



THE USE OF WASTE MATERIALS FROM A BRICK KILN TO PRODUCE HYDRAULIC MORTARS BASED ON SLAKED LIME. I. EVALUATION OF MATERIALS REACTIVITY

B. Megna

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale(DICAA)

Università di Palermo

Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy

e-mail: bartolomeo.megna@unipa.it

Key words: hydraulic mortars, crushed bricks mortar, waste materials, thermal analysis, pozzolanic reaction

Parole chiave: malte idrauliche, cocciopesto, materiali di scarto, analisi termica, reazione pozzolanica.

Abstract. *This paper deals with the production of crushed brick mortars using waste materials from a brick factory. Part of the quarried material is not suitable for the production, as the clay is too plastic. Both this clay and the defective end products from the kiln were tested as reactive aggregates for hydraulic mortars based on slaked lime. The clay was heated in a muffle furnace at three different temperatures and then ground into three different particle sizes, to point out the influence of such parameters on the reactivity of the aggregates with respect to the slaked lime. Simultaneous Thermal Analysis and chemical tests were performed to investigate the properties of the crushed brick mortars and the influence of the aggregate characteristics.*

Sommario. *Questo lavoro prende in considerazione la possibilità di utilizzare i prodotti di recupero da una linea di produzione di laterizi come materie prime secondarie per la produzione di una malta idraulica a base di calce aerea, che costituisce un prodotto ad alto valore aggiunto. I materiali presi in considerazione sono sia gli scarti della produzione dei laterizi, sia un'argilla presente nelle stratificazioni della cava che alimenta l'impianto, che attualmente non viene utilizzata perché troppo grassa. Quest'ultima è stata cotta in un forno a muffola a tre diverse temperature, comprese tra quella di decomposizione dei minerali argillosi e quella di formazione della mullite, e poi setacciata in tre diversi tagli granulometrici, per studiare l'influenza di entrambi i parametri, temperatura e granulometria, sulla reattività nei confronti della calce. Sia i rottami di laterizio sia l'argilla cotta ad hoc sono stati utilizzati quali aggregati reattivi per il confezionamento di malte a cocciopesto a base di calce aerea. L'idraulicità dei diversi sistemi ottenuti è stata valutata sia mediante il saggio di pozzolanicità sia mediante analisi termica simultanea.*

1 INTRODUZIONE

È noto da oltre due millenni che mescolando calce aerea e laterizi macinati si ottiene un sistema lapideo artificiale, detto malta a cocchiopesto, che rispetto ad una malta aerea presenta migliori proprietà meccaniche e minore permeabilità. In diversi siti archeologici sono presenti pavimentazioni ad *opus signinum*, costituite da uno strato superficiale di cocchiopesto, nel quale talvolta rade tessere lapidee delineano decori geometrici o figurati, oppure vere e proprie pavimentazioni musive, quali l'*opus tessellatum* e l'*opus vermiculatum*, nelle quali lo strato superficiale è costituito da tessere lapidee o vitree, ma è presente anche il cocchiopesto negli strati del sottofondo, e in particolare nel *rudus*, secondo quanto prescritto da Vitruvio¹. Inoltre l'efficienza delle grandi opere idrauliche dell'Impero Romano, destinate al trasporto e all'accumulo dell'acqua, si basava non solo sulla straordinaria capacità di progettare ma anche sulla possibilità di rivestire canali e vasche con strati impermeabili di cocchiopesto².

L'acquisizione di tali proprietà nelle malte a cocchiopesto è dovuta alla reazione tra la calce aerea e il metacaolino del laterizio, che porta alla formazione di silicati e alluminati di calcio idrati, responsabili della cosiddetta "idraulicità della malta". Proprietà simili presentano le malte pozzolaniche, anch'esse ben note ai Romani, che si ottengono mescolando calce aerea e sabbia pozzolanica, la *pulvis puteolana* cavata nell'area vesuviana, oggi sostituita in larga misura da materiali ad attività pozzolanica di sintesi industriale.

A partire dalla seconda metà dell'ottocento l'uso di questi sistemi leganti è stato quasi del tutto soppiantato dall'avvento del cemento, legante idraulico per eccellenza, che offre proprietà meccaniche più elevate e permeabilità più bassa. Da qualche decennio, tuttavia, nell'ambito del recupero del patrimonio edilizio si è risvegliato un certo interesse per le calce idrauliche e per i sistemi idraulici a base di calce aerea che, sia per le loro proprietà meccaniche intermedie tra la calce aerea e il cemento sia per le loro caratteristiche chimiche, risultano più compatibili con le murature degli edifici storici rispetto al cemento, il cui uso nel restauro architettonico talvolta ha prodotto dissesti gravi e difficilmente rimediabili.

Per tali ragioni diversi ricercatori hanno rivolto recentemente il loro interesse verso lo studio di questo tipo di sistemi²⁻⁶. In questo contesto, su sollecitazione di un gruppo industriale che produce sia calce aerea che laterizi, si è avviato un progetto di ricerca sulla possibilità di riutilizzare i materiali di scarto della linea di produzione dei laterizi per formulare malte a cocchiopesto preconfezionate. In particolare si è posta l'attenzione su due materiali che costituiscono nell'impianto un impegnativo problema di smaltimento: i rottami di mattone e un'argilla grassa, presente nelle stratificazioni della cava di approvvigionamento, che viene utilizzata solo in minima percentuale per la preparazione degli impasti destinati al ciclo produttivo e che, se sottoposta ad un opportuno processo di cottura, potrebbe fornire un prodotto ricco di metacaolino, particolarmente idoneo allo scopo.

Le diverse fasi dello studio prevedono: a) la caratterizzazione dei materiali dal punto di vista mineralogico e chimico; b) la valutazione della loro pozzolanicità in funzione di alcuni parametri significativi, quali la temperatura di cottura e la granulometria; c) la caratterizzazione meccanica e la porosimetria delle malte a cocchiopesto confezionate con questi materiali; d) lo studio della risposta di tali malte alle aggressioni dell'ambiente, e in particolare all'azione delle acque solfatiche.

In questo lavoro vengono presentati i risultati delle prime fasi dello studio, relativi all'analisi dei materiali e alla valutazione della loro reattività.

Va evidenziato che il successo di questo progetto potrebbe portare da una parte alla formulazione di un prodotto a elevato valore aggiunto e dall'altra ad un interessante beneficio per l'ambiente, attraverso il recupero produttivo di materiali destinati a discarica.

2. MATERIALI E METODI

L'impianto di produzione dei laterizi è alimentato dall'argilla proveniente da una cava in territorio del Comune di Caccamo, situata nell'areale di affioramento della facies argillosa della Formazione Terravecchia, ascrivibile al Messiniano Inferiore-Tortoniano. La formazione è costituita, oltre che dalla suddetta facies argillosa, anche da un'alternanza di livelli argillosi con banchi di sabbie, arenarie e conglomerati, e superiormente da potenti placche di conglomerati grossolani. Essa costituisce il substrato su cui poggiano i Gessi del Messiniano, che affiorano nel rilievo che sovrasta la cava, la cui sommità è costituita dai Trubi, calcari marnosi del Pliocene inferiore, che a loro volta poggiano in paraconcordanza sui Gessi.

In particolare la stratigrafia della cava offre due diverse rocce alternate in strati sovrapposti: la prima di queste, che nel seguito di questo lavoro sarà denominata A1, è quella utilizzata per la produzione dei laterizi, la seconda invece, indicata come A2, è considerata di scarto perché troppo grassa, quindi inadatta al confezionamento dei laterizi, e viene aggiunta solamente in poche unità percentuali all'impasto per la linea di produzione.

Entrambe le argille sono state cotte a tre diverse temperature: 600°C, 700°C and 800°C. Già a partire da 600°C i minerali argillosi si decompongono, producendo miscele di ossidi di silicio e di alluminio (*metacaolino*) reattive nei confronti della calce. A temperature superiori agli 800°C tali ossidi tenderebbero a ricombinarsi tra di loro, producendo mullite e quarzo e rendendo il laterizio inerte rispetto alla calce. Nel seguito i diversi campioni di argille cotte sottoposti alla sperimentazione sono designati da una sigla che individua il tipo di argilla e la temperatura di cottura, ad esempio A1 600, seguita da un numero che si riferisce alla granulometria, espressa in μm , alla quale è stata ridotta l'argilla cotta per il confezionamento delle malte a cocchiopesto, come meglio specificato più avanti, ad esempio A1 600 <200.

L'altro materiale oggetto di questo studio è il rottame di mattone, che inevitabilmente si produce per lo scarto di tutti i pezzi che presentano difetti (deformazioni, fessurazioni etc.) dovuti al ciclo di cottura o a danneggiamento meccanico. Si tratta di un prodotto, chiamato Poroton, nel quale viene indotta artificialmente un'elevata macroporosità, introducendo nell'impasto argilloso una carica di materiali organici particellari, quali sfere di polistirolo espanso o residui solidi dell'industria olearia. I campioni di questo tipo sono designati nel seguito mediante la sigla Po e da un numero che si riferisce alla granulometria, ad esempio Po<500.

Poiché la granulometria degli aggregati sicuramente influenza in modo significativo la loro reattività nei confronti del grassello di calce, si è scelto di studiarne l'effetto mediante la separazione di tre diversi tagli granulometrici, ottenuti setacciando i mattoni macinati attraverso vagli a maglie quadrate di 500 μm , 200 μm e 100 μm rispettivamente e scartando il trattenuto sul primo setaccio.

Per quanto riguarda la calce, invece, in questa prima fase della ricerca non si è ritenuto utile introdurre ulteriori variabili, relative anche al legante, e pertanto tutte le malte a cocchiopesto sottoposte a sperimentazione sono state confezionate utilizzando una stessa calce commerciale, classificata come *fiore di calce*⁷.

Le malte sono state preparate usando un rapporto in volume aggregato/legante pari a 3:1 per ciascuna delle diverse granulometrie di aggregato. Il contenuto d'acqua è stato scelto in funzione della lavorabilità minima necessaria per riempire gli stampi, costituiti da cilindri di teflon, con diametro e altezza di 20 mm, tagliati lungo una generatrice e poggiati su una mattonella di ceramica, come mostrato nella figura 1. La poca considerazione per un parametro importante come il contenuto d'acqua delle malte, che ne influenza significativamente le proprietà meccaniche, è giustificata dal fatto che in questa prima fase

della ricerca esse sono state destinate esclusivamente ad analisi di tipo chimico fisico.

Dopo un periodo di presa di circa 24 ore, i provini sono stati sformati e lasciati a stagionare a 40°C e al 100% di umidità relativa, per garantire le migliori condizioni di indurimento.



Figura 1: Preparazione dei provini di malta per le prove di compressione.

Il lavoro di analisi è iniziato con la caratterizzazione delle argille A1 e A2 dal punto di vista mineralogico e petrografico, seguendo le indicazioni dell'AISA⁸.

La reattività delle argille cotte ad hoc e dei rottami di mattoni nei confronti della calce è stata valutata mediante il saggio di pozzolanicità previsto dalla norma UNI EN 196-5:1996.

Il grado di idraulicità delle malte è stato valutato attraverso l'analisi termica differenziale e termogravimetrica, ricavando un indicatore già utilizzato con successo nello studio di sistemi leganti idraulici di diversa natura⁹. Le misure sono state eseguite con un analizzatore termico simultaneo Netzsch mod. STA 409/2/6, sottoponendo i campioni ad una velocità di riscaldamento di 10°C/min.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Caratterizzazione delle argille

I minerali argillosi delle argille A1 e A2 sono stati identificati mediante diffrattometria a raggi X. In una prima fase si è eseguita l'analisi sul campione di argilla tal quale. Si è quindi proceduto a separare un campione che permettesse di evidenziare i minerali argillosi rispetto ad altre fasi presenti all'interno della roccia, come carbonati e quarzo. A tal fine si è operato un attacco acido per eliminare i carbonati e una separazione gravimetrica per ricavare la frazione di materiale di finezza inferiore a 2µm, che viene assunta come la fase argillosa della roccia⁸. Infine il silt dell'argilla, separato tramite lavaggi successivi con acqua, è stato osservato in microscopia ottica.

Le analisi diffrattometriche sono state eseguite con un apparecchio Philips PW 1130/1050 usando la radiazione CuKα, coprendo l'intervallo di angoli di incidenza 2θ da 3° a 60°.

I tracciati diffrattometrici delle argille A1 e A2 in figura 2 appaiono identici e perfettamente sovrapponibili. Per spiegare il differente comportamento plastico manifestato dalle due argille all'impasto con acqua, è necessario quindi riferirsi alle analisi effettuate sulle singole frazioni separate dalle due rocce. L'analisi dei silt infatti ha messo in evidenza delle forti differenze, come mostrato in figura 3. In particolare nel silt dell'argilla A2 è predominante la presenza di frustuli carboniosi, che invece nell'argilla A1 sono presenti solo sporadicamente.

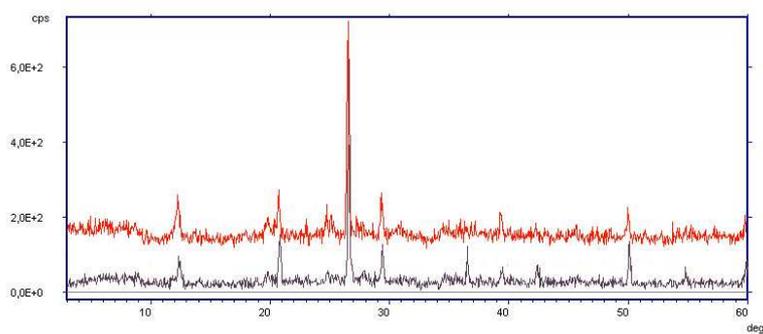


Figura 2: Diffratogrammi dei campioni delle due argille tal quali, in blu A1 in rosso A2.

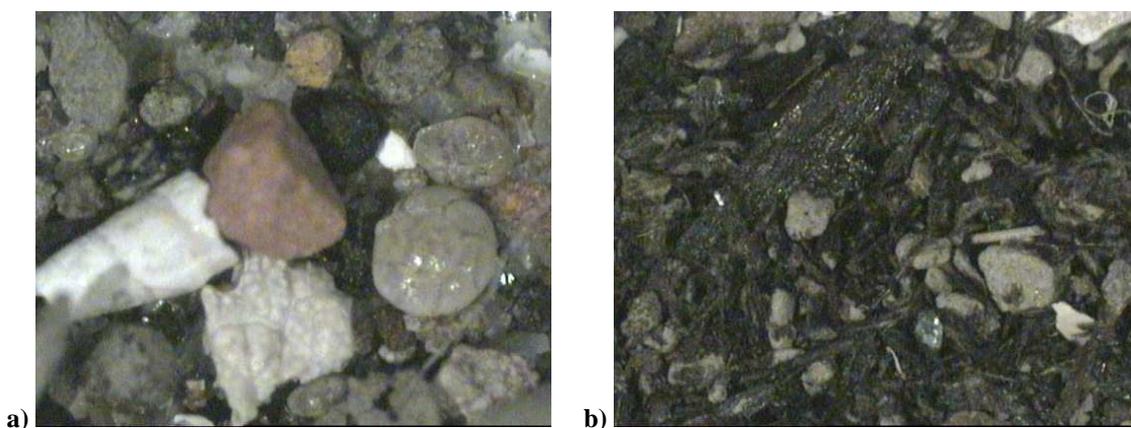


Figura 3: Immagini al microscopio ottico dei silt separati dalle due argille (7x all'osservazione).
a) Silt dell'argilla A1; b) Silt dell'argilla A2, ricco di frustuli carboniosi.

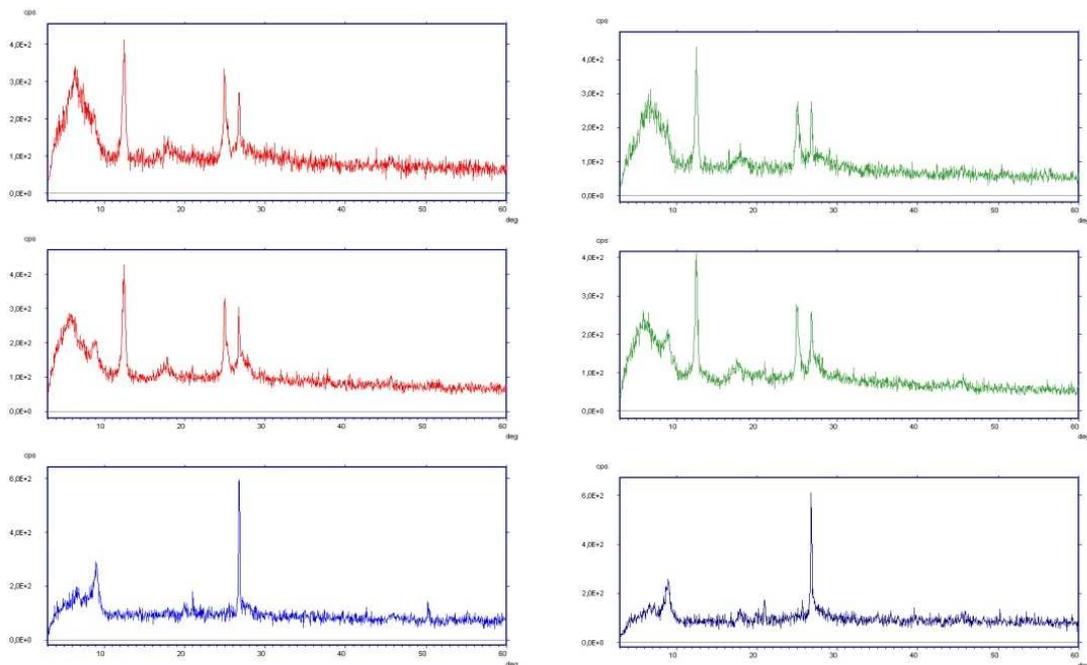


Figura 4: Diffratogrammi dei campioni delle due argille arricchiti in minerali argillosi. Nella colonna di sinistra i campioni di A1, in quella di destra i campioni di A2. Nella prima riga i preparati orientati tal quali, nella seconda dopo esposizione a vapori di glicole etilenico, nella terza dopo riscaldamento del a 550°C.

Campione	Calcite	Quarzo	Feldspati	Montmorillonite (°)	Illite(°)	Kaolinite(°)
A1	+	+++	+	++	+	+++
A2	+	+++	+	++	+	+++
A1 600	+	+++	+			
A1 700		+++	+			
A1 800		+++	+			
A2 600	+	+++	+			
A2 700		+++	+			
A2 800		+++	+			
Po		+++	+			

Tabella 1: Fasi mineralogiche presenti nelle due argille in funzione della temperatura di cottura. Il numero delle croci si riferisce all'abbondanza relativa delle fasi. Il simbolo (°) indica le fasi riscontrate nei campioni arricchiti.

3.2 Saggio di pozzolanicità

Il saggio di pozzolanicità, che nelle norme¹⁰ è riferito al cemento pozzolanico, si presta anche alla valutazione della reattività di aggregati per il confezionamento di malte a cocciopesto. Esso infatti si basa sulla misura della reattività del materiale in esame nei confronti dell'idrossido di calcio a temperatura ambiente. Si assume come sistema di riferimento una soluzione satura di calce (idrossido di calcio) e si segue l'andamento nel tempo del consumo di calce, conseguente alla reazione pozzolanica, mediante la titolazione dello ione calcio e dello ione idrossido.

Per gli scopi del presente studio, il saggio è stato effettuato, oltre che sugli aggregati di interesse, anche su un cemento portland e su un cemento portland mescolato con carbonato di calcio, assunti come materiali di riferimento a comportamento non pozzolanico.

Il risultato di ciascuna prova di pozzolanicità corrisponde a un punto sui diagrammi di figura 5, che riportano in ascissa la concentrazione di ione idrossido e in ordinata la concentrazione di ione calcio, espressa come ossido. Negli stessi diagrammi è rappresentata la curva di saturazione dell'idrossido di calcio in acqua a 20°C che, come detto, costituisce il sistema di riferimento: il punto corrispondente a un materiale ad attività pozzolanica, cioè che consuma l'idrossido di calcio, si troverà al di sotto della curva di equilibrio, tanto più distante dalla stessa quanto maggiore è la reattività del materiale.

I prodotti del trattamento termico dell'argilla A2, in tutto l'intervallo di temperature di cottura preso in considerazione, mostrano una buona reattività nei confronti dell'idrossido di calcio già dopo sette giorni di maturazione, come mostrato in figura 5a dalla posizione dei punti rappresentativi (triangoli), ben al di sotto della curva di equilibrio.

L'argilla A1 invece presenta una reattività minore. I punti rappresentativi di questi campioni (cerchi) nella figura 5 si mantengono più vicini alla curva di equilibrio, ed in particolare il campione A1 800, rappresentato in figura 5a da un punto rosso al di sopra della curva di equilibrio, risulta non pozzolanico nella prova a sette giorni. Ciò potrebbe essere conseguenza di una parziale ricombinazione a 800°C dei componenti del metacaolino, con formazione di prodotti inerti.

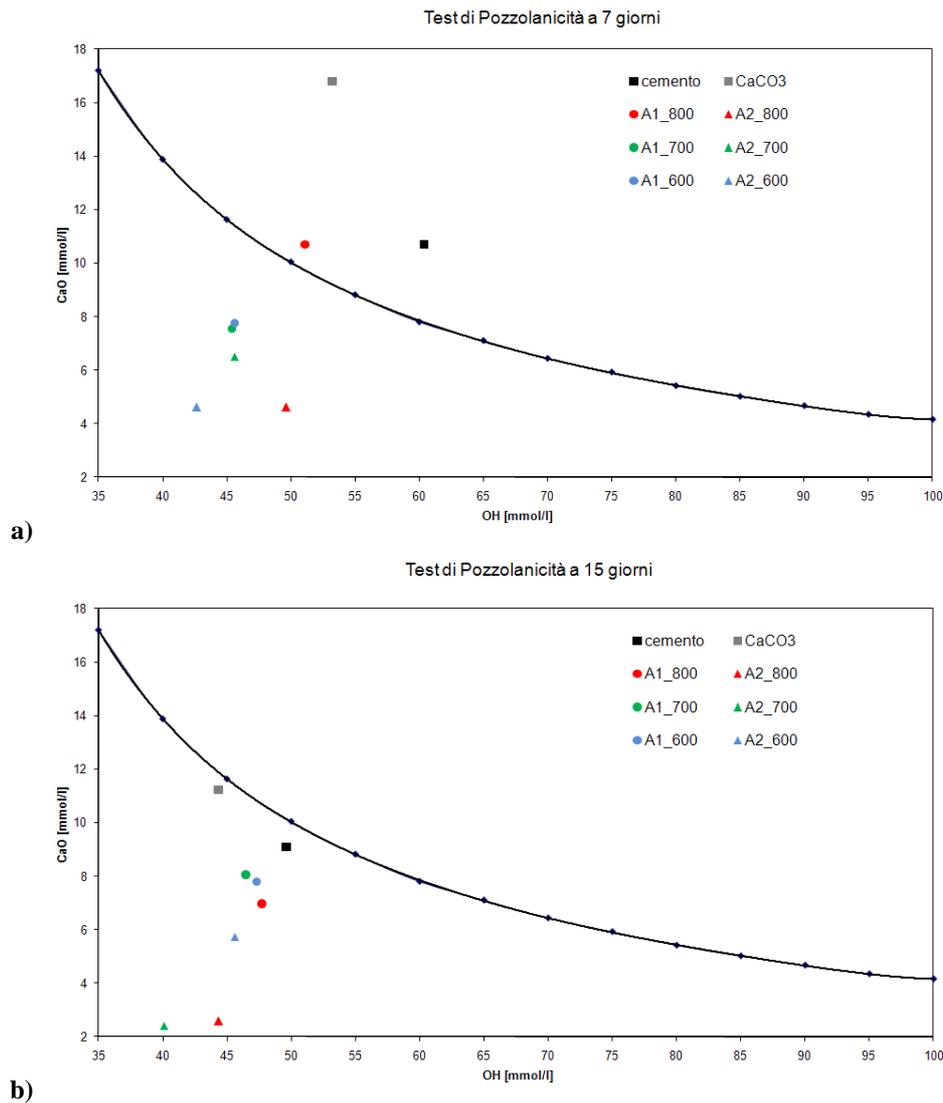


Figura 5: Risultati del saggio di pozzolanicità per i diversi aggregati: a) dopo 7 giorni; b) dopo 15 giorni. Le concentrazioni sono misurate in millimoli per litro. Il tenore di ione calcio è espresso in termini di ossido.

Il test di pozzolanicità dunque indica che a seguito della cottura le due argille, nonostante le modeste differenze riscontrate nella caratterizzazione mineralogica, presentano un'attività pozzolanica abbastanza diversa e in particolare l'argilla A2 risulta più reattiva dell'argilla A1. La temperatura di cottura invece sembra avere un effetto modesto, anche se l'argilla A1 cotta a 800°C risulta addirittura non pozzolanica all'analisi eseguita dopo 7 giorni.

Le prove sui due campioni di riferimento a comportamento non pozzolanico, costituiti da cemento portland tal quale (quadrati neri) e miscelato a calcite (quadrati grigi), hanno permesso di evitare errori di valutazione dei risultati. Infatti l'anidride carbonica dell'aria, reagendo con l'idrossido di calcio presente in acqua tende a trasformarlo in carbonato di calcio insolubile (*reazione di carbonatazione*) e questo produce un falso effetto di pozzolanicità. In figura 5b si può osservare che i punti rappresentativi di questi due campioni si trovano al di sotto della curva di equilibrio, più o meno alla stessa distanza da essa, rivelando così che nel corso della seconda settimana di prova si è avuto una certa contaminazione delle soluzioni da parte dell'aria. Ciò induce quindi a ritenere che nella stessa

figura 5b l'allontanamento dei punti relativi ai campioni A2 dalla curva non sia dovuto ad un ulteriore sviluppo della loro pozzolanicità, che probabilmente si è già esaurita completamente nella prima settimana di prova. Anche il passaggio al di sotto della curva del punto rappresentativo del campione A1 800 può essere conseguenza, almeno in parte, dell'azione dell'anidride carbonica dell'aria.

3.3 Caratterizzazione termogravimetrica delle malte indurite

Secondo quanto riportato in diversi lavori^{9,11-15}, attraverso l'analisi termogravimetrica è possibile evidenziare il grado di idraulicità di campioni di malte storiche sia pozzolaniche che a cocchiopesto. A questo scopo l'intervallo di temperatura nel quale si esegue l'analisi, da 20°C a 1000°C, viene suddiviso e la perdita di peso del campione in ciascun campo attribuita a specifici effetti:

- 20°-120°C perdita dell'acqua non combinata (umidità);
- 200°-600°C perdita dell'acqua combinata nei prodotti idraulici (silicati e alluminati idrati) e nei sali solubili eventualmente presenti;
- >600°C perdita di anidride carbonica combinata nei prodotti aerei (decarbonatazione di calcite e magnesite).

Le malte analizzate in questo lavoro, a causa del loro limitato tempo di stagionatura, presentano un residuo di idrossido di calcio, che si disidrata intorno a 550°C dando origine ad un picco termogravimetrico ristretto e ben evidenziato. La perdita di peso associata a questo picco, dove presente, può essere sottratta dalla perdita totale tra 200°C e 600°C, per il computo dell'acqua di cristallizzazione dei composti idraulici.

I risultati della lettura dei tracciati termogravimetrici sono mostrati nella tabella 2. Il valore riportato nell'ultima colonna è il rapporto tra la perdita di peso conseguente alla decarbonatazione e quella dovuta alla disidratazione dei prodotti idraulici e viene quindi considerato come un indice inverso di idraulicità: più elevato è il numero meno spiccato è il carattere idraulico della malta.

Questo tipo di valutazione può essere efficacemente rappresentata diagrammando i dati sperimentali secondo opportune coordinate^{9,11-15}.

In figura 6a vengono riportate in ascissa la percentuale d'acqua assorbita fisicamente e in ordinata la perdita percentuale di peso associata ai composti idraulici. Di conseguenza i punti rappresentativi delle diverse malte si allineano in modo tale che una maggiore distanza dall'origine è indice di maggiore idraulicità.

In figura 6b l'ascissa è la percentuale d'acqua associata ai composti idraulici, mentre l'ordinata è l'inverso dell'indice di idraulicità (ultima colonna in tabella 2) rapportato al quantitativo d'acqua assorbito fisicamente⁹. Di conseguenza i punti rappresentativi delle malte aeree si avvicinano all'asse delle ordinate e quelli delle malte idrauliche all'asse delle ascisse.

Il confronto dei due grafici fornisce indicazioni coerenti riguardo all'idraulicità dei campioni analizzati. In particolare in figura 5a si può notare che i punti più vicini all'origine, che quindi presentano il minore grado di idraulicità, sono relativi alle malte confezionate con la polvere di mattone e con le argille cotte a 800°C, che erano risultati gli aggregati meno reattivi al saggio di pozzolanicità. Inoltre, a parità di temperatura di cottura (denotata dal colore dei simboli), i campione di argilla A2 risultano sempre più idraulici degli analoghi ottenuti con l'argilla A1, a conferma di quanto già evidenziato con il saggio di pozzolanicità. La cottura a 600°C sembra fornire gli aggregati più reattivi, ma senza una forte differenza rispetto a quelli ottenuti a 700°C. Nell'eventuale applicazione dei risultati di questo studio su una scala di produzione di aggregati reattivi per cocchiopesto, una temperatura di set point di

600°C potrebbe non essere sufficiente per assicurare la totale decomposizione dei minerali argillosi, considerate le difficoltà di controllo dei gradienti di temperatura all'interno di un forno industriale. Pertanto il materiale che complessivamente risponde meglio alle finalità produttive risulta l'argilla A2 cotta a 700°C.

Infine l'effetto della granulometria degli aggregati, in particolar modo per l'argilla A2, è di conferire al sistema legante proprietà idrauliche più marcate al diminuire del diametro delle particelle, risultato conseguente al fatto che le reazioni di formazione dei prodotti idraulici sono favorite da un'elevata superficie specifica dei solidi particellari. Tuttavia questo parametro andrà riconsiderato nei suoi effetti complessivi quando saranno prese in considerazione le proprietà meccaniche delle malte.

	Perdite di peso, %					
	A	C	D	F	G=C-D	E=F/G
Temperatura	20-120°C	200-600°C	~550°C	>600°C		
A1 600 <500	2,46	3,28	0,95	6,68	2,33	2,86
A1 600 <200	2,58	3,87	1,29	5,30	2,58	2,05
A1 600 <100	1,13	2,39	0	10,33	2,39	4,32
A2 600 <500	1,72	3,13	0,78	9,55	2,35	4,06
A2 600 <200	1,80	3,71	0	9,87	3,71	2,66
A2 600 <100	3,19	3,58	0	9,97	3,58	2,78
A1 700 <500	0,90	2,4	0	9	2,4	3,75
A1 700 <200	1,20	4,3	1,47	4,60	2,83	1,62
A1 700 <100	1,40	2,5	0,87	9,10	1,63	5,58
A2 700 <500	1,40	3,7	1,09	7,70	1,8	4,27
A2 700 <200	1,10	3,60	0,42	8	3,18	2,51
A2 700 <100	1,60	4,3	0	5,90	4,3	1,37
A1 800 <500	0,75	3,38	0,87	5,14	2,41	2,13
A1 800 <200	0,33	0,88	0	11,19	0,88	12,71
A1 800 <100	0,49	1,78	0	8,94	1,78	5,02
A2 800 <500	1,12	2,52	1,11	8,23	1,41	5,83
A2 800 <200	0,79	2,37	0	9,51	2,37	4,01
A2 800 <100	1,60	3,04	0	5,92	3,04	1,94
Po<500	0,50	2,40	2,22	4,30	0,18	23,88
Po <200	0,80	2,5	1,66	4,60	0,84	5,47
Po <100	0,70	1,8	0,83	7,20	0,97	7,42

Tabella 2: Risultati dell'analisi termogravimetrica delle malte, suddivisi per intervalli di temperatura.

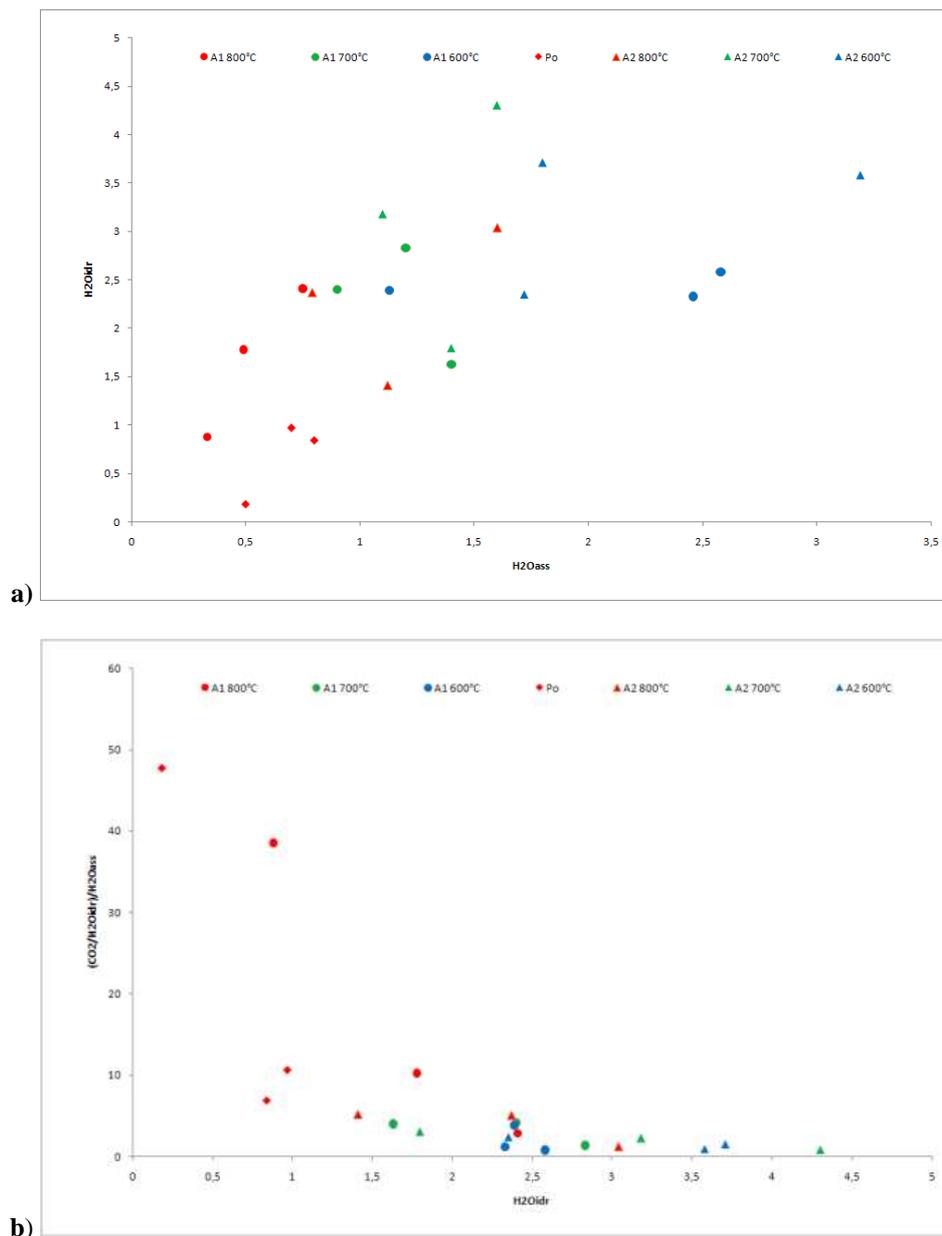


Figura 6: Diagrammi dell'idraulicità delle malte in accordo con i risultati dell'analisi termogravimetrica.

4 CONCLUSIONI

I risultati sperimentali fin qui acquisiti consentono di ricavare alcune considerazioni preliminari sugli obiettivi della ricerca.

I due materiali di scarto disponibili, i rottami di mattoni e l'argilla grassa, mostrano comportamenti decisamente diversi, che tuttavia non escludono la possibilità di una loro riutilizzazione.

I materiali provenienti dal forno di cottura dei laterizi, avendo subito un ciclo termico fino a temperature superiori ai 900°C, non presentano attività pozzolanica e dunque non sono idonei per conferire proprietà idrauliche a una malta di calce aerea. Tuttavia essi possono essere macinati fino alla granulometria di una sabbia e utilizzati come aggregati inerti nel

confezionamento di malte a cocchiopesto. Questa pratica, rispetto all'uso di una sabbia lapidea naturale, offre il duplice vantaggio di non ricorrere ad attività di cava e di riciclare materiale altrimenti destinato a discarica. Inoltre i frammenti di laterizio contribuiscono ad accentuare il caratteristico aspetto delle malte a cocchiopesto, particolarmente apprezzato per alcuni interventi di restauro architettonico.

Per quanto riguarda le due argille, disponibili in grandi quantità presso la cava di approvvigionamento dell'impianto di produzione dei laterizi, le analisi mineralogico petrografiche ne hanno evidenziato alcune differenze, che si accentuano a seguito della cottura, come mostrato dai risultati del saggio di pozzolanicità e dell'analisi termogravimetrica. L'argilla A2, considerata troppo grassa per la produzione dei laterizi e quindi destinata in larga misura ad essere scartata, sviluppa invece interessanti caratteristiche di pozzolanicità se cotta a temperature adeguate. Sembra pertanto proponibile l'uso di questo materiale quale aggregato reattivo da miscelare alla calce aerea e ai rottami di mattone macinati, per la formulazione di malte a cocchiopesto premiscelate.

Prima di tradurre questi risultati nell'avvio una linea di produzione, restano da approfondire alcune aspetti non trascurabili del comportamento delle malte così formulate. Uno riguarda le proprietà meccaniche che, grazie allo sviluppo dei prodotti di reazione tra la calce e il metacaolino, dovrebbero risultare più elevate rispetto a quelle di una malta di calce confezionata con sabbia inerte. L'altro riguarda la loro risposta alle aggressioni ambientali e, in particolar modo, all'attacco da parte di acque ricche di solfati. Infatti la sensibilità del cemento portland all'attacco solfatico, che produce effetti espansivi deleteri dovuti alla formazione di ettringite secondaria, è una delle cause che hanno giustamente determinato la messa al bando del cemento dai cantieri di restauro, e dunque un materiale che si pone come alternativa deve assicurare una buona resistenza ai solfati.

Lo studio prosegue pertanto con la preparazione di provini di malta, confezionati con diverse granulometrie degli aggregati, sia inerti sia reattivi, e con diverso contenuto d'acqua, da sottoporre a prove di compressione e a misure porosi metriche, e con la valutazione della resistenza all'attacco solfatico, per la quale si è messa a punto una procedura sperimentale che fa riferimento al saggio di Le Chatelier Anstett^{16, 17}.

Ringraziamenti: Si ringrazia la Sicomed srl di Palermo per aver fornito i materiali e il supporto finanziario per la ricerca.

BIBLIOGRAFIA

1. M. P. Vitruvio, *De architectura*, a cura di Pierre Gros, Einaudi (1997)
2. G. Rizzo, L. Ercoli, B. Megna and M. Parlapiano, "Characterization of mortars from ancient and traditional water supply systems in Sicily", *J. Therm. Anal. Cal.*, **92**, **1**, 323-330 (2008).
3. Moropoulou, A. Bakolas and K. Bisbikou, "Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques" *Thermochim. Acta*, **269/270**, 779-795 (1995).
4. A. Bakolas, G. Biscontin, V. Contardi, E. Franceschi, A. Moropoulou, D. Palazzi and E. Zendri, "Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice" *Thermochim. Acta*, **269/270**, 817-828 (1995).
5. G. Biscontin, M. Pellizon Birelli and E. Zendri, "Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars" *J. Cultur. Heritage*, **3**, 31-37(2002).

6. P. Maravelaki-Kalaitzaki, A. Bakolas and A. Moropoulou, "Physico-chemical study of Cretan ancient mortars", *Cement Concr. Res.*, **33**, 651-661(2003).
7. UNI EN 459-1 *Calci da costruzione. Definizioni, specifiche e criteri di conformità* (1996).
8. AA.VV. *Argille e Minerali delle Argille: Analisi di materiali argillosi per diffrazione di raggi X e microscopia elettronica a scansione. Teoria e Applicazioni*, a cura di S. Fiore-IMAA-CNR, Global Print srl, Gorgonzola (MI), (2005).
9. G. Rizzo, B. Megna, "Characterization of hydraulic mortars by means of simultaneous thermal analysis" *J. Therm. Anal. Cal.*, **92**, **1**, 173-178 (2008).
10. UNI EN 196-5 *Metodi di prova dei cementi. Prova di pozzolanicità dei cementi pozzolanici* (1996).
11. A. Moropoulou, A. Bakolas, P. Moundoulas, E. Aggelakopoulou and S. Anagnostopoulou, "Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries", *Cement Concr. Composites*, **27**, 289-294 (2005).
12. J. Pires and A. J. Cruz, "Techniques of thermal analysis applied to the study of cultural heritage" *J. Therm. Anal. Cal.*, **87**, 411-415 (2007).
13. A. Moropoulou, A. Bakolas and K. Bisbikou, "Investigation of the technology of historic mortars" *J. Cultur. Heritage*, **1**, 45-58 (2000).
14. D. A. Silva, H. R. Wenk and P. J. M. Monteiro, "Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern" *Thermochim. Acta*, **438**, 35-40 (2005).
15. P. Bruno, D. Calabrese, M. Di Pierro, A. Genga, C. Laganara, D. A. P. Manigrassi, A. Traini and P. Ubbriaco, "Chemical-physical and mineralogical investigation on ancient mortars from the archaeological site of Monte Sannace (Bari-Southern Italy)" *Thermochim. Acta*, **418**, 131-141 (2004).
16. Le Chatelier, Anstett - *Revue Matériaux de Construction*, **314** (1935).
17. L. Blondiau, "Considerations diverses relatives à l'essai de résistance chimique au sulfate de calcium suivant le processus Le Chatelier Anstett", *Rev. Mater. Constr. Trav. Publics III*, **546**, 189-200 (1961).