Soluzioni avanzate per l’efficientamento energetico in edilizia basate su sottoprodotti dell'industria

Antonio Licciulli

Dipartimento di Ingegneria dell’Innovazione

antonio.licciulli@unisalento.it

Ma non era meglio prima??

- I Romani riuscirono a costruire opere imponenti che hanno resistito i millenni.
- Gli edifici in calcestruzzo armato sono progettati per durare 50 anni

Ni

Il bisogno di una rivoluzione semantica

- **Immondizia** da immundus, im mundus im negazione mundus mondo
- **Sporcizia** dal latino sporcus cosparso di macchie, radice indoeuropea sparc cospargere, roba sudicia; l'essere immondo
- **Rifiuto** dal francese o spagnolo refutar composta da "re" contro "futar" spargere
- **Pattume** dal francese "patauger" impantanarsi pantano
- **Spazzatura** da spazzare, togliere di mezzo
- **PIL Prodotto Interno Lordo** dal lat. "Lurdus" sudicio

Cessazione della qualifica di rifiuto

DLGS152/2006 art.184-bis.

Un rifiuto cessa di essere tale, quando è stato sottoposto a un'operazione di recupero, e soddisfi i criteri specifici, da adottare nel rispetto delle seguenti condizioni:

a) la sostanza o l'oggetto è comunemente utilizzato per scopi specifici;

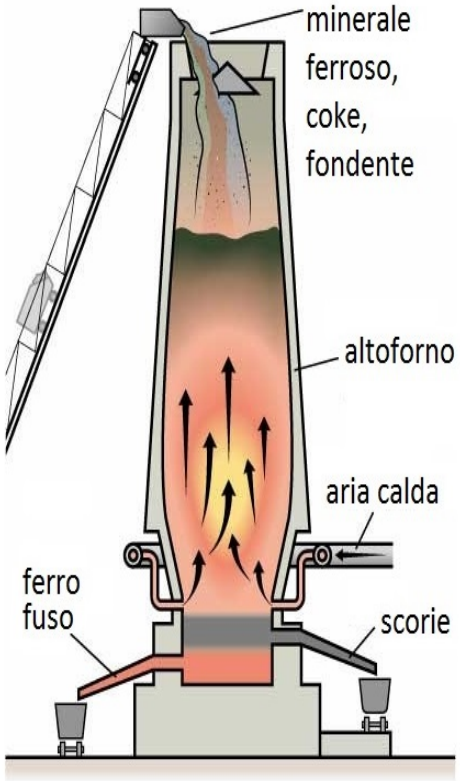
b**) esiste un mercato** o una domanda per tale sostanza od oggetto;

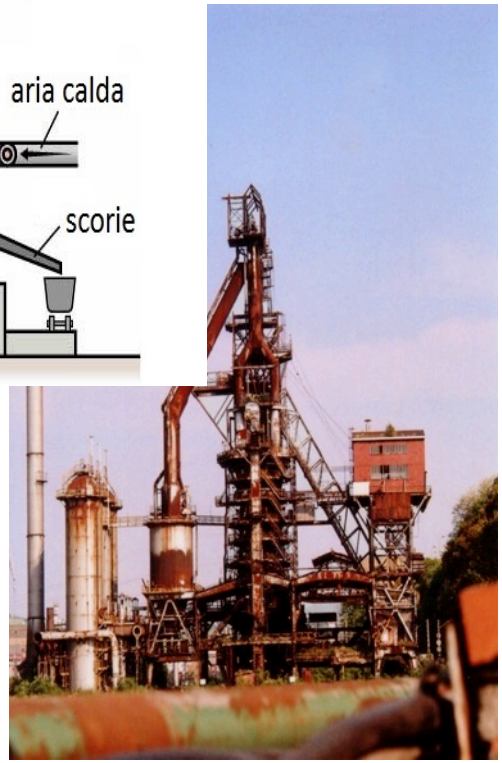
c) la sostanza o l'oggetto **soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici** e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;

d) l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto **non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana**

La loppa di altoforno

- È un sottoprodotto del processo di produzione della ghisa
- Ha capacità idraulica latente. L'aggiunta di calce accelera il processo
- Grazie a questa proprietà viene addizionata al cemento Portland per dare origine ai cementi d'altoforno o siderurgici (di tipo III secondo la norma UNI EN 197-1)





I cementi di tipo III

- Requisiti composizionali della loppa come aggiunta:
- CaO + MgO + SiO2 = 2/3 della masa totale
- (CaO + MgO)/(SiO2) > 1
- Il resto deve essere Al2O3 e modeste quantità di altri composti

El	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. C [wt.%]
O	8	K-series	39.17	57.46		0.00
Mg	12	K-series	4.89	4.72	MgO	8.11
Al	13	K-series	5.70	4.96	Al2O3	10.77
Si	14	K-series	14.57	12.18	SiO2	31.17
K	19	K-series	0.42	0.25	K2O	0.50
Ca	20	K-series	33.79	19.79	CaO	47.28
Ti	22	K-series	0.75	0.37	TiO2	1.25
Mn	25	K-series	0.26	0.11	MnO	0.33
Fe	26	K-series	0.29	0.12	FeO	0.38
Sr	38	K-series	0.08	0.02	SrO	0.10
Y	39	K-series	0.01	0.00	Y2O3	0.01
Zr	40	K-series	0.06	0.02	ZrO2	0.09
Rh	45	K-series	0.00	0.00		0.00
		Total:	100.00	100.00		

Analisi XRF della loppa per cementi provenient

La loppa destinata allo smaltimento

- Parte della loppa prodotta non risponde ai requisiti della normativa dei cementi d'altoforno
- Contiene molto FeO e non contiene MgO
- Occorre trovare altre destinazioni d'uso

El	AN	Net	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. C [wt.%]
Ca	20	2862101	36.07	22.88	CaO	50.47
O	8	0	36.25	57.60		0.00
Si	14	206026	14.14	12.79	SiO2	30.24
Fe	26	1488732	9.19	4.18	FeO	11.83
Ti	22	165261	2.18	1.16	TiO2	3.64
Mn	25	49289	0.36	0.17	MnO	0.46
K	19	37615	0.67	0.44	K2O	0.81
Rh	45	20599	0.00	0.00		0.00
S	16	41908	0.91	0.72	SO3	2.26
Zr	40	11742	0.10	0.03	ZrO2	0.13
Sr	38	18350	0.14	0.04	SrO	0.16
		Total:	100.00	100.00		

Analisi XRF della loppa per cementi
Proveniente da ILVA

Sottoprodotto DLGS152/2006 art.184-bis.

È un sottoprodotto e non un rifiuto qualsiasi sostanza od oggetto che soddisfa tutte le seguenti condizioni:

a) la sostanza o l'**oggetto** è **originato da un processo** di produzione, di cui costituisce parte integrante, e **il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto**;

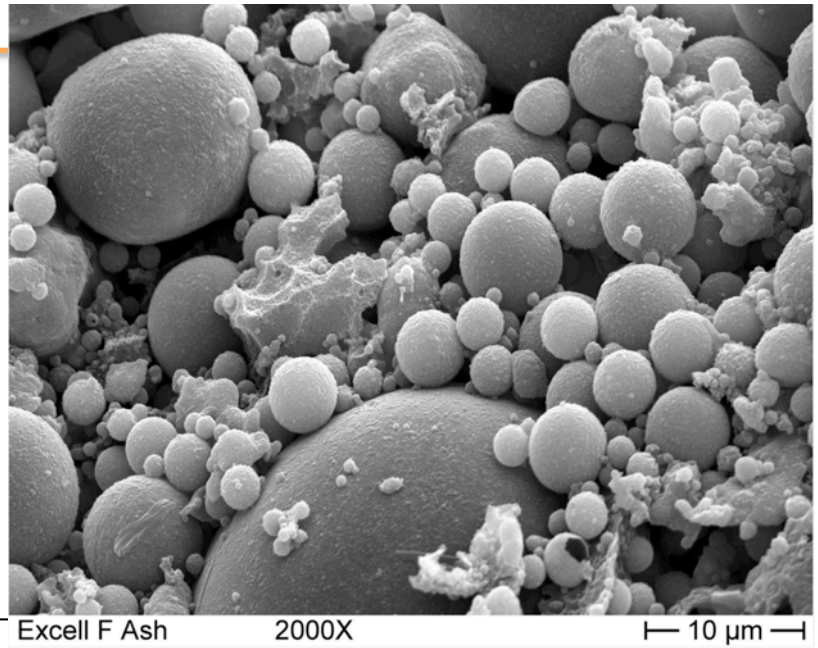
b) **è certo che la sostanza o l'oggetto sarà utilizzato** .. da parte del produttore o di terzi;

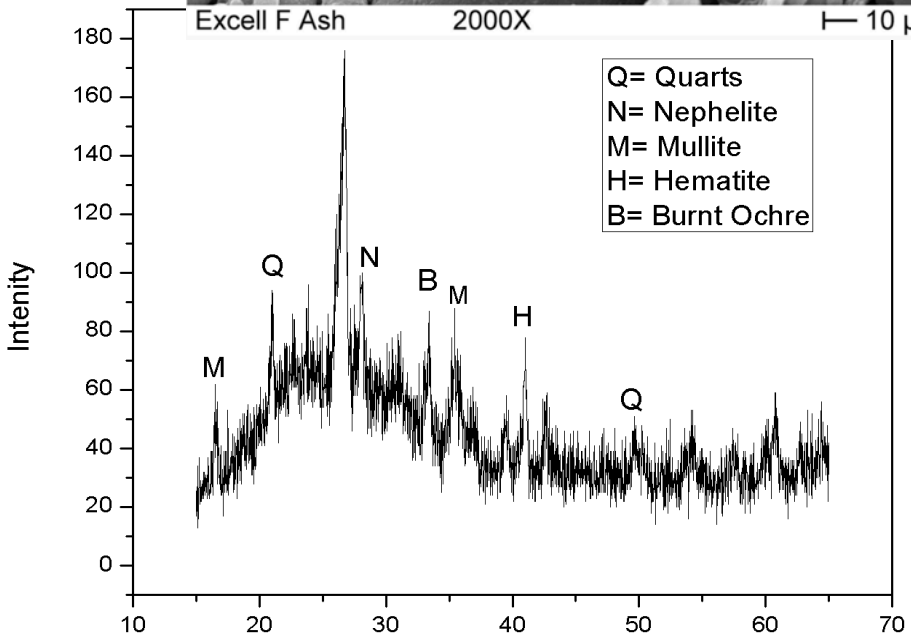
c) la sostanza o l'oggetto può essere **utilizzato direttamente** senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;

d) l'ulteriore **utilizzo è legale**, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, i requisiti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e **non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana**.

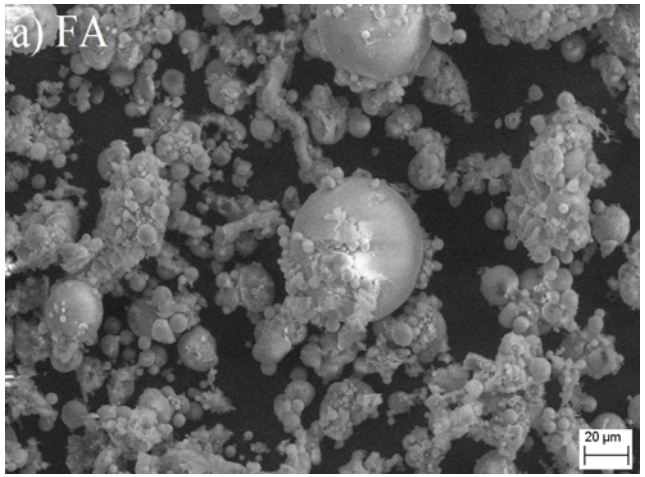
Microstruttura e composizione delle ceneri da carbone

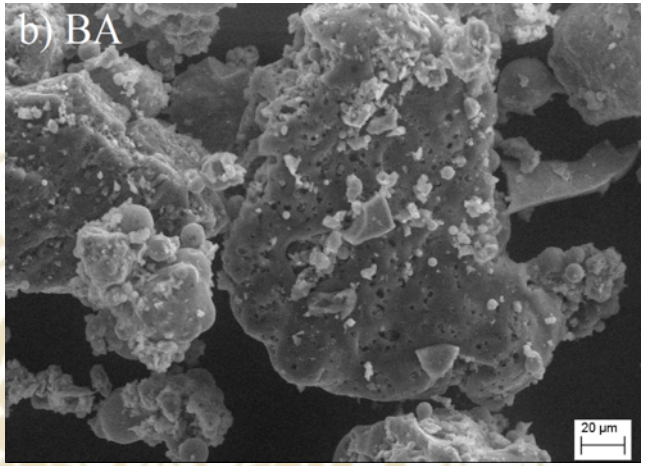
- Le ceneri sono silico alluminati parzialmente amorfi ad alta area specifica
- I minerali presenti nel carbone fondono a 1400°C formando microparticelle sferoidali di natura vetrosa che sono trascinate dai fumi fuori dalla caldaia
- Presentano una elevata reattività quando messi a contatto con alcali e silicati alcalini

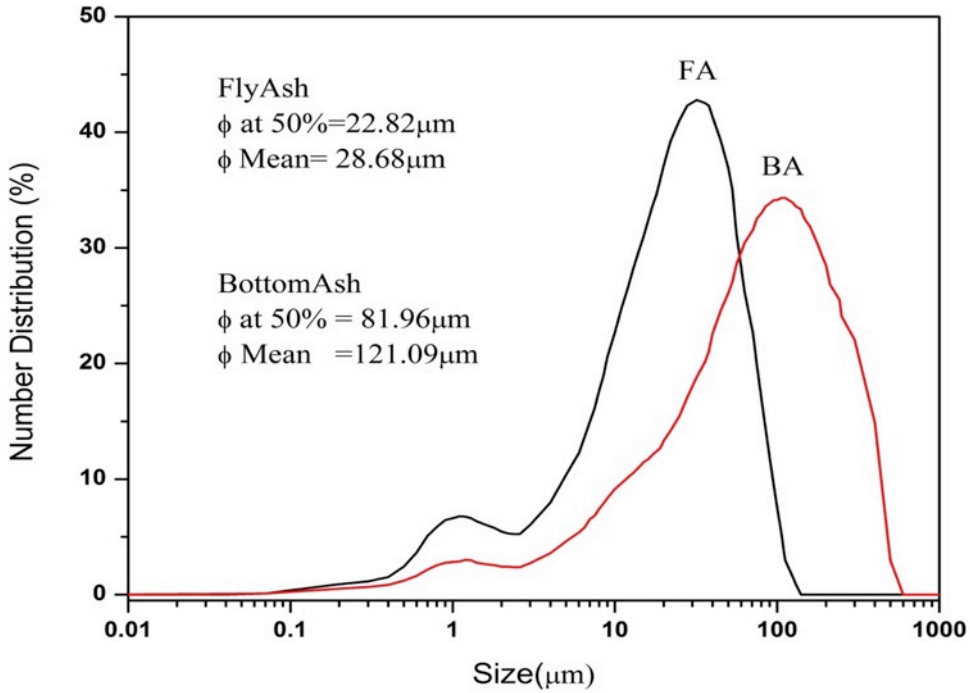




Caratteristiche granulometriche delle fly ash e delle bottom ash







Caratteristiche granulometrie a confronto

Protocollo LEED: vantaggi nell'uso di sottoprodotti

Category	Available Points
Sustainable Sites (SS)	14 (20%)
Water Efficiency (WE)	5 (7%)
Energy and Atmosphere (EA)	17 (25%)
Materials and Resources (MR)	13 (19%)
Indoor Environmental Quality (EQ)	15 (22%)
Innovation and Design Process (ID)	5 (7%)
Total Points Available	**69**

LEED Leadership in Energy and Environmental Design

US Green Building Council (1993)

Protocollo LEED: vantaggi nell'uso di sottoprodotti

Category	Available Points
Sustainable Sites (SS)	14 (20%)
Water Efficiency (WE)	5 (7%)
Energy and Atmosphere (EA)	17 (25%)
Materials and Resources (MR)	13 (19%)
Indoor Environmental Quality (EQ)	15 (22%)
Innovation and Design Process (ID)	5 (7%)
Total Points Available	**69**

MR, Credit 4.1: premialità quando i **materiali riciclati** costituiscono il 10% del totale (sulla base dei costi)
MR, Credit 4.2: premialità quando i materiali riciclati costituiscono il 10% del totale (sulla base dei costi)

- **MR, Credit 5.1:** premialità quando i materiali di **provenienza regionale** costituiscono il 10% del totale (sulla base dei costi)
- **MR, Credit 5.2:** premialità quando i materiali di provenienza regonale costituiscono il 20% del totale (sulla base dei costi)
- **ID, Credit 1.4:** premialità per il **contenuto di innovazione**: l'uso di cenere volante al posto del cemento o materiali innovativi ad alto isolamento termico ha un impatto sulla produzione di CO_2
- **EQ, Credit 7.1: Comfort** termico dovuto all'isolamento e all'inerzia termica

Materiali avanzati e soluzioni innovative investigate

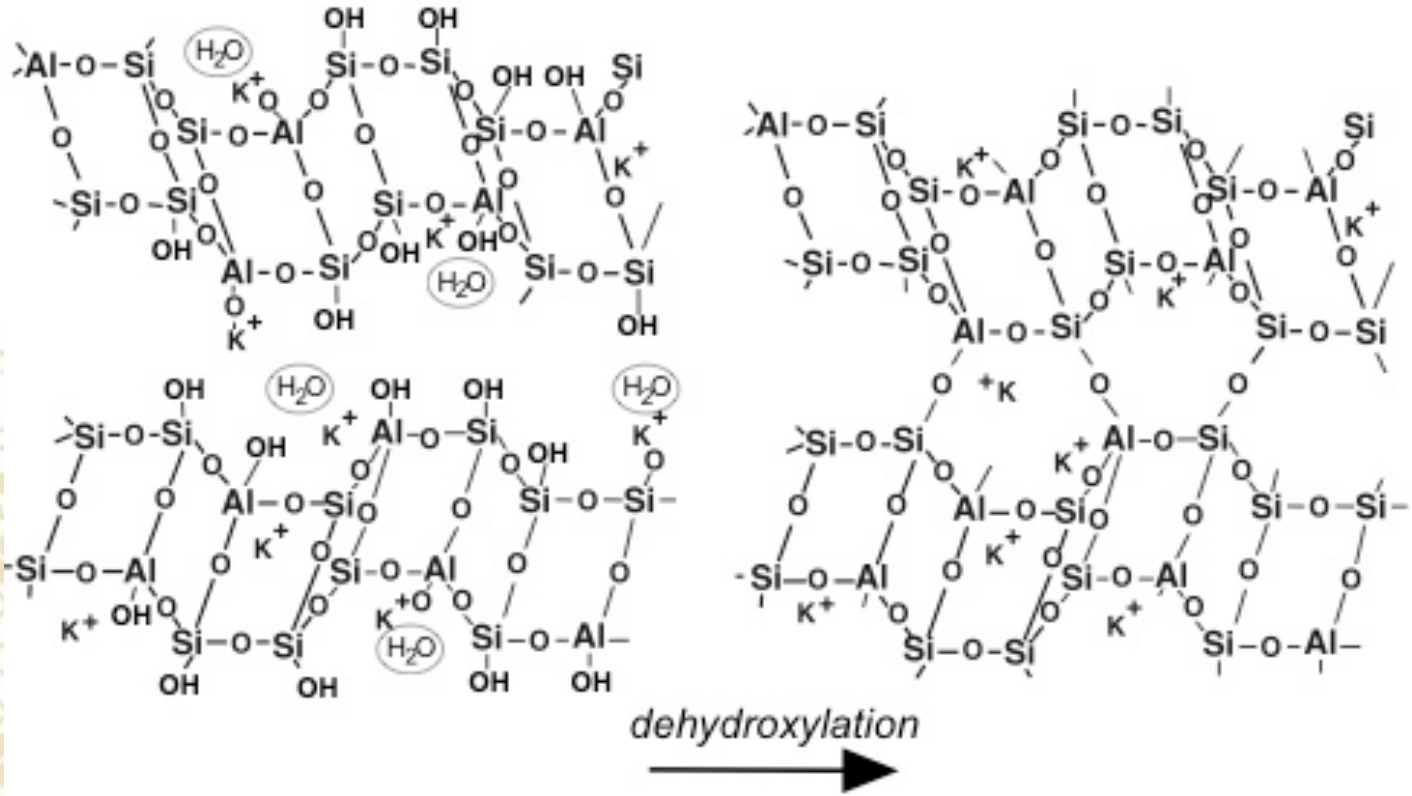
Malte non cementizie

Mattoni schiumati

Aggregati leggeri

La presa e l'indurimento nei geopolimeri

Gli elementi alumino silicati (ceneri, loppe, metacaolino) in ambiente alcalino sono decomposti in oligomeri che successivamente si riorientano e riassemblano tramite reazioni di policondenzazione



Malte geopolimeriche da ceneri volanti

- Sono state formulate malte geopolimeriche combinando silicati alcalini e ceneri da combustione del carbone (tipo fly ash e bottom ash)
- La struttura del network geopolimerico si rappresenta genericamente con una formula del tipo:

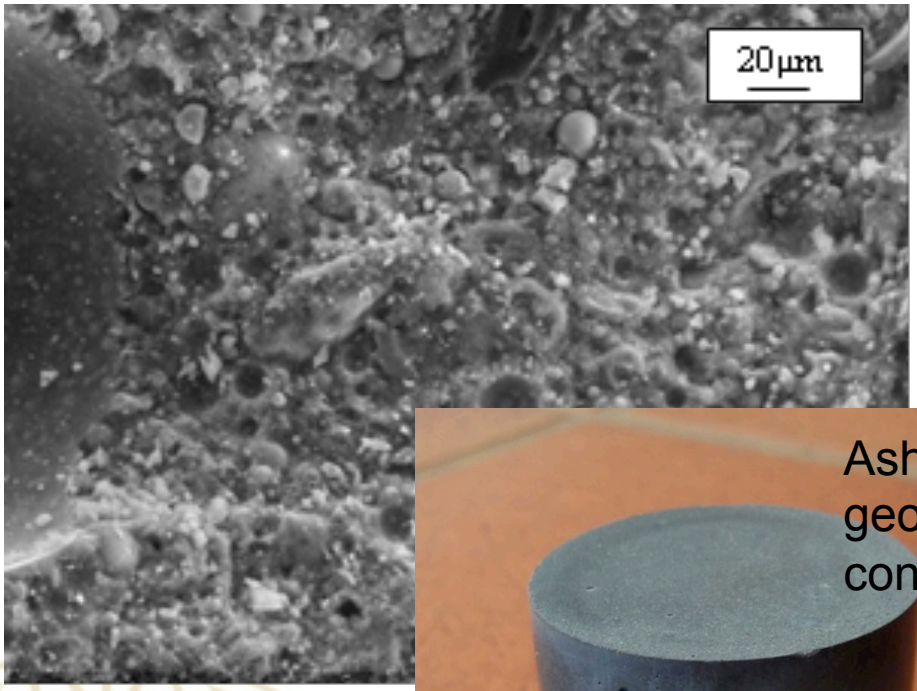
$$M\{-(Si\text{-}O)z - Al\text{-}O\}n \,.wH_2O$$

M rappresenta K, Na or Ca,

n il grado di polimerizzazione e

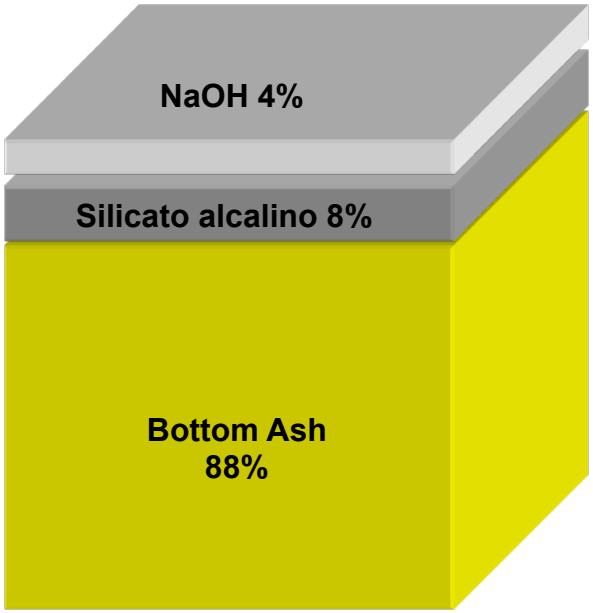
z … 1, 2, 3 indica il numero di cluster di silicati formati.

Composizione e microstruttura della malta geopolimerica

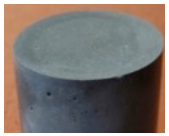


Ash coal geoplymer concrete

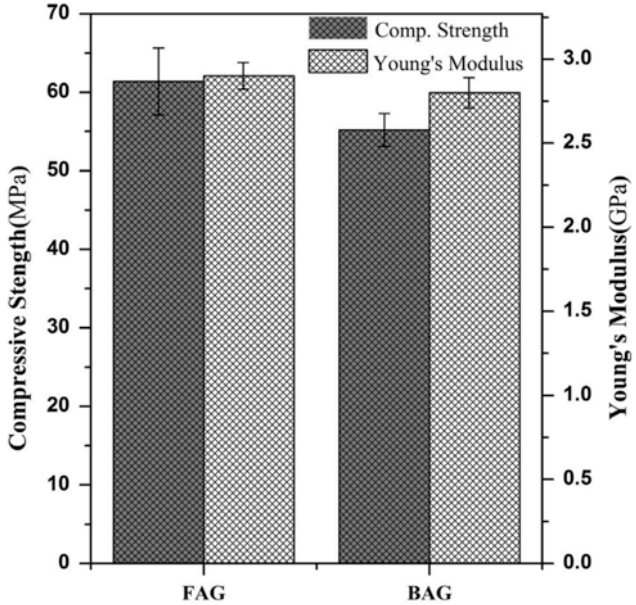
Composizione della fase solida



Caratterizzazione meccanica delle malte geopolimeriche



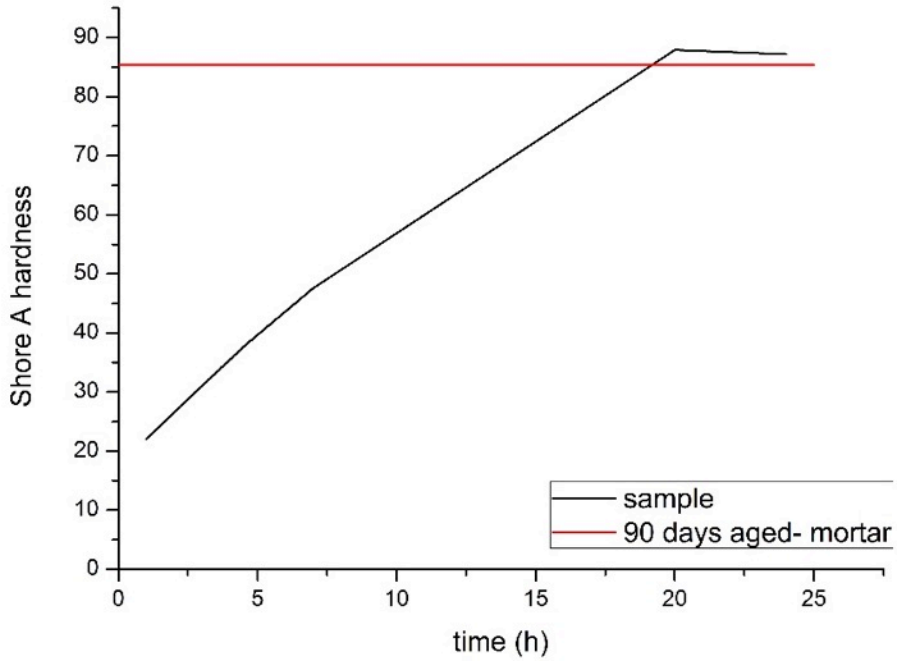
- Sono state sviluppate malte contenenti fly ash (FAG) e bottom ash (BAG).
- Le malte formulate con cenere volante hanno in generale migliori prestazioni termiche e meccaniche



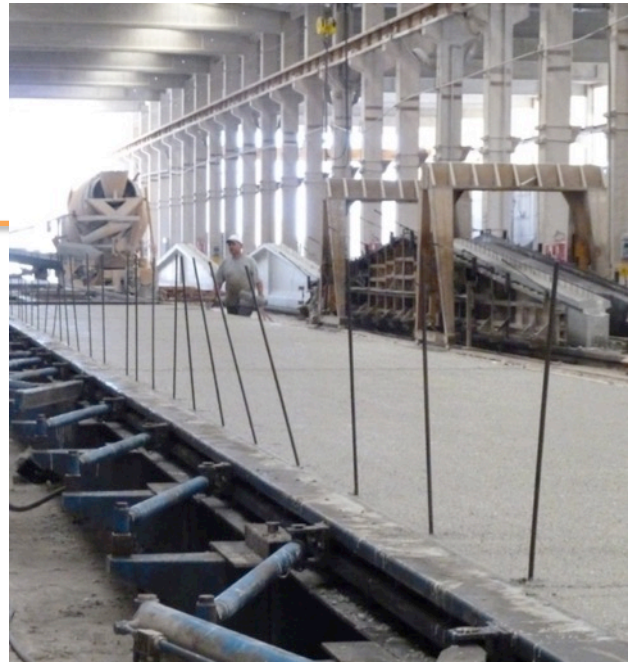
Sample ID	Apparent density (g/cm^3)	Bulk density (g/cm^3)	Porosity (%)	Thermal conductivity (W/mK)	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
FAG	2.45	1.454	37	0.58	61.4	2.9
BAG	2.48	1.65	33.5	0.848	55.2	2.8

Tempo di presa

- Come riferimento è stato usato il valore di durezza Shore di una malta invecchiata 90 giorni
- La malta fresca ha raggiunto il valore di riferimento in circa 20 ore



I possibili utilizzi di malte e conglomerati geopolimerici



Applicazioni:

- malte di allettamento: ad alto isolamento termico
- malta per massetto per la posa di materiali da pavimentazione
- malta di finitura e arriccio nella preparazione di intonaci
- Mattoni e blocchi prefabbricati
- Travi precompresse

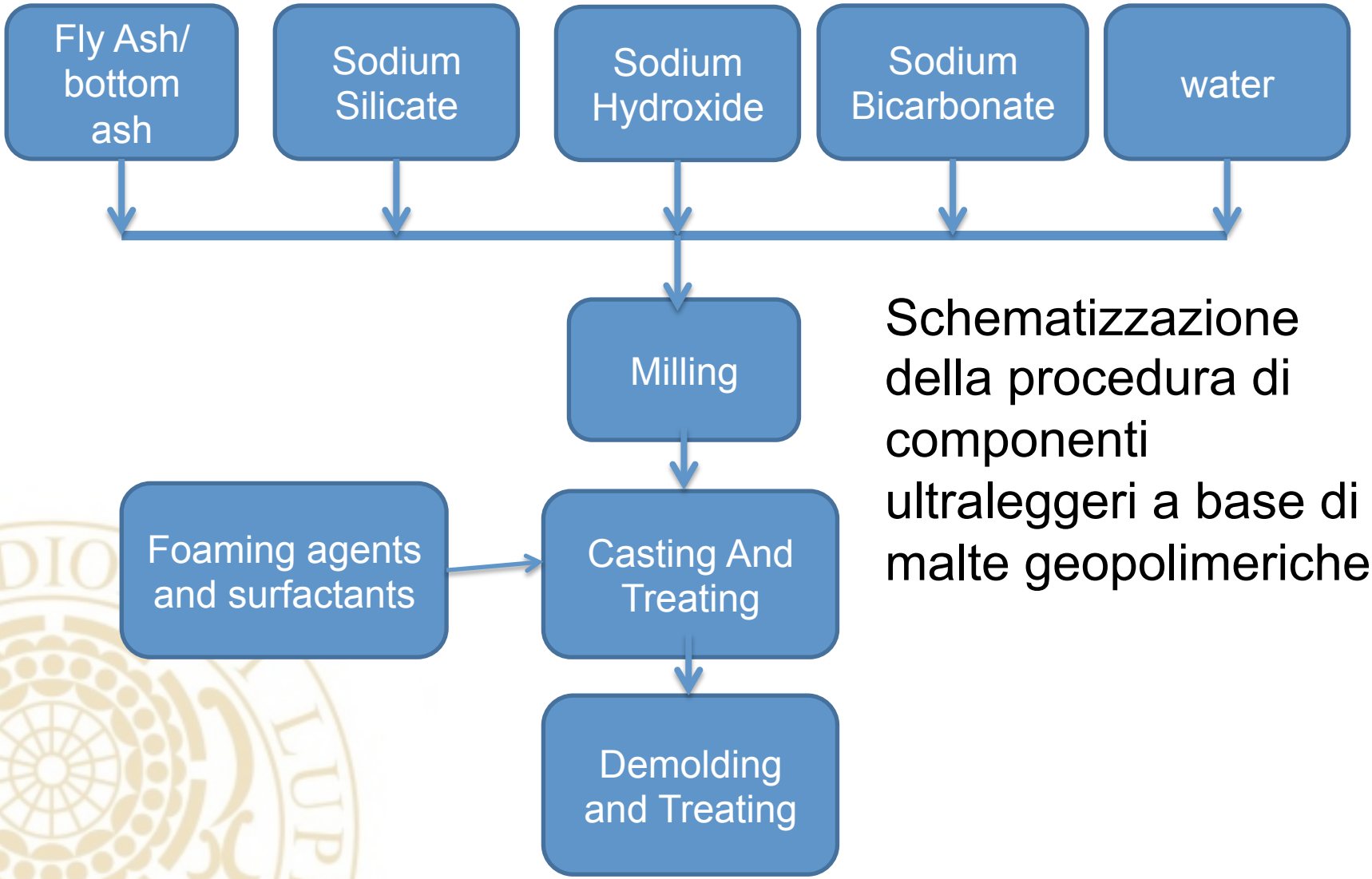
Potenziali vantaggi

- Maggiore resistenza meccanica
- Minore assorbimento d'acqua
- Basso costo di produzione e ridotto impatto ambientale della produzione
- Tempo di presa accellerato

Confronto con le malte cementizie

Property	Malta cementizia	Malta da geopolimero
Compressive strength	20-40 (MPa) after 4 week	50-60 (MPa) after one week
Density	2-4 (g/cc)	1.65 g/cc
Thermal Conductivity	1.8-2 (W/mK)	0.848 (W/mK)
Cost	Expensive	Cheap

Sistemi geopolimerici ultraleggeri

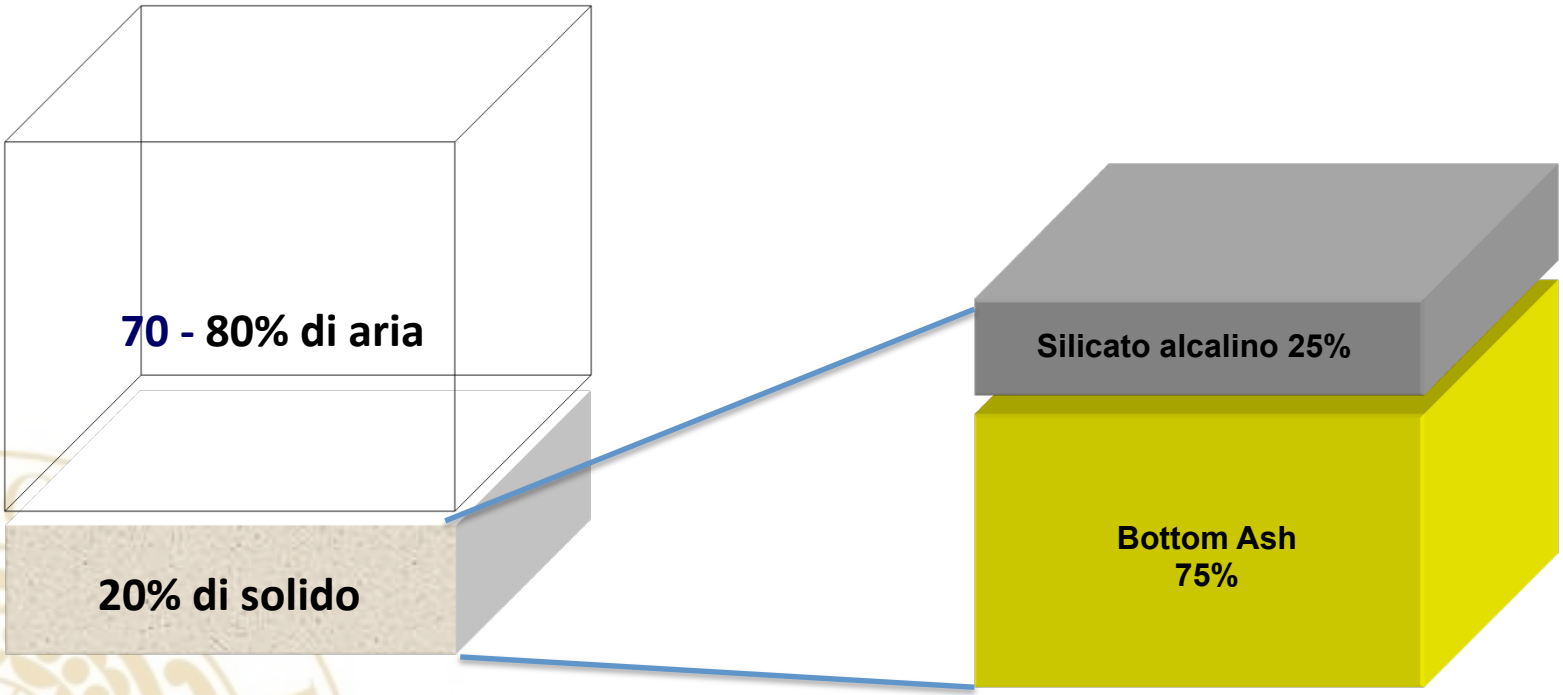


Schematizzazione della procedura di componenti ultraleggeri a base di malte geopolimeriche

Composizione e struttura del mattone aerato

Composizione dei blocchi a base di bottom ash aerata

Composizione della fase solida



Dimostratori in geopolimero espanso

Mattone alleggerito

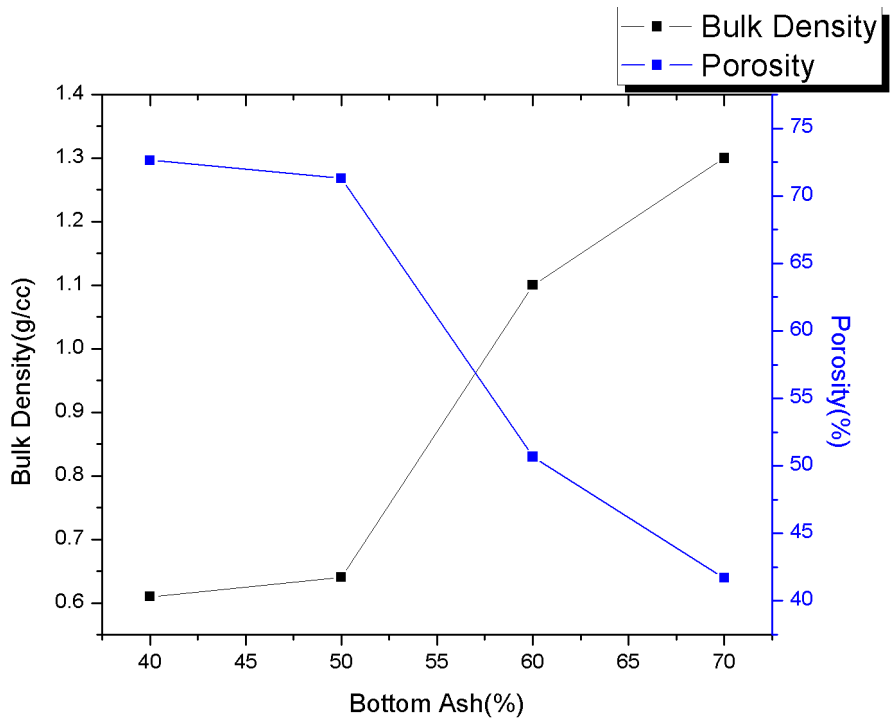
Laterizio con anima isolante in materiale geopolimerico

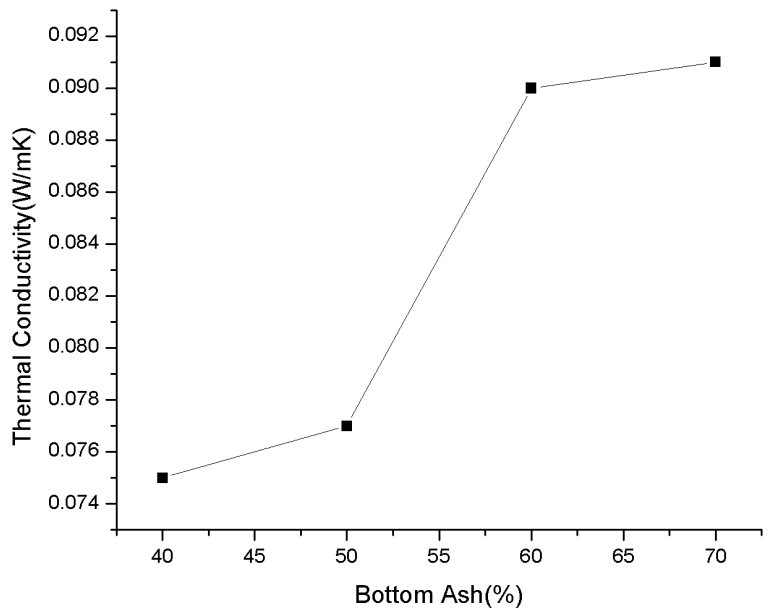
Lavorabilità meccanica

Lavorabilità estremamente facilitata dalla porosità

Geometrie e forme complesse possono essere ottenute

Densità e conducibilità termica





Conducibilità e inerzia termica

Il mattone aerato consente lo smorzamento dell'ampiezza dell'onda termica esterna e lo sfasamento, cioè con il ritardo di tempo intercorrente tra l'impatto sulla superficie esterna del muro ed il suo apparire, con intensità smorzata, sulla faccia interna.

Con una parete di 35cm di spessore

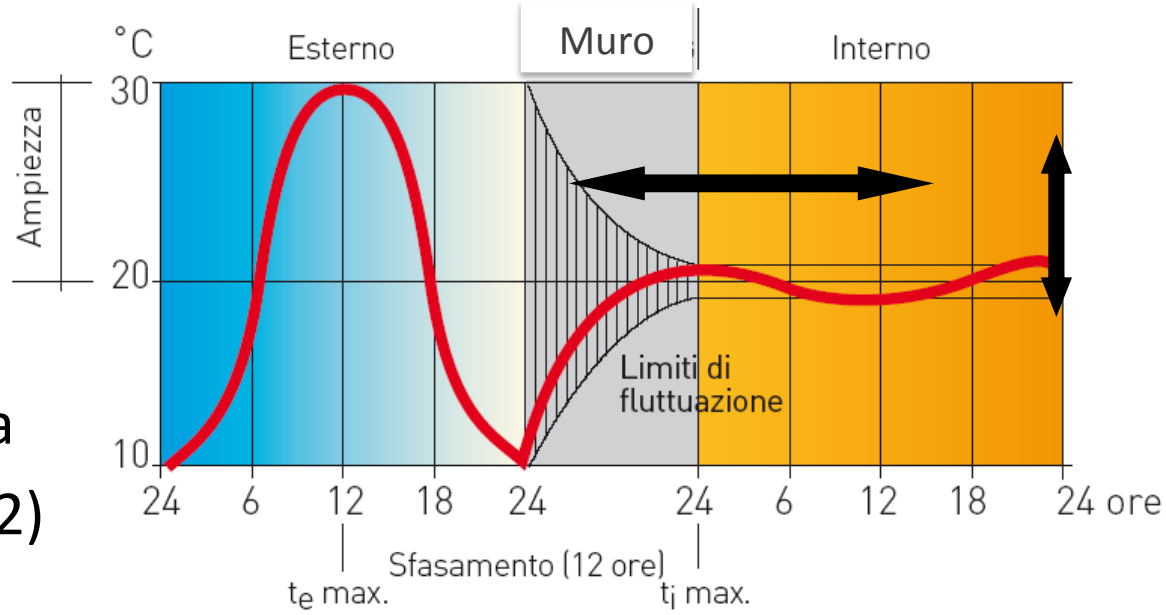
Λ = 0,7W/mK

U = 0,27W/m^{2}K

Φ = 11-13h

Trasmittanza periodica

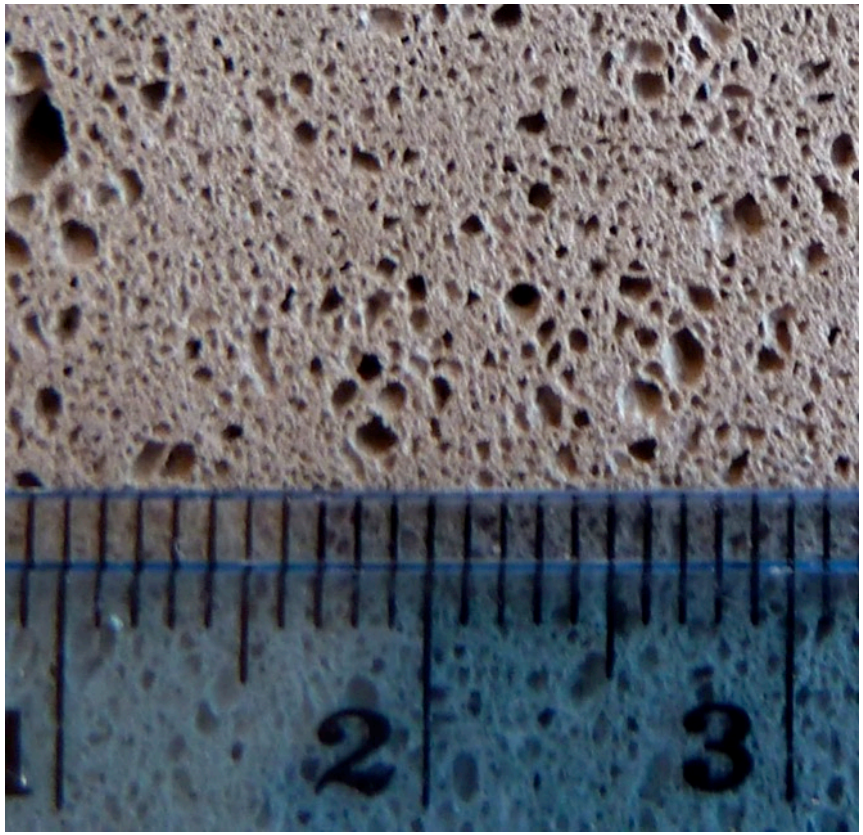
Y_{ie} = 0,07W/m^{2}K (<0,12)



Confronto con mattoni Ytong (gasbeton)

Ytong

Unisalento



Applicazioni

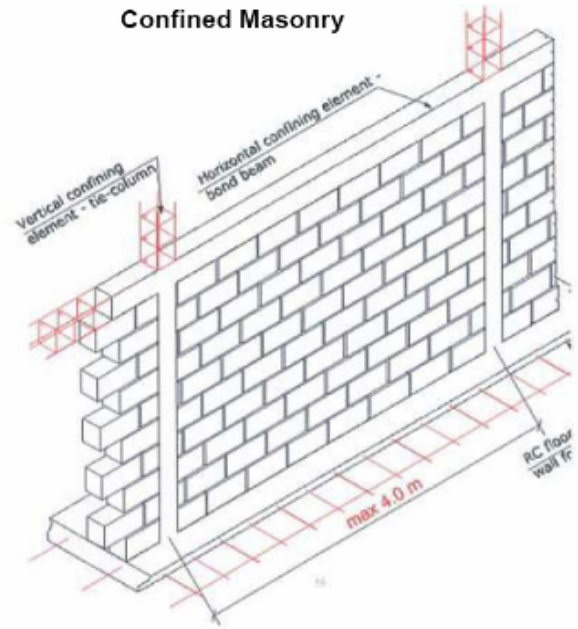
Muratura di Tamponamento

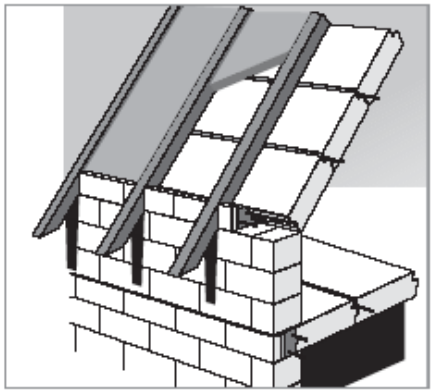
Compartimentazioni REI

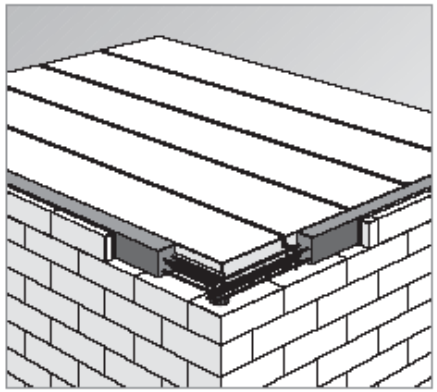
Cappotti esterni e interni

Correzione dei ponti termici

Solai e coperture







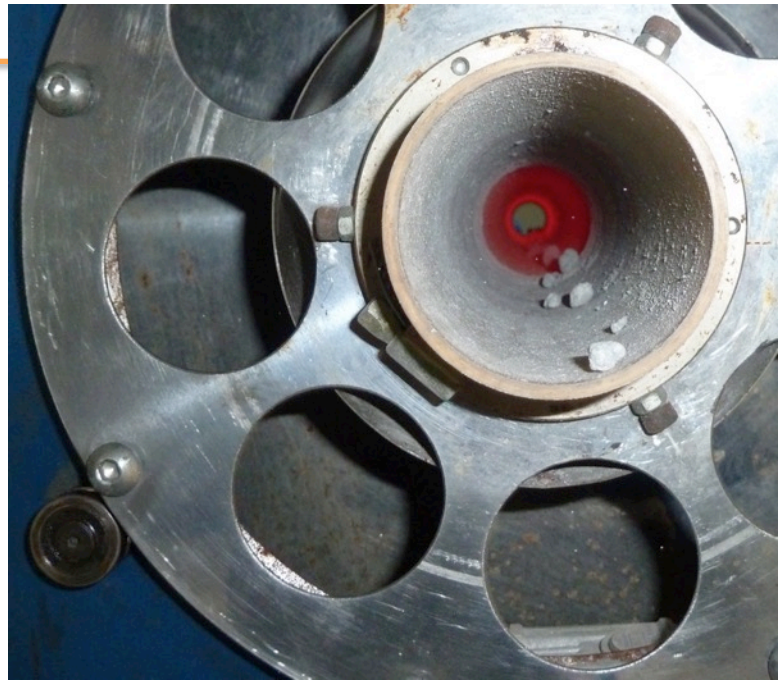
Confronto con i calcestruzzi aerati

Property	Ytong/Gasbeton	Ceneri schiumate
Porosità (%)	70 – 80	50 - 75 %
Resistenza meccanica (Mpa)	3,3-5	1,5-6
Conducibilità termica (W/mK)	0,12-0,8	0,1-0,7
Densità (g/cc)	0,3-0,6	0,3-1,3
Costo	Costoso	Economico

Processo di schiumatura di granulati mediante forno rotativo

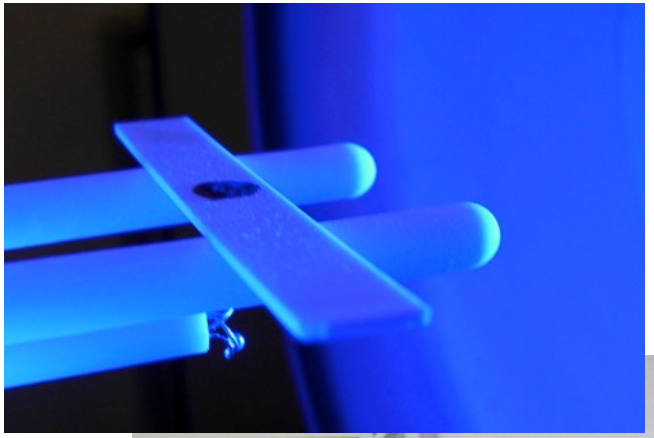
- Sistema vetroso: fly ash
- Fondente: Borace (tetraborato di sodio $Na_2B_4O_7$)
- Agente espandente: $CaCO_3$ $CaCO_3 \leftrightarrows CaO + CO_2$ (700-850°C)

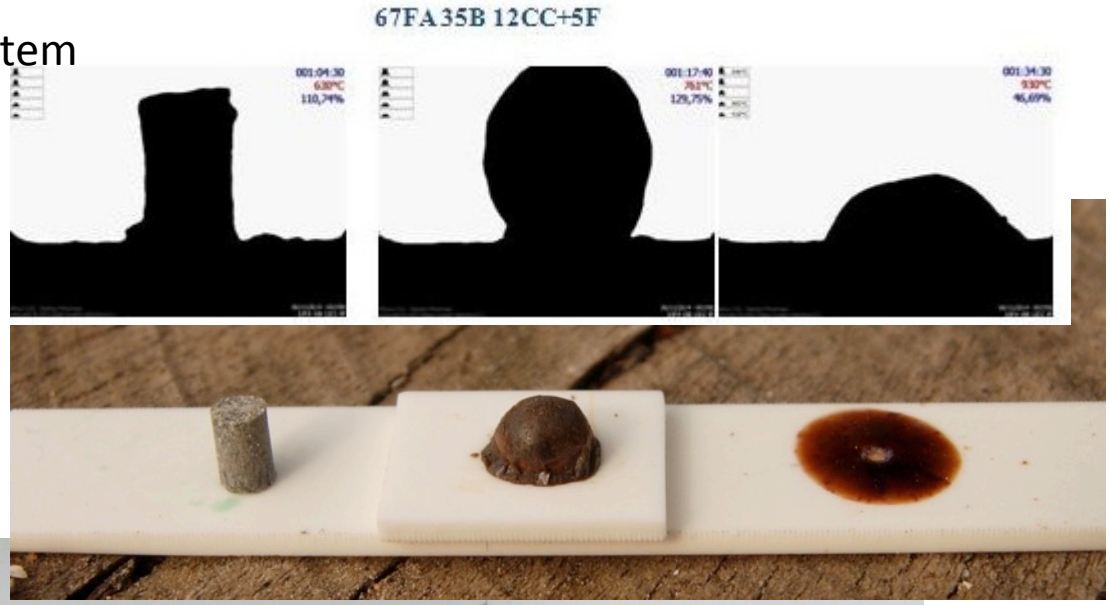
- La schiumatura è ottenuta in un forno rotante a 770°C
- Tempo di transito <10min

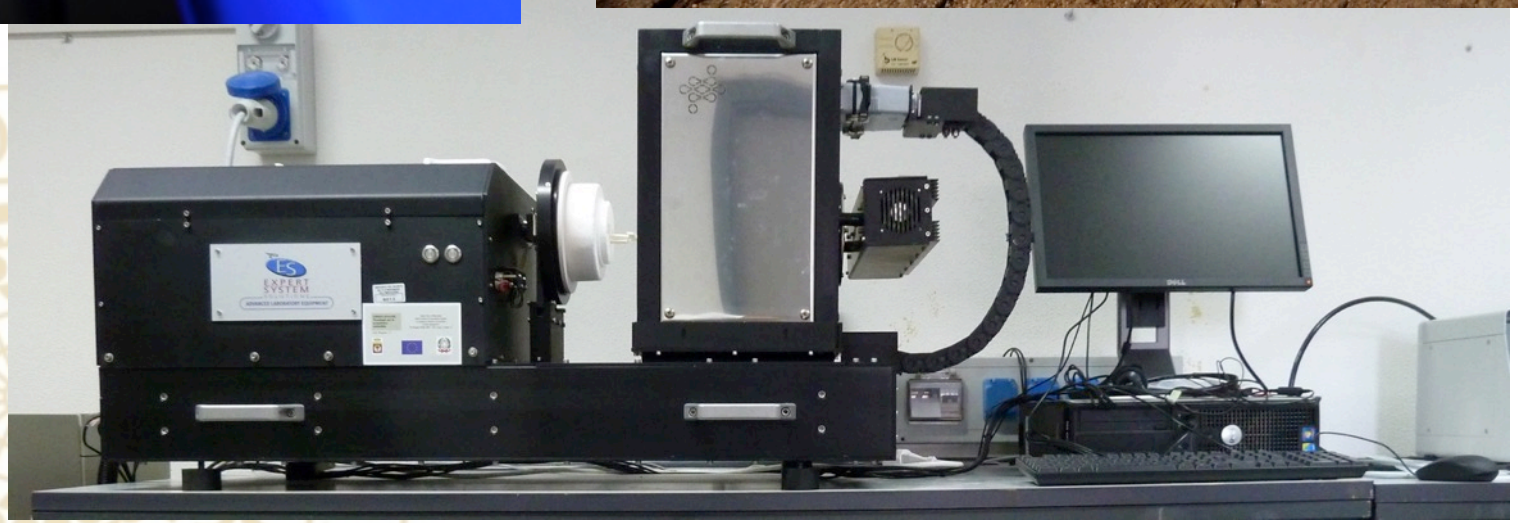


Microscopia ottica scaldante per ottimizzare la schiumatura degli inerti

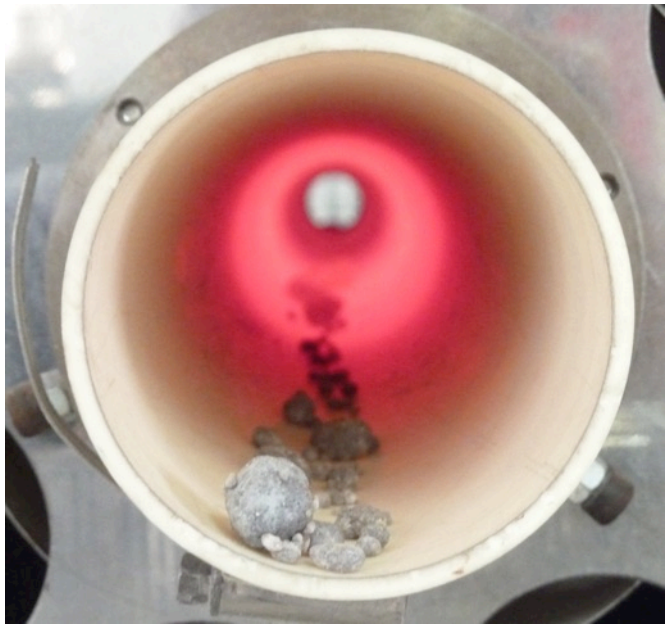
Microscopio Riscaldante Expert System
Misura HSM.







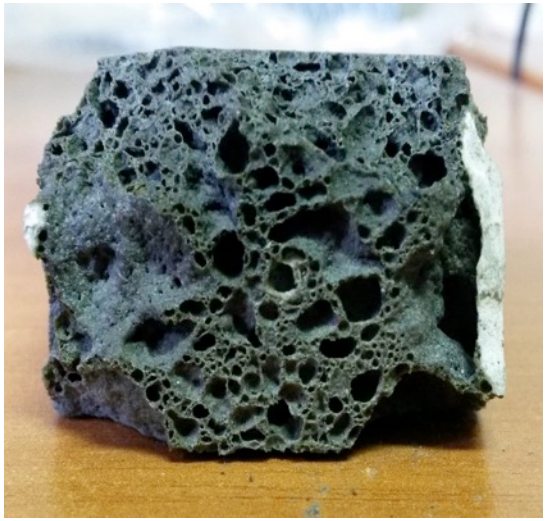
Confronto tra gli inerti leggeri ottenuti con l'argilla espansa commerciale



PROPRIETA'	ARGILLA ESPANSA	GRANULI
DIMENSIONE (mm)	**3 ÷ 8**	**4.74 ÷ 8**
LOOSE BULK DENSITY (kg/m^3)	**0.38**	**0.42**
CRUSHING VALUE (Mpa)	**1.5**	**2.8**
CONDUCIBILITA' TERMICA (W/mk)	**0.09**	**0.08**
ASSORBIMENTO DELL' ACQUA DOPO 24h	**n.a.**	**14%**

Possibili utilizzi della loppa destinata allo smaltimento

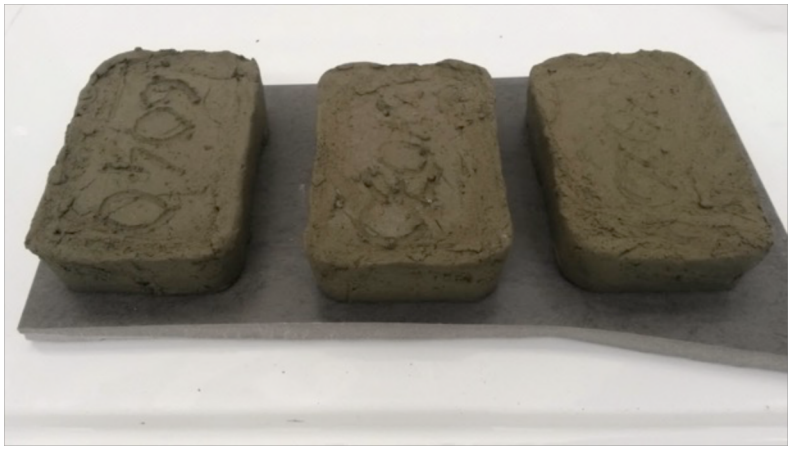
- Schiume ceramiche a bassa conducibilità termica
- Aggregati espansi per la produzione di calcestruzzi alleggeriti



Proprietà	Aggregati vetro-loppa	Argilla espansa Leca
Densità bulk (g/cm3)	0,8	0,4
Conducibilità termica (W/mK)	0,113	0,095
Resistenza a compressione (MPa)	6,4	1,5

Laterizi argilla-cenere

- Sono state preparate composizioni fino al 40% di ceneri sul carico solido
- Impasto e formatura senza problemi



Campione	Argilla (g)	Ceneri (g)	Conducibilità termca (W/mK)
Laterizio			0,73
AFA8020	80	20	0,57
AFA7030	70	30	0,55
AFA6040	60	40	0,43

Risposta delle soluzioni innovative Unisalento a Itaca Puglia

Categoria

- Energia primaria non rinnovabile
- Materiali ecocompatibili
- Prestazioni dell'involucro
- Qualità ambientale
- Qualità del servizio

Criteri

B1.2. Energia primaria per il riscaldamento

B.4.6 Materiali riciclati/recuperati

B.4.8 Materiali locali

B6.2 Energia netta per raffrescamento

B.6.3 Trasmittanza termica dell'involucro

D.3.2 Benessere

D.5.6 Qualità acustica

E.6.1 Mantenimento delle prestazioni dell'involucro

Conclusioni

- Il risparmio energetico e la tutela ambientale sono i nuovi paradigmi nel settore dell'edilizia
- Da questi paradigmi si irradia una forte domanda di innovazione per il superamento di approcci costruttivi tradizionali
- I sottoprodotti industriali quali loppe e ceneri possono diventare nel nostro contesto territoriale una importante materia prima per lo sviluppo di nuovi prodotti per la costruzione

I ringraziamenti

Vanno ai collaboratori:

Ehsan Ul Aq, Vincenzo Contaldi, Sudipto Pal, Sergio Franza, K.P. Sanosh

Alle aziende partner:

ENEL, Italcementi, Ilva, Salentec