



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
20133 MILANO – P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

Dichiarazione di compatibilità delle malte VAGA con elementi in calcestruzzo per murature REI 180

Novembre 2010



*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

1. Premessa

Lo scopo della presente relazione è di verificare la compatibilità delle malte VAGA (Super MaltaBLOK, classe M10; HR15, classe M15 e FibroMalta, classe M5), con mattoni forati in calcestruzzo per applicazioni a murature caratterizzate da resistenza al fuoco pari almeno a REI 180.

La dichiarazione di compatibilità verrà effettuata

- a) sulla base delle risultanze sperimentali ottenute sulle malte, il cui comportamento meccanico e termico è stato oggetto di indagini sperimentali condotte presso il Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano (Allegato 1);
- b) alla luce di prove al vero, effettuate su prototipi di muri tagliafuoco, in scala reale (3.00 × 3.00 m), condotte presso l'Istituto RINA di Genova.

Ove necessario, le osservazioni sperimentali saranno opportunamente integrate con analisi numeriche, in accordo alle prescrizioni di cui al D.M. 14/01/2008, e alla luce della UNI EN 1992-1-2 (Eurocodice 2 per strutture in calcestruzzo esposte ad incendio, esplicitamente richiamato nel D.M. 14/01/2008).

Il presupposto fondamentale della presente dichiarazione è che si possa dimostrare che, per una tipologia di muratura standard, le malte abbiano un comportamento al fuoco uguale o migliore del calcestruzzo (di cui sono costituiti i blocchi che, insieme alla malta, compongono la muratura).

E' bene ricordare anzitutto come la sigla "REI" si riferisca ai tre requisiti fondamentali che un elemento strutturale deve garantire durante un incendio, per un intervallo di tempo stabilito in funzione della destinazione d'uso:

- **R = Resistenza:** l'elemento deve garantire il mantenimento della propria capacità portante sotto l'effetto combinato dei carichi di esercizio e delle temperature elevate;
- **E = Ermeticità (Tenuta):** l'elemento deve mantenersi integro e garantire così una funzione di compartimentazione (= separazione) nei confronti di fumi e fiamme;
- **I = Isolamento:** l'elemento deve limitare la trasmissione di calore, dal lato esposto all'incendio al lato non esposto, al fine di evitare il propagarsi della combustione.

La valutazione della resistenza R viene generalmente eseguita determinando preventivamente la distribuzione di temperatura all'interno dell'elemento strutturale, per effetto della curva temperatura-tempo prevista in normativa, e atta a simulare le condizioni ambientali in presenza di incendio. La distribuzione di temperatura così ottenuta consente di valutare il decadimento delle proprietà meccaniche dei materiali in ogni punto dell'elemento. Sulla base di tale decadimento, è possibile, attraverso i metodi di calcolo analitici previsti dalla normativa, quantificare il corrispondente decadimento della capacità portante, e verificarne la compatibilità con il carico previsto sulla struttura in condizioni di incendio.

La valutazione della tenuta E non può prescindere da prove sperimentali: si deve infatti verificare la



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
20133 MILANO – P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

capacità dei materiali che costituiscono l'elemento, di non permettere il passaggio di fumi. E' inoltre necessario che, sotto l'effetto dell'incendio, non si verificano nell'elemento fessurazioni tali da comportare la propagazione dei fumi e delle fiamme. A questi aspetti della tenuta, che potremmo definire "intrinseci", ovvero connaturati alla natura dei materiali che costituiscono l'elemento strutturale, se ne affiancano altri, che potremmo definire "estrinseci", e che dipendono invece dal contesto strutturale: sotto l'effetto delle temperature elevate, e delle conseguenti dilatazioni termiche, il materiale deve permettere all'elemento in prova di mantenere un'adeguata connessione con gli altri elementi strutturali (travi e pilastri), in modo da evitare che si creino, in corrispondenza delle zone di interfaccia, passaggi per le fiamme e i fumi.

La valutazione dell'isolamento I viene eseguita sulla base della distribuzione di temperatura all'interno dell'elemento. Si deve garantire che, sul lato non esposto all'incendio, la variazione di temperatura rispetto a quella ambientale non ecceda i limiti così fissati dalla normativa (UNI EN 1992-1-2):

- incremento della temperatura media inferiore a 140°C;
- incremento massimo di temperatura inferiore a 180°C.

La verifica del mantenimento di queste tre caratteristiche per 180 minuti, in una muratura standard realizzata con blocchi in calcestruzzo normale e malte VAGA, costituisce l'obiettivo di questa relazione.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

2. Geometria

In Figura 1 è riportata la geometria di un tipico blocco in calcestruzzo per murature tagliafuoco; come si può notare, sono presenti due fori, due pareti e tre costole.

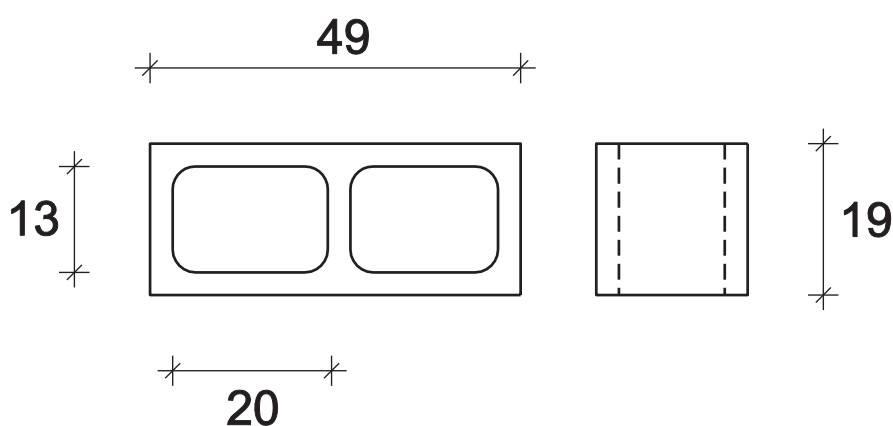


Figura 1 – Dimensioni caratteristiche del mattone forato considerato (spessore di costole e pareti = 32 mm).

La malta viene utilizzata per l'allettamento di questo tipo di mattoni, che sono normalmente realizzati in calcestruzzo (nelle murature tagliafuoco), ma che possono anche essere in laterizio, e contribuisce alla formazione dei vari corsi della muratura. Essa viene stesa in forma di giunti verticali ed orizzontali.

E' opportuno considerare che, ai fini della resistenza (R) in presenza di carichi verticali, sono i giunti orizzontali ad essere sollecitati in maniera significativa, mentre ai giunti verticali è affidato semplicemente il compito di garantire un adeguato comportamento monolitico della muratura.

Se invece si considerano la tenuta (E) e l'isolamento (I), anche i giunti verticali costituiscono potenziali punti deboli per il passaggio di fumi e fiamme, ovvero per un'eccessiva trasmissione di calore alla faccia non esposta all'incendio.

Nel seguito si farà riferimento ad una tipica muratura tagliafuoco, così composta:

- mattoni delle dimensioni riportate in Figura 1;
- malta di allettamento, disposta su giunti verticali e orizzontali, di spessore pari ad 1 cm.



*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

3. Verifica del criterio R

In uno stato di sollecitazione generico (azione assiale eccentrica = azione assiale centrata + momento flettente) agente su una muratura, la capacità portante è rappresentabile mediante un dominio di interazione M-N (momento-azione assiale), determinato in base alle caratteristiche di resistenza dei materiali costituenti la muratura (calcestruzzo e malta).

Ai sensi del D.M. 14/01/2008, le prestazioni meccaniche di una malta sono definite mediante la sua resistenza media a compressione f_m . La categoria di una malta è definita da una sigla costituita dalla lettera M seguita da un numero che indica la resistenza f_m espressa in MPa. Per l'impiego in murature portanti non è ammesso l'impiego di malte con resistenza $f_m < 2.5$ MPa; la resistenza a compressione dei blocchi può invece variare da 2 a 40 MPa.

In sede di progetto, per le murature formate da elementi artificiali pieni o semipieni, il valore di resistenza f_k dell'insieme blocco-malta può essere dedotto dalla resistenza a compressione degli elementi, e dalla classe di appartenenza della malta (Tabella 11.10.V del D.M. 14/01/08).

Dalle considerazioni precedenti è allora lecito attendersi (a) che la resistenza della muratura in condizioni di incendio sia determinata dalle proprietà della malta e del calcestruzzo, e (b) che i decadimenti di resistenza dei due materiali determinino il decadimento di resistenza della muratura.

In Figura 2 è mostrato il decadimento della resistenza a compressione residuale per le tre malte VAGA oggetto delle indagini di laboratorio di cui all'Allegato 1; la banda grigia riguarda invece la resistenza "a caldo" di calcestruzzi ordinari, ad aggregati silicei (limite inferiore) e calcarei (limite superiore), secondo le prescrizioni di cui alla UNI EN 1992-1-2. Considerando che generalmente la resistenza misurata in condizioni residuali è sino al 10-25% inferiore alla resistenza misurata a caldo, si può concludere che le tre malte oggetto di indagine presentino un decadimento della resistenza a compressione del tutto in linea con quello di un calcestruzzo normale. E' allora lecito attendersi che una muratura realizzata con blocchi in calcestruzzo normale e malte VAGA, presenti un decadimento di resistenza analogo a quello di un calcestruzzo normale. In altri termini, le malte VAGA non sono certamente l'anello debole della catena resistente.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

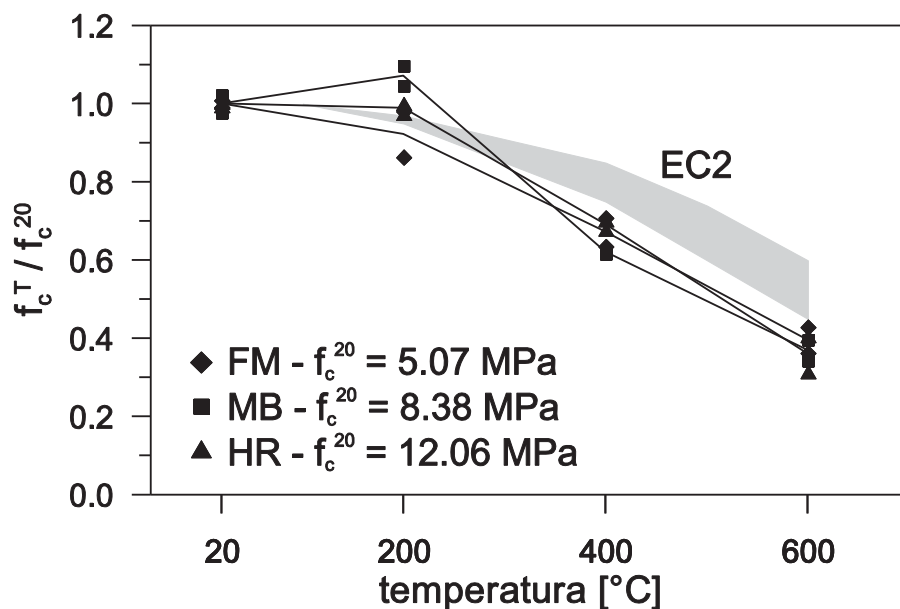


Figura 2 – Confronto tra la resistenza residuale normalizzata delle tre malte VAGA, e la resistenza a caldo di calcestruzzi ordinari (come da UNI EN 1992-1-2), si veda l'Allegato 1.



*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

4. Verifica del criterio E

Come si è ricordato in precedenza, la tenuta estrinseca dipende in maniera significativa dal contesto strutturale, e dunque deve essere valutata caso per caso. Peraltro, alla valutazione della tenuta concorre il coefficiente di dilatazione termica, che, per le malte VAGA, non è stato oggetto di misure sperimentali.

La tenuta intrinseca, invece, dipende primariamente dalle proprietà dei materiali in gioco (calcestruzzo dei blocchi, malta dei giunti), e dalla loro mutua collaborazione. Risulta pertanto possibile effettuare delle considerazioni sulla tenuta intrinseca, prescindendo dal contesto strutturale.

Le malte VAGA sono state utilizzate per la realizzazione di provini di muratura in scala reale (3.00×3.00 m), soggetti a prova di tenuta ed isolamento presso l'Istituto RINA di Genova. Le murature oggetto di prova sono state realizzate con blocchi in calcestruzzo, e anche con mattoni forati in laterizio. In tutte le prove effettuate, per le quali si rimanda ai relativi certificati, sono stati registrati valori di EI pari almeno a 180 minuti. Si può quindi concludere che le malte VAGA siano compatibili con la realizzazione di murature caratterizzate da EI 180.

In Figura 3 e 4 sono mostrate delle fotografie della prova effettuata su un prototipo di muratura realizzato con mattoni forati in laterizio, e malta intermedia. Il dettaglio relativo all'angolo in basso a sinistra (Figura 4), vincolato su ambedue i lati da putrelle in acciaio, mostra l'assenza di fessure passanti, nonché la connessione con i profilati in acciaio ancora integra su tutto il contorno.

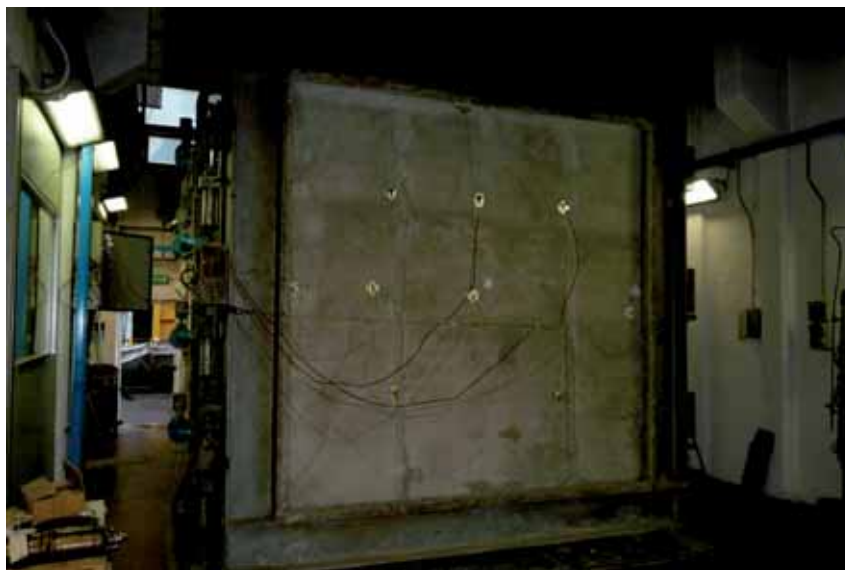


Figura 3 – Campione di muratura di dimensioni 3×3 m, durante la prova di resistenza al fuoco condotta presso l'Istituto RINA di Genova (blocchi in laterizio) in data 18/09/2010.



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
20133 MILANO – P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*



Figura 4 – Dettaglio tratto dalla foto precedente: si noti l'assenza di fessure passanti, e dunque la perfetta tenuta anche al termine della prova (durata della prova = 240 minuti).



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

5. Verifica del criterio I

Le considerazioni svolte al paragrafo precedente sulla base delle prove sperimentali condotte all'Istituto RINA di Genova consentono di affermare direttamente che le malte VAGA sono atte a garantire l'isolamento almeno per 180 minuti. In questo paragrafo si vuole però affrontare tale questione da un punto di vista più generale, aggiungendo valutazioni di tipo analitico.

A tal proposito, si consideri il generico blocco standard costituente la muratura, e già mostrato in Figura 2: considerandone la sezione corrente (ovvero, non a ridosso dei giunti), esso è in grado di soddisfare al requisito I per 180 minuti se, a seguito di esposizione su di un lato ad incendio standard ISO834, la temperatura media sul lato esposto non aumenta più di 140°C rispetto alla temperatura ambiente (20°C), e la temperatura massima non eccede la temperatura ambiente per più di 180°C. Al fine di comprendere sotto quali condizioni questo possa avvenire, si effettua lo studio della distribuzione di temperatura all'interno di un blocco, mediante un modello bidimensionale ad elementi finiti.

Indagine preliminare bidimensionale sul blocco singolo

Si è creato un modello geometrico che riproduce esattamente la geometria del blocco (Figura 5a); tale modello è stato suddiviso in elementi finiti triangolari (Figura 5b), e si è provveduto a studiare la distribuzione di temperatura sulla sezione del blocco al variare della durata di incendio.

Preliminarmente è stata individuata la temperatura da assegnare alle cavità per garantire il raggiungimento della resistenza di 180 minuti per il criterio I. Le condizioni al contorno imposte nella prima analisi sono state le seguenti:

- lato caldo: trasmissione del calore mediante convezione ed irraggiamento con ambiente a temperatura variabile secondo la curva di incendio standard ISO834;
- lato freddo: trasmissione del calore mediante convezione ad ambiente a temperatura costante, pari a 20°C;
- superfici delle cavità adiabatiche.

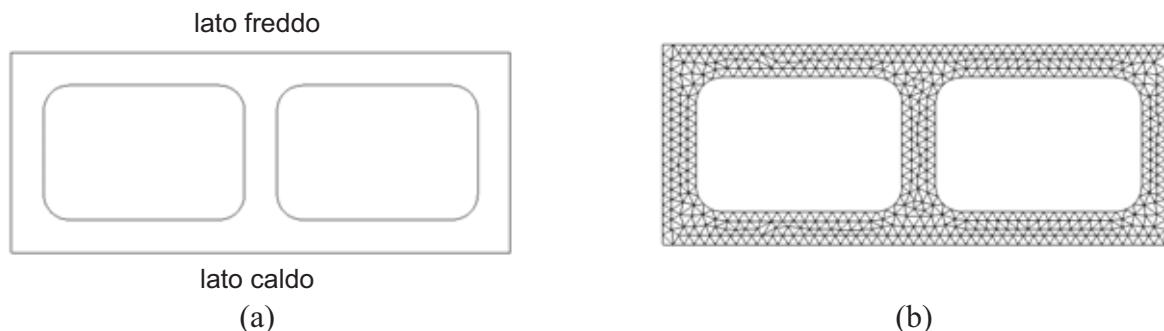


Figura 5 – (a) Modello bidimensionale del singolo mattone; (b) suddivisione del modello in elementi finiti triangolari.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

I risultati dell'analisi sono mostrati in Figura 6, per le durate di incendio di 60, 120 e 180 minuti. Si noti come il lato inferiore risulti progressivamente più scuro all'aumentare della durata di incendio, e quindi al progredire dell'onda termica all'interno della sezione del blocco.

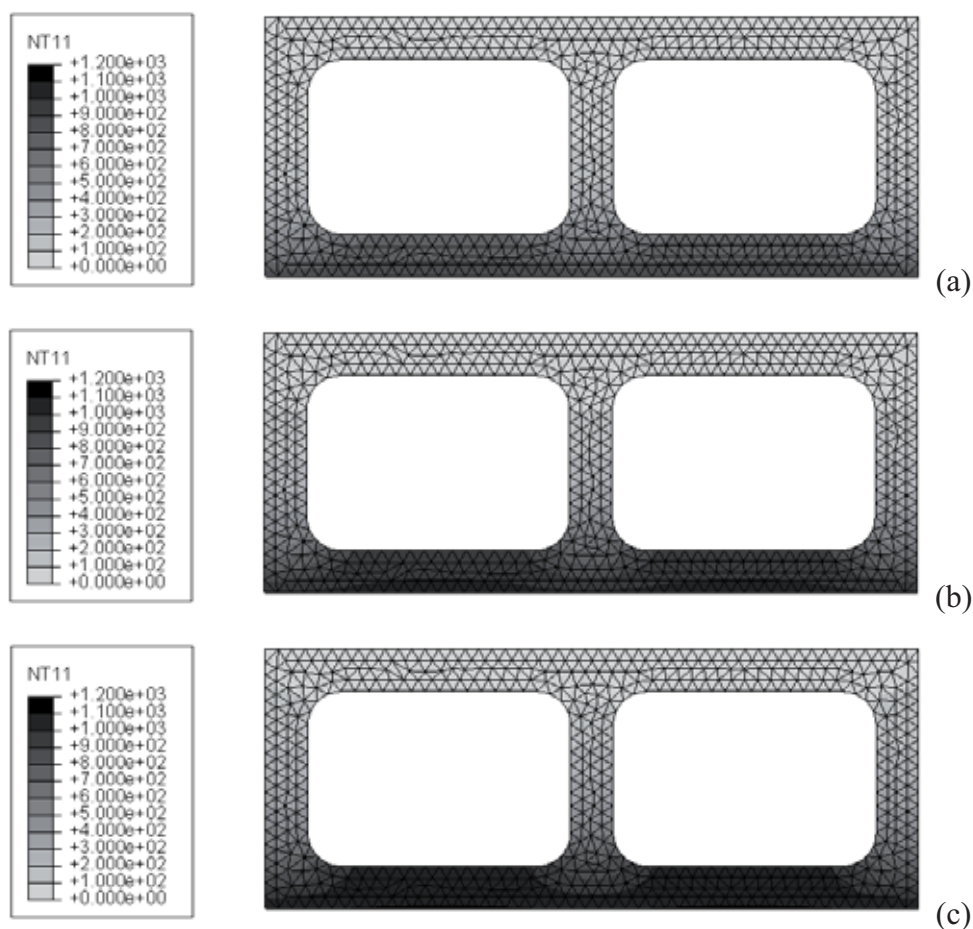


Figura 6 – Modello 1: Mappe di temperatura in funzione della durata di incendio: a) $t = 60$ minuti; b) $t = 120$ minuti; e c) $t = 180$ minuti.

Ipotizzare che le cavità del blocco siano adiabatiche comporta una sopravvalutazione delle capacità isolanti del blocco stesso; nella realtà, all'aumentare della durata di incendio, la temperatura dell'aria presente all'interno delle cavità aumenterà, e si verificherà una trasmissione di calore per effetto di moti convettivi. Inoltre, non si può escludere che le superfici che si affacciano sulla cavità scambino mutuamente calore per irraggiamento.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

Per tenere conto di tale fenomeno sono state svolte ulteriori analisi, ipotizzando che l'aria all'interno della cavità si mantenga a temperatura costante, e che avvenga uno scambio di calore con le superfici a contatto con essa mediante convezione.

I risultati di tutte le analisi effettuate, espressi come distribuzione di temperatura sul lato freddo a 180 minuti, sono riportati in Figura 7. A titolo di confronto sono riportate anche due rette orizzontali che rappresentano la temperatura media e massima consentite sul lato non esposto (pari rispettivamente a $T_{media} = 20 + 140 = 160^{\circ}\text{C}$, e $T_{max} = 20 + 180 = 200^{\circ}\text{C}$) ai fini del soddisfacimento del criterio I.

Dalla Figura 7 si può concludere come la massima temperatura all'interno della cavità compatibile con il soddisfacimento del criterio I per 180 minuti valga 300°C .

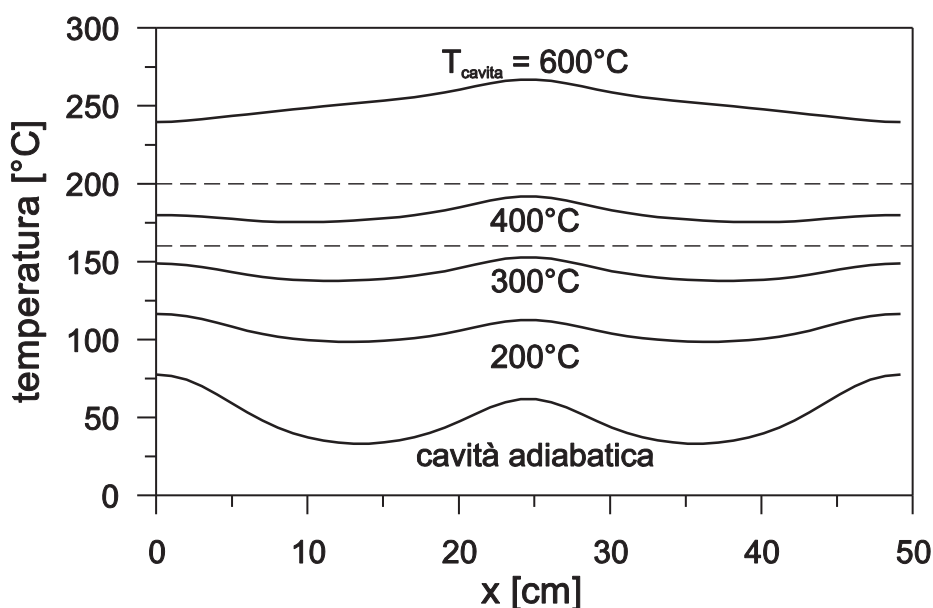


Figura 7 – Profilo termico sulla superficie fredda, in funzione della temperatura (supposta costante) all'interno delle cavità.

Indagine tridimensionale sull'insieme blocco + malta

Si vuole ora indagare il comportamento dell'insieme malta-blocco; se i risultati di diffusività ottenuti sulle malte VAGA indicano di per sé un comportamento migliore, in termini di potere isolante, rispetto ai calcestruzzi ordinari, non si può però escludere che l'utilizzo in giunti di allettamento (continui lungo tutta la muratura e a diretto contatto con l'aria calda all'interno delle cavità dei blocchi) possa costituire una via preferenziale di trasmissione del calore, con ciò



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

compromettendo la capacità isolante del blocco stesso.

A tale scopo si è considerata una muratura, con blocchi in calcestruzzo, aventi le dimensioni mostrate in Figura 2, e giunti di malta dello spessore di 1 cm, esposta ad incendio su di un lato (Figura 8); in considerazione della modularità della muratura, è lecito considerare solamente la porzione rettangolare di colore grigio chiaro.

Vista frontale

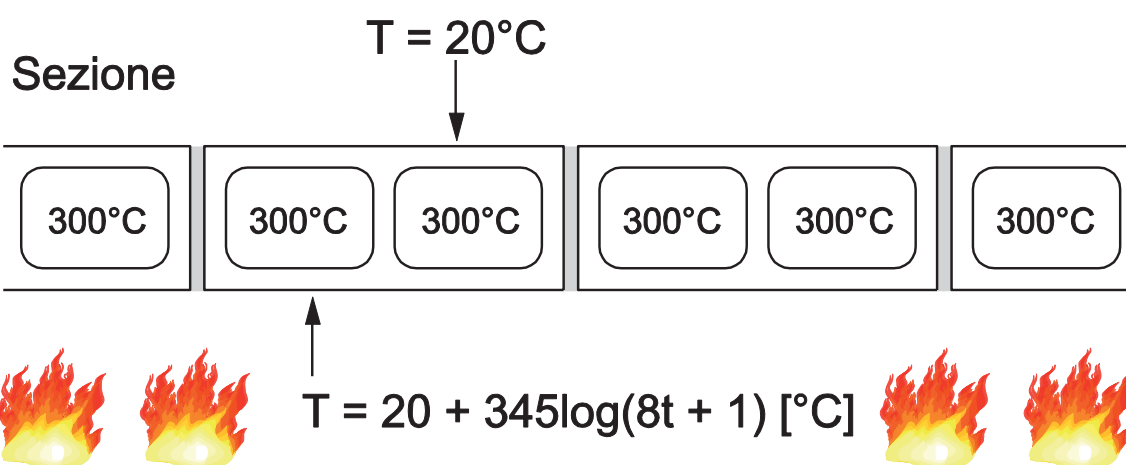
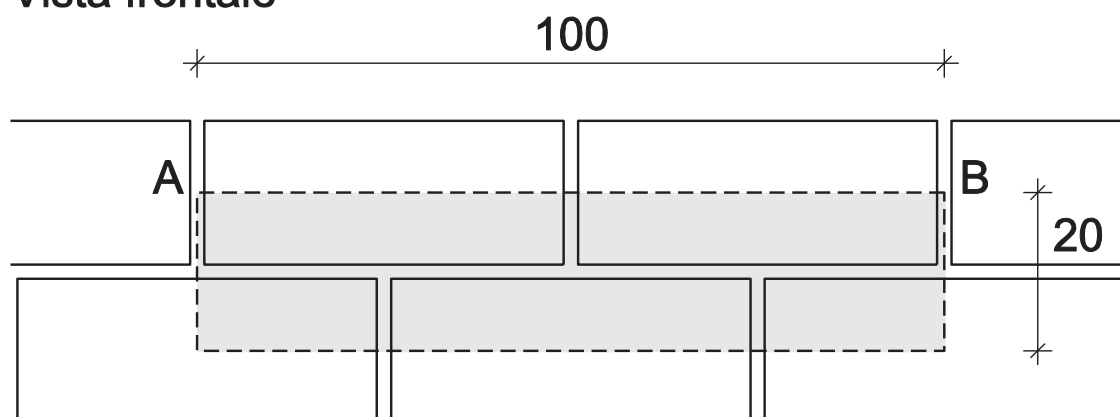


Figura 8 – Porzione di muro oggetto dell'analisi tridimensionale ad elementi finiti.

Tale porzione è stata ricostruita e modellata mediante elementi finiti tetraedrici (Figura 9), e sottoposta alle stesse condizioni al contorno considerate nella precedente analisi bidimensionale. Alla luce dei risultati ottenuti sul singolo blocco, è stata imposta all'interno delle cavità una temperatura costante pari a 300°C ; tale valore costituisce il limite, oltre il quale la sezione corrente

Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
 Costa de Nobili (Pavia)

del blocco non è in grado di soddisfare i requisiti di isolamento in termini di temperatura media e massima.

Il già citato potere isolante della malta è stato tenuto in considerazione introducendo nel modello una diffusività molto prossima alle misure sperimentali (Figura 10, si veda anche l'Allegato 1), e comunque decisamente inferiore a quella di un calcestruzzo normale (si vedano, per esempio, le prescrizioni di cui alla UNI EN 1992-1-2).

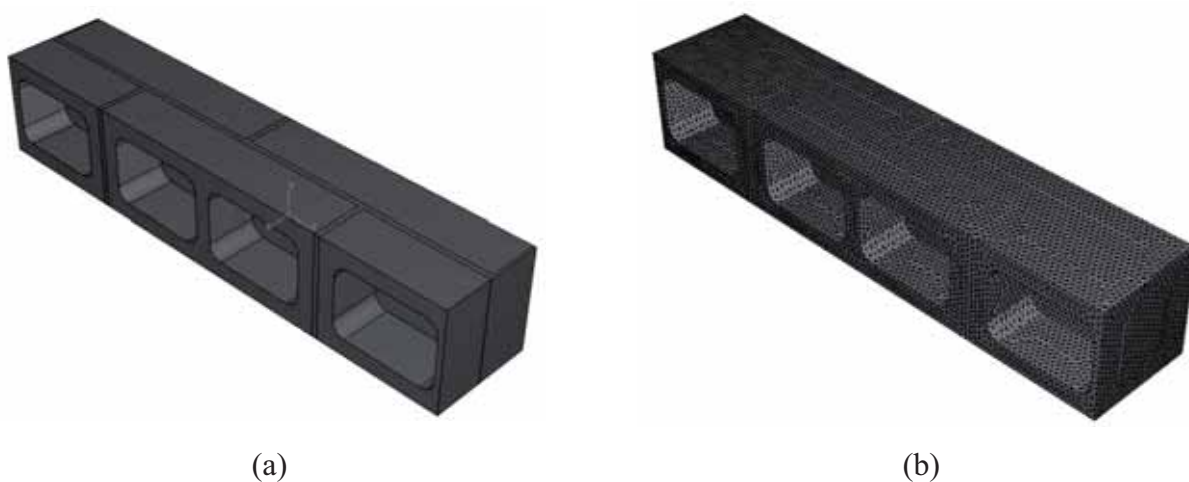


Figura 9 – Immagine del modello tridimensionale, e suddivisione in elementi finiti.

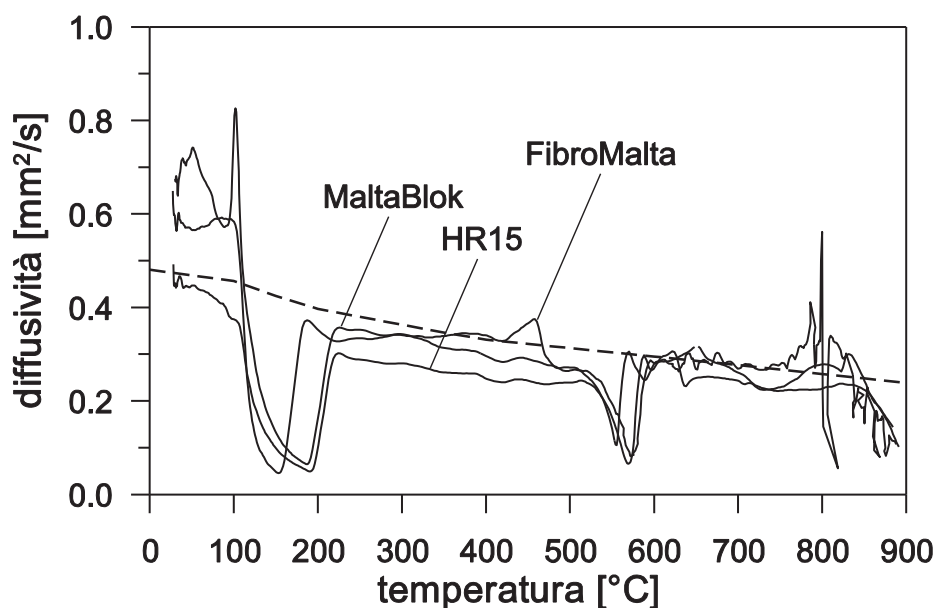


Figura 10 – Diffusività misurata sperimentalmente (Allegato 1), e andamento assunto nei calcoli.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

I risultati dell'analisi sono illustrati in Figura 11a, dove si mostra la mappa del flusso di calore che attraversa lo spessore della muratura in corrispondenza del lato non esposto. Si noti come i valori più elevati (zone più scure) si abbiano in corrispondenza delle costole e delle pareti del blocco in calcestruzzo; i giunti di malta, invece, risultano di colore più chiaro, a conferma del loro buon comportamento isolante. In Figura 11b sono invece mostrate le temperature sul lato non esposto; si noti come le temperature più elevate si manifestino in corrispondenza delle costole. Sulle pareti si hanno temperature meno elevate, proprio grazie all'effetto isolante del giunto.

L'andamento delle temperature sul segmento AB del lato non esposto (Figura 8) è riportato, per maggiore chiarezza, in Figura 12; si vede chiaramente che le vie preferenziali per la trasmissione del calore sono le costole, mentre le pareti sono caratterizzate da temperature inferiori, grazie alla benefica influenza dei giunti. In ogni caso, la temperatura massima è inferiore a 160°C, e dunque il criterio I è da ritenersi soddisfatto.

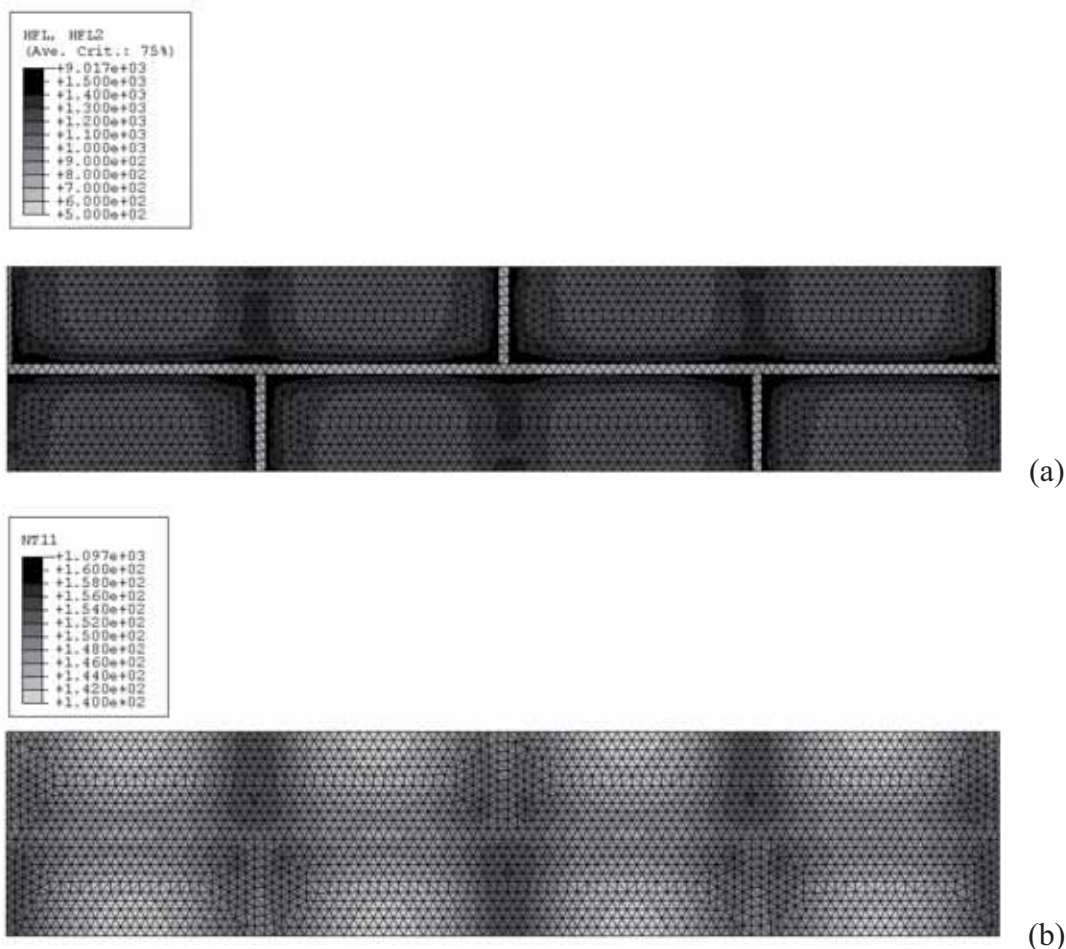


Figura 11 – Modello tridimensionale: (a) flusso di calore; e (b) temperatura sul lato non esposto.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

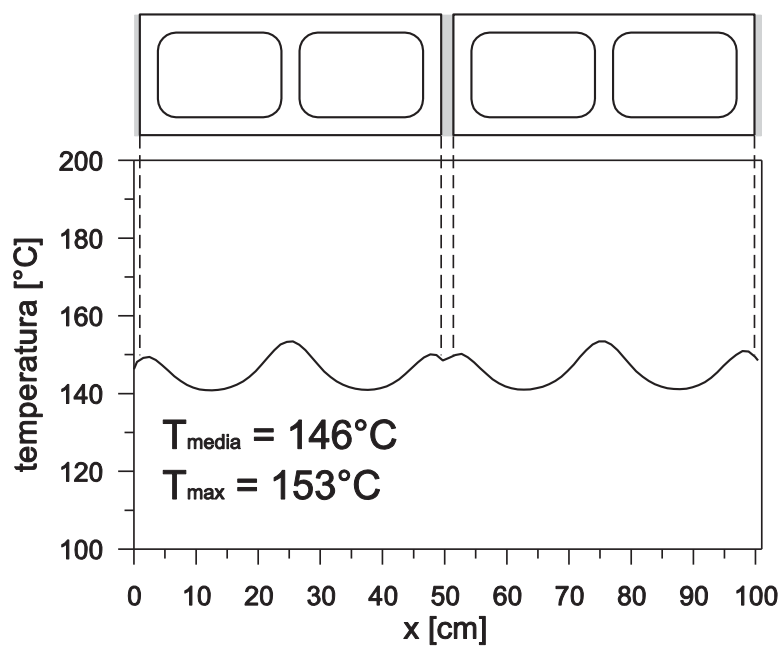


Figura 12 – Modello tridimensionale: profilo termico in corrispondenza del lato freddo, lungo il segmento AB (Figura 8).



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
20133 MILANO – P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

6. Conclusioni

In considerazione

- a) dei risultati sperimentali ottenuti al Politecnico sulle 3 malte VAGA (HR15, $f_m \geq 15$ MPa; FibroMalta, $f_m \geq 5$ MPa; Super MaltaBLOK, $f_m \geq 10$ MPa), e riguardanti il loro comportamento termo-meccanico ad alta temperatura;
- b) della prova di tenuta e di isolamento realizzata presso l'Istituto RINA su campione di muro con laterizi forati e malta tipo FibroMalta;
- c) delle analisi numeriche effettuate su una porzione di muratura con forati di calcestruzzo e letti di malta;

le tre malte VAGA risultano compatibili con applicazioni in muri tagliafuoco con blocchi in calcestruzzo o con forati in laterizio, aventi resistenza al fuoco di almeno 180 minuti.



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
20133 MILANO – P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

Referenze bibliografiche e normative

- Decreto Ministeriale 16/02/2007: "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione".
- Decreto del Ministero delle Infrastrutture 14/01/2008: "Norme tecniche per le costruzioni".
- UNI EN 1992-1-2 (2005): "Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio", UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 97 pp.
- Buchanan A. (2002): *Progetto delle strutture resistenti al fuoco*, Hoepli, Milano, 436 pp. (Edizione italiana aggiornata agli Eurocodici a cura di Pietro Gambarova e Roberto Felicetti).



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
20133 MILANO – P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

Allegato 1

Caratterizzazione Termomeccanica di Malte Cementizie atte all'Allettamento di Blocchi di Cemento e Calcestruzzo

Novembre 2010

Gli Sperimentatori
ing. Patrick Bamonte
ing. Alireza Nafarieh

Il Responsabile del Laboratorio
Settore "Calcestruzzi - Prove Speciali"
Prof. Roberto Felicetti



*Richiedente: VAGA S.r.l. “Aggregati e Malte per l’Edilizia”
Costa de’ Nobili (Pavia)*

1. Premessa

La Società VAGA S.r.l. “Aggregati e Malte per l’Edilizia” di Costa de’ Nobili (Pavia) ha commissionato al Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano la caratterizzazione termomeccanica di tre malte a prestazione garantita, e precisamente le malte Super MaltaBLOK (indicata nel seguito con MB, classe M10, avente resistenza caratteristica a compressione superiore a 10 MPa), HR15 (indicata con HR, classe M15, avente resistenza caratteristica a compressione superiore a 15 MPa) e FibroMalta (indicata con FM, classe M5 avente resistenza caratteristica a compressione superiore a 5 MPa). La malta FM, pur essendo fibrorinforzata, può essere considerata come sufficientemente rappresentativa delle malte ordinarie di classe M5 (quali – ad esempio – la Malta Bastarda VAGA), cui fare riferimento nell’indagine sulle prime due a prestazioni più elevate.

La caratterizzazione meccanica si è resa necessaria per completare la conoscenza delle caratteristiche chimico-fisico-meccaniche delle tre malte, di prossima introduzione sul mercato ed aventi particolari proprietà di compattezza ed adesione. A titolo di esempio, da prove precedenti eseguite da VAGA, il coefficiente di assorbimento capillare e la resistenza di aderenza al supporto sono risultati di $0.37 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$ e 1.20 MPa nel caso della malta HR15, contro $0.65 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$ e 0.75 MPa nel caso della FibroMalta, e $0.70 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0.5})$ e $> 0.35 \text{ MPa}$ nel caso della Malta Bastarda VAGA (qui citata a titolo di riferimento).

La caratterizzazione termomeccanica (resistenza a compressione, curve tensione-deformazione in compressione, resistenza a trazione in flessione a 3 punti, modulo elastico secante, massa volumica e diffusività termica) sono funzionali alla modellazione di un modulo di muratura (= blocco di calcestruzzo/cemento + corsi di malta) ai fini della valutazione per via numerica della resistenza meccanica (R) e della capacità di isolamento (I), mentre discorso a parte richiederà la tenuta (E), per cui fanno testo le prove su muri $3 \times 3 \text{ m}$ esposti all’incendio standard in prove al vero condotte presso l’Istituto RINA di Genova.

Nel presente allegato vengono illustrati i risultati relativi a resistenza a compressione cilindrica, modulo elastico secante, massa volumica, diffusività termica, resistenza a trazione indiretta per flessione su 3 punti, e resistenza a compressione su cubi.

I cilindri per le prove di compressione e per la valutazione del modulo elastico secante sono stati 24 ($\varnothing \times h = 80 \times 160 \text{ mm}$), cui si sono aggiunti 3 provini per la valutazione della diffusività termica ($\varnothing \times h = 100 \times 300 \text{ mm}$). Per questi tre ultimi le cassetture sono state fornite dal Politecnico alla VAGA, ciascuna con dotazione di due termocoppie già disposte in posizione opportuna, in modo cioè che – dopo il getto della malta effettuato dalla VAGA – le termocoppie fossero l’una prossima alla superficie del cilindro di malta, e l’altra sull’asse del cilindro stesso.

Tutti i cilindri sono stati gettati in VAGA verso il 15 Giugno 2010, in modo da avere maturazione di 28 gg attorno al 15 Luglio, ed essere poi sottoposti a ciclo termico (7 gg. dopo), e quindi provati nell’ultima settimana di Luglio.



*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

Al fine di appurare l'influenza del processo di maturazione sulle prestazioni meccaniche, sono stati sottoposti a prova di compressione altri 6 cilindri, mantenuti in camera umida presso gli stabilimenti VAGA sino al raggiungimento dei 28 giorni di età.

Tutti i cilindri sono stati stagionati presso VAGA in condizioni quasi sigillate (in quanto all'interno delle rispettive casserature costituite da tubi di materiale plastico privi di fondo e di coperchio), alla temperatura di 20-25°C ed U.R. pari a 60-70%. Al Politecnico i provini sono stati tagliati alla giusta lunghezza e spianati, in modo da garantire la planarità ed il parallelismo delle facce estreme.

In Figura 1 è riportata la fotografia di un provino posto nel forno elettrico a controllo PID (proporzionale-integro-differenziale) della velocità di riscaldamento; il provino è uno dei tre con termocoppie per la misura delle temperature superficiale ed assiale, al fine di valutare la diffusività termica. Il provino è inserito in un tubo di acciaio, che garantisce l'uniformità del campo termico. Il parametro di controllo del forno è la temperatura interna del tubo di acciaio.

La resistenza a trazione indiretta per flessione è stata misurata su provini prismatici di dimensione 40 × 40 × 160 mm (Figura 2), e i due monconi risultanti dalla rottura di ogni prisma sono stati poi assoggettati a prova di compressione. È opportuno osservare che, analogamente ai 6 cilindri supplementari utilizzati per le prove di compressione, anche i provini prismatici sono stati maturati in camera umida per almeno 28 giorni prima di essere assoggettati alle prove meccaniche.

2. Caratterizzazione termica

La misura della diffusività termica $D = \lambda / (c \rho) [L^2/t]$, ove λ è la conducibilità termica [$Q/(LTt)$], c è il calore specifico [$Q/(MT)$] e ρ è la massa volumica [M/L^3], ha richiesto – come già si è detto – la preparazione di un cilindro per ogni tipo di malta, strumentato con due termocoppie atte a misurare la temperatura superficiale e la temperatura sull'asse, e collocate nella sezione mediana del cilindro stesso (Figura 1). La diffusività (m^2/s) è il parametro che controlla la trasmissione del calore per conduzione, ed ha il significato fisico di rapporto fra calore trasmesso e calore accumulato nel materiale (a maggiore diffusività termica corrisponde minore potere isolante, e viceversa).

Note sperimentalmente in un predefinito intervallo ($T = 150-900^\circ C$) la diffusività termica e la massa volumica, nota anche la conducibilità termica (in quanto – ad esempio – fornita a 20°C dal produttore della malta ed assunta variabile con la temperatura come indicato dall'Eurocodice 2), è possibile ricavare dalla diffusività il calore specifico, in modo da caratterizzare completamente la malta, in termini di conducibilità, calore specifico e massa volumica.

Ognuno dei 3 cilindri strumentati è stato riscaldato lentamente da 20°C a 900°C, in modo da permettere – ad intervalli regolari – di misurare le temperature fornite dalle due termocoppie. Come si può osservare in Figura 3, nell'intervallo 200-550°C le tre malte hanno denotato valori pressoché costanti della diffusività termica e prossimi a 0.25-0.35 mm^2/s , molto minori di quelli normalmente riscontrati nel calcestruzzo ordinario, rappresentati in Figura 3 dalla banda grigia, che rappresenta l'intervallo di valori di conducibilità consentito dalla normativa (EC2).



*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

Si può dire che rispetto alla curva media del calcestruzzo ordinario, la diffusività termica delle tre malte sia circa del 30-35% inferiore, il che rappresenta un fattore molto positivo, in quanto in murature con blocchi di calcestruzzo o mattoni riposanti su letti di malta non è certo la malta a causare ponti termici. Si sottolinea come tale buona caratteristica di isolamento delle malte sia propria anche delle malte MB ed HR, che si confermano tanto isolanti quanto le malte ordinarie rappresentate dalla malta FM.

Si osservi che i vistosi picchi negativi a 150-200°C e a 550-580°C corrispondono (a) al passaggio dell'acqua contenuta nei pori dallo stato liquido allo stato di vapore (il rapporto acqua/cemento nelle malte raggiunge valori di poco inferiori all'unità, rispetto agli usuali valori 0.45-0.60 nel calcestruzzo ordinario), e (b) al cambiamento di regime cristallino (da α a β) del quarzo contenuto nella sabbia. Ambedue questi fenomeni sono endotermici e quindi si manifestano con assorbimento di calore (a temperatura pressoché costante), il che comporta picchi positivi nel calore specifico, e picchi negativi nella diffusività termica.

Si noti che al di sotto di 100-150°C il metodo usato non permette una valutazione affidabile della diffusività termica (in quanto il riscaldamento del provino è ancora caratterizzato da un forte transitorio), mentre al di sopra di 800°C il fenomeno della calcinazione (con dissociazione del carbonato di calcio in ossido di calcio ed anidride carbonica a partire da circa 700°C) danneggia talmente il materiale da rendere assai dubbi i valori calcolati per la diffusività termica.

3. Perdita di massa volumica all'alta temperatura

Al termine dei cicli termici di cui si dirà al punto successivo, ciascun provino è stato pesato, per valutarne la massa e quindi la perdita della massa volumica (densità) alle varie temperature di riferimento.

Come si può vedere in Figura 4, la perdita di massa volumica è pressoché la stessa per le tre malte (ogni punto è la media di due misure sperimentali). Rispetto al calcestruzzo ordinario, la perdita è maggiore (a 600°C, la perdita è prossima al 12% per le malte e al 5% per il calcestruzzo).

La spiegazione più ovvia sta nel maggior contenuto d'acqua delle malte (il rapporto acqua/cemento può arrivare al 95%, a fronte di contenuti simili di cemento). Ad esempio, per massa volumica apparente di 1900 kg/m³, contenuto di cemento di 350 kg/m³ e contenuto di acqua di 280 kg/m³ (a/c = 0.80, compresa l'acqua contenuta nell'aggregato), assumendo che l'acqua combinata sia pari al 22% del peso di cemento (59 kg) e che l'acqua libera nei micropori sia quindi 280 – 77 = 203 kg, si può ritenere che a 400°C tutta l'acqua libera sia stata espulsa (203 kg), così come parte dell'acqua combinata (ad esempio $\frac{1}{4} 59 = 19$ kg), il che comporta un calo di massa volumica di $222/1900 = 11.7\%$, valore assai prossimo a quello misurato. (Si noti che nelle normali condizioni di maturazione molta acqua viene persa nel passaggio dallo stato fresco allo stato indurito – attorno a 100-150 kg/m³ – il che qui non è avvenuto essendo i provini maturati in condizioni quasi sigillate).



Richiedente: VAGA S.r.l. “Aggregati e Malte per l’Edilizia”
Costa de’ Nobili (Pavia)

Si osservino anche le diverse densità iniziali, variabili da 1982 kg/m³ (HR) a 1866 kg/m³ (MB) ed a 1758 kg/m³ (FM).

4. Resistenza a compressione dopo riscaldamento ad alta temperatura

La caratterizzazione è stata eseguita su provini cilindrici (diametro \approx 80 mm ed altezza \approx 160 mm) consegnati al Politecnico in numero di 24, la cui prova in compressione è stata eseguita sia in condizioni vergini (materiale non riscaldato, $T = 20^{\circ}\text{C}$), sia dopo ciclo termico a $T = 200, 400$ e 600°C (si vedano in Figura 5a due provini sistemati nel forno elettrico, in attesa di essere riscaldati, ed in Figura 5b quattro provini della malta MB, di cui il primo a sinistra vergine e gli altri tre riscaldati a 200, 400 e 600°C).

I cicli termici (Figura 6) sono sempre costituiti in un lento riscaldamento fino alla temperatura di riferimento ($\Delta T/\Delta t = 1^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$), seguito da un periodo di riposo alla stessa temperatura (120 minuti) e da un ancor più lento raffreddamento ($\Delta T/\Delta t = -0.25^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$) fino alla temperatura ambiente (20°C). In tal modo è stata garantita l’uniformità del campo termico in ogni istante del ciclo termico e sono quindi stati evitati gradienti termici tali da provocare l’insorgere di pericolose autotensioni.

Le prove sono avvenute in condizioni “residuali”, cioè dopo raffreddamento dalla temperatura di riferimento alla temperatura ambiente (Figura 7). Come è noto, in tali condizioni la resistenza a compressione dei materiali cementizi è minore (del 15-25% e più) di quella “a caldo”.

Sono stati provati 2 cilindri per ogni temperatura di riferimento e per ogni malta; tale numero (da considerarsi come un “minimo invalicabile”) è risultato sufficiente in virtù della eccellente ripetibilità delle prove, a tutte le temperature di riferimento e per tutte le tre malte.

Le prove sono state condotte in controllo di spostamento (attraverso il controllo dello spostamento relativo fra i piatti di carico), a carico crescente con velocità di 2.5 $\mu\text{m}/\text{s}$ (fino al picco del carico), e a carico decrescente con velocità di 5.0 μm fino al 50% del carico di picco e di 10.0 μm per carico inferiore e decrescente fino alla rottura per schiacciamento.

In Figura 8 sono riportati i risultati delle prove a compressione su cilindro. La malta HR dimostra di avere le prestazioni migliori a tutte le temperature, e di avere – a 600°C – resistenza residua più che doppia rispetto alla malta FM, qui considerata come malta di riferimento.

Si noti che le resistenze misurate a 20°C sono in linea con quelle attese ($R_c = 17, 14$ e 8 MPa), purchè si tenga conto dei seguenti fattori:

- la resistenza R_c delle malte è normalmente misurata su cubi (lato 40 mm), per cui nel passaggio dalla resistenza misurata su cilindro f_c a quella misurata su cubo R_c occorre tener conto del rapporto $f_c/R_c = 0.80-0.85$, il che comporta un incremento del 18-25% della resistenza cilindrica;



*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

- i provini usati nelle prove sulle malte, essendo di piccole dimensioni (cubi di lato 40 mm) sono caratterizzati da un non trascurabile "effetto dimensionale"; secondo tale effetto, la resistenza risulta maggiore nel caso di provini piccoli rispetto a quella misurata su provini di dimensioni maggiori (80-160 mm nei cilindri provati in questa campagna sperimentale); si può ritenere pertanto che a causa dell'effetto dimensionale la resistenza su provini di dimensioni 80-160 mm sia almeno del 10-15% inferiore a quella misurata su provini di dimensioni 40 mm; quindi, per passare alla equivalente resistenza su provini piccoli, la resistenza cilindrica misurata va incrementata almeno del 10-15%;
- la maturazione in cassaforma – pur essendo avvenuta in condizioni quasi sigillate – non permette di raggiungere i valori di resistenza corrispondenti alla maturazione in ambiente controllato ($T = 22^{\circ}\text{C}$ e $\text{U.R.} \geq 95\%$); pertanto, la resistenza cilindrica misurata va incrementata almeno del 10-15%.

Molto significativo è il confronto in Figura 9, ove si vede come le tre malte abbiano un decadimento meccanico molto prossimo a quello del calcestruzzo ordinario (rappresentato dalla banda grigia; occorre tenere presente che la banda grigia si riferisce alla resistenza "a caldo", mentre le curve sperimentali si riferiscono alla resistenza "residuale", del 15-25% minore, come già si è detto).

Frequente (e ben documentato in letteratura) è l'aumento della resistenza a compressione fino a $250-300^{\circ}\text{C}$, che però è di scarso interesse pratico.

Il decadimento della resistenza a compressione simile a quello di un calcestruzzo ordinario è un fatto altamente positivo, in quanto esclude che in una muratura in blocchi di calcestruzzo i letti di malta siano "l'anello debole" della catena resistente, e ciò a qualunque temperatura.

A completamento delle prove effettuate su cilindri maturati in condizioni quasi sigillate ma non standard, sono state eseguite – come già è stato detto – prove su ulteriori 6 cilindri maturati in camera umida. Tali prove, limitate a 20°C (cioè con provini in condizioni vergini), sono state effettuate in controllo di carico, ad una velocità di $0.5-1.0 \text{ MPa/s}$, conformemente alle indicazioni normative. I risultati, riportati in Tabella 1, mostrano come la maturazione in camera umida permetta di raggiungere e abbondantemente superare le resistenze attese di 17, 14 e 8 MPa.

5. Modulo elastico dopo riscaldamento ad alta temperatura

Il modulo elastico è stato valutato a partire dalle curve tensione-deformazione, come modulo "secante", per valori tensionali compresi fra il 30 ed il 50% della resistenza (= tensione di picco della curva tensione-deformazione), Figura 10.

I valori a 20°C sono molto bassi rispetto a quelli di un calcestruzzo ordinario, come d'altra parte è noto per le malte (nel nostro caso si va dal 44% della malta FM al 60% della malta HR, valutando il modulo elastico del calcestruzzo ordinario con la formula presente in MC 90: $E_c = 11000 \cdot f_c^{0.3}$, ove f_c ed E_c sono misurati in MPa).



*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

La malta HR si dimostra ancora la migliore fino a 400°C, per poi coincidere con la malta MB. Sempre a 400°C, rispetto alla malta di riferimento FM la malta HR ha modulo elastico residuo del 100% superiore.

Le suddette considerazioni vengono confermate dai diagrammi normalizzati (Figura 11), ove si dimostra come fino a 400°C il decadimento del modulo della malta HR sia il minore, per poi allinearsi con quello delle altre due malte. Comunque fino a 200°C il decadimento del modulo elastico secante delle tre malte risulta addirittura inferiore a quello del calcestruzzo ordinario, rappresentato dalla banda grigia riportata in Figura 11, mentre per temperature più elevate le tre malte presentano un decadimento perfettamente in linea con il calcestruzzo ordinario.

6. Resistenza a trazione e resistenza a compressione cubica

Come ricordato in precedenza, la resistenza a trazione indiretta per flessione è stata misurata su provini prismatici di dimensione 40 × 40 × 160 mm, sottoposti ad un carico concentrato in corrispondenza della mezzeria, secondo la procedura indicata dalla normativa UNI EN 1015-11 (Figura 12). I due monconi risultanti dalla rottura di ogni prisma sono stati poi assoggettati a prova di compressione, tramite una piastra di dimensioni 40 × 40 mm, consentendo in questo modo la misura della resistenza cubica (Figura 13).

I risultati relativi alla resistenza a trazione indiretta per flessione (Figura 14) confermano in parte quanto già osservato in compressione (Figura 8), e cioè che la malta FM subisce perdite maggiori delle malte HR ed MB. Queste ultime però hanno decadimento in trazione molto simile, contrariamente a quanto avviene in compressione. In Figura 15 è mostrato il decadimento normalizzato della resistenza a trazione indiretta, confrontato con le prescrizioni fornite dall'Eurocodice 2 per la resistenza a trazione "a caldo" di calcestruzzi ordinari. Si noti come, analogamente al caso delle resistenze a compressione, le malte tendano a comportarsi in maniera simile ad un tipico calcestruzzo. Le maggiori differenze si riscontrano al di sopra dei 200°C: le malte sembrerebbero essere meno sensibili all'alta temperatura, ma ciò potrebbe anche essere dovuto alla modalità di misura della resistenza a trazione indiretta che, a differenza della resistenza a trazione diretta, comporta significative redistribuzioni tensionali sulla sezione più sollecitata del provino, con un conseguente aumento della resistenza a trazione "apparente" (calcolata, cioè, assumendo una distribuzione lineare delle tensioni sulla sezione).

I risultati di resistenza a compressione cubica sono mostrati in Figura 16. Anche in questo caso, si conferma come la maturazione in camera umida sia benefica ai fini delle prestazioni dei materiali, che mostrano infatti resistenze medie a 20°C ($R_c^{20} = 18, 16 \text{ e } 8.50 \text{ MPa}$) perfettamente in linea o addirittura superiori ai valori attesi ($R_c = 17, 14 \text{ e } 8 \text{ MPa}$). Quanto al decadimento in funzione della temperatura (Figura 17), esso risulta pressoché perfettamente lineare per HR ed MB, con valori a 600°C pari all'incirca alla metà dei valori in condizioni vergini, mentre la malta FM risulta leggermente meno sensibile al danneggiamento termico al di sopra dei 200°C. In questo caso non è possibile effettuare un confronto diretto con le curve da normativa, poiché la resistenza cubica misurata su provini 40 × 40 risente in maniera significativa dell'effetto dimensionale già



*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

citato, e dell'attrito tra provino e piastre della pressa. In ogni caso, il decadimento misurato risulta in linea con quello valutato sui provini cilindrici.

7. Considerazioni conclusive

Le 27 prove condotte sulle malte Super MaltaBLOK, HR15 e FibroMalta hanno dimostrato le buone caratteristiche fisico-meccaniche delle tre malte ad alta temperatura ($T \leq 600^{\circ}\text{C}$), con riferimento alla diffusività termica, alla resistenza a compressione cilindrica ed al modulo elastico secante.

In particolare:

- Le tre malte hanno mostrato diffusività termica complessivamente più bassa di quella del calcestruzzo ordinario (dal 25 al 40% in meno), il che indica per le tre malte un forte potere isolante; pertanto, in pareti in blocchi di calcestruzzo le malte in questione non costituiranno mai un ponte termico.
- Le due malte più prestanti (MaltaBLOCK e HR) hanno denotato caratteristiche di resistenza residuale a compressione decisamente migliori di quelle della FibroMalta, a tutte le temperature, ma in termini relativi tutte e tre le malte hanno mostrato resistenza residuale a compressione molto simile a quella del calcestruzzo ordinario, per tutte le temperature fino a 600°C ; pertanto, in pareti a blocchi di calcestruzzo le malte in questione non rappresenteranno mai, a qualunque temperatura, l'anello debole della catena resistente.
- Anche per il modulo elastico secante residuale le due malte più prestanti si comportano meglio della FibroMalta, a tutte le temperature; tuttavia, in termini relativi il decadimento del modulo elastico è simile nei tre casi, ed è inferiore a quello del calcestruzzo ordinario alle temperature basse (al di sotto dei 200°C), mentre a seguito di esposizione a temperature più elevate, le malte presentano decadimenti del tutto in linea con il calcestruzzo ordinario. Resta però il fatto che il modulo elastico delle tre malte nelle condizioni vergini è molto più basso di quello del calcestruzzo ordinario, come è ben noto; tuttavia, nel caso della malta HR il modulo elastico raggiunge – a 20°C – il 60% di quello del calcestruzzo ordinario di corrispondente resistenza; tale elevata frazione (60%) favorisce la compatibilità cinematica fra strati di malta e blocchi di calcestruzzo o mattoni.
- Anche in termini di resistenza residuale a trazione indiretta, il comportamento delle tre malte appare in linea con quello "a caldo" di un tipico calcestruzzo.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

Referenze bibliografiche e normative

- Decreto del Ministero delle Infrastrutture 14/01/2008: "Norme tecniche per le costruzioni".
- UNI EN 12390-3 (2003): "Prova sul calcestruzzo indurito – Resistenza alla compressione dei provini", UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 13 pp.
- UNI EN 1015-11 (2007): "Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita", UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 10 pp.
- UNI EN 1992-1-2 (2005): "Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio", UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 97 pp.
- R. Felicetti e P.G. Gambarova (1998): "Effects of High Temperature on the Residual Compressive Strength of High-Strength Siliceous Concretes", *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 4, July-August 1998, pp. 395-406.
- L. Phan e N. Carino (1998): "Review of Mechanical Properties of HSC at elevated Temperature", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 10, No. 1, pp. 58-64.
- Bamonte P., Gambarova P.G. e Meda A. (2008): "Today's Concretes Exposed to Fire – Test Results and Sectional Analysis", *Structural Concrete*, Vol.9, No.1, March 2008, pp.19-30.
- Buchanan A. (2002): *Progetto delle strutture resistenti al fuoco*, Hoepli, Milano, 436 pp. (Edizione italiana aggiornata agli Eurocodici a cura di Pietro Gambarova e Roberto Felicetti).



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

Figure

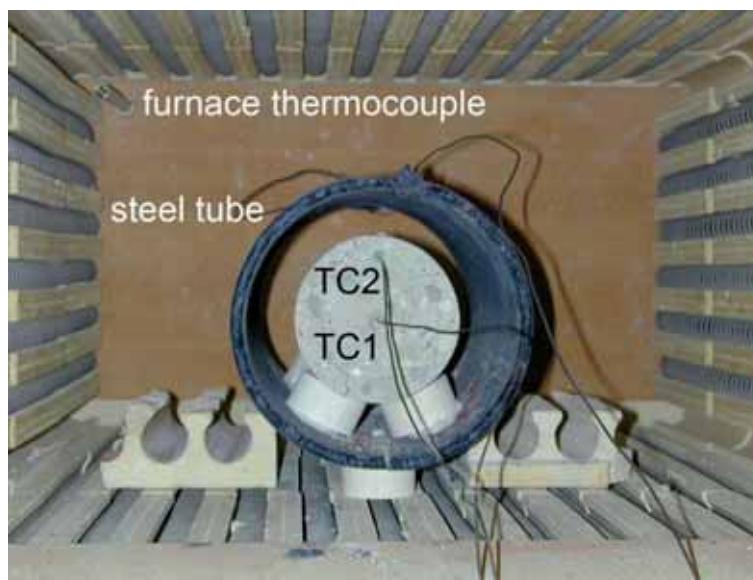


Figura 1 – Provino cilindrico strumentato con due termocoppie (TC1 e TC2), posto nel forno elettrico per riscaldamento fino a 900°C finalizzato alla valutazione della diffusività termica. Il tubo metallico ("steel tube") ha il compito di rendere più omogeneo il campo termico attorno al provino.



Figura 2 – Provini prismatici all'interno del forno elettrico, appena prima del ciclo termico con temperatura massima di 600°C.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
 Costa de' Nobili (Pavia)

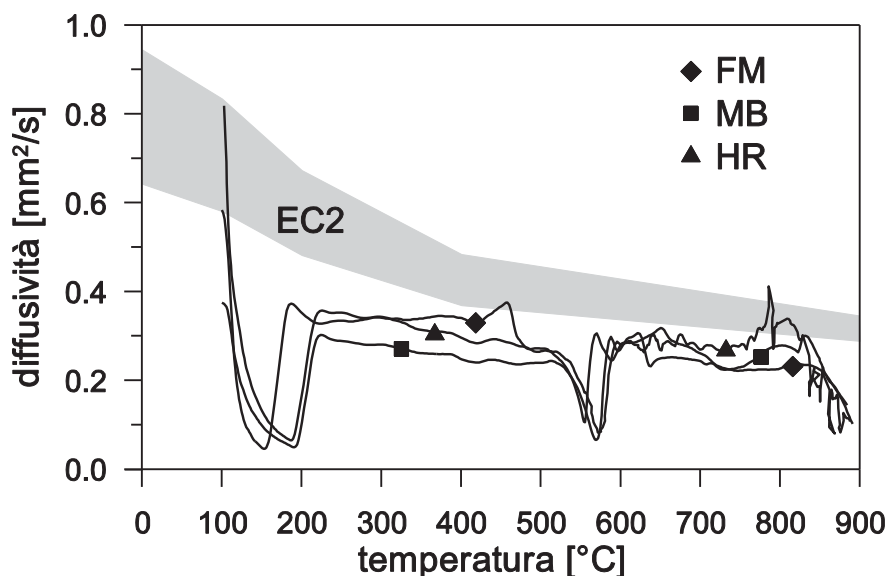


Figura 3 – Diagrammi della diffusività termica in funzione della temperatura. La banda grigia rappresenta il calcestruzzo ordinario, secondo le formulazioni introdotte in EC2 per massa volumica, calore specifico e conducibilità termica in funzione della temperatura.

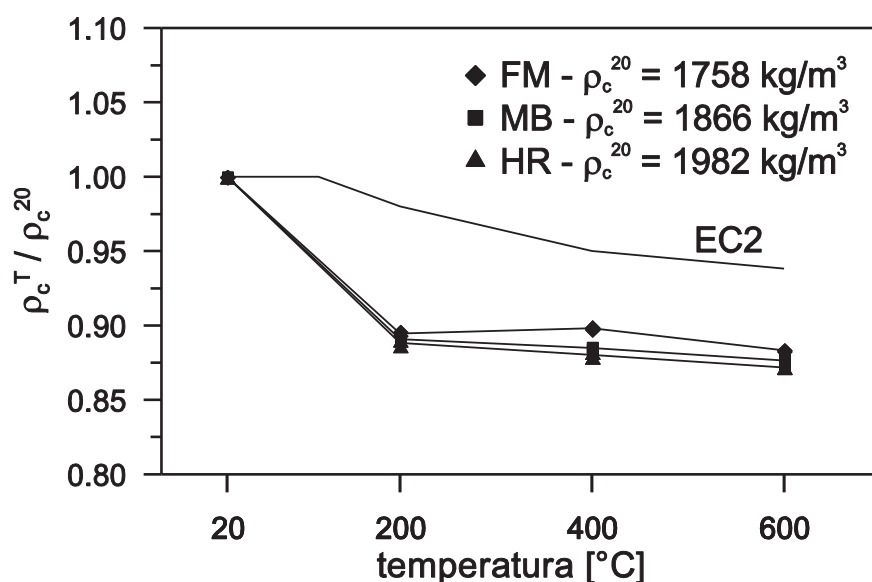


Figura 4 – Diagrammi normalizzati della massa volumica in funzione della temperatura e diagramma fornito da EC2 per calcestruzzo ordinario.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)



(a)



(b)

Figura 5 – (a) Vista di due provini collocati nel forno prima di un ciclo termico; e (b) provini di malta MB (Super MaltaBLOK) in condizioni vergini (a sinistra), e dopo ciclo termico a 200, 400 e 600°C (da sinistra a destra).

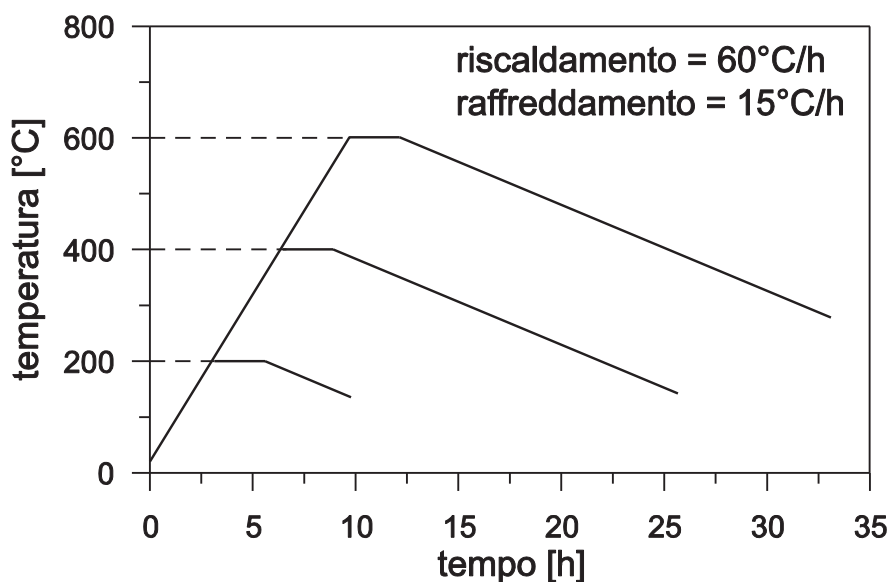


Figura 6 – Cicli termici alle temperature di riferimento $T = 200, 400$ e 600°C .



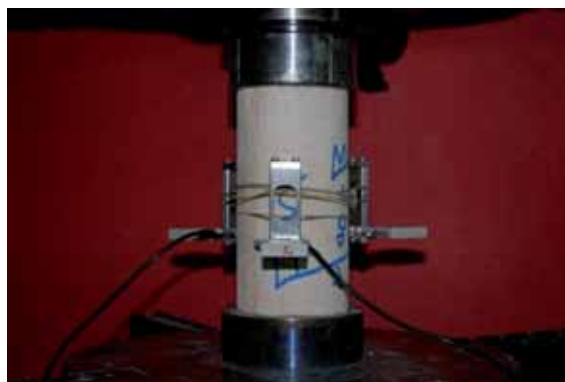
Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)



(a)



(b)



(c)

Figura 7 – Apparato sperimentale: (a) pressa elettro-meccanica INSTRON da 100 kN capace di eseguire prove in trazione/compressione in controllo di spostamento, deformazione o carico (si osservino i 3 DD1 resistivi con base 50 mm per la misura della deformazione assiale e per la determinazione del modulo elastico); (b) unità di controllo della pressa e di acquisizione-dati; e (c) provino strumentato.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

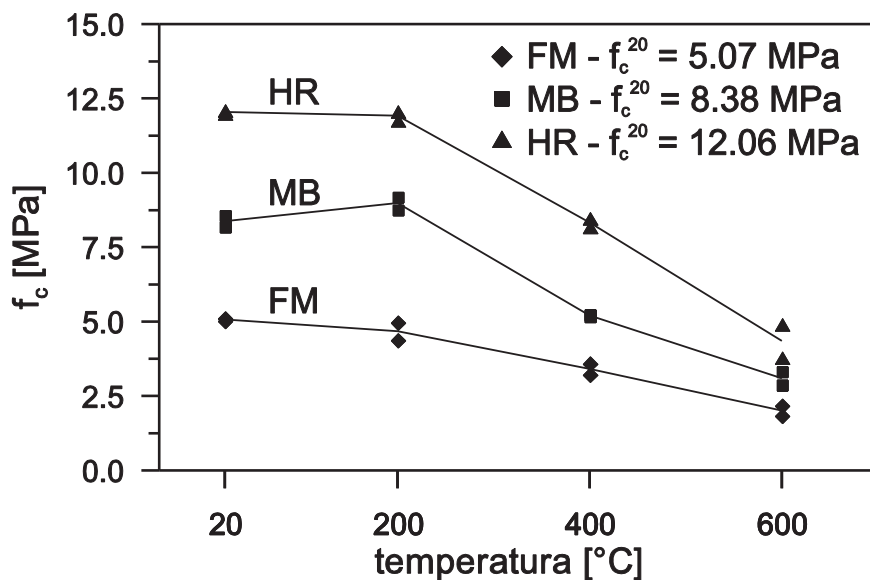


Figura 8 – Diagrammi della resistenza a compressione cilindrica in funzione della temperatura.

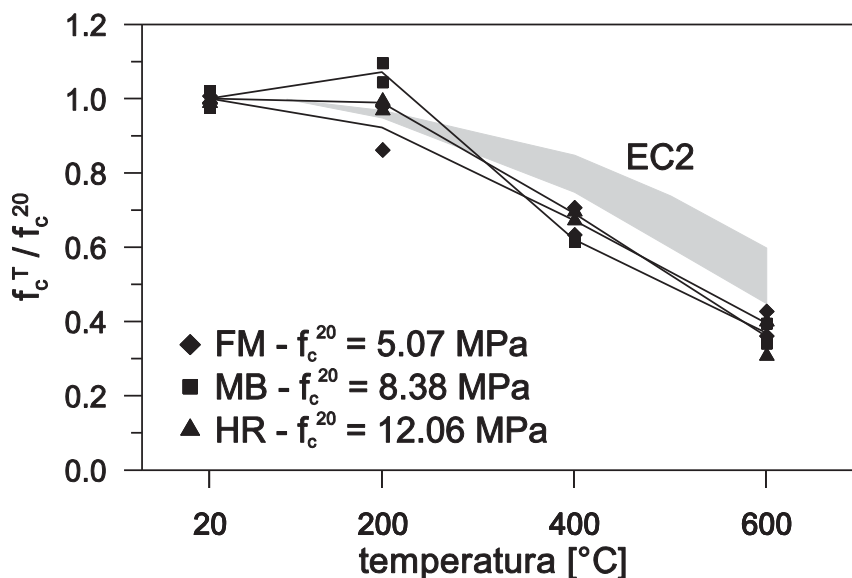


Figura 9 – Diagrammi normalizzati della resistenza a compressione cilindrica in funzione della temperatura.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
 Costa de Nobili (Pavia)

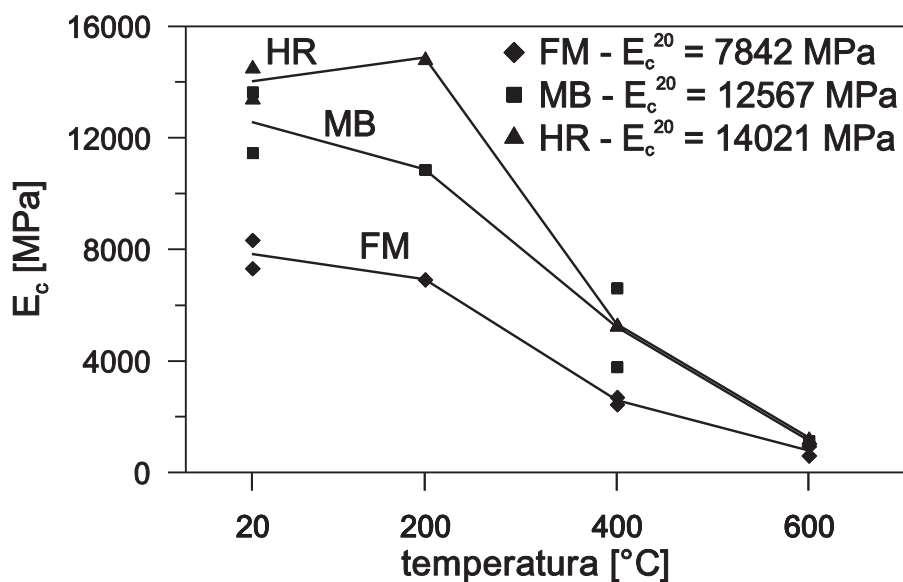


Figura 10 – Diagrammi del modulo elastico secante in funzione della temperatura.

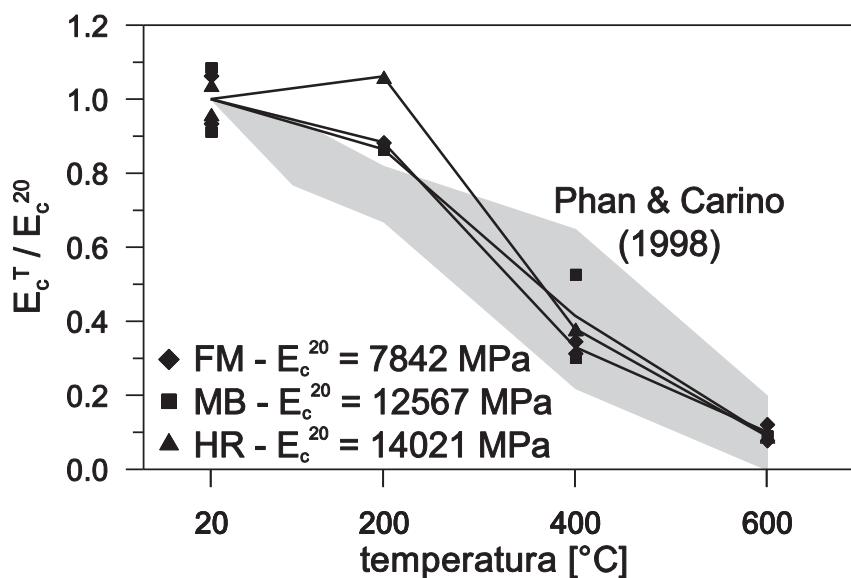


Figura 11 – Diagrammi normalizzati del modulo elastico secante in funzione della temperatura.



*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

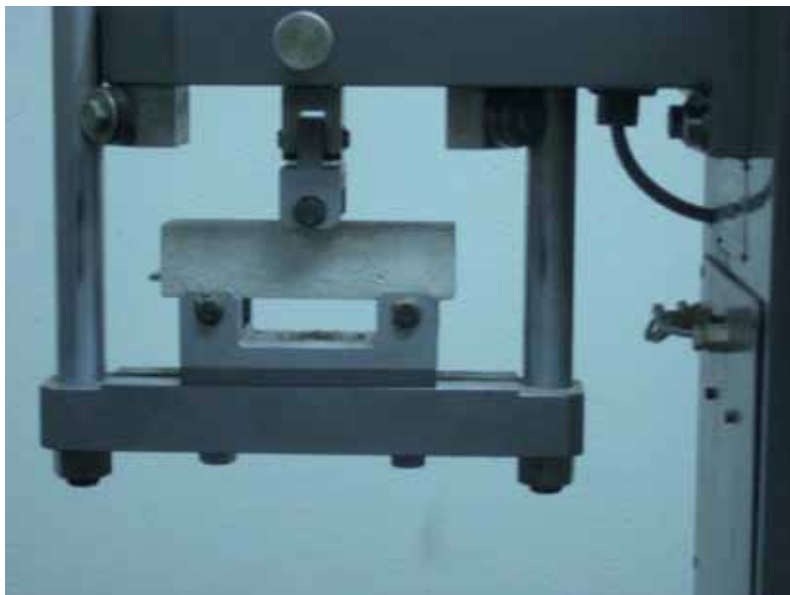


Figura 12 – Provino prismatico soggetto a prova di trazione indiretta per flessione.



Figura 13 – Provino cubico soggetto a prova di compressione.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

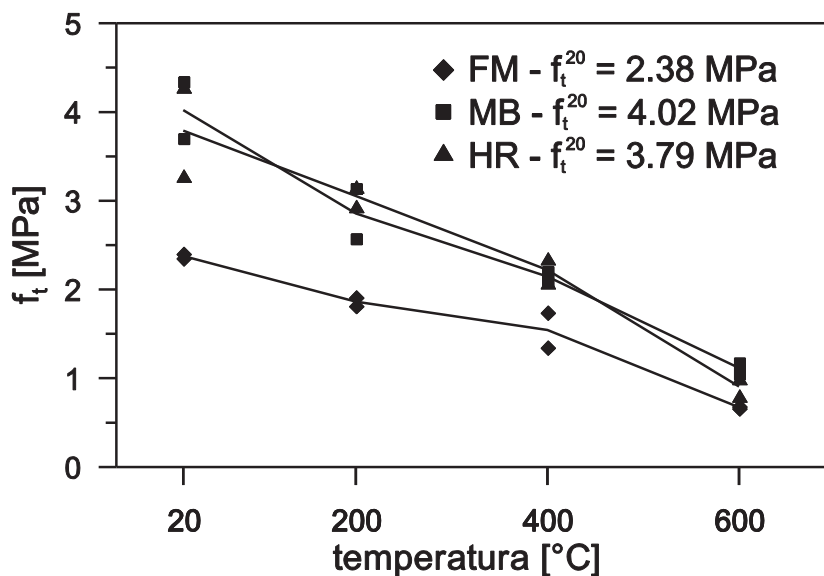


Figura 14 – Diagrammi della resistenza a trazione indiretta per flessione in funzione della temperatura.

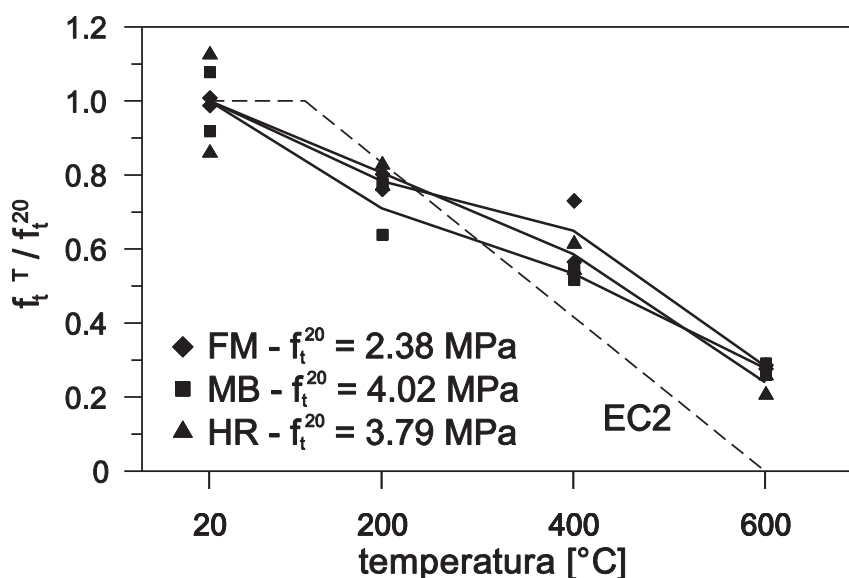


Figura 15 – Diagrammi normalizzati della resistenza a trazione indiretta per flessione in funzione della temperatura.



Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)

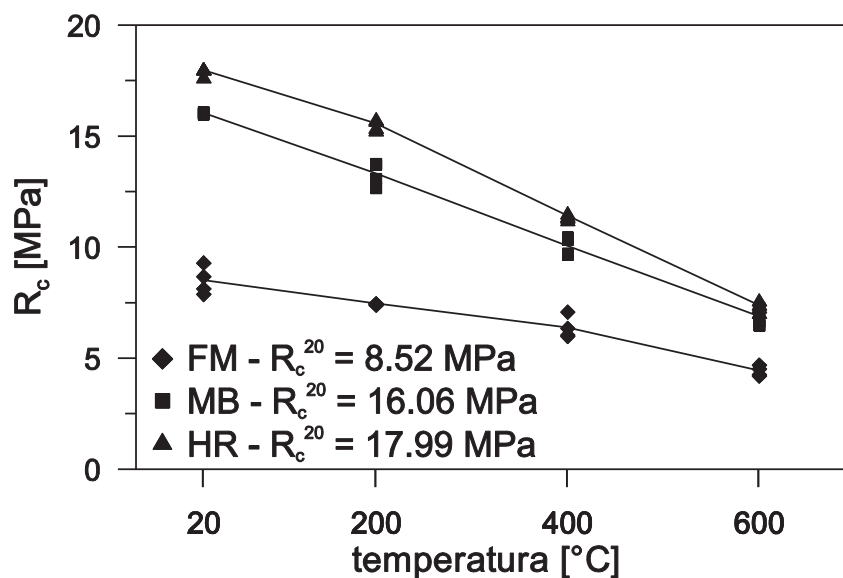


Figura 16 – Diagrammi della resistenza a compressione (misurata su cubetti) in funzione della temperatura.

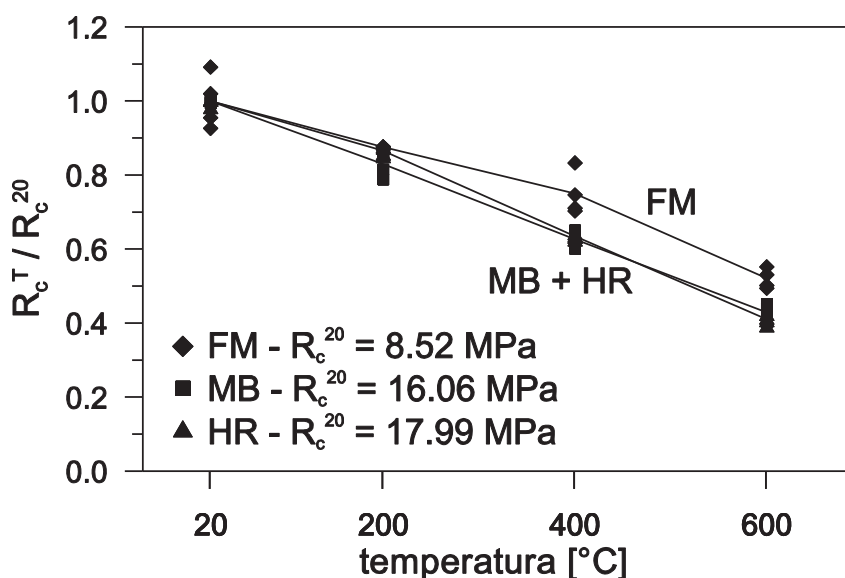


Figura 17 – Diagrammi normalizzati della resistenza a compressione (misurata su cubetti) in funzione della temperatura.



POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
20133 MILANO – P.ZA LEONARDO DA VINCI, 32

Cod. Fiscale 80057930150
P. IVA 04376620151

*Richiedente: VAGA S.r.l. "Aggregati e Malte per l'Edilizia"
Costa de' Nobili (Pavia)*

	malta		
provino	Fibromalta	MaltaBlok	HR15
C	10.90	16.12	19.32
D	11.16	16.07	18.61
valore medio	11.03	16.10	18.96

Tabella 1 – Risultati delle prove di compressione su cilindri maturati in camera umida per 28 gg.