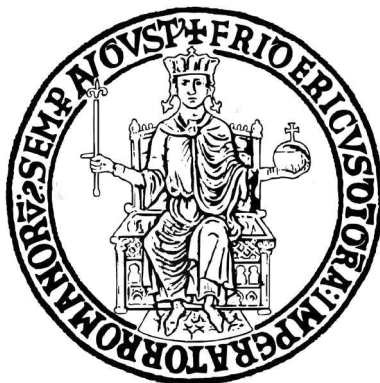


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Dottorato di Ricerca in
Ingegneria dei Sistemi Civili XXXV Ciclo
ICAR/10: Architettura Tecnica

*Filler pozzolanici di riciclo e malte ecologiche per il patrimonio
costruito. Ricerca, progetto e sperimentazione*

Coordinatore di Dottorato:
Prof. Ing. Andrea Papola

Candidata:
Manuela Compagnone

Tutor:
Prof.ssa Ing. Gigliola Ausiello

Anno Accademico 2021/2022

Al mio maestro e caro amico
Gianni Albano

INDICE

Introduzione.....	5
Capitolo 1 Leganti e Malte.....	9
1.1 Leganti: generalità.....	9
1.2 Leganti aerei.....	10
1.2.1 Calce aerea	10
1.2.2 Gesso.....	13
1.3 Leganti idraulici.....	13
1.3.1 Calce idraulica	14
1.3.2 Cemento.....	16
1.4 Malte	17
1.4.1 Aggregati.....	18
1.4.2 Filler.....	19
1.5 Riferimenti	21
Capitolo 2 I filler pozzolanici: stato dell'arte.....	22
2.1 Sugarcane Bagasse Ash (SCBA)	23
2.1.1 Impiego di SCBA e risultati ottenuti.....	27
2.1.2 Riferimenti.....	29
2.2 Rice Husk Ash (RHA)	31
2.2.1 Impiego di RHA e risultati ottenuti	34
2.2.2 Riferimenti.....	35
2.3 Saw Dust Ash (SDA)	37
2.3.1 Impiego di SDA e risultati ottenuti.....	39
2.3.2 Riferimenti.....	40
2.4 Palm Oil Fuel Ash (POFA)	42

2.4.1	Impiego di POFA e risultati ottenuti.....	43
2.4.2	Riferimenti.....	45
2.5	Waste Glass Ash (WGA).....	46
2.5.1	Impiego di WGA e risultati ottenuti.....	47
2.5.2	Riferimenti.....	50
2.6	Wheat Straw Ash (WSA).....	52
2.6.1	Impiego di WSA e risultati ottenuti.....	53
2.6.2	Riferimenti.....	54
2.7	Waste Paper Sludge Ash (WPSA).....	55
2.7.1	Impiego di WPSA e risultati ottenuti.....	56
2.7.2	Riferimenti.....	57
Capitolo 3	Requisiti normativi	59
3.1	Regolamento Europeo 305/11	59
3.2	Norme armonizzate	59
3.3	Dichiarazione di prestazione	59
3.4	La marcatura CE.....	60
3.5	Valutazione e verifica della costanza di prestazione.....	60
3.6	Deroghe alla redazione della dichiarazione di prestazione.....	61
3.7	Norme armonizzate per intonaci e malte per muratura.....	62
3.8	UNI EN 998-1	63
3.9	Esempio Dichiarazione di Prestazione DoP:	65
3.10	Riferimenti	66
Capitolo 4	Componenti della miscela e prove sui materiali	67
4.1	Legante: calce idrata	67
4.1.1	Finezza	68
4.1.2	Contenuto di acqua libera.....	68
4.1.3	Stabilità.....	69
4.1.4	Prove sulla malta	69

4.1.5	Massa volumica.....	70
4.2	Aggregato: sabbia di fiume.....	70
4.2.1	Massa volumica dei granuli.....	72
4.3	Filler ipotizzati: CLF e CP.....	73
4.3.1	Setacciatura.....	74
4.3.2	Massa volumica.....	75
4.3.3	Microscopia elettronica a scansione SEM - EDS.....	76
4.3.4	Analisi diffrattometrica XRD.....	78
4.3.5	Spettroscopia FT/IR.....	80
4.3.6	Spettrometria di massa al plasma accoppiata induttivamente ICP-MS.....	81
4.3.7	Saggio di pozzolanicità.....	82
4.4	Riferimenti	84
Capitolo 5	Sperimentazione Parte I: percorso e progetto.....	85
5.1	Obiettivo	85
5.2	Mix design.....	86
5.2.1	Curva granulometrica	86
5.2.2	Rapporto legante/aggregato.....	88
5.2.3	Contenuto d'acqua	89
5.2.4	Percentuale di filler	89
5.3	Miscele.....	90
5.4	Preparazione dei provini e valutazione della consistenza	92
5.5	Resistenza a flessione e a compressione	94
5.6	Riferimenti	101
Capitolo 6	Sperimentazione Parte II: equilibrio e proporzioni.....	102
6.1	Mix design.....	102
6.1.1	Curva granulometrica	102
6.1.2	Rapporto legante aggregato.....	104
6.1.3	Contenuto d'acqua	104

6.1.4	Percentuale di filler	104
6.2	Miscela	105
6.3	Resistenza a flessione e a compressione	107
6.4	Assorbimento d'acqua per capillarità	113
6.5	Adesione	116
6.6	Coefficiente di permeabilità al vapore acqueo	120
6.7	Conducibilità termica	122
6.8	Riferimenti	126
Conclusioni..		127

INTRODUZIONE

In vista della crescente sensibilità alle tematiche ambientali, negli ultimi anni ha trovato sempre più spazio l'interesse a conferire un'impronta ecologica ai materiali edili ed in particolar modo ai conglomerati. È proprio in questo spazio che si colloca la ricerca proposta che ha ad oggetto l'impiego di sottoprodotti o prodotti di scarto per il confezionamento delle malte.

Fulcro di questo studio è il “filler”, un aggregato di dimensioni ridottissime ($< 0,063$ mm) il cui effetto riempitivo e di riduzione dei vuoti è noto. I filler possono essere distinti in passivi, ovvero inerti, ed attivi, che chimicamente si comportano come la pozzolana naturale. Quest'ultima è responsabile della cosiddetta *reazione pozzolanica*, per cui la silice reattiva (naturale o artificiale) e l'idrossido di calce reagiscono grazie alla presenza di acqua, formando i silicati di calcio idrati denominati anche come gel C - S - H. Questo si presenta come lamelle sottili dell'ordine del nanometro ed è responsabile della resistenza meccanica della miscela.

Nella metà dell'ultimo secolo, si è affermato l'impiego di filler attivi artificiali quali ceneri volanti, fumo di silice e loppa d'altoforno, ovvero materiali di scarto che, invece di essere smaltiti, conferiscono, per la loro caratteristica di pozzolanicità, nuova vita nei calcestruzzi. Il loro impiego consente dei vantaggi sostenibili in termini di riduzione di materiale prelevato dalle cave e di emissioni di CO₂. In virtù di questi benefici, una porzione di ricercatori sta valutando ulteriori alternative sostenibili alla pozzolana naturale, in quanto il prelievo di materiale dalle cave non ha riscontrato una riduzione tangibile ed è evidente la necessità di ridurre emissioni inquinanti.

In linea con questo fine è il percorso di ricerca intrapreso; infatti, l'obiettivo finale è stato quello di definire una malta nel cui mix design sia compreso un opportuno quantitativo di filler derivante da materiale di scarto attivo. Questo quantitativo è stato definito con l'obiettivo di conseguire differenti prestazioni anche con l'uso dei filler oggetto di studio.

Determinante è stato stabilire, rispetto agli altri componenti, la percentuale di filler che sia rappresentativa di un buon compromesso tra sostenibilità e prestazioni. Quanto maggiore è la percentuale impiegata, più la malta si può definire “sostenibile”, poiché minore è l'utilizzo di materie prime estratte dalle cave e maggiore è la riduzione di emissioni che possono derivare dallo smaltimento di questi prodotti di scarto.

Prima di arrivare a questo punto, il cammino è stato ovviamente lungo. Nella prima fase, l'attenzione è stata focalizzata maggiormente sullo studio del filler pozzolanico alternativo. In letteratura, ne sono stati riscontrati diversi che non trovano ancora un riscontro pratico,

nonostante sia stato appurato il loro potenziale pozzolanico. Per questi la sperimentazione non sembra essere molto spinta, anzi addirittura sembra essere quasi circoscritta alla determinazione di poche caratteristiche. In letteratura emergono molte sperimentazioni per la valutazione di una percentuale di questa polvere reattiva in sostituzione o in aggiunta al legante.

Questo studio è stato imprescindibile per comprendere le caratteristiche di un filler e l'approccio da implementare in fase di sperimentazione.

È risultata utile una sistematizzazione di tutte le informazioni che emergono dallo stato dell'arte in modo da poter comparare tra loro i filler. Un'elaborazione organica dello stato dell'arte ha avuto sicuramente il vantaggio di una maggiore chiarezza, tale da poter effettuare delle considerazioni e delle riflessioni a cui si può giungere in maniera più lineare e diretta, senza passare per percorsi di studio più laboriosi e tortuosi.

Tutte le tipologie di filler attivi studiati si riconducono alle medesime caratteristiche che denotano il comportamento pozzolanico. Nonostante questo comune denominatore come fondamento intrinseco della loro caratterizzazione, le modalità di approccio e di studio dei filler attivi sono abbastanza eterogenee in quanto diverse sono le loro derivazioni. Il filler che viene immesso nella miscela, infatti, deve essere preventivamente soggetto a lavorazioni, più o meno complesse, affinché possa diventare quanto più reattivo possibile ed esplicare al meglio l'attività pozzolanica.

La struttura amorfa della silice è un elemento indispensabile per spiegare la reazione, come anche la finezza della polvere. Infatti, più le particelle sono sottili, più sarà amplificata l'azione pozzolanica poiché più elevata sarà la superficie utile disponibile a concorrere per questa reazione. Per raggiungere queste caratteristiche, però, sono diverse le strade da intraprendere e si differenziano proprio in funzione del sottoprodotto di origine. Ad esempio i filler ottenuti da scarti di derivazione agricola necessitano che l'elemento vegetale da cui hanno origine sia preventivamente lavato per eliminare la sabbia - responsabile di un elevato contenuto di silice in forma cristallina e non amorfa - e che sia bruciato a temperature controllate per ottenere una cenere finissima e senza cristallizzazione della silice. Altri sottoprodotti o scarti, invece, necessitano di essere semplicemente macinati per raggiungere la finezza ottimale.

Pertanto, un primo step necessario è stato proprio quello di raccogliere quante più notizie possibili dallo stato dell'arte, in modo da poter confrontare tra di loro i filler, così da capire più agevolmente le analogie e le differenze tra di essi, ma anche per meglio comprendere come delineare il percorso di ricerca da intraprendere e come approcciare in funzione della tipologia di filler.

Proieguo della ricerca è stato l'ipotesi di nuovi filler di scarto scelti in base alle nozioni che emergono dall'ampio scenario dello stato dell'arte. Lo scopo è stato quello di prevedere l'uso di

filler che non comportassero lavorazioni eccessive e che quindi fossero di immediato impiego. L'obiettivo, infatti, è stato quello di ricercare un filler di scarto che, per essere immesso nelle miscele, necessitasse del minor numero possibile di lavorazioni. A supporto di queste ipotesi, sono state previste delle indagini diagnostiche preventive per confermare la fattibilità del loro impiego nelle malte. Solo a questo punto è stato possibile impiegare il filler nella malta e si è dato il via alla fase di test e sperimentazione.

Pertanto, si è proceduto con la realizzazione di miscele con diverse percentuali di filler. Le malte relative ai vari mix sono state caratterizzate con varie prove di laboratorio in modo da determinarne le proprietà reologiche e le prestazioni. Dall'analisi dei risultati ottenuti si è potuto evincere il quantitativo di polvere pozzolanica che ha consentito di avere delle prestazioni sufficienti.

L'obiettivo ultimo della ricerca, però, è stato quello di andare oltre la sperimentazione e giungere alla definizione di un possibile campo di applicazione della miscela progettata poiché "l'applicabilità" è una caratteristica che necessita di essere valutata e testata poiché deve garantire determinate prestazioni che saranno funzione del suo utilizzo. A tal proposito, è stata definita in partenza la destinazione d'impiego della malta da progettare, ovvero una malta che potesse essere idonea anche per il patrimonio costruito realizzato con malte a base di calce. Questa scelta ha dettato la tipologia di legante da studiare in combinazione con i filler ipotizzati. Lo studio di questo legante abbinato ai filler pozzolanici alternativi non è molto diffuso in letteratura. Infatti, un fattore comune delle sperimentazioni che emergono dallo stato dell'arte fino ad ora analizzato è, quasi sempre, l'impiego dello stesso tipo di legante, ovvero quello cementizio. Questo ambito di ricerca sembra essere molto più fermo sul binomio filler-cemento, escludendo, in tal modo, a priori un possibile vasto campo di applicazione inadatto con questo tipo di legante. È conosciuta, infatti, l'incompatibilità del cemento con i materiali e le tecniche costruttive tradizionali che richiedono l'impiego di calce, per cui una malta cementizia con filler pozzolanici non potrebbe essere impiegata su edifici storici, nella logica dei principi cardine del restauro di compatibilità, reversibilità e minimo intervento. A tal proposito ci si è mossi verso altri leganti come la calce idrata ed è stato studiato il binomio filler-calce. Si è visto che in letteratura i ricercatori hanno progettato dei mix con percentuali di filler in sostituzione o in aggiunta al legante. Siccome la malta oggetto della ricerca deve rispondere anche a criteri di sostenibilità, è stato pensato di sostituire parte del legante con il filler. Quindi, la scelta di andare in sostituzione, invece che in aggiunta al legante, è dettata dal fatto che è più sostenibile ridurre il consumo di calce, invece che quello dell'aggregato, visto che la calce deriva da un processo di produzione soggetto ad emissioni di CO₂, anche se in misura inferiore rispetto al cemento. Oltre che per motivi di sostenibilità, la

scelta di andare in sostituzione al legante è conveniente per poter trarre delle conclusioni in maniera più lineare. Infatti, se da un lato è più vantaggioso aggiungere filler al legante senza ridurlo, dall'altro si potrebbero fare delle considerazioni falsate. Infatti, andare in aggiunta al legante significherebbe incrementare la frazione fine che potrebbe comportare maggiore compattezza e, di riflesso, migliori prestazioni meccaniche indipendentemente dalla pozzolanicità del filler ipotizzato. Se invece viene tolta frazione fine - calce - per sostituirla con altra fine - filler - le prestazioni meccaniche sono scevre da questi condizionamenti. Ancora, anche la scelta del legante impiegato ha alla base una motivazione di convenienza tale da poter stimare dei risultati e fare delle osservazioni in maniera più semplice.

La calce spenta, sia idrata che grassello di calce, è idonea con le tecniche costruttive tradizionali succitate. La calce scelta è quella idrata in polvere perché, a differenza del grassello, consente di avere piena e facile consapevolezza delle quantità impiegate e questo è un vantaggio per chi progetta una malta a base di calce. L'esperienza insegna che con il grassello di calce vengono raggiunte prestazioni migliori rispetto alla calce idrata, ma l'obiettivo preponderante della ricerca è dimostrare la fattibilità di impiego dei filler ipotizzati e in che misura possono essere rapportati al legante.

Capitolo 1

LEGANTI E MALTE

Prima di entrare nel cuore della ricerca, è imprescindibile lo studio di malte e leganti la cui conoscenza è fondamentale per poter intraprendere questo percorso di ricerca. Infatti per comprendere i filler, è dapprima necessaria una conoscenza teorica delle miscele e del loro comportamento. Si illustrano di seguito le principali nozioni in merito a questo argomento.

1.1 Leganti: generalità

I leganti sono materiali da costruzione con proprietà adesive e coesive, dalla granulometria molto fine, derivanti dalla cottura di alcuni tipi di roccia. Se mescolati con acqua formano una pasta che risulta essere plastica e lavorabile grazie alla presenza di acqua libera. Si innesca, quindi, il fenomeno della *presa* per cui, a mano a mano, questa pasta perde la sua plasticità a causa della riduzione di acqua libera, fino a solidificarsi completamente grazie a reazioni chimiche tra acqua e legante che avvengono a seguito dell'idratazione. Il fenomeno di *indurimento* avviene progressivamente nel tempo, durante il quale si sviluppa la resistenza meccanica¹. In particolare, la resistenza a compressione aumenta rapidamente nei primi giorni di indurimento, dopodiché continua ad aumentare, ma in maniera molto più lenta fino a raggiungere il suo massimo valore. Mentre la fase di presa dura, per alcuni leganti, qualche minuto o diverse ore per altri, quella di indurimento si protrae per svariate settimane e, spesso, anche per mesi e anni. In funzione degli elementi che vengono additivati al legante, si possono ottenere diverse tipologie di miscele. Se alla pasta viene aggiunto aggregato fine, si ottiene una malta. Se invece la pasta viene addizionata sia ad aggregato fine che ad aggregato grosso, si ottiene il calcestruzzo

Calcestruzzo			
Malta			Aggregato grosso
Pasta		Aggregato fine	
Acqua	Legante		

Tabella 1: Componenti delle miscele

¹ Si indica con il termine *stagionatura* o *maturazione* l'iter e la procedura volta a favorire il processo di idratazione del legante. Generalmente, sono fattori cardine di una corretta stagionatura l'umidità e la temperatura. Questa procedura risulta essere determinante per valorizzare la resistenza meccanica della miscela e anche la sua durabilità.

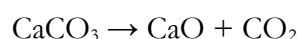
I leganti possono essere differenziati in due tipologie in funzione di come può avvenire l'indurimento ed in particolare si distinguono i leganti aerei e i leganti idraulici.

1.2 Leganti aerei

I leganti vengono detti aerei se fanno presa e induriscono soltanto in presenza di aria. Tra i leganti aerei ricordiamo le calce aeree e il gesso.

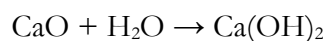
1.2.1 Calce aerea

La calce aerea è il legante più antico e deriva dalla cottura, con fuoco diretto o indiretto, di rocce calcaree tramite forni verticali, denominati “a tino” o “colanti”. Le rocce sono costituite prevalentemente da CaCO_3 , la cui quantità deve essere almeno pari al 95%. La calce ottenuta, quindi, può essere più o meno pura poiché in natura si ritrovano rocce di diversa varietà e purezza². La cottura delle rocce avviene a temperature che oscillano tra i 900 e i 1000 °C e innescando la reazione:



Il prodotto diretto di questa reazione è la cosiddetta *calce viva*, detta anche *calce in zolle*, poiché, mentre l'anidride carbonica CO_2 si disperde nell'ambiente, l'ossido di calcio CaO si presenta in pezzi irregolari di grandezza variabile. In genere la calce viene utilizzata dopo un processo di spegnimento che, mentre in passato veniva effettuato in cantiere, adesso avviene in appositi impianti che garantiscono una standardizzazione del processo e, di conseguenza, una costanza e regolarità della qualità del prodotto.

Grazie allo spegnimento della calce, l'ossido di calcio CaO derivante dalla precedente reazione, reagisce con l'acqua H_2O dando luogo all'idrossido di calcio Ca(OH)_2 secondo la reazione:



Lo spegnimento della calce può avvenire in due modi.

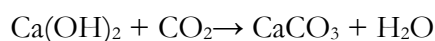
1. Spegnimento con acqua superiore a quella stechiometricamente necessaria, durante il quale viene sviluppato molto calore per cui una parte dell'acqua evapora e la reazione continua grazie al vapore che si genera nell'ambiente chiuso. L'idratazione comporta un

² In genere, l'impurezza che maggiormente si riscontra è il carbonato di magnesio MgCO_3 e le argille.

aumento di volume dei granuli per cui la zolla si disgrega generando una polvere molto fine chiamata *calce idrata in polvere*.

2. Spegnimento con eccesso di acqua la quale viene aggiunta gradualmente per cui anche in questo caso si ha una disgregazione delle zolle grazie al processo di idratazione, però il quantitativo di acqua in tal caso è almeno il doppio. Si ottiene in tal modo una pasta plastica e untuosa detta *grassello di calce*, la cui porzione superficiale, una volta filtrata da eventuali impurità, è la più pregiata.

Dopo il processo di spegnimento, la calce spenta si asciuga. L'idrossido di calcio Ca(OH)_2 reagisce con l'anidride carbonica CO_2 per cui si innesca il fenomeno della carbonatazione che dà luogo nuovamente alla formazione di carbonato di calcio CaCO_3 .



Si nota che il composto finale ha la stessa composizione chimica della roccia da cui deriva la calce.

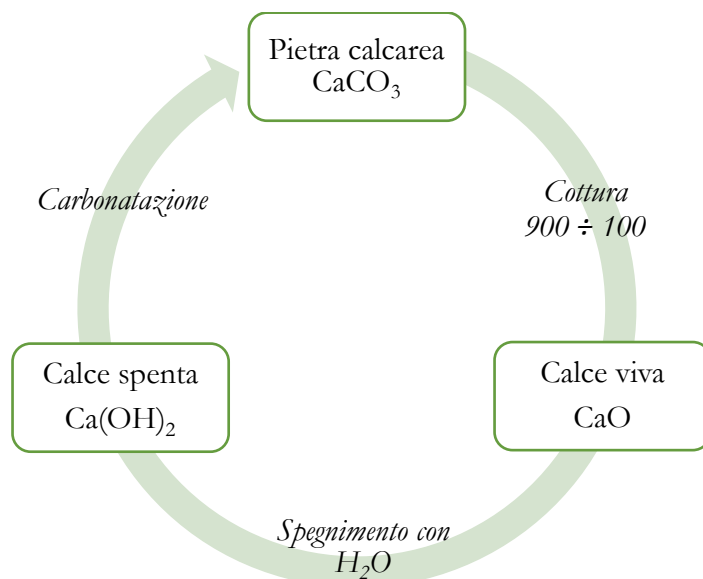


Figura 1: Ciclo della calce

A volte succede che il processo di spegnimento non è completo anche durante la posa in opera della miscela. Questo implica che la calce viva completa la sua idratazione una volta messa in opera comportando un sollevamento e conseguente distacco della malta indurita poiché i granelli di calce aumentano di volume a causa dell'idratazione. Ne sono un esempio i calcinaroli tipici negli intonaci a base di calce aerea che non è perfettamente spenta.

In virtù della UNI EN 459-1, le calce aeree vengono classificate in base al loro contenuto di ossido di calcio CaO e ossido di magnesio MgO.

Tipi di calce da costruzione^{a)}

Designazione	Sigla
Calce calcica 90	CL 90
Calce calcica 80	CL 80
Calce calcica 70	CL 70
Calci dolomitiche 85	DL 85
Calci dolomitiche 80	DL 80
Calce idraulica 2	HL 2
Calce idraulica 3,5	HL 3,5
Calce idraulica 5	HL 5
Calce idraulica naturale 2	NHL 2
Calce idraulica naturale 3,5	NHL 3,5
Calce idraulica naturale 5	NHL 5

a) Inoltre, le calce aeree sono classificate in base alle loro condizioni di consegna: come calce viva (Q) o calce spenta (S). Nel caso particolare di calci dolomitiche idrate, il grado di idratazione è definito come segue: S1, semi-idrate; S2, completamente idrate.

Figura 2: Prospetto 1 della UNI EN 459-1

Requisiti chimici della calce^{a)}

	Tipo di calce da costruzione	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Calce libera
1	CL 90	≥90	≤5 ^{c)}	≤4	≤2	-
2	CL 80	≥80	≤5 ^{c)}	≤7	≤2	-
3	CL 70	≥70	≤5	≤12	≤2	-
4	DL 85	≥85	≥30	≤7	≤2	-
5	DL 80	≥80	≥5	≤7	≤2	-
6	HL 2	-	-	-	≤3 ^{b)}	≥8
7	HL 3,5	-	-	-	≤3 ^{b)}	≥6
8	HL 5	-	-	-	≤3 ^{b)}	≥3
9	NHL 2	-	-	-	≤3 ^{b)}	≥15
10	NHL 3,5	-	-	-	≤3 ^{b)}	≥9
11	NHL 5	-	-	-	≤3 ^{b)}	≥3

Nota. I valori sono applicabili a tutti i tipi di calce. Per la calce viva questi valori corrispondono al prodotto finito; per tutti gli altri tipi di calce (calce idrata, grassello e calci idrauliche) i valori sono basati sul prodotto dopo la sottrazione del suo contenuto di acqua libera e di acqua legata.

a) Valori espressi come percentuale in massa.

b) È ammesso un contenuto di SO₃ maggiore del 3% e fino al 7% purché sia accertata la stabilità, dopo 28 giorni di maturazione in acqua, utilizzando la prova indicata nella EN 196-2.

c) È ammesso un contenuto di MgO fino al 7% se si supera la prova di stabilità indicata in 5.3 della EN 459-2:2001.

Figura 3: Prospetto 2 della UNI EN 459-1

In particolare, nella fase di sperimentazione del percorso di dottorato, come specificato nel paragrafo §4.1, è stata impiegata una calce aerea definita dalla norma UNI EN 459-1 come CL 90, dove:

- CL sta per Calcic Lime, ossia una calce costituita da ossido o idrossido di calcio³;
- 90 indica la percentuale minima di ossidi $\text{CaO} + \text{MgO}$ di cui meno del 5% di magnesio e meno del 4% di carbonati⁴.

1.2.2 Gesso

Il gesso d'opera deriva dalla macinazione e conseguente cottura della cosiddetta pietra di gesso⁵ composta prevalentemente da solfato di calcio bi-idrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e varie impurezze come quarzo, ossidi di ferro, silicati e alluminati. La polvere ottenuta può essere cotta sia a 130° ottenendo il gesso emidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) e sia a 180°C ottenendo l'anidrite solubile (CaSO_4). L'emidrato e l'anidrite solubile, se vengono miscelati con l'acqua, reintegrano una parte di questa che è andata persa durante la cottura. Si ottiene, quindi, una pasta che fa presa rapidamente e al termine di questa fase, ha recuperato il grado di idratazione iniziale. Infatti il processo di idratazione termina quando tutto l'emidrato e tutto l'anidrite solubile si trasformano in gesso bi-idrato. L'acqua necessaria per il processo di idratazione varia in funzione dell'elemento che andiamo a mescolare⁶. È infatti intuibile che l'acqua necessaria per l'emidrato è inferiore rispetto a quella necessaria per l'anidrite solubile. Ne consegue un rapporto acqua/legante differente e, nello specifico, risulta più basso nel caso dell'emidrato, a parità di consistenza. Ciò influisce notevolmente sulla resistenza meccanica che risulta nettamente migliore nelle miscele composte con gesso emidrato.

1.3 Leganti idraulici

I leganti vengono detti idraulici se fanno presa e induriscono sia all'aria e sia se immersi in acqua. Tra i leganti idraulici si rammentano le calce idrauliche e i cementi.

³ Normativa UNI EN 459-1, paragrafo 3.6

⁴ Normativa UNI EN 459-1, paragrafo 4, prospetto 2.

⁵ Roccia sedimentaria di deposito chimico.

⁶ La percentuale di acqua necessaria in peso dell'emidrato è pari al 18,7% a differenza di quella necessaria per l'anidrite solubile che risulta pari al 24%. Queste quantità d'acqua sono state valutate per ottenere la completa idratazione. Informazione tratta da L. Bertolini, "Materiali da costruzione, Volume I - Struttura, proprietà e tecnologie di produzione", Parte III, Cap. 7, § 7.6.1., Città Studi edizioni, 2010.

1.3.1 Calce idraulica

A differenza della calce aerea, la calce idraulica fa presa e indurisce non solo all'aria, ma anche quando è immersa in acqua. Questo comporta notevoli vantaggi perché la caratteristica di idraulicità consente alle miscele di indurire regolarmente anche in zone dove non c'è un'adeguata condizione che garantisce il fenomeno della carbonatazione, come ad esempio nel nucleo centrale del getto o della miscela posata in opera. L'idraulicità di una calce dipende della quantità di argilla contenuta nella roccia calcarea in quanto è proprio nell'argilla che sono contenuti i principali ossidi come SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 responsabili della reazione pozzolanica. Pertanto, è stato definito come indice di idraulicità i il seguente rapporto:

$$i = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO}}$$

Esistono varie tipologie di calci idrauliche

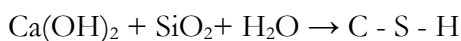
- calci idrauliche in senso stretto, derivanti dalla calcinazione delle marne⁷ o da miscele di calcare e argilla, sono quindi calci idrauliche naturali;
- calci idrauliche artificiali che sono quelle che attualmente si vendono in commercio;
- calce aerea spenta con l'aggiunta di materiale pozzolanico come pozzolana naturale o pozzolana artificiale.

Nel primo caso, i leganti derivano dalla cottura a 900 °C di calcari marnosi o di miscele di calcare e argilla come esplicito precedentemente. A causa delle elevate temperature si ha una dissociazione degli elementi per cui la silice e l'allumina che derivano dalla dissociazione dell'argilla, reagiscono con l'ossido di calcio CaO . Se viene aggiunta l'acqua stechiometricamente necessaria, l'ossido di calcio CaO si trasforma in idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ che reagisce con il silicato bicalcico e l'alluminato di calcio. Per cui si formano i silicati idrati di calcio C - S - H e gli alluminati idrati di calcio C - A - H.

In realtà, oggi sono preponderanti le miscele di cemento Portland e filler perlopiù calcarei che vanno a chiudere la porosità incrementando la resistenza meccanica. A questi vengono aggiunti anche additivi di vario genere per migliorarne le caratteristiche. Ad esempio, per migliorare la lavorabilità possono essere impiegati additivi aeranti che incrementano la lavorabilità grazie alla presenza delle bollicine, ma anche metilcellulose modificate, e/o amidi con funzioni tixotropizzanti, nonché piccole percentuali di idrorepellenti. Ancora, per ridurre il quantitativo

⁷ Le marne sono rocce sedimentarie composte generalmente da carbonato di calcio CaCO_3 a cui si aggiunge un'aliquota argillosa. Sono proprio i componenti dell'argilla a conferire la caratteristica di idraulicità alla miscela.

d'acqua, possono essere impiegati anche gli additivi superfluidificante. Quindi, a seconda della prestazione che si desidera migliorare, possono essere impiegate diverse tipologie di additivi. Infine, nel terzo caso, l'idrossido di calcio Ca(OH)_2 della calce spenta reagisce con la pozzolana naturale o artificiale, innescando la cosiddetta *reazione pozzolanica*, per cui:



Si ha, quindi, che la silice reattiva contenuta nella pozzolana (naturale o artificiale) e l'idrossido di calce reagiscono grazie alla presenza di acqua, formando i silicati di calcio idrati denominati anche come gel C - S - H. Questo si presenta come lamelle sottili dell'ordine del nanometro ed è responsabile della resistenza meccanica della miscela.

D'altronde le eccellenti proprietà della pozzolana sono state esplicitate anche da Vitruvio nel suo trattato *De Architectura*:

*“Evvi una specie di polvere che fa effetti naturali meravigliosi. Si trova n' contorni di Baja, e ne'territorj de' municipj, che sono intorno al Vesuvio; mescolata in somma di calcina e pietre, fa gagliarda non solo ogni specie di fabbrica, ma particolarmente quelle, che si fanno in mare sotto acqua.”*⁸

In virtù della UNI EN 459-1, le calce idrauliche vengono classificate in calce idrauliche naturali NHL e calce idrauliche HL. Le calce idrauliche NHL si distinguono in:

- *“calce idrauliche naturali: Calce prodotte dalla cottura di calcari più o meno argillosi o silicei, con successiva riduzione in polvere mediante spegnimento con o senza macinazione. Tutte le NHL hanno la proprietà di far presa e indurire sotto l'acqua. L'anidride carbonica atmosferica contribuisce al processo di indurimento”*⁹
- *“calce idrauliche naturali con materiali aggiunti (Z): Per le NHL vedere 3.10.1. I prodotti speciali che possono contenere aggiunte di idonei materiali pozzolanici o idraulici, fino al 20% in massa, sono contrassegnati con l'aggiunta di Z”*¹⁰

Le calce idrauliche HL, invece, sono *“calce costituite prevalentemente da idrossido di calcio, silicati di calcio e alluminati di calcio prodotti mediante miscelazione di materiali appropriati. Queste calce possiedono la proprietà di far presa e indurire sotto l'acqua. L'anidride carbonica atmosferica contribuisce al processo di indurimento”*.¹¹

⁸ Marco Vitruvio Pollione, *“De Architectura”*, traduzione del Marchese Berardo Galiani, Libro II, Capitolo VI.

⁹ Definizione §3.10.1 della UNI EN 459-1

¹⁰ Definizione §3.10.2 della UNI EN 459-1

¹¹ Definizione §3.11 della UNI EN 459-1

Uno degli obiettivi della ricerca è quello di progettare una malta a base di calce aerea idraulicizzata dall'aggiunta di filler attivi ipotizzati durante il percorso di dottorato. I risultati raggiunti sono illustrati nei capitoli 5 e 6 relativi alla sperimentazione. Vengono valutate le prestazioni di varie miscele di malta in conformità dalla norma di prodotto UNI EN 998-1, evidenziando il mix in cui gli effetti benefici del fenomeno di idraulicizzazione sono più evidenti.

1.3.2 Cemento

Il cemento è un legante idraulico, ottenuto dalla cottura di una miscela di calcare ed argilla, o di calcare marnoso. Esistono varie tipologie di cementi, classificati in conformità con la UNI EN 197-1 come segue:

- Cemento Portland (Tipo I);
- Cemento Portland con aggiunte (Tipo II);
- Cemento d'Altoforno (Tipo III);
- Cemento Pozzolanico (Tipo IV);
- Cemento composito (Tipo V).

Il cemento Portland è la base da cui derivano molte tipologie di cemento e si ottiene con la macinazione del clinker a cui viene aggiunta una piccola quantità di gesso¹² per regolare la presa. In particolare, il cemento di tipo I è costituito da almeno il 95% di clinker e la rimanente percentuale da costituenti secondari come ad esempio filler o altri materiali. Il clinker si ottiene dalla cottura a 1450 °C di una miscela calcarea - quindi costituita prevalentemente da CaCO_3 - e argilla (silicati idrati di alluminio $x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$), preventivamente macinata. A seguito della cottura, il risultato finale sono dei granuli detti clinker che hanno dimensioni variabili dall'ordine del millimetro fino a quella del centimetro.

Per produrre il cemento d'altoforno, viene impiegato il cemento Portland precedentemente descritto, a cui viene aggiunta la loppa basica d'altoforno, che è un sottoprodotto della lavorazione della ghisa con proprietà idrauliche. Per la UNI EN 197-1 il contenuto di loppa nel cemento di tipo III varia tra il 36 e il 95%.

Se, invece, al cemento Portland vengono aggiunti materiali pozzolanici, allora si ottiene il cemento pozzolanico. La differenza tra il cemento d'altoforno e quello pozzolanico risiede proprio nel differente comportamento dell'aggiunta in questione. Infatti, mentre la loppa d'altoforno si comporta come un vero e proprio legante, per cui se mescolata con acqua fa presa e indurisce, la pozzolana necessita di un'elevata quantità di idrossido di calcio con cui reagire. Per

¹² Circa il 5% in massa.

la UNI EN 197-1 il contenuto di materiale pozzolanico nel cemento di tipo IV varia tra il 11 e il 55%.

Il cemento composito di tipo V, invece, è ottenuto con l'aggiunta sia di loppa d'altoforno che di pozzolana.

Infine, i cementi di tipo II sono costituiti da cemento Portland con piccole aggiunte di loppa, pozzolana, calcare, ecc. e possono essere chiamati cementi portland alla loppa (II/A-S e II/B-S), al fumo di silice (II/A-D), alla pozzolana (II/A-P, II/B-P, II/A-Q e II/B-Q), alle ceneri volanti (II/A-V, II/B-V, II/A-W e II/B-W), al calcare (II/A-L e II/B-L), composito (II/A-M e II/B-M). Ogni tipo di cemento viene siglato affinché se ne individui la tipologia e in particolare vengono contraddistinti con "CEM" seguito da un numero romano e da lettere che sono identificativi del tipo e del sottotipo di cemento e da un numero che indica la classe di resistenza.

Le classi di resistenza sono tre:

- 32,5
- 42,5
- 52,5

Questi valori rappresentano i corrispondenti carichi di rottura N/mm^2 a compressione a 28 giorni di stagionatura, valutata su provini di malta preparati con un rapporto a/c pari a 0,5 e un rapporto sabbia/cemento pari a 3, in conformità con la UNI EN 196-1. Ciascuna classe di resistenza si divide in due sottoclassi:

- N per i cementi normali;
- R cementi ad indurimento rapido.

1.4 Malte

La malta è un impasto che si ottiene mediante la miscelazione di:

$$\text{legante} + \text{acqua} + \text{aggregato fine}$$

ed eventualmente anche di additivi. La granulometria dell'aggregato fine dipende dalla destinazione d'uso della malta e quindi dallo spessore che questa deve avere. Ad esempio, se si vuole un rasante per finiture, essendo uno strato più superficiale che deve essere liscio e sottile, è preferibile avere aggregati il cui diametro non superino il millimetro visto che lo strato di applicazione stesso sarà dell'ordine qualche millimetro, quindi si deve avere un assortimento granulometrico quanto più fine possibile. Mentre, al contrario, se si vuole una malta da rinzafo, il

cui spessore è dell'ordine di 2-3 cm, l'assortimento granulometrico può spingersi fino a 3 millimetri.

Le malte possono essere classificate in funzione del legante impiegato. Le malte che sono composte da leganti aerei vengono dette, appunto, malte aeree e sono capaci di far presa e indurire soltanto all'aria. Queste possono essere:

- malte di calce spenta;
- malte di gesso.

Invece, le malte che sono capaci di far presa e indurire anche in acqua, sono dette malte idrauliche e sono composte da leganti idraulici. Distinguiamo, quindi:

- malte di calce idraulica;
- malte cementizie.

Se la malta è confezionata con leganti diversi, si dice che la malta è composta o bastarda. Fondamentale è il rapporto che c'è tra il legante e l'aggregato, documentato già da Vitruvio nel suo trattato *De Architectura*:

*"...spenta che sarà, si stempera la calcina con 3 di rena se questa sarà di cava, ma con 2, se di fiume o di mare, essendo quella la giusta porzione".*¹³

1.4.1 Aggregati

Gli aggregati sono sostanze minerali impiegati, insieme ad acqua e legante, per la produzione di miscele come malte e calcestruzzi, dei quali ne rappresentano lo scheletro e possono essere naturali, artificiali o riciclati. In particolare, le malte sono composte dal cosiddetto aggregato fine. Infatti è fondamentale la suddivisione degli aggregati in base alla dimensione: gli aggregati, per essere classificati come fini, devono passare per almeno il 95% per un setaccio di maglia 4 mm.¹⁴ Oltre a distinguersi per la dimensione, gli aggregati si differenziano anche per la forma che influenza il grado di riempimento e la lavorabilità della miscela. Possono distinguersi varie forme: sferica, allungata, piatta, spigolosa ecc. Quanto più il granulo tende ad essere sferico, più aumenta il grado di riempimento e la lavorabilità a parità di acqua. Gli aggregati piatti e allungati possono opporsi all'eliminazione delle bolle d'aria e, al contempo, indurre dei benefici sulla resistenza a flessione. Infine, quelli spigolosi, invece, possono apportare benefici in termini di resistenza a trazione a causa della maggiore aderenza alla pasta.

¹³ Marco Vitruvio Pollione, *"De Architectura"*, traduzione del Marchese Berardo Galiani, Libro II, Capitolo V.

¹⁴ L. Bertolini, "Materiali da costruzione, Volume I - Struttura, proprietà e tecnologie di produzione", Parte III, Cap. 8; §8.1., Città Studi edizioni, 2010

In funzione della natura dell'aggregato, i granuli possono essere caratterizzati da una percentuale di porosità variabile che può oscillare dal 2% per le rocce ignee intrusive, fino al 40% per le rocce calcaree o vulcaniche. La porosità è una caratteristica cardine in quanto da questa dipendono sia l'assorbimento d'acqua dell'aggregato e sia le sue proprietà meccaniche¹⁵.

Un'attenzione particolare va rivolta alle sabbie naturali in quanto sono state oggetto di sperimentazione in questo percorso di ricerca. Queste possono essere distinte in sabbie di frantoio o naturali: Le prime si presentano con spigoli più vivi che rendono l'impasto meno lavorabile, mentre quelle di fiume sono più arrotondate. Inoltre nelle sabbie di frantoio si riscontra un'elevata presenza di polveri, a causa del processo di frantumazione, che non consente una corretta aderenza della sabbia con la pasta stessa. Per ovviare a questo problema è opportuno un preventivo lavaggio.

In genere non viene impiegata la sabbia di mare poiché al suo interno sono presenti sali che possono portare a delle efflorescenze o influenzare negativamente le armature metalliche, per cui dovrebbero essere soggette ad un preventivo, accurato e costoso lavaggio.

1.4.2 Filler

Il filler è un aggregato caratterizzato da una dimensione dei granelli ridottissima infatti è definito come:

*“Aggregato, la gran parte del quale passa allo staccio con maglie da 0,063 mm e che può essere aggiunto a materiali da costruzione per conferire determinate proprietà.”*¹⁶

Possono differenziarsi in funzione del comportamento e della provenienza. In funzione del comportamento distinguiamo i filler passivi e attivi. Quelli passivi sono materiali inerti finissimi che vengono impiegati nelle miscele per ridurre la porosità, data la loro granulometria estremamente piccola. Ne consegue che il loro scopo cardine è quello di fornire maggiore compattezza. Sono inerti quindi non sviluppano reazioni chimiche. I filler attivi, invece, sono quelli che sviluppano la reazione pozzolanica (si veda §1.3.1) per cui hanno la capacità di reagire con l'idrossido di calcio e rendere il composto idraulico. La reazione conferisce maggiore stabilità alla miscela e incrementa le prestazioni meccaniche.

Per quanto concerne la provenienza, si distinguono in naturali e artificiali in quanto derivanti da sottoprodotti o scarti di lavorazioni.

¹⁵ Come resistenza a compressione, all'urto, all'abrasione, il modulo elastico e durezza.

¹⁶ Definizione riportata al paragrafo 3.6 della UNI EN 1097-7.

Il filler naturale per eccellenza è la pozzolana, mentre per quanto riguarda quelli artificiali, si riscontrano aggiunte minerali già ampiamente utilizzate nella sfera del costruito, come ad esempio fumo di silice, cenere volante e loppa d'altoforno.

L'impiego di filler di riciclo consente dei vantaggi sostenibili in termini di riduzione di materiale prelevato dalle cave e di emissioni di CO₂ in quanto sono materiali che, invece di essere smaltiti, trovano nuova vita nei materiali da costruzione.

In virtù di questi benefici di sostenibilità, una porzione di ricercatori sta valutando ulteriori alternative sostenibili a questi materiali di scarto, in quanto il prelievo di materiale dalle cave non ha riscontrato una riduzione tangibile ed è evidente la necessità di ridurre emissioni inquinanti.

In linea con questo filone è il percorso di ricerca intrapreso. Infatti, uno degli obiettivi prefissati è proprio quello di ipotizzare dei nuovi filler attivi, dimostrare la loro fattibilità di impiego (paragrafo §4.3) e di valutare in che misura sono stati rapportati al legante (capitoli 5 e 6).

1.5 Riferimenti

L. Bertolini, “Materiali da costruzione, Volume I - Struttura, proprietà e tecnologie di produzione”, Parte III, Città Studi edizioni, 2010

REGIO DECRETO 16 novembre 1939-XVIII, n. 2228

F. Fascia, R. Iovino, “La struttura in cemento armato per l'architettura – Tecnica e tecnologia”, ARACNE editrice s.r.l., Roma, 2008, ISBN 978–88–548–1913–9

Marco Vitruvio Pollione, “*De Architectura*”, traduzione del Marchese Berardo Galiani

UNI EN 197-1 “Cemento. Composizioni. Specificazioni. Criteri di conformità. Cementi comuni”

UNI EN 196-1 “Determinazione delle resistenze meccaniche”

UNI EN 459-1 “Calci da costruzione - Definizioni, specifiche e criteri di conformità”

UNI EN 13139 “Aggregati per malta”

UNI 11471 “Valutazione della pozzolanicità di un materiale”

Capitolo 2

I FILLER POZZOLANICI: STATO DELL'ARTE

Prima di ipotizzare l'uso di filler a comportamento pozzolanico, è stato opportuno studiare i filler artificiali alternativi alla pozzolana naturale. Quest'ultima, come spiegato nel capitolo 1, è responsabile della cosiddetta *reazione pozzolanica*, per cui la silice reattiva e l'idrossido di calce reagiscono grazie alla presenza di acqua, formando i silicati di calcio idrati denominati anche gel C - S - H. Questo si presenta come lamelle sottili dell'ordine del nanometro ed è responsabile della resistenza meccanica della miscela.

In letteratura sono stati riscontrati vari filler a comportamento pozzolanico e di diverse derivazioni (industriale, agricola, rifiuti solidi). Tuttora la maggior parte di questi non trova ancora un riscontro pratico diffuso.

Inoltre, questo ambito di ricerca sembra essere più proiettato sullo studio del binomio filler-cemento, escludendo, in tal modo, a priori un possibile vasto campo di applicazione inadatto con questo tipo di legante. La maggior parte delle sperimentazioni analizzate, infatti, impiega come legante il cemento.

Nonostante la maggior parte degli articoli studiati preveda alla base delle sperimentazioni l'impiego del cemento, è stato, comunque, necessario analizzarle e raccogliere le varie informazioni inerenti ad ogni filler studiato per comprenderne le caratteristiche, ma soprattutto per capire che approccio implementare in fase di sperimentazione.

Di seguito si descrivono i filler studiati che sono:

- il filler che deriva dalla bagassa di canna da zucchero, denominato in letteratura come *Sugarcane Bagasse Ash*;
- il filler che deriva dalla lolla di riso, denominato in letteratura come *Rice Husk Ash*;
- il filler che deriva dalla segatura, denominato in letteratura come *Saw Dust Ash*;
- il filler che deriva dalla produzione di olio di palma, denominato in letteratura come *Oil Fuel Ash*;
- il filler formato da polvere di vetro, denominato in letteratura come *Waste Glass Ash*;
- il filler che deriva dalla paglia di grano, denominato in letteratura come *Wheat Straw Ash*;
- il filler che deriva dai fanghi delle cartiere, denominato in letteratura come *Waste Paper Sludge Ash*.

I filler citati sono stati studiati e analizzati in varie sperimentazioni che prevedevano il loro impiego in sostituzione o in aggiunta al legante. Per alcuni, la valutazione delle prestazioni è stata più spinta perché maggiormente sperimentati, per altri meno.

2.1 Sugarcane Bagasse Ash (SCBA)

Il filler derivante dalla bagassa della canna da zucchero è il sottoprodotto principale dell'industria dell'alcool e dello zucchero. Quella della canna da zucchero è una delle più grandi colture al mondo, estendendosi su circa 25 milioni di ettari, in oltre 90 paesi, con una raccolta mondiale di 1,75 miliardi di tonnellate. Si deduce che sussiste una grande produzione di bagassa di canna da zucchero in tutto il mondo, per cui risultano significative e determinanti strade alternative per lo smaltimento di questo materiale.

In generale, la canna da zucchero fresca viene tritata in modo da estrarre il succo della canna. La bagassa non è altro che la materia fibrosa rimanente in seguito al processo di estrazione ed è circa il 30 - 50% della canna da zucchero. La bagassa viene utilizzata dalle stesse fabbriche come combustibile nel processo di cogenerazione per produrre vapore ed elettricità in modo che lo zuccherificio sia autosufficiente dal punto di vista energetico. Subisce quindi un processo di combustione che la trasforma in cenere. In seguito, questo sottoprodotto viene generalmente impiegato come fertilizzante, ma in realtà non risulta essere particolarmente idoneo per assolvere questo compito a causa del suo alto contenuto di silice e della mancanza di sostanze nutritive.

La cenere di bagassa di canna da zucchero (SCBA) rappresenta all'incirca solo il 3 - 4% del prodotto iniziale, si deduce quindi un rendimento molto basso che ne rende improbabile la produzione su larga scala. Infatti da una tonnellata di bagassa di canna da zucchero, si possono generare tra i 25 e i 40 kg di cenere di bagassa.

La SCBA presenta silice sia in forma amorfa che cristallina (quarzo e cristobalite) e, in generale, la quantità di contenuto di silice varia in funzione dell'ambiente circostante, della natura del suolo, del periodo di raccolta e del processo in questione. La presenza di silice in forma amorfa è dovuta al fatto che le piante assorbono acido ortosilicico, proveniente dalle acque sotterranee, che viene poi polimerizzato come silice amorfa la quale diventa reattiva in seguito al processo di combustione. La presenza di silice in forma di cristobalite, invece, è attribuibile alle alte temperature e alle lunghe durate del processo di incenerimento. La presenza di quarzo, invece, può provenire anche dalla sabbia del terreno che aderisce alla canna da zucchero quando questa viene raccolta. In realtà la quantità di sabbia che aderisce alla canna da zucchero è piccola, infatti rappresenta solo circa il 2% in peso del materiale che viene lavorato, ma con la perdita di frazione organica durante la combustione della bagassa, il rapporto tra la massa di sabbia e la massa totale

di SCBA aumenta in modo significativo e si può raggiungere anche una quantità di quarzo di quasi il 60% della silice totale contenuta nel filler. Quando il contenuto di silice sotto forma di quarzo è relativamente elevato, la cenere potrebbe ancora essere utilizzata nei materiali da costruzione come sostituto della sabbia¹⁷.

Grazie all'elevata quantità di silice amorfa e allumina amorfa (componenti essenziali della reazione pozzolanica con l'idrossido di calcio), la SCBA può essere usata come materiale pozzolanico. Molti studi hanno dimostrato, però, che la polvere grezza derivante dalla bagassa della canna da zucchero ha in genere una bassa attività pozzolanica¹⁸ che non supera i minimi standard richiesti, poiché il processo di combustione avviene con temperature alte ed incontrollate. Se grezza, questa polvere potrebbe essere caratterizzata da un'alta perdita alla combustione, dovuta alla presenza di particelle fibrose di carbonio incombusto, e da una grandezza media delle particelle che non consente di avere un'ampia superficie specifica¹⁹.

È noto che l'attività pozzolanica della SCBA dipende essenzialmente dalla presenza di silice in forma amorfa, dall'elevata superficie specifica e dal basso contenuto di carbonio. Questi requisiti sono in contrasto con le caratteristiche della polvere grezza che in genere risulta eterogenea, con particelle di grandi dimensioni e con un alto contenuto di carbonio. Pertanto, affinché la polvere di bagassa della canna da zucchero abbia un'efficace attività pozzolanica, è indispensabile intervenire sul processo produttivo ed aggiungere ulteriori lavorazioni in seguito alla sua produzione. È importante, quindi, che le ceneri derivino da un processo di produzione con temperatura di combustione controllata, determinante per la composizione chimica, e che siano soggette ad una successiva macinazione per ridurre la grandezza media delle particelle in modo da incrementarne la superficie specifica e, di conseguenza, la superficie reattiva. Si deduce che maggiore è il tempo di macinazione, migliore risulterà l'attività pozzolanica. D'altro canto è inutile prolungare in maniera notevole i tempi di macinazione poiché le particelle con dimensioni molto piccole sono naturalmente più resistenti e tendono a deformarsi plasticamente anziché rompersi

¹⁷ G. Sua-iam and N. Makul, "Use of High Volume, Untreated Bagasse Ash as a Fine Aggregate Substitute for Preparing Self-Compacting Concrete," *Research and development journal*, vol. 24, no. 3, pp 8–15, 2013.

¹⁸ G. C. Cordeiro et al., 2009, hanno condotto una sperimentazione che ha valutato la SCBA come additivo pozzolanico nel calcestruzzo. La polvere di bagassa di canna da zucchero ricevuta per realizzare i provini aveva un indice di attività pozzolanica iniziale di solo il 49%, rendendo necessarie ulteriori azioni per il suo incremento (G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares, and E. de M. R. Fairbairn, "Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 2, pp. 110–115, 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.11.005).

¹⁹ È stato riscontrato un valore della dimensione della particella D_{50} di circa 100 μm , che, ad esempio, è molto maggiore rispetto a quella del cemento portland come riscontrato in Tabella 1, pagina 3 dell'articolo "Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste," *J. Clean. Prod.*, vol. 57, pp. 308–319, 2013, di G. Sua-Iam and N. Makul, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.06.009.

in dimensioni inferiori²⁰.

La quantità della silice in forma cristallina e/o amorfa nella SCBA varia in funzione del processo di combustione a cui è sottoposta, ma raramente si ha un controllo sulla temperatura di combustione e sul tipo di raffreddamento delle ceneri. Alcuni studi hanno dimostrato che le ceneri prodotte con una temperatura di combustione compresa tra 400 e 500 °C presentano silice in forma amorfa. Invece, se la temperatura di combustione è superiore ai 600 °C le ceneri presentano un inizio di cristallizzazione dei fosfati. Temperature di 800 °C sono causa della cristallizzazione della silice come cristobalite. Nonostante la cenere prodotta a 400 °C presenti silice in forma amorfa, questa ha una ridotta attività pozzolanica dovuta all'elevato contenuto di carbonio nel campione. Questo perché ci sono molte particelle incombuste, generalmente molto ruvide, il cui componente principale è il carbonio non bruciato anziché il silicio. Si deduce che la temperatura di combustione più idonea per ottenere un filler pozzolanico è di circa 600 °C in modo da ridurre al minimo le particelle fibrose e principi di cristallizzazione della silice. Quindi, se generata sotto determinate condizioni, la cenere di bagassa della canna da zucchero è caratterizzata da un elevato contenuto di SiO₂ in forma amorfa e in letteratura si riscontrano in genere valori ricadenti nell'intervallo tra il 60 e il 75% della silice totale. Infatti, la composizione chimica della polvere di bagassa di canna da zucchero è stata analizzata nell'ambito di vari studi con analisi di diffrazione a raggi X le quali hanno evidenziato la presenza di silice amorfa, riscontrata nell'intervallo 2θ tra 20° e 25°, e la presenza di piccole quantità di fasi cristalline come quarzo e cristobalite. Sono stati inoltre riscontrati CaO, K₂O e altri ossidi minori tra cui Al₂O₃, Fe₂O₃ e SO₃.

La composizione e le proprietà fisiche di SCBA variano, oltre che con la temperatura e la durata del processo di combustione, anche con molti altri fattori come la varietà della canna da zucchero e la sua crescita, purezza della bagassa, tipologia di raffreddamento, luogo e metodo di raccolta della cenere di bagassa, tipologia di caldaia. Ad esempio, se la cenere di bagassa venisse raccolta direttamente dal fondo della caldaia potrebbe mostrarsi più ruvida e con particelle irregolari a causa dell'elevato contenuto di carbonio, mentre se venisse raccolta attraverso un sistema di filtrazione potrebbe contenere meno carbonio.

Il contenuto di carbonio è un'informazione che può essere nota anche dall'aspetto della polvere di bagassa della canna da zucchero, il cui colore può variare in una scala cromatica che va da nero fino a grigio chiaro.

Se il filler mostra un colore tendente al nero, il contenuto di carbonio è elevato a causa della

²⁰ G. C. Cordeiro et al., nel 2010 hanno appurato che dopo 60 minuti di macinazione con mulino vibrante, non si è avuta alcuna riduzione significativa delle particelle poiché il macchinario non era abbastanza efficiente per macinare la cenere in modo che le dimensioni fossero inferiori a 0,3 μm.

combustione incompleta. Invece, se la polvere appare grigia, significa che è avvenuta la cristallizzazione della silice e la decomposizione a causa delle elevate temperature, di circa 800 °C, e addirittura appare bianca per temperature al di sopra di 900 °C.

Siccome in genere la SCBA proveniente da centrali elettriche viene prodotta a temperature e durate incontrollate, risulta essere composta da particelle di colore eterogeneo e morfologia differente. Quindi, le caratteristiche fisiche, come il peso specifico e la superficie specifica, variano soprattutto in funzione della temperatura di combustione. Infatti, a causa della presenza di particelle di carbonio che sono leggere, fibrose e porose, la SCBA grezza presenta una superficie specifica e una densità relativa molto basse.

Da uno studio di Cordeiro et al. nel 2010²¹, è emerso che dopo la combustione a 600 °C, la cenere ha mostrato una sezione media di circa 11 µm, con una bassa percentuale (8,27%) di cenere trattenuta dal setaccio con maglia di 45 µm, una densità di circa 2500 kg/m³ ed una superficie specifica di circa 12000 m²/kg, molto simile alla polvere di buccia di riso. Dopo la combustione, però, affinché venga raggiunto almeno l'indice di pozzolanicità minimo suggerito dallo standard di riferimento brasiliano NBR 12653 del 75%, si dovrebbe prevedere una successiva macinazione in modo da incrementarne la superficie specifica.

È stato inoltre dimostrato, da uno studio di M. M. N. S. Soares et al., nel 2014²², che durante la combustione della polvere anche il flusso d'aria forzato svolge un ruolo importante sia per la morfologia delle particelle che per il contenuto di materia organica. In particolare è stato osservato che la condizione migliore di combustione è con temperatura di 600 °C e aria forzata poiché tale condizione permette di avere un picco di distribuzione della dimensione delle particelle nell'intervallo di 40-80 µm, come nelle altre condizioni di combustione, e un ulteriore picco di distribuzione intorno ai 15 µm. Questo picco di distribuzione aggiuntivo comporta una maggiore percentuale di particelle più fini. Si desume che la morfologia delle ceneri differisce se il processo di combustione avviene nel forno chiuso statico o se avviene con flusso d'aria forzata. Infatti se il forno è chiuso, il processo di combustione non è in grado di rompere le lunghe fibre della bagassa, mentre, se il materiale viene bruciato a diverse temperature sotto un flusso di aria forzata, si nota un'efficace rottura delle fibre. Inoltre, con combustione nel forno chiuso, non si riesce ad avere la completa combustione della frazione organica della bagassa di canna da zucchero – rappresentativa del 94% circa della massa - poiché la quantità di ossigeno non risulta essere sufficiente per la combustione completa.

²¹ G. C. Cordeiro, R. D. T. Filho, and E. M. R. Fairbairn, "Ultrafine sugar cane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries," *IBRACON Struct. Mater.*, vol. 3, no. 1, pp. 50–67, 2010.

²² M. M. N. S. Soares, F. S. J. Poggiali, A. C. S. Bezerra, R. B. Figueiredo, M. T. P. Aguiar, and P. R. Cetlin, "The effect of calcination conditions on the physical and chemical characteristics of sugar cane bagasse ash," *Rev. Esc. Minas*, vol. 67, no. 1, pp. 33–39, 2014, doi: 10.1590/s0370-44672014000100005

2.1.1 Impiego di SCBA e risultati ottenuti

La fattibilità di utilizzare SCBA nei materiali cementizi è stata studiata da una considerevole parte di ricerca inerente a questo sottoprodotto, da quando la sua attività pozzolanica è stata scoperta da Hernández et al. nel 1998²³. Può essere sostituita nel calcestruzzo in determinate quantità, ma si è dimostrata utile anche come aggregato fine²⁴ in uno stato di scarsa reattività nel caso in cui sia presente un elevato contenuto di silice sotto forma di quarzo, elemento presente in maniera consistente nella sabbia naturale.

Le varie sperimentazioni effettuate hanno dimostrato che la polvere di bagassa di canna da zucchero, se finemente macinata, può essere sostituita al normale cemento Portland fino al 20% del volume senza compromettere la resistenza a compressione del calcestruzzo. Anzi, si è visto che in un intervallo di sostituzione di SCBA fino al 10% circa la resistenza a compressione cresce, per poi decrescere ed arrivare, per i campioni in cui il cemento è stato sostituito del 20%, a valori di resistenza circa pari a quella del campione di riferimento che non contiene polvere di bagassa di canna da zucchero²⁵. Ciò può essere dovuto sia per la reazione pozzolanica e sia per l'elevata superficie specifica della SCBA che porta alla formazione di siti di nucleazione per ulteriori prodotti di idratazione. Con la sostituzione del cemento con un quantitativo di SCBA superiore al 20%, la resistenza a compressione diminuisce rispetto a quella dei campioni di riferimento. Pertanto, il 20% di sostituzione di SCBA in OPC è considerato un limite ottimale.

L'aggiunta di SCBA comporta anche miglioramenti in termini di durabilità del calcestruzzo poiché sono state riscontrate riduzioni della permeabilità e diffusione dei cloruri²⁶. È stato inoltre

²³ J. M. Hernandez, B. Middendorf, M. Gehrke and H. Budelmann, "Use of wastes of the sugar Industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction," *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, no. 11, pp. 1525–1536, 1998.

²⁴ A. Sales and S. A. Lima, "Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 6, pp. 1114–1122, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.026.

²⁵ Sperimentazione condotta nel 2007 da K. Ganesan, K. Rajagopal, e K. Thangavel.

²⁶ La valutazione della durabilità è stata effettuata, nel 2014, da A. Bahurudeen, K. S. Vaisakh, e M. Santhanam tramite vari test su campioni di controllo senza sostituzioni di SCBA e su campioni con percentuali di sostituzione di SCBA del 10, 15 e 20%, con tempi di stagionatura di 28 e 56 giorni. Il test rapido di penetrazione dei cloruri RCPT ha mostrato che la carica totale passata è stata di 3060 Coulomb per i campioni di controllo stagionati a 28 giorni ed è stata riscontrata una riduzione del solo 3,5% per i campioni stagionati a 56 giorni. La sostituzione del cemento con SCBA ha notevolmente ridotto la conduttanza elettrica con una riduzione del 65, 73 e 81% rispettivamente per i campioni con percentuale di SCBA del 10, 15 e 20% a 28 giorni, rispetto ai campioni di controllo, e con ulteriori miglioramenti a 56 giorni. Gli indici di conducibilità del cloruro CCI risultavano essere ridotti del 23, 48 e 54% per campioni sostituiti rispettivamente con SCBA del 10, 15 e 20% dopo 56 giorni di indurimento. Si deduce che la resistenza alla penetrazione di ioni cloruro aumenta all'aumentare della percentuale di sostituzione del cemento con SCBA. È stato inoltre effettuato il test di permeabilità all'ossigeno che fornisce una chiara rappresentazione del grado di connettività dei pori in un campione di calcestruzzo ed è stato riscontrato un aumento graduale dell'OPI (Oxygen Permeability Index) con un aumento della sostituzione di SCBA, indice di un miglioramento della struttura dei pori. Infine è stata valutata la profondità medie di penetrazione e per i campioni con percentuale di sostituzione del 10, 15 e 20% erano rispettivamente a 7.0, 5.8 e 4.8 cm a 28 giorni, molto più bassa del campione di controllo (circa 8.0 cm) e la riduzione della profondità media di penetrazione è risultata ancora più significativa a 56 giorni di stagionatura. Anche K. Ganesan, K. Rajagopal, and K. Thangavel, nel 2007, hanno condotto uno studio sulla permeabilità al cloruro e hanno notato che la carica totale che passava attraverso i campioni di calcestruzzo miscelato con SCBA è diminuita con l'aumento del contenuto di SCBA fino al 25% di sostituzione e quindi la permeabilità al cloruro era

osservato che con la sostituzione del 20% di SCBA, i campioni di calcestruzzo mostrano una riduzione del 40% circa del coefficiente di assorbimento d'acqua²⁷, funzione della permeabilità all'acqua. Ciò è sicuramente dovuto anche alla sua struttura micrometrica, poiché la sua distribuzione granulometrica è normalmente più fine rispetto al cemento Portland. Questo consente di occludere gradualmente i pori ed ottenere una porosità minore e, di conseguenza, una riduzione dei vuoti.

Affinché si possa ottenere una consistenza e una lavorabilità regolare del calcestruzzo, numerosi ricercatori hanno verificato che l'incorporazione di SCBA comporta un quantitativo d'acqua tanto maggiore quanto maggiore è la percentuale di SCBA sostituita all'OCP. Ciò è imputato sicuramente alla maggiore superficie specifica dovuta sia alla particolare conformazione della polvere, che risulta altamente irregolare e porosa, che alla dimensione inferiore del diametro della particella rispetto all'OPC. Quindi, quanto maggiore è la percentuale di SCBA sostituita all'OPC maggiore sarà il quantitativo di additivo superfluidificante per ottenere una buona lavorabilità.

Sostituendo parzialmente il cemento con SCBA, è stato riscontrato anche un ritardo nel processo di presa a causa del maggior quantitativo di acqua e del minor quantitativo di cemento, più reattivo della SCBA, che rallenta il processo di idratazione, con conseguente riduzione del calore di idratazione e spostamento del picco di calore sviluppato durante questa reazione²⁸. In funzione della percentuale di polvere di bagassa di canna da zucchero sostituita al cemento, il picco di temperatura del calcestruzzo si potrebbe ridurre di 4 - 11 °C e il tempo necessario per raggiungerlo potrebbe ritardarsi di 1 - 3 ore²⁹. Ciò è però dovuto anche alla presenza di strati di particelle SCBA che si depositano attorno a quelle di cemento anidro, diminuendo di conseguenza l'idratazione dello stesso. Altra causa del rallentamento del processo di idratazione è la riduzione del contenuto di C₃S, C₃A e gesso, elementi altamente influenti sullo sviluppo del calore di idratazione, in quanto il quantitativo di cemento è inferiore rispetto alla miscela di controllo.

man mano considerevolmente ridotta. In particolare, il valore totale della carica superata per il 20% di calcestruzzo miscelato con SCBA risultava inferiore di oltre il 50% sia a 28 giorni che a 90 giorni di stagionatura dei provini. Hanno inoltre studiato il coefficiente di diffusione del cloruro dei campioni di calcestruzzo miscelato SCBA ed è stato riscontrato una sua diminuzione con l'aumento del contenuto di SCBA fino al 25% di sostituzione, indicando che la diffusione del cloruro è considerevolmente ridotta dalla sostituzione parziale di OPC con SCBA. Rispetto al calcestruzzo di controllo è stata ottenuta una riduzione di oltre il 50% del valore del coefficiente di diffusione del calcestruzzo con il 20% di SCBA.

²⁷ K. Ganesan, K. Rajagopal, and K. Thangavel, "Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 6, pp. 515–524, 2007

²⁸ K. Ganesan et al., nel 2007, hanno verificato che il calore sviluppato durante la reazione di idratazione del cemento dei campioni con percentuale di sostituzione con SCBA del 10% è risultato inferiore del 23% rispetto ai campioni di controllo.

²⁹ K. Montakarntiwong, N. Chusilp, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, "Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry". *Mater. Des.*, no. 49, pp 414–420, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.01.031

Questi tempi di presa rallentati comportano il mantenimento della lavorabilità del calcestruzzo per tempi maggiori. Invece i tempi di indurimento del calcestruzzo miscelato con SCBA risultano conformi ai normali limiti se il livello di sostituzione della polvere è fino al 20% del cemento.

Tutte le ricerche riscontrate in letteratura scientifica hanno appurato la fattibilità di utilizzare polvere di bagassa di canna da zucchero come parziale sostitutivo del cemento o come aggiunta a questo senza che ci sia un peggioramento delle sue caratteristiche, anzi per alcune di esse si può notare anche un miglioramento.

2.1.2 Riferimenti

Si riportano di seguito i principali dei riferimenti bibliografici analizzati inerenti alla polvere di bagassa di canna da zucchero.

Bahurudeen, K. S. Vaisakh, and M. Santhanam, “Availability of sugarcane bagasse ash and potential for use as a supplementary cementitious material in concrete,” *Indian Concr. J.*, vol. 89, no. 6, pp. 41–50, 2015.

Bahurudeen and M. Santhanam, “Performance evaluation of sugarcane bagasse ash-based cement for durable concrete,” *Proc. 4th Int. Conf. Durab. Concr. Struct. ICDCS 2014*, no. July, pp. 275–281, 2014, doi: 10.5703/1288284315412.

Khatun and K. Singh, “A Review on Self Compacting Concrete by utilizing Sugarcane Bagasse Ash : Future Concrete,” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, no. 5 pp. 1760–1764, 2018, e-ISSN: 2395-0056, p-ISSN: 2395-0072.

Sales and S. A. Lima, “Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 6, pp. 1114–1122, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.026.

E. Câmara, R. C. A. Pinto, and J. C. Rocha, “Setting process on mortars containing sugarcane bagasse ash,” *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 9, no. 4, pp. 617–629, 2016, doi: 10.1590/s1983-41952016000400009.

G. C. Cordeiro, P. V. Andreão, and L. M. Tavares, “Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning,” *Heliyon*, vol. 5, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02566.

G. C. Cordeiro, R. D. T. Filho, and E. M. R. Fairbairn, “Ultrafine sugar cane bagasse ash : high potential pozzolanic material for tropical countries,” *IBRACON Struct. Mater.*, vol. 3, no. 1, pp. 50–67, 2010.

G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares, and E. de M. R. Fairbairn, “Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 2, pp. 110–115, 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.11.005.

G. Sua-iam and N. Makul, “Use of High Volume, Untreated Bagasse Ash as a Fine Aggregate Substitute for Preparing Self-Compacting Concrete,” *Research and development journal*, vol. 24, no. 3, pp 8–15, 2013.

G. Sua-Iam and N. Makul, “Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 57, pp. 308–319, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.06.009.

K. Ganesan, K. Rajagopal, and K. Thangavel, “Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 6, pp. 515–524, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001.

K. Montakarnitwong, N. Chusilp, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, “Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry”. *Mater. Des.*, no. 49, pp 414–420, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.01.031.

M. M. N. S. Soares, F. S. J. Poggiali, A. C. S. Bezerra, R. B. Figueiredo, M. T. P. Aguilar, and P. R. Cetlin, “The effect of calcination conditions on the physical and chemical characteristics of sugar cane bagasse ash,” *Rev. Esc. Minas*, vol. 67, no. 1, pp. 33–39, 2014, doi: 10.1590/s0370-44672014000100005.

P. Jagadesh, A. Ramachandramurthy, and R. Murugesan, “Overview on properties of sugarcane bagasse ash (SCBA) as Pozzolan,” *Indian J. Geo-Marine Sci.*, vol. 47, no. 10, pp. 1934–1945, 2018.

S. Subedi, G. Arce, M. Hassan, N. Kumar, M. Barbato, and M. T. Gutierrez-Wing, “Influence of Production Methodology on the Pozzolanic Activity of Sugarcane Bagasse Ash,” *MATEC Web Conf.*, vol. 271, p. 07003, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201927107003.

Q. Xu, T. Ji, S. J. Gao, Z. Yang, and N. Wu, “Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2018, doi: 10.3390/ma12010039.

V. D. Katare and M. V. Madurwar, “Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, no. November, pp. 1–15, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142.

V. N. Castaldelli, J.L. Akasaki, J.L.P. Melges, M.M. Tashima, L. Soriano, M.V. Borrachero, J. Monzó and J. Payá, “Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials,” *Materials (Basel)*, vol. 6, no. 8, pp. 3108–3127, 2013, doi: 10.3390/ma6083108.

2.2 Rice Husk Ash (RHA)

La buccia di riso è un sottoprodotto agricolo ottenuto in seguito alla sbramatura del cereale. Questa operazione permette di separare il chicco dalla buccia detta anche “lolla”. In generale, il riso è una delle maggiori colture alimentari del mondo, vista la forte richiesta, con una previsione della sua domanda in continua crescita. Di fatto il riso è il cereale più coltivato in tutto il mondo e vanta una produzione di circa 720 milioni di tonnellate di risone all’anno, di cui 482 milioni di tonnellate rappresentano il riso finito. Le risaie sono presenti in tutto il mondo, ma quelle con un’estensione maggiore sono sicuramente nel continente asiatico, mentre nel resto del mondo coprono circa l’1% della superficie terrestre.

Si deduce che la buccia di riso designa uno scarto abbastanza consistente in quanto il 20% del riso è costituito dalla sua buccia, mentre il chicco di riso è il 69% del prodotto iniziale e lo strato interno di crusca ne rappresenta circa l’11%.

La buccia di riso è un materiale fibroso e la sua composizione varia in funzione del clima, delle condizioni geografiche, dalle caratteristiche del suolo, dalla modalità di crescita³⁰ e della tipologia di pianta. Generalmente è composta, per il 75-80% del suo peso, essenzialmente da cellulosa,

³⁰ L’impiego di fertilizzanti utilizzati durante la crescita della pianta può alterare la composizione chimica della buccia di riso. Si potrebbero riscontrare elevati contenuti di Mg, Al, e Fe.

emicellulosa e lignina, mentre, per il rimanente 15-20% del peso, principalmente da silice. Infatti, durante la crescita, le piante di riso assorbono dal terreno la silice insieme ad altri minerali. Il silicio è presente principalmente in forma amorfa e si colloca soprattutto nei peli, detti tricomi, e nelle protuberanze interne ed esterne della buccia.

La buccia di riso non ha un acclarato valore commerciale, ma a causa del suo elevato contenuto calorico di circa 16720 kJ/kg, viene utilizzata come combustibile nelle caldaie per generare elettricità o per produrre vapore durante il processo di parboiling e, in seguito al processo di combustione, si trasforma in polvere (RHA) che rappresenta il 25% della buccia grezza iniziale.

Quindi per 1000 kg di riso grezzo, vengono prodotti circa 200 kg (20%) di buccia dalla quale si generano circa 50 kg (25%) di RHA.

Grazie al processo di combustione viene decomposta la parte organica della buccia di riso, per cui quasi tutti i componenti organici vengono rimossi e rimane la silice in percentuale elevata e altri oligoelementi come potassio, calcio, alluminio, ferro e magnesio. In letteratura si riscontrano polveri di buccia di riso con un contenuto di silice di oltre l'85% di cui quella in forma amorfa risulta di gran lunga preponderante rispetto a quella cristallina.

La silice della buccia di riso grezza è legata con molecole organiche che si decompongono con la parziale combustione della buccia, provocando la rottura dei legami di Si.

In seguito alla combustione, la buccia di riso tende a mantenere la sua morfologia corrugata originale, ma con globuli ridotti e compattati a causa del rilascio dei prodotti volatili³¹.

Il processo di combustione, poiché effettuato in condizioni incontrollate, dà luogo ad una cenere con un'elevatissima percentuale di silice in forma cristallina. Se però si intervenisse sulle condizioni di combustione, si potrebbe ottenere una cenere con un contenuto elevato di silice amorfa altamente reattiva³². In particolare, si possono riscontrare due tecniche di combustione.

Una è quella di tipo diretto che viene utilizzato per l'approvvigionamento energetico. Questo metodo di combustione consente di ottenere delle ceneri con caratteristiche variabili che concorrono all'attività pozzolanica. L'altro metodo è la combustione indiretta che si effettua con l'impiego di due camere e consente di avere un maggiore controllo sul processo di combustione.

³¹ S. D. Genieva, S. C. Turmanova, A. S. Dimitrova, and L. T. Vlaev, "Characterization of rice husks and the products of its thermal degradation in air or nitrogen atmosphere," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 93, no. 2, pp. 387–396, 2008, doi: 10.1007/s10973-007-8429-5.

³² La decomposizione termica della lolla di riso è stata studiata da Hamad e Khatab, nel 1981. Hanno osservato che per temperature inferiori ai 400 °C, la cenere conteneva cellulosa incombusta. Nell'intervallo di temperatura che varia tra circa 500 – 600 °C, invece, la cenere presentava silice in forma amorfa. Per temperature superiori, è stata riscontrata silice in forma cristallina ed in particolare la cristobalite per temperature superiori a circa 800 °C e la tridimite per temperature superiori a circa 1150 °C. Si è visto inoltre che la formazione di silice amorfa dipendeva anche dalla presenza di ventilazione durante il processo di combustione e dalla velocità dell'aria. Infatti a velocità di combustione basse, la silice che si formava era amorfa mentre a velocità elevate dell'aria, la silice si cristallizzava. I risultati della ricerca hanno evidenziato che la massima reattività dell'RHA è stata osservata per la polvere prodotta a 400 °C per 6-12 ore e a 500 °C per 8-12 ore, mentre per temperature superiori ai 600 °C c'è stata una riduzione della reattività.

Si intuisce che controllare il processo di combustione porta ad avere delle ceneri di migliore qualità con caratteristiche che tendono ad essere standardizzate, con un basso contenuto di carbonio ed elevate proprietà pozzolaniche. È stato riscontrato un intervallo di temperature di combustione ottimale compreso tra i 500 - 800 °C. Al di sotto dei 500 °C rimane un elevato quantitativo di materiale organico, mentre al di sopra degli 800 °C la silice cambia la sua struttura che da amorfa diventa cristallina. Inoltre, il processo di combustione controllato consente di distribuire in maniera diffusa l'ossigeno e, quindi, di conseguenza, di ottenere un lotto di ceneri con caratteristiche omogenee e con un alto contenuto di silice in forma amorfa.

Anche la velocità di combustione comporta delle conseguenze sulla morfologia della particelle e, più precisamente, sulla loro porosità. In particolare, il volume dei pori aumenta con l'aumentare della velocità di riscaldamento. Di conseguenza la superficie specifica interna è maggiore per cui da un lato aumenta la reattività e la resistenza finale di conseguenza, ma dall'altro diminuisce la lavorabilità poiché maggiore sarà l'acqua che la superficie assorbe.

È importante anche che il raffreddamento naturale della cenere bruciata avvenga in una zona asciutta subito dopo la combustione, per un minimo di 24 ore prima del suo impiego.

In generale, gli studi sulla morfologia hanno evidenziato che le particelle di RHA sono caratterizzate da una geometria irregolare assimilabile ad una sfera molto porosa di dimensioni massima di 100 μm e dimensioni media di 75 μm , da cui si deduce una superficie specifica elevata, a differenza della buccia di riso grezza che è caratterizzata invece da una bassa porosità e quindi bassa superficie specifica.

La reattività della cenere potrebbe essere aumentata grazie ad un processo di macinazione in seguito alla combustione. Si è visto però che man mano che aumenta il tempo di macinazione si hanno solo lievi incrementi della superficie specifica in quanto l'RHA è caratterizzata da una geometria porosa³³.

Sono stati effettuati studi per capire come intervenire sulla produzione della cenere di buccia di riso in modo da incrementare il contenuto di silice amorfa. Si è visto che un primo passo fondamentale è il lavaggio della buccia di riso grezza poiché consente di rimuovere alcune impurità presenti, come ad esempio polvere e piccoli sassi che possono contaminare il prodotto finale. Inoltre il lavaggio consente una preliminare depurazione chimica poiché dissolve alcune sostanze solubili, tra cui sali metallici. Nonostante il lavaggio, le particelle potrebbero presentare alcuni contaminanti e, in tal caso, sarebbe necessario un ulteriore trattamento con acido diluito a

³³ G. A. Habeeb e H. Bin Mahmud, nel 2010, per mezzo di un mulino a tamburo rotante, hanno appurato che con un tempo di macinazione di 90 minuti è stato raggiunto un diametro medio della particella di 68,3 μm con una superficie specifica di circa 25 m^2/g . Con un tempo di macinazione di 360 minuti invece si è raggiunto un diametro medio di 11,5 μm che ha portato solo ad un lieve incremento della superficie specifica di circa 5 m^2/g .

caldo per eliminarli³⁴ e procedere alla combustione che consente la rimozione della parte organica dalla buccia di riso. In realtà per ottenere già un ottimo risultato con costi minimi, potrebbe essere sufficiente il solo lavaggio per ottenere una cenere cenere bianca ricca di silice³⁵ e dalle buone prestazioni.

Il colore bianco della cenere indica che è decomposta in maniera efficace poiché presenta un basso contenuto di carbonio. Questo è correlato all'assenza di metalli alcalini durante la calcinazione, che evita la formazione di particelle di carbone nero a causa della decomposizione incompleta.

2.2.1 Impiego di RHA e risultati ottenuti

La cenere di buccia di riso è stata tra le prime ad essere sperimentata come materiale pozzolanico, tant'è vero che il suo impiego nel calcestruzzo è stato brevettato nel 1924. In particolare, le varie sperimentazioni effettuate hanno dimostrato che la polvere di buccia di riso, se finemente macinata, raggiunge un massimo aumento della resistenza a compressione con una percentuale di sostituzione al cemento Portland del 10% - 15%³⁶. Incrementando ulteriormente la percentuale di sostituzione, la resistenza a compressione decresce, fino a diventare comparabile a quella del campione di controllo con una percentuale di sostituzione del 20%.

Incrementando ulteriormente la percentuale di sostituzione dell'RHA si ha una riduzione della

³⁴ Il trattamento chimico può essere effettuato per mezzo di HCl, H₂SO₄, HNO₃, NaOH, NH₄OH, etc.

³⁵ Chakraverti et al., nel 1988, hanno scoperto che pretrattando la buccia di riso con acido cloridrico si può ottenere una cenere più bianca rispetto alla buccia non trattata che si può mostrare più impura e con un colore tendente al marrone chiaro, a parità delle altre condizioni. Questo perché grazie alla lisciviazione della lolla di riso con HCl diluito, vengono rimossi la gran parte degli elementi metallici, senza avere effetti negativi sulla quantità di silice amorfa.

Huang, nel 1988, ha brevettato un processo grazie al quale è riuscito ad ottenere una polvere di buccia di riso superfine con un diametro medio delle particelle di 0,04-0,05 μ m e con un quantitativo di silice maggiore del 92%.

Madrid et al., nel 2012 in "Production and Characterisation of Amorphous Silica from rice husk waste" hanno illustrato la valenza del processo di produzione della cenere di buccia di riso per la presenza di un contenuto elevato di silice amorfa. Hanno infatti dimostrato che se si procede prima al lavaggio, poi alla lisciviazione ed infine alla calcinazione, si può ottenere una cenere con una morfologia molto porosa che sembra promettere un'elevata reattività.

Infatti sembra che si riducano al minimo le sostanze contaminanti. In particolare durante le fasi di lavaggio e lisciviazione, si è perso circa il 30% del peso della buccia e sono stati rimossi potassio, ferro, manganese e zinco, con concentrazioni rispettivamente 0,54%, 0,13%, 0,04% e 0,003%. In particolare durante la fase di lavaggio è stato rimosso l'85% dello zinco, e si è arrivati alla sua rimozione complessiva del 92% dopo la lisciviazione acida. L'acqua ha consentito, invece, lo scioglimento intorno al 45-65% per gli altri metalli. Per raggiungere percentuali di rimozione dei metalli superiore al 90% è necessaria la lisciviazione acida.

³⁶ A. A. Ramezaniapour, M. Mahdikhani, and G. Ahmadibeni nel 2009 hanno condotto una sperimentazione per valutare anche le caratteristiche meccaniche dei provini di calcestruzzo confezionati con una percentuale di RHA in sostituzione al cemento del 7%, 10% e 15% del suo peso. Le prove sono state svolte a 7, 28 e 90 giorni. È emerso che il calcestruzzo contenente RHA aveva una resistenza a compressione e a trazione maggiore di quella del calcestruzzo di controllo al variare dei tempi di stagionatura. In particolare, all'aumentare della quantità di RHA, la resistenza alla trazione è aumentata fino al 20%. Inoltre, il calcestruzzo con presenza di RHA presentava un modulo di elasticità più elevati rispetto a quello del calcestruzzo senza RHA, ed era più elevato quanto maggiore era il contenuto di RHA e il tempo di stagionatura. Infatti, dopo 90 giorni, la miscela con il 15% di RHA ha mostrato un aumento del 7% del modulo elastico statico a compressione rispetto al calcestruzzo di controllo.

resistenza a compressione poiché si riduce il quantitativo di cemento e di conseguenza la quantità di idrossido di calcio a seguito del processo di idratazione. Il quantitativo di idrossido di calcio rilasciato non è in grado di colmare la silice poiché quest'ultima è presente in quantità abbondante, per cui, anche se potenzialmente reattiva, la silice non contribuisce allo sviluppo della resistenza, ma è come se svolgesse un ruolo di inerte.

I risultati migliori sono ottenuti quanto più è fine la polvere di buccia di riso³⁷. La maggiore finezza di RHA ha incrementato la superficie specifica e, di conseguenza, la reazione con l'idrossido di calcio Ca(OH)_2 . Ciò consente la maggiore produzione di silicato di calcio idrato C-S-H con conseguente incremento della resistenza a compressione. Inoltre, la granulometria più fine delle particelle di RHA ha ridotto la porosità. Questo comporta dei benefici in termini di durabilità³⁸ poiché si ha un effetto di riempimento dei vuoti che consente di avere un'elevata resistenza alla penetrazione al cloruro e alla penetrazione all'acqua.

L'aggiunta di RHA al calcestruzzo ha comportato un quantitativo d'acqua maggiore a causa della particolare morfologia delle particelle, poiché, essendo molto porose, hanno una superficie specifica maggiore e di conseguenza necessitano di un quantitativo maggiore di acqua per non compromettere la lavorabilità.

2.2.2 Riferimenti

Si riportano di seguito i principali dei riferimenti bibliografici analizzati inerenti alla polvere di buccia di riso.

A. A. Ramezaniapour, M. Mahdikhani, and G. Ahmadibeni, "The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp.

³⁷ G. A. Habeeb e H. Bin Mahmud, nel 2010, hanno valutato la resistenza a compressione del calcestruzzo al variare delle percentuali di sostituzione e al variare del grado di finezza della polvere. Il diametro medio dell'OPC impiegato era di 22,1 μm mentre i diametri medi di RHA erano: 31,3 μm (tempo di macinazione 180 minuti), 18,3 μm (tempo di macinazione 270 minuti) e 11,5 μm (tempo di macinazione 360 minuti). Per ogni dimensione media del diametro di RHA sono stati confezionati provini con livelli di sostituzione del 5, 10, 15 e 20%, oltre ai campioni di controllo necessari per il confronto. I risultati ottenuti hanno evidenziato che a pochi giorni di stagionatura, le malte erano comparabili rispetto al campione di controllo, mentre a 28 giorni, si è avuto un notevole incremento della resistenza a compressione. I risultati migliori erano quelli relativi ad un livello di sostituzione del 10%, mostrando un incremento della resistenza a compressione rispetto al campione di controllo del 22,2 % (per il diametro maggiore), 26,7 % (per il diametro intermedio) e 30,8% (per il diametro più fine), per cui il calcestruzzo con RHA più fine mostrava una resistenza maggiore rispetto al calcestruzzo con RHA meno fine.

³⁸ A. A. Ramezaniapour, M. Mahdikhani, and G. Ahmadibeni nel 2009 hanno condotto una sperimentazione per valutare anche la permeabilità al cloruro dei provini di calcestruzzo confezionati con una percentuale di RHA in sostituzione al cemento del 7%, 10% e 15% del suo peso. Le prove sono state svolte a 7, 28 e 90 giorni. L'impiego di RHA nel calcestruzzo ha consentito un netto aumento della resistenza alla penetrazione del cloruro rispetto alla miscela di controllo, circa 4 - 5 volte superiore per il 15% di RHA. Inoltre hanno valutato la permeabilità all'acqua ed è emerso che la profondità di penetrazione diminuiva con l'aumentare del contenuto di RHA e dei tempi di stagionatura.

83–91, 2009.

A. A. Ramezaniapour, P. Pourbeik, M. Mahdikhani, and G. Ahmadibeni, F. Moodi, “Evaluation of Mechanical Properties and durability of concretes containing rice husk ash,” *3rd International Conference on Concrete & Development*, pp. 93–141, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-15411-9_4.

G. A. Habeeb and H. Bin Mahmud, “Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material,” *Mater. Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 185–190, 2010, doi: 10.1590/S1516-14392010000200011.

J. Hadipramana, F. V. Riza, I. A. Rahman, L. Y. Loon, S. H. Adnan, and A. M. A. Zaidi, “Pozzolanic Characterization of Waste Rice Husk Ash (RHA) from Muar, Malaysia,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 160, no. 1, Dec. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/160/1/012066.

M. Dabai, C. Muhammad, B. Bagudo, and A. Musa, “Studies on the Effect of Rice Husk Ash as Cement Admixture,” *Niger. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 17, no. 2, pp. 252–256, 2010, doi: 10.4314/njbas.v17i2.49917.

M. E. Ephraim, G. A. Akeke, and J. O. Ukpata, “Compressive strength of concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement,” *Sch. J. Eng. Res.*, vol. 1, no. May, pp. 32–36, 2012.

M. N. N. Khan, M. Jamil, M. R. Karim, M. F. M. Zain, and A. B. M. A. Kaish, “Utilization of rice husk ash for sustainable construction: A review,” *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 12, pp. 1119–1127, 2015, doi: 10.19026/rjaset.9.2606.

M. Thiedeitz, W. Schmidt, M. Härder, and T. Kränkel, “Performance of rice husk ash as supplementary cementitious material after production in the field and in the lab,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 19, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/ma13194319.

N. S. Msinjili and W. Schmidt, “Rice husk ash as a constituent material for low-cost housing in Africa,” *Cem. Trend*, no. November, pp. 44–46, 2014.

N. Van Tuan, “Rice Husk Ash as a Mineral Admixture for Ultra High Performance Concrete”,

Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 2011.

R. Kishore, V. Bhikshma, and P. Jeevana Prakash, “Study on strength characteristics of high strength Rice Husk Ash concrete,” *Procedia Eng.*, vol. 14, pp. 2666–2672, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.335.

R. Madrid, C. A. Nogueira, and F. Margarido, “Production and Characterisation of Amorphous Silica from rice husk waste” *Int. Conf. Eng. Waste Biomass Valoriz.*, pp. 1–10, 2012.

S. Chandrasekhar, K. G. Satyanarayana, P. N. Pramada, P. Raghavan, and T. N. Gupta, “Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk - An overview,” *J. Mater. Sci.*, vol. 38, no. 15, pp. 3159–3168, 2003, doi: 10.1023/A:1025157114800.

S. D. Genieva, S. C. Turmanova, A. S. Dimitrova, and L. T. Vlaev, “Characterization of rice husks and the products of its thermal degradation in air or nitrogen atmosphere,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 93, no. 2, pp. 387–396, 2008, doi: 10.1007/s10973-007-8429-5.

2.3 Saw Dust Ash (SDA)

La polvere di segatura è un rifiuto organico prodotto in quantità abbondante in tutto il mondo in quanto deriva dallo scarto dell’industria del legno, infatti viene prodotto quando il legname viene lavorato nelle segherie. Si genera a seguito del taglio, molatura, perforazione o levigatura del legno con una sega o un altro strumento, ed è, quindi, composta da particelle fini di legno.

In genere la segatura viene utilizzata principalmente per la produzione di pannelli truciolari, ma ha anche altri campi di applicazione come ad esempio quello agricolo poiché viene impiegata come pacciame per il terreno. Ancora, la segatura può essere utilizzata come combustibile domestico o negli stessi stabilimenti. Infatti le industrie del legno spesso hanno le proprie caldaie su piccola scala per la produzione di energia termica per processi di lavorazione come l’essiccazione dei prodotti finiti, impiegando come combustibile i rifiuti di legno generati. Inoltre, la segatura viene anche utilizzata come combustibile domestico. A seguito del processo di combustione si genera la cenere derivante dalla segatura (SDA).

In letteratura è stata riscontrata presenza di silice amorfa, tale da rendere questa cenere un filler attivo impiegato in combinazione con il legante. In realtà la segatura è uno scarto di lavorazione

industriale e/o artigianale estremamente variabile ed eterogeneo³⁹ in quanto può derivare da diverse tipologie di legno. Una composizione non standardizzata della segatura comporta che la caratterizzazione chimica è mutabile in funzione della specie di alberi di cui è costituita. Infatti le varie specie di legno possono presentare ossidi essenziali in diversa quantità⁴⁰. Inoltre, all'interno di una stessa categoria di alberi, si possono riscontrare composizioni leggermente differenti a causa della variabilità del clima, delle condizioni geografiche, dalle caratteristiche del suolo o dalla modalità di crescita. Si intuisce che sono molte le variabili che entrano in gioco nella composizione della segatura stessa, rendendo molto difficile uniformare le caratteristiche della stessa.

Inoltre, anche in questo caso, la reattività di questa cenere può dipendere molto dalle condizioni di combustione e dalla finezza che caratterizza le particelle del filler. Un processo di combustione incontrollato comporta la presenza di silice in forma cristallina che non concorre alla reazione pozzolanica, a differenza di un processo di combustione controllato, come riscontrato per i filler precedenti. In particolare sono state individuate come temperature ottimali di combustione quelle comprese tra i 400 e i 600 °C. Valori di temperatura al di sopra o al di sotto di questo intervallo comportano degli svantaggi poiché al di sotto dei 400 °C rimane un elevato quantitativo di materiale organico, mentre al di sopra degli 600 °C la silice cambia la sua struttura e tende a cristallizzarsi. Altro accorgimento che incrementa la reattività della cenere potrebbe essere una successiva macinazione, a seguito della combustione, in modo da incrementare la superficie specifica e quindi la superficie che concorre alla reazione. Oppure provvedere alla setacciatura in modo da tenere in considerazione solo la frazione più fine passante a 0,063 mm.

Infatti, in generale le dimensioni delle particelle di pozzolana hanno una notevole influenza sulle proprietà della malta o del calcestruzzo. Potenziando l'effetto di riempimento ed incrementando le proprietà pozzoloniche, si può di conseguenza migliorare la durabilità del calcestruzzo e della

³⁹ In letteratura sono stati ritrovati percentuali di ossidi diverse al variare delle ceneri di segatura analizzate. Ad esempio A. A. Raheem, B. S. Olanekanmi e C. S. Folorunso nella sperimentazione riportata in "Saw Dust Ash as Partial Replacement for Cement in Concrete," *Organ. Technol. Manag. Constr. An Int. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 474–480, 2012, hanno riscontrato una percentuale di silice maggiore del 65% in ogni campione ed una somma ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) = 73,07% quindi maggiore del 70% in accordo ai requisiti della ASTM C 618 (1991).

Ancora, T. R. Praveen Kumar, C. Sudheesh e S. Sasi Kumar nella sperimentazione riportata in "Strength characteristics of saw dust ash based geopolymer concrete," *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 738–745, 2015, sono stati raggiunti valori di ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) = 77,17% con una percentuale di silice di 62,87%.

Queste percentuali classificano la cenere come un materiale a comportamento pozzolanico efficace, in realtà, però sono state riscontrate anche percentuali nettamente più basse. Ad esempio E. N. N. Ogork and S. Ayuba in "Influence of Sawdust Ash (SDA) as Admixture in Cement Paste and Concrete," *IJISSET-International J. Innov. Sci. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 10, pp. 736–743, 2014, hanno analizzato SDA con valori di ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) = 12,47% di gran lunga inferiore alle quantità prescritte nella ASTM C 618. Nonostante ciò, anche se con basse percentuali di impiego della cenere - circa il 2% di aggiunta al cemento - la cenere di segatura è stata ritenuta dagli stessi ricercatori come idonea ad essere impiegata nelle miscele cementizie.

⁴⁰ Confronto degli ossidi essenziali in SDA nelle diverse specie di legno riportato in tabella 2.6 dell'articolo di S. A. Mangi, "Utilization of Sawdust Ash as Cement replacement for the Concrete Production: A Review," *Engineering Science and Technology International Research Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 11–15, 2017.

malta grazie al restringimento del volume dei vuoti e la riduzione di Ca(OH)_2 . Rendendo più fine la cenere POFA, aumenterà di conseguenza il contenuto di SiO_2 che innesci la reazione, portando gli effetti benefici suddetti.

2.3.1 Impiego di SDA e risultati ottenuti

In letteratura si riscontrano studi che hanno lo scopo di dimostrare la fattibilità dell'utilizzo della polvere di segatura nelle miscele. Innanzitutto si è notato che l'impiego di SDA incide sicuramente sulla porosità in quanto diminuisce, poiché le particelle della cenere, essendo molto fini, vanno a chiudere i vuoti che si formano. Inoltre, l'impiego di SDA influenza anche la lavorabilità, che diminuisce all'aumentare del contenuto di cenere. Una diminuzione della lavorabilità, però, comporta un maggior quantitativo di acqua per rendere più lavorabile la miscela, poiché, aumentando la superficie specifica, c'è bisogno di più acqua per bagnare le particelle. Ciò comporta un aumento del rapporto acqua/legante, oppure l'aggiunta di un superfluidificante. Questo è tipico del cemento pozzolanico a causa della maggiore quantità di silice, infatti la reazione siliceo-calce richiede più acqua durante l'idratazione del cemento.

D'altro canto, la riduzione della porosità implica una diminuzione della penetrazione all'acqua e ai cloruri con conseguente aumento della durabilità poiché si riduce al minimo l'accesso degli agenti deterioranti⁴¹.

Inoltre, il maggior quantitativo di acqua può essere dovuto al fatto che la SDA ha un peso specifico inferiore rispetto all'OPC, per cui è necessario un volume maggiore di SDA che sostituisce un'aliquota di cemento valutata in peso. Ciò implica un maggiore impiego di acqua per bagnare il volume in eccesso di SDA.

Per quanto concerne le caratteristiche meccaniche, sono state effettuate delle valutazioni sulla possibilità di sostituire parzialmente la SDA con il legante. Come specificato precedentemente, la cenere di segatura presenta caratteristiche abbastanza eterogenee al variare dei campioni. Pertanto anche i risultati emersi dalle varie sperimentazioni analizzate risultano non allineati. Infatti a volte è stata riscontrata una riduzione della resistenza a compressione all'aumentare della quantità di SDA in sostituzione al cemento. Per cui a volte solo il 5% di sostituzione SDA è risultata sufficiente per ottenere prestazioni accettabili quanto più vicine possibili alla miscela di riferimento⁴². D'altro canto, con altre sperimentazioni, è emerso che il calcestruzzo progettato con cenere di segatura presentava prestazioni comparabili con il calcestruzzo di cemento Portland

⁴¹ Studio condotto da E. Augustine in "Sawdust Ash as an Inhibitor for Reinforcement Corrosion in Concrete," MOJ Civ. Eng., vol. 2, no. 3, pp. 1–6, 2016, doi: 10.15406/mojce.2016.01.00015.

⁴² Studio condotto da A. A. Raheem, B. S. Olasunkanmi e C. S. Folorunso nel 2012.

fino al 12% di sostituzione del cemento⁴³. Ancora, in altre è stata riscontrata una percentuale di sostituzione ottimale del 2%⁴⁴. Un ulteriore quantitativo di sostituzione implicherebbe una miscela più economica e rispettosa dell'ambiente poiché il cemento si riduce, ma comporterebbe un decremento della resistenza a compressione. Anche se è stato anche che con l'aumentare del periodo di stagionatura, la differenza di resistenza meccanica tra il campione di controllo (quindi con 0% di ceneri) e le miscele con varie percentuali di sostituzione tende a diminuire⁴⁵. Pertanto si desume che le miscele con SDA potrebbero essere concepite per impieghi in cui la resistenza meccanica è un aspetto secondario (come ad esempio massetti, intonaci etc.). Sono inoltre stati effettuati degli studi per proporre SDA come filler in sostituzione all'aggregato fine ed anche in questo caso è stato riscontrato un decremento delle prestazioni all'aumentare del livello di sostituzione⁴⁶. L'aggiunta di SDA ha comportato benefici in termini di riduzione del ritiro, aumento dei tempi di presa iniziali e finali e una migliore resistenza agli ambienti con acido solforico e acido cloridrico e quindi potrebbe essere indicato anche come additivo ritardante e potenziatore di resistenza in ambienti normali e acidi⁴⁷.

2.3.2 Riferimenti

Si riportano di seguito i principali dei riferimenti bibliografici analizzati inerenti alla cenere di segatura.

A. A. Raheem, B. S. Olasunkanmi, and C. S. Folorunso, "Saw Dust Ash as Partial Replacement for Cement in Concrete," *Organ. Technol. Manag. Constr. An Int. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 474–480, 2012, doi: 10.5592/otmcj.2012.2.3.

A. U. Elinwa and Y. A. Mahmood, "Ash from timber waste as cement replacement material," *Cement and Concrete Composites*, vol. 24, no. 2, pp. 219–222, 2002.

⁴³ Comparazione condotta da Ratod Vinod Kumar e M. Shiva Rama Krishna, riportata nell'articolo "A Case Study on Partial Replacement of Cement by Saw Dust Ash in Concrete," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 747–752, 2018, doi: 10.22214/ijras.2018.2133.

⁴⁴ E.-N. N. Ogork and S. Ayuba, "Influence of Sawdust Ash (SDA) as Admixture in Cement Paste and Concrete," *IJISSET-International J. Innov. Sci. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 10, pp. 736–743, 2014.

⁴⁵ Studio condotto da A.U. Elinwa e Y.A. Mahmood nel 2002.

⁴⁶ L. N. Tilak, S. K. M. B e M. Singh nel 2018 hanno valutato la variazione della resistenza a compressione del calcestruzzo sostituendo con SDA una percentuale di aggregato fine pari a 10, 20, 50 e 100%. All'aumentare del livello di sostituzione è stata riscontrata una riduzione delle prestazioni meccaniche rispettivamente del 28,54%, 53,95%, 67,10% e 75,92%. Si nota inoltre che all'aumentare del livello di sostituzione la riduzione della resistenza a compressione decresce.

⁴⁷ E.-N. N. Ogork and S. Ayuba, "Influence of Sawdust Ash (SDA) as Admixture in Cement Paste and Concrete," *IJISSET-International J. Innov. Sci. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 10, pp. 736–743, 2014.

A. U. Elinwa and A. M. Mamuda, "Sawdust ash as powder material for self-compacting concrete containing naphthalene sulfonate," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/129276.

A. U. Elinwa, M. Mamuda, and M. Ahmed, "Mechanical strengths of self compacting concrete containing sawdust-ash and naphthalene sulfonate," *Adv. Concr. Constr.*, vol. 2, no. 4, pp. 301–308, 2014, doi: 10.12989/acc.2014.2.4.301.

E. Augustine, "Sawdust Ash as an Inhibitor for Reinforcement Corrosion in Concrete," *MOJ Civ. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 1–6, 2016, doi: 10.15406/mojce.2016.01.00015.

I. O. Obilade, "Use of Saw Dust Ash as Partial Replacement for Cement In Concrete," *Int. J. Eng. Sci. Invent.*, vol. 3, no. 8, pp. 36–40, 2014.

J. James, "Strength benefit of sawdust/wood ash amendment in cement stabilization of an expansive soil," *Rev. Fac. Ing.*, vol. 28, no. 50, pp. 44–61, 2019, doi: 10.19053/01211129.v28.n50.2019.8790.

L. N. Tilak, S. K. M. B, and M. Singh, "Use of Saw Dust as Fine Aggregate in Concrete Mixture," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, no. 9, pp. 1249–1253, 2018.

L. O. Ettu, K. C. Nwachukwu, J. I. Arimanwa, and C. T. G. Awodiji, "Variation of Strength of OPC-Saw Dust Ash Cement Composites with Water-Cement Ratio," vol. 2, no. 7, pp. 9–13, 2013.

R. V. Kumar, M. Shiva Rama Krishna, "A Case Study on Partial Replacement of Cement by Saw Dust Ash in Concrete," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 747–752, 2018, doi: 10.22214/ijraset.2018.2133.

S. A. Mangi, "Utilization of Sawdust Ash as Cement replacement for the Concrete Production: A Review," *Engineering Science and Technology International Research Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 11–15, 2017.

T. R. Praveen Kumar, C. Sudheesh, and S. Sasi Kumar, "Strength charecteristics of saw dust ash based geopolymer concrete," *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 738–745, 2015.

E.-N. N. Ogork and S. Ayuba, "Influence of Sawdust Ash (SDA) as Admixture in Cement Paste and Concrete," *IJISSET-International J. Innov. Sci. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 10, pp. 736–743, 2014.

2.4 Palm Oil Fuel Ash (POFA)

La cenere di olio di palma è un sottoprodotto agro-industriale prodotto soprattutto in Malesia, Indonesia e Thailandia. Si ottiene a seguito della combustione di gusci e bucce di palma. Infatti, per ottenere l'olio di palma finito, si deve ricorrere a diverse operazioni e la prima avviene proprio in frantoio dove si estrae l'olio di palma grezzo dal frutto. Con 100 tonnellate di grappoli di frutta fresca, si ottengono 52 tonnellate di gusci, fibre e grappoli vuoti.

Questo materiale di scarto in genere si compone di circa l'85% di fibre e il 15% di gusci e grappoli di frutta vuoti. Questi vengono impiegati come combustibile nelle caldaie dei frantoi a una temperatura di circa 800-1000 °C per generare elettricità necessaria per il processo di estrazione dell'olio di palma. La cenere prodotta in seguito alla combustione risulta essere il 5% in peso del prodotto di scarto iniziale.

L'applicazione del POFA resta molto limitata e circoscritta in pochi impieghi, infatti a volte questo rifiuto viene utilizzato come fertilizzante, ma in realtà non risulta essere particolarmente idoneo per questo compito a causa della mancanza di sostanze nutritive, per cui la maggior parte del POFA viene smaltita come rifiuto nelle discariche.

Al variare del sistema operativo e del processo di combustione delle fabbriche di olio di palma, si possono ottenere ceneri dalle caratteristiche dissimili. Un primo aspetto differente è la colorazione delle ceneri che possono tendere più o meno al colore nero. Quanto più il colore è scuro, maggiore sarà la quantità di carbonio incombusto presente all'interno delle ceneri. La rimozione del carbonio in eccesso e di altri materiali organici incombusti contenuti nel POFA è fondamentale per evitare effetti negativi nelle miscele. Le particelle che compongono la cenere si presentano con una forma irregolare e porosa e quindi con un'ampia superficie specifica. Questo ha delle ripercussioni poiché tendono ad assorbire molta acqua poiché la superficie specifica è elevata nonostante le ridotte dimensioni.

In letteratura è stata riscontrata la caratteristica di pozzolanicità per questo filler. Infatti, il principale componente della POFA è la silice e l'allumina⁴⁸. La silice in forma amorfa presente reagisce con l'idrossido di calcio che si forma a seguito del processo di idratazione del legante e

⁴⁸ Durante uno studio di S. O. Bamaga, M. W. Hussin e M. A. Ismail nel 2013, sono state valutate le prestazioni di calcestruzzi realizzati sostituendo il 20% del peso del cemento con ceneri provenienti da tre diversi frantoi in Malesia. In particolare le ceneri presentavano valori di silice del 58.30%, 59.60% e 52.50% e valori di allumina rispettivamente pari a 6.69%, 7.05% e 8.83%.

comporta la formazione di gel di idrato di silicato di calcio C-S-H secondario grazie ad una reazione pozzolanica.

In realtà le ceneri di POFA se composte da particelle con diametro di grande dimensione, non sono propriamente adatte come filler pozzolanico, per cui risulterebbe opportuno incrementare la loro finezza con un processo di macinazione.

2.4.1 Impiego di POFA e risultati ottenuti

Sono stati condotti studi per impiegare queste ceneri in malte e calcestruzzi come materiale pozzolanico ed ottenere una ragionevole resistenza alla compressione.

In letteratura si riscontrano risultati variabili in merito alle varie sperimentazioni conseguite impiegando la cenere POFA a vari livelli di sostituzione. Ciò è probabilmente dovuto alla qualità e tipologia dei materiali impiegati nei diversi studi.

Alcune ricerche dimostrano che le miscele ottenute mostravano buone caratteristiche con il 20% di sostituzione⁴⁹. Con questa percentuale di sostituzione è stato ottenuto un calcestruzzo con una resistenza a compressione paragonabile al campione di controllo.

In altre ricerche, però, sono stati riscontrati anche valori di resistenza a compressione inferiori all'aumentare della percentuale di sostituzione della POFA al legante. Questo potrebbe essere un aspetto relativamente trascurabile se si utilizza il calcestruzzo per scopi non strutturali, in cui la resistenza a compressione non gioca un ruolo rilevante. Pertanto è stata valutata la percentuale di sostituzione che rappresentasse il giusto compromesso affinché le prestazioni meccaniche risultassero accettabili anche se ridotte rispetto al campione di controllo. Tale percentuale si attesta intono al 20%, massimo 30% per le sperimentazioni studiate e analizzate⁵⁰.

⁴⁹ Durante uno studio di S. O. Bamaga, M. W. Hussin e M. A. Ismail nel 2013, sono state valutate le prestazioni di calcestruzzi realizzati sostituendo il 20% del peso del cemento con ceneri provenienti da diversi frantoi. In particolare sono state valutate le resistenze a compressione a 7, 28 e 90 giorni. Per quanto concerne la durabilità, è stata studiata la resistenza ai cloruri e ai solfati in conformità con gli standard ASTM appropriati. È stato notato che i provini stagionati a 7 e 28 giorni mostravano una resistenza a compressione inferiore rispetto al campione di controllo. La spiegazione può essere ricondotta nel fatto che i calcestruzzi con POFA, avendo un contenuto di cemento inferiore, generano meno prodotti di idratazione che sono essenziali per formare il gel di idrato di silicato di calcio. A 90 giorni, invece, la resistenza a compressione risulta essere maggiore rispetto a quella dei provini di controllo poiché POFA contiene un contenuto di silice maggiore che reagisce con l'idrossido di calcio in età successive.

Questa percentuale di sostituzione è stata confermata anche da uno studio di S. Bamaga, M. A. Ismail, M. W. Hussin, e U. Teknologi nel 2010 che hanno valutato le prestazioni di calcestruzzi realizzati sostituendo il 20% del peso del cemento Portland a 7, 28 e 90 giorni.

⁵⁰ Si ricorda in tal senso anche lo studio condotto da A. Munir, Abdullah, Huzaim, Sofyan, Irfandi e Safwan nel 2015, che esamina il ruolo del POFA da sostituire parzialmente al cemento, in termini di peso, nella produzione di calcestruzzo espanso. È stata evidenziata una riduzione della resistenza a compressione e la perdita di resistenza alla compressione del calcestruzzo aggiungendo il 50% di POFA è risultata del 30 ~ 40% circa. Nonostante ciò l'aggiunta del 20% di POFA fornisce una resistenza accettabile del calcestruzzo espanso impiegato per scopi non strutturali.

Oltre le prestazioni meccaniche delle miscele con POFA, sono state valutate ulteriori prestazioni e sono stati riscontrati benefici su altri fronti⁵¹. Infatti, l'impiego di questa cenere comporta anche miglioramenti in termini di durabilità del calcestruzzo. Questo risultato è stato confermato da svariate ricerche poiché sono state riscontrate riduzioni sia della permeabilità che della penetrazione dei cloruri⁵² in quanto la reazione di SiO₂ contenuta nella POFA e idrossido di calcio migliora il legame interfacciale tra gli aggregati e la pasta, per cui il calcestruzzo risulta impermeabile e denso, grazie alla formazione del gel C-S-H che infittisce la microstruttura del campione. Per lo stesso motivo, l'aggiunta di POFA alle miscele ha comportato anche un aumento della resistenza ai solfati⁵³ con conseguente aumento della durabilità del calcestruzzo.

In particolare, più è fine la particella, maggiori sono i benefici e addirittura, additivando POFA anche ceneri di grandezza nanometrica, si ha una maggiore influenza positiva poiché riempie ulteriormente la porosità del calcestruzzo e la sua resistenza alla compressione⁵⁴.

Anche la resistenza alla carbonatazione dipende dalla compattezza e dalla densificazione del calcestruzzo a seguito di impiego di POFA. Infatti una maggiore compattezza e densificazione del calcestruzzo comporta una difficoltà maggiore per l'anidride carbonica CO₂ a penetrare e, di riflesso, comporta una maggiore resistenza alla carbonatazione. Questo fenomeno, quindi, si amplifica quanto più fini sono le particelle poiché hanno una funzione di microriempimento.

Altra conseguenza di una porosità ben strutturata e ridotta è la riduzione della capacità di assorbimento, che comporta una maggiore resistenza all'assorbimento d'acqua per risalita capillare.

⁵¹ W. Sanawung, T. Cheewaket, W. Tangchirapat, e C. Jaturapitakkul, nel 2017, hanno condotto uno studio valutando le prestazioni del calcestruzzo in cui la POFA è stata utilizzata per sostituire parzialmente l'OPC in percentuali del 15, 25 e 35% in peso di legante. Le resistenze a compressione di questi provini erano del 94–80% del calcestruzzo di controllo a 28 e 90 giorni. È stata però riscontrata una buona resistenza alla permeabilità all'acqua con il 15% di sostituzione ed inoltre anche una riduzione della penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo con percentuali di sostituzione dal 15 al 35%. Per cui si deduce che la sostituzione del POFA macinato è più importante per aumentare la resistenza alla penetrazione degli ioni cloruro del calcestruzzo che per aumentare la sua resistenza alla compressione.

⁵² Durante uno studio di S. O. Bamaga, M. W. Hussin e M. A. Ismail nel 2013, sono state valutate le prestazioni di calcestruzzi realizzati sostituendo il 20% del peso del cemento con ceneri provenienti da tre diversi frantoi in Malesia. È stato osservato che la miscela con POFA presentava una resistenza alla penetrazione degli ioni cloruro notevolmente migliorata. In particolare, in funzione delle varie ceneri utilizzate, è stata riscontrata nel test RCTP una riduzione della carica passata dal 35% circa al 60% sostituendo il 20% del cemento.

Inoltre è stata riscontrata anche una riduzione della carica passante nel test RCTP condotto da S. Bamaga, M. A. Ismail, M. W. Hussin, e U. Teknologi nel 2010. Infatti si è avuta una riduzione della carica passata del 63% sostituendo il 20% di cemento con POFA rispetto al calcestruzzo OPC.

⁵³ Durante uno studio di S. O. Bamaga, M. W. Hussin e M. A. Ismail nel 2013, sono state valutate le prestazioni di calcestruzzi realizzati sostituendo il 20% del peso del cemento con ceneri provenienti da tre diversi frantoi in Malesia. È stato riscontrato un miglioramento della resistenza ai solfati fino al 37% sostituendo il 20% del cemento con POFA.

Studio condotto anche da S. Bamaga, M. A. Ismail, M. W. Hussin, e U. Teknologi nel 2010.

⁵⁴ W. Le Tang *et al.*, "Optimization of micro and nano palm oil fuel ash to determine the carbonation resistance of the concrete in accelerated condition," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: 10.3390/ma12010130.

Nonostante la sua capacità idraulica, è stato però riscontrato che il comportamento pozzolanico di questo filler è piuttosto lento, per cui l'influenza benefica del suo impiego è tangibile aumentando i giorni di stagionatura. Pertanto POFA mostra un'attività di resistenza inferiore in una fase iniziale, ma mostra valori potenziati in una fase successiva.

Un aspetto negativo di questo filler è denotato dalla sua conformazione irregolare che ne incrementa la superficie specifica. Questo significa che l'acqua necessaria nelle miscele deve essere maggiore per ottenere la stessa consistenza della stessa miscela senza impiego di POFA, altrimenti verrebbe inficiata la lavorabilità. Un maggior assorbimento d'acqua, però, potrebbe essere conseguenza anche di un'elevata quantità di frazione incombusta che assorbe maggiormente rispetto alle altre particelle.

2.4.2 Riferimenti

Si riportano di seguito i principali dei riferimenti bibliografici analizzati inerenti alla cenere di palma da olio.

A. Munir, Abdullah, Huzaim, Sofyan, Irfandi, and Safwan, "Utilization of palm oil fuel ash (POFA) in producing lightweight foamed concrete for non-structural building material," *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 739–746, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.119

L. A. Sofri *et al.*, "Performance of Concrete by Using Palm Oil Fuel Ash (POFA) as a Cement Replacement Material," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 815, no. June, pp. 29–33, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.815.29.

N. M. Altwair, S. Kabir, and W. Brameshuber, "Palm Oil Fuel Ash (Pofa): an Environmentally-Friendly Supplemental Cementitious Material for Concrete Production," *Int. Rilem Conf. Mater. Sci. (Matsci)*, Vol Iii, vol. 77, no. October, pp. 113–126, 2010.

N. F. Imran, M. N. Hasri, N. A. K. Fitri, D. Hasan, and M. Z. Ramli, "Effects of palm oil fuel ash (POFA) towards consistency and setting time properties of concrete," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2020, no. October 2018, 2018, doi: 10.1063/1.5062661.

S. Bamaga, M. A. Ismail, M. W. Hussin, and U. Teknologi, "Chloride Resistance of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash," vol. 1, no. December, pp. 158–166, 2010.

S. O. Bamaga, M. W. Hussin, and M. A. Ismail, "Palm Oil Fuel Ash: Promising supplementary cementing materials," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 7, pp. 1708–1713, 2013, doi: 10.1007/s12205-013-1241-9.

U. Jamo, S. G. Abdu, and B. Pahat, "Characterization of a Treated Palm Oil Fuel Ash," *Sci. World J.*, vol. 10, no. 1, pp. 27–31, 2015.

W. Sanawung, T. Cheewaket, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Influence of Palm Oil Fuel Ash and W/B Ratios on Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Resistance of Concrete," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/4927640.

W. Le Tang *et al.*, "Optimization of micro and nano palm oil fuel ash to determine the carbonation resistance of the concrete in accelerated condition," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: 10.3390/ma12010130.

T. Mehmannaavaz, M. Ismail, S. Radin Sumadi, M. A. Rafique Bhutta, M. Samadi, and S. M. Sajjadi, "Binary effect of fly ash and palm oil fuel ash on heat of hydration aerated concrete," *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/461241.

Sooraj VM, "Effect of Palm Oil Fuel Ash (POFA) on Strength Properties of Concrete," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 3, no. 6, pp. 2250–3153, 2013.

M. H. Ahmad, U. Tun, and H. Onn, "Compressive Strength of Palm Oil Fuel Ash Concrete," *Int. Conf. Constr. Build. Technol. 2008*, no. 27, pp. 297–306, 2008.

2.5 Waste Glass Ash (WGA)

Il filler WGA deriva da scarti di vetro che al giorno d'oggi risultano essere abbondanti. Il vetro è un solido amorfo non cristallino⁵⁵ e la sua produzione ha origini molto antiche infatti il primo vetro fabbricato è stato trovato nell'antica Mesopotamia e da allora la sua produzione è aumentata fino a raggiungere quantità elevate come quelle prodotte oggi, con un conseguente crescere dei tassi di spreco.

⁵⁵ Q. S. Khan, M. N. Sheikh, T. J. McCarthy, M. Robati e M. Allen nel 2019 hanno valutato la fattibilità di impiegare polvere di vetro nel calcestruzzo e tutti i lotti di polvere di vetro riciclato pervenuti contenevano più del 70% di biossido di silicio SiO₂.

È noto come il vetro sia un materiale inerte comunemente utilizzato per la produzione di imballaggi ed è risaputa la sua peculiarità nell'ambito del riciclaggio, infatti può essere fuso svariate volte senza perdere le sue prestazioni e le sue proprietà chimiche. Infatti i rifiuti di vetro possono essere frantumati, fusi e trasformati in nuovi prodotti senza che vengano modificate le proprietà del vetro in maniera significativa. In Europa il suo riciclaggio è molto spinto rispetto al resto del mondo, infatti quasi l'85% dei packaging in vetro sono realizzati con materiale riciclato. Nonostante ciò c'è una grande frazione di rifiuti di vetro che va in discarica.

Essendo il vetro essenzialmente costituito da silice amorfa, presenta alcune analogie con i materiali pozzolanici tradizionali e, quando è finemente macinato, può essere utilizzato anche come materiale cementizio supplementare.

La polvere di vetro contiene silice SiO_2 di natura amorfa in quantità circa del 70%, pertanto ha delle analogie con i materiali pozzolanici tradizionali e può essere impiegato come materiale cementizio supplementare, se finemente macinato. Infatti la silice presente gli consente di reagire con la portlandite. In letteratura si evincono risultati dell'analisi XRD in cui non sono presenti picchi relativi a composti cristallizzati, ad eccezione di un ampio alone di diffrazione compreso tra 20° e 30° , corrispondente alla fase vetrosa. Per questo motivo può essere considerato uno dei materiali cementizi supplementari. Le proprietà pozzolaniche della polvere di vetro possono essere rilevate solo con una dimensione delle particelle molto fini, riscontrata in letteratura tra 300 e 75 μm . Tale dimensione consente di avere anche un'elevata area specifica superficiale che ne incrementa l'attività pozzolanica. L'area specifica è amplificata anche dal fatto che le particelle che compongono la polvere di vetro presentano una geometria irregolare e spigolosa.

È evidente che per raggiungere dimensioni così piccole, il vetro necessita di essere macinato fino a raggiungere la granulometria necessaria. Sarebbe opportuno però provvedere ad un lavaggio preventivo alla macinazione e conseguente essiccazione in modo da eliminare elementi contaminanti.

Ad ogni modo, in letteratura emerge la fattibilità di impiego della polvere di vetro in aggiunta o sostituzione al legante. Studi preliminari hanno desunto che sostituendo al cemento una percentuale di polvere di vetro del 15%, le emissioni di CO_2 potrebbero essere ridotte dallo 0,75% all'1,05%⁵⁶.

2.5.1 Impiego di WGA e risultati ottenuti

L'impiego di polvere di vetro nelle malte cementizie e nei calcestruzzi è un'idea promettente viste

⁵⁶ S. Saggai, S. Dahmani, M. Boulifa, and A. Debbabi, "Waste Glass Powder in mortar: technical and environmental effects," no. February, 2019.

le sue caratteristiche di pozzolanicità.

In generale, vetro e cemento non sono chimicamente compatibili. Infatti la silice presente nel vetro e gli alcali all'interno della pasta cementizia sono responsabili della reazione alcali-silice (ASR), dannosa in condizioni di umidità poiché può portare a fessurazioni estese e deterioramento del calcestruzzo. Infatti, potrebbe succedere che la silice presente nel vetro si combini con alcali - e calcio - formando gel N, K-(C)-S-H provocando l'espansione del calcestruzzo e conseguente fessurazione.

Questa reazione è molto influenzata dalle dimensioni delle particelle che compongono la polvere di vetro: più sono fini hanno e più ridotte sono le espansioni derivanti dalla reazione. Pertanto, l'impiego della polvere di vetro può portare a due effetti tra loro contrapposti perché a causa della presenza di silice, da un lato si potrebbe avere la reazione ASR, che è dannosa per le miscele, dall'altro la reazione pozzolanica, che porta, invece, benefici. La chiave del comportamento della polvere di vetro risiede, quindi, nella dimensione delle particelle perché se fini riducono la reazione ASR e, al contempo, amplificano quella pozzolanica⁵⁷, ma non si esclude la compresenza di entrambe le reazioni.

In letteratura non si riscontrano risultati univoci in quanto tutto può dipendere dai materiali impiegati ma anche dal grado di macinazione. È stato riscontrato, infatti, uno studio diffuso nella ricerca della percentuale di sostituzione al cemento che desse dei valori di resistenza a compressione paragonabili al campione di controllo. Talvolta le sperimentazioni hanno restituito i risultati sperati individuando una percentuale di sostituzione variabile tra il 15% e il 30%⁵⁸. In

⁵⁷ Q. S. Khan, M. N. Sheikh, T. J. McCarthy, M. Robati e M. Allen nel 2019 hanno condotto uno studio per valutare la soglia critica di granulometria del vetro al di sotto della quale non si verifici alcuna espansione causata dalla reazione ASR nella malta a base di cemento. Lo studio ha dimostrato che solo le classi di granulometria con grandezza delle particelle $> 1,25$ mm hanno portato a una significativa espansione dei provini. L'assenza di espansione, però, non è stata sufficiente a provare che la reazione ASR non fosse avvenuta e che quindi non ci fosse traccia di ASR-gel nelle malte. Infatti, tracce della reazione ASR sono state osservate anche nei campioni contenenti vetro con dimensioni delle particelle fino a $315\text{ }\mu\text{m}$. Da questo si desume che l'ASR non può essere escluso per le particelle di vetro più fini, ma i prodotti della reazione pozzolanica hanno probabilmente rilevanza maggiore. Pertanto non si può escludere che le due reazioni siano concomitanti, ma, nel caso in cui il vetro si presenti in particelle molto fini, gli effetti della reazione pozzolanica superano quelli dell'ASR.

⁵⁸ Come dimostrato nel 2019 dalla ricerca di S. Saggai, S. Dahmani, M. Boulifa e A. Debbabi la percentuale di sostituzione al cemento di polvere di vetro è del 15%. Tale polvere è caratterizzata da una dimensione massima delle particelle di $800\text{ }\mu\text{m}$.

Come dimostrato nel 2012 dalla ricerca di Matos e Sousa-Coutinho, utilizzando il 20% di polvere di vetro in sostituzione al cemento le malte hanno raggiunto una resistenza a compressione paragonabile ai campioni di controllo. Da precisare che la polvere di vetro utilizzata aveva una dimensione delle particelle minore di $40\text{ }\mu\text{m}$, per cui era caratterizzata da un'ampia superficie specifica e quindi maggiore reattività.

Come dimostrato nel 2019 dalla ricerca di V. Letelier, B. I. Henríquez-Jara, M. Manosalva, C. Parodi, and J. M. Ortega, l'utilizzo di particelle di polvere di vetro con una dimensione massima di $38\text{ }\mu\text{m}$, consente di aumentare la percentuale di filler da sostituire al cemento fino al 30%.

Come dimostrato nella sperimentazione di M. Carsana, M. Frassoni e L. Bertolini nel 2014 la polvere di vetro miscelata in percentuale del 30% sia con cemento Portland che con calce, ha dimostrato di migliorare la resistenza delle malte. Le verifiche sono state condotte su miscele composte da due tipologie di polveri di vetro: una con superficie specifica di circa $400\text{ m}^2/\text{kg}$ e l'altra con una superficie specifica di $600\text{ m}^2/\text{kg}$.

altri casi però la sostituzione del cemento con polvere di vetro in queste quantità ha portato ad una riduzione della resistenza a compressione all'aumentare della percentuale di sostituzione⁵⁹. Questo può dipendere dalla qualità dei materiali impiegati e anche dalle dimensioni delle particelle della polvere di vetro.

L'incremento delle prestazioni può essere giustificato dal fatto che le particelle più fini vanno a collocarsi tra i vuoti lasciati dagli altri componenti, riducendo il volume dei pori nella matrice indurita. Inoltre minore è la dimensione, più ampia sarà la superficie specifica e quindi maggiore sarà la sua reattività pozzolanica poiché questa è proporzionale alla quantità di superficie disponibile per la reazione.

Il decremento delle prestazioni, invece, potrebbe riscontrarsi nel caso in cui si impieghino polveri con particelle dal diametro elevato oppure perché semplicemente le caratteristiche vengono valutate in tempi brevi, mentre gli effetti pozzolanici possono risultare evidenti in tempi più lunghi.

In letteratura è stato riscontrato anche uno studio condotto da M. Carsana, M. Frassoni e L. Bertolini che ha valutato l'impiego della polvere di vetro⁶⁰ anche in malte a base di calce utilizzando una miscela composta dal 70% di grassello di calce Ca(OH)_2 e il 30% di polvere di vetro. Si è notato che la reazione pozzolanica del vetro con la calce era molto lenta tanto da determinare un aumento della resistenza anche dopo 7 anni di stagionatura a umido.

Un impiego alternativo riscontrato della polvere di cemento è quello di sostituirla all'aggregato, senza riduzione del legante cementizio⁶¹.

L'impiego della polvere di vetro può influenzare la consistenza delle malte grazie da un lato al carattere non idrofilo e liscio della superficie delle particelle e dall'altro dalla loro forma irregolare e spigolosa. Infatti la prima caratteristica potrebbe causare un aumento del rapporto acqua/legante, e quindi migliorare la fluidità della malta fresca. Al contempo, però, la particolare geometria spigolosa potrebbe ostacolare il movimento della malta. Infatti la fluidità delle malte è ridotta se si utilizzano particelle con il bordo più affilato e la forma più angolare. Però quando la granulometria si riduce, la consistenza della malta aumenta fino a valori anche maggiori di quelli della malta di controllo, nonostante la geometria spigolosa. Questo perché probabilmente più le

⁵⁹ Si ricorda la ricerca di E. Horszczaruk e P. Brzozowski nel 2019 in cui la resistenza a compressione delle malte testate è diminuita con l'aumentare della WGA in sostituzione al cemento. Per cui la migliore percentuale riscontrata è stata del 5%, determinando una riduzione del volume dei vuoti (che ha implicato un minore assorbimento d'acqua) e il miglioramento della lavorabilità della malta fresca mantenendo le proprietà meccaniche paragonabili al campione di controllo dopo 28 e 56 giorni di stagionatura.

Si ricorda inoltre la sperimentazione condotta da A. Shayan e A. Xu nel 2004, in cui la resistenza a compressione delle malte testate è diminuita con l'aumentare della WGA in sostituzione al cemento.

⁶⁰ Le verifiche sono state condotte su miscele composte da due tipologie di polveri di vetro: una con superficie specifica di circa 400 m²/kg e l'altra con una superficie specifica di 600 m²/kg.

⁶¹ Come dimostrato nel 2004 dalla sperimentazione di A. Shayan e A. Xu, sostituendo il 30% di polvere di vetro alla sabbia, sono state ottenute resistenze a compressione maggiori rispetto al campione di controllo.

particelle sono fini e maggiore è la riduzione dell'attrito causato dall'irregolarità della geometria. Inoltre il ridotto assorbimento di acqua da parte della polvere di vetro potrebbe compensare gli effetti suddetti causati dalla forma irregolare.

In letteratura però è stata riscontrata anche una notevole diminuzione di consistenza con l'aumentare della polvere di vetro nella miscela, e quindi una diminuzione della lavorabilità del calcestruzzo. Ciò può essere probabilmente dovuto all'elevata tensione superficiale della polvere di vetro a causa della forte azione capillare⁶².

È stato inoltre riscontrato che le particelle della polvere di vetro producono un'elevata densità di impaccamento della pasta cementizia, provocando una riduzione della porosità e dell'assorbimento d'acqua. L'assorbimento d'acqua e la porosità tendono a decrescere al ridursi della dimensione della particella impiegata e all'aumentare della percentuale di polvere di vetro.

Quindi l'impiego della polvere di vetro comporta benefici in termini di durabilità poiché migliora la resistenza alla penetrazione dei cloruri e all'attacco dei solfati.

2.5.2 Riferimenti

Si riportano di seguito i principali dei riferimenti bibliografici analizzati inerenti alla polvere di vetro.

A. Rahma, N. El Naber, and S. Issa Ismail, "Effect of glass powder on the compression strength and the workability of concrete," *Cogent Eng.*, vol. 4, no. 1, 2017, doi: 10.1080/23311916.2017.1373415.

A. Shayan and A. Xu, "Value-added utilisation of waste glass in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 1, pp. 81–89, 2004, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00251-5.

B. A. Tayeh, D. M. Al Saffar, A. S. Aadi, and I. Almeshal, "Sulphate resistance of cement mortar contains glass powder," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, no. August, 2019, doi: 10.1016/j.jksues.2019.07.002.

E. Horszczaruk and P. Brzozowski, "Mechanical Properties of Mortars Containing Waste Glass Powder," *Period. Polytech. Archit.*, vol. 50, no. 1, pp. 30–34, 2019, doi: 10.3311/ppar.12752.

⁶² Come ipotizzato da A. Rahma, N. El Naber e S. Issa Ismail in "Effect of glass powder on the compression strength and the workability of concrete," *Cogent Eng.*, vol. 4, no. 1, 2017, doi: 10.1080/23311916.2017.1373415.

M. Carsana, M. Frassoni, and L. Bertolini, "Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 45, pp. 39–45, 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005.

Q. S. Khan, M. N. Sheikh, T. J. McCarthy, M. Robati, and M. Allen, "Experimental investigation on foam concrete without and with recycled glass powder: A sustainable solution for future construction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 201, pp. 369–379, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.178.

V. Letelier, B. I. Henríquez-Jara, M. Manosalva, C. Parodi, and J. M. Ortega, "Use of waste glass as a replacement for raw materials in mortars with a lower environmental impact," *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019, doi: 10.3390/en12101974.

S. Saggai, S. Dahmani, M. Boulifa, and A. Debbabi, "Waste Glass Powder in mortar : technical and environmental effects," no. February, 2019.

Q. S. Khan, M. N. Sheikh, T. J. McCarthy, M. Robati, and M. Allen, "Experimental investigation on foam concrete without and with recycled glass powder: A sustainable solution for future construction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 201, pp. 369–379, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.178.

R. Idir, M. Cyr, and A. Tagnit-hamou, "Potential pozzolanicity of glass cullet fines and aggregates," pp. 27–35, 2011.

O. Corbu, A. M. Ioani, M. M. Al Bakri Abdullah, V. Meîţă, H. Szilagyî, and A. V. Sandu, "The pozzolanic activity level of powder waste glass in comparisons with other powders," *Key Eng. Mater.*, vol. 660, no. August, pp. 237–243, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.660.237.

N. Tamanna, N. Mohamed Sutan, R. Tuladhar, D. Teo Ching Lee, and I. Yakub, "Pozzolanic Properties of Glass Powder in Cement Paste," *J. Civ. Eng. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 75–81, 2016, doi: 10.33736/jcest.307.2016.

A. Khmîri, B. Samet, and M. Chaabouni, "Assesment of the Waste Glass Powder Pozzolanic Activity By Different Methods," vol. 10, no. February, pp. 322–328, 2012.

2.6 Wheat Straw Ash (WSA)

La cenere di paglia di grano è un filler che nasce dalla combustione della paglia che è un sottoprodotto agricolo utilizzata come biomassa. La paglia di frumento rappresenta uno scarto consistente del raccolto di cereali. Basti pensare che la resa media di paglia è di circa 1,3 - 1,4 kg per kg di grano. In particolare i gambi secchi delle piante di grano vengono bruciati all'aperto una volta rimosso il grano e la pula e ciò è causa di inquinamento ambientale. Questa viene prodotta in elevate quantità, infatti si pensi che nel 2014 la produzione mondiale annua di grano è stata di circa 705 milioni di tonnellate. Si deduce la mole elevata di paglia che viene prodotta ogni anno. Questo scarto viene attualmente utilizzato come mangime per animali e, limitatamente ad alcune zone, nella costruzione di case con fango. Tuttavia, soprattutto nei paesi economicamente meno sviluppati, è consuetudine bruciare la paglia di grano a cielo aperto, con conseguenti problematiche ambientali e di salute, generando grossi quantitativi di cenere che però deriverebbero da un processo di combustione incontrollato.

Se però la combustione fosse controllata, si potrebbe ottenere una cenere con elevata percentuale di silice amorfa, infatti in letteratura se ne possono riscontrare gli effetti pozzolanici. Le condizioni di combustione della WSA sono state oggetto di sperimentazione da parte di molti ricercatori. Le risultanze desunte sono state varie e anche differenti tra loro. L'opinione maggiormente diffusa è un intervallo di temperature che si aggiri attorno ai 500-600 °C⁶³, anche se sono state riscontrate temperature di combustione più elevate.

Maggiore è la temperatura di combustione, maggiore è la quantità di silice prodotta. Tuttavia, la combustione a temperature estremamente elevate provoca la formazione di silice cristallina con conseguente diminuzione della reattività dei rifiuti agricoli.

Vari studi hanno dimostrato la presenza di elevate quantità di silice amorfa anche oltre il 70%⁶⁴, ma d'altro canto si riscontrano in letteratura anche percentuali di circa il 50%⁶⁵. Questo

⁶³ M. N. Amin, T. Murtaza, K. Shahzada, K. Khan e M. Adil nel 2019 hanno prelevato vari campioni di paglia di grano grezzo e li hanno bruciati a temperature diverse pari a 550 °C, 650 °C e 750 °C per comprendere la temperatura e la durata di combustione ottimale per produrre la più alta quantità di silice di natura amorfa. Le analisi XRD ed EDX hanno evidenziato che gli elementi SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ in WSA aumentavano con l'aumento della temperatura di combustione. Tuttavia, al crescere della temperatura, la silice da amorfa tendeva a diventare cristallina. Pertanto è emerso che le condizioni di combustione a 550 °C per 5 ore sono risultate migliori rispetto a temperature di combustione di 650 °C e 750 °C.

Ancora, anche S. A. Memon, I. Wahid, M. K. Khan, M. A. Tanoli e M. Bimaganbetova nel 2018 hanno studiato le condizioni di combustione più ottimali ed hanno dedotto che la paglia di grano se bruciata a temperature di 600 °C e macinata per 120 minuti amplifica al meglio le sue capacità idrauliche per poter essere utilizzata come materiale pozzolanico nei compositi a base di cemento.

⁶⁴ Percentuale di silice del 73% in H. Biricik, F. Akoz, I. Berktaş and A.N. Tulgar, Study of pozzolanic properties of wheat straw ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29(5), pp. 637-643, 1999.

⁶⁵ Percentuale di silice del 52% in M. Radeka, V. Zekic, D. Milic, M. Malesev and V. Radonjanin. Physical, chemical and pozzolanic properties of biomass ash, 13th International Conference Planning, Design, Construction and Building Renewal, 2015, pp. 114-127.

cambiamento nella quantità di silice è dovuto a vari fattori come la topografia, la chimica del suolo e il tipo di fertilizzanti utilizzati durante la crescita del grano.

Una caratteristica rilevante della WSA è che ha una densità molto bassa, è infatti un materiale molto leggero e questo comporterebbe di conseguenza una riduzione di peso dell'elemento in cui è impiegato e, quindi, un alleggerimento della struttura.

La particella che compone WSA si presentano con una geometria irregolare che varia da angolare a piatta e allungata mentre la tessitura appare ruvida e abrasiva. Pertanto presentano un'ampia superficie specifica che potrebbe essere incrementata con una macinazione delle particelle. Questo potrebbe comportare una maggiore richiesta d'acqua, se immesso in malte e calcestruzzi, affinché non venga compromessa la lavorabilità.

2.6.1 Impiego di WSA e risultati ottenuti

La fattibilità di impiegare la WSA come parziale sostituta dei leganti cementizi è stata studiata da vari ricercatori per capire in che percentuale potesse essere immessa nella miscela in modo da avere prestazioni paragonabili alla miscela di controllo.

Si possono riscontrare benefici in termini di caratteristiche meccaniche con una percentuale di sostituzione al cemento del 10%⁶⁶. Con percentuali di sostituzione più spinte, come circa ad esempio il 15% si possono ottenere anche miscele con prestazioni simili a quella della stessa miscela senza filler. È stato osservato che, rispetto a dei campioni di controllo in cui non è stato impiegato filler, la resistenza alla compressione è aumentata all'aumentare della percentuale di sostituzione WSA fino al 10% del peso del cemento dopodiché, oltre questa percentuale, le c'è stato un decremento delle prestazioni. Per cui, con questa percentuale di sostituzione sono state raggiunte resistenze a compressione maggiori rispetto ai campioni di controllo. Questo è dovuto alla presenza di SiO_2 in forma amorfa presente nella cenere, comportando la reazione pozzolanica. Oltre questa percentuale di sostituzione si ha un decremento prestazionale a causa del maggior quantitativo di silice che non è reattiva poiché in eccesso.

Questi effetti, però, si possono riscontrare e/o amplificare all'aumentare dei giorni di stagionatura a causa della continua reazione di idratazione dei leganti. Questo perché il comportamento pozzolanico è lento quindi gli effetti possono amplificarsi in tempi più lunghi.

⁶⁶ N. Bheel, M. H. W. Ibrahim, A. Adesina, C. Kennedy e I. A. Shar, nel 2021, nella loro sperimentazione hanno riscontrato che la sostituzione al Cemento Portland del 10% di WSA ha comportato un incremento della resistenza a compressione, trazione e flessione rispettivamente del 12%, 10% e 11%.

M. S. Khan, F. Ali, and M. A. Zaib, nel 2019 hanno condotto una sperimentazione sostituendo al Cemento Portland il 10%, 20% e 30% di WSA in peso di cemento. All'aumentare del contenuto di WSA si è ottenuta una riduzione della resistenza a compressione, e solo con il 10% di sostituzione sono stati ottenuti risultati comparabili.

Tuttavia, questo contenuto ottimale di WSA può essere aumentato a seconda della composizione chimica della cenere, che cambia con la topografia, il suolo e il tipo di fertilizzanti utilizzati.

Le miscele contenenti WSA hanno una lavorabilità ridotta a causa dell'irregolarità delle particelle che si presentano piatte, allungate e dalla superficie rugosa, tanto da incrementare l'acqua necessaria. Infatti la maggiore superficie comporta un maggiore assorbimento d'acqua della WSA e, di conseguenza, quanto maggiore è la quantità di WSA impiegata, minore è la consistenza.

2.6.2 Riferimenti

Si riportano di seguito i principali dei riferimenti bibliografici analizzati inerenti alla cenere di paglia di grano.

M. S. Khan, F. Ali, and M. A. Zaib, "A Study of Properties of Wheat Straw Ash as a Partial Cement Replacement in the Production of Green Concrete," *UW J. Sci. Technol.*, vol. 3, pp. 61–68, 2019.

N. Bheel, M. H. W. Ibrahim, A. Adesina, C. Kennedy, and I. A. Shar, "Mechanical performance of concrete incorporating wheat straw ash as partial replacement of cement," *J. Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 6, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s41024-020-00099-7.

O. Jankovský *et al.*, "Study on pozzolana activity of wheat straw ash as potential admixture for blended cements," *Ceram. - Silikaty*, vol. 61, no. 4, pp. 327–339, 2017, doi: 10.13168/cs.2017.0032.

R. M. A. E.-N. T A EL-SAYED, A M ERFAN, "Influence of Rice, Wheat Straw Ash & Rice Husk Ash on the Properties of Concrete Mixes," *Jokull J.*, vol. 67, no. 05, pp. 103–119, 2017.

R. A. Khushnood, S. A. Rizwan, S. A. Memon, J. M. Tulliani, and G. A. Ferro, "Experimental Investigation on Use of Wheat Straw Ash and Bentonite in Self-Compacting Cementitious System," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/832508.

J. Ahmad *et al.*, "A step towards sustainable self-compacting concrete by using partial substitution of wheat straw ash and bentonite clay instead of cement," *Sustain.*, vol. 13, no. 2, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/su13020824.

M. N. Amin, T. Murtaza, K. Shahzada, K. Khan, and M. Adil, "Pozzolan potential and mechanical performance of wheat straw ash incorporated sustainable concrete," *Sustain.*, vol. 11, no. 2, pp. 1–20, 2019, doi: 10.3390/su11020519.

S. A. Memon, I. Wahid, M. K. Khan, M. A. Tanoli, and M. Bimaganbetova, "Environmentally friendly utilization of wheat straw ash in cement-based composites," *Sustain.*, vol. 10, no. 5, pp. 1–21, 2018, doi: 10.3390/su10051322.

V. Bartůněk, D. Sedmidubský, D. Bouša, and O. Jankovský, "Production of pure amorphous silica from wheat straw ash," *Green Mater.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1680/jgrma.17.00035.

2.7 Waste Paper Sludge Ash (WPSA)

Il filler che deriva dai fanghi delle cartiere è un sottoprodotto industriale che si ottiene a seguito della combustione dei fanghi, che conseguono dalla produzione della carta, una volta essiccati. I residui ottenuti sono costituiti da acqua, fibre di cellulosa, sali inorganici e composti organici, infatti il materiale si presenta molto viscoso e grumoso. Si stima che da 1000 kg di fanghi si possono produrre circa 60 kg di cenere, per cui WPSA costituiscono il 6% del prodotto iniziale.

La produzione di carta è estesa in tutto il mondo e, nel corso degli anni la sua produzione si è intensificata, generando più rifiuti.

Nonostante la digitalizzazione abbia comportato una contrazione mondiale del mercato della carta grafica, in generale emerge una crescita complessivamente continua nell'industria della cellulosa e della carta, vista la crescente richiesta nel mercato per altre applicazioni, come cartone e carta da imballaggio, carta velina, ecc. Pertanto, la cellulosa e la carta sono un rifiuto consistente oggi e l'Europa ne è il secondo produttore mondiale, con il 25% della produzione. La produzione di cellulosa e carta comporta, infatti, 11 milioni di tonnellate di rifiuti all'anno.

In generale, i fanghi vengono smaltiti nel terreno come fertilizzante agricolo, oppure vengono impiegati negli impianti di cogenerazione presso la cartiera stessa, o vengono smaltiti in discarica.

In misura minore vengono impiegati per altre applicazioni come la costruzione di riempimenti di terrapieni o la stabilizzazione degli strati di pavimentazione.

I fanghi delle cartiere sono composti da diverse mineralogie che dipendono dal processo industriale, dal rapporto tra carta vergine/riciclata utilizzata come materia prima e dai componenti inorganici presenti. In letteratura è stato riscontrato che i principali costituenti sono silice SiO_2 , calcio CaO e allumina Al_2O_3 e, anche se WPSA ha una composizione eterogenea al

variare dei campioni analizzati, in genere la sua composizione, per lo stesso impianto, è allineata nel tempo.

Queste ceneri si presentano con particelle porose ed eterogenee con una potenziale attività pozzolanica. La porosità è molto diffusa e irregolare a causa della sua natura fibrosa e questo implica che l'umidità viene trattenuta nei pori e tra le fibre che rappresentano un ostacolo per la sua fuoriuscita. Ciò comporta che questa cenere assorbe molta acqua e, se impiegata nelle malte, potrebbe comprometterne la lavorabilità.

Le condizioni di combustione giocano un ruolo fondamentale nelle caratteristiche di pozzolanicità delle ceneri. Durante il processo di combustione i composti organici vengono bruciati a temperature comprese tra 350 e 500 °C circa, mentre le cariche minerali e i sali inorganici vengono trasformati nei corrispondenti ossidi a temperature più elevate (circa 700°C)⁶⁷ inducendo la formazione di materiale pozzolanico. A tal proposito i ricercatori propongono un approccio alternativo alla combustione incontrollata dei fanghi delle cartiere, in modo che possano essere impiegati nelle miscele e nei calcestruzzi.

2.7.1 Impiego di WPSA e risultati ottenuti

Molti studi e sperimentazioni confermano che WPSA può essere utilizzato come materiale da impiegare nelle malte e calcestruzzi. Questo potrebbe comportare notevoli vantaggi poiché si possono ridurre i costi legati allo smaltimento di questo scarto.

Si è visto che WPSA comporta un effetto benefico nel momento in cui viene miscelato con l'acqua, poiché genera una soluzione altamente alcalina, che porta al rilascio di fasi più reattive come Al_2O_3 e SiO_2 , tipico dei materiali cementizi o pozzolanici, comportando dei benefici in termini di resistenza a compressione⁶⁸. Però, siccome le particelle che compongono queste ceneri hanno un'elevata porosità, il loro impiego potrebbe comprometterne la lavorabilità⁶⁹ poiché assorbono più acqua rispetto al cemento. Infatti, le miscele in cui vengono impiegate necessitano

⁶⁷ I. Vegas, M. Frías, J. Urreta e J. T. San José nel 2006 hanno constatato che il processo di combustione ha un effetto diretto sull'attività pozzolanica di WPSA e la reattività pozzolanica è stata massima quando il materiale è stato bruciato a 700 °C per due ore.

⁶⁸ M. I. Malik nel 2013 ha condotto una sperimentazione comparando diverse miscele di calcestruzzo con diverse percentuali di WPSA in sostituzione al cemento. In particolare è stata studiata la percentuale di sostituzione del 10%, 20% e 30% e le prestazioni meccaniche dei campioni realizzati sono state confrontate con le resistenze restituite dal campione di controllo, ovvero quello senza filler, dopo una stagionatura di 7 e 28 giorni. I risultati hanno mostrato che c'è stato un aumento della resistenza alla compressione con il 5% di filler in sostituzione al cemento, dopodiché, all'aumentare della percentuale di sostituzione, la resistenza a compressione è diminuita rispetto ai campioni senza filler. La resistenza alla compressione massima misurata a 7 giorni di stagionatura è stata del 10% in più rispetto a quella del campione di riferimento, mentre a 28 giorni di stagionatura è stata del 15% in più rispetto a quella del campione di riferimento.

⁶⁹ M. I. Malik nel 2013 ha desunto che WPSA può essere impiegato in sostituzione al cemento fino al 5% in peso e con una granulometria inferiore a 90 µm per evitare che la lavorabilità diminuisca.

di un maggiore rapporto acqua/legante, penalizzando la resistenza alla compressione delle malte stesse⁷⁰. È proprio per questo motivo che si consiglia una percentuale in sostituzione al cemento del 5%⁷¹, quindi WPSA è adatto in piccole quantità di miscele di calcestruzzo in sostituzione del cemento. Inoltre si è visto che riducono i tempi di presa iniziale e finale delle paste cementizie⁷². Essendo ceneri molto leggere, comportano un alleggerimento del calcestruzzo e il peso diminuisce all'aumentare della percentuale di filler immesso⁷³.

2.7.2 Riferimenti

Si riportano di seguito i principali dei riferimenti bibliografici analizzati inerenti alla cenere derivanti dai fanghi delle cartiere.

M. A. Fauzi, H. Sulaiman, A. R. M. Ridzuan, and A. N. Azmi, “The effect of recycled aggregate concrete incorporating waste paper sludge ash as partial replacement of cement,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1774, no. October 2016, 2016, doi: 10.1063/1.4965063.

H. Baloochi, D. Aponte, and M. Barra, “Soil stabilization using waste paper fly ash: Precautions for its correct use,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 23, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/app10238750.

M. F. Azrizal, M. N. Noorsuhada, M. F. P. M. Latif, M. F. Arshad, and H. Sulaiman, “The properties of wastepaper sludge ash and its generic applications,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1349, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1349/1/012087.

⁷⁰ A. M. M. Nazar, N. F. Abas e M. A. Othuman Mydin nel 2014 hanno comparato diverse miscele di calcestruzzo con diverse percentuali di WPSA in sostituzione al cemento. In particolare è stata studiata la percentuale di sostituzione del 10%, 20% e 30% e le prestazioni meccaniche dei campioni realizzati sono state confrontate con le resistenze restituire dal campione di controllo, ovvero quello senza filler. I risultati hanno mostrato un decrescere della resistenza a compressione al crescere della percentuale di filler. E questo può essere attribuito al rapporto acqua/legante elevato.

⁷¹ M. I. Malik, “Study of Concrete Involving Use of Waste Glass as Partial Replacement of Fine Aggregates,” *IOSR J. Eng.*, vol. 3, no. 7, pp. 08–13, 2013, doi: 10.9790/3021-03760813.

Anche Banevičienė, Malaiškienė, Vaičienė e Boris, nel 2019 in “The Possibilities of Paper Sludge Waste (PSw) Utilization in Cement Materials,” affermano che la percentuale ottimale è del 5%. Infatti hanno preparato cinque miscele, con 2,5%, 5%, 7,5% e 10% di WPSA sostituito in pesa al cemento. I campioni con il 5% di sostituzione mostravano una resistenza alla compressione è aumentata di circa il 7% rispetto al campione di controllo. Dopodiché, all'aumentare della percentuale di sostituzione, la resistenza a compressione è diminuita.

⁷² I. Vegas, M. Frías, J. Urreta e J. T. San José nel 2006 hanno appurato che impiegando WPSA in misura del 10% del legante in una pasta cementizia, viene modificato leggermente il tempo di presa iniziale del cemento, accelerando il processo di 30 minuti.

⁷³ M. I. Malik nel 2013 ha riscontrato una diminuzione del 4,58% del peso medio con una percentuale di sostituzione del 20%.

P. M. S. Bujulu, A. R. Sorta, G. Priol, and A. J. Emdal, “Potential of Wastepaper Sludge Ash To Replace Cement in Deep,” *Annu. Conf. Transp. Assoc. Canada*, pp. 1–17, 2007.

Y. Ganesan, K. Sakthivel, V. Murugan, and S. Duraisamy, “Research Analysis of Paper Sludge and Paper Ash Bricks,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 955, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/955/1/012057.

S. Kumar, S. Amit, and M. R. Islam, “Application of Paper Sludge Ash in Construction Industry-a review,” *Proc. 3rd Int. Conf. Civ. Eng. Sustain. Dev.*, no. February 2016, 2017.

A. M. M. Nazar, N. F. Abas, and M. A. Othuman Mydin, “Study on the utilization of paper mill sludge as partial cement replacement in concrete,” *MATEC Web Conf.*, vol. 10, 2014, doi: 10.1051/mateconf/20141002001.

N. Khalid, M. Mukri, F. Kamarudin, and M. F. Arshad, “Clay soil stabilized using waste paper sludge ash (WPSA) mixtures,” *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 17 I, pp. 1215–1225, 2012.

Banevičienė, Malaiškienė, Vaičienė, and Boris, “The Possibilities of Paper Sludge Waste (PSw) Utilization in Cement Materials,” *Proceedings*, vol. 16, no. 1, p. 34, 2019, doi: 10.3390/proceedings2019016034.

I. Vegas, M. Frías, J. Urreta, and J. T. San José, “Obtaining a pozzolanic addition from the controlled calcination of paper mill sludge. Performance in cement matrices,” *Mater. Constr.*, vol. 56, no. 283, pp. 49–60, 2006, doi: 10.3989/mc.2006.v56.i283.8.

C. Cherian and S. Siddiqua, “Pulp and paper mill fly ash: A review,” *Sustain.*, vol. 11, no. 16, pp. 1–16, 2019, doi: 10.3390/su11164394.

V. Logeswaran and G. Ramakrishna, “Waste Paper Sludge Ash - State of art,” *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, no. 9, pp. 2333–2338, 2019, doi: 10.35940/ijitee.i8572.078919.

M. I. Malik, “Study of Concrete Involving Use of Waste Glass as Partial Replacement of Fine Aggregates,” *IOSR J. Eng.*, vol. 3, no. 7, pp. 08–13, 2013, doi: 10.9790/3021-03760813.

Capitolo 3

REQUISITI NORMATIVI

3.1 Regolamento Europeo 305/11

Il Regolamento Europeo n. 305/2011 - CPR Regolamento da Costruzione (UE) - entrato in vigore il 1° luglio del 2013, in sostituzione della Direttiva 89/106/CEE, stabilisce, per i fabbricati che decidono di mettere sul mercato dei prodotti da costruzione, dei percorsi armonizzati per la commercializzazione. In particolare, se il prodotto da costruzione ricade nell'ambito di una cosiddetta norma armonizzata, allora il fabbricante è tenuto a produrre una DoP (Dichiarazione di Prestazione), una documentazione tecnica e ad apporre la marcatura CE sul prodotto.

3.2 Norme armonizzate

Le norme armonizzate - pubblicate nella Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea - definiscono attraverso l'allegato informativo ZA il sistema di valutazione e i criteri di verifica della costanza della prestazione dei prodotti da costruzione. Inoltre, attraverso le caratteristiche essenziali del prodotto (tabella ZA.1), consentono il rispetto dei sette requisiti di base delle opere da costruzione:

- Sicurezza in caso di incendio;
- Igiene, salute e ambiente;
- Resistenza meccanica e stabilità;
- Sicurezza e accessibilità in uso;
- Protezione contro il rumore;
- Risparmio energetico e ritenzione di calore;
- Uso sostenibile delle risorse naturali.

3.3 Dichiarazione di prestazione

La Dichiarazione di Prestazione (DoP) è sicuramente la novità più importante introdotta dal CPR. Infatti, attraverso la DoP che sostituisce la precedente Dichiarazione di Conformità dei prodotti da costruzione, il produttore dichiara le prestazioni del prodotto e si assume di fatto la

responsabilità legale della conformità dello stesso alla norma armonizzata cogente. Per tale motivo, mediante la compilazione della DoP, il fabbricante è obbligato alle seguenti informazioni:

- Norma armonizzata;
- Gli usi previsti del prodotto;
- Il sistema di valutazione e verifica della costanza di prestazione del prodotto;
- Codice identificativo dell'organismo notificato di certificazione del prodotto;
- Caratteristiche essenziali.

3.4 La marcatura CE

In seguito alla compilazione della DoP, il fabbricante appone la marcatura CE sulla confezione del prodotto. In tal modo, il produttore dichiara quanto segue:

- la conformità del prodotto alle caratteristiche riportate nella DoP;
- la costanza delle prestazioni attraverso l'implementazione di sistema di verifica e di valutazione;
- Il rispetto di tutti i requisiti stabiliti nel Regolamento Europeo 305/2011.

3.5 Valutazione e verifica della costanza di prestazione

L'allegato V del CPR stabilisce cinque differenti sistemi di Valutazione e Verifica della Costanza della Prestazione (VVCP) con livelli di coinvolgimento degli Organismi notificati crescenti.

VVCP⁷⁴	COMPITI DEL FABBRICANTE	COMPITI DELL'ORGANISMO NOTIFICATO	DOCUMENTI PER IL MARCHIO CE
1+	Controllo della produzione in fabbrica (FPC); Ulteriori prove su campioni prelevati in fabbrica in conformità del piano di prova prescritto.	L'Organismo Notificato rilascia il certificato di costanza della prestazione del prodotto sulla base dei seguenti elementi: (i) Determinazione del prodotto-tipo; (ii) Ispezione iniziale dello stabilimento di produzione e del controllo della produzione in fabbrica; (iii) Sorveglianza, valutazione e verifica continuativa del controllo della produzione in fabbrica; (iv) Prove di controllo di campioni prelevati presso lo stabilimento o i depositi del Fabbricante	Dichiarazione di Prestazione (DoP); Certificato di costanza della prestazione del prodotto.

⁷⁴ Allegato V – Regolamento Europeo n. 305/2011

1	Controllo della produzione in fabbrica (FPC); Ulteriori prove su campioni prelevati in fabbrica in conformità del piano di prova prescritto.	L'Organismo Notificato rilascia il certificato di costanza della prestazione del prodotto sulla base dei seguenti elementi: (i) Determinazione del prodotto-tipo; (ii) Ispezione iniziale dello stabilimento di produzione e del controllo della produzione in fabbrica; (iii) Sorveglianza, valutazione e verifica continuativa del controllo della produzione in fabbrica	Dichiarazione di Prestazione (DoP); Certificato di costanza della prestazione del prodotto.
2+	Determinazione del prodotto-tipo; Controllo della produzione in fabbrica (FPC); Ulteriori prove su campioni prelevati in fabbrica in conformità del piano di prova prescritto	L'Organismo Notificato rilascia il certificato di conformità del controllo della produzione in fabbrica sulla base dei seguenti elementi: (i) Ispezione iniziale dello stabilimento di produzione e del controllo della produzione in fabbrica; (ii) Sorveglianza, valutazione e verifica continuativa del controllo della produzione in fabbrica.	Dichiarazione di Prestazione (DoP); Certificato di costanza della prestazione del prodotto.
3	Controllo della produzione in fabbrica (FPC)	Il laboratorio di prova notificato determina il prodotto-tipo in base a Prove tipo iniziale (ITT) (sulla scorta del campionamento effettuato dal fabbricante), a calcoli di tipo, a valori desunti da tabelle o a una documentazione descrittiva del prodotto.	Dichiarazione di Prestazione (DoP).
4	Determinazione del prodotto-tipo; Controllo della produzione in fabbrica (FPC)	Non è previsto alcun intervento da parte di terzi	Dichiarazione di Prestazione (DoP).

Tabella 2: Schematizzazione Allegato V – Regolamento Europeo n. 305/2011

3.6 Deroche alla redazione della dichiarazione di prestazione

La dichiarazione di prestazione non è richiesta per i prodotti da costruzione che rientrano in una norma armonizzata⁷⁵, quando:

⁷⁵ Capo 2, articolo 5, Regolamento Europeo 305/11

1. il prodotto da costruzione sia fabbricato in un unico esemplare o su specifica del committente in un processo non in serie a seguito di una specifica ordinazione e installato in una singola ed identificata opera di costruzione da parte di un fabbricante che è responsabile della sicurezza dell'incorporazione del prodotto da costruzione nelle opere di costruzione, conformemente alle normative nazionali applicabili e sotto la responsabilità dei soggetti incaricati della sicurezza dell'esecuzione delle opere di costruzione designati ai sensi delle normative nazionali applicabili;
2. il prodotto da costruzione sia fabbricato in cantiere per essere incorporato nelle rispettive opere di costruzione conformemente alle norme nazionali applicabili e sotto la responsabilità dei soggetti incaricati della sicurezza dell'esecuzione delle opere di costruzione designati ai sensi delle normative nazionali applicabili;
3. il prodotto da costruzione sia fabbricato con metodi tradizionali o con metodi atti alla conservazione del patrimonio e mediante un procedimento non industriale per l'appropriato restauro di opere di costruzione formalmente protette come parte di un patrimonio tutelato o in ragione del loro particolare valore architettonico o storico, nel rispetto delle normative nazionali applicabili.

Inoltre, nel caso di prodotti da costruzione rientranti nell'ambito di applicazione di una norma armonizzata e fabbricati in un unico esemplare o su specifica del committente in un processo non in serie a seguito di una specifica ordinazione e installati in una singola ed identificata opera di costruzione l'art. 38 del CPR⁷⁶ specifica quanto segue: *“il fabbricante può sostituire la parte relativa alla valutazione della prestazione del sistema applicabile, di cui all'allegato V, con una documentazione tecnica specifica che dimostra la conformità di tale prodotto ai requisiti applicabili e l'equivalenza delle procedure utilizzate con le procedure fissate nelle norme armonizzate”*.

3.7 Norme armonizzate per intonaci e malte per muratura

Lo scopo della ricerca è quello di progettare una malta da intonaco che abbia caratteristiche prestazionali di una malta per interventi di recupero e che sia in grado di rispondere pienamente al requisito relativo all'uso sostenibile delle risorse naturali, come specificato nell'articolo 1, comma 55, del Regolamento Europeo 305/11:

“Il requisito di base delle opere di costruzione relativo all'«uso sostenibile delle risorse naturali» dovrebbe in particolare tener conto della possibilità di riciclo delle opere di costruzione, dei loro materiali e delle loro parti dopo

⁷⁶ Capo 1, Articolo 38, Regolamento Europeo 305/11

la demolizione, della durabilità delle opere di costruzione e dell'uso di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili nelle opere di costruzione".⁷⁷

Per tale motivo, si prende in considerazione quanto stabilito dalla UNI EN 998-1, la norma armonizzata per gli intonaci da interni ed esterni.

3.8 UNI EN 998-1

Come specificato nello scopo e campo di applicazione, tale norma contiene le definizioni e i requisiti prestazionali relativi alle malte per intonaci interni/esterni basate su leganti inorganici. Non sono trattate invece le malte in cui il principale agente legante è il solfato di calcio.⁷⁸ Pertanto, in fase di sperimentazione – come si evince nei successivi capitoli 5 e 6 – sono state eseguite tutte le prove per la caratterizzazione delle prestazioni richieste dal prospetto 1 e 2 della UNI EN 998-1. Essendo una norma armonizzata, è dotata di un'appendice ZA in cui sono specificate le condizioni per la marcatura CE delle malte per intonaci destinate agli impieghi indicati nel prospetto ZA.1, in cui sono specificate anche le varie caratteristiche essenziali.

prospetto ZA.1 Scopo e punti pertinenti			
Prodotto: Malte per intonaci interni ed esterni prodotte in fabbrica come trattate in 1 della presente norma, comprendenti i tipi seguenti: - Malta per scopi generali (GP); - Malta leggera (LW); - Malta colorata per intonaci esterni (CR); - Malta monostrato per utilizzo esterno (OC); - Malta per risanamento (R); - Malta per isolamento termico (T). Impiego previsto: In pareti, soffitti, colonne e tramezzi come trattati nello scopo e campo di applicazione della presente norma.			
Caratteristiche essenziali	Punti relativi ai requisiti della presente norma europea	Livelli e/o classi	Note/Tipo di dichiarazione
Reazione al fuoco (per le malte per intonaci interni/esterni destinate ad essere utilizzate in elementi soggetti a requisiti anticendio)	5.2.2	Euroclassi da A1 a F	Euroclasse dichiarata
Assorbimento d'acqua (per le malte per intonaci esterni destinate ad essere utilizzate in elementi esterni)	Prospetto 2, L5	Nessuno	Categorie (da W 0 a W 2) ad eccezione di R per la quale sono richiesti valori dichiarati di assorbimento d'acqua ($\leq 0,3 \text{ kg/m}^2$ dopo 24 h)
Permeabilità all'acqua dopo cicli di gelo/disgelo (solo malta per intonaco esterno OC)	Prospetto 2, L7	Nessuno	Permeabilità all'acqua ($\leq 1 \text{ ml/cm}^2$ dopo 48 h)
Permeabilità al vapore acqueo (per le malte per intonaci esterni destinate ad essere utilizzate in elementi esterni)	Prospetto 2, L8	Nessuno	Coefficiente dichiarato μ (≤ 15 per R e T)

Figura 4: Prospetto ZA.1 Parte 1 della UNI EN 998-1

⁷⁷ Articolo 1, comma 55, Regolamento Europeo 305/11

⁷⁸ Capitolo 1, UNI EN 998-1

prospetto ZA.1 **Scopo e punti pertinenti** (Continua)

Caratteristiche essenziali	Punti relativi ai requisiti della presente norma europea	Livelli e/o classi	Note/Tipo di dichiarazione
Adesione (tutte le malte per intonaci interni/esterni ad eccezione di OC)	Prospetto 2, L3	Nessuno	Valore dichiarato (N/mm ²) e modo di rottura (FP)
Adesione dopo i cicli di gelo/disgelo (solo malta per intonaco esterno OC)	Prospetto 2, L4	Nessuno	Valore dichiarato (N/mm ²) e modo di rottura (FP)
Conducibilità termica/Massa volumica (per le malte per intonaci interni/esterni destinate ad essere utilizzate in elementi soggetti a requisiti termici ad eccezione di T)	Prospetto 2, L9	Nessuno	Valori dichiarati nel prospetto
Conducibilità termica (solo per le malte T)	Prospetto 2, L10	Nessuno	Categorie (da T1 a T2)
Durabilità della malta OC (contro il gelo/disgelo)	5.2.3.1 e prospetto 2, L4 e L7	Nessuno	Dichiarazione come da 5.2.3.1
Durabilità di tutte le malte ad eccezione OC (per utilizzo esterno)	5.2.3.2 e prospetto 2, L3 e L5	Nessuno	Dichiarazione come da 5.2.3.2
Sostanze pericolose	Nota di ZA.1 di cui sopra	Nessuno	In conformità a ZA.3 (penultimo paragrafo)

Figura 5: Prospetto ZA.1 Parte 2 della UNI EN 998-1

I prospetti ZA.2 e ZA.3 specificano invece il sistema di attestazione di conformità (4) e la ripartizione dei compiti tra Fabbrikante e organismo notificato, relativo alla valutazione di conformità.

prospetto ZA.2 **Sistema di conformità**

Prodotto/i	Impiego/impieghi previsto/i	Livello/i o classe/i	Sistema/i di attestazione di conformità
Malte prodotte in fabbrica per intonaci interni/esterni	Nelle finiture per pareti, colonne, tramezzi e soffitti	-	4 ^a)
a) Vedere Direttiva 89/106/CEE (CPD) Allegato III.2.(ii), terza possibilità.			

Figura 6: Prospetto ZA.2 della UNI EN 998-1

prospetto ZA.3 **Assegnazione dei compiti per la valutazione di conformità per la malta per intonaci interni/esterni sotto il sistema 4**

Compiti		Contenuto del compito	Punti della valutazione di conformità da applicare
Compiti del produttore	Controllo di produzione di fabbrica (C.P.F)	Parametri relativi a tutte le caratteristiche pertinenti del prospetto ZA.1	8.3
	Prove di tipo iniziale	Tutte le caratteristiche pertinenti del prospetto ZA.1	8.2

Figura 7: Prospetto ZA.3 della UNI EN 998-1

3.9 Esempio Dichiarazione di Prestazione DoP:

DICHIARAZIONE DI PRESTAZIONE N.1

- Codice di identificazione unico del prodotto-tipo: Intonaco ricerca
- Usi previsti: Malta da intonaco a prestazione garantita per usi generali (GP) in interno ed esterno su pareti, soffitti, colonne e partizioni
- Fabbricante: Manuela Compagnone - Università degli Studi di Napoli Federico II
- Sistemi di VVCP: sistema 4
- Norme armonizzate: EN 998-1
- Organismi notificati: L'ente notificato non ha compiti da svolgere
- Prestazioni dichiarate:

Caratteristiche essenziali	Prestazioni
Reazione al fuoco:	Classe A1
Assorbimento d'acqua:	W1
Permeabilità al vapore:	μ 25
Adesione:	$\geq 0,3$ N/mm ² – FP: B
Conduttività termica a (λ_{10} , dry):	0,93 W/m·K (val. medio tab; P=50%)
Durabilità:	NPD
Sostanze pericolose:	vedi SDS

- Documentazione Tecnica Appropriata: Classe di reazione al fuoco dichiarata senza necessità di test, in conformità alla decisione 96/603/CE della Commissione e successive modifiche. Contenuto organico <1% in massa.
- Informazioni REACH:

La presente dichiarazione di responsabilità viene emessa in conformità al Regolamento (UE) n. 305/2011 e al Regolamento delegato della Commissione (UE) n. 574/2014, sotto la sola responsabilità del fabbricante sopra identificato.

Firmato a nome e per conto del fabbricante _____

 01234
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 10 01234-CPD-00234
EN 998-2:2010 <u>Designed</u> general purpose masonry mortar for external use in elements subject to structural requirements Compressive strength: Category M 5 Initial shear strength: 0,15 N/mm² (tab. value) Contents of chloride: 0,07 % Cl Reaction to fire: Class A1 Water absorption: 0,05 kg/(m² × min^{0,5}) Water vapour permeability: μ 15/35 Thermal conductivity: ($\lambda_{10, dry}$) 0,83 W/mK (tab. mean value; P = 50 %) Durability (against freeze-thaw): evaluation based on provisions valid in the intended place of use of the mortar

Figura 8: Esempio marcature CE

3.10 Riferimenti

Il Regolamento Europeo n. 305/2011 - CPR Regolamento da Costruzione (UE)

Direttiva 89/106/CEE

UNI EN 998 - 1 “Specifiche per malte per opere murarie - Malte per intonaci interni ed esterni”

CONCLUSIONI

Al termine di questo percorso di ricerca è opportuno trarre delle conclusioni ed esprimere delle riflessioni sul lavoro svolto. Gli obiettivi fissati ad inizio ricerca sono stati molti: ipotizzare nuovi filler, capire l'interazione del filler con il legante, progettare una nuova malta - per scopi generali o da risanamento - e garantire la sua applicabilità sul patrimonio costruito. Tra vari sforzi, molti dei quali sono stati raggiunti, si sono poste le basi per un prosieguo della ricerca in questo settore.

Un primo traguardo raggiunto è stato quello di aver confermato l'ipotesi del comportamento pozzolanico dei filler ipotizzati CLF e CP. Appurare la fattibilità del loro impiego è stata una grande vittoria perché sono state validate le deduzioni conseguite dallo studio dello stato dell'arte. La letteratura studiata in merito è stata vasta e si è configurata a macchia di leopardo per cui ogni filler riscontrato, alternativo alla pozzolana naturale, sembrava apparire come uno *spot* in questo ampio scenario, senza avere alcuna connessione con gli altri, ma in realtà, anche se i filler possono essere studiati singolarmente, hanno delle analogie tra di loro. Sono state proprio queste analogie a dare le basi e a costruire le supposizioni fatte. Inoltre, altra nota positiva è che i filler ipotizzati costituendo un rifiuto, richiedono tempi e costi di smaltimento; quindi, valutarne le potenzialità di riciclo è una scelta sostenibile.

L'impegno preponderante nel corso della sperimentazione è stato quello di valutare la miscela migliore tra quelle progettate e, di conseguenza, definire la percentuale ottimale di filler in sostituzione al legante. In linea generale si può confermare che la combinazione migliore è senza dubbio quella con rapporto legante/aggregato pari 1:2 e con il 10% di filler - sia CLF che CP - in sostituzione al legante. Ovviamente queste proporzioni sono contestualizzate in funzione dei materiali impiegati che potrebbero restituire risultati differenti se non si cerca di mantenere una standardizzazione degli stessi. I provini fatti sono stati veramente tanti, per cui il quantitativo di materiale necessario è stato altrettanto notevole. Per cercare di mantenere lo standard succitato, i materiali, quindi, sono stati recuperati volta per volta in modo da averli sempre nelle stesse condizioni di vendita. Questo perché, ad esempio, la calce potrebbe carbonatare se non correttamente tenuta, oppure la sabbia si potrebbe inumidire e quindi influenzare il rapporto acqua/legante. Lo stesso ragionamento è stato replicato per i filler ipotizzati; infatti, le ceneri CLF e CP sono state sempre prelevate negli stessi luoghi.

Questo per cercare di mantenere le condizioni al contorno quanto più costanti possibili ed evitare il più possibile ogni forma di condizionamento delle prestazioni delle miscele progettate.

I risultati ottenuti incoraggiano verso la combinazione succitata. Questi però non sono sufficienti a definire queste malte come malte da risanamento. I risultati evidenziano delle prestazioni meccaniche ottimali con rapporto legante/aggregato pari 1:2 e con il 10% di filler in sostituzione al legante. Mentre la miscela 10 CP V 1:2 può essere classificata come CSII, la miscela 10 CLF V 1:2 è classificabile come CSI, ma la sua resistenza a compressione è di poco inferiore al minimo della categoria CSII. Pertanto, la miscela 10 CLF V 1:2 è stata trattata come potenzialmente CSII perché migliorabile facilmente in termini di prestazioni meccaniche; quindi, è stata considerata in egual modo della sua miscela speculare con CP. Per queste due miscele, le prove di resistenza meccanica, aderenza e permeabilità al vapore acqueo vanno verso una direzione che prevale rispetto alle altre, ma questo non può dirsi per i risultati ottenuti dalla prova di assorbimento d'acqua, poiché non rispettano i requisiti minimi idonei per le malte da risanamento. Tutte le miscele hanno presentato dei risultati tra loro confrontabili in quanto abbastanza allineati. Sono miscele che assorbono tanto, ma sono soggette ad una risalita capillare dell'acqua elevata > 5 mm come definito dalla UNI EN 998-1. Pertanto tutte le miscele progettate sono malte da intonaco che possono essere classificate come GP, ovvero per scopi generali.

L'assorbimento d'acqua per capillarità purtroppo è stata la problematica consistente, poiché i campioni addirittura risultavano saturi d'acqua dopo 24 ore di immersione; quindi, questo aspetto è sicuramente da migliorare, non solo per le miscele candidate ad essere classificate come da risanamento R, ma anche per tutte le altre.

Vista la problematica, questo intonaco potrebbe essere impiegato, per le pareti che non siano a contatto con il terreno come ad esempio le pareti interne di un edificio, oppure come finitura dell'intradosso dei solai.

A prescindere da questo, si ritiene comunque che il 10% di filler in sostituzione alla calce idrata sia la percentuale di massima ottimizzazione e amplificazione dei risultati; dopodiché, all'aumentare della percentuale di filler, le prestazioni iniziano a decrescere. Sarebbe interessante valutare intervalli di sostituzione più piccoli nell'intorno del 10% per analizzarne i risultati e capire quale sia effettivamente il massimo di amplificazione delle prestazioni. Quello che è emerso da questo percorso è che progettare una miscela è un equilibrio molto sottile e presumibilmente non ci può essere un massimo assoluto, per il quale tutta la silice amorfa disponibile reagisca con l'idrossido di calcio. Questo perché per quanto ci si impegni a garantire la standardizzazione e la costanza dei materiali impiegati, c'è sempre un minimo di variabilità degli stessi. Questo vale soprattutto per i filler ipotizzati che riscontrano la problematica comune a tutti i filler di derivazione vegetale. Infatti, essendo di origine lignea, il contenuto di silice dipende molto dal terreno di crescita, le condizioni climatiche, l'impiego di fertilizzanti e dal luogo in cui

crescono le piante d'origine. Questo è il motivo per cui, probabilmente, al 15% di sostituzione i risultati sono un po' altalenanti, se confrontati con i campioni di riferimento. È come se fosse una condizione *borderline*. Ciò che è certo è che la percentuale di sostituzione consigliabile è il 10%, dopo la quale si inizia ad avere un decadimento delle prestazioni all'aumentare della quantità di filler e con il 20% di sostituzione si ha un notevole decremento delle prestazioni.

Il percorso intrapreso è stato fondamentale per valutare l'interazione del filler con la calce idrata perché il traguardo cardine è stato quello di dimostrare la fattibilità di impiego dei filler ipotizzati e di valutare in che misura sono stati rapportati al legante.