



POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea in Ingegneria Civile - Strutture

Laurea Magistrale

CARATTERIZZAZIONE TERMO-MECCANICA DI CALCESTRUZZI ESPOSTI ALL'ALTA TEMPERATURA E DIAGNOSTICA DEL DANNO

Relatore : Prof. Dott. Ing. Pietro Giovanni GAMBAROVA

Candidato : Riccardo NEGRI
matricola 782292

Anno Accademico 2012 / 2013

INDICE GENERALE

1) INDICI

1.a) Indice delle figure

1.b) Indice delle tabelle

1.c) Indice dei grafici

2) COMPENDIO

3) INTRODUZIONE PERSONALE

4) CONTESTO DELLA RICERCA

4.a) Progettazione ad alte temperature e applicazioni dei CLS studiati

4.b) Contestualizzazione della Campagna generale

4.c) Contestualizzazione della parte di campagna condotta dallo studente

4.c.1) Composizione delle cinque miscele analizzate in questa parte di lavoro

4.c.2) Introduzione alle prove eseguite

4.c.3) Catalogazione dei provini impiegati per le differenti esperienze

5) ESPERIENZE CONDOTTE SUL MATERIALE

5.a) Misura della densità alle diverse temperature

5.b) Prove di compressione

- 5.b.1) Descrizione dell'esperimento e della strumentazione
- 5.b.2) Legami costitutivi
- 5.b.3) Estrapolazione dei parametri significativi
 - 5.b.3.1) Resistenza ultima a compressione, $f_c(T)$
 - 5.b.3.2) Deformazione di picco, $\varepsilon_c(T)$
 - 5.b.3.3) Modulo elastico secante al 50% dello sforzo ultimo, $E_{50}(T)$
- 5.b.4) Breve spiegazione dei risultati ottenuti
- 5.b.5) Confronto dei risultati con la letteratura scientifica
 - 5.b.5.1) Confronto con EC4, ACI e con le ricerche degli autori Phan e Carino
 - 5.b.5.2) Confronto con altri tipi di miscele
- 5.c) Prove di Diffusività
 - 5.c.1) Riferimento teorico
 - 5.c.2) Descrizione dell'esperimento
 - 5.c.3) Risultati e commenti
 - 5.c.4) Confronto dei risultati con la letteratura scientifica
- 5.d) Prove a ultrasuoni
 - 5.d.1) Metodo lineare
 - 5.d.1.1) Descrizione della strumentazione e dell'esperimento
 - 5.d.1.2) Estrapolazione dei parametri $v_{US}(T)$ e $A_{MAX}(T)$
 - 5.d.1.3) Correlazione tra v_{US} e E_{DIN}
 - 5.d.2) Scaling Subtraction Method (SSM)
 - 5.d.2.1) Descrizione della strumentazione e dell'esperimento;
 - 5.d.2.2)....
 - 5.d.3) Single MOde Non-linear Resonant Acoustic Spectroscopic (SIMON-RAS)
 - 5.d.3.1) Descrizione della strumentazione e dell'esperimento
 - 5.d.3.2) Problematrice riscontrate
 - 5.d.3.3) Correlazione tra frequenza e v_{US}
 - 5.d.3.4) Estrapolazione di E_{DIN}
- 5.e) Indici di danneggiamento del materiale
 - 5.e.1) Confronto tra modulo elastico e velocità degli ultrasuoni, $D_{E50} - D_v$
 - 5.e.2) Confronto tra modulo elastico e ampiezza degli ultrasuoni, $D_{E50} - D_A$

5.e.3) Confronto tra ampiezza e velocità degli ultrasuoni, $D_A - D_v$

5.e.4) Commento ai confronti

6) CONCLUSIONI

6.a) Prestazioni meccaniche delle cinque miscele analizzate

6.b) Confronto con miscele precedentemente studiate e con prescrizioni normative

6.c) Commenti sui metodi diagnostici con ultrasuoni

6.d) Possibili sviluppi futuri

7) BIBLIOGRAFIA

7.a) Materiale direttamente richiamato nel testo

7.b) Materiale aggiuntivo

8) CHIUSURA PERSONALE E RINGRAZIAMENTI

1) INDICI

1.a) Indice delle figure

Immagine *i 4.1* : Illustrazione dei cicli termici

Immagine *i 4.2* : Fotografia delle due tipologie di provini impiegati negli esperimenti.

Immagine *i 5.1* : Fotografia della macchina Schenck utilizzata per le prove di compressione.

Immagine *i 5.2* : Fotografia del particolare piatto articolato della macchina Schenck.

Immagine *i 5.3* : Fotografia della cabina di controllo collegante la macchina Schenck con il computer.

Immagine *i 5.4* : Schematizzazione di LVDT e DD1

Immagine *i 5.5* : Fotografia della strumentazione con cui si rilevano le fasi della prova di compressione.

Immagine *i 5.6* : Fotografia della strumentazione per le prove di diffusività.

Immagine *i 5.7* : Pulsatore BF IMGPLS 01 e campionatore Picoscope.

Immagine *i 5.8* : Schema della strumentazione per le prove con ultrasuoni lineari.

Immagine *i 5.9* : Insieme emettitore-provino-ricevitore-peso di 3.77 kg (posto in alto).

Immagine *i 5.10* : Strumentazione per le prove con ultrasuoni lineari.

Immagine *i 5.11* : Schema della strumentazione per le prove con ultrasuoni SSM.

Immagine *i 5.12* : Strumentazione per le prove con ultrasuoni SSM.

1.b) Indice delle tabelle

Tabella *t 4.1* : Classificazione delle undici miscele della campagna di ricerca generale.

Tabella *t 4.1.b* : Indicazione delle cinque miscele studiate nel presente lavoro di ricerca.

Tabella *t 4.2* : Composizione dettagliata delle cinque miscele oggetto di studio.

Tabella *t 5.1* : Valori di densità al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscela C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

Tabella *t 5.2* : Valori di densità al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscela C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

Tabella *t 5.3* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 60 M 000, Tutte le temperature).

Tabella *t 5.4* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 60 M M10, Tutte le temperature).

Tabella *t 5.5* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 60 M 2, Tutte le temperature).

Tabella *t 5.6* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 30M 000, Tutte le temperature).

Tabella *t 5.7* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 90M 000, Tutte le temperature).

Tabella *t 5.8* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 20°C, tutte le miscele).

Tabella *t 5.9* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 105°C, tutte le miscele).

Tabella *t 5.10* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 250°C, tutte le miscele).

Tabella *t 5.11* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 500°C, tutte le miscele).

Tabella *t 5.12* : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 750°C, tutte le miscele).

Tabella *t 5.13* : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscela C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

Tabella *t 5.14* : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscela C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

Tabella *t 5.15* : Valori di ε_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

Tabella *t 5.16* : Valori di ε_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

Tabella *t 5.17* : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

Tabella *t 5.18* : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

Tabella *t 5.19* : Valori di modulo elastico estrapolati dai risultati delle prove ultrasoniche (E_{DIN}) e direttamente calcolati dalle prove di compressione (E_{50}).

1.c) Indice dei grafici

Grafico *g 5.1* : Valori di densità al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

Grafico *g 5.2* : Valori di densità al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

Grafico *g 5.3* : Valori di densità al crescere della temperatura di preriscaldamento (Tutte le miscele).

Grafico *g 5.4* : Legami costitutivi (miscela C 60 M 000, Tutte le temperature).

Grafico *g 5.5* : Legami costitutivi (miscela C 60 M M10, Tutte le temperature).

Grafico *g 5.6* : Legami costitutivi (miscela C 60 M 2, Tutte le temperature).

Grafico *g 5.7* : Legami costitutivi (miscela C 30M 000, Tutte le temperature).

Grafico *g 5.8* : Legami costitutivi (miscela C 90M 000, Tutte le temperature).

Grafico *g 5.9* : Legami costitutivi (T 20°C, tutte le miscele).

Grafico *g 5.10* : Legami costitutivi (T 105°C, tutte le miscele).

Grafico *g 5.11* : Legami costitutivi (T 250°C, tutte le miscele).

Grafico *g 5.12* : Legami costitutivi (T 500°C, tutte le miscele).

Grafico *g 5.13* : Legami costitutivi (T 750°C, tutte le miscele).

Grafico *g 5.14* : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

Grafico *g 5.15* : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

Grafico *g 5.16* : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (Tutte le miscele).

- Grafico *g 5.17* : Valori di ε_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).
- Grafico *g 5.18* : Valori di ε_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).
- Grafico *g 5.19* : Valori di ε_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (Tutte le miscele).
- Grafico *g 5.20* : Grafico esplicativo della definizione di E_{50} .
- Grafico *g 5.21* : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).
- Grafico *g 5.22* : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).
- Grafico *g 5.23* : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (Tutte le miscele).
- Grafico *g 5.24* : Confronto con prescrizioni EC4 rispetto al parametro f_c .
- Grafico *g 5.25* : Confronto con prescrizioni ACI rispetto al parametro f_c .
- Grafico *g 5.26* : Confronto con risultati ottenuti da Phan e Carino rispetto al parametro E_{50} .
- Grafico *g 5.27* : Confronto con miscele contenenti barite rispetto al parametro f_c .
- Grafico *g 5.28* : Confronto con miscele contenenti barite rispetto al parametro ε_c .
- Grafico *g 5.29* : Confronto con miscele contenenti barite rispetto al parametro E_{50} .
- Grafico *g 5.30* : Confronto con miscele contenenti polistirene espanso rispetto al parametro f_c .
- Grafico *g 5.31* : Confronto con miscele contenenti polistirene espanso rispetto al parametro ε_c .
- Grafico *g 5.32* : Confronto con miscele contenenti polistirene espanso rispetto al parametro E_{50} .
- Grafico *g 5.33* : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 60 M 000 e confronto con prescrizioni EC2.
- Grafico *g 5.34* : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 60 M M10 e confronto con prescrizioni EC2.
- Grafico *g 5.35* : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 60 M M20 e confronto con prescrizioni EC2.
- Grafico *g 5.36* : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 30 M 000 e confronto con prescrizioni EC2.
- Grafico *g 5.37* : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 90 M 000 e confronto con

prescrizioni EC2.

Grafico *g 5.38* : Risultati delle prove di diffusività
(miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

Grafico *g 5.39* : Risultati delle prove di diffusività
(miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

Grafico *g 5.40* : Risultati delle prove di diffusività
(Tutte le miscele).

Grafico *g 5.41* : Confronto con miscele contenenti barite rispetto alla diffusività.

Grafico *g 5.42* : Confronto con miscele contenenti polistirene espanso rispetto alla diffusività.

Grafico *g 5.43* : Risultati delle prove a ultrasuoni lineari su miscela C 60 M 000, Velocità (v_{US})
di attraversamento e Ampiezza (A_{US}) dell'onda uscente.

Grafico *g 5.44* : Risultati delle prove a ultrasuoni lineari su miscela C 60 M M10, Velocità (v_{US})
di attraversamento e Ampiezza (A_{US}) dell'onda uscente.

Grafico *g 5.45* : Risultati delle prove a ultrasuoni lineari su miscela C 60 M M20, Velocità (v_{US})
di attraversamento e Ampiezza (A_{US}) dell'onda uscente.

Grafico *g 5.46* : Risultati delle prove a ultrasuoni lineari su miscela C 30 M 000, Velocità (v_{US})
di attraversamento e Ampiezza (A_{US}) dell'onda uscente.

Grafico *g 5.47* : Risultati delle prove a ultrasuoni lineari su miscela C 60 M 000, Velocità (v_{US})
di attraversamento e Ampiezza (A_{US}) dell'onda uscente.

Grafico *g 5.48* : Risultati delle prove a ultrasuoni lineari su tutte le miscele, Velocità (v_{US})
di attraversamento.

Grafico *g 5.49* : Risultati delle prove a ultrasuoni lineari su tutte le miscele, Ampiezza (A_{US})
dell'onda uscente.

Grafico *g 5.50* : Confronto tra gli indici di danno E_{50} e v_{US} .

Grafico *g 5.51* : Confronto tra gli indici di danno E_{50} e A_{US} .

Grafico *g 5.52* : Confronto tra gli indici di danno v_{US} e A_{US} .

2) COMPENDIO

Nel campo del calcestruzzo, materiale di primaria importanza per le costruzioni civili, sempre più attenzione si pone sull'accurato progetto di miscele che siano adatte ad ottenere ben determinate prestazioni. Si riconosce così come una particolare miscela cementizia possa presentare caratteristiche favorevoli per un determinato utilizzo, risultando contemporaneamente inadatta per altri tipi di applicazioni.

In questo lavoro di ricerca si è indagato il comportamento ad alte temperature di cinque mescole cementizie, diverse tra loro dalla rispettiva resistenza a compressione e dal contenuto di fibre. Sono qui stati indagati solo un limitato numero di parametri, quali la resistenza a compressione uni-assiale, la variazione di densità e l'andamento della diffusività al crescere della temperatura, lasciando spazio ad un futuro completamento.

Nella seconda parte del lavoro, sono stati sperimentati alcuni innovativi metodi di diagnostica, che si servono delle onde ultrasoniche. Tre tecniche sono state utilizzate per valutare l'entità del danno indotto dal riscaldamento sulle mescole cementizie.

La prima tecnica si basa sulla misura della velocità con cui un'onda ultrasonica attraversa un provino di lunghezza nota e dell'ampiezza massima dell'onda uscente dallo stesso.

La seconda e la terza tecnica si basano sulla perdita di linearità tra intensità dell'onda immessa e intensità dell'onda uscente. Tale perdita di linearità tra causa ed effetto si accentua al crescere del danneggiamento subito dal materiale.

3) INTRODUZIONE PERSONALE

4) CONTESTO DELLA RICERCA

Il lavoro di ricerca riportato in questa relazione costituisce parte di un'ampia campagna di caratterizzazione di undici nuove miscele cementizie, relativamente al loro comportamento ad alte temperature. Nel presente capitolo si introducono le caratteristiche delle miscele oggetto di studio, nonché le tipologie di prove che saranno condotte.

Successivamente, si definiscono i limiti entro cui si svolge il presente lavoro di tesi, introducendo l'impostazione generale seguita durante la campagna.

4.a) Progettazione ad alte temperature e applicazioni dei CLS studiati

Il presente lavoro di ricerca si propone due obiettivi; il primo riguarda la caratterizzazione di nuove mescole cementizie relativamente al loro comportamento ad alta temperatura, mentre il secondo riguarda lo studio di tecniche innovative per la diagnostica del danneggiamento termico, subito da elementi strutturali in calcestruzzo.

Il tema comune di questo lavoro è dunque lo studio del materiale calcestruzzo, qualora sia esposto a temperatura elevata.

Questo argomento ricorre in un gran numero di situazioni differenti. Alcuni esempi possono essere i seguenti:

- la progettazione di strutture in scenario di incendio [*Bamonte P., Felicetti R., Gambarova P.G., Meda A. e Riva P. (2004)*],
- la messa a punto di miscele ottimali per la realizzazione di tubazioni di gas o fluidi incandescenti,
- la realizzazione di pavimentazioni speciali [*Bamonte P. e Gambarova P.G. (2010)*],
- ...

Inoltre, si annota come nella società stia crescendo l'attenzione verso la sicurezza e la prevenzione, anch'esse tematiche ricorrenti nelle situazioni in cui si sviluppano le alte temperature.

Tutti questi fattori contribuiscono ad indirizzare l'interesse della Ricerca nei confronti di questo argomento, e ciò ha portato, negli ultimi decenni, a compiere grandi passi in avanti nella conoscenza e nella pratica progettuale.

Alcune delle problematiche oggi in fase di studio sono:

- la messa a punto di regole progettuali che siano contemporaneamente semplici ed efficaci,
- la standardizzazione delle prove da eseguire sui materiali, al fine di valutarne il comportamento ad alta temperatura [*Felicetti R., Gambarova P.G. (2003)*],
- l'individuazione di efficaci tecniche diagnostiche per monitorare strutture che siano state soggette a danneggiamento termico [*Tarum R.N., Mohan Malotta V., Popovics J.S. (2004)*].

Alla luce delle precedenti considerazioni, risulta evidente quale sia l'interesse che ha sospinto il lavoro di ricerca di seguito illustrato.

4.b) Contestualizzazione della Campagna generale

Lo studio riportato nella presente relazione costituisce una piccola parte di un lavoro ben più ampio, che ha lo scopo di caratterizzare alcuni nuovi tipi di mescole cementizie, relativamente al loro comportamento ad alte temperature.

Più nel particolare, il progetto di ricerca si pone come obiettivo lo studio dell'influenza che 4 differenti parametri hanno su

- a) comportamento meccanico del calcestruzzo,
- b) sensibilità allo spacco esplosivo superficiale,
- c) interazione tra acciaio e calcestruzzo.

I quattro parametri oggetto di studio sono i seguenti:

1) Resistenza a compressione:

- $f_c = 40$ MPa ($f_{ck} = 30$ MPa, $a/c \approx 0.5$)
- $f_c = 70$ MPa ($f_{ck} = 60$ MPa, $a/c \approx 0.4$)
- $f_c = 100$ MPa ($f_{ck} = 90$ MPa, $a/c \approx 0.3$)

2) Tipologia degli aggregati:

- Silicio-calcarei
- Calcarei
- Basaltici

3 – 4) Tipologia e quantitativo di fibre:

Metalliche

- 0.51% in volume, 40 kg/mc
- 0.77% in volume, 60 kg/mc

Polimeriche tipo 1: Polipropileniche (PP), microfibre monofilamento

- 0.05% in volume, 0.5 kg/mc
- 0.11% in volume, 1 kg/mc
- 0.21% in volume, 2 kg/mc

Polimeriche tipo 2: Polipropileniche (PP), microfibre monofilamento

- 0.21% in volume, 2 kg/mc

Le prove sperimentali pianificate sono elencate di seguito.

a) La caratterizzazione termo-meccanica dei materiali prevede le seguenti esperienze.

- Prove di diffusività (da 20 a 900°C) su cilindri 10x30 cm.
- Prove a temperatura ambiente:
 - Prove di compressione a 28 gg su cilindri 15x30 cm;
 - Prove di compressione su cilindri 10x20 cm;
 - Prove di trazione diretta su cilindri 10x15 cm con intaglio;
 - Prove di trazione indiretta per flessione su prismi 10x10x41.5 cm;
 - Prove di trazione indiretta per spacco (prova brasiliana) su cubi di lato 10 cm.
- Prove a caldo alle temperature di 105, 250, 500 e 750°C:

- Prove di compressione su cilindri 10x20 cm;
 - Prove residuali dopo esposizione a temperature di 105, 250, 500 e 750°C:
 - Prove di compressione su cilindri 10x20 cm;
 - Prove di trazione diretta su cilindri 10x15 cm con intaglio;
 - Prove di trazione indiretta per flessione su prismi 10x10x41.5 cm;
 - Prove di trazione indiretta per spacco (prova brasiliana) su cubi di lato 10 cm.
- b) Lo studio della sensibilità allo spacco superficiale esplosivo prevede le seguenti esperienze.
- Misurazione della pressione di vapore su provini cubici di lato 10 cm durante il riscaldamento ($HR = 2^{\circ}C/min$) e successiva prova di spacco alla massima pressione raggiunta durante il riscaldamento.
 - Esposizione al fuoco secondo ISO 834 di pannelli 100x100x15 cm.
- c) La caratterizzazione dell'interazione acciaio-calcestruzzo prevede le seguenti esperienze.
- Prove di aderenza a temperatura ambiente.
 - Prove di aderenza a caldo alle temperature di 400 e 550°C.
 - Prove di aderenza residuali dopo esposizione a temperature di 200, 400, 550 e 700°C.

Si ritiene di chiarire brevemente alcuni concetti riguardanti queste tipologie di prove [Bamonte P., Lo Monte F., Gambarova P.G. e Rossino C. (2013)], [Felicetti R., Gambarova P.G. (2003)]. Innanzitutto, quando si intenda studiare il **comportamento ad alte temperature** di un materiale, è necessario che il riscaldamento del provino avvenga nel modo più uniforme possibile. In questa maniera si escludono effetti locali (come il fenomeno di spacco superficiale, causato da gradienti termici molto elevati), che renderebbero impossibile un'oggettiva caratterizzazione del materiale. Per questo motivo, il gradiente termico con cui avviene il riscaldamento deve essere opportunamente contenuto ($1 \div 5^{\circ}C/min$), in modo che il calore possa diffondersi gradualmente all'interno del provino.

Si è poi fatta distinzione tra prove a caldo e prove in condizioni residuali.

Nelle **prove a caldo**, i provini estratti dal forno alla temperatura di riferimento vengono isolati con apposite camicie e, nel giro di 10-15 minuti dall'estrazione, sottoposti all'esperimento. La procedura descritta non è di facile realizzazione pratica, e richiede una buona dose di esperienza da parte dell'operatore.

Le **prove in condizioni residuali** si effettuano su provini che, dopo aver trascorso un certo lasso di tempo alla temperatura di interesse (nel nostro caso 2 ore), sono tornati alla temperatura ambiente con velocità di raffreddamento opportunamente contenuta. Tra il periodo di massimo riscaldamento e l'esecuzione della prova è auspicabile che trascorrono da una a due settimane.

In questa campagna sperimentale si sono fissate cinque temperature di riferimento; 20, 105, 250, 500 e 750°C. Il generico ciclo termico per l'esecuzione delle prove a caldo e in condizioni residuali è stato così effettuato;

- riscaldamento del provino fino alla temperatura di riferimento con gradiente termico pari a $1^{\circ}C/min$,
- permanenza per due ore a temperatura costante,

- estrazione del provino (nel caso delle prove a caldo),
- raffreddamento con gradiente termico inferiore a $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ fino alla temperatura ambiente (nel caso delle prove in condizioni residuali).

I cicli termici ai quali sono stati sottoposti i provini in questa parte di campagna sperimentale sono illustrati nel grafico qualitativo *g 4.1*.

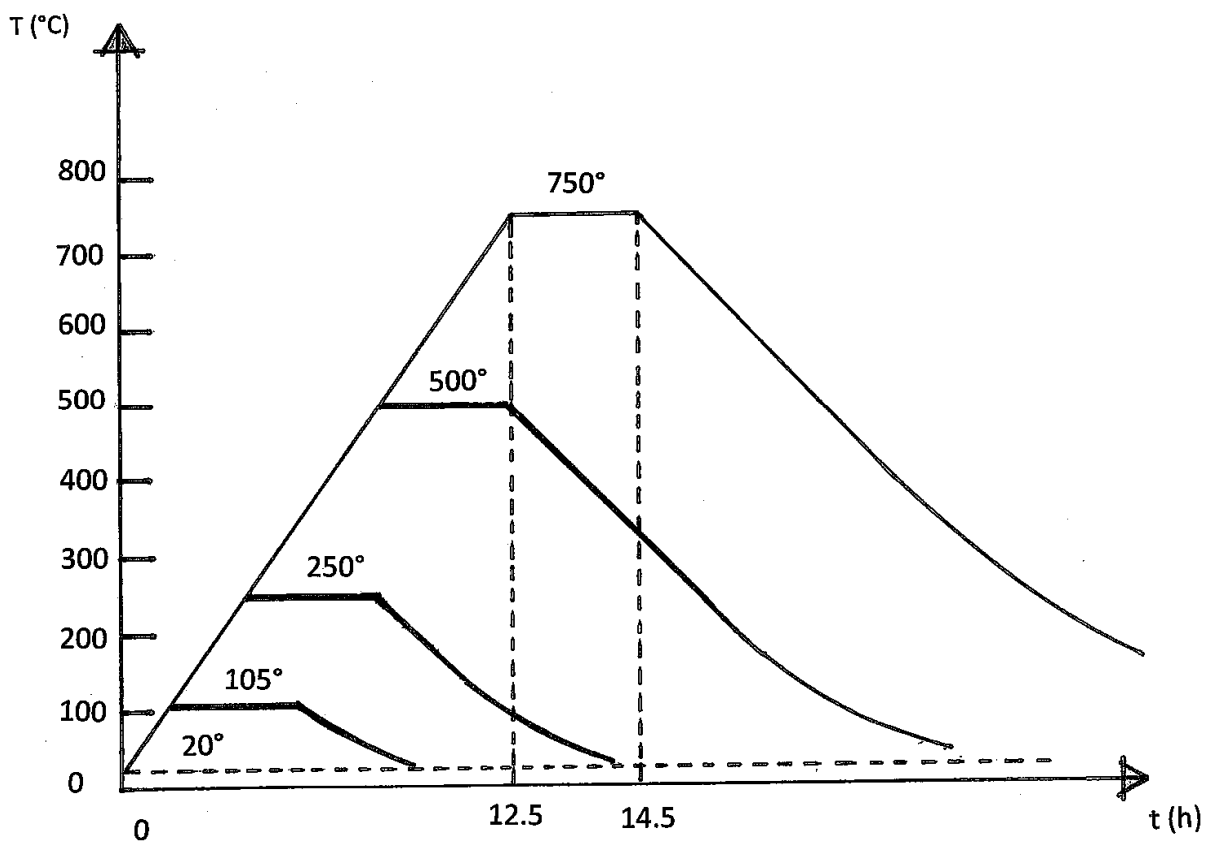
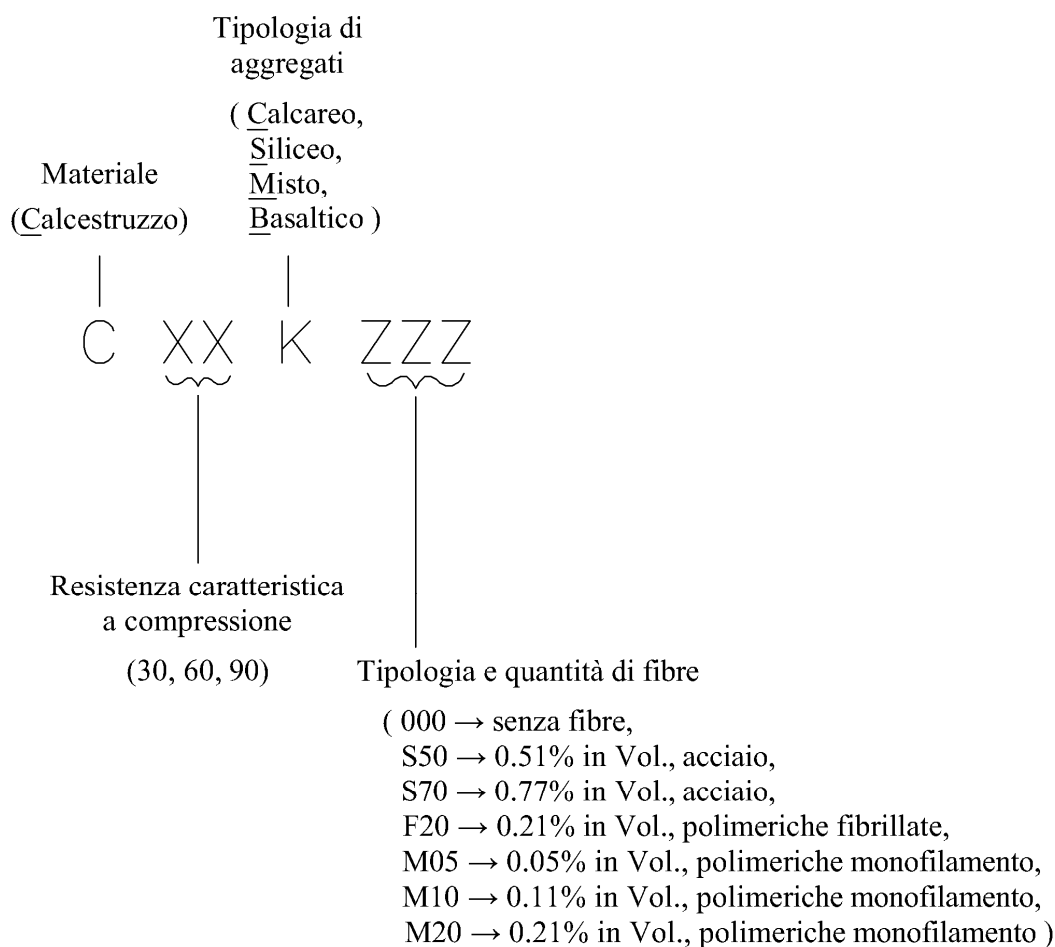


Immagine *i 4.1* : Illustrazione dei cicli termici

Combinando in maniera diversa i quattro parametri sopra descritti (f_{ck} , tipologia di aggregato, tipologia e quantitativo di fibre), sono stati preparati undici diversi tipi di mescola. Sulla base della loro composizione, è stata stabilita la nomenclatura di seguito illustrata, adatta a designare inequivocabilmente ciascuna di esse.



Nella tabella riportata di seguito, sono indicati i dati fondamentali circa la composizione di ciascuna miscela.

No.	Nomenclatura	f_{ck}	Aggregati	Fibre
1	C 30 M 000	30	Silicio-calcarei	-
2	C 60 M 000	60	Silicio-calcarei	-
3	C 60 C 000	60	Calcarei	-
4	C 60 B 000	60	Basaltici	-
5	C 60 M S50	60	Silicio-calcarei	Metalliche (0.51% in Vol., 40 kg/mc)
6	C 60 M S70	60	Silicio-calcarei	Metalliche (0.77% in Vol., 60 kg/mc)
7	C 60 M M05	60	Silicio-calcarei	Polimeriche (monofilamento, 0.05% in Vol., 0.5 kg/mc)
8	C 60 M M10	60	Silicio-calcarei	Polimeriche (monofilamento, 0.11% in Vol., 1.0 kg/mc)
9	C 60 M M20	60	Silicio-calcarei	Polimeriche (monofilamento, 0.21% in Vol., 2.0 kg/mc)
10	C 60 M F20	60	Silicio-calcarei	Polimeriche (fibrillate, 0.21% in Vol., 2.0 kg/mc)
11	C 90 M 000	90	Silicio-calcarei	-

Tabella *t 4.1* : Classificazione delle undici miscele della campagna di ricerca generale.

4.c) Contestualizzazione della parte di campagna condotta dallo studente

4.c.1) Composizione delle 5 miscele analizzate in questa parte di lavoro

Come già anticipato all'inizio del paragrafo § 4.b, la presente relazione costituisce il resoconto di una piccola parte della campagna generale presentata precedentemente.

Nelle prossime righe, si andrà a definire quali delle undici mescole sono state studiate, e tramite quali tipologie di prove.

Per quanto riguarda le mescole analizzate in questa parte di lavoro, esse sono cinque.

Si riporta nuovamente la Tabella 4.1, evidenziando in essa le righe corrispondenti alle mescole in questione.

No.	Nomenclatura	f_{ck}	Aggregati	Fibre
1	C 30 M 000	30	Silicio-calcarei	-
2	C 60 M 000	60	Silicio-calcarei	-
3	C 60 C 000	60	Calcarei	-
4	C 60 B 000	60	Basaltici	-
5	C 60 M S50	60	Silicio-calcarei	Metalliche (0.51% in Vol., 40 kg/mc)
6	C 60 M S70	60	Silicio-calcarei	Metalliche (0.77% in Vol., 60 kg/mc)
7	C 60 M M05	60	Silicio-calcarei	Polimeriche (monofilamento, 0.05% in Vol., 0.5 kg/mc)
8	C 60 M M10	60	Silicio-calcarei	Polimeriche (monofilamento, 0.11% in Vol., 1.0 kg/mc)
9	C 60 M M20	60	Silicio-calcarei	Polimeriche (monofilamento, 0.21% in Vol., 2.0 kg/mc)
10	C 60 M F20	60	Silicio-calcarei	Polimeriche (fibrillate, 0.21% in Vol., 2.0 kg/mc)
11	C 90 M 000	90	Silicio-calcarei	-

Tabella t 4.1.b : Indicazione delle cinque miscele studiate nel presente lavoro di ricerca.

Dunque, la tipologia di aggregato è comune a tutte e cinque le miscele analizzate, mentre la tipologia di fibre è comune alle due miscele che ne sono dotate.

Per tale motivo, in questa parte di campagna sperimentale, saranno fatti confronti rispetto ai soli due seguenti parametri;

- resistenza caratteristica f_{ck} (30, 60 e 90 MPa),
- contenuto in fibre (0, 1 e 2 kg/mc di miscela).

Si riporta nella sottostante tabella la composizione dettagliata delle cinque miscele studiate nel corso del presente lavoro.

No. miscela	1	2	8	9	11
Nomenclatura	C 30 M 000	C 60 M 000	C 60 M M10	C 60 M M20	C 90 M 000
CEM I (kg/mc)	400	400	400	400	480
Riempitivo calcareo (kg/mc)	200	-	-	-	-
GGBS (kg/mc)	-	200	200	200	300
Ghiaia silicea(^) (kg/mc)	883	860	860	860	821
Aggregato siliceo(^) (kg/mc)	610	699	699	699	667
Sabbia calcarea(*) (kg/mc)	-	-	-	-	-
Aggregato calcareo(**) (kg/mc)	-	-	-	-	-
Fibre polimeriche monofilamento (kg/mc)	-	-	1	2	-
Fibre polimeriche fibrillate (kg/mc)	-	-	-	-	-
Fibre metalliche (kg/mc)	-	-	-	-	-
Super-fluidificante acrilico (kg/mc)	1.8	2.76	2.76	2.76	12.79
Rapporto acqua/cemento	0.56	0.36	0.36	0.36	0.24
Densità della miscela fresca (kg/mc)	2340	2390	2370	2350	2440
f cm, cil / f cm, cubo (Mpa)	40/47	62/72	60/70	60/69	90/99

Tabella t 4.2 : Composizione dettagliata delle cinque miscele oggetto di studio.

4.c.2) Introduzione alle prove eseguite

Nello svolgimento del presente lavoro sono state effettuate molte misure; le grandezze misurate e la strumentazione impiegata in ciascuna prova saranno dettagliatamente descritte nei capitoli successivi.

Possiamo suddividere la campagna sperimentale descritta in questa relazione in due macro-parti. Nella prima parte si è inteso caratterizzare le cinque miscele in questione (paragrafo § 4_c_1), rispetto al loro **comportamento ad alta temperatura** (vedere paragrafo § 4_b per la definizione corretta).

Nella seconda parte, invece, si sono studiate alcune **tecniche non distruttive di diagnostica**, basate sull'analisi di onde ultrasoniche immesse nel provino.

La suddivisione è così organizzata.

- Prove atte a caratterizzare il comportamento ad alta temperatura delle miscele;
 - misura della variazione di densità al crescere della temperatura di riscaldamento, prima e dopo esposizione a temperature di 105, 250, 500 e 750°C,
 - prove di compressione in condizioni residuali su cilindri 10x20 cm, dopo esposizione a temperature di 105, 250, 500 e 750°C,
 - prove di diffusività tra i 20 e i 900°C.
- prove di diagnostica del danno residuale mediante immissione e lettura di onde ultrasoniche, prima e dopo esposizione a temperature di 105, 250, 500 e 750°C.

Per quanto riguarda i cicli di riscaldamento ai quali sono stati sottoposti i provini, essi sono illustrati nel paragrafo § 4_b.

La descrizione accurata delle prove di compressione si trova nel successivo paragrafo § 5_b_1.

Le prove di caratterizzazione sono state impostate sulla base di precedenti lavori di ricerca condotti al Politecnico di Milano [Bamonte P., Lo Monte F. e Gambarova P.G. (2013)], [Felicetti R. (2008)], [Bamonte P., Lo Monte F., Gambarova P.G. e Pecce M. (2013)].

Anche le prove con onde ultrasoniche sono state progettate basandosi su precedenti lavori di ricerca [Scalerandi M., Griffa M., Antonaci P., Wyrzykowski M. e Lura P. (2013)], [Antonaci P., Bruno C.L.E., Gliozzi A.S. e Scalerandi M. (2010)], [Van Den Abeele K., Sutin A., Carmeliet J. e Johnson P.A. (2001)], [Tarum R.N., Mohan Malotta V., Popovics J.S. (2004)], [Van Den Abeele K., De Visscher J. (2000)], [Antonaci P., Bocca P., Maserà D., Pugno N., Scalerandi M. e Sellone F. (2007)]. In parte si è tentato di ritrovare risultati già descritti in articoli scientifici precedentemente pubblicati, in parte si sono indagati nuovi aspetti e metodologie.

Le prove eseguite con onde ultrasoniche sono di tre tipi differenti.

Con la prima serie di prove [Tarum R.N., Mohan Malotta V., Popovics J.S. (2004)], si sono misurati il tempo di percorrenza dell'onda all'interno del provino e l'ampiezza massima raggiunta dall'onda uscente, immettendo nel materiale impulsi di intensità e frequenza costanti.

Nella seconda e nella terza serie di prove [Scalerandi M., Griffa M., Antonaci P., Wyrzykowski M. e Lura P. (2013)], [Antonaci P., Bruno C.L.E., Gliozzi A.S. e Scalerandi M. (2010)] si è invece utilizzato un modulatore di intensità e di frequenza, che ci ha permesso di registrare l'onda uscente dal provino per diversi valori di ampiezza e frequenza del segnale entrante.

I dettagli sull'esecuzione delle prove con ultrasuoni sono accuratamente riportati nei successivi paragrafi § 5.d.

4.c.3) Catalogazione dei provini impiegati per le differenti esperienze

Tutti i provini utilizzati in questa parte di lavoro sono stati fatti maturare in condizioni controllate per sessanta giorni dopo la fase di getto.

Per le prove di compressione sono stati predisposti tre provini cilindrici 10x20 cm per ciascuna temperatura di riferimento. Poiché le temperature di riferimento sono cinque (20, 105, 250, 500 e 750°C), così come le miscele analizzate, il numero totale di provini forniti è stato di settantacinque (3 provini x 5 temperature x 5 miscele).

Le prove atte a misurare la variazione di densità al crescere della temperatura sono state condotte sugli stessi provini utilizzati per le prove di compressione, così come anche le indagini con onde ultrasoniche. Questo è stato possibile, poiché entrambe queste due tipologie di prove non comportano danneggiamento del provino.

Si anticipa inoltre che, per ciascuna temperatura di riferimento, solo due dei tre provini a disposizione sono stati effettivamente utilizzati, lasciando il terzo come riserva, nel caso di dispersioni sospette tra i risultati ottenuti.

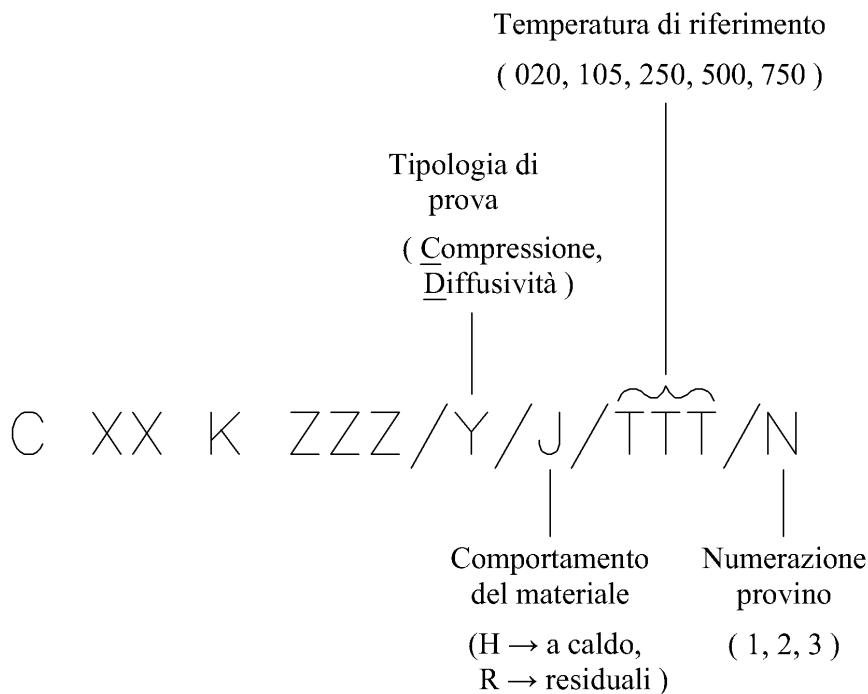
Per le prove di diffusività, sono stati preparati cinque provini, uno per ciascuna miscela oggetto di studio. Questi provini hanno forma cilindrica e dimensioni 10x30 cm, e sono dotati di due termocoppie inglobate nella malta cementizia.

Si riporta di seguito la fotografia delle due tipologie di provini utilizzate. Il provino sulla sinistra è stato sottoposto alle prove di densità, alle prove ultrasoniche e a quelle di compressione. Il provino sulla destra è stato utilizzato per valutare la diffusività.



Immagine i 4.2 : Fotografia delle due tipologie di provini impiegati negli esperimenti.

In base a quanto esposto, la nomenclatura presentata nel paragrafo § 4.b è stata estesa per adattarsi a questa parte di campagna sperimentale.



Nel seguito di questa relazione, ci si riferirà ai provini oggetto di studio utilizzando sempre la nomenclatura sopra esposta.

5) ESPERIENZE CONDOTTE SUL MATERIALE

Questo capitolo costituisce la parte centrale del presente lavoro di tesi. In esso sono dettagliatamente descritte tutte le esperienze condotte, i risultati ottenuti, i confronti con alcune normative tecniche e con precedenti lavori di ricerca. Le prove descritte sono già state introdotte ed elencate nel precedente paragrafo § 4.c.2.

Si rimarca che mentre la prima parte del capitolo (dal paragrafo § 5.a al § 5.c) costituisce parte del lavoro di caratterizzazione delle mescole, riguardo al loro comportamento ad alte temperature in condizioni residuali, nella seconda parte (paragrafo § 5.d) sono affrontati i problemi di diagnostica con ultrasuoni, e sono riportati i risultati ottenuti tramite tre diverse tipologie di prove.

5.a) Misura della densità alle diverse temperature

Come già anticipato al paragrafo § 4.c.2, tutti i provini utilizzati nella nostra campagna sono stati fatti maturare per 60 giorni dopo il getto. Durante questo lasso di tempo ciascun provino ha raggiunto un proprio valore stabile di massa e volume (salvo ulteriori variazioni, insignificanti rispetto alle nostre misure).

Di ciascun provino, sono poi stati accuratamente misurati volume e massa, sia prima sia dopo il ciclo termico. In questo modo, si è potuta valutare la variazione di densità all'aumentare della temperatura.

Per ciascuna delle cinque miscele sono stati messi a disposizione dieci provini, due per ogni temperatura di riferimento (20, 105, 250, 500 e 750°C). Il valore di densità corrispondente a ciascuna temperatura è ottenuto come media dei due provini ugualmente riscaldati.

Nei grafici che seguono, sono stati messi a confronto i dati riguardanti le cinque miscele in questione. Poiché esse sono tutte composte con la stessa qualità di aggregato (silicio-calcareo) e le fibre sono dello stesso tipo (nelle sole miscele che le contengono), i **confronti** sono stati fatti **rispetto alla resistenza caratteristica** e, separatamente, **rispetto al contenuto di fibre**.

Nel grafico g 5.1, si trovano i risultati delle miscele C 30 M 000, C 60 M 000 e C 90 M 000; si ricorda che nessuna di queste miscele ha fibre al proprio interno, mentre esse differiscono per il livello di resistenza (f_{ck} 30, 60 e 90 MPa rispettivamente).

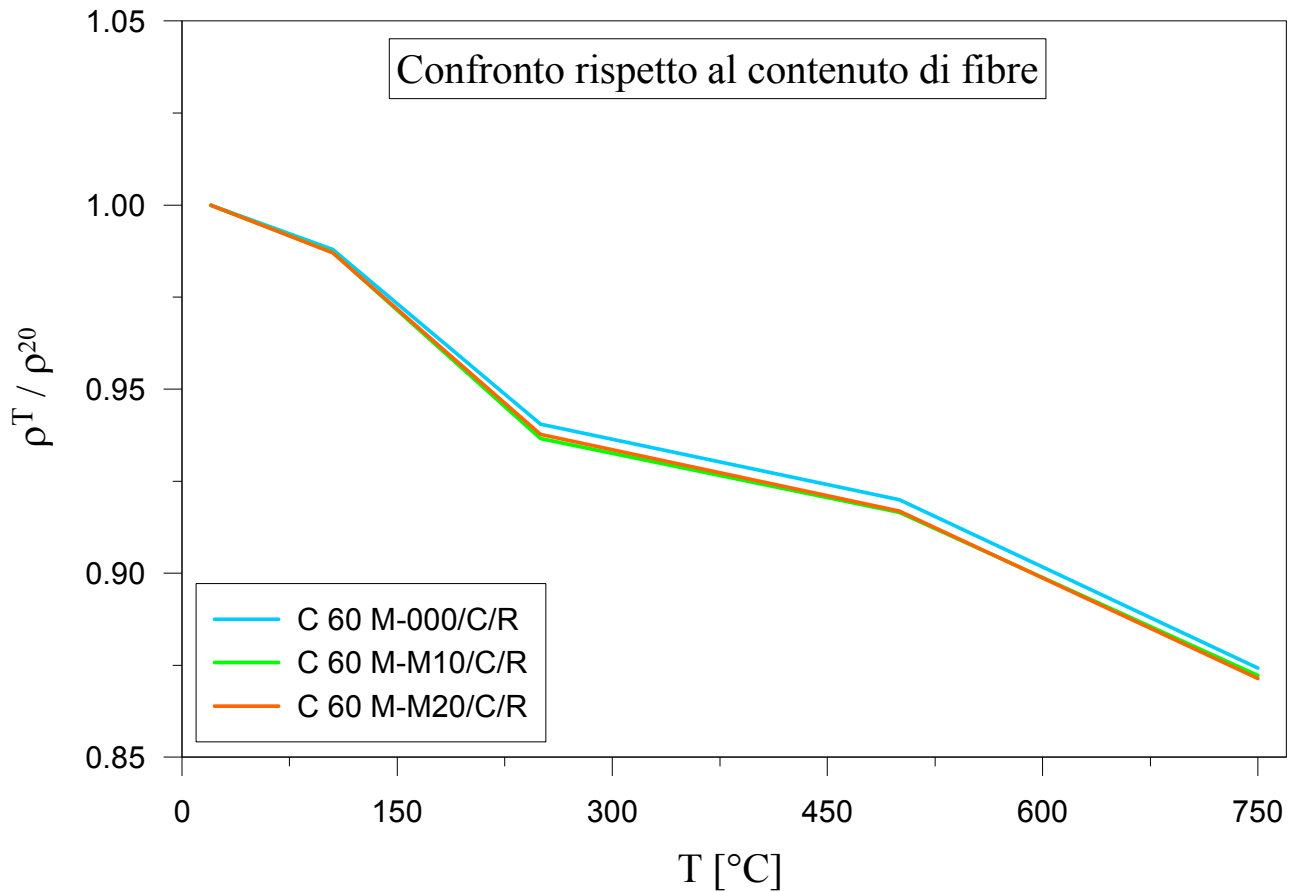


Grafico g 5.1 : Valori di densità al crescere della temperatura di pre-riscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

T [°C]	20	105	250	500	750
Miscela	ρ ₂₀ [kg/mc]	ρ ₁₀₅ / ρ ₂₀	ρ ₂₅₀ / ρ ₂₀	ρ ₅₀₀ / ρ ₂₀	ρ ₇₅₀ / ρ ₂₀
C 30 M 000	2296	0.985	0.951	0.936	0.897
C 60 M 000	2415	0.988	0.940	0.920	0.874
C 90 M 000	2465	0.993	0.956	0.933	0.898

Tabella t 5.1 : Valori di densità al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

...(commenti)...

Nel grafico g 5.2, sono riportati i risultati delle miscele C 60 M 000, C 60 M M10 e C 60 M M20; queste hanno comune grado di resistenza (f_{ck} 60 MPa), ma contenuto di fibre differente (0, 1 e 2 kg/mc rispettivamente).

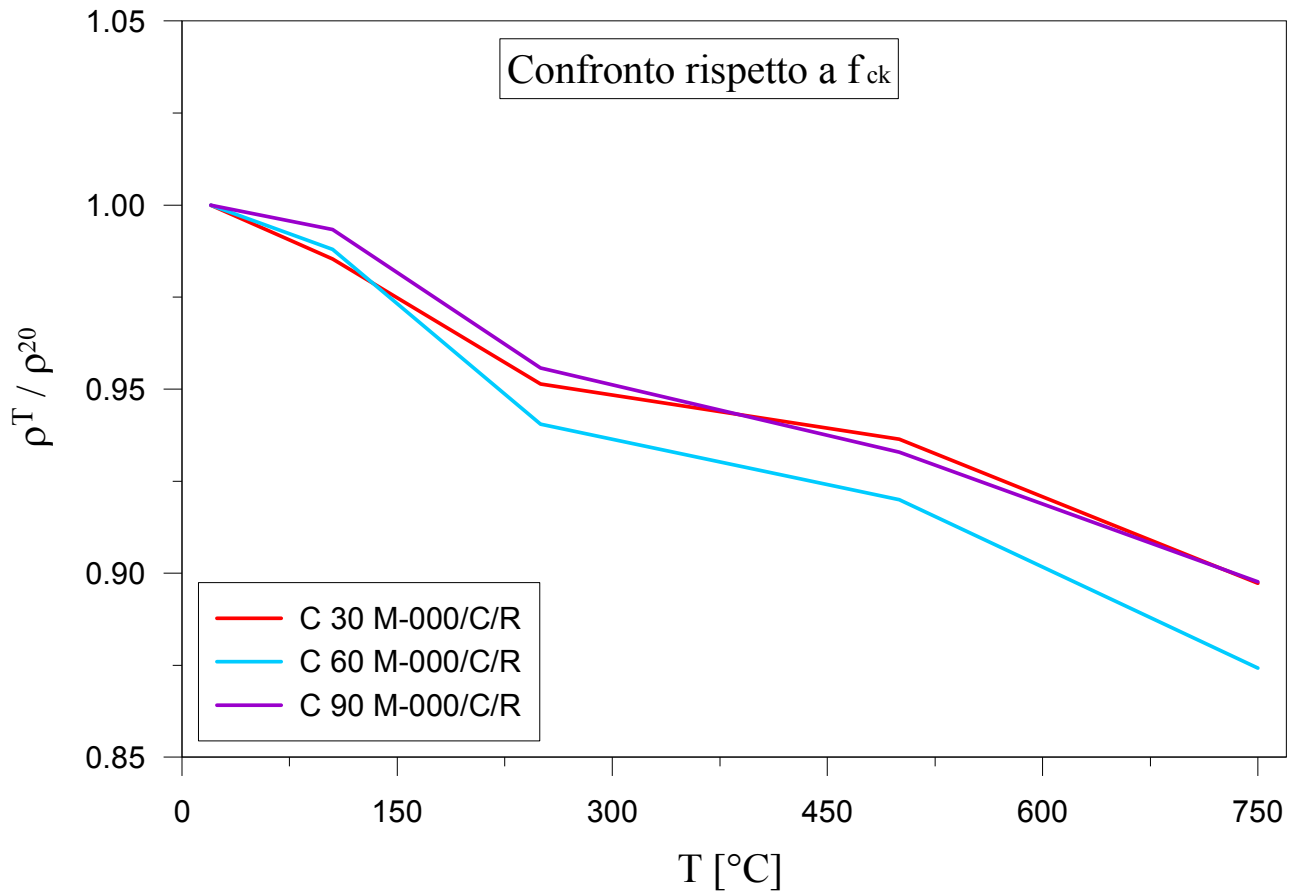


Grafico g 5.2 : Valori di densità al crescere della temperatura di pre-riscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

T [°C]	20	105	250	500	750
Miscela	ρ_{20} [kg/mc]	ρ_{105} / ρ_{20}	ρ_{250} / ρ_{20}	ρ_{500} / ρ_{20}	ρ_{750} / ρ_{20}
C 60 M 000	2415	0.988	0.940	0.920	0.874
C 60 M M10	2383	0.987	0.937	0.916	0.872
C 60 M M20	2364	0.987	0.938	0.917	0.871

Tabella t 5.2 : Valori di densità al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

...(commenti)...

Nel grafico g 5.3, infine, si trovano i risultati di tutte e cinque le miscele simultaneamente.

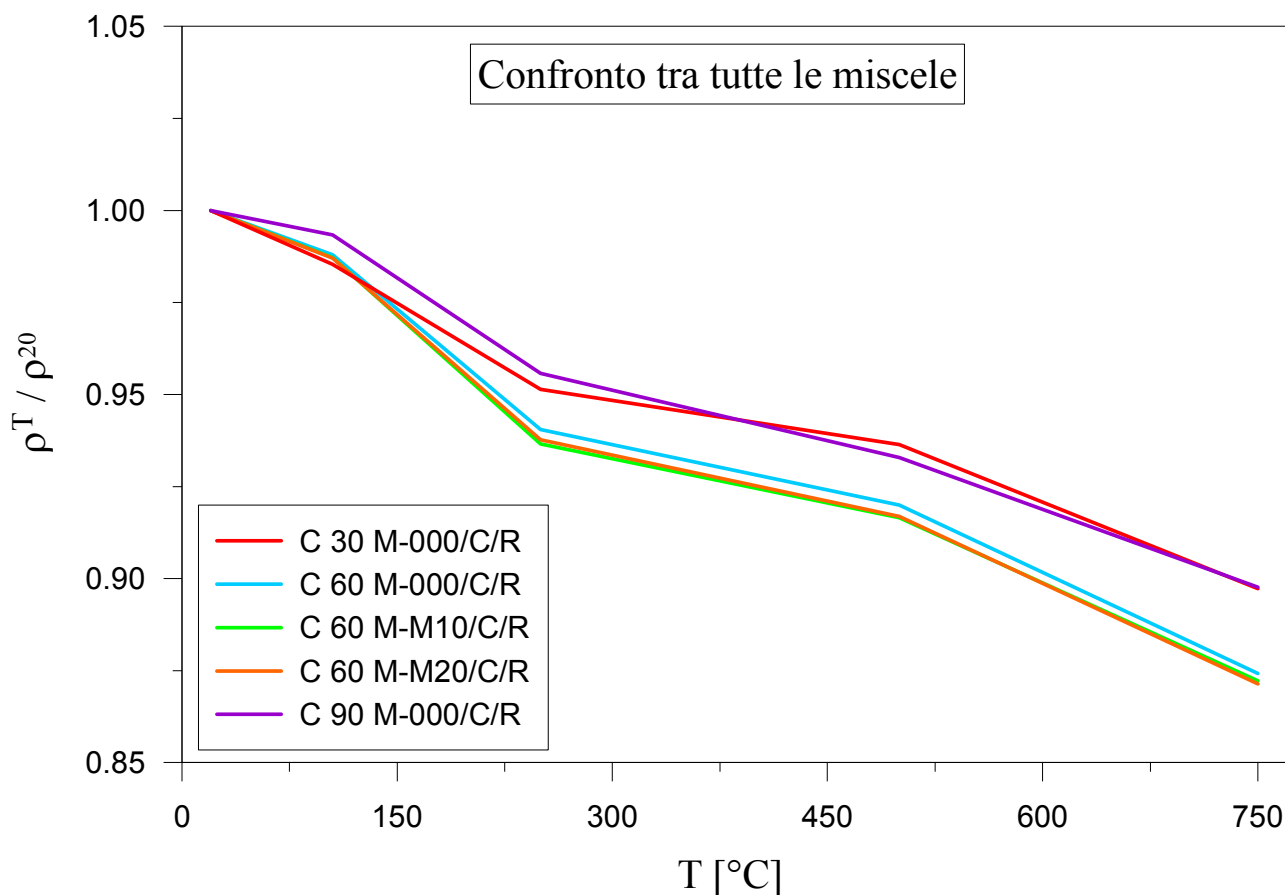


Grafico g 5.3 : Valori di densità al crescere della temperatura di pre-riscaldamento (Tutte le miscele).

...(commenti)...

In conclusione, ciò che ci si aspettava, e che è stato confermato dalle misure effettuate, era una diminuzione di densità conseguente all'aumento di temperatura.

E' possibile spiegare tale diminuzione di massa volumica in questo modo [Bazant Z.P. e Kaplan M.F. (1996)]; al crescere della temperatura, l'acqua che durante la maturazione non ha partecipato all'idratazione del cemento, ma che è rimasta intrappolata nelle micro-cavità del materiale, passa dallo stato liquido a quello di vapore. Sempre a causa dell'aumento di temperatura, la pressione del vapore intrappolato cresce, causando micro-danneggiamento nel materiale cementizio che lo circonda. Quando il danneggiamento determina la formazione di micro-fessure connesse con l'esterno, il vapore esce dal provino, disperdendosi nell'ambiente circostante. La massa di quest'acqua dispersa costituisce quindi la differenza rilevata.

5.b) Prove di compressione

I risultati delle prove meccaniche di compressione costituiscono la base di riferimento per ogni altra tipologia di prova, nella caratterizzazione ad alte temperature delle mescole cementizie.

Nel presente lavoro, tali prove sono state condotte solo in condizioni residuali, secondo quanto descritto nel precedente paragrafo § 4.b.

Il risultato delle prove di compressione sono i grafici dei legami costitutivi (paragrafo § 5.b.2), ottenuti per ciascuna miscela e a ciascuna delle temperature di riferimento. Da tali grafici sono stati estrapolati i parametri meccanici significativi (f_c , ϵ_c , E_{50}). Di essi si è studiata la variazione con il crescere della temperatura e con il variare della composizione chimica delle diverse miscele (paragrafo § 5.b.3).

I risultati sono dunque commentati con riguardo ai precedenti studi effettuati sull'argomento [Bazant Z.P. e Kaplan M.F. (1996)] (paragrafo § 5.b.4), e confrontati con precedenti lavori di ricerca [Bamonte P., Lo Monte F. e Gambarova P.G. (2013)] e con le normative tecniche di riferimento (paragrafo § 5.b.5) [CEN, European Committee for Standardization – EN 1994-1-2 (2005)], [ACI 216-1.07 (2007)].

5.b.1) Descrizione dell'esperimento e della strumentazione

Per le prove di compressione si sono utilizzati i cilindri di dimensioni 10x20 cm, preparati come indicato nel paragrafo § 4.c.2.

Di ciascuna delle cinque miscele sono stati messi a disposizione dieci provini. Di questi dieci provini, due sono stati compressi senza alcun pre-riscaldamento, mentre le restanti quattro coppie sono state pre-riscaldate rispettivamente fino alle temperature di 105, 250, 500 e 750 °C, come indicato al paragrafo § 4.b. I risultati per ciascuna temperatura di riferimento sono ottenuti come media tra i due provini ugualmente riscaldati.

I cicli di riscaldamento ai quali sono stati sottoposti i provini sono esaurientemente descritti nel paragrafo § 4.b.

Tutte le prove sono state eseguite utilizzando la macchina da pressa SCHENK (Immagine *i 5.1*), situata all'interno del Laboratorio di Prove dei Materiali (L.P.M), presso il Politecnico di Milano. Tale macchina funziona in controllo di spostamento, è dotata di piatto superiore articolato (Immagine *i 5.2*) (limitante gli effetti flessionali parassiti) ed è in grado di esercitare una compressione massima pari a 100 t.



Immagine *i 5.1* : Fotografia della macchina Schenck utilizzata per le prove di compressione.



Immagine *i 5.2* : Fotografia del particolare piatto articolato della macchina Schenck.

Sulle sezioni trasversali di ciascun provino è stato steso un sottilissimo strato di acido stearico, con lo scopo di ridurre l'attrito tra i piatti della pressa e le sezioni stesse.

La deformazione assiale del provino è stata valutata in via diretta mediante tre misuratori resistivi con base 50 mm (DD1), disposti a distanza 120° l'uno dall'altro, lungo la circonferenza media del provino.

In aggiunta, sono stati utilizzati tre trasduttori di spostamento induttivo (LVDT), sempre posizionati con sfasamento reciproco di 120°, per misurare la distanza tra i due piatti della pressa durante il corso della prova (Immagine *i 5.3*).

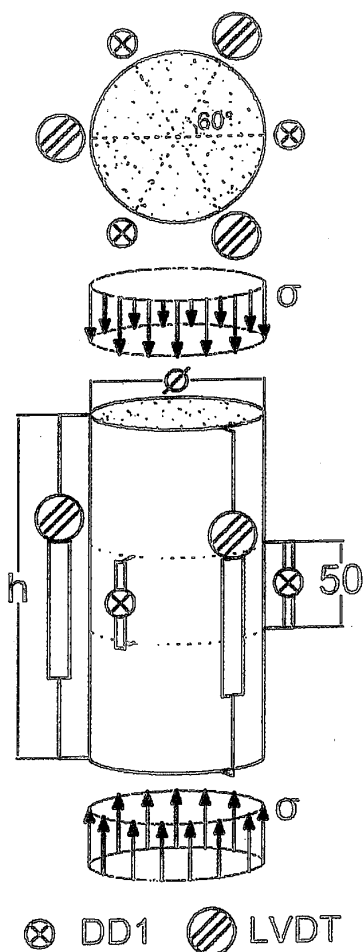


Immagine *i 5.3* : Schematizzazione di LVDT e DD.

Durante la prova, le grandezze elettriche registrate dai DD1 e dagli LVDT sono inviate ad una centrale di acquisizione dati UPM 60 (Immagine *i 5.4*), che le trasforma in dati acquisibili dal computer. I dati ricevuti dal computer possono così essere facilmente letti dall'operatore ed opportunamente trattati.



Immagine *i 5.4* : Fotografia della cabina centrale di acquisizione dati UPM 60.

Tutta la strumentazione descritta è immortalata nella fotografia sottostante (Immagine *i 5.5*).

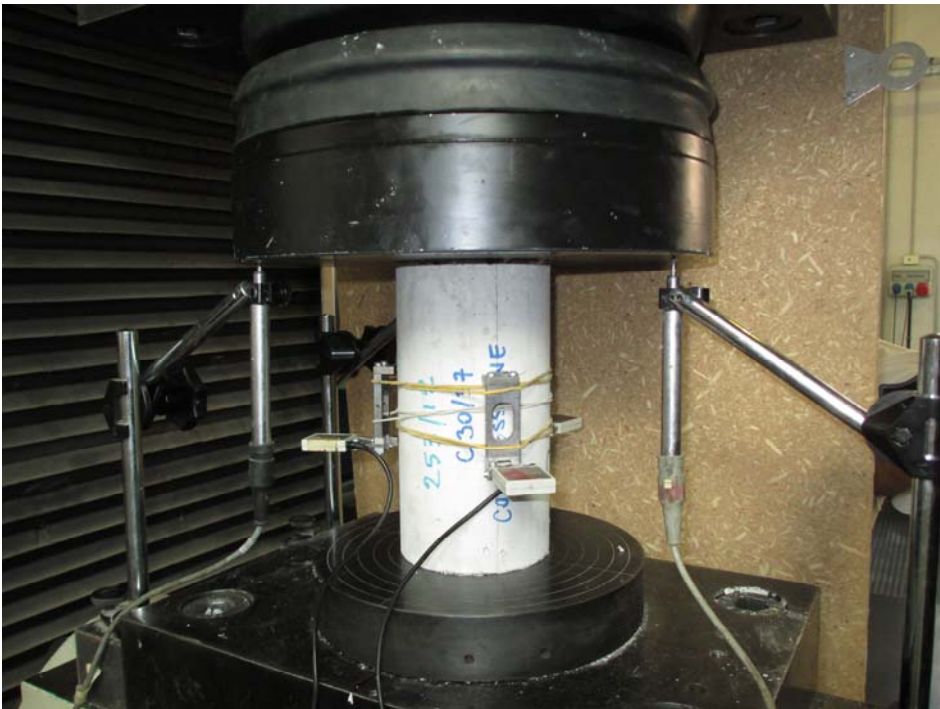


Immagine *i 5.5* : Fotografia della strumentazione con cui si rilevano le fasi della prova di compressione.

La prova di compressione uni-assiale per il generico provino è stata così condotta;

- il provino è stato sottoposto a ciclo termico (secondo quanto descritto nel paragrafo § 4_b),
- il provino è stato munito della strumentazione precedentemente descritta e posizionato tra i piatti della pressa,
- il provino è stato condotto fino a rottura controllando gli spostamenti della pressa, registrando il suo comportamento meccanico fin'oltre lo sforzo di picco.

Concludiamo questa presentazione delle prove di compressione con un'anticipazione; la dispersione tra i risultati ottenuti è stata del tutto soddisfacente. Questo fatto assolve il basso numero di provini impiegati (solamente due per ciascuna temperatura di riferimento).

5.b.2) Legami costitutivi

Dalle prove di compressione eseguite si è ricavata la serie di legami costitutivi riportati di seguito. I risultati numerici acquisiti dal computer sono stati opportunamente trattati, in modo da compensare gli errori di misura intrinseci nella strumentazione.

Si premette che in questo paragrafo ci si è limitati ad una semplice elencazione dei risultati delle misure. I confronti (e i dovuti commenti) rispetto alla diversa composizione delle miscele cementizie saranno riportati nel paragrafo successivo, il § 5.b.3, dopo aver estrapolato dai presenti grafici i parametri meccanici di interesse (f_c , ϵ_c , e E_{50}).

Nella prima serie di grafici (grafici da g 5.4 a g 5.8) si sono raggruppati i legami costitutivi valutati per ciascuna delle cinque temperature di riferimento, distinguendo tra le cinque diverse miscele.

Miscela C 60 M 000 (f_{ck} 60 MPa, senza fibre)

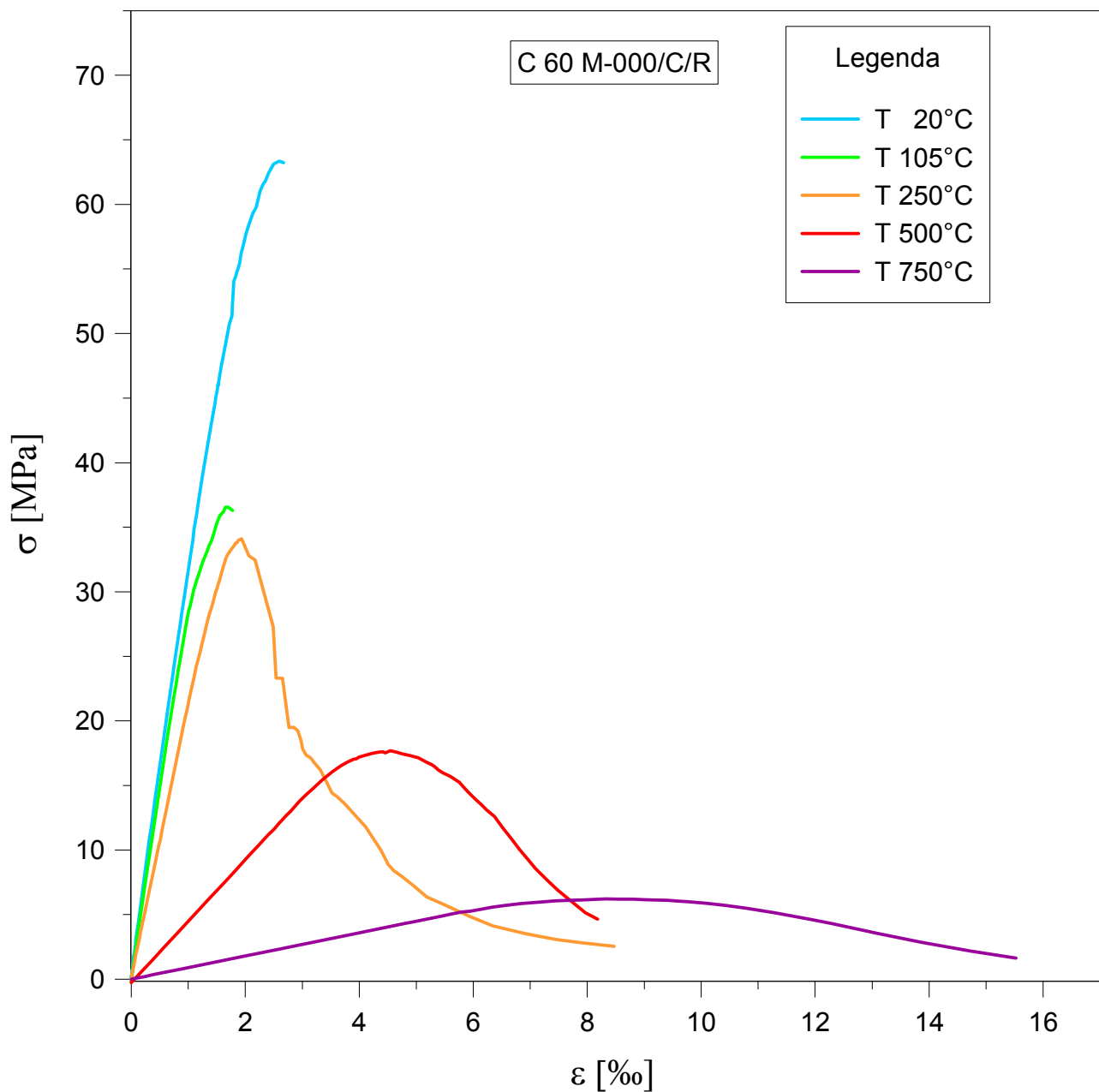


Grafico g 5.4 : Legami costitutivi (miscela C 60 M 000, Tutte le temperature).

T [°C]	20	105	250	500	750
E_{50} [MPa]	31810	29599	21466	3816	751
ϵ_c	0.00259	0.00165	0.00194	0.00495	0.00907
f_c [MPa]	63.4	36.6	34.1	17.7	6.2

Tabella t 5.3 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 60 M 000, tutte le temperature).

Miscela C 60 M M10 (f_{ck} 60 MPa, 1 kg di fibre per mc di miscela)

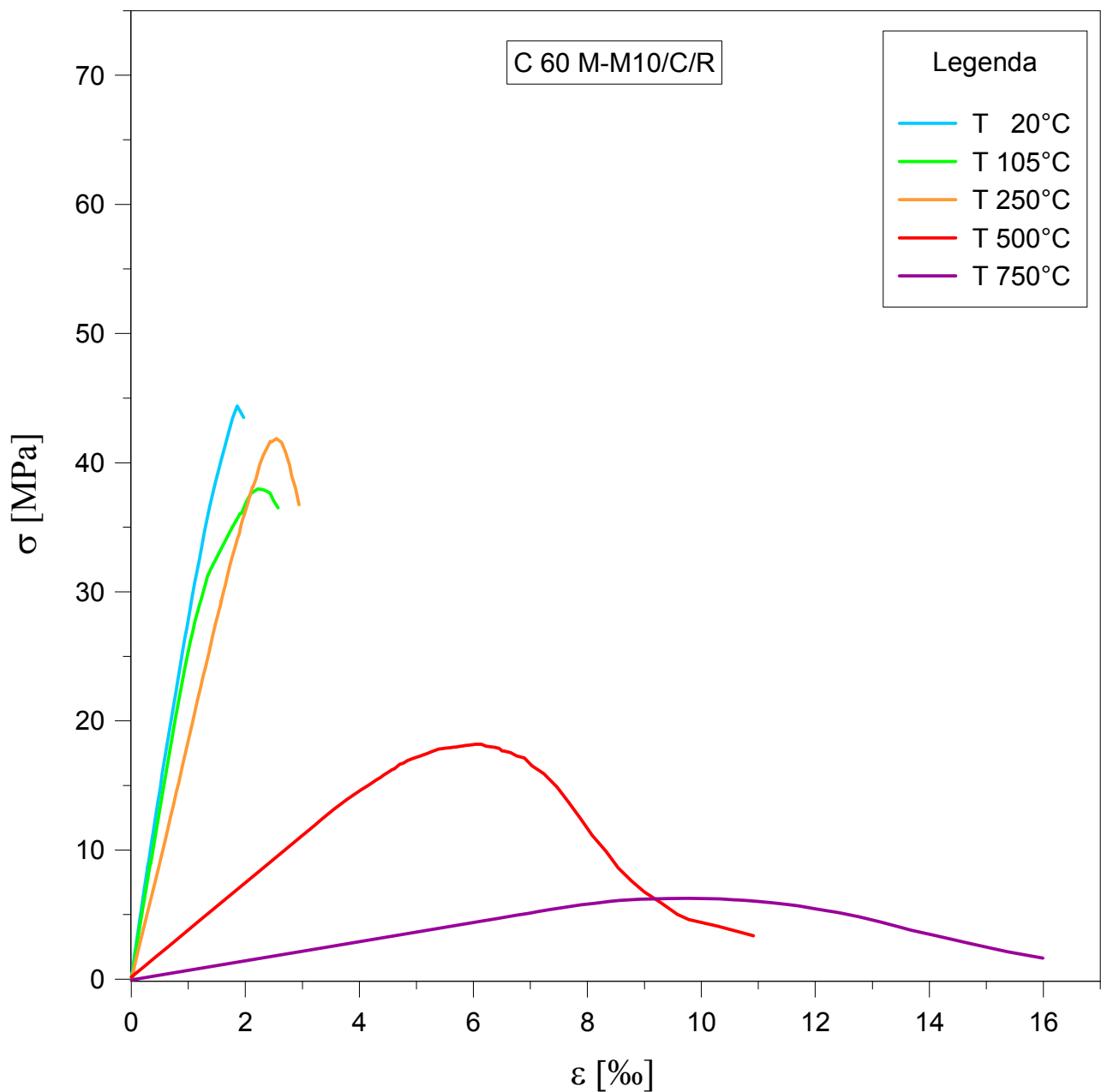


Grafico g 5.5 : Legami costitutivi (miscela C 60 M M10, Tutte le temperature).

T [°C]	20	105	250	500	750
E_{50} [MPa]	28612	26153	18503	3348	629
ϵ_c	0.00186	0.00222	0.00254	0.00628	0.01047
f_c [MPa]	44.4	38.0	41.9	18.2	6.3

Tabella t 5.4 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 60 M M10, tutte le temperature).

Miscela C 60 M M20 (f_{ck} 60 MPa, 2 kg di fibre per mc di miscela)

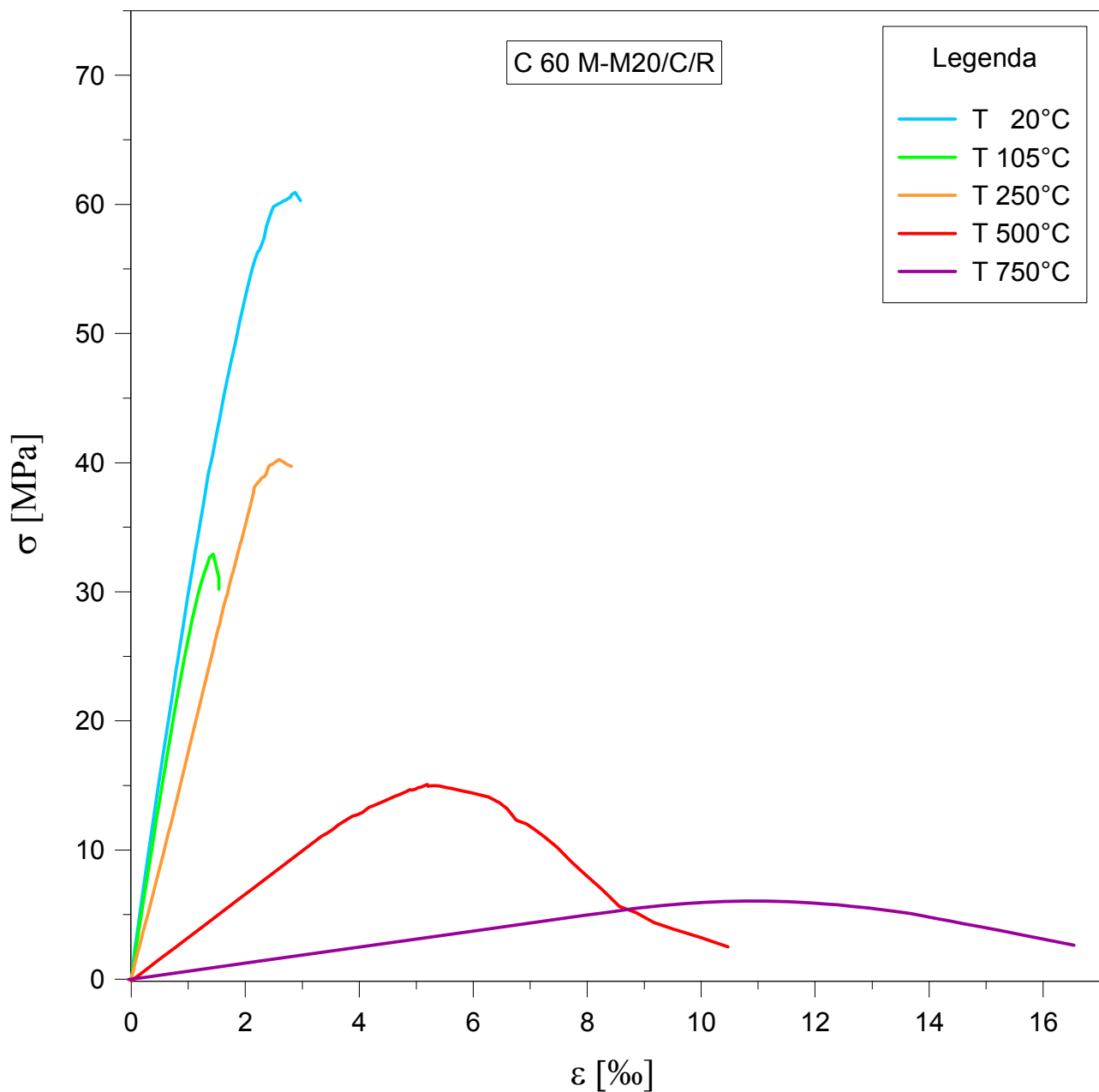


Grafico g 5.6 : Legami costitutivi (miscela C 60 M 2, Tutte le temperature).

T [°C]	20	105	250	500	750
E_{50} [MPa]	29813	27665	17653	3073	640
ϵ_c	0.00288	0.00144	0.00259	0.00537	0.01058
f_c [MPa]	60.9	32.9	40.2	15.1	6.1

Tabella t 5.5 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 60 M 2, tutte le temperature).

Miscela C 30 M 000 (f_{ck} 30 MPa, senza fibre)

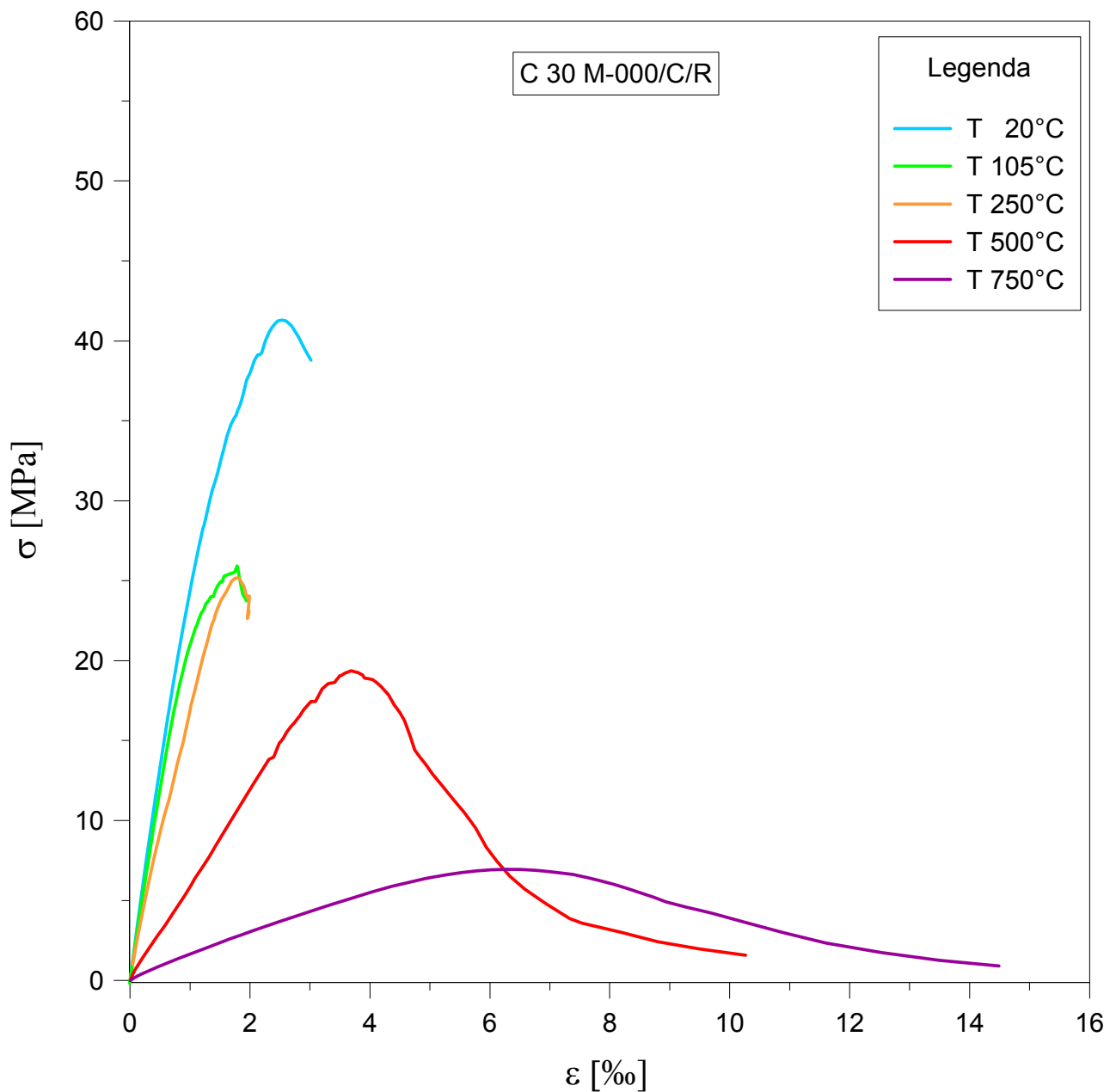


Grafico g 5.7 : Legami costitutivi (miscela C 30M 000, Tutte le temperature).

T [°C]	20	105	250	500	750
E_{50} [MPa]	25388	23870	17266	5937	1498
ϵ_c	0.00254	0.00179	0.00182	0.00369	0.00618
f_c [MPa]	41.3	25.9	25.2	19.4	6.9

Tabella t 5.6 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 30M 000, tutte le temperature).

Miscela C 90 M 000 (f_{ck} 90 MPa, senza fibre)

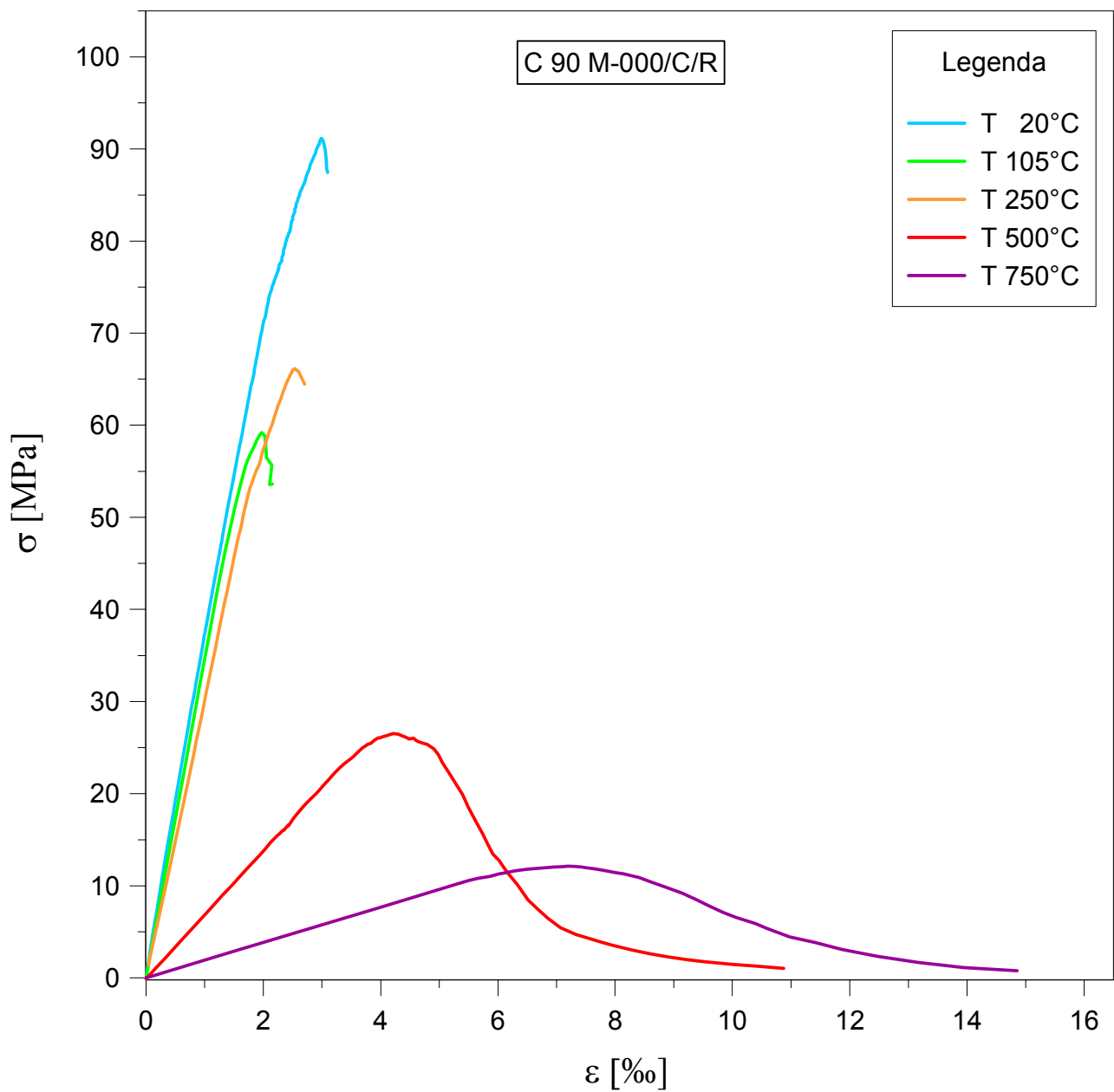


Grafico g 5.8 : Legami costitutivi (miscela C 90M 000, Tutte le temperature).

T [°C]	20	105	250	500	750
E_{50} [MPa]	36879	34656	30219	5283	1294
ϵ_c	0.00299	0.00197	0.00254	0.00478	0.00896
f_c [MPa]	91.1	59.2	66.2	26.5	12.1

Tabella t 5.7 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (miscela C 90M 000, tutte le temperature).

Le precedenti curve sforzo-deformazione mostrano un ben definito ramo elastico lineare iniziale, la perdita di linearità in prossimità dello sforzo di picco (f_c), e, per le sole temperature 500 e 750°C, un ramo discendente piuttosto regolare, evidenziando un consistente aumento di duttilità da parte del materiale al crescere della temperatura di pre-riscaldamento.

Nella seconda serie di grafici (grafici da *g 5.9* a *g 5.13*) si sono raggruppati i legami costitutivi di tutte e cinque le miscele, distinguendo tra le cinque temperature di riferimento.

Temperatura di pre-riscaldamento: 20°C

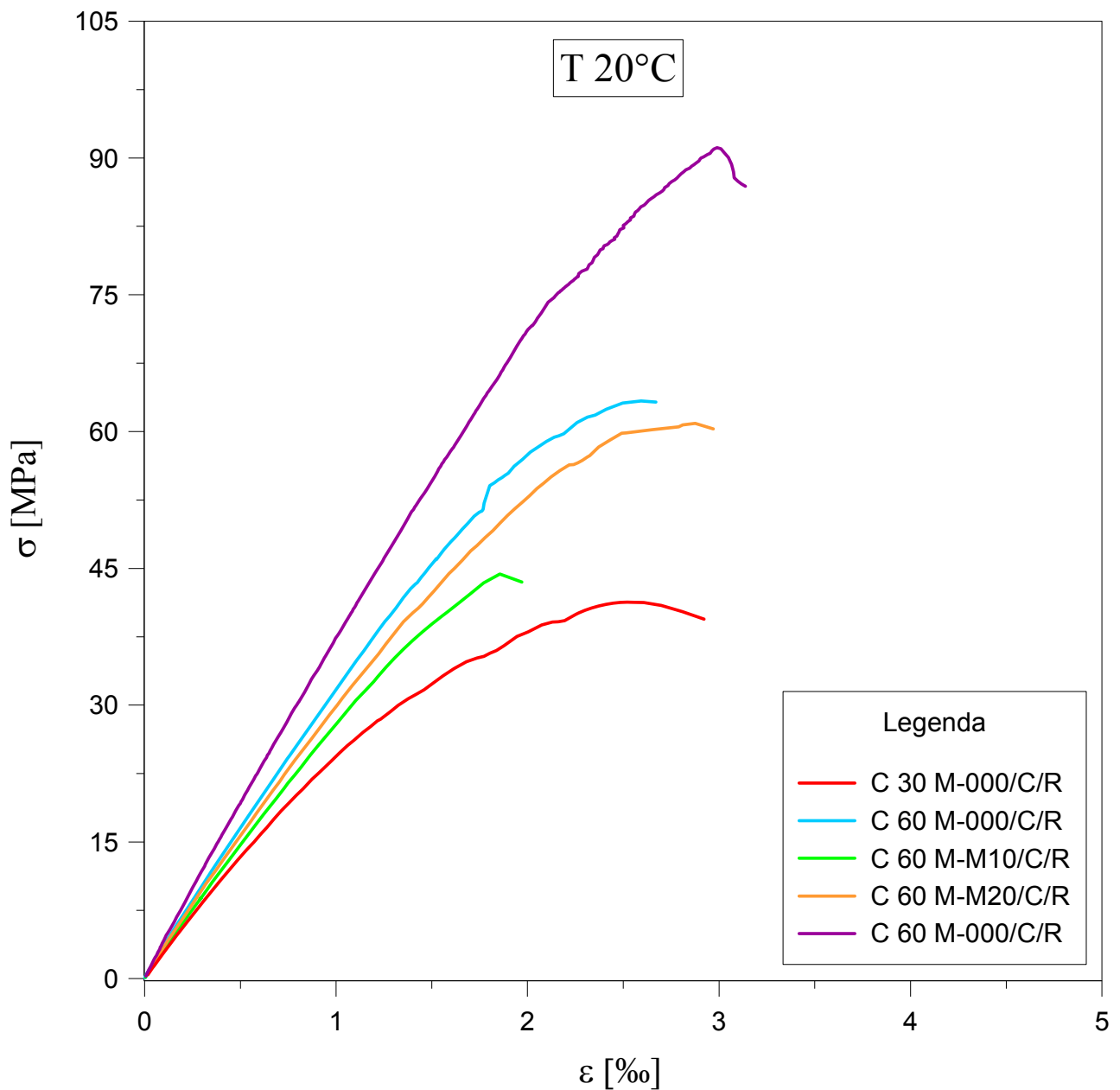


Grafico g 5.9 : Legami costitutivi (T 20°C, tutte le miscele).

Miscela	C 60 M 000	C 60 M M10	C 60 M M20	C 30 M 000	C 90 M 000
E ₅₀ [MPa]	31810	28612	29813	25388	36879
ε _c	0.00259	0.00186	0.00288	0.00254	0.00299
f _c [MPa]	63.4	44.4	60.9	41.3	91.1

Tabella t 5.8 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 20°C, tutte le miscele).

Temperatura di pre-riscaldamento: 105°C

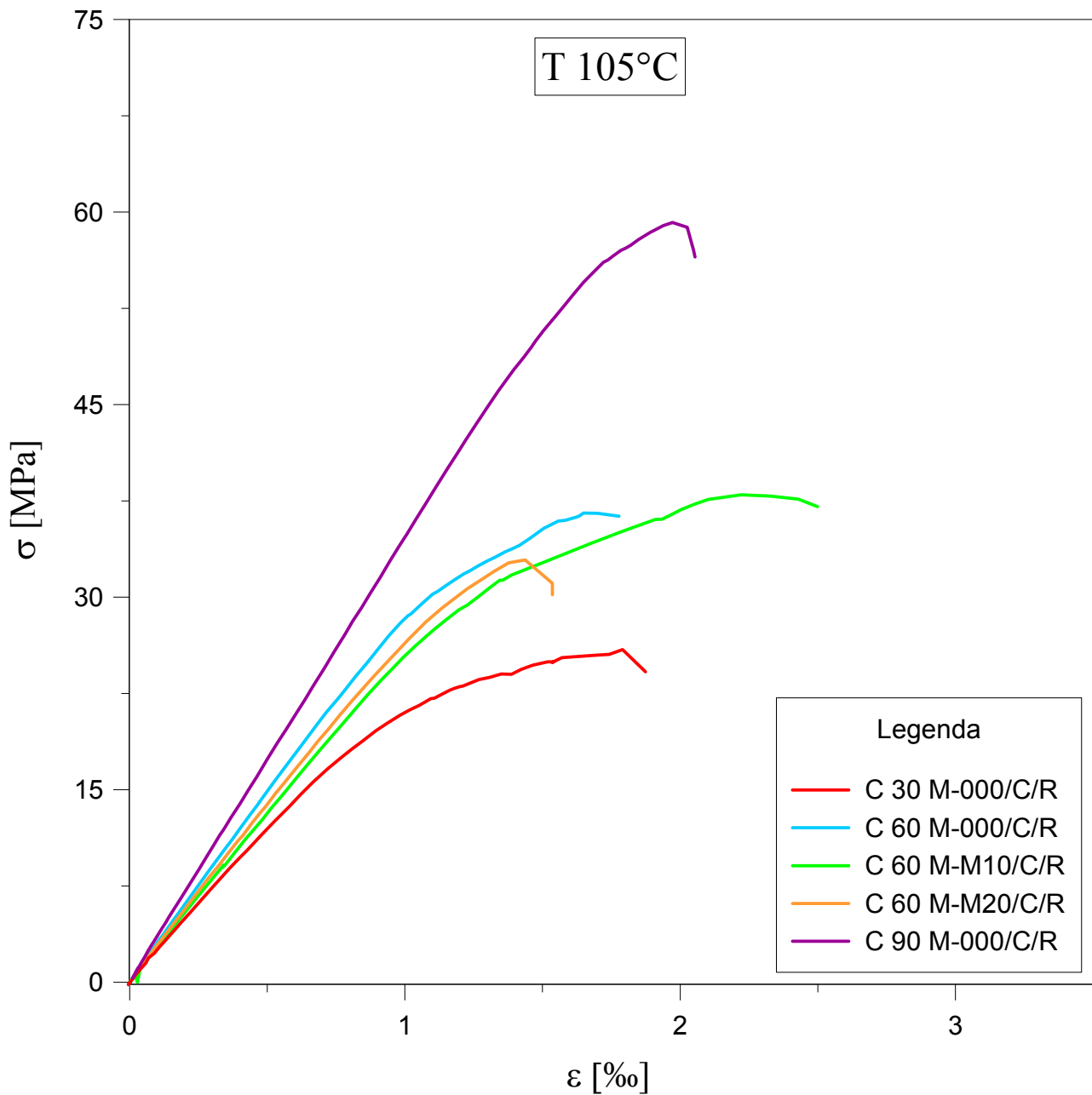


Grafico g 5.10 : Legami costitutivi (T 105°C, tutte le miscele).

Miscela	C 60 M 000	C 60 M M10	C 60 M M20	C 30 M 000	C 90 M 000
E_{50} [MPa]	29599	26153	27665	23870	34656
ϵ_c	0.00165	0.00222	0.00144	0.00179	0.00197
f_c [MPa]	36.6	38.0	32.9	25.9	59.2

Tabella t 5.9 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 105°C, tutte le miscele).

Temperatura di pre-riscaldamento: 250°C

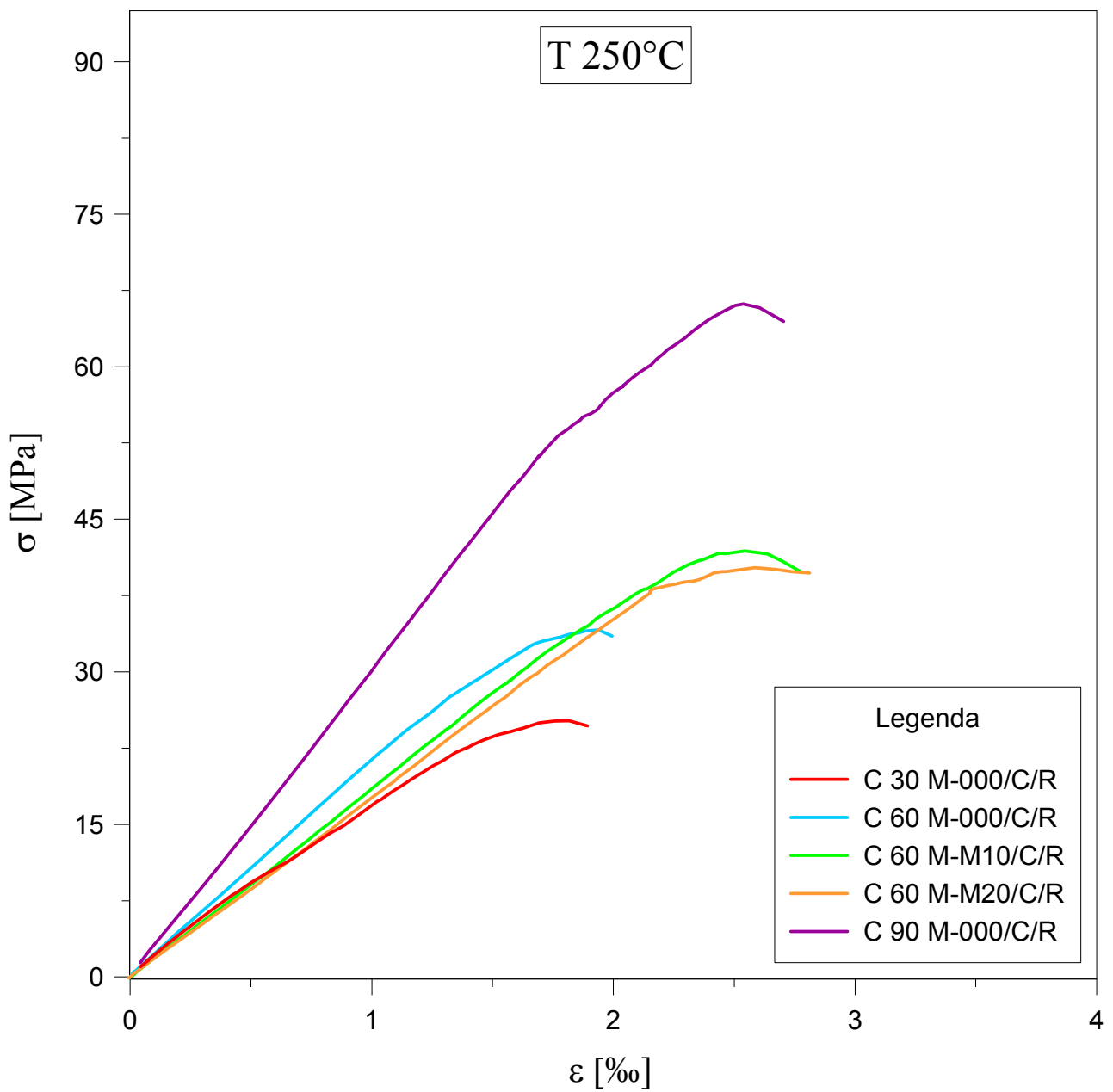


Grafico g 5.11 : Legami costitutivi (T 250°C, tutte le miscele).

Miscela	C 60 M 000	C 60 M M10	C 60 M M20	C 30 M 000	C 90 M 000
E_{50} [MPa]	21466	18503	17653	17266	30219
ϵ_c	0.00194	0.00254	0.00259	0.00182	0.00254
f_c [MPa]	34.1	41.9	40.2	25.2	66.2

Tabella t 5.10 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 250°C, tutte le miscele).

Temperatura di pre-riscaldamento: 500°C

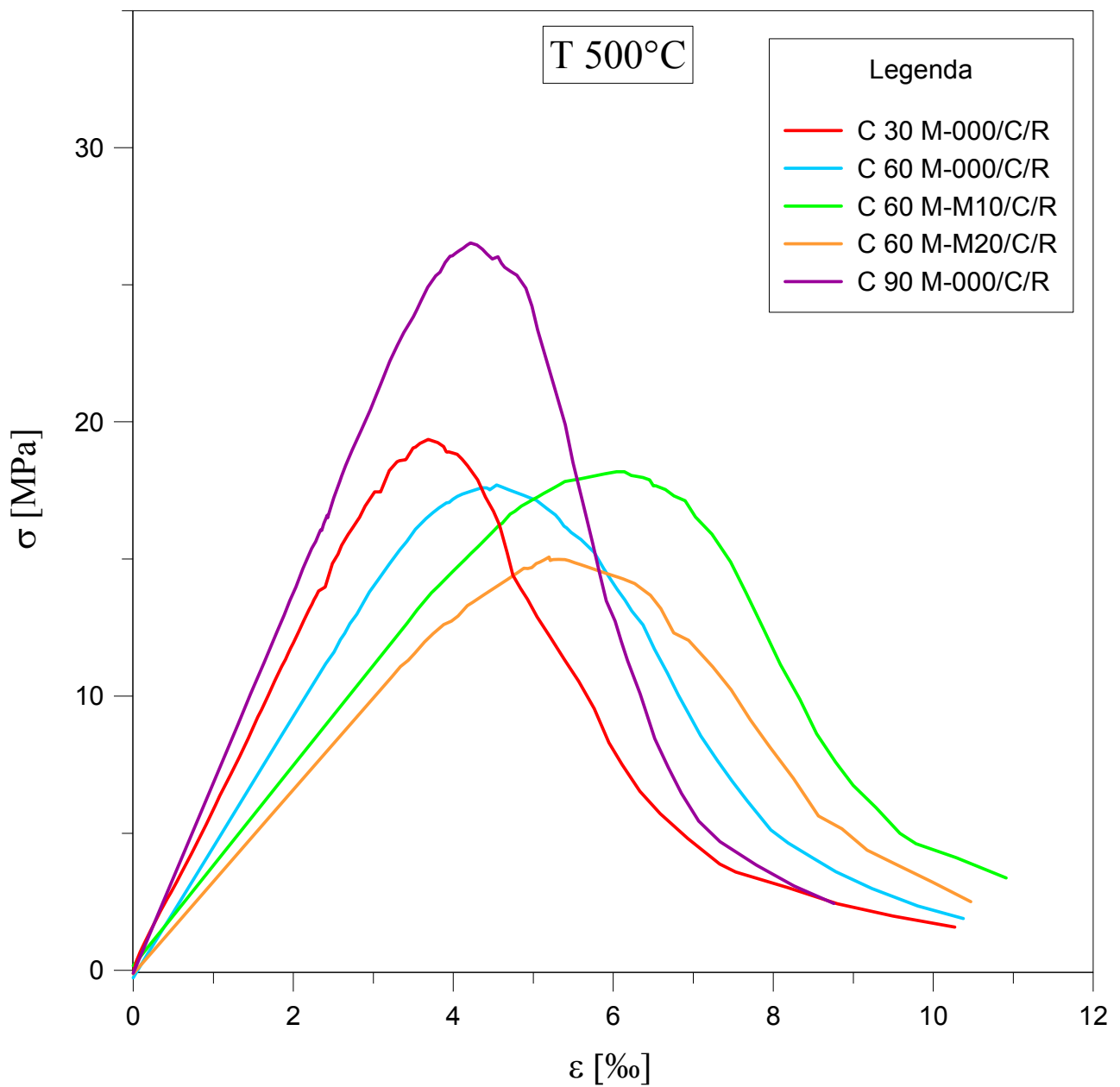


Grafico g 5.12 : Legami costitutivi (T 500°C, tutte le miscele).

Miscela	C 60 M 000	C 60 M M10	C 60 M M20	C 30 M 000	C 90 M 000
E_{50} [MPa]	3816	3348	3073	5937	5283
ϵ_c	0.00495	0.00628	0.00537	0.00369	0.00478
f_c [MPa]	17.7	18.2	15.1	19.4	26.5

Tabella t 5.11 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 500°C, tutte le miscele).

Temperatura di pre-riscaldamento: 750°C

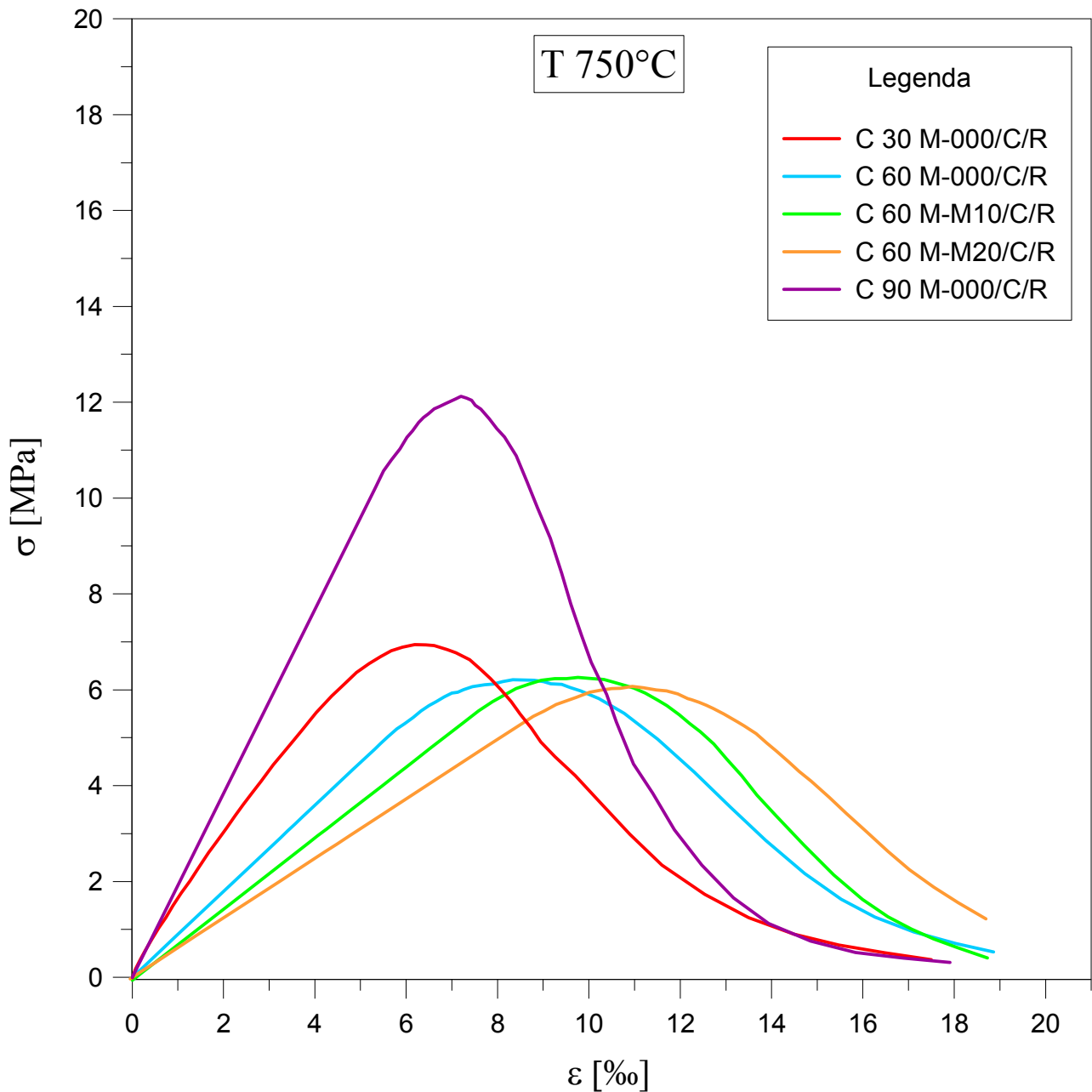


Grafico g 5.13 : Legami costitutivi (T 750°C, tutte le miscele).

Miscela	C 60 M 000	C 60 M M10	C 60 M M20	C 30 M 000	C 90 M 000
E_{50} [MPa]	751	629	640	1498	1294
ϵ_c	0.00907	0.01047	0.01058	0.00618	0.00896
f_c [MPa]	6.2	6.3	6.1	6.9	12.1

Tabella t 5.12 : Valori dei parametri meccanici caratteristici (T 750°C, tutte le miscele).

...(commenti)...

5.b.3) Estrapolazione dei parametri significativi

Dalle curve sforzo-deformazione valutate mediante le prove di compressione uni-assiale, si sono estrapolati i seguenti parametri; $f_c(T)$, $\varepsilon_c(T)$, $E_{50}(T)$. Essi sono necessari per caratterizzare il comportamento meccanico ad alte temperature delle cinque mescole cementizie in fase di studio. Conoscere il valore che questi parametri assumono in condizioni residuali, dopo che il materiale sia stato soggetto a riscaldamento, è importante per diversi motivi (paragrafo § 4.a).

E' dunque di nostro interesse studiare il modo in cui questi parametri variano al crescere della temperatura di pre-riscaldamento e al variare della composizione della malta.

Come apparirà evidente in seguito, e come è già stato ampiamente appurato nei precedenti lavori di ricerca, il valore dei tre parametri può variare in maniera significativa, con l'aumentare della temperatura.

Nel seguito si riportano i grafici che mostrano tali variazioni. I confronti tra le diverse mescole sono stati fatti in base al contenuto di fibre e alla resistenza caratteristica, poiché il materiale che costituisce gli aggregati e quello che costituisce le fibre sono comuni (paragrafo § 4.c.1).

5.b.3.1) Resistenza ultima a compressione, $f_c(T)$

Il primo parametro che si analizza è lo sforzo di picco, f_c .

Con i tre successivi grafici (grafici dal g 5.14 al 5.16) si illustrano le variazioni di questo parametro al variare della temperatura di pre-riscaldamento. I confronti sono sempre fatti rispetto alla resistenza caratteristica e al contenuto in fibre, separatamente.

Si ricorda ancora che gli aggregati sono di composizione silicio-calce per tutte e cinque le miscele, e che la tipologia di fibre è comune per le due mescole cementizie che ne sono dotate (paragrafo § 4.c.1).

Nei grafici sottostanti, lo sforzo di picco è normalizzato rispetto al valore misurato senza alcun pre-riscaldamento (f_{c20}).

Si ribadisce che per ciascuna miscela e per ciascuna temperatura di riferimento sono stati analizzati due provini. I valori riportati sono le medie dei risultati derivanti da ciascuna di tali coppie.

Nel primo grafico (grafico g 5.14) si riporta l'andamento dello sforzo di picco normalizzato, al variare della temperatura, per le tre miscele C 60 M 000, C 60 M M10 e C 60 M M20. Tutte e tre queste miscele hanno la stessa resistenza caratteristica (f_{ck} 60), mentre differiscono per il contenuto in fibre (0, 1 e 2 kg/mc rispettivamente).

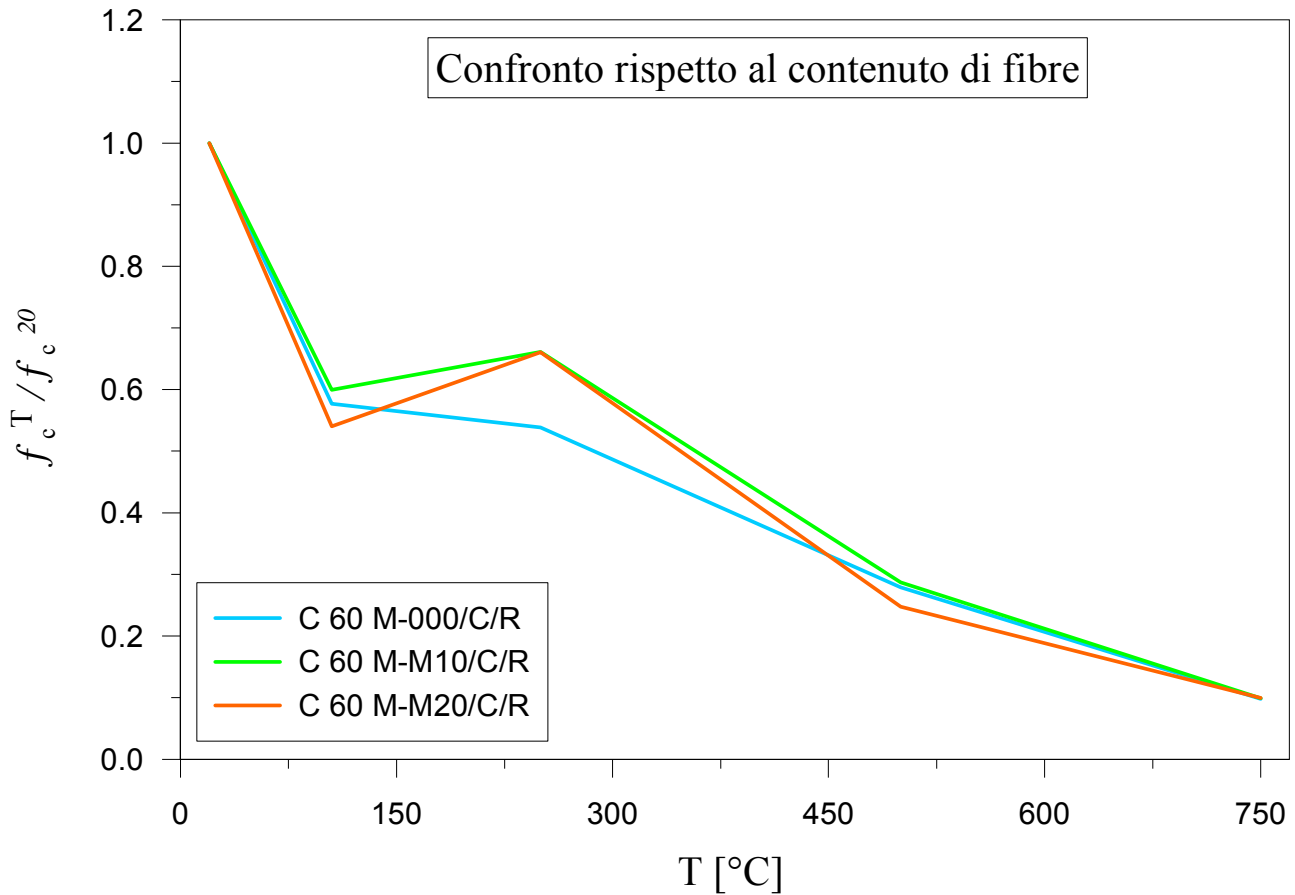


Grafico g 5.14 : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

T [°C] →	20	105	250	500	750
Miscela	f_{c20} [MPa]	f_{c105} / f_{c20}	f_{c250} / f_{c20}	f_{c500} / f_{c20}	f_{c750} / f_{c20}
C 60 M 000	63.4	0.577	0.539	0.279	0.098
C 60 M M10	44.4	1.000	0.599	0.661	0.287
C 60 M M20	60.9	0.540	0.661	0.247	0.100

Tabella t 5.13 : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

...(commenti)

Nel secondo grafico (grafico g 5.15) si riporta l'andamento dello sforzo di picco normalizzato, al variare della temperatura, per le tre miscele C 30 M 000, C 60 M 000 e C 90 M 000. Tutte e tre queste miscele sono prive di fibre, mentre differiscono rispetto alla resistenza caratteristica (f_{ck} 30, 60 e 90 MPa rispettivamente).

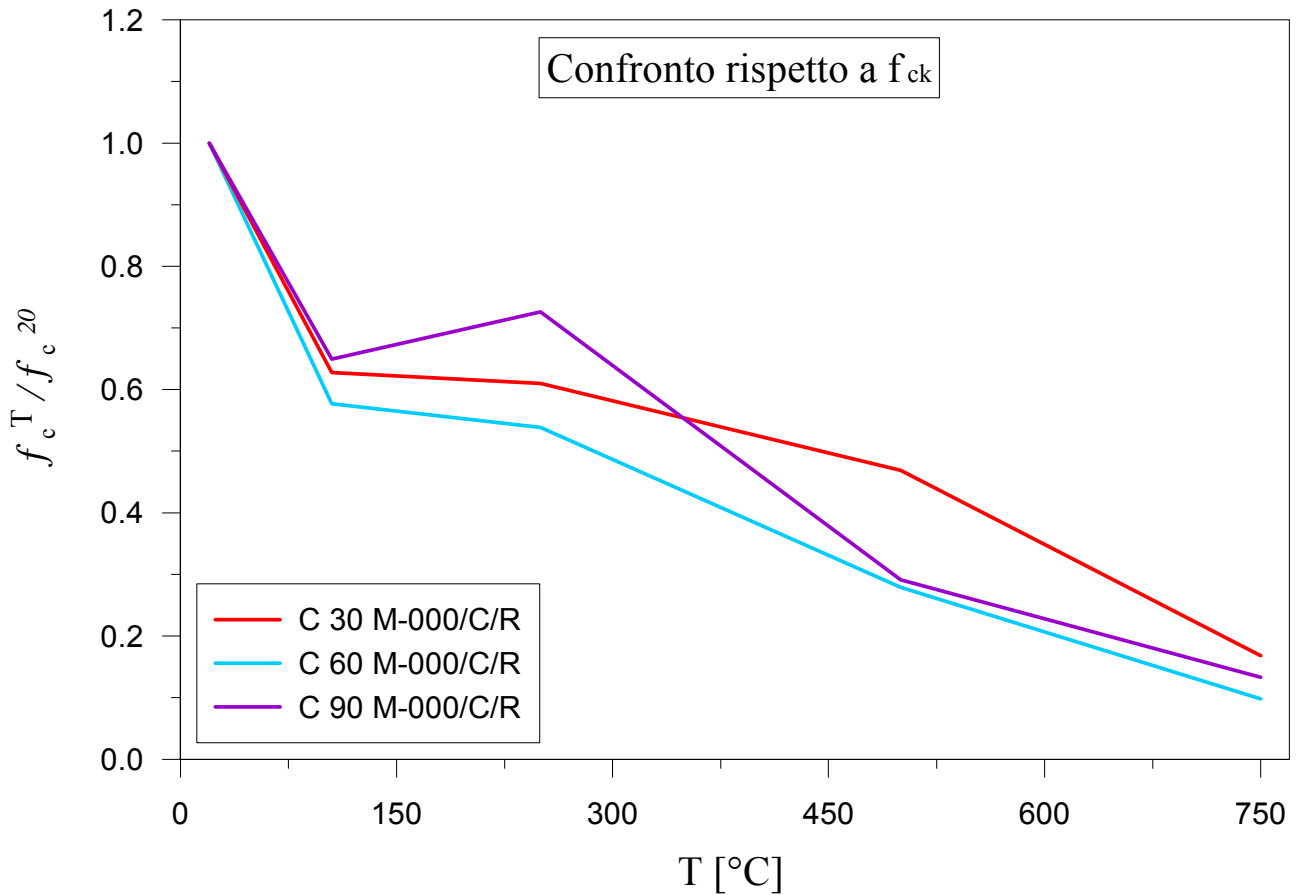


Grafico g 5.15 : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

T [°C] →	20	105	250	500	750
Miscela	f_{c20} [MPa]	f_{c105} / f_{c20}	f_{c250} / f_{c20}	f_{c500} / f_{c20}	f_{c750} / f_{c20}
C 30 M 000	41.3	0.628	0.610	0.469	0.168
C 60 M 000	63.4	0.577	0.539	0.279	0.098
C 90 M 000	91.1	0.650	0.726	0.291	0.133

Tabella t 5.14 : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

...(commenti)

Infine, si riportano su un unico grafico (grafico g 5.16) i risultati relativi a tutte e cinque le miscele studiate.

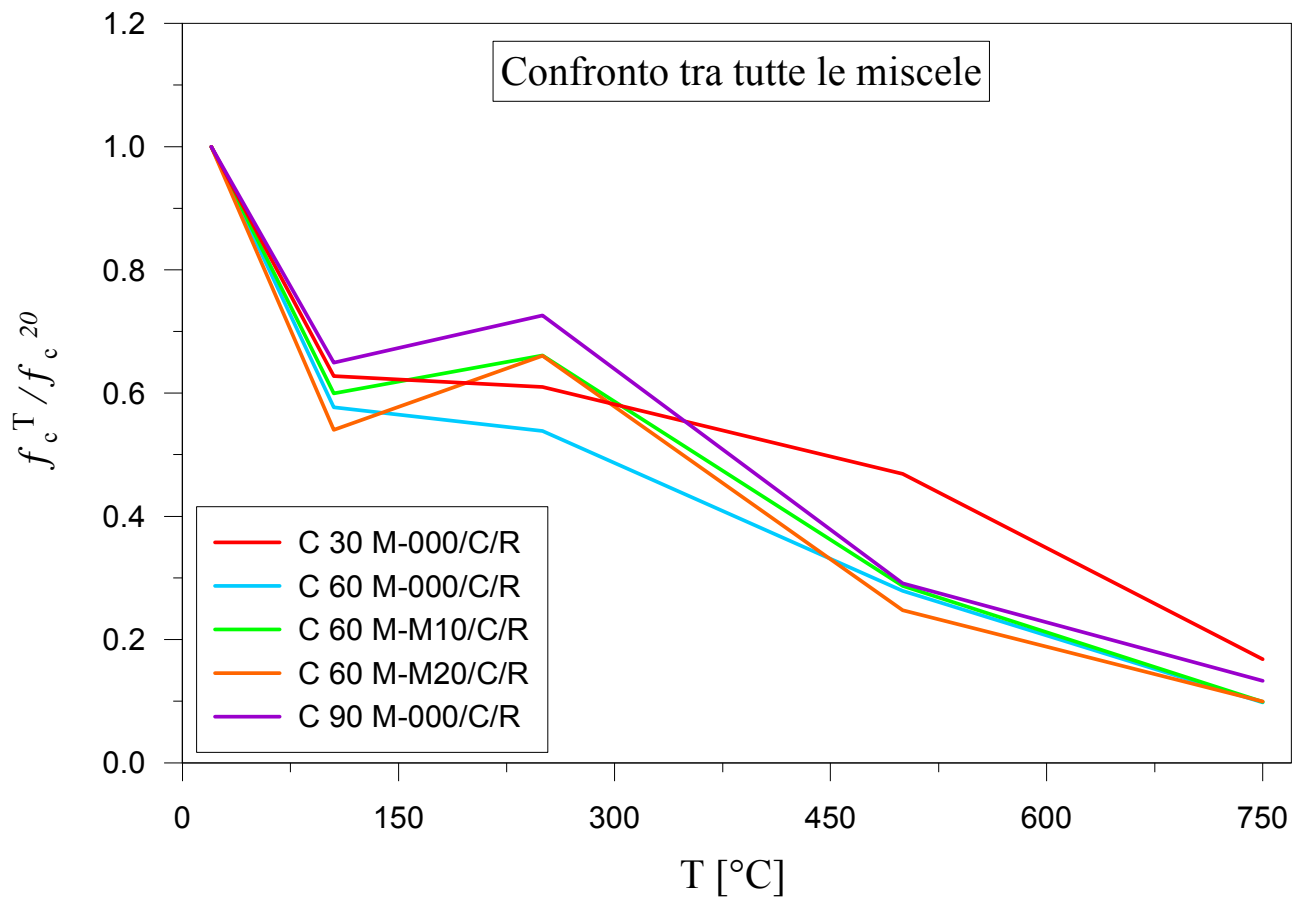


Grafico g 5.16 : Valori di f_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (Tutte le miscele).

...(commenti)...

5.b.3.2) Deformazione di picco, $\varepsilon_c(T)$

Il secondo parametro necessario per caratterizzare il comportamento ad alte temperature delle cinque miscele cementizie è la deformazione corrispondente allo sforzo di picco, ε_c .

Con i tre successivi grafici (grafici dal g 5.17 al 5.19) si illustrano le variazioni di questo parametro al variare della temperatura di pre-riscaldamento. I confronti sono sempre fatti rispetto alla resistenza caratteristica e al contenuto in fibre, separatamente.

Si ricorda ancora che gli aggregati sono di composizione silicio-calce per tutte e cinque le miscele, e che la tipologia di fibre è comune per le due mescole cementizie che ne sono dotate (paragrafo § 4.c.1).

Si ribadisce che per ciascuna miscela e per ciascuna temperatura di riferimento sono stati analizzati due provini. I valori riportati sono le medie dei risultati derivanti da ciascuna di tali coppie.

Nel primo grafico (grafico g 5.17) si riporta l'andamento della deformazione corrispondente allo sforzo di picco per le tre miscele C 60 M 000, C 60 M M10 e C 60 M M20. Tutte e tre queste miscele hanno la stessa resistenza caratteristica (f_{ck} 60), mentre differiscono per il contenuto in fibre (0, 1 e 2 kg/mc rispettivamente).

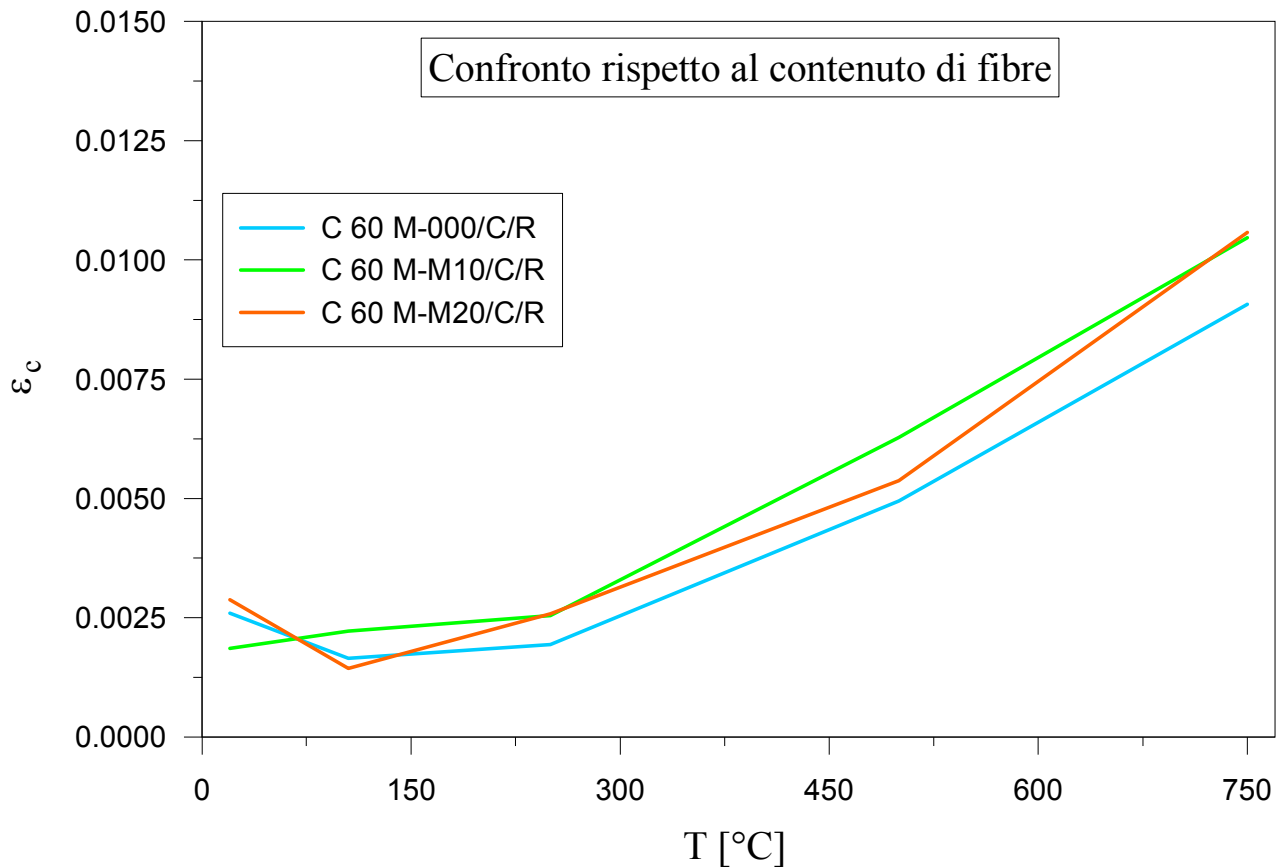


Grafico g 5.17 : Valori di ϵ_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

T [°C] →	20	105	250	500	750
Miscela	ε _{c20}	ε _{c105}	ε _{c250}	ε _{c500}	ε _{c750}
C 60 M 000	0.00259	0.00165	0.00194	0.00495	0.00907
C 60 M M10	0.00186	0.00222	0.00254	0.00628	0.01047
C 60 M M20	0.00288	0.00144	0.00259	0.00537	0.01058

Tabella t 5.15 : Valori di ϵ_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

...(commenti)...

Nel secondo grafico (grafico g 5.18) si riporta l'andamento della deformazione corrispondente allo sforzo di picco per le tre miscele C 30 M 000, C 60 M 000 e C 90 M 000. Tutte e tre queste mescole sono prive di fibre (f_{ck} 60), mentre differiscono per la resistenza caratteristica (f_{ck} 30, 60 e 90 MPa rispettivamente).

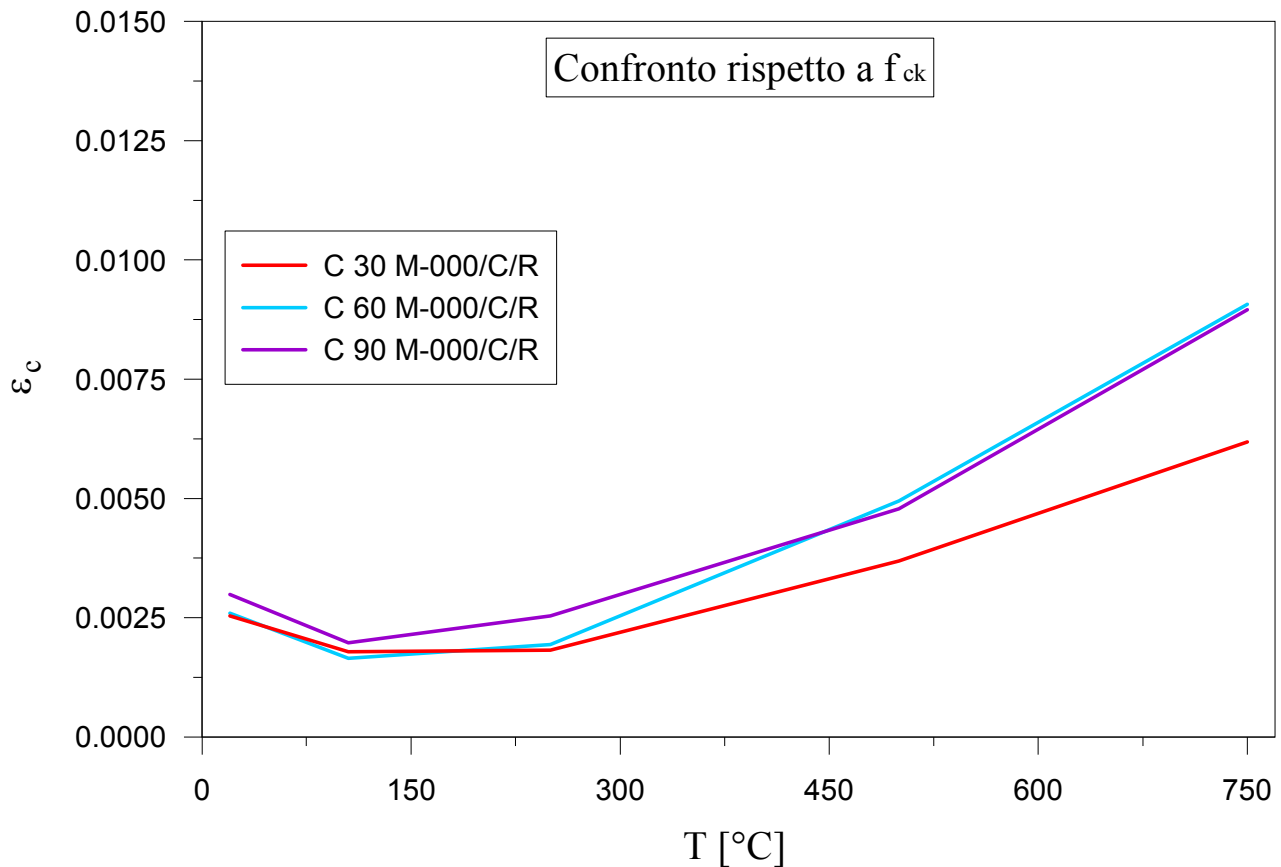


Grafico g 5.18 : Valori di ϵ_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

T [°C] →	20	105	250	500	750
Miscela	ϵ_{c20}	ϵ_{c105}	ϵ_{c250}	ϵ_{c500}	ϵ_{c750}
C 30 M 000	0.00254	0.00179	0.00182	0.00369	0.00618
C 60 M 000	0.00259	0.00165	0.00194	0.00495	0.00907
C 90 M 000	0.00299	0.00197	0.00254	0.00478	0.00896

Tabella t 5.16 : Valori di ϵ_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

...(commenti)...

Infine, si riportano su un unico grafico (grafico g 5.19) i risultati relativi a tutte e cinque le miscele studiate.

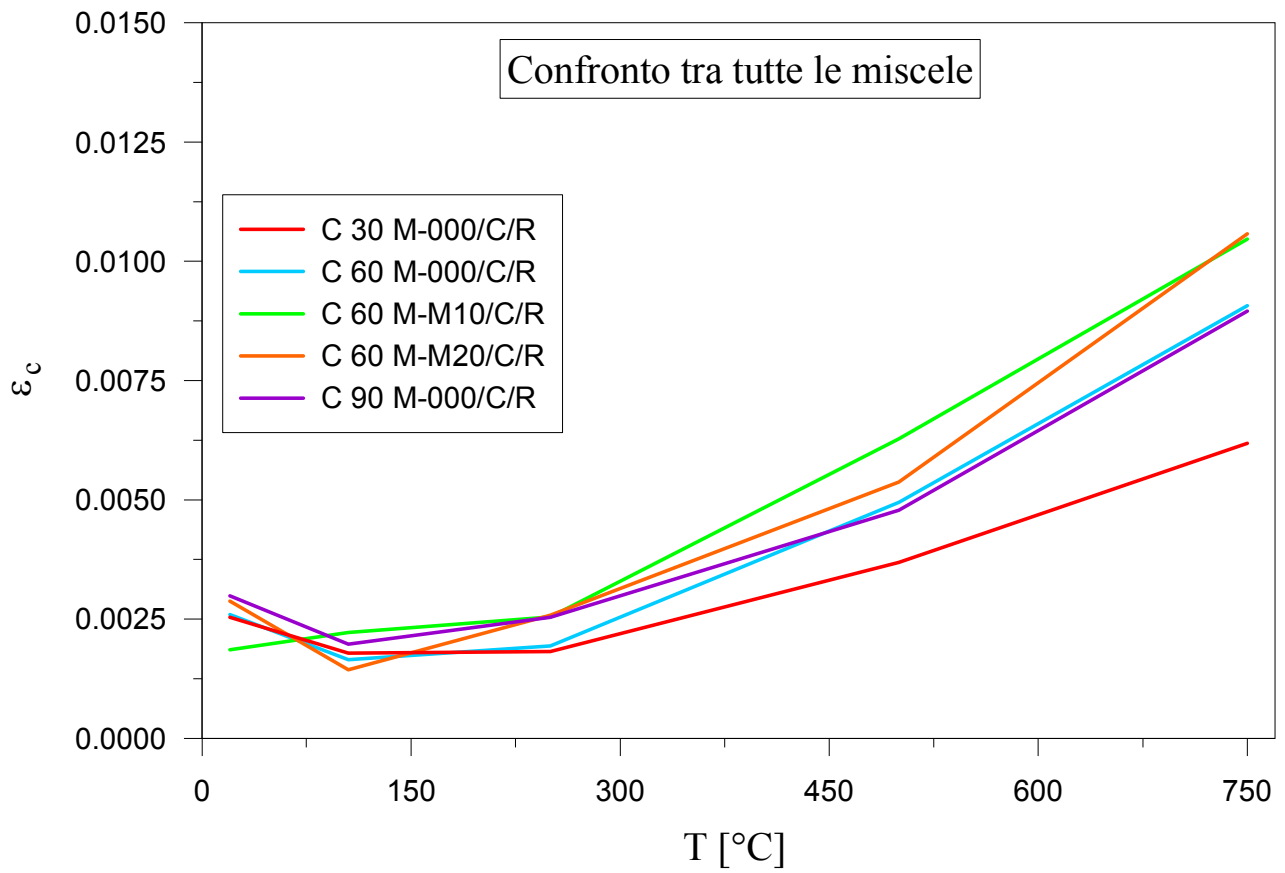


Grafico g 5.19 : Valori di ϵ_c al crescere della temperatura di preriscaldamento (Tutte le miscele).

...(commenti)...

5.b.3.3) Modulo elastico secante al 50% dello sforzo ultimo, $E_{50}(T)$

L'ultimo dei tre parametri di interesse è il modulo elastico secante al 50% dello sforzo di picco. Esso equivale alla pendenza della retta passante per l'origine e secante il grafico sforzo-deformazione, nel punto in cui lo sforzo è uguale alla metà dello sforzo di picco. Il grafico qualitativo riportato di seguito chiarisce meglio la definizione di questo parametro.

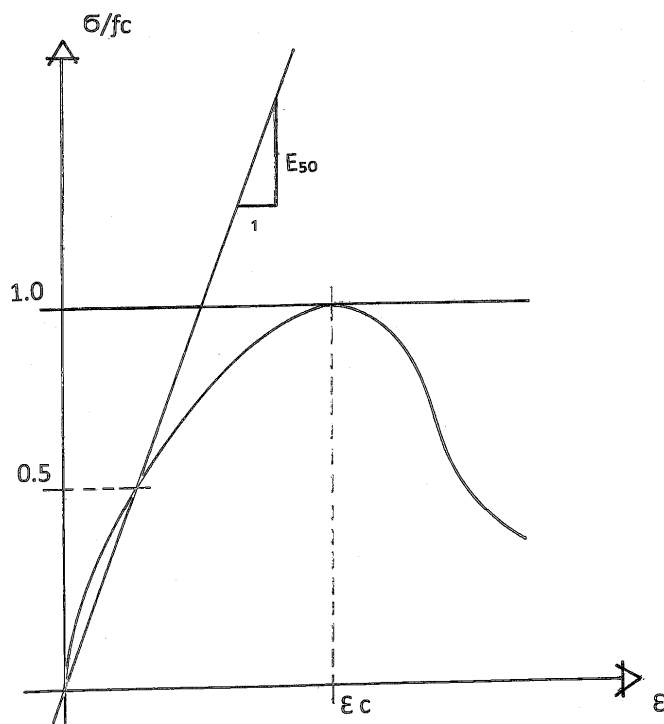


Grafico g 5.20 : Grafico esplicativo riguardo alla definizione di E_{50} .

Con i tre successivi grafici (grafici dal g 5.21 al 5.23) si illustrano le variazioni di questo parametro al variare della temperatura di pre-riscaldamento. I confronti sono sempre fatti rispetto alla resistenza caratteristica e al contenuto in fibre, separatamente.

Si ricorda ancora che gli aggregati sono di composizione silicio-calcareo per tutte e cinque le miscele, e che la tipologia di fibre è comune per le due mescole cementizie che ne sono dotate (paragrafo § 4.c.1).

Si ribadisce che per ciascuna miscela e per ciascuna temperatura di riferimento sono stati analizzati due provini. I valori riportati sono le medie dei risultati derivanti da ciascuna di tali coppie.

Nel primo grafico (grafico g 5.21) si riporta l'andamento del modulo elastico secante al 50% per le tre miscele C 60 M 000, C 60 M M10 e C 60 M M20. Tutte e tre queste miscele hanno la stessa resistenza caratteristica (f_{ck} 60), mentre differiscono per il contenuto in fibre (0, 1 e 2 kg/mc rispettivamente).

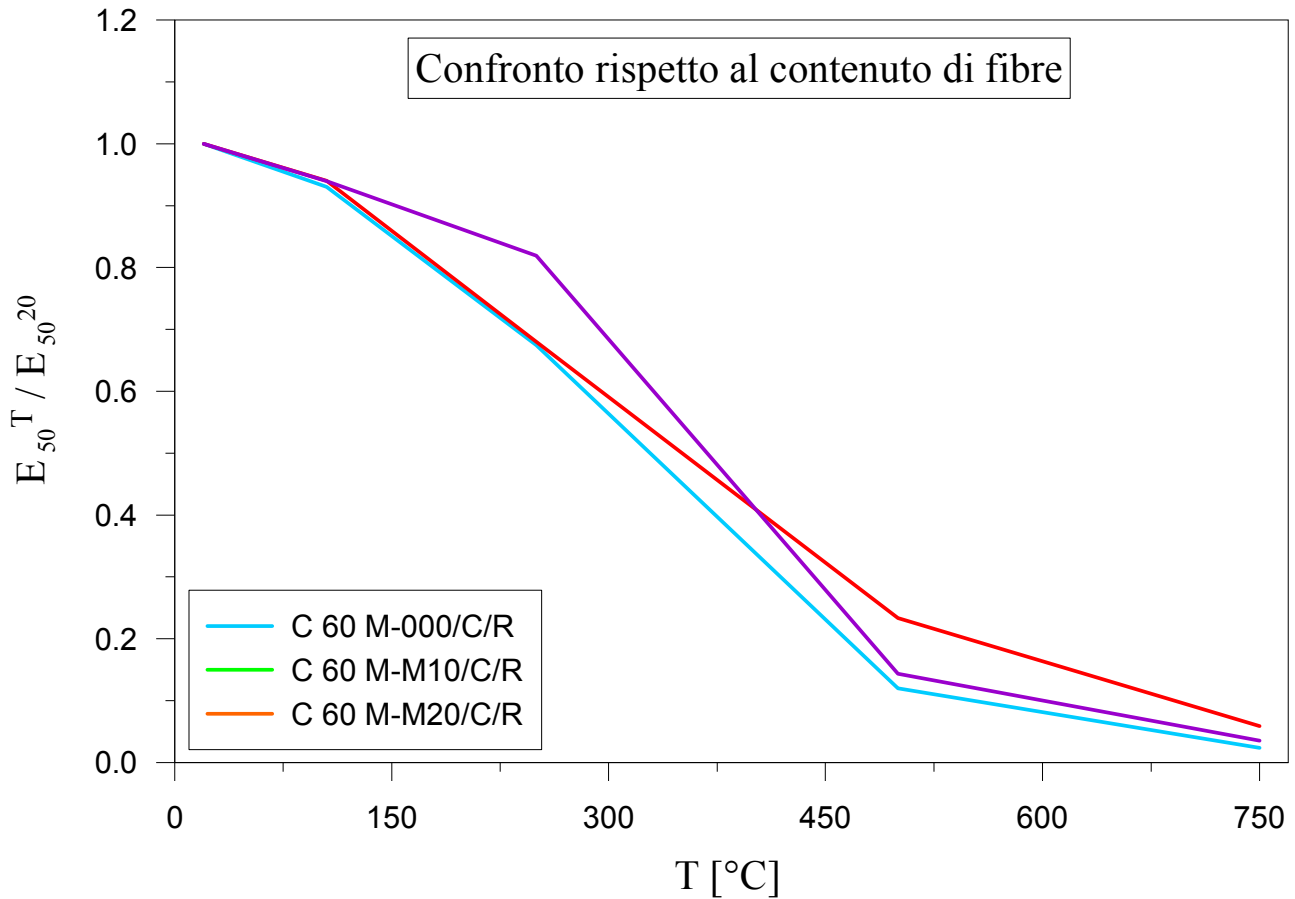


Grafico g 5.21 : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

T [°C] →	20	105	250	500	750
Miscela	E_{50} [MPa]	E_{105} / E_{20}	E_{250} / E_{20}	E_{500} / E_{20}	E_{750} / E_{20}
C 60 M 000	31810	0.930	0.675	0.120	0.024
C 60 M M10	28612	0.914	0.647	0.117	0.022
C 60 M M20	29813	0.928	0.592	0.103	0.021

Tabella t 5.17 : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

...(commenti)...

Nel secondo (grafico g 5.22) si riporta l'andamento del modulo elastico secante al 50% per le tre miscele C 30 M 000, C 60 M 000 e C 90 M 000. Tutte e tre queste miscele sono prive di fibre (f_{ck} 60), mentre differiscono per la resistenza caratteristica (f_{ck} 30, 60 e 90 MPa rispettivamente).

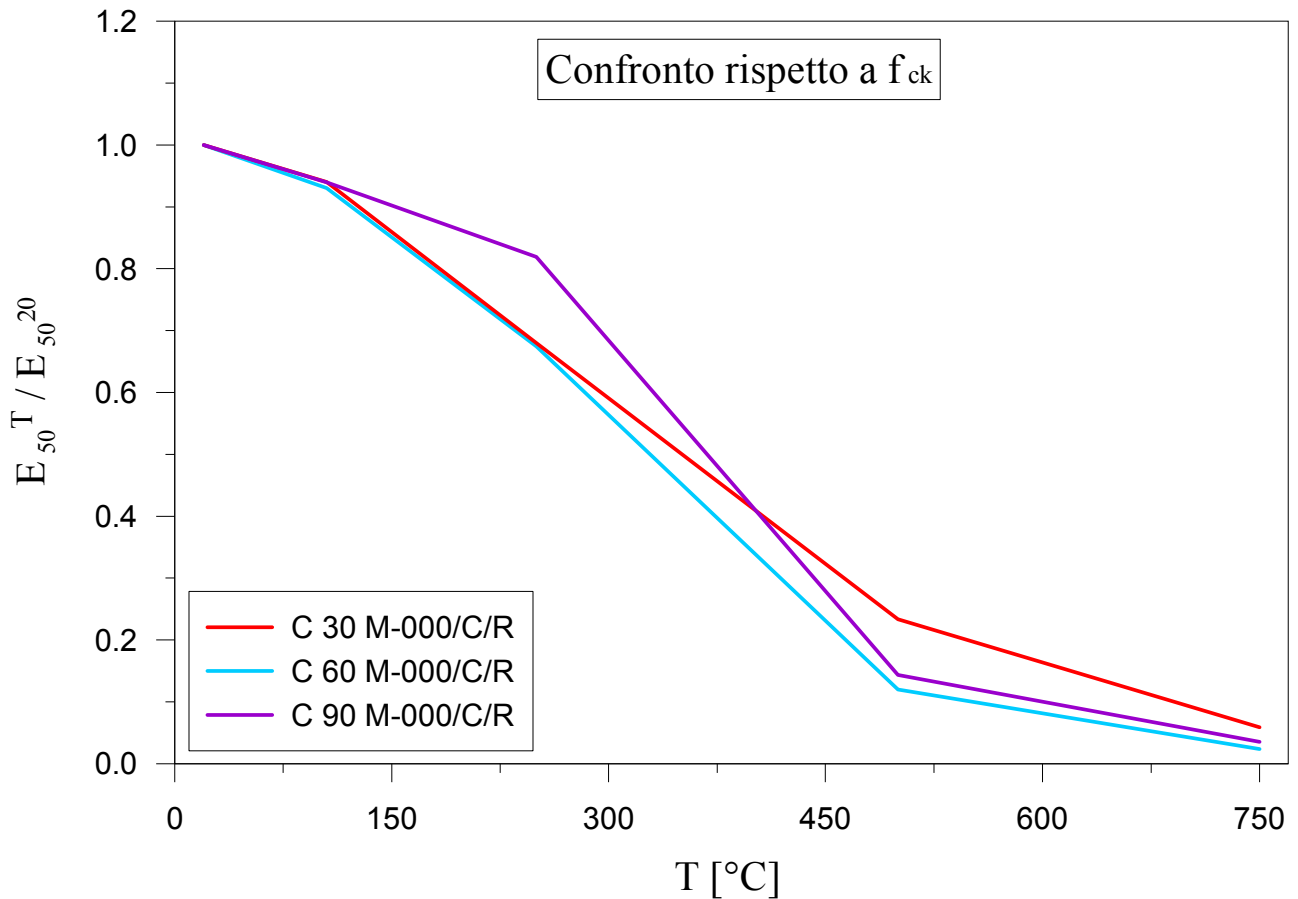


Grafico g 5.22 : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

T [°C] →	20	105	250	500	750
Miscela	E_{50} [MPa]	E_{105} / E_{20}	E_{250} / E_{20}	E_{500} / E_{20}	E_{750} / E_{20}
C 30 M 000	25388	0.940	0.680	0.234	0.059
C 60 M 000	31810	0.930	0.675	0.120	0.024
C 90 M 000	36879	0.940	0.819	0.143	0.035

Tabella t 5.18 : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

...(commenti)...

Infine, si riportano su un unico grafico (grafico g 5.23) i risultati relativi a tutte e cinque le miscele studiate.

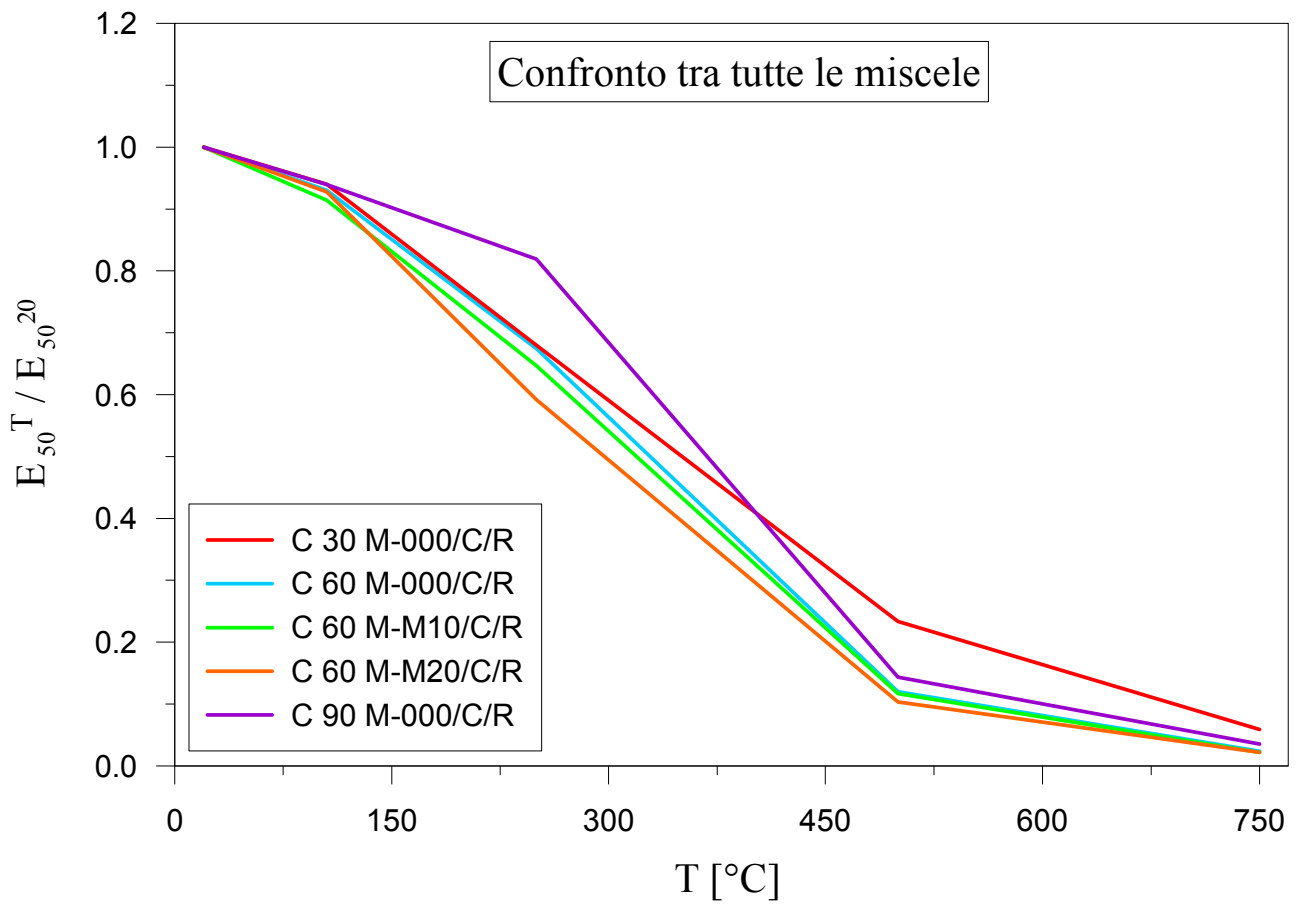


Grafico g 5.23 : Valori di E_{50} al crescere della temperatura di preriscaldamento (Tutte le miscele).

...(commenti)...

5.b.4) Breve spiegazione dei risultati ottenuti

I risultati precedentemente esposti evidenziano un netto decadimento delle proprietà meccaniche da parte di tutte le miscele cementizie studiate, all'aumentare della temperatura di pre-riscaldamento. Questo deterioramento è ben noto nell'ambiente scientifico che si occupa di calcestruzzi soggetti ad alte temperature ed è stato valutato per diverse tipologie di miscela cementizia, in numerosi precedenti lavori di ricerca.

E' possibile reperire una spiegazione fisico-chimica di tale decadimento all'interno del riferimento bibliografico [*Bazant Z.P. e Kaplan M.F. (1996)*].

Tra le cause di deterioramento possiamo distinguere quelle che riguardano la meso-struttura e quelle che interessano invece la micro-struttura del materiale.

Le cause di danneggiamento che riguardano la meso-struttura sono principalmente le seguenti.

Innanzitutto, l'aumento di temperatura causa un aumento di pressione del vapore intrappolato nei pori della malta cementizia. Quest'aumento di pressione interna danneggia il materiale, causandone il deterioramento meccanico. Questo fatto spiega anche perché le miscele con densità maggiore (come i calcestruzzi ad alta ed altissima resistenza) tendano a subire deterioramento più marcato, rispetto a quelle con minor densità (ad esempio i calcestruzzi ordinari). Nelle prime, infatti, i pori sono più piccoli e meno interconnessi, così che la pressione cresce di molto, prima che il vapore possa trovare una via di sfogo verso l'esterno.

La seconda causa di decadimento delle proprietà, che interessa la meso-struttura del materiale, ha a che fare con il diverso coefficiente di dilatazione termica che rispettivamente hanno la malta cementizia e gli aggregati in essa inglobati. Questa differenza di dilatazione termica causa incompatibilità cinematica e compromette l'adesione tra le due fasi della miscela.

Gli aggregati silicei e calcarei sono soggetti a dilatazione termica, rispettivamente fino alle temperature di 500 e 600°C. Gli aggregati contenenti quarzo, invece, sono ulteriormente soggetti ad una trasformazione chimica che fa passare la matrice cristallina dalla forma di α -quarzo alla forma di β -quarzo, e che si manifesta tra i 500 e i 650°C. Questa trasformazione è accompagnata da una significativa espansione volumetrica da parte dell'aggregato.

Da questo punto di vista, un calcestruzzo in cui la composizione granulometrica sia uniforme e ricca di materiale fine e ultrafine (come il calcestruzzo auto-compattante, vedere [*Bamonte P., Lo Monte F., Gambarova P.G. e Rossino C. (2013)*]) subisce un decadimento meno brusco, rispetto ad una miscela ricca di aggregati di grosso diametro e di diversa natura.

Ci sono poi cause di deterioramento legate a fenomeni che interessano la nano- e la micro-scala del materiale.

Questi fenomeni, che tra loro avvengono a temperature differenti, sono essenzialmente legati ai cambiamenti chimico-fisici dei prodotti d'idratazione, all'espulsione dell'acqua dalla pasta cementizie e alla stabilità chimico-fisica degli aggregati.

In dettaglio, riportando quanto descritto nel riferimento bibliografico [*Bazant Z.P. e Kaplan M.F. (1996)*], la miscela cementizia è interessata dai seguenti fenomeni.

- Da 105°C in poi, tutta l'acqua libera che si trova nei pori capillari e l'acqua assorbita nei pori del gel viene espulsa sotto forma di vapore.
- Dai 180 agli 850°C, avviene la disidratazione del gel CSH, con maggior gradiente di reazione intorno ai 200°C (la decomposizione del gel inizia intorno ai 700°C).
- Tra i 400 e i 600°C, avviene la dissociazione del composto Idrossido di Calcio, con gradiente di reazione massimo tra i 450 e i 500°C.

- Tra i 105 e i 600°C, si registra un continuo e marcato aumento della porosità, con i pori che aumentano tanto in numero, quanto in dimensione.
- Dai 105°C avviene l'espulsione dell'acqua contenuta dagli aggregati (l'intensità di questo fenomeno dipende dalla composizione chimica degli aggregati stessi).
- Tra i 600 e i 900°C, avviene la decarbonatazione degli aggregati calcarei, con massimo gradiente di reazione intorno ai 700°C (la presenza di silicio nel calcare anticipa la decarbonatazione a 560°C).
- Durante il raffreddamento, la calce libera (CaO) risultante dalla decarbonatazione si combina con l'umidità atmosferica e forma idrossido di calcio, con un notevole aumento di volume, che a sua volta causa fessurazione e rigonfiamento del calcestruzzo.

Tutti questi fenomeni che avvengono alla nano- e micro-scala del materiale concorrono nel deterioramento del materiale.

5.b.5) Confronto dei risultati con la letteratura scientifica

5.b.5.1) Confronto con EC4, ACI e con le ricerche degli autori Phan e Carino

In questo paragrafo, si mettono a confronto i risultati precedentemente esposti con alcune formule previsionali reperibili in letteratura.

I parametri su cui si effettuano i confronti sono la resistenza a compressione f_c e il modulo elastico secante al 50% dello sforzo ultimo, E_{50} .

La resistenza a compressione in condizioni residuali delle cinque mescole viene confrontata prima con la prescrizione offerta dalla norma "UNI EN 1994, Eurocodice 4, Parte 1-2, Allegato C", e successivamente con quella presente nella norma "ACI 216-1.07".

Ciascuna di queste normative fornisce a sua volta due curve distinte; una adatta per calcestruzzi con aggregati silicei, l'altra per calcestruzzi con aggregati calcarei.

Nei grafici che seguono sono messe a confronto le cinque miscele oggetto di studio con le prescrizioni dell'Eurocodice 4, per quanto riguarda il decadimento della resistenza a compressione con l'aumentare della temperatura.

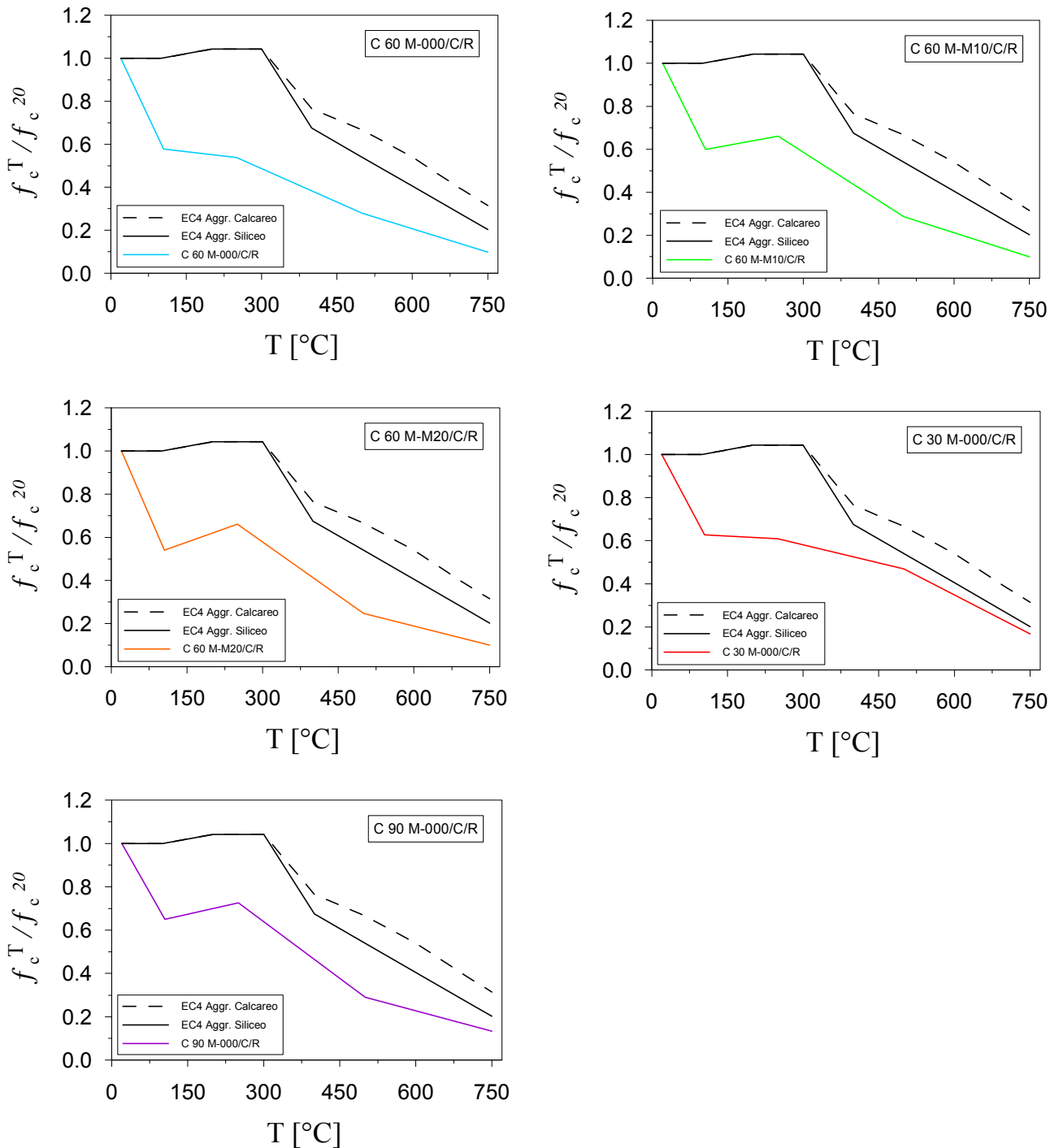


Grafico g 5.24 : Confronto con prescrizioni EC4 rispetto al parametro f_c .

...commenti...

Nei grafici che seguono sono messe a confronto le cinque miscele oggetto di studio con le prescrizioni della normativa americana ACI 216, per quanto riguarda il decadimento della resistenza a compressione con l'aumentare della temperatura.

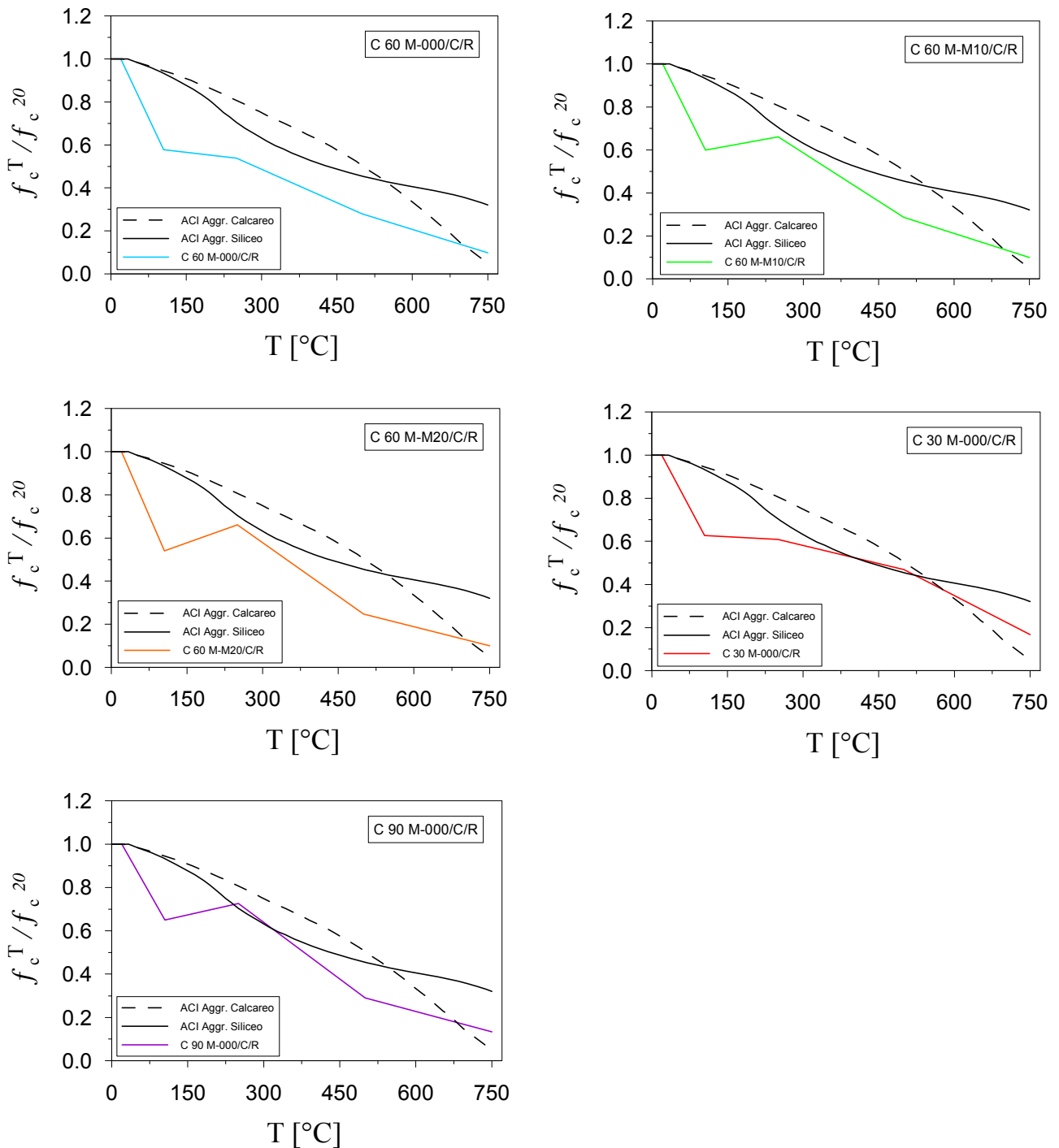


Grafico g 5.25 : Confronto con prescrizioni ACI rispetto al parametro f_c .

...commenti...

Infine, si confrontano i risultati ottenuti circa il decadimento del modulo elastico secante al 50% dello sforzo ultimo, con le ricerche pubblicate nell'anno 1998 dagli autori Phan L.T. e Carino N.J. sulla rivista ASCE - Journal of Materials in Civil Engineering [*Phan L.T. e Carino N.J. (1998)*]. I risultati di questa ricerca si sono nel tempo dimostrati di grande validità, e ricorrono come base di confronto in numerose successive pubblicazioni sul medesimo argomento.

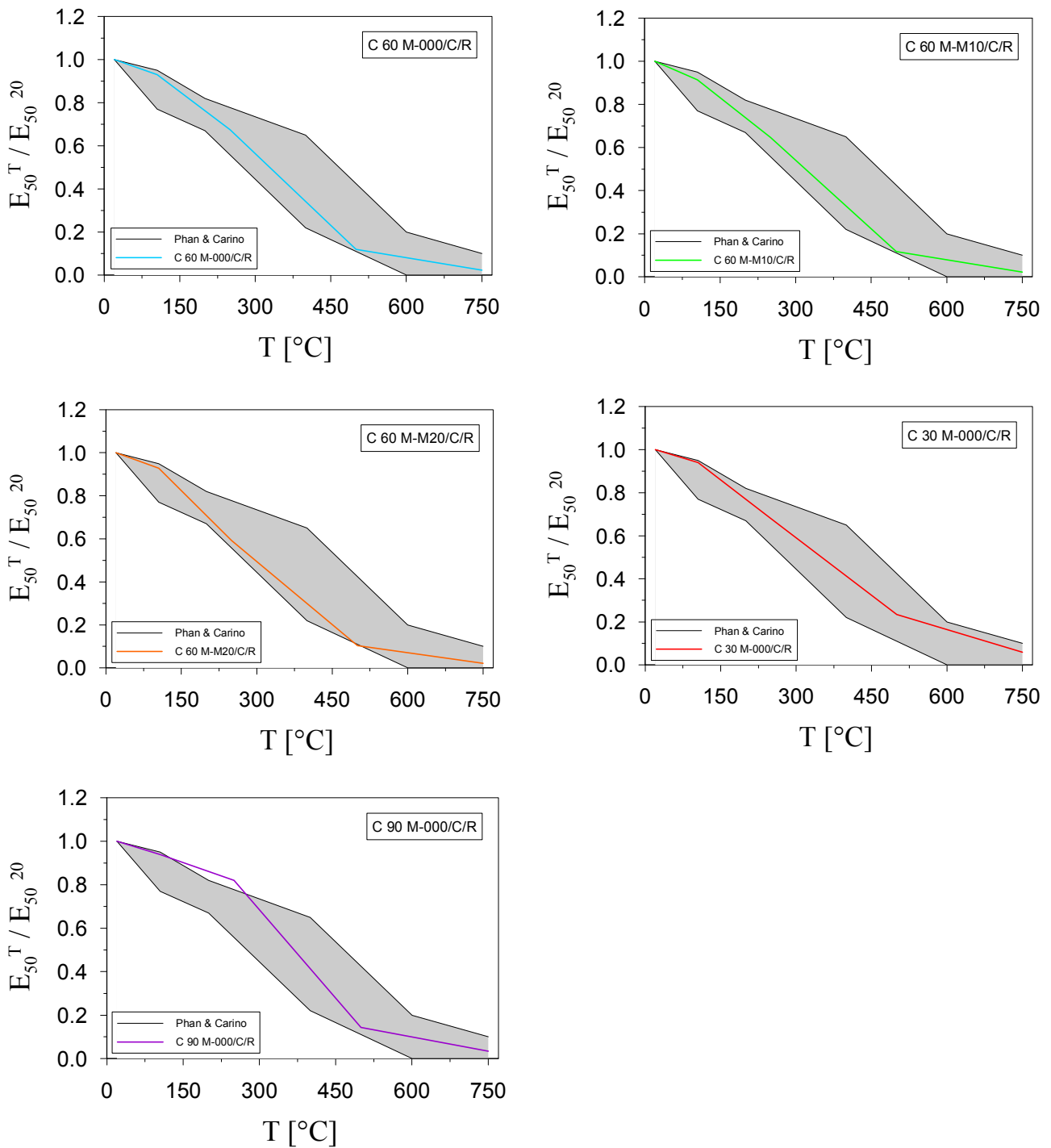


Grafico g 5.26 : Confronto con risultati ottenuti da Phan e Carino rispetto al parametro E_{50} .

...commenti...

5.b.5.2) Confronto con altri tipi di miscele

In questo paragrafo si mettono a confronto i risultati ottenuti nel presente lavoro con quelli di precedenti ricerche, sempre riguardanti la caratterizzazione ad alte temperature di particolari miscele cementizie.

In dettaglio, due tipologie di calcestruzzo sono considerate per il confronto. La prima tipologia consiste in calcestruzzo ad elevata densità, utilizzato come schermo per le radiazioni di raggi X [Bamonte P., Lo Monte F. e Gambarova P.G. (2013). “*Mechanical and Thermal Properties of a Heavy Radiation-Proof Concrete Exposed to High Temperature*”], mentre la seconda consiste in calcestruzzo alleggerito mediante l’aggiunta nella miscela di particelle di polistirene espanso [Bamonte P., Lo Monte F., Gambarova P.G. e Pecce M. (2013). “*High-Temperature Behavior of Reduced-Mass Concrete Containing Expanded Polystyrene Synthesized Particles (EPS)*”].

Entrambi i lavori di ricerca, da cui questi risultati sono tratti, sono stati condotti al Politecnico di Milano dalla squadra guidata dal professor P.G. Gambarova.

Di seguito, si descrivono brevemente le miscele utilizzate come confronto.

Il calcestruzzo ad alta densità è costituito da aggregati a base di solfato di bario, ha resistenza caratteristica pari a 30 MPa e densità nominale pari a 3100 – 3200 kg/mc.

Di questo calcestruzzo sono state create due mescole, differenti tra loro rispetto al trattamento di maturazione. La prima miscela, denominata MD, è stata mantenuta per tre anni dopo il getto in condizioni di normale umidità. La seconda miscela, denominata MM, è invece stata mantenuta per i tre anni successivi al getto in ambiente ad elevata umidità.

Il calcestruzzo alleggerito è caratterizzato dall’aggiunta di polistirene espanso nella miscela, ha resistenza a compressione dopo novanta giorni pari a 26.9÷28.4 MPa, e densità nominale che varia tra 1889 e 1951 kg/mc.

Anche di questa tipologia di calcestruzzo sono state create due mescole, differenti tra loro per il contenuto di cemento, per la composizione granulometrica e per la percentuale in volume di additivi.

La differenza più importante riguarda però il contenuto di cemento; mentre nella prima miscela, denominata M1, ne sono presenti 643 kg/mc, nella seconda, denominata M2, ve ne si trovano 815 (cemento CEM II a-LL R 42.5 – c).

L’elevata quantità di cemento, presente in entrambe le miscele M1 e M2 (si ricorda che le mescole analizzate nella presente relazione ne contengono 400 kg/mc), compensa le basse prestazioni meccaniche offerte dal polistirene espanso.

In tutti i confronti, sono inoltre presenti i risultati relativi ad una quinta miscela, denominata M0. Si tratta di un calcestruzzo ordinario, con resistenza a compressione pari a 25.8 MPa e densità nominale pari a 2279 kg/mc. Questa quinta miscela serve come riferimento, trattandosi appunto di calcestruzzo ordinariamente impiegato nelle opere civili.

Per la composizione dettagliata di queste cinque miscele, si rimanda agli articoli specifici consigliati.

Nella prima serie di grafici, si riporta il confronto tra le cinque miscele in fase di studio e le due miscele baritiche, MD ed MM, rispetto ai tre parametri meccanici caratteristici, f_c , ϵ_c ed E_{50} . I risultati relativi alla miscela di riferimento M0 sono sempre riportati.

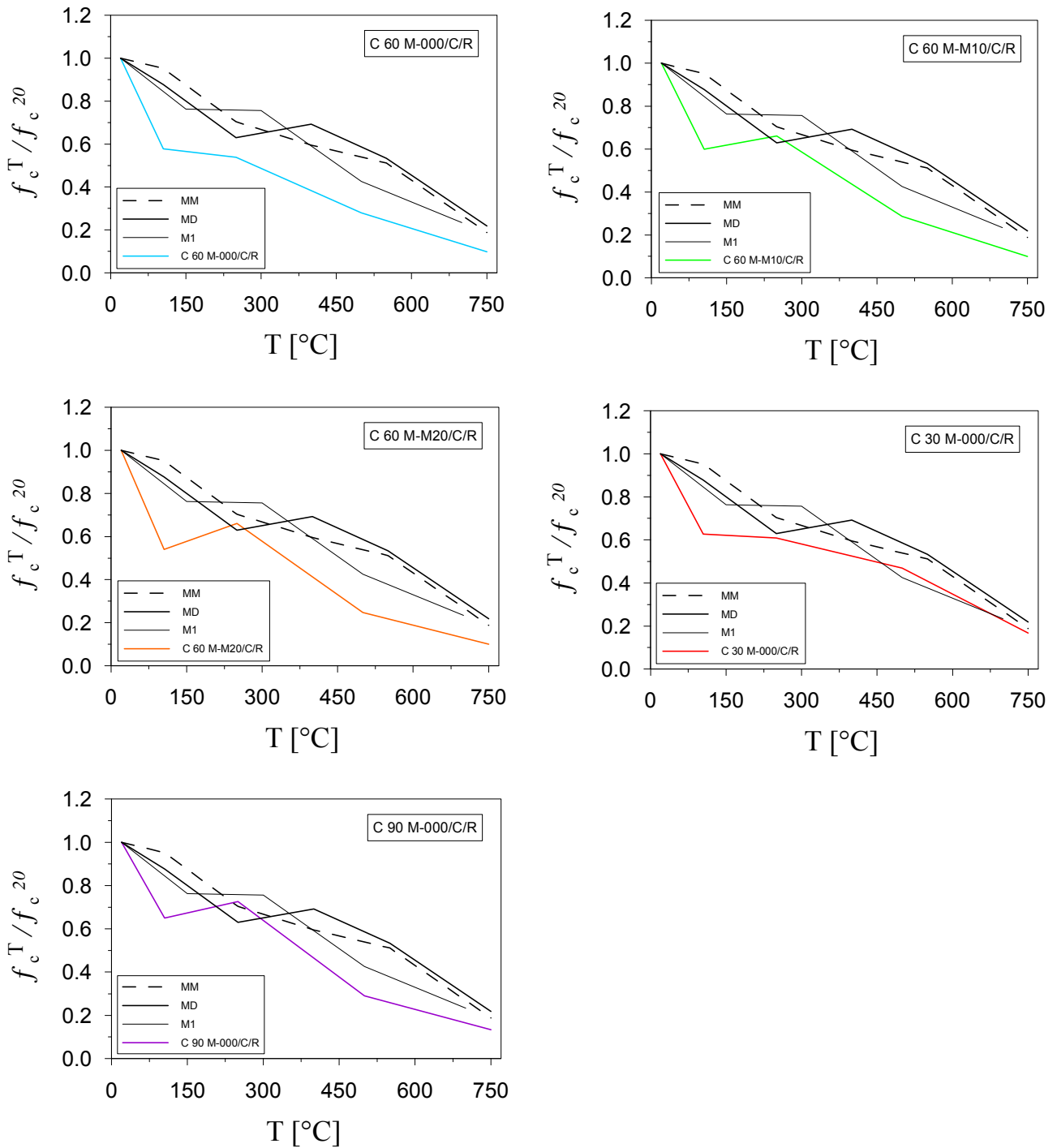


Grafico g 5.27 : Confronto con miscele contenenti barite rispetto al parametro f_c .

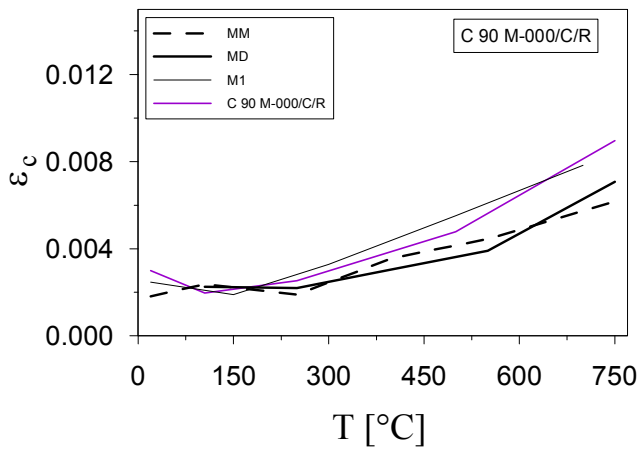
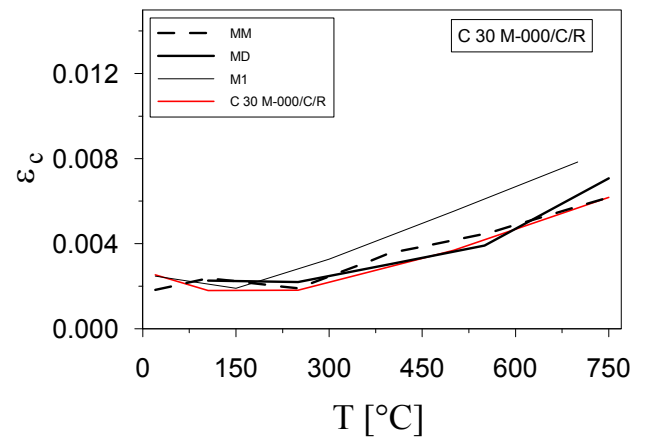
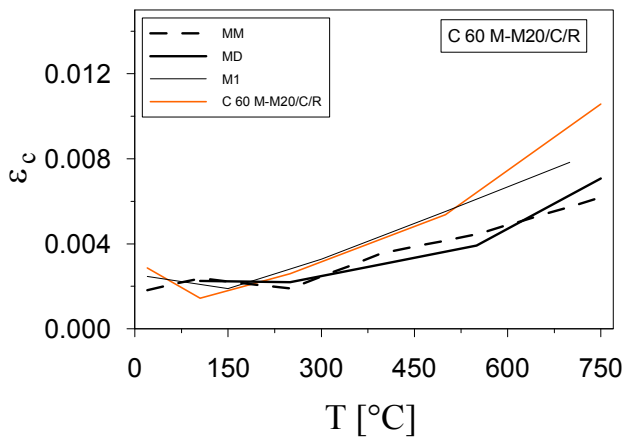
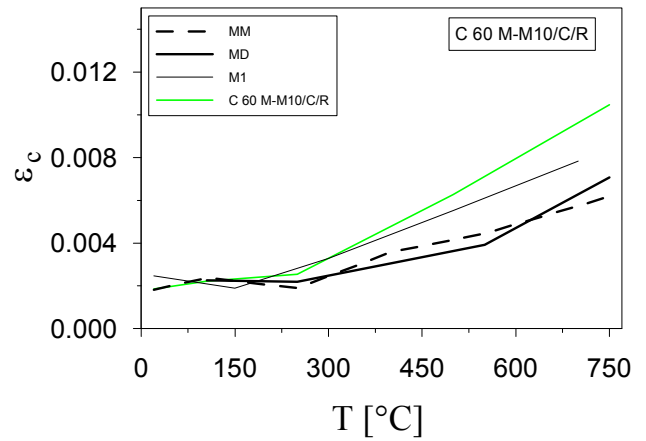
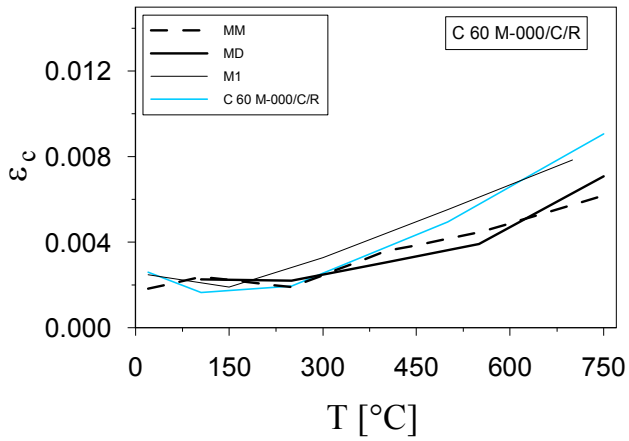


Grafico g 5.28 : Confronto con miscele contenenti barite rispetto al parametro ϵ_c .

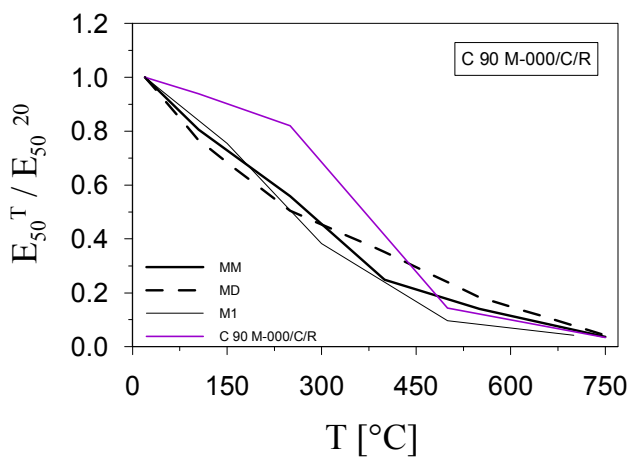
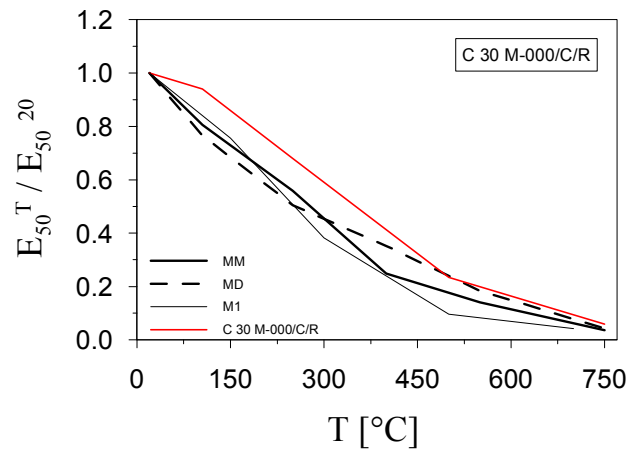
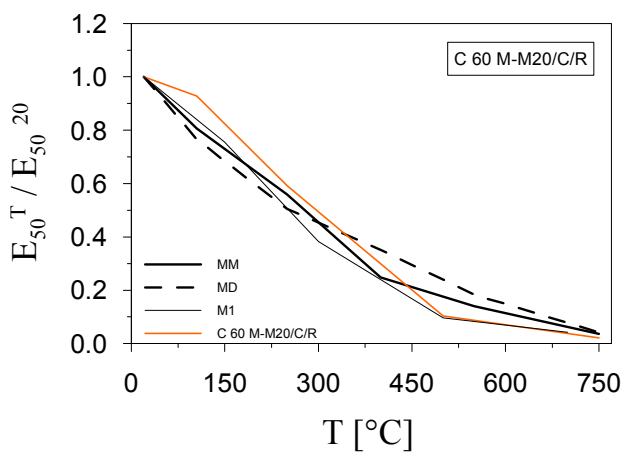
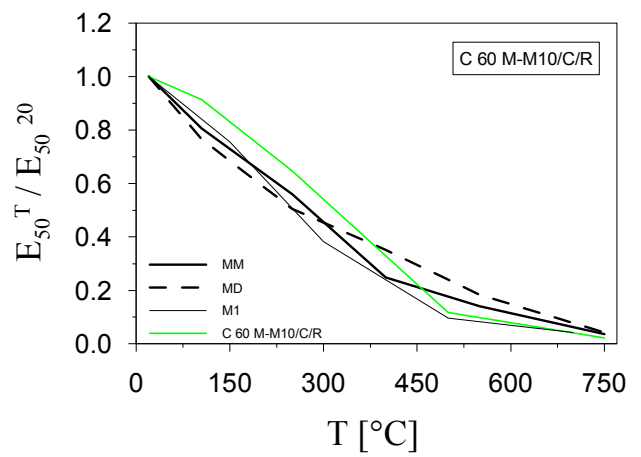
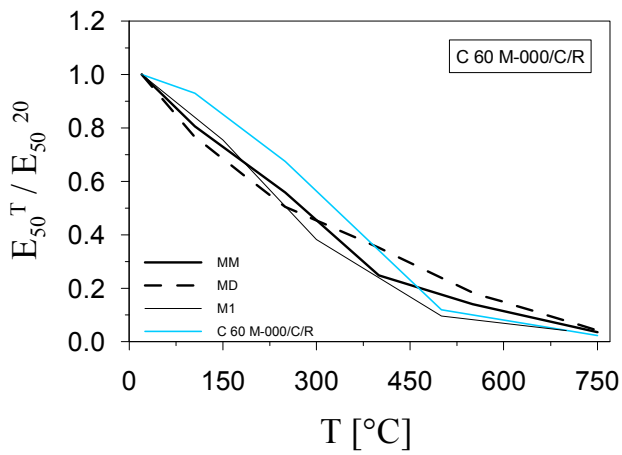


Grafico g 5.29 : Confronto con miscele contenenti barite rispetto al parametro E_{50} .

...commenti...

Nella seconda serie di grafici, si riporta il confronto tra le cinque miscele in fase di studio e le due miscele contenenti polistirene, M1 ed M2, rispetto ai tre parametri meccanici caratteristici, f_c , ϵ_c ed E_{50} .

I risultati relativi alla miscela di riferimento M0 sono sempre riportati.

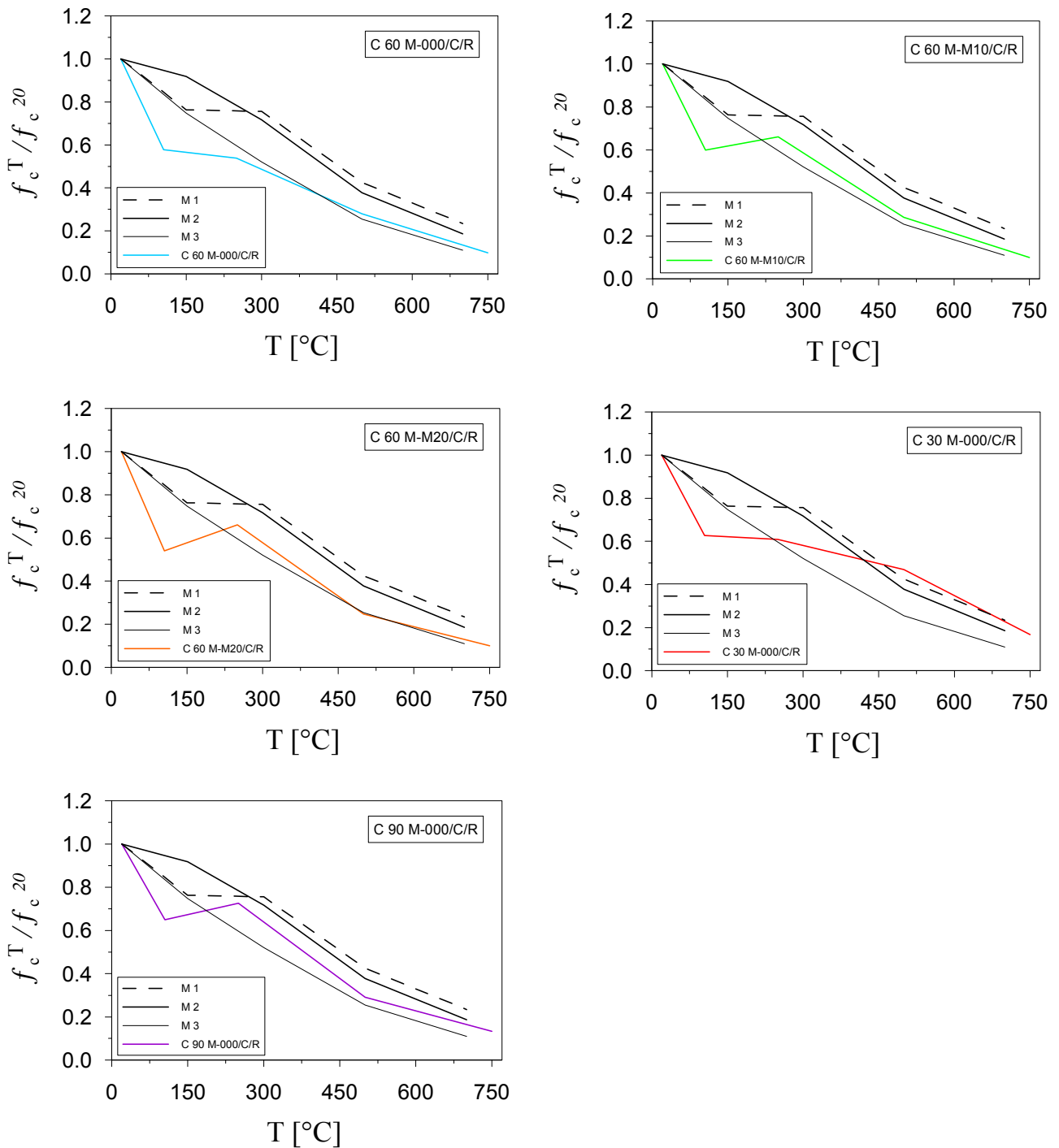


Grafico g 5.30 : Confronto con miscele contenenti polistirene espanso rispetto al parametro f_c .

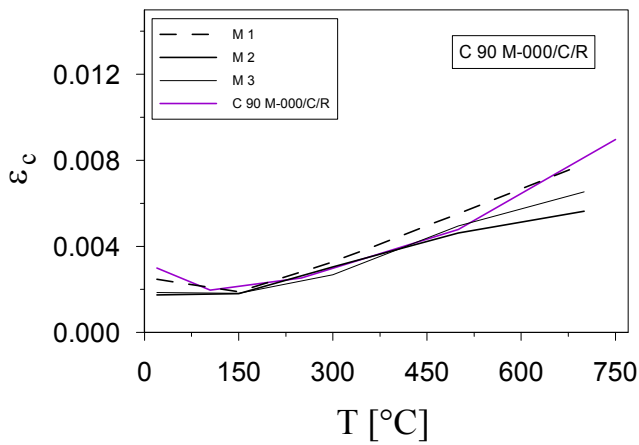
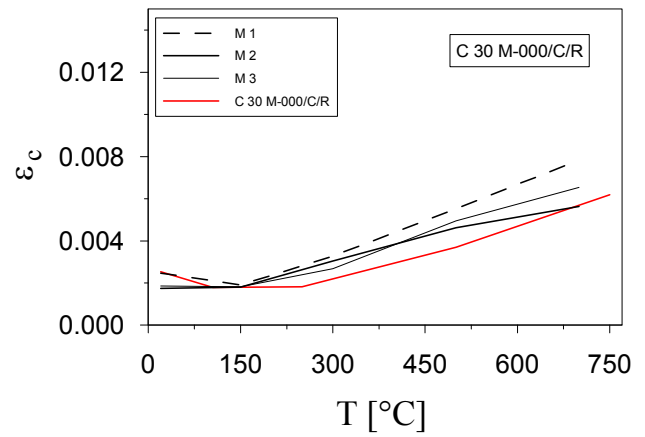
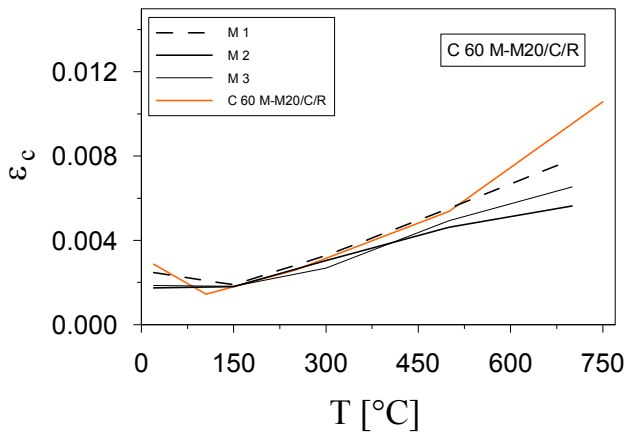
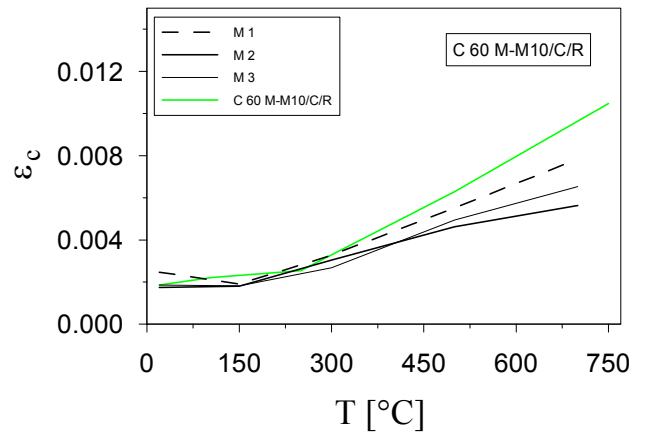
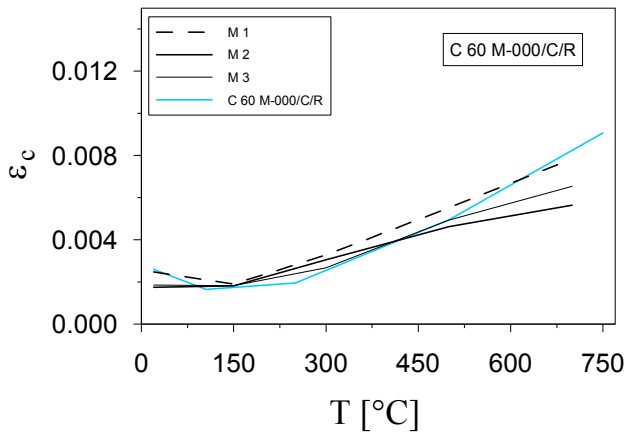


Grafico g 5.31 : Confronto con miscele contenenti polistirene espanso rispetto al parametro ϵ_c .

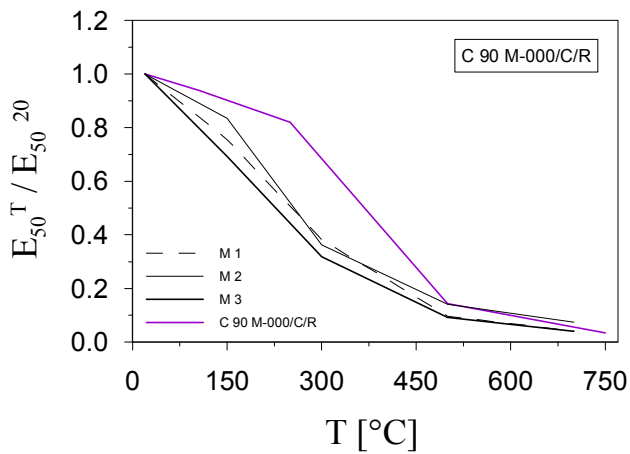
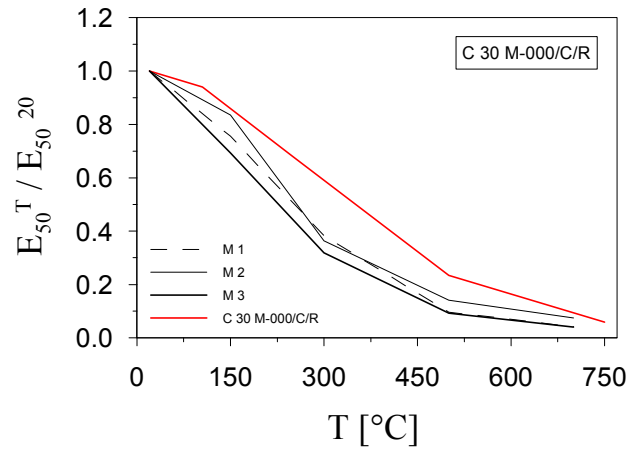
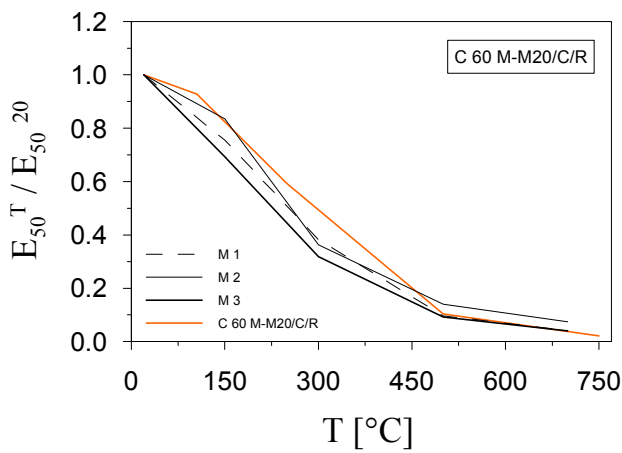
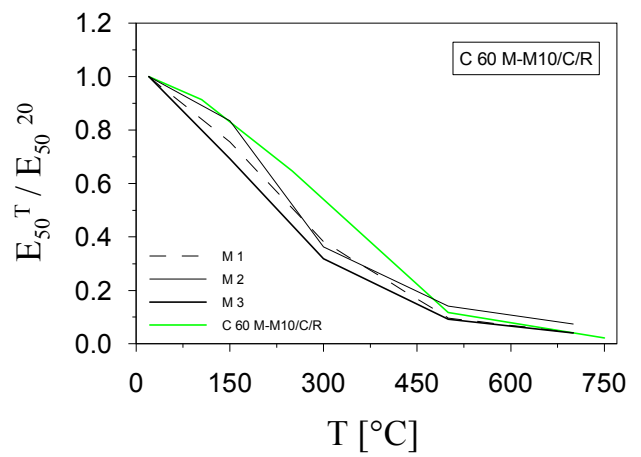
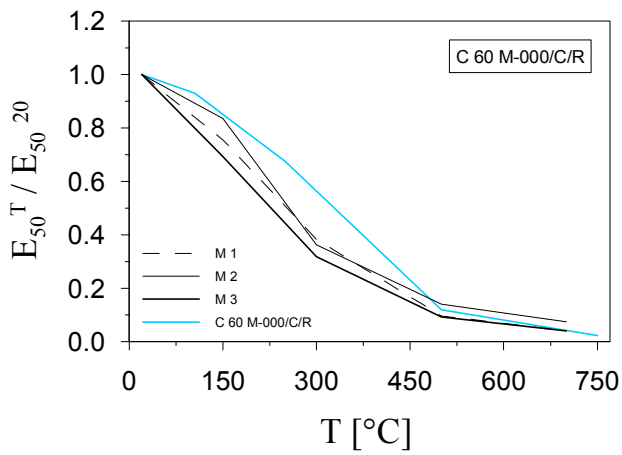


Grafico g 5.32 : Confronto con miscele contenenti polistirene espanso rispetto al parametro E_{50} .

...commenti...

5.c) Prove di Diffusività

Con le prove descritte nel seguito, si è valutata la diffusività termica D di ciascuna delle cinque mescole oggetto di studio.

Come meglio illustrato nel successivo paragrafo § 5.c.1, questo parametro è definito come il rapporto tra la conducibilità termica λ e il prodotto tra il calore specifico c_p e la densità ρ del materiale.

$$D = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$$

L'andamento della diffusività al crescere della temperatura risulta di particolare interesse quando si intenda svolgere una simulazione numerica di elementi strutturali esposti ad elevate temperature [Felicetti R., Gambarova P.G. e Bamonte P. (2012)].

Il calcestruzzo è caratterizzato da un basso valore di conducibilità termica λ (20÷100 volte minore di quella dell'acciaio) [Felicetti R. (2008)]. Questo fatto ha risvolto positivo, in quanto protegge gli strati interni dell'elemento strutturale dal danneggiamento termico, e ritarda il riscaldamento delle barre d'armatura. D'altra parte, però, un valore di diffusività troppo piccolo determina l'instaurarsi di gradienti termici molto elevati negli strati più superficiali dell'elemento. Questo fatto, a sua volta, può causare lo spacco esplosivo degli strati di copriferro, determinando la diretta esposizione dell'acciaio d'armatura alla fonte di calore [Bamonte P., Gambarova P.G., Cangiano S., Busnelli F., Billi R. e Quaglia M. (2006)].

5.c.1) Riferimento teorico

Per la valutazione sperimentale della diffusività D del calcestruzzo, si parte dall'impostazione matematica del problema del cilindro di lunghezza infinita e raggio R senza sorgenti di calore al suo interno.

Poiché il problema è assial-simmetrico e il cilindro si suppone di lunghezza infinita, è sufficiente considerare l'andamento spaziale della temperatura lungo il raggio del cilindro.

L'equazione differenziale che governa il problema, in cui le variabili indipendenti sono il raggio r ed il tempo t , mentre la variabile dipendente è la temperatura T , è riportata di seguito [Felicetti R. (2008)].

$$r \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = D \cdot \left(r^2 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

Si prendono poi in considerazione due punti, posti lungo il raggio; il primo (a temperatura $T_1(t)$) si trova esattamente nel centro, mentre il secondo (a temperatura $T_2(t)$) è posizionato ad una distanza $a < R$ dal primo.

Se si considera che la superficie esterna del cilindro sia uniformemente riscaldata con gradiente di riscaldamento costante v_h , e si trascura lo stato di transitorio riguardante i primi trenta minuti circa del processo, la soluzione dell'equazione assume la seguente espressione [Felicetti R. (2008)].

$$T_2(t) - T_1(t) = \frac{v_h \cdot a^2}{4 \cdot D(t)}$$

Conoscendo i valori delle temperature $T_1(t)$ e $T_2(t)$, e la velocità di riscaldamento della superficie esterna del cilindro v_h , è dunque possibile valutare l'andamento del parametro diffusività e porlo in relazione con la temperatura di riscaldamento del materiale.

Nella pratica dell'esperimento, si sono utilizzati cilindri di dimensioni 10x30 cm ($L/\Phi=3$), al fine di ricreare la condizione ideale di cilindro indefinitamente lungo.

Inoltre, la temperatura nei due punti considerati è stata monitorata con due termocoppie inglobate nel calcestruzzo.

Infine, si precisa che la velocità di riscaldamento della superficie esterna del cilindro non coincide con la temperatura imposta al forno dall'operatore. Si è dunque stabilito [Felicetti R. (2008)] di adottare per questo valore la seguente espressione.

$$v_h = 0.25 \cdot \dot{T}_2 + 0.75 \cdot \dot{T}_1$$

Adoperando questa scelta, si è in grado di cogliere le brusche variazioni di diffusività causate dalle trasformazioni chimico-fisiche che, come sarà mostrato nel seguito, avvengono nel materiale a determinate temperature.

5.c.2) Descrizione dell'esperimento

Per l'esecuzione dell'esperimento in questione, si è fatto riferimento a precedenti lavori di ricerca ([Felicetti R. (2008)], [Bamonte P., Lo Monte F. e Gambarova P.G. (2013)], [Felicetti R., Gambarova P.G e Bamonte P. (2012)]).

Come già anticipato nel paragrafo precedente, si sono utilizzati provini cilindrici di dimensioni 10x30 cm, in modo che il rapporto L/Φ fosse sufficientemente elevato da riprodurre la situazione ideale di cilindro infinitamente lungo.

Il generico provino è stato provvisto di due termocoppie in esso inglobate al momento del getto, i cui punti di misura corrispondono ai punti 1 e 2 introdotti nel precedente paragrafo § 5.c.

In dettaglio, il punto 2 si trova ad una distanza di 45 mm dal punto 1, il quale giace nel centro del provino cilindrico.

La fotografia del provino generico è riportata nel paragrafo § 4.c.3.

Per ciascuna delle cinque miscele, la prova è stata condotta su un solo provino.

Il provino è stato quindi inserito nel forno, protetto da un cilindro esterno di metallo, affinché l'irraggiamento di calore sulla sua superficie esterna fosse il più uniforme possibile.

Sempre con lo stesso scopo, si sono utilizzati dei piccoli supporti ceramici che sorreggessero il provino e ne evitassero il contatto diretto con il cilindro metallico.

Tutta la strumentazione appena descritta è stata immortalata nella fotografia riportata di seguito.



Immagine i 5.6 : Fotografia della strumentazione per le prove di diffusività.

5.c.3) Risultati e commenti

I risultati ottenuti dalle prove di misura della diffusività, eseguite secondo la modalità descritta nei precedenti paragrafi, sono illustrati nei seguenti grafici.

In ciascun grafico è riportato l'andamento della diffusività D in funzione della temperatura T_m , che è la media tra le temperature T_1 e T_2 .

I primi cinque grafici riportano l'andamento della diffusività per ciascuna delle cinque miscele analizzate. Su ciascuno di essi è riportato anche l'andamento della diffusività D , calcolato secondo le formule fornite dalla norma UNI EN 1992 Eurocodice 2, parte 1-2, paragrafo § 3.3. L'Eurocodice 2 fornisce due espressioni limite per il calcolo della diffusività in funzione della temperatura. Le curve derivanti da entrambe queste espressioni sono riportate nei grafici, al fine di stabilire un confronto tra i risultati ottenuti e le prescrizioni normative.

Nei grafici successivi, invece, il confronto viene posto tra le diverse tipologie di mescole. Come nell'esposizione dei risultati derivanti dalle prove di compressione, i confronti tra mescole diverse sono stati fatti in base al contenuto di fibre e in base alla resistenza caratteristica a compressione. Nell'ultimo grafico di questo paragrafo, infine, si trovano contemporaneamente i risultati relativi a tutte e cinque le miscele oggetto di studio.

Nel grafico seguente è riportato l'andamento della diffusività in funzione della temperatura T_m , misurata sul provino C 60 M M000/D.

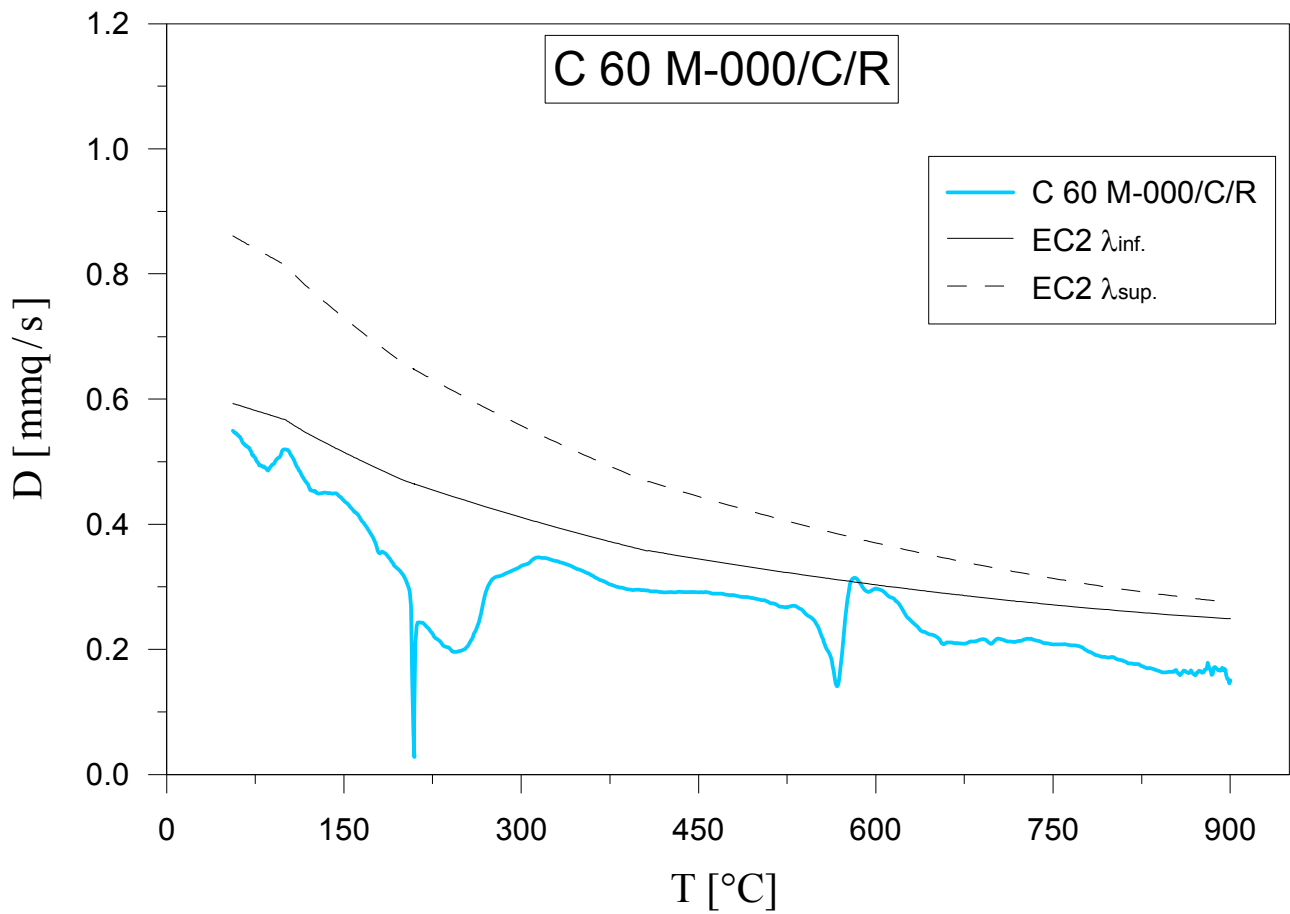


Grafico g 5.33 : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 60 M 000 e confronto con prescrizioni EC2.

...commenti...

Nel grafico seguente è riportato l'andamento della diffusività in funzione della temperatura T_m , misurata sul provino C 60 M M10/D.

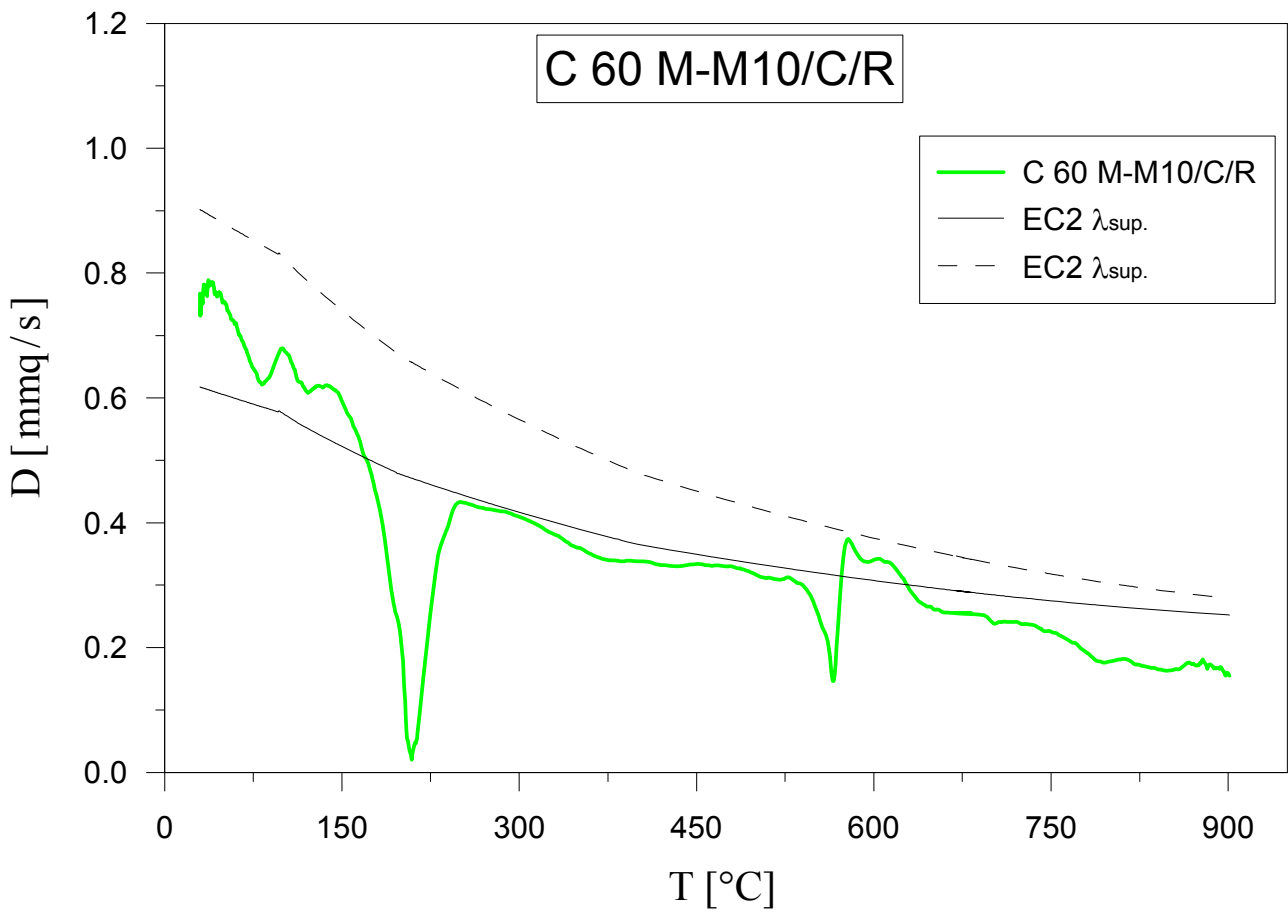


Grafico g 5.34 : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 60 M M10 e confronto con prescrizioni EC2.

...commenti...

Nel grafico seguente è riportato l'andamento della diffusività in funzione della temperatura T_m , misurata sul provino C 60 M M20/D.

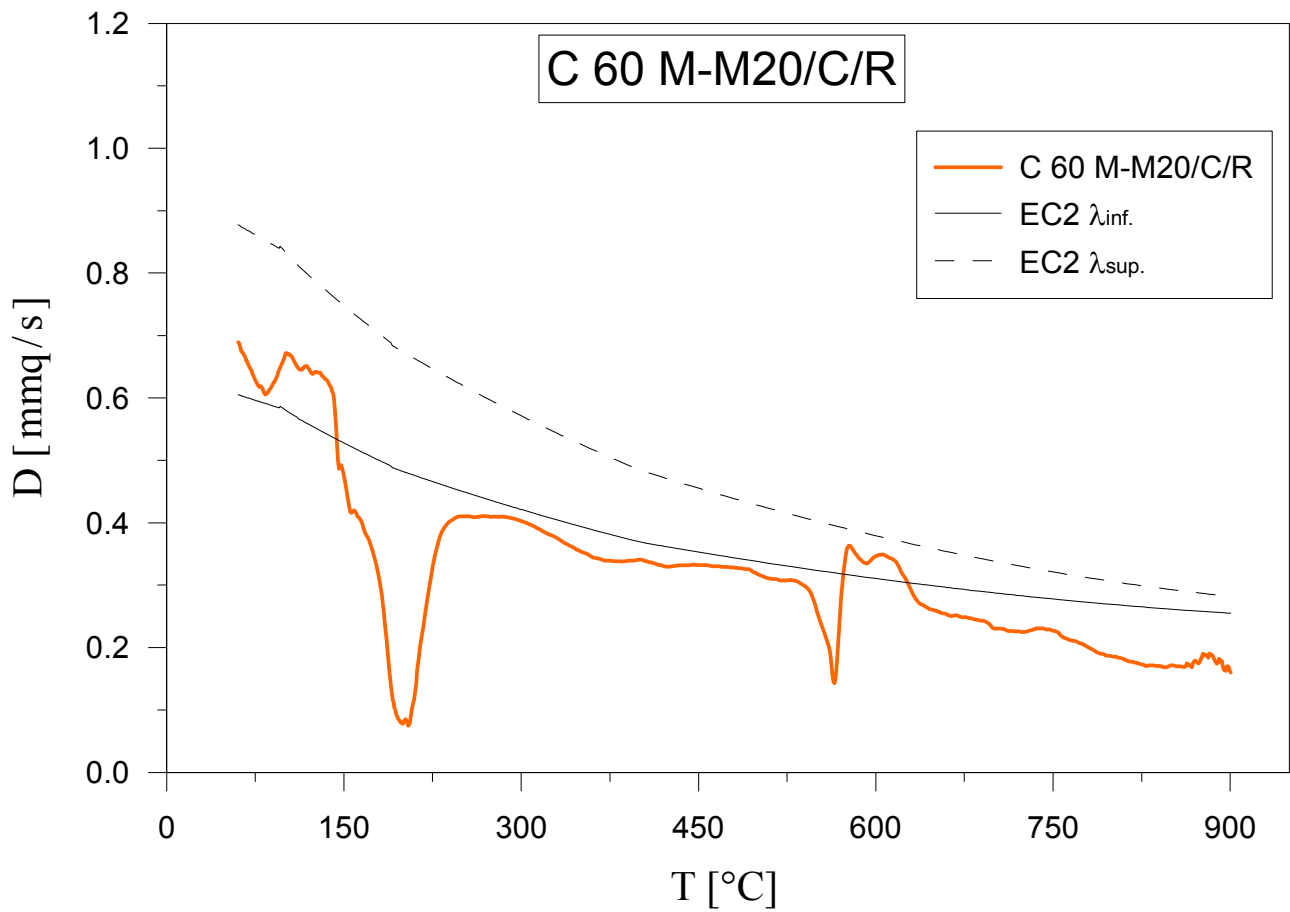


Grafico g 5.35 : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 60 M M20 e confronto con prescrizioni EC2.

...commenti...

Nel grafico seguente è riportato l'andamento della diffusività in funzione della temperatura T_m , misurata sul provino C 30 M 000/D.

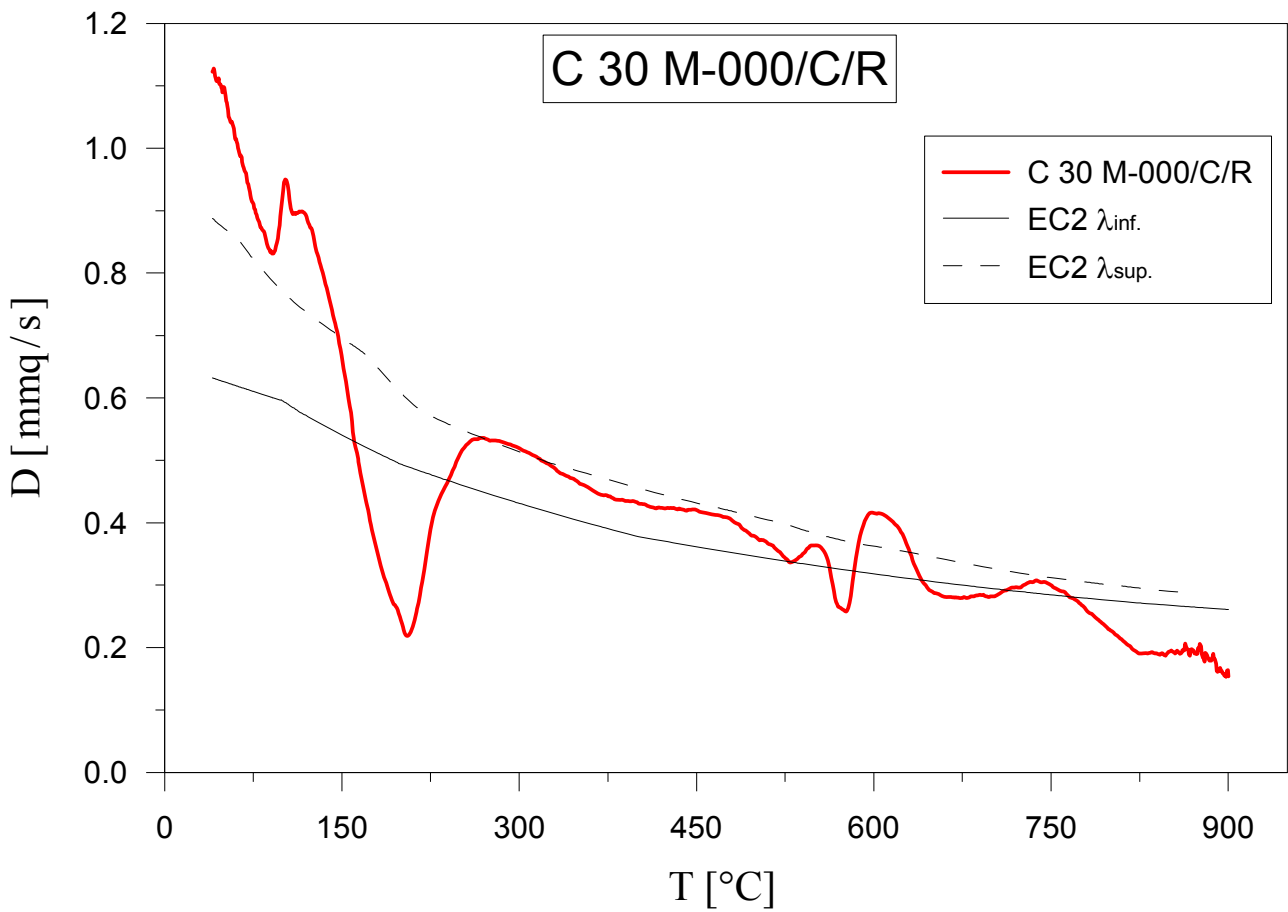


Grafico g 5.36 : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 30 M 000 e confronto con prescrizioni EC2.

...commenti...

Nel grafico seguente è riportato l'andamento della diffusività in funzione della temperatura T_m , misurata sul provino C 90 M 000/D.

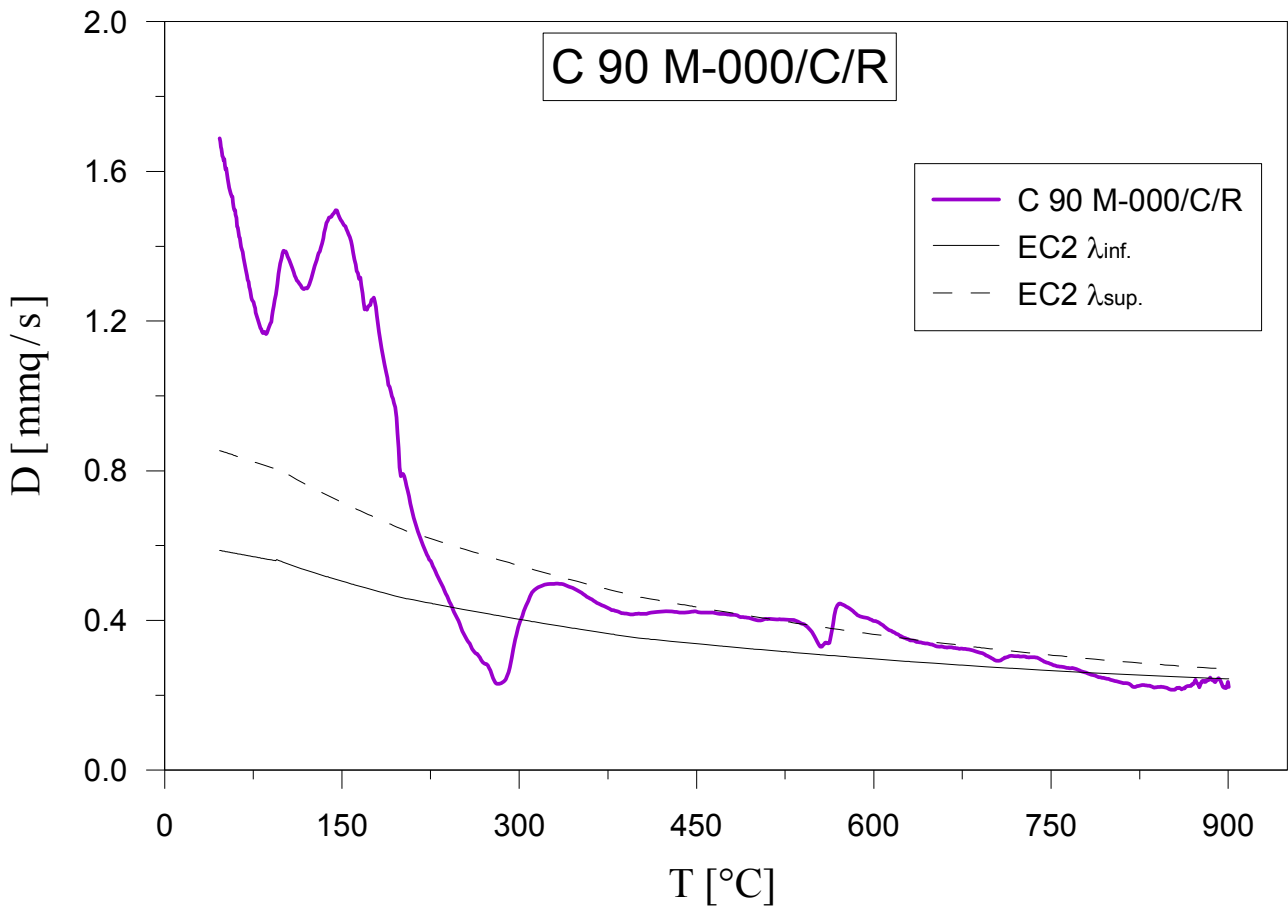


Grafico g 5.37 : Risultati delle prove di diffusività sulla miscela C 90 M 000 e confronto con prescrizioni EC2.

..commenti...

Nel grafico seguente sono riportati i risultati delle prove di diffusività relativi alle tre mescole aventi comune resistenza caratteristica a compressione, e differenti tra loro per la quantità di fibre (C 60 M 000, C 60 M M10 e C 60 M M20).

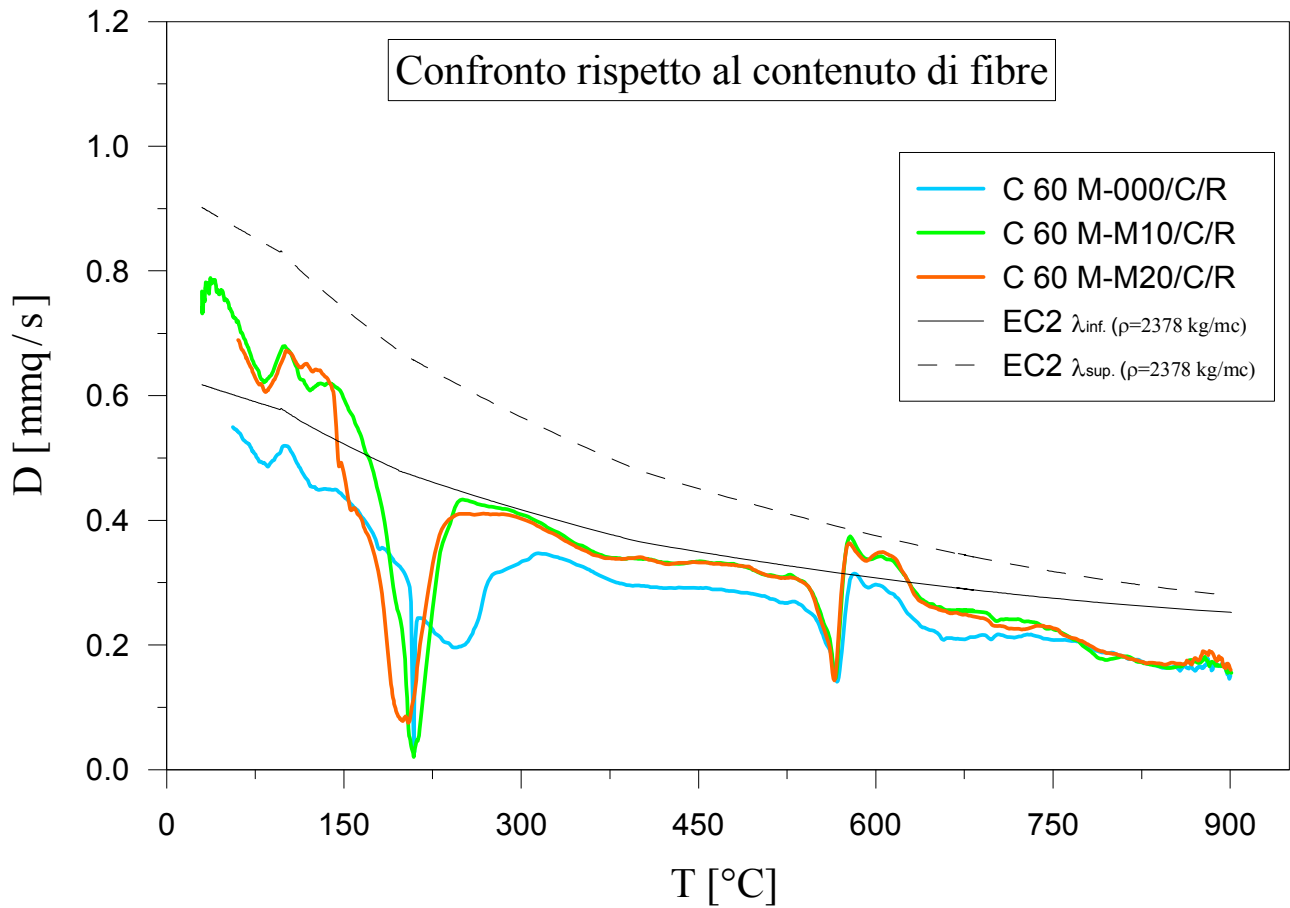


Grafico g 5.38 : Risultati delle prove di diffusività (miscele C 60 M 000, C 60 M M10, C 60 M M20).

...commenti...

Nel grafico seguente sono riportati i risultati delle prove di diffusività relative alle tre mescole prive di fibre, differenti tra loro per il rispettivo valore di resistenza caratteristica a compressione (C 30 M 000, C 60 M 000 e C 90 M 000).

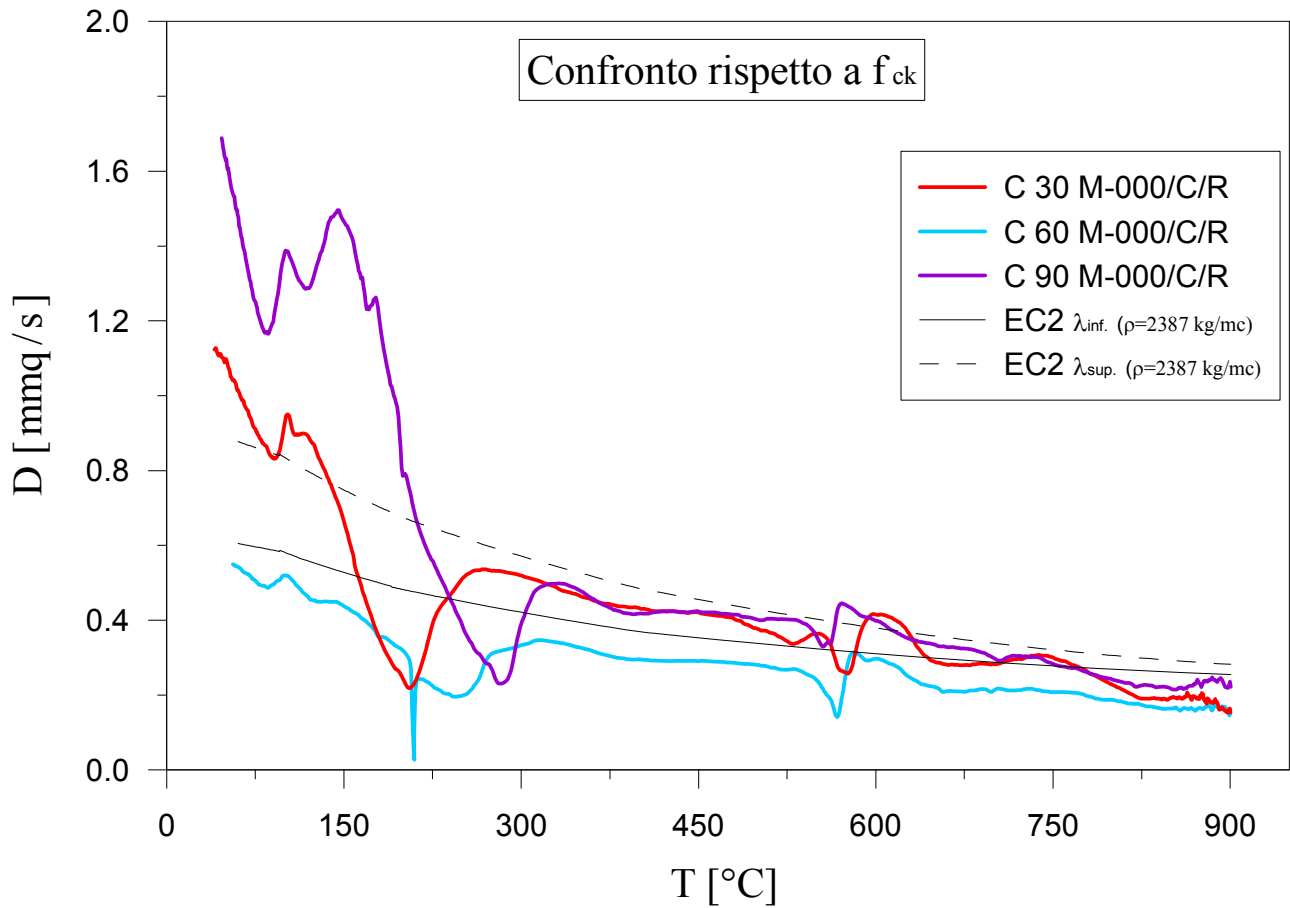


Grafico g 5.39 : Risultati delle prove di diffusività (miscele C 30 M 000, C 60 M 000, C 90 M 000).

...commenti...

Infine, nel grafico che conclude questo paragrafo, sono riportati i risultati delle prove di diffusività relativi a tutte e cinque le miscele oggetto di studio.

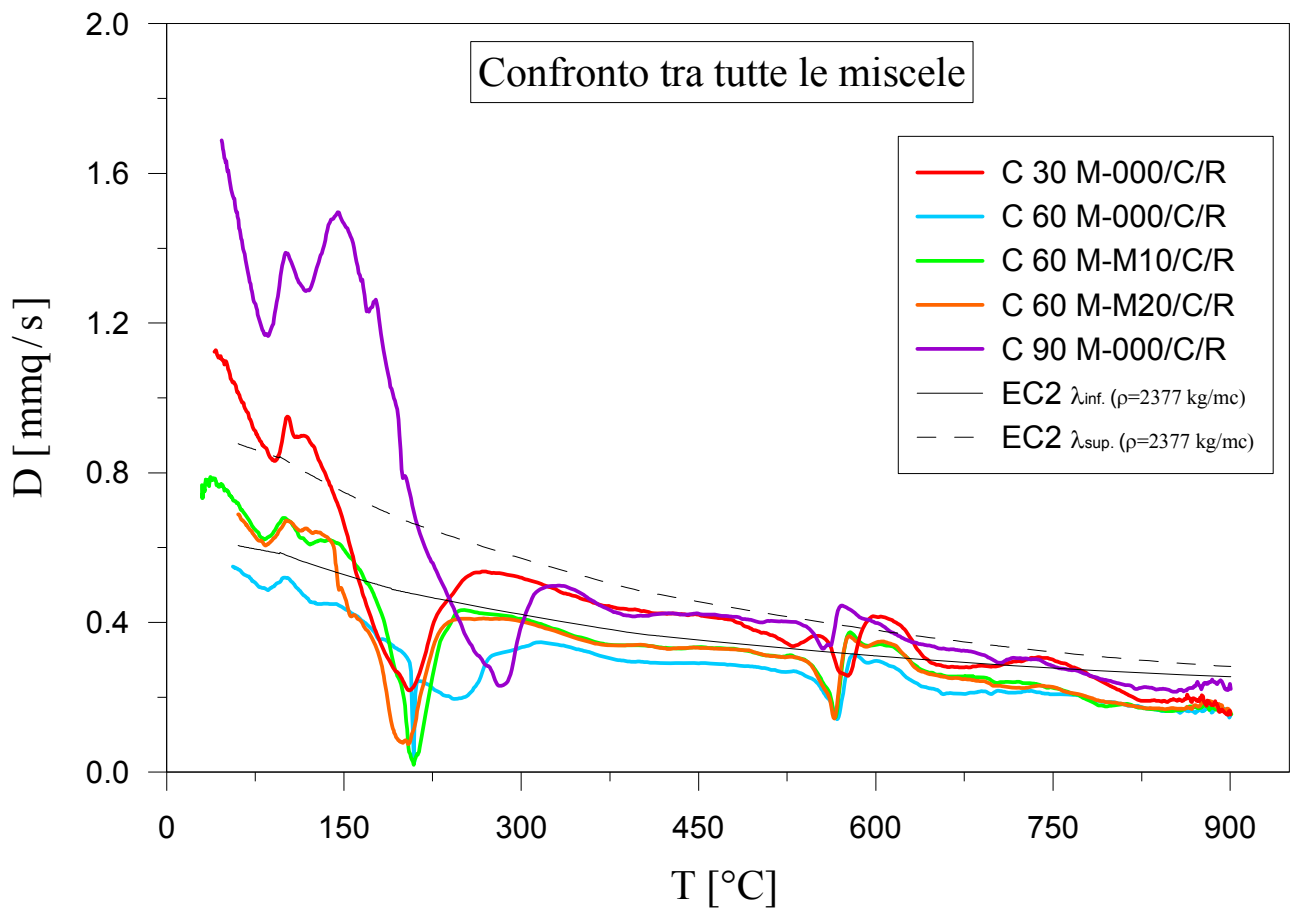


Grafico g 5.40 : Risultati delle prove di diffusività (Tutte le miscele).

...commenti...

5.c.4) Confronto dei risultati ottenuti con esempi tratti dalla letteratura scientifica

Come è già stato fatto nel paragrafo § 5.b.5.2, si eseguono confronti tra le cinque mescole in fase di studio e altre tipologie di miscele cementizie, caratterizzate in precedenti lavori di ricerca.

In particolare, si fa un'altra volta riferimento alle mescole contenenti aggregati baritici [Bamonte P., Lo Monte F. e Gambarova P.G. (2013)], denominate MD ed MM, e alle mescole contenenti particelle di polistirene espanso [Bamonte P., Lo Monte F., Gambarova P.G. e Pecce M. (2013)], queste ultime denominate M1 ed M2 (vedere anche paragrafo § 5.b.5.2 per dettagli sulla composizione delle quattro miscele di confronto).

In ciascun grafico sono poi riportati i risultati relativi al calcestruzzo ordinario di resistenza caratteristica f_c 25.8 MPa, denominato M0, la cui composizione dettagliata è descritta in [Bamonte P., Lo Monte F., Gambarova P.G. e Pecce M. (2013)].

Si riportano innanzitutto i confronti con le due miscele contenenti aggregati a base di solfato di bario.

5.d) Prove con ultrasuoni

La determinazione delle caratteristiche del calcestruzzo tramite prove non distruttive è, al giorno d'oggi, un importante argomento di ricerca.

Le esigenze da cui è incentivato lo sviluppo di queste tecniche sono essenzialmente le seguenti.

Da una parte, si desidera approntare nuove metodologie di caratterizzazione dei materiali in laboratorio, riducendo i costi e le tempistiche necessari per le attuali tipologie di prove.

D'altro lato, si è interessati ad avere tecniche di diagnostica da applicare a parti di strutture esistenti, senza che si debbano compromettere gli elementi da cui la struttura è composta (come invece avviene quando sono necessari carotaggi).

Relativamente a quest'ultimo aspetto, è prevedibile che esso debba suscitare un interesse via via crescente, specialmente nella nostra area geografica, a causa dell'elevato numero di opere in calcestruzzo che iniziano oggi a manifestare sintomi di danneggiamento dovuti all'invecchiamento. Un altro fattore di danneggiamento che può affliggere le strutture in calcestruzzo è l'esposizione all'alta temperatura. I metodi utilizzati oggigiorno per valutare lo stato delle strutture, dopo che queste siano rimaste esposte ad elevati valori di temperatura, non sono ancora completamente affidabili, oppure non sono di semplice applicazione.

Una delle possibilità, al fine di sviluppare nuovi sistemi di diagnostica del danneggiamento termico, può essere quella data dalle moderne tecniche ad ultrasuoni.

Le tecniche ad ultrasuoni si servono di un emettitore di onde a frequenza ultrasonica (20 – 40 kHz), che funziona come un diapason. L'onda emessa dall'emettitore viene captata da un ricevitore (che funziona sempre come un diapason, eccitato dall'onda inviata dall'emettitore). Tra emettitore e ricevitore si pone il materiale oggetto di studio.

La principale applicazioni di questa tecnologia consiste nel misurare il tempo che trascorre tra l'emissione dell'onda e la sua captazione da parte del ricevitore [Tarum R.N., Mohan Malotta V., Popovics J.S. (2004)].

Oggigiorno si stanno cercando altri parametri del materiale, che siano da un lato comodamente misurabili tramite la tecnologia ad ultrasuoni, dall'altro il più possibile indicativi del grado di danneggiamento subito.

Nei paragrafi che seguono, alcune di queste nuove tecniche sono illustrate [Van Den Abeele K., Sutin A., Carmeliet J. e Johnson P.A. (2001)].

5.d.1) Metodo lineare

Le prove descritte in questo paragrafo § 5.d.1 vengono denominate “lineari” perché si inquadrano nel riferimento teorico dei materiali elastici e lineari.

La principale applicazione delle prove ultrasoniche lineari consiste nel correlare la velocità di attraversamento del provino da parte dell’onda ultrasonica, con il modulo elastico dinamico E_D e il coefficiente di deformazione trasversale ν del materiale.

Per ricavare la formula di correlazione tra i parametri elastici del materiale e la velocità dell’onda che si propaga attraverso di esso, si fa riferimento al problema matematico di mezzo elastico lineare. Tale formula è riportata di seguito [Tarum R.N., Mohan Malotta V., Popovics J.S. (2004)].

$$E_D = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{(1 - \nu)} \cdot \rho \cdot V^2$$

Nella precedente formula, ρ è la densità del materiale, mentre V è la velocità di propagazione dell’onda ultrasonica all’interno dello stesso. Il coefficiente moltiplicativo funzione di ν si aggira, per il calcestruzzo, intorno al valore di 0.9

Negli esperimenti condotti in questo lavoro di ricerca, tuttavia, l’interesse non è stato rivolto alla correlazione tra velocità dell’onda e valore del modulo elastico del materiale.

Si è invece cercata la relazione tra il tempo di attraversamento del provino da parte dell’onda, l’attenuazione d’intensità di quest’ultima durante l’attraversamento e il grado di danneggiamento termico subito dalle mescole analizzate.

Questa prova si basa dunque sulla misurazione di due parametri distinti, e sulla loro successiva correlazione con il grado di danneggiamento del materiale.

Tali parametri sono i seguenti:

- il tempo di attraversamento del provino da parte dell’onda,
- il rapporto tra l’intensità dell’onda immessa e l’intensità dell’onda ricevuta.

Il fenomeno fisico che rende d’interesse la conoscenza di questi due valori, misurati durante la prova ultrasonica, è spiegato di seguito.

Le onde meccaniche che si propagano con frequenze ultrasoniche vengono fortemente disturbate dalla presenza, lungo il loro percorso, di stati gassosi. Più precisamente, si può dire che il gas costituisca un filtro, per le onde ultrasoniche.

Quando l’onda viene immessa nel provino dall’emettitore, essa si propaga nello spazio tridimensionale occupato dal materiale. Il fronte d’onda si propaga quindi lungo infinite direzioni.

Quando il fronte d’onda raggiunge l’altra estremità del provino, l’onda ultrasonica eccita il ricevitore, il quale segnala che l’impulso è stato ricevuto.

Nel caso in cui il materiale fosse continuo (il che è solamente un’astrazione), il punto del fronte d’onda che investirebbe per primo il ricevitore (punto I) sarebbe quello che ha seguito il percorso più breve tra i due apparecchi. Tutti gli altri punti del fronte d’onda raggiungerebbero il ricevitore in ritardo, alcuni addirittura dopo aver subito varie riflessioni all’interno del provino.

Se però questo punto I, appartenente al fronte d’onda, fosse bloccato dall’incontro con un vuoto (riempito quindi di aria, anziché dal materiale solido), il ricevitore sarebbe prima investito da un altro punto del fronte d’onda (punto II), il quale avrebbe percorso un cammino più lungo rispetto al punto I.

In questo modo è possibile creare una corrispondenza tra il tempo trascorso tra l’emissione e la ricezione dell’onda, e la presenza di vuoti all’interno del materiale.

Poiché il danneggiamento termo-meccanico del calcestruzzo si manifesta anche con l'aumento della percentuale di vuoti nella matrice cementizia, risulta possibile correlare il tempo di attraversamento del provino da parte dell'onda ultrasonica con lo stato di salute del materiale analizzato.

Un altro fenomeno fisico empiricamente verificabile è che l'attenuazione d'intensità dell'onda aumenta, al crescere del percorso da essa seguito.

Per lo stesso motivo di prima, dunque, è possibile correlare la diminuzione di intensità subita dall'onda nell'attraversare il provino, con il grado di danneggiamento del provino stesso.

5.d.1.1) Descrizione della strumentazione e dell'esperimento

Le prove ultrasoniche lineari sono state condotte all'interno del Laboratorio di Prove dei Materiali (L.P.M), presso il Politecnico di Milano. L'apparecchiatura è stata gentilmente fornita dal professor Roberto Felicetti, il quale ha anche contribuito alla messa a punto degli esperimenti.

La strumentazione utilizzata è così composta:

- un emettitore ed un ricevitore piezoelettrici,
- un Pulsatore BF IMGPLS 01, per regolare l'eccitazione dell'emettitore piezoelettrico,
- un campionatore Picoscope, per acquisire e campionare il segnale avvertito dal ricevitore piezoelettrico,
- un computer, per visualizzare e registrare le misure;
- un supporto (immagine *i 5.9*), per tenere in posizione il provino durante le prove.

Nelle due successive immagini sono immortalati il Pulsatore BF e il campionatore Picoscope.



Immagine *i 5.7*: Pulsatore BF IMGPLS 01 e Campionatore Picoscope.

Gli strumenti elencati sono stati tra loro collegati come schematizzato nella seguente figura.

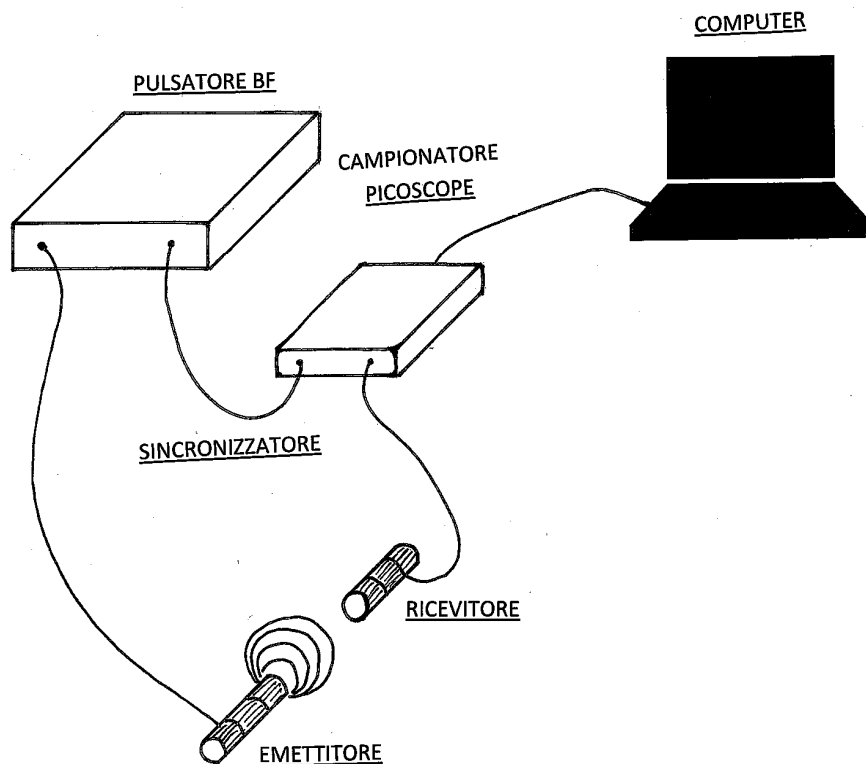


Immagine *i* 5.8: Schema della strumentazione per le prove con ultrasuoni lineari.

Il potenziale elettrico trasmesso dal pulsatore all'emettitore è pari a 1700 V. La frequenza di campionamento da parte del Picoscope è pari a 10 MHz. L'intensità dell'onda percepita dal ricevitore, riconvertita in potenziale elettrico, si aggira intorno ai 10 V nel caso di provino non danneggiato, mentre scende sotto agli 0.02 V nel caso di provino con danneggiamento termo-meccanico massimo.

Durante la messa a punto delle esperienze, dopo numerosi tentativi e prove effettuati, si è stabilito di posizionare uno strato di plastilina spesso 2 mm, tra ciascuna faccia del provino e i due dispositivi piezoelettrici. Questo è servito affinché non ci fossero volumi di vuoto tra la superficie del provino e quella dello strumento.

Inoltre, per migliorare ulteriormente il contatto, si è posizionato un peso di 3.77 kg sopra l'insieme emettitore – provino – ricevitore. Quanto appena descritto è immortalato nella sottostante fotografia.



Immagine *i* 5.9 : Insieme emettitore-provino-ricevitore-peso di 3.77 kg (posizionato in alto).

Di seguito si riporta la descrizione dettagliata dell'esperimento.

Per ciascun provino, si è immessa un'onda ultrasonica generata dall'emettitore piezoelettrico e controllata tramite il Pulsatore BF. L'onda uscente, captata tramite il ricevitore piezoelettrico, è stata inviata al campionatore Picoscope, e da lì al computer.

Grazie ad un programma implementato in codice Labview dal professor Felicetti, è stato possibile estrapolare il valore di ampiezza massima dell'onda uscente e il tempo da quest'ultima impiegato per attraversare il provino.

Ogni misura è stata ripetuta due volte, invertendo le sezioni trasversali del provino.

Per ciascun provino, infine, la misura è stata effettuata prima e dopo il ciclo termico.

5.d.1.2) Estrapolazione dei parametri $v_{US}(T)$ e $A_{MAX}(T)$

In questo paragrafo si riportano i risultati delle prove ultrasoniche lineari precedentemente introdotte.

Per ciascuna delle miscele oggetto di studio, si riportano le variazioni subite dai parametri misurati (ampiezza dell'onda uscente A_{US} e velocità di attraversamento del provino v_{US}), al crescere del danneggiamento termico subito dal materiale.

Si precisa inoltre che tali parametri vengono riportati in forma adimensionale, essendo sempre ottenuti come rapporto tra la misura effettuata prima del ciclo termico e dopo di esso.

La prima miscela di cui si riportano i risultati è la miscela C 60 M 000.

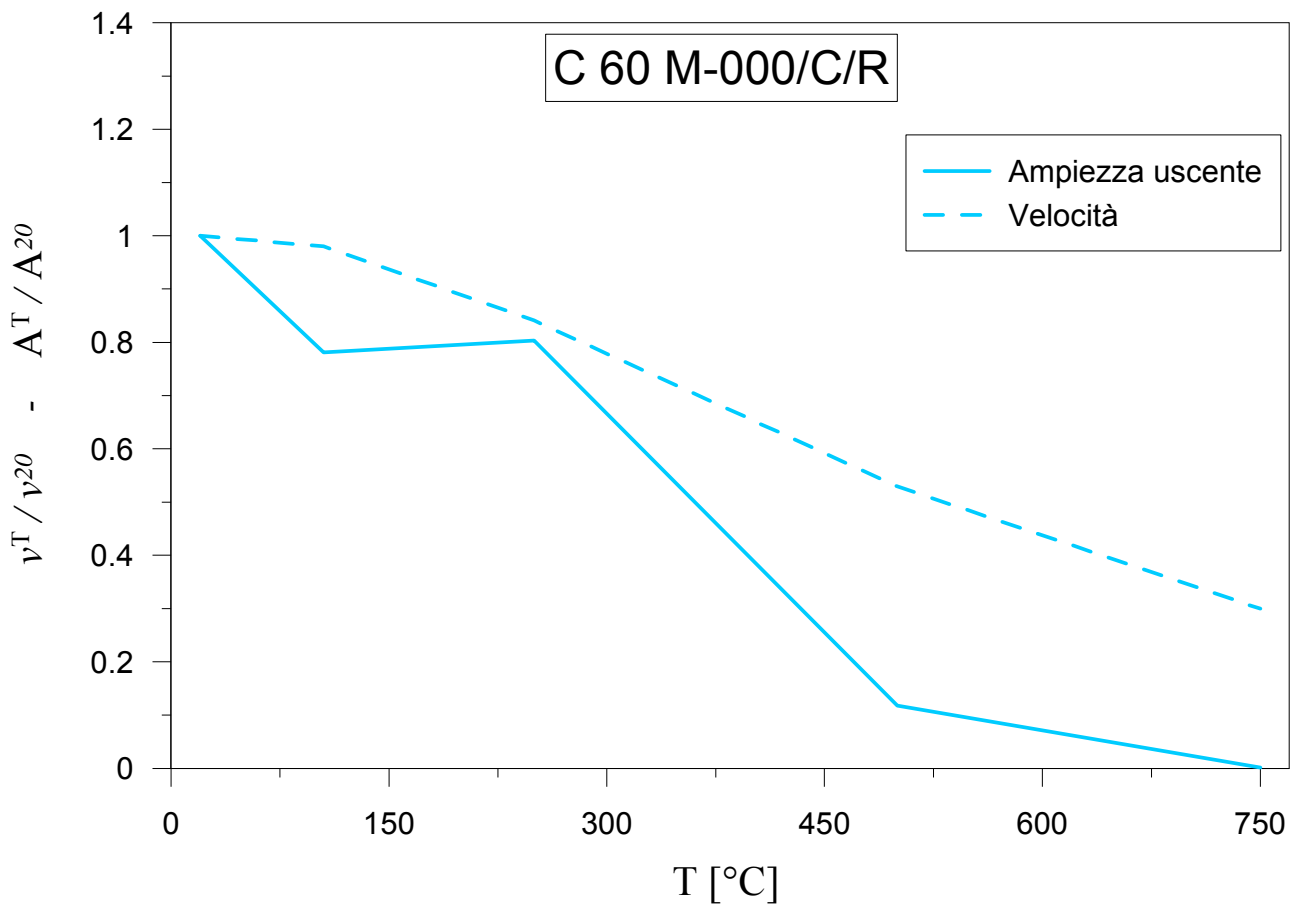


Grafico g 5.43 : Risultati delle prove ad ultrasuoni lineari su miscela C 60 M 000, Velocità (v_{us}) di attraversamento e Ampiezza (A_{us}) dell'onda uscente.

Nel grafico sottostante si riportano i risultati relativi alla miscela C 60 M M10.

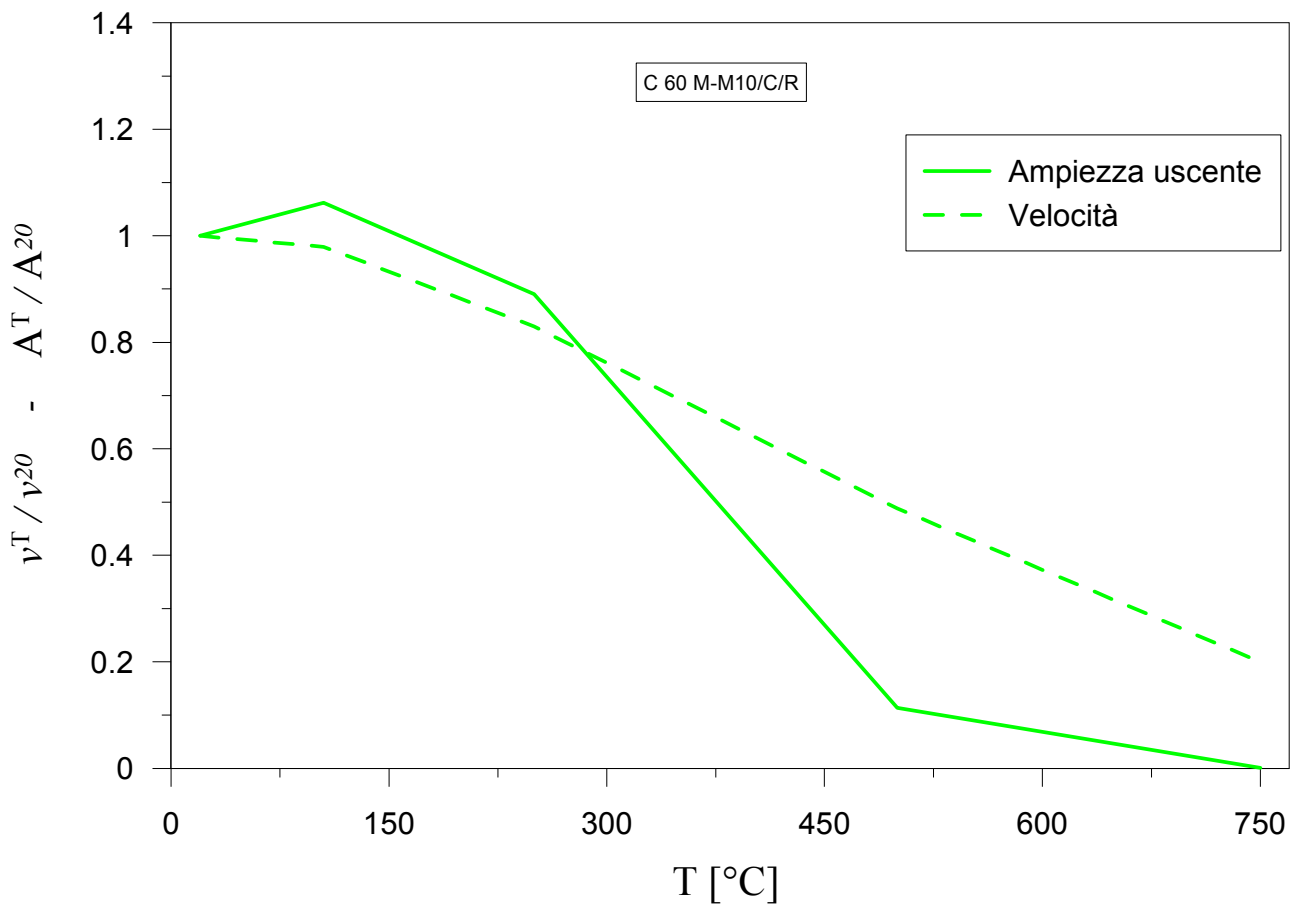


Grafico g 5.44 : Risultati delle prove ad ultrasuoni lineari su miscela C 60 M M10, Velocità (v_{us}) di attraversamento e Ampiezza (A_{us}) dell'onda uscente.

Nel grafico sottostante si riportano i risultati relativi alla miscela C 60 M M20.

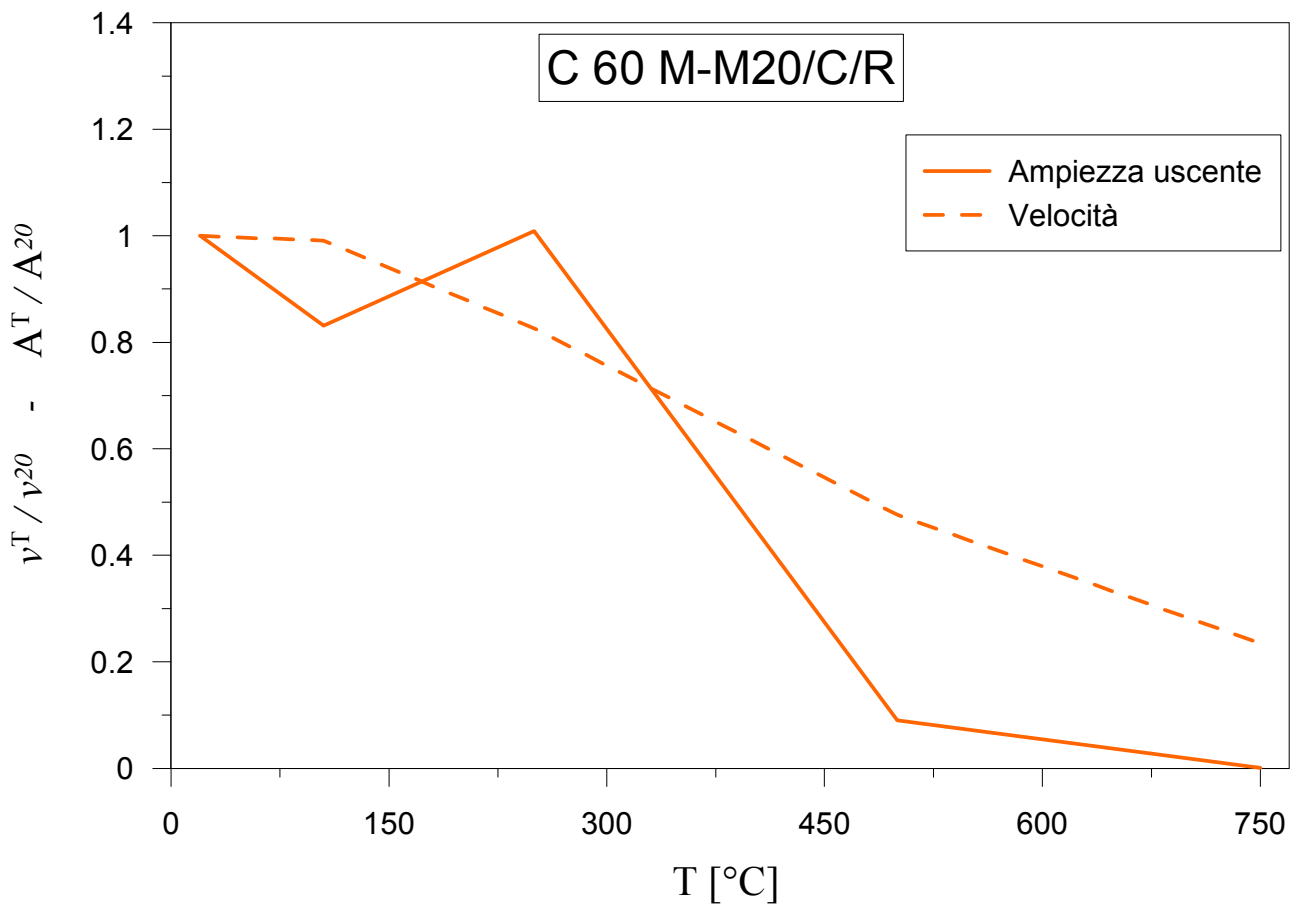


Grafico g 5.45 : Risultati delle prove ad ultrasuoni lineari su miscela C 60 M M20, Velocità (v_{us}) di attraversamento e Ampiezza (A_{us}) dell'onda uscente.

Nel grafico sottostante si riportano i risultati relativi alla miscela C 30 M 000.

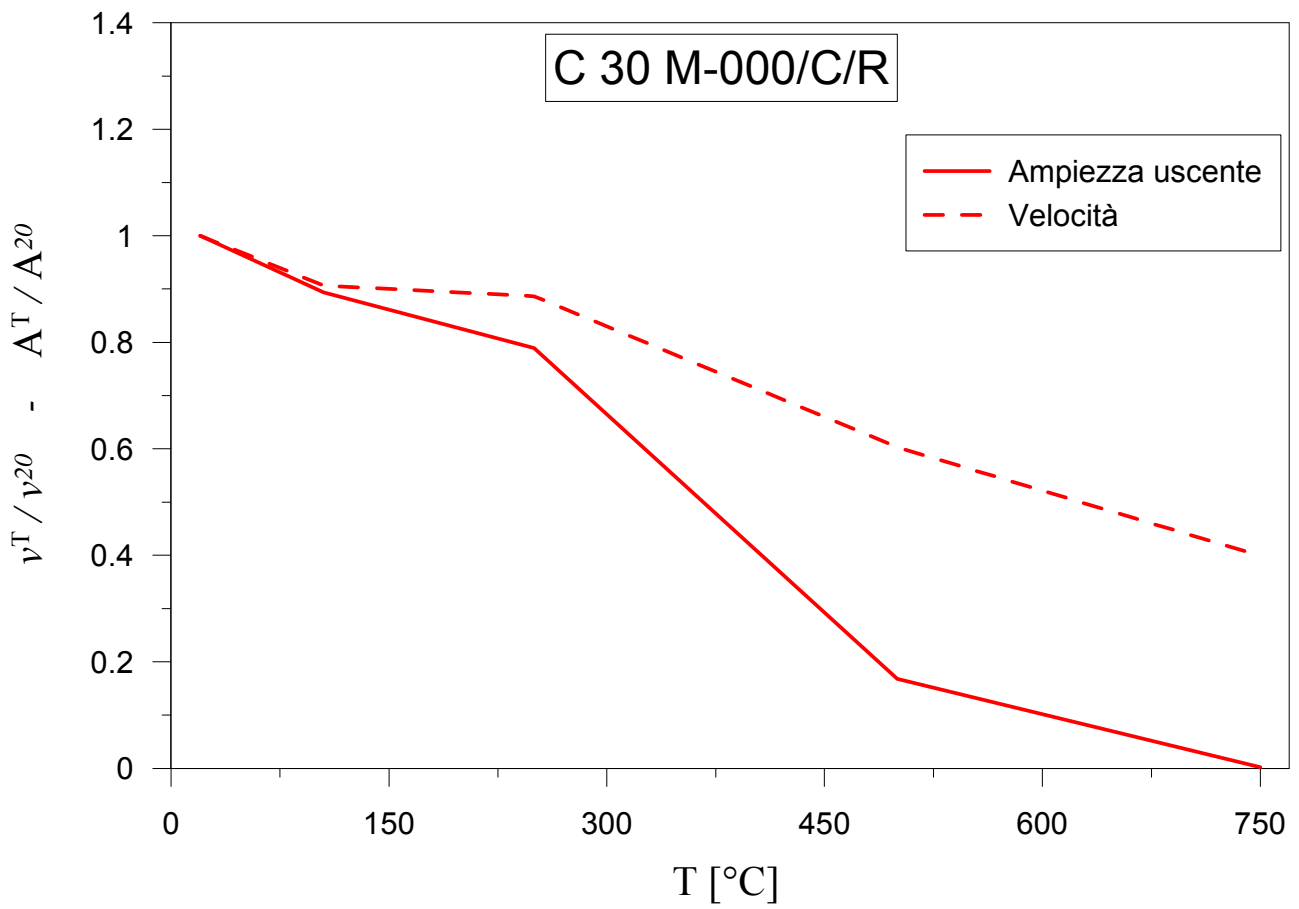


Grafico g 5.46 : Risultati delle prove ad ultrasuoni lineari su miscela C 30 M 000, Velocità (v_{us}) di attraversamento e Ampiezza (A_{us}) dell'onda uscente.

Nel grafico sottostante si riportano i risultati relativi alla miscela C 90 M 000.

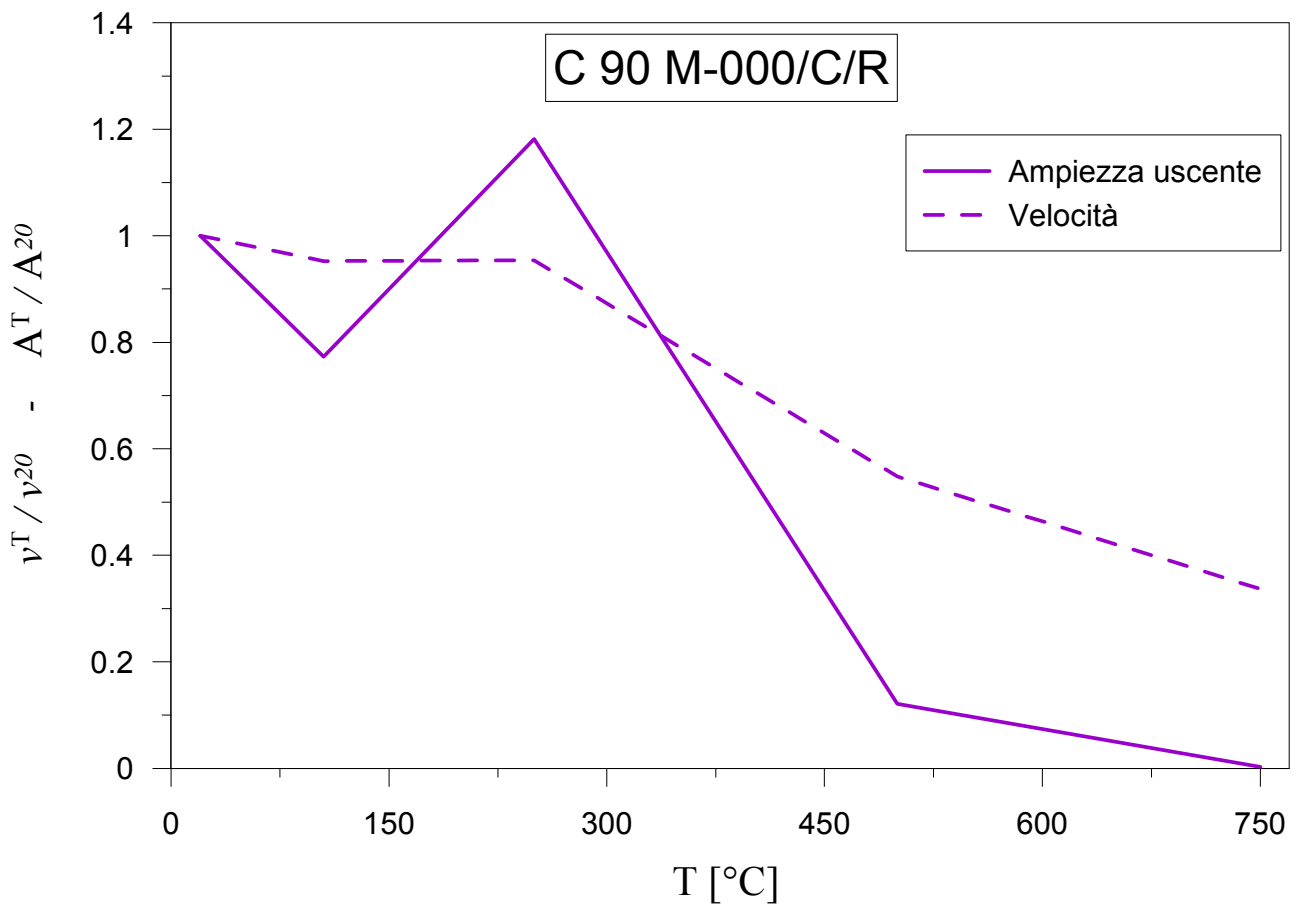


Grafico g 5.47 : Risultati delle prove ad ultrasuoni lineari su miscela C 60 M 000, Velocità (v_{us}) di attraversamento e Ampezza (A_{us}) dell'onda uscente.

Si riportano infine i seguenti due grafici, nei quali i risultati relativi a tutte e cinque le miscele sono confrontati.

Il primo grafico riporta i risultati delle misure della velocità di attraversamento del provino.

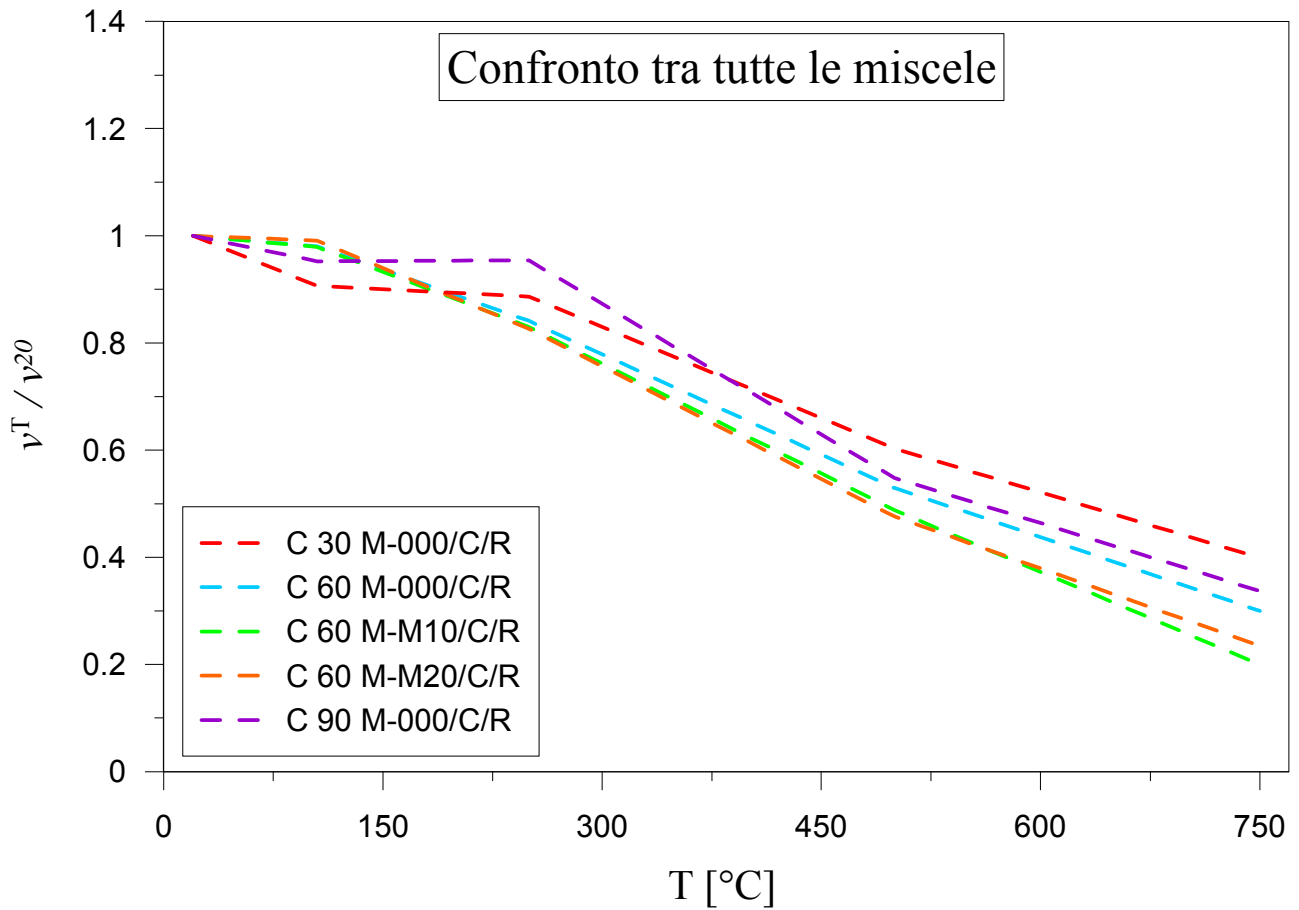


Grafico g 5.48 : Risultati delle prove ad ultrasuoni lineari su tutte le miscele, Velocità (v_{US}) di attraversamento.

Il grafico seguente riporta i risultati delle misure dell'ampiezza dell'onda uscente.

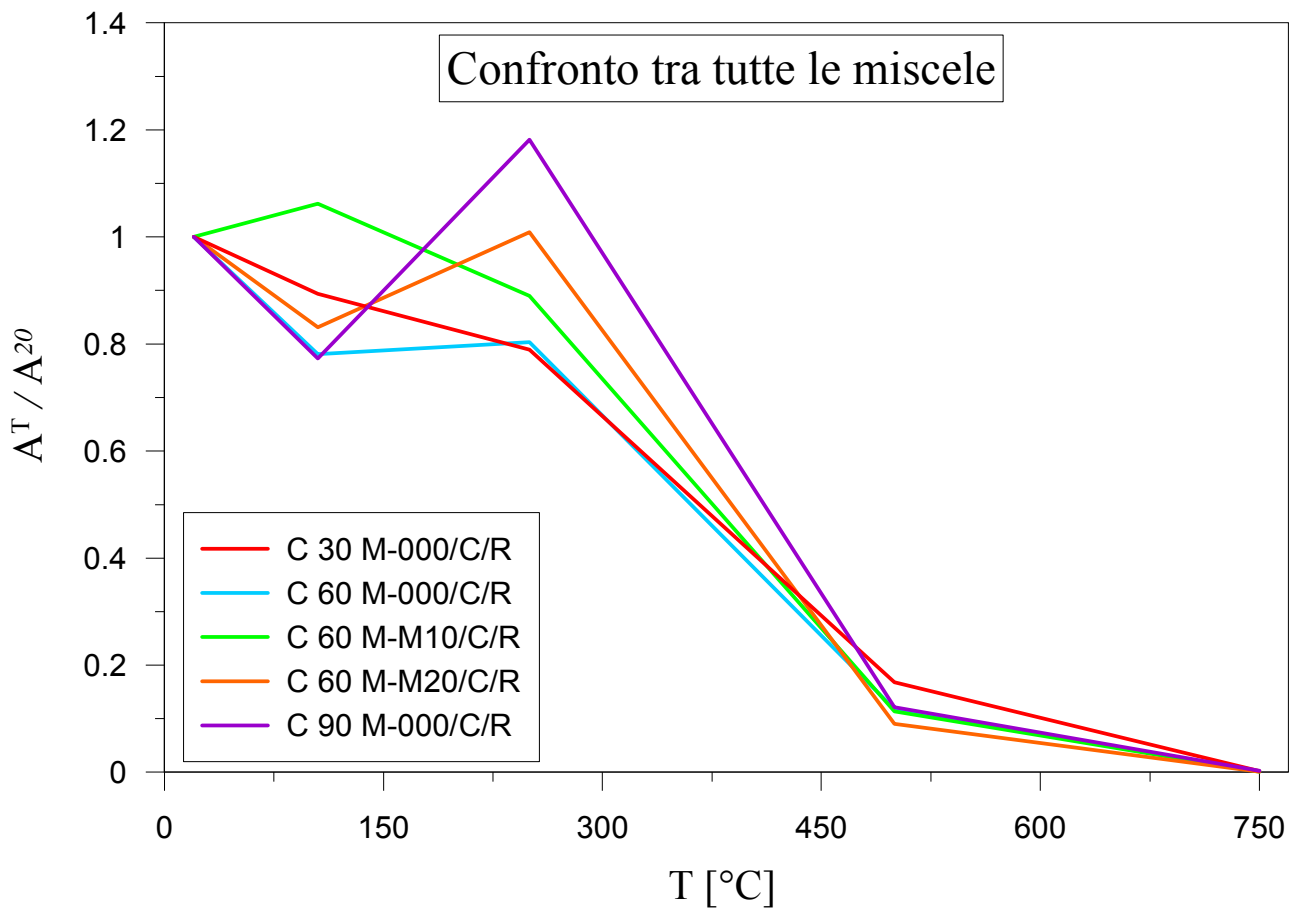


Grafico g 5.49 : Risultati delle prove ad ultrasuoni lineari su tutte le miscele, Ampiezza (A_{us}) dell'onda uscente.

...commenti...

5.d.1.3) Correlazione tra v_{US} ed E_{DIN}

In questo paragrafo, riportiamo il valore del modulo elastico dinamico calcolato mediante la formula che si trova all'inizio del paragrafo § 5.d.1.

Nella tabella seguente, per ciascuna miscela, si riportano i valori di modulo elastico estrapolati dalle prove ultrasoniche e i valori di modulo elastico secante, ottenuti dalle prove di compressione. I risultati in tabella sono ottenuti su provini non sottoposti a riscaldamento, assumendo come coefficiente di deformazione trasversale ν un valore pari a 0.2.

Miscela	L [m]	ρ [kg/mc]	t [μ s]	V [m/s]	E_{DIN}	E_{50}	$E_{50} / E_{DIN} \cdot 100$
C 60 M 000	0.192	2415	44.3	4343.5	41013	31810	78
C 60 M M10	0.194	2383	46.2	4193.9	37718	28612	76
C 60 M M20	0.192	2364	46.4	4130.3	36300	29813	82
C 30 M 000	0.194	2296	49.5	3923.2	31798	25388	80
C 90 M 000	0.195	2465	45.6	4275.5	40559	36879	91

Tabella t 5.19 : Valori di modulo elastico estrapolati dai risultati delle prove ultrasoniche (E_{DIN}) e direttamente calcolati dalle prove di compressione (E_{50}).

I risultati riportati in tabella mostrano che il valore di modulo elastico estrapolato dalle misure ultrasoniche può differire anche del 24% rispetto al valore direttamente calcolato mediante prove di compressione.

5.d.2) Scaling Subtraction Method (SSM)

5.e.2.1) Descrizione della strumentazione e dell'esperimento;

5.d.2.2)....

5.d.3) Single M0de Non-linear Resonant Acoustic Spectroscopic (SIMON- RAS)

5.d.3.1) Descrizione della strumentazione e dell'esperimento

5.d.3.2) Problematiche riscontrate

5.d.3.3) Correlazione tra frequenza e v_{US}

5.d.3.4) Estrapolazione di E_{DIN}

5.e) Indici di danneggiamento del materiale

5.e.1) Confronto tra modulo elastico e velocità degli ultrasuoni, $D_{E50} - D_v$

5.e.2) Confronto tra modulo elastico ed ampiezza degli ultrasuoni, $D_{E50} - D_A$

5.e.3) Confronto tra ampiezza e velocità degli ultrasuoni, $D_A - D_v$

5.e.4) Commento ai confronti

6) CONCLUSIONI

6.a) Prestazioni meccaniche delle 5 miscele analizzate

6.b) Confronto con miscele precedentemente studiate e con prescrizioni normative

6.c) Commenti sui metodi diagnostici con ultrasuoni

6.d) Possibili sviluppi futuri

7) BIBLIOGRAFIA

7.a) Materiale direttamente richiamato nel testo

ACI 216-1.07 (2007), “Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies”. Report by Joint ACI / TMS Committee 216, 32 pp.

Antonaci P., Bruno C.L.E., Gliozzi A.S. e Scalerandi M. (2010). “Monitoring evolution of compressive damage in concrete with linear and nonlinear ultrasonic methods”. *Cement and Concrete Research* 40, 1106–1113.

Antonaci P., Bocca P., Masera D., Pugno N., Scalerandi M. e Sellone F. (2007). “Spectral Analysis and Damage Evolution in Concrete Structures with Ultrasonic Technique”. *Fracture Mechanics of Concrete Structures – Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures – Carpinteri et al.*, 1023-1027.

Bamonte P., Felicetti R., Gambarova P.G., Meda A. e Riva P. (2004). “Heat in Concrete: Structural Behavior and Failure Modes”. *Studies and Researches*, Vol. 25, ed. by Politecnico di Milano and Italcementi, pp. 1-27.

Bamonte P., Lo Monte F., Gambarova P.G. e Rossino C. (2013). “A Review of SSC Mechanical Properties at High Temperatures”. *Proc. 2nd Workshop of ACI Italy Chapter on “The new Boundaries of Structural Concrete”*, Bergamo, 4 – 5 October 2013, 20 pp., in press.

Bamonte P. e Gambarova P.G. (2010). “Thermal and Mechanical Properties at High Temperature of a Very High-Strength Durable Concrete”. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 6, 545-555.

Bamonte P., Gambarova P.G., Cangiano S., Busnelli F., Billi R. e Quaglia M. (2006). “Thermo-Mechanical Characterization of Concrete Mixes Suitable for the Rehabilitation of Fire-Damaged Tunnel Linings”. *Studies and Researches*, Vol. 26, ed. by Politecnico di Milano and Italcementi, pp. 233-286.

Bamonte P., Lo Monte F. e Gambarova P.G. (2013). “Mechanical and Thermal Properties of a Heavy Radiation-Proof Concrete Exposed to High Temperature”. *Proc. 7th Int. Conf. on “Concrete under Severe Conditions” – CONSEC 13*, Nanjing (China), 23 – 25 September 2013, 10 pp. (in press).

Bamonte P., Lo Monte F., Gambarova P.G. e Pecce M. (2013). “High-Temperature Behavior of Reduced-Mass Concrete Containing Expanded Polystyrene Synthesized Particles (EPS)”. *Proc. fib Symposium Tel Aviv 2013 “Engineering, a Concrete Future: Technology, Modelling and Construction”* (Tel Aviv, Israel, April 2013), 61-64.

Bazant Z.P. e Kaplan M.F. (1996). “Concrete at high temperature – Materials properties and Mathematical Models”. *Concrete Design and Construction Series*, ed. by F.K. Kong and R.H. Evans, Longman Group Limited, 412 pp.

CEN, European Committee for Standardization – EN 1992-1-2 (2005), “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”, Brussels, Belgium.

CEN, European Committee for Standardization – EN 1994-1-2 (2005), “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”, Brussels, Belgium.

Felicetti R. (2008). “Assessment of the Equivalent Thermal Diffusivity for Fire Analysis of Concrete Structures”. Proc. Fib Task Group 4.3 Workshop “Fire Design of Concrete Structures” (Coimbra, Portugal, November 8-9, 2007), 149-158.

Felicetti R., Gambarova P.G. (2003). “Heat in Concrete: Special Issues in Materials Testing”. Studies and Researches, Vol. 24, ed. by Politecnico di Milano and Italcementi, pp. 121-137.

Felicetti R., Gambarova P.G e Bamonte P. (2012). “Thermal and Mechanical Properties of Light-Weight Concrete Exposed to High Temperature”. Fire and Materials, Vol. 37, No. 3, 200-216.

Phan L.T. e Carino N.J. (1998). “Review of Mechanical Properties of HSC at High Temperature”, ASCE – Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 10, No. 1, 58-64.

Scalerandi M., Griffa M., Antonaci P., Wyrzykowski M. e Lura P. (2013). “Nonlinear elastic response of thermally damaged consolidated granular media”. Journal of Applied Physics 113, 9 pp.

Tarum R.N., Mohan Malotta V., Popovics J.S. (2004). “The Ultrasonic Pulse Velocity Method”. CLC Press LLC, 19 pp.

Van Den Abeele K., De Visscher J. (2000). “Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques”. Cement and Concrete Research 30, 1453-1464.

Van Den Abeele K., Sutin A., Carmeliet J. e Johnson P.A. (2001), “Micro-damage diagnostic using nonlinear elastic wave spectroscopy”. NDT&E International 34, 239-248.

7.b) Materiale aggiuntivo

8) CHIUSURA PERSONALE E RINGRAZIAMENTI