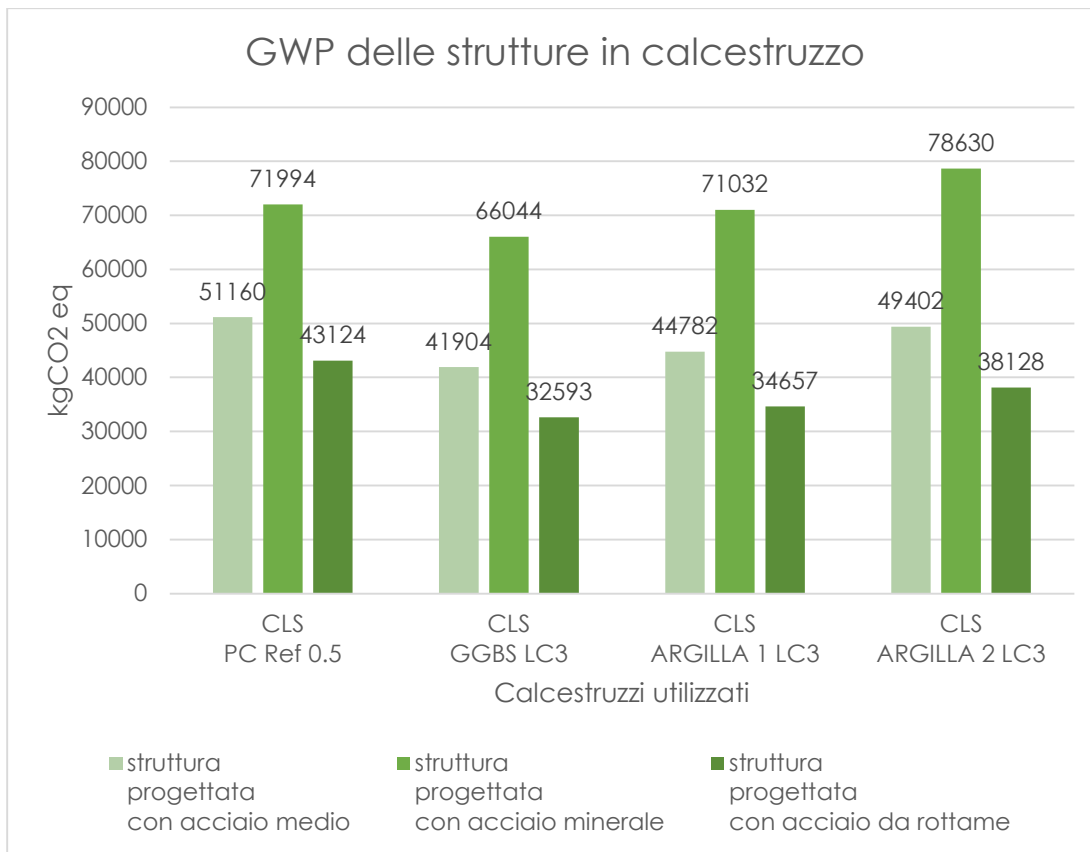
	CLS PC Ref 0.5	CLS GGBS LC3	CLS ARGILLA 1 LC3	CLS ARGILLA 2 LC3
m ³ cls	71.7	76.98	84.3	91.9
kg acciaio	9921	11495	12500	13918
kgCO ₂ eq/m ³ cls	478.3	290.5	279.15	280.1
kgCO ₂ eq cls	34294	22363	23532	25741
KgCO ₂ eq acciaio medio	16866	19542	21250	23661
kgCO ₂ della struttura progettata con acciaio medio	51160	41904	44782	49402
KgCO ₂ eq acciaio minerale	37700	43681	47500	52888
kgCO ₂ eq della struttura progettata con acciaio minerale	71994	66044	71032	78630
KgCO ₂ eq acciaio da rottame	8830	10231	11125	12387
kgCO ₂ eq della struttura progettata con acciaio da rottame	43124	32593	34657	38128

È evidente che se si progetta di costruire unicamente con acciaio minerale, la convenienza nel realizzare una struttura con i nuovi calcestruzzi da un punto di vista ambientale esiste solo nel caso in cui venga utilizzato il calcestruzzo GGBS LC3. Se invece si considera di utilizzare l'acciaio medio o dell'acciaio proveniente da rottami, c'è un ritorno in termini di prestazione ambientale.

Nello specifico, rispetto ad una struttura realizzata con i convenzionali calcestruzzi, c'è un risparmio di kg di CO₂ eq pari a:

	% kgCO ₂ eq non immessi in ambiente			
	CLS PC Ref 0.5	CLS GGBS LC3	CLS ARGILLA 1 LC3	CLS ARGILLA 2 LC3
struttura progettata con acciaio medio	0	18%	12%	3%
struttura progettata con acciaio minerale	0	8%	1%	x
struttura progettata con acciaio da rottame	0	25%	20%	12%

Vengono riportati i dati relativi al GWP di ogni struttura considerando tutte e tre le tipologie di acciaio:



Da tale analisi si può dedurre che l'utilizzo del solo acciaio minerale non comporta miglioramento da un punto di vista ambientale nell'edificazione della costruzione presa in esame ad esclusione della sola riduzione del 10% di emissioni nel caso del calcestruzzo confezionato con GGBS LC3, dato che il vantaggio in termini ambientali dei calcestruzzi innovativi è controbilanciato dalla necessità di un maggior quantitativo di armatura.

D'altra parte, poiché l'acciaio prodotto attualmente proviene per il 40% da rottame, il conseguente abbassamento del costo di CO₂eq relativo incrementa il vantaggio ambientale della costruzione della struttura con i nuovi leganti, che arriva al 20% considerando il CLS GGBS LC3 e al 10% per il CLS Argilla 1 LC3.

Inoltre, poiché la siderurgia secondaria è destinata ad incrementare fino al 100%, questo vantaggio è aumenterà ulteriormente, fino a diminuire di un quarto (-25%) le emissioni del calcestruzzo realizzato con GGBS LC3 e del -10% considerando i calcestruzzi realizzati con le miscele Argilla 1 LC3 ed Argilla 2 LC3.

CONCLUSIONI

Le sperimentazioni raccolte all'interno di questa tesi hanno lo scopo di fornire un'alternativa concreta al cemento Portland. L'essere ricorsi a prove di caratterizzazione, provini e materiali normati fa sì che tali analisi siano replicabili, fornendo una base per lo sviluppo ed il miglioramento dei nuovi leganti.

Gli LC3 (ovvero i CEM II/C-M) si sono dimostrati validi sostituti dei leganti tradizionali, in quanto rappresentano un ottimo compromesso fra il raggiungimento delle prefissate prestazioni meccaniche ed il soddisfacimento del requisito della sostenibilità ambientale. I nuovi cementi oggetto di studio sono stati infatti catalogati come cementi in classe di resistenza 32.5 L, e questo ha fatto sì che potessero essere portate avanti sperimentazioni riguardo il confezionamento di calcestruzzi realizzati con tali leganti, che a loro volta si sono dimostrati prestanti dal punto di vista meccanico. Questi leganti prevedono l'impiego della metà del quantitativo di cemento Portland di un legante tradizionale, ragion per cui rappresentano un valido sostituto dei leganti tradizionali soddisfacendo il requisito di sostenibilità ambientale a discapito di un decremento della prestazione meccanica. Tale decremento si manifesta in fase progettuale con un aumento della cubatura di calcestruzzo previsto per la realizzazione della struttura, ma rende comunque possibile l'esecuzione del progetto.

Dopo aver effettuato l'analisi dell'impatto ambientale delle strutture progettate con i nuovi leganti sviluppati è possibile affermare che:

- Sono più sostenibili rispetto al cemento Portland tradizionale, riducendo le emissioni di CO₂ di circa la metà a parità di peso,
- Garantiscono prestazioni meccaniche tali da poter essere utilizzati per confezionare calcestruzzi strutturali,
- Permettono di diminuire l'impatto delle strutture in fase di costruzione fino al 25%.

Al termine delle sperimentazioni, è possibile confermare che gli LC3 sono effettivamente una realtà concreta ed alternativa al cemento Portland.

BIBLIOGRAFIA

- UNEP – GlobalABC, Global status Report for Buildings and Construction 2022;
- UNEP – GlobalABC, Global status Report for Buildings and Construction 2021;
- Balasubramanian, N., Sarangapani, C. A review on the factors influencing the performance of sustainable ternary cement composites. *Environ Dev Sustain* (2023);
- Prof. Quirino Sestini, *La chimica del cemento*, 1943;
- M. Collepardi and V.S.Ramachandran, “*Effect of Admixtures*”, 9th International Congress on the Chemistry of Cement”, pp. 529-570, New Delhi, India, 23-28 November, 1992;
- A. Borsoi, S. Collepardi L. Coppola, R. Troli e M. Collepardi, “*Progressi nei superfluidificanti per calcestruzzi*”, *L’Industria Italiana del Cemento*, N° 741, pp 234-245, 1999);
- Meenkashi Sharma, Shashank Bishnoi, Fernando Martirena, Karen Scrivener, *Limestone calcined clay cement and concrete: A state of the art review*;
- Commissione mondiale sull’ambiente e lo sviluppo, *Our common future* (Brundtland Report), 1987;
- Dichiarazione universale sulla diversità culturale, art 1 e art 3 UNESCO 2001;
- Regolamento UE 305/11;
- Provincia di Cremona, *Nuovo Manuale GPP*, revisione aggiornata del manuale GPPnet, maggio 2008;
- Commissione Europea, *Un manuale sugli appalti pubblici ecocompatibili*, Ufficio delle comunicazioni ufficiali delle Comunità Europee, Lussemburgo, 2005;
- CEN/TC51/WG6 n. 333 – Dicembre 2011: *Development of new Ternary Cements with reduced Clinker content*
CEN/TC51/WG6 n. 396 – Giugno 2014: *Assessment of the “fitness for use” for cements of the combination K-S-V to be included in EN 197-1 as cement type CEM II/C-M (S-V) and CEM VI (S-V)*

CEN/TC51/WG6 n. 453 – Marzo 2018: *Assessment of the fitness for the use to produce structural concrete of new cement compositions K-S-P with the scope of their standardization as common cements*
CEN/TC51/WG6 n.494 – Marzo 2019: *Dossier to support an application for the European standardisation of CEM II/C-M cements*;

- Claudio Durastanti e Laura Moretti, *Impatti ambientali della produzione di cemento: un'analisi statistica*, in *Applied Sciences* 2020, 10(22), 8212; doi.org/10.3390/app1022821;
- Mohammed S. Imbabi, Collette Carrigan, Sean McKenna, *Trends and developments in green cement and concrete technology* in *International Journal of Sustainable Built Environment*, 194-216, 2012; [10.1016/j.ijsbe.2013.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.05.001);
- Mario Colleparidi, Silvia Colleparidi, Roberto Troli, *Il nuovo calcestruzzo*, Edizione Tintoretto, 2014;
- Mario Colleparidi, *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, Milano, Hoepli, 1991;
- M. Heikal, M. S. Morsy, H. El-Didamony, *Effetto del calcare sulle caratteristiche di idratazione del cemento Portland con loppa d'altoforno*, estratto da "L'industria del cemento", n. 765, maggio 2001;
- Alessandra De Santis, Chiara Martini, Fabrizio Martini, Marcello Salvio, Claudia Toro, *Cemento* in *Quaderni dell'efficienza energetica*, Aprile 2021; [Cemento \(enea.it\)](https://www.enea.it);
- Keegan Ramsden, *Cemento e calcestruzzo: l'impatto ambientale*, in *Princeton.edu*, novembre 2020, princeton.edu;
- Patrizia Ricci, *Economia Circolare, Il contributo dell'industria del cemento*, in *Blog Federbeton*, 5 Aprile 2023;
- Umberto Costa, *L'evoluzione dei materiali per contribuire alla decarbonizzazione delle costruzioni: i cementi della UNI EN 197-5*, in *Blog Federbeton*, 29 Marzo 2023;
- M. Sharma, S. Bishnoi, F. Martirena, K. Scrivener, *Limestone calcined clay cement and concrete: a state-of-the-art review*, in *Cem. Concr. Res.* 149 (2021) 106564, doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564;
- Y. Ruan, T. Jamil, C. Hu, *Microstructure and mechanical properties of sustainable cementitious materials with ultra-high substitution level of*

calcined clay and limestone powder, in *Construction and Building Materials*, 314(6):12546, doi:[10.1016/j.conbuildmat.2021.125416](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125416);

- K. Scrivener, F. Martirena, S. Bishnoi, S. Maity, *Calcined clay limestone cements (LC³)*, in *Cem. Concr. Res.* 114, 2018, 49-56, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>;
- M. Khan, Q. D. Nguyen, A. Castel, *Carbonation of Limestone Calcined Cement Concrete*, in *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, January 2018, doi: [10.1007/978-94-024-1207-9_38](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_38);
- G. Cardinalud, E. Rozière, O. Martinage, A. Loukili, L. Barnes-Davin, M. Parigi, D. Deneele, *Calcined clay – Limestone cements: Hydration processes with high and low-grade kaolinite clays*, 277, Marzo 2021, 122271, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122271>;
- Tesi di Laurea, Diego Marrocchini, Prof.re Stefano Silvestri, “*Progettazione sismica di un edificio intelaiato, di 6 piani, in c.a., ed analisi critica delle regole imposte dalla normative D.M. 14/01/2008*”
- Tesi di Laurea, Silvia Pizzabiocca, Prof.ssa Francesca Tittarelli, *Valorizzazione del filler calcareo per lo sviluppo di nuovi leganti sostenibili*, UNIVPM, 2022;
- ASTM C1897-20: Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements;
- UNI EN 197-1:2012, *Composizione, specifiche e criteri di conformità per i cementi comuni*;
- UNI EN 197-1:2012, *Cemento – Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per i cementi comuni*;
- UNI EN 197-5, 2021, *Cemento - Parte 5: cemento Portland composito CEM II/C-M e cemento composito CEM VI*;
- UNI EN 196-1: 2016, *Metodi di prova dei cementi - Parte 1: Determinazione delle resistenze meccaniche*;
- UNI EN 1015-3:2007, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)*;
- UNI EN 1015-6:2007, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 6: Determinazione della massa volumica apparente della malta fresca*;

- UNI EN 1015-11:2007, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*;
- UNI EN 12504-4:2021, *Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici*".
- UNI EN 8147:2008, *Agenti espansivi non metallici per impasti cementizi - Determinazione dell'espansione contrastata della malta*;
- UNI EN 12617-4:2003, *Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture in calcestruzzo - Metodi di prova - Determinazione del ritiro e della dilatazione*;
- UNI EN 15801:2010, *Conservazione dei beni culturali - Metodi di prova - Determinazione dell'assorbimento dell'acqua per capillarità*
- D.M. 14/01/2008, "Norme tecniche per le costruzioni"
- D.M. 17/01/2018, aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"

Se siete arrivati a leggere fino a qui, saprete che è con il cuore pieno di gratitudine che mi emoziono nel ringraziarvi uno per uno.

Ringrazio la Professoressa Francesca Tittarelli per avermi permesso di portare avanti una tesi così interessante ed essere sempre stata disponibile per ogni piccola spiegazione. Un grazie va all'ingegner Alessandra Mobili, per il grande supporto e le numerose spiegazioni tecniche. E grazie di cuore alla dottoranda Ing. Elisa Blasi, che con pazienza e grande dedizione mi ha fatta appassionare a questo lavoro di tesi.

Un grande grazie va anche al Professor Francesco Clementi, che mi ha permesso di far convergere in un unico progetto i miei interessi relativamente a due materie così apparentemente lontane.

E ora non posso non nominarvi uno per uno, sperando di riuscire a leggervi ad alta voce.

A Mamma e Papà, grazie per il bene incondizionato che mi volete. Mi rivedo in voi ogni giorno, e vedo gli occhi fieri con cui parlate di me. Vi vedo ogni giorno, e non smetterò mai di pensare a quanto io sia stata fortunata nell'avervi come genitori.

Alla mia famiglia, ai miei nonni, a tutti i miei zii e cugini. Sono cresciuta avvolta dal vostro amore, anche se alcuni di voi ora mi guardano da lassù, e non ci sono parole per dirvi quanto io vi sia grata.

A Leo. Non mi piace parlare con gli altri dei nostri momenti, perché ho sempre paura che raccontandoli a qualcun altro possano perdere di magia. Eppure, oggi ci tengo a dirti grazie per tutti quei momenti in cui sarebbe stato più facile andarsene, ma sei rimasto accanto a me. Sei la mia certezza, a te devo i miei sorrisi più belli.

A Chiara. Al legame che abbiamo, quello che abbiamo coltivato anche senza essercene accorte, pieno di bene non detto ma sempre sentito.

A Sofia, la riscoperta più bella dell'ultimo periodo. Al fatto che ti voglio bene in modo proporzionale al contatto fisico che evitiamo (quindi davvero tanto). A Runda, a tutte le risate ed i pianti fatti al monumento pensando che davvero quelli fossero i problemi della vita. A Ciammi, alla delicatezza con cui mi tratti e a Dodi, per esserci stato sempre. A Chillo, Bea, Edo, Pacina e Brubru. Siete il regalo più bello che la nostra uniforme puzzolente potesse farmi. Alle notti passate a chiacchierare e a giocare rancorosamente ai giochi da tavolo e alle feste in maschera. A tutta la vita che ci aspetta, insieme.

A Mattia, a come ci sei per me e a come ci sono per te, sempre. A Caterina, Stefania e Maria Chiara. Mi avete donato una leggerezza di cui non vi siete neanche accorte, ed in questo vedo tutto il bene del mondo. A Sara e Costantino, Alessandra e Gabriele. Siete la rappresentazione dell'amore, e vi sono grata per l'esempio meraviglioso di cui ci rendete partecipi.

A don Alessio, al modo in cui guardi sempre agli altri e ti spendi per loro. A Lorenzo, per la tua genuinità nel cercarmi.

A Giangi, Peppe e Silvia. La strada ha sicuramente deciso di farmi un regalo, facendovi capitare accanto a me nel momento giusto.

Ad Alessia e Ghydes, perché grazie a voi ho imparato a fidarmi di chi mi sostiene e a dare valore a chi si fida di me.

A Caterina, Alessandro, Elisa, Francesco, Marco, Michele ed Emanuele. Per me siete casa.

A Davide, Chiara, Luigi, Giacomo e Rita, per avermi accolta come se fossi una di voi da sempre.

A Luigi alle chiamate di notte durante il lockdown e a tutti gli esami sostenuti insieme, a Stefano, Michela, Fabio, Sofia ed Alessandro. Che questo sia solo il primo dei tanti traguardi della nostra professione.

E un po' grazie anche a me, alle mie fragilità ed alle debolezze, che mi rendono tanto vulnerabile quanto forte.

