POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea
in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

LO SPACCO ESPLOSIVO

Come il rapporto acqua/legante, la percentuale dei vuoti d'aria e il contenuto di fibre influenzano il comportamento del calcestruzzo indurito soggetto ad elevate temperature.

Relatore
Prof. A.P. Fantilli

Con la collaborazione del
Prof. K. Nemati

Candidato
Nicolò Accornero

Marzo 2018

Indice

Abstract

1 Introduzione 1

1.1 Significato del lavoro svolto 4

1.2 Suddivisione della tesi 6

1.3 University of Washington e Worcester Polytechnic Institute 7

2 Fenomeno incendio 9

2.1 Fasi evolutive 9

2.2 Curve di incendio 12

2.2.1 Curva di incendio naturale 12

2.2.2 Curve di incendio nominale 14

3 Comportamento al fuoco del calcestruzzo 18

3.1 Trasformazioni chimico-fisiche del materiale 20

3.2 Proprietà meccaniche del calcestruzzo 24

3.2.1 Resistenza a compressione 26

3.2.2 Modulo di elasticità 29

3.2.3 Resistenza a trazione 30

3.3 Proprietà termiche del calcestruzzo 31

3.3.1 Conducibilità termica 32

3.3.2 Calore specifico 33

3.3.3 Densità 34

3.3.4 Diffusività termica 35

4 Fenomeno Spalling 37

4.1 Definizione 37

4.2 Teorie riguardo il fenomeno di spacco esplosivo 40

4.2.1 Processo termo-igrometrico. 41

4.2.2 Processo termo-meccanico 44

4.2.3 Combinazione del processo termo-igrometrico e meccanico 45

4.2.4 Teorie e studi recenti 46

4.3 Fattori che influenzano lo spacco esplosivo 47

4.4 Conseguenze del fenomeno spalling 52

4.5 Modelli di previsione dello spalling 59

5 Calcestruzzo ad alta resistenza 62

5.1 Comportamento ad elevate temperature..... 64

6 Permeabilità ed energia di frattura..... 67

6.1 Permeabilità 67

6.2 Energia di frattura 71

6.2.1 Tecnica RILEM e valutazione di Gf 75

6.2.2 Gf in funzione della temperatura 77

7 Parte 1. Tecniche di progetto contro lo spalling 84

7.1 Obiettivo della progettazione..... 84

7.2 Variazione del rapporto acqua/cemento..... 87

7.2.1 Rapporto acqua/cemento vs. Pressione all'interno dei pori 90

7.2.2 Rapporto acqua/cemento vs. Fenomeno di spalling..... 90

7.2.3 Porosità vs. Espansione dell'acqua vaporizzata 91

7.2.4 Overview..... 93

7.3 Variazione della percentuale di vuoti (aria)..... 95

7.3.1 Prestazioni di un calcestruzzo sottoposto a "air entrained"..... 99

7.3.2 Rete di bolle d'aria all'interno del calcestruzzo. 103

7.3.3 Overview..... 106

7.4 Utilizzo di fibre in Polipropilene 108

7.4.1 Permeabilità connessa al volume e alla struttura dei pori. 116

7.4.2 Quantità ottimale di fibre in polipropilene..... 120

7.4.3 Diametro, lunghezza e tipologia di fibra in polipropilene 122

7.4.4 Overview..... 126

7.5 Utilizzo di fibre ibride 127

7.5.1 Confronto tra l'utilizzo di fibra ibrida, d'acciaio o polipropilene. . 131

7.5.2 Energia di frattura vs. Energia cinetica. 133

7.5.3 Come le fibre ibride migliorano la resistenza al fuoco. 139

7.5.4 Overview..... 141

7.6 Overview generale sul comportamento del calcestruzzo 143

8 Parte 2. Analisi del caso studio-Test di resistenza al fuoco..... 145

8.1 Criterio del mix design..... 147

8.2 Composizione delle miscele di calcestruzzo 149
8.2.1 Proprietà dei materiali costituenti le miscele 150
8.2.2 Caratteristiche Provini 165
8.3 WPI "Worcester Polytechnic Institute". Combustion Lab 168
8.3.1 Strumentazione utilizzata 170
8.3.2 Procedura utilizzata 177
8.4 Calcolo temperature superficiale del provino 179
8.4.1 Analisi dei dati 189
8.5 Perdita di massa 192
8.5.1 Analisi dei dati 195
8.5.2 Rapporto tra la perdita di massa e il fenomeno di spalling 214
8.6 Osservazione visiva dei provini 215
8.7 Determinazione della resistenza a compressione 226
9 Sviluppi successivi 233
9.1 Test prova a compressione 233
10 Conclusione 237
11 Allegati 241
11.1 Dati temperatura 241
12 Bibliografia 260

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 2-1 EVOLUZIONE DELL'INCENDIO CON LA RAPPRESENTAZIONE DELLE QUATTRO FASI CARATTERISTICHE. FONTE: GUIDA PRATICA ALLA PROGETTAZIONE SECONDO UNI 9494-2-2017. AERNOVA..... 9

FIGURA 2-2 TASSO DI RILASCIO DELL'ENERGIA TERMICA. FONTE: MAROTTA (2011) 12

FIGURA 2-3 CURVE DI INCENDIO PARAMETRICHE PER INCENDIO CONTROLLATO DALLA VENTILAZIONE. FONTE: BALDUZZI (2015) 13

FIGURA 2-4 PARAGONE TRA L'ANDAMENTO DI UNA CURVA PARAMETRICA E QUELLO DELLA CURVA STANDARD ISO 834. FONTE: AICAP ROMA. GAZZETTA UFFICIALE..... 14

FIGURA 2-5 CURVE D'INCENDIO; EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA SECONDO LA TIPOLOGIA D'INCENDIO. FONTE: ATEC CONCRETE CONSTRUCTION 14

FIGURA 2-6 CURVA TEMPO/TEMPERATURA ASTM E119.FONTE: ASTM E119..... 15

FIGURA 3-1 TIPI DI ACQUA PRESENTI NEL CALCESTRUZZO. FONTE: BERTOLINI (2000). 22

FIGURA 3-2 DEFORMAZIONE TERMICA DEGLI AGGREGATI. 1) AGGREGATI SILICEI 2) AGGREGATI CALCAREI. FONTE: EN-1992-2..... 24

FIGURA 3-3 DIAGRAMMA SFORZO-DEFORMAZIONE A TEMPERATURE ELEVATE. FONTE: PHAN E AL. (2010) 25

FIGURA 3-4 ANALISI DEL LIVELLO DI TENSIONE IN RELAZIONE ALLA TEMPERATURA E AL LIVELLO DI CARICO DURANTE UN RISCALDAMENTO CONDOTTO MANTENENDO IL LIVELLO DI CARICO A COMPRESSIONE COSTANTE. FONTE: KHOURY (2000)..... 25

FIGURA 3-5 DIAGRAMMA SFORZO-DEFORMAZIONE DI UN PROVINO IN CALCESTRUZZO COSTITUITO DA AGGREGATI CALCAREI NON SIGILLATO. FONTE: KOTTAS E AL. (1979) 26

FIGURA 3-6 DIAGRAMMA SFORZO-DEFORMAZIONE DI UN PROVINO IN CALCESTRUZZO COSTITUITO DA AGGREGATI CALCAREI SIGILLATO. FONTE: KOTTAS E AL. (1979)..... 26

FIGURA 3-7 RESISTENZA A COMPRESSIONE IN FUNZIONE DELL'AUMENTO DI TEMPERATURA. CONFRONTO TRA CALCESTRUZZO LEGGERO, CON AGGREGATI CALCAREI E SILICEI DURANTE UN TEST CON SOLLECITAZIONE DI CARICO. FONTE: PHAN E AL. (2010)..... 27

FIGURA 3-8 RESISTENZA A COMPRESSIONE IN FUNZIONE DELL'AUMENTO DI TEMPERATURA. CONFRONTO TRA CALCESTRUZZO LEGGERO, CON AGGREGATI CALCAREI E SILICEI DURANTE UN TEST SENZA SOLLECITAZIONE DI CARICO. FONTE: PHAN E AL. (2010)..... 28

FIGURA 3-9 RESISTENZA A COMPRESSIONE IN FUNZIONE DELL'AUMENTO DI TEMPERATURA. CONFRONTO TRA CALCESTRUZZO LEGGERO, CON AGGREGATI CALCAREI E SILICEI DURANTE UN TEST SENZA SOLLECITAZIONE DI CARICO E INSEGUITO AL RAFFREDDAMENTO DEL PROVINO. FONTE: PHAN E AL. (2010) 29

FIGURA 3-10 MODULO DI ELASTICITÀ DI PROVINI IN CALCESTRUZZO IN RELAZIONE ALL'AUMENTO DI TEMPERATURA. FONTE: PHAN E AL. (2010) 29

FIGURA 3-11 ANDAMENTO DELLA RESISTENZA A TRAZIONE IN FUNZIONE DELL'AUMENTO DELLA TEMPERATURA. FONTE: BAMONTE (2014) 30

FIGURA 3-12 PROPRIETÀ MECCANICHE IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA. FONTE: BAMANONTE (2014) 30

FIGURA 3-13 MAPPE DI TEMPERATURA, CON ISOTERME IN FUNZIONE DELLA DISTANZA DALLA SUPERFICE ESPOSTA AL FUOCO. FONTE: BAMONTE (2014)..... 31
FIGURA 3-14 CONDUCIBILITÀ TERMICA DEL CALCESTRUZZO. 1) LIMITE SUPERIORE 2) LIMITE INFERIORE. FONTE: EN 1992-2..... 32
FIGURA 3-15 CONDUCIBILITÀ TERMICA DEL CALCESTRUZZO CONFEZIONATO CON CEMENTO PORTLAND, IN RELAZIONE ALL'AUMENTO DI TEMPERATURA. FONTE: HARMATHY E AL. (1973) 34
FIGURA 3-16 ANDAMENTO DEL VALORE DELLA DENSITÀ PER DIFFERENTI TIPOLOGIE DI CALCESTRUZZO. FONTE: SCHNEIDER E AL. (1981). 35
FIGURA 3-17 DIFFUSIVITÀ TERMICA DEL CALCESTRUZZO CALCAREO. FONTE: SCHNEIDER (1982). 36
FIGURA 3-18 DIFFUSIVITÀ TERMICA DEL CALCESTRUZZO SILICEO. FONTE: SCHNEIDER (1982). 36
FIGURA 4-1 SPALLING SUPERFICIALE E SPALLING ESPLOSIVO. FONTE: BASTAMI (2011). 38
FIGURA 4-2 ANDAMENTO DELLA PRESSIONE ALL'INTERNO DEGLI STRATI SUPERFICIALE DI UN ELEMENTO IN CALCESTRUZZO. PARAGONE TRA CALCESTRUZZO NORMALE E AD ALTA RESISTENZA. FONTE: KHOURY (2000)..... 42
FIGURA 4-3 "MOISTURE CLOG MODEL". VNEGONO EVIDENZIATE LE TRE DIFFERENTI ZONE DI VAPORE. DALL'ESTERNO ALL'INTENRO: ZONA ASCIUTTA, ZONA DI INTERFACCIA CON VAPORE LIBERO E ZONA COMPLETAMENTE SATURA. FONTE: KHOURY (2000) 43
FIGURA 4-4 VOLUME SFERICO CHE RAPPRESENTA IL MODELLO DI UN PORO. FONTE: AKHTARUZZAMAN (1973) 44
FIGURA 4-5 ILLUSTRAZIONE DEL PROCESSO TERMO-MECCANICO. FONTE: JANSSON (2013) 45
FIGURA 4-6 COMBINAZIONE DEL PROCESSO TERMO-IGROMETRICO E TERMO-MECCANICO. FONTE: KHOURY (2000) 46
FIGURA 4-7 SPALLING IN RELAZIONE DELLA VELOCITÀ DI RISCALDAMENTO. FONTE: KHOURY (2000). 48
FIGURA 4-8 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA IN FUNZIONE DEL TEMPO PER TUTTE LE TIPOLOGIE DI MISCELE TESTATE. IL NUMERO DOPO LA T INDICA LA DISTANZA IN MM DALLA SUPERFICIE RISCALDATA. FONTE: MINDEGUIA E AL. (2000) 56
FIGURA 4-9 ANDAMENTO DELLA PRESSIONE IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA PER DUE DIFFERENTI PROFONDITÀ. FONTE: PHAN (2008)..... 58
FIGURA 4-10 ANDAMENTO DELLA PRESSIONE A 25 MM DALLA SUPERFICIE RISCALDATA. FONTE: PHAN (2008) 58
FIGURA 4-11 ANDAMENTO DELLO SPALLING ESPLOSIVO IN FUNZIONE DEL CONTENUTO DI UMIDITÀ E DELLA TENSIONE, SVILUPPATO IN SEGUITO A CHRISTIAANSE. FONTE: KHOURY (2000)..... 59
FIGURA 4-12 ANDAMENTO DELLO SPALLING ESPLOSIVO IN FUNZIONE DEL CONTENUTO DI UMIDITÀ E DELLA TENSIONE, SVILUPPATO IN SEGUITO A ZHUKOV. FONTE: KHOURY (2000) 60
FIGURA 6-1 RELAZIONE TRA LA PERMEABILITÀ ALL'ACQUA E L'APERTURA DELLE FESSURE PER PROVINI SOTTO CARICO E IN SEGUITO ALL'APPLICAZIONE DEL CARICO. FONTE: WANG E AL. (2001)..... 70
FIGURA 6-2 EVOLUZIONE DELLA PERMEABILITÀ DI TRE DIFFERENTE CAMPIONI DI CALCESTRUZZO IN RELAZIONE ALLA TEMPERATURA. FONTE: NOUMOWE E AL. (2008) 71

FIGURA 6-3 PROVA A COMPRESSIONE: LEGAME COSTITUTIVO TENSIONE-DEFORMAZIONE. FONTE: TECNOLOGIA E PROPRIETÀ MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO. 72
FIGURA 6-4 PROVA A TRAZIONE. LEGAME TENSIONE-DEFORMAZIONE. FONTE: CARPINTERI (1995) 73
FIGURA 6-5 TENSIONE TRASMESSA ATTRAVERSO LA FESSURA IN FUNZIONE DELL'APERTURA. FONTE: CARPINTERI (1995) 74
FIGURA 6-6 SCHEMA DELLA TRAVE CARICATA SU TRE PUNTI. FONTE: UDAY (2017) 76
FIGURA 6-7 CARICO RESIDUO IN RELAZIONE ALLA DEFORMAZIONE PER VARIE TEMPERATURE. FONTE: NIELSEN E BICANIC (2013) 78
FIGURA 6-8 ANDAMENTO DELL'ENERGIA DI FRATTURA IN RELAZIONE ALL'AUMENTO DELLA TEMPERATURA. FONTE: NIELSEN E BICANIC (2013) 78
FIGURA 6-9 ENERGIA DI FRATTURA E AUMENTO DELLA TEMPERATURA. CONFRONTO TRA UN CALCESTRUZZO NORMALE E UN CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA. FONTE: NIELSEN E BICANIC (2013)..... 79
FIGURA 6-10 ANDAMENTO DELL'ENERGIA DI FRATTURA RELATIVA IN RELAZIONE ALL'AUMENTO DI TEMPERATURA. FONTE: NIELSEN E BICANIC (2013) 79
FIGURA 6-11 ENERGIA DI FRATTURA PER DIFFERENTI VALORI DI TEMPERATURA. FONTE: ZHANG E BICANIC (2006). 80
FIGURA 6-12 ENERGIA DI FRATTURA IN RELAZIONE LA PERCENTUALE DI PESO PERSO. FONTE: ZHANG E BICANIC (2006). 81
FIGURA 6-13 ENERGIA DI FRATTURA RESIDUA PER IL PROVINO COSTITUITO DALLA MISCELA 26C. FONTE: PENG E AL. (2007)..... 83
FIGURA 6-14 ENERGIA DI FRATTURA RESIDUA PER IL PROVINO RINFORZATO CON FIBRE IBRIDE COSTITUITO DALLA MISCELA 26H1. FONTE: PENG E AL. (2007)..... 83
FIGURA 7-1 RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DELLA VARIAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE CON IL VARIARE DEL RAPPORTO ACQUA/CEMENTO. FONTE: PROPRIETÀ STRUTTURALI DEL CALCESTRUZZO 88
FIGURA 7-2 ANDAMENTO DELLA PRESSIONE ALL'INTERNO DEI PORI IN FUNZIONE DEL RAPPORTO ACQUA/CEMENTO. FONTE: MINDEGUIAE AL. (2000)..... 90
FIGURA 7-3 GRADO DI SPALLING ESPLOSIVO IN FUNZIONE DEL RAPPORTO ACQUA/LEGANTE ALL'INTERNO DELLA MISCELA DI CALCESTRUZZO. FONTE: BASTAMI E AL. (2011) 91
FIGURA 7-4 VOLUME DI CALCESTRUZZO SOGGETTO AL FENOMENO DI SPALLING NEI PROVINI DI 150 MM. FONTE: KORTEN E WETZIG (2013)..... 92
FIGURA 7-5 VOLUME DI CALCESTRUZZO SOGGETTO AL FENOMENO DI SPALLING NEI PROVINI DI 300 MM. FONTE: KORTEN E WETZIG (2013)..... 92
FIGURA 7-6 FESSURAZIONI INDOTTE DAL GRADIENTE TERMICO. CONFRONTO TRA CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA CON E SENZA AGENTI CHIMICI AREANTI. FONTE: KHALIQ E WAHEED (2017). 102
FIGURA 7-7 MASSA RELATIVA PERSA IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA PER CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA CON E SENZA AGENTI CHIMICI AREANTI. FONTE: KHALIQ E WAHEED (2017)..... 103

FIGURA 7-8 PRISMI DI CALCESTRUZZO IN SEGUITO ALL'ESPOSIZIONE IN UNA FORNACE ALLA CURVA STANDARD DI FUCO ISO. A) M60; B) M60AE1; C) M60AE2. FONTE: RIELABORAZIONE PERSONALE DI D'ALOIA AL. (2013). 105
FIGURA 7-9 CALCESTRUZZO SENZA FIBRE, COMPOSTO DA CEMENTO AGGREGATI E RELATIVE ITZ. B) CONNESSIONI TRA LE REGIONI ITZ DEGLI AGGREGATI A CAUSA DELLA PRESENZA DELLE FIBRE IN POLIPROPILENE. FONTE: MAZZUCCO E AL. (2015)..... 112
FIGURA 7-10 CONNESSIONE DEI VUOTI. FONTE: MAZZUCCO E AL. (2015) 113
FIGURA 7-11 EFFETTI DEL RILASSAMENTO DELLE FIBRE IN POLIPROPILENE. FONTE: MAZZUCCO E AL. (2015). 113
FIGURA 7-12 CONNESSIONE DELLE MACRO-BOLLE D'ARIA. 1) PASTA DI CEMENTO; 2) MICRO-BOLLE D'ARIA; 3) FIBRE A TEMPERATURA AMBIENTE; 4) FIBRE ALLO STATO LIQUIDO. FONTE: MAZZUCCO E AL. (2015)... 114
FIGURA 7-13 EVOLUZIONE DELLO STATO DELLE FIBRE IN POLIPROPILENE. FONTE: MAZZUCCO E AL. (2015) .. 115
FIGURA 7-14 PERMEABILITÀ INTRINSECA A CONFRONTO IN PROVINI DI CALCESTRUZZO CON E SENZA FIBRE IN POLIPROPILENE 1,5 KG/M^3. FONTE: ZEIML E AL. (2006). 117
FIGURA 7-15 VOLUME TOTALE DEI PORI IN RELAZIONE A DIFFERENTI TEMPERATURE. CONFRONTO TRA CALCESTRUZZO CON E SENZA FIBRE IN POLIPROPILENE 1,5 KG/M^3. I QUADRATI RAPPRESENTANO I VALORI MEDI, MENTRE I SEGMENTI IN LINEA CONTINUA I VALORI MASSIMI E MINIMI. FONTE: ZEIML E AL. (2006). 118
FIGURA 7-16 VOLUME TOTALE DEI PORI CON UN DETERMINATO VALORE DI RAGGIO. CONFRONTO TRA CALCESTRUZZO CON E SENZA FIBRE IN POLIPROPILENE 1,5 KG/M^3. I QUADRATI RAPPRESENTANO I VALORI MEDI, MENTRE I SEGMENTI IN LINEA CONTINUA I VALORI MASSIMI E MINIMI. FONTE: ZEIML E AL. (2006). 118
FIGURA 7-17 RAPPRESENTAZIONE DELLA DIFFERENZA TRA LA PRODUZIONE E IL PASSAGGIO DEL VAPORE ACQUEO ATTRAVERSO LA SEZIONE DELL'ELEMENTO IN CALCESTRUZZO SENZA FIBRE IN POLIPROPILENE. FONTE: ZEIML E AL. (2006). 120
FIGURA 7-18 RAPPRESENTAZIONE DELLA DIFFERENZA TRA LA PRODUZIONE E IL PASSAGGIO DEL VAPORE ACQUEO ATTRAVERSO LA SEZIONE DELL'ELEMENTO IN CALCESTRUZZO CON FIBRE IN POLIPROPILENE. FONTE: ZEIML E AL. (2006). 120
FIGURA 7-19 PERCENTUALE DI MATERIALE SOGGETTO AL FENOMENO DI SPALLING IN FUNZIONE DEL DIAMETRO DELLA SFERA E DELLA QUANTITÀ DI FIBRE INSERITE NELLA MISCELA. FONTE: DEBICKI E AL. (2012)..... 122
FIGURA 7-20 PROVINI IN SEGUITO AL FENOMENO DI SPALLING. SFERE SENZA AGGIUNTA DI FIBRE IN PP DI VARIO DIAMETRO A) 0,12 M; B) 0,18 M; C) 0,24 M. FONTE: DEBICKI E AL. (2012)..... 122
FIGURA 7-21 MASSA PERSA DAI PROVINI IN PROVINI DI CALCESTRUZZO COSTITUITI DA VARI TIPI DI FIBRE CON DIVERSE LUNGHEZZE IN RELAZIONE AL NUMERO NL^{3}K. FONTE: HEO E AL. (2012)..... 124
FIGURA 7-22 DIAGRAMMA CHE MOSTRA L'ANDAMENTO DEL COEFFICIENTE DI FORMA. FONTE: HEO E AL. (2012). 125
FIGURA 7-23 EFFETTO DEL FATTORE DI FORMA DELLE FIBRE SULLA LAVORABILITÀ DEL CALCESTRUZZO, IN RELAZIONE AL LORO CONTENUTO PERCENTUALE. FONTE: CHANH (2013). 129

FIGURA 7-24 DIAGRAMMA SFORZO-DEFORMAZIONE DURANTE UNA PROVA DI COMPRESSIONE PER UN CALCESTRUZZO RINFORZATO CON FIBRE IN ACCIAIO. FONTE: CHANH (2013). 130
FIGURA 7-25 INFLUENZA DEL CONTENUTO DI FIBRE IN ACCIAIO SULLA RESISTENZA A TRAZIONE. FONTE: CHANH (2013). 130
FIGURA 7-26 ENERGIA DI FRATTURA PER 5 TIPOLOGIE DI CALCESTRUZZO PRIMA E DOPO ESSERE STATI ESPOSTI AD ALTE TEMPERATURE. FONTE: PENG E AL. (2006). 132
FIGURA 7-27 MODELLO PER LA DESCRIZIONE DELLO SPALLING IN SEGUITO AL PROCESSO TERMO-IGROMETRICO. A) PRIMA E B) DOPO DELL'ESPULSIONE DEL FRAMMENTO. FONTE: ZEIML E AL. (2008)..... 135
FIGURA 7-28 APPROSSIMAZIONE GEOMETRICA DELLE PROPRIETÀ DEL FRAMMENTO GENERICO DI CALCESTRUZZO ESPOSTO AL FENOMENO DI SPALLING. FONTE: ZEIML E AL. (2008). 137
FIGURA 7-29 A) ENERGIA CINETICA E B) VELOCITÀ ASSOCIATE AL PROCESSO TERMO-IGROMETRICO IN FUNZIONE DELLO SPESSORE D DEL FRAMMENTO E DELLA PRESSIONE DI VAPORE ALL'INTERNO DEI PORI PER TRE DIFFERENTI VALORI DI TEMPERATURA. FONTE: ZEIML E AL. (2008). 137
FIGURA 7-30 A) ENERGIA CINETICA E B) VELOCITÀ ASSOCIATE AL PROCESSO TERMO-IGROMETRICO IN FUNZIONE DELLO SPESSORE D DEL FRAMMENTO E DELLA PRESSIONE DI VAPORE ALL'INTERNO DEI PORI PER TRE DIFFERENTI VALORI DI TEMPERATURA. FONTE: ZEIML E AL. (2008). 138
FIGURA 7-31 SPALLING ESPLOSIVO PER PROVINI IN CALCESTRUZZO RINFORZATO CON 1,0%V DI FIBRE CORTE IN ACCIAIO IN SEGUITO ALL'ESPOSIZIONE AD UNA TEMPERATURA MASSIMA DI 800 °C. FONTE:CZOBOLY E AL. (2016) 140
FIGURA 8-1 FIBRE IN POLIPROPILENE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 152
FIGURA 8-2 PROVINO 300X150 MM IN CASSEFORME DI PVC, MARCHIATA CON LA TIPOLOGIA DELLA MISCELA. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 166
FIGURA 8-3 STOCCAGGIO DEI PROVINI ALL'INTERNO DEL LABORATORIO IN SANDPOINT. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 166
FIGURA 8-4 RICONTROLLO DEI PROVINI. ASSEGNAZIONE DELLA MISCELA. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 167
FIGURA 8-5 DIMOSTRAZIONE POTENZA DEL FORNO. FONTE: FOTOGRAFIA, ELABORAZIONE PERSONALE, WPI. 170
FIGURA 8-6 LANA ISOLANTE PER ELEVATE TEMPERATURE, KAOWOOL. FONTE: SCHEDA TECNICA. 170
FIGURA 8-7 CHIUSURA FORNO. FONTE: FOTOGRAFIA, ELABORAZIONE PERSONALE, WPI. 171
FIGURA 8-8 SISTEMA ELETTRONICO PER IL CONTROLLO DELL'ALIMENTAZIONE. FONTE: FOTOGRAFIA, ELABORAZIONE PERSONALE, WPI. 172
FIGURA 8-9 METODO DI ACCENSIONE DEL FORNO. FONTE: FOTOGRAFIA, ELABORAZIONE PERSONALE, WPI. . 173
FIGURA 8-10 CURVA TEMPO-TEMPERATURA ASTM E-119. FONTE: ASTM E-119 173
FIGURA 8-11 INTERFACCIA DEL PROGRAMMA PER GESTIRE LA VENTILAZIONE. FONT: FOTOGRAFIA, ELABORAZIONE PERSONALE, WPI. 174
FIGURA 8-12 POSIZIONAMENTO DEI CILINDRI ALL'INTERNO DEL FORNO. FONTE: FOTOGRAFIA, ELABORAZIONE PERSONALE, WPI. 175

FIGURA 8-13 REGISTRAZIONE DEL PESO. FONTE: FOTOGRAFIA, ELABORAZIONE PERSONALE, WPI. 176
FIGURA 8-14 DISPOSIZIONE DELLE TERMOCOPPIE ALL'INTENRO DEL FORNO. FONTE: FOTOGRAFIA, ELABORAZIONE PERSONALE, WPI. 180
FIGURA 8-15 CONFRONTO TRA L'ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE REGISTRATO DALLE TERMOCOPPIE E L'ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA ALL'INTERNO DEL FORNO. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 181
FIGURA 8-16 MEDIA CORRETTA.FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 183
FIGURA 8-17 CONFRONTO TRA LA MEDIA DELLE TEMPERATURE REGISTRATE E L'ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA ALL'INTERNO DEL FORNO. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 184
FIGURA 8-18 CONFRONTO TRA LA MEDIA DELLE TEMPERATURE REGISTRATE ALL'INTERNO DEL FORNO E LA CURVA STANDARD ASTM E-119. FONTE: WPI. 185
FIGURA 8-19 L'ANDAMENTO COMPLETO DELLA TEMPERATURA ALL'INTERNO DEL FORNO NEI PRIMI 90 MINUTI. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 186
FIGURA 8-20 RAFFREDDAMENTO DEL FORNO. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 187
FIGURA 8-21 REGISTRAZIONE DEL MOMENTO IN CUI LA TERMOCOPPIA REGISTRA LA TEMPERATURA DELL'ARIA ALL'INTERNO DEL FORNO. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 188
FIGURA 8-22 RAPPRESENTAZIONE DEI MASSIMI DELLE TEMPERATURE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE ... 190
FIGURA 8-23 PERDITA DI MASSA (%) – A/C. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 197
FIGURA 8-24 PERDITA DI MASSA(%)-VUOTI D'ARIA (%). FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 198
FIGURA 8-25 PERDITA DI MASSA(%)-FIBRE (LB). FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 199
FIGURA 8-26 % DI MASSA PERSA-RAPPORTO A/C. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 202
FIGURA 8-27 % DI MASSA PERSA-VUOTI ARIA. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 203
FIGURA 8-28 MEDIA % DI MASSA PERSA A-B. RUN 1-4. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 205
FIGURA 8-29 MEDIA % DI MASSA PERSA A-B. RUN 2-5. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 206
FIGURA 8-30 MEDIA % DI MASSA PERSA A-B. RUN 3-6. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 208
FIGURA 8-31 % DI MASSA PERSA-RAPPORTO A/C. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 210
FIGURA 8-32 % DI MASSA PERSA-VUOTI D'ARIA %. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 211
FIGURA 8-33 % DI MASSA PERSA-QUANTITÀ FIBRE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 211
FIGURA 8-34 RAPPRESENTAZIONE DELLA PERDITA DI MASSA IN RELAZIONE AL TEMPO DI ESPOSIZIONE AD ALTE TEMPERATURE. FONTE: MINDEGUIA E AL. (2000) 212
FIGURA 8-35 RAPPRESENTAZIONE DELLA PERDITA DI MASSA IN RELAZIONE AL TEMPO DI ESPOSIZIONE AD ALTE TEMPERATURE. FONTE: KHALIQ E WAHEED (2017) 213
FIGURA 8-36 RAPPRESENTAZIONE DELLA PERDITA DI MASSA IN RELAZIONE AL TEMPO DI ESPOSIZIONE AD ALTE TEMPERATURE. FONTE: DEBICKI E AL. (2012) 214
FIGURA 8-37 PROVINO 3B.FONTE: FOTO. ELABORAZIONE PERSONALE, WPI 222
FIGURA 8-38 PROVINI SOGGETTI AD EXPLOSIVE SPALLING. FONTE: HEO (2012) 223
FIGURA 8-39 PROVINO 7B. FONTE: FOTO. ELABORAZIONE PERSONALE, WPI 223

FIGURA 8-40 PROVINO 7A. FONTE: FOTO. ELABORAZIONE PERSONALE, WPI..... 224
FIGURA 8-41FONTE: FOTO. PROVINO 12B.ELABORAZIONE PERSONALE, WPI 225
FIGURA 8-42 PROVINO 1B. FONTE: FOTO. ELABORAZIONE PERSONALE, WPI..... 225
FIGURA 8-43PROVA A COMPRESSIONE PROVINO 1A. FONTE: FOTO. ELABORAZIONE PERSONALE, WPI..... 226
FIGURA 8-44 PROVA A COMPRESSIONE PROVINO1B. FONTE: FOTO. ELABORAZIONE PERSONALE, WPI 227
FIGURA 8-45 RESISTENZA A COMPRESSIONE FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 229
FIGURA 8-46 COMPRESSIVE STRENGHT-W/C. FONTE:ELBORAZIONE PERSONALE..... 230
FIGURA 8-47 COMPRESSIVE STRENGHT-VUOTI ARIA. FONTE:ELBORAZIONE PERSONALE 231
FIGURA 9-1 RAPPRESENTAZIONE DELLA ROTTURA CORRETTA DI UN PROVINO CILINDRICO DI CALCESTRUZZO. FONTE: MATERIALE CALCESTRUZZO. UNIVERSITÀ FIRENZE 234
FIGURA 9-2 RAPPRESENTAZIONE DELLE ROTTURE NON ACCETTATE DI PROVINI CILINDRICI IN CALCESTRUZZO. FONTE: MATERIALE CALCESTRUZZO. UNIVERSITÀ FIRENZE 235
FIGURA 9-3 RAPPRESENTAZIONE DELL'ANDAMENTO DELLA CURVA SFORZO-DEFORMAZIONE PER DIVERSE TIPOLOGIE DI CALCESTRUZZO. FONTE: MATERIALE CALCESTRUZZO. UNIVERSITÀ FIRENZE..... 236

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1-1 CARATTERISTICHE DELLE 12 MISCELE OGGETTO DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 4

TABELLA 3-1 COMPORTAMENTO AL FUOCO DI DIVERSI MATERIALI MESSI A CONFRONTO. FONTE: "ASSOCIAZIONE ITALIANA PRODUTTORI ADDITIVI E PRODOTTI PER CALCESTRUZZO" RIELABORAZIONE DEI DATI PERSONALE. 18

TABELLA 3-2 TRASFORMAZIONI FISICO-CHIMICHE E COLORAZIONI NEL CALCESTRUZZO ESPOSTO AD ELEVATE TEMPERATURE. FONTE: ELABORAZINE DEI DATI PERSONALE DA GIACALONE (2011). 23

TABELLA 4-1 CONTENUTO DI UMIDITÀ DOPO 28 GIORNI DI MATURAZIONE. FONTE: RIELABORATA DA KHOURY (2000) 49

TABELLA 4-2 COMPOSIZIONE DELLA MISCELA (KG), RESISTENZA A COMPRESSIONE, PERMEABILITÀ E CONTENUTO INIZIALE DI ACQUA DEI PROVINI SOTTOPOSTO A TEST. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE DA MINDEGUIA E AL. (2000) 54

TABELLA 4-3 COMPOSIZIONE DELLE MISCELE DI CALCESTRUZZO DEI PROVINI SOTTOPOSTI A TEST. FONTE: RIELABORAZIONE DA MINDEGUIA E AL. (2000) 55

TABELLA 7-1 CARATTERISTICHE DELLE 12 MISCELE OGGETTO DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 85

TABELLA 7-2 VARIAZIONE DEL RAPPORTO ACQUA/CEMENTO ALL'INTERNO DELLE 12 MISCELE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 87

TABELLA 7-3 VARIAZIONE DELLA % DI VUOTI D'ARIA ALL'INTERNO DELLE MISCELE DI CALCESTRUZZO. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 95

TABELLA 7-4 COMPOSIZIONE MISCELA CALCESTRUZZO E INDICAZIONE DEL GRADO DI SPALLING. FONTE: RIELABORAZIONE PERSONALE DI D'ALOIA E AL. (2013). 104

TABELLA 7-5 QUANTITÀ DI FIBRE IN POLIPROPILENE UTILIZZATE ALL'INTERNO DELLE MISCELE N.4-5-6. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 108

TABELLA 7-6 PROPORZIONI ALL'INTENRO DELLA MISCELA. FONTE: RIELABORAZIONE PERSONALE DA DEBICKI E AL. (2012) 121

TABELLA 7-7 QUANTITÀ DI FIBRE ALL'INTERNO DELLE DIVERSE MISCELE. FONTE: RIELABORAZIONE PERSONALE DA PENG E AL. (2006) 131

TABELLA 7-8 UITLIZZO DELLE FIBRE ALL'INTERNO DELLE DIVERSE MISCELE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE DA CZOBOLY E AL. (2016). 139

TABELLA 8-1 IPOTESI DI REAZIONE AL FENOMENO DI SPALLING. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 146

TABELLA 8-2VARIAZIONE DEL RAPPORTO ACQUA/CEMENTO. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 147

TABELLA 8-3 VARIAZIONE DELLE FIBRE IN POLIPROPILENE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 148

TABELLA 8-4 GRAVITÀ SPECIFICA. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE DEI DATI FORNITI DA LAFARGE. 150

TABELLA 8-5 CAPACITÀ DI ASSORBIMENTO DEGLI AGGREGATI ALL'INTERNO DELLA MISCELA IN CALCESTRUZZO. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE DEI DATI FORNITI DA LAFARGE. 151
TABELLA 8-6 DOSAGGIO CONSIGLIATO DA SCEHDE TECNICHE PER AGENTE CHIMICO AREANTE E FLUIDIFICANTE. FONTE: SCHEDE TECNICHE BESTON. 151
TABELLA 8-7 PROPRIETÀ FISICHE DELLE FIBRE IN POLIPROPILENE UTILIZZATE ALL'INTERNO DELLA MISCELA IN CALCESTRUZZO. FONTE: SCHEDA TECNICA MASTERFIBER® MAC 2200 CB. 152
TABELLA 8-8 CARATTERISTICA E COMPOSIZIONE DELLE MISCELE OGGETTO DI STUDIO. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE A PARTIRE DAI FOGLI DI CALCOLO EXCEL RELATIVI AL MIX DESIGN FORNITI DAL CONCRETE LAB DI SEATTLE 153
TABELLA 8-9 CARATTERISTICHE DELLE 12 MISCELE OGGETTO DELLA CAMPAGNA SPERIMENALE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 165
TABELLA 8-10 ORGANIZZAZIONE PROVINI SERIA A. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 169
TABELLA 8-11 ORGANIZZAZIONE PROVINI SERIA B. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 169
TABELLA 8-12 CALCOLO DEI VALORI MASSIMI DELLA TEMPERATURA REGISTRATA. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 182
TABELLA 8-13 CONDIZIONE DI ACCETTABILITÀ O NON DEI VALORI REGISTRATI. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 182
TABELLA 8-14 TEMPERATURE MASSIME. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 189
TABELLA 8-15 PERCENTUALE DELLA PERDITA DI MASS RELATIVA ALLA SERIE A. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 195
TABELLA 8-16 CLASSIFICA RELATIVA ALLA PERDITA DI MASSA. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 196
TABELLA 8-17 % DI MASSA PERSA-RAPPORTO A/C. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 196
TABELLA 8-18 PERDITA DI MASSA(%)-VUOTI D'ARIA (%). FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 198
TABELLA 8-19 PERCENTUALE DELLA PERDITA DI MASS RELATIVA ALLA SERIE B. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 200
TABELLA 8-20 CLASSIFICA RELATIVA ALLA PERDITA DI MASSA. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 201
TABELLA 8-21 % DI MASSA PERSA-RAPPORTO A/C. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 201
TABELLA 8-22 % DI MASSA PERSA-% VUOTI ARIA. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 202
TABELLA 8-23 CONFRONTO A-B. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE 204
TABELLA 8-24 MEDIA % DI MASSA PERSA A-B. RUN 1-4. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 204
TABELLA 8-25 MEDIA % DI MASSA PERSA A-B. RUN 2-5. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 206
TABELLA 8-26 MEDIA % DI MASSA PERSA A-B. RUN 3-6. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 207
TABELLA 8-27 MEDIA % DI MASSA PERSA A-B. RUN 3-6. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 209
TABELLA 8-28 % PERDITA DI MASSA- RAPPORTO A/C. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 209
TABELLA 8-29 % PERDITA DI MASSA- VUOTI ARIA. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 210
TABELLA 8-30 COMPOSIZIONE DELLE MISCELE DI CALCESTRUZZO. VARIAZIONE DEL RAPPORTO A/C. FONTE: RIELABORAZIONE PERSONALE DEI DATI DA MINDEGUIA E AL. (2000) 212

TABELLA 8-31 COMPOSIZIONE DELLE MISCELE DI CALCESTRUZZO. VARIAZIONE DELLA % DI VUOTI. FONTE: RIELABORAZIONE PERSONALE DEI DATI DA KHALIQ E WAHEED (2017) 213
TABELLA 8-32 COMPOSIZIONE DELLE MISCELE DI CALCESTRUZZO. VARIAZIONE DELLA QUANTITÀ DI FIBRE. FONTE: RIELABORAZIONE PERSONALE DEI DATI DA DEBICKI (2012) 214
TABELLA 8-33 RESISTENZA A COMPRESSIONE. FONTE: ELABORAZIONE PERSONALE. 228
TABELLA 8-34 COMPRESSIVE STRENGHT-W/C. FONTE:ELBORAZIONE PERSONALE 230
TABELLA 8-35 COMPRESSIVE STRENGHT-VUOTI ARIA. FONTE: ELBORAZIONE PERSONALE 231

Abstract

Il fenomeno di spacco esplosivo, in inglese *explosive spalling*, che viene descritto da Khoury and Anderberg (2000) come un distaccamento, violento e non, di strati e frammenti di materiale dalla faccia di un elemento strutturale in calcestruzzo nel momento in cui questa viene esposta ad alte velocità di riscaldamento e temperature, è stato ampiamente studiato all'interno dell'elaborato, analizzando le cause e le conseguenze che provoca sull'elemento. La causa principale del fenomeno esplosivo risulta essere la combinazione di un processo igrometrico e di un processo meccanico. All'interno della matrice cementizia le elevate quantità di vapore accumulate, non in grado di evadere dalla sezione dell'elemento, originano elevati valori di pressione sulla superficie dei pori, raggiungendo e superando la resistenza a trazione del calcestruzzo. Parallelamente a questo fenomeno, si generano sforzi di compressione, dovuti ai gradienti termici. L'unione di questi due eventi porta all'espulsione violenta dello strato superficiale dell'elemento.

Punto fondamentale di questo studio è stato osservare ed analizzare singolarmente come il rapporto acqua/cemento, la percentuale di aria e la presenza di fibre all'interno del materiale possano influire sul livello di permeabilità della sezione e quindi sull'avvenimento o meno del fenomeno degradante di spalling. Per fare questo si sono studiate dodici differenti tipi di miscele di calcestruzzo.

Durante le prove sperimentali, condotte all'interno di un Fire Lab, sono stati testati 24 cilindri di calcestruzzo, con dimensioni d=150 mm e h=300 mm. Questi sono stati sottoposti a una curva di fuoco standard ASTM E-119 per la durata di 90 minuti raggiungendo i 1850 °F all'interno di un forno alimentato a gas propano.

I dati acquisiti prima, dopo e durante i test sono stati: la misurazione del peso iniziale e finale del provino, il monitoraggio costante della temperatura

superficiale durante tutto il periodo di esposizione al fuco e durante le 8 ore seguenti, documentazione fotografica per analizzare i danni riportati e infine il calcolo della resistenza media a compressione attraverso prova distruttiva.

Risultato sorprendente è stato quello di osservare che tutti i cilindri mostrano una percentuale relativa alla massa persa che va da un minimo di 6,8 % a un massimo del 9,8 %. In quanto non si è verificato il distaccamento di grandi porzioni di materiale solido, questo valore fa riferimento solo all'evaporazione dell'acqua presente all'interno della sezione. Il fenomeno di spalling si è verificato solo in forma molto leggera ed ha coinvolto esclusivamente la parte superficiale di alcuni provini. Questo risultato mostra in maniera chiara ed evidente che l'alta permeabilità della sezione ha svolto un ruolo fondamentale in tutte le tipologie di miscele, permettendo al vapore di evadere dalla sezione senza comportare un grave danneggiamento.

Parole chiave: spalling, resistenza, fuoco, calcestruzzo, fibre, aria.

Abstract

The explosive spalling phenomenon, described by Khoury and Anderberg (2000) as a violent or non-violent detachment of the surface layers and fragments of material from the face of a concrete structural element when exposed to high temperatures and rapid rates of heating, it has been studied within the elaborate, analyzing the causes and the consequences it causes on the element. The main cause of this explosive phenomenon is the combination of a hygrometric process and a mechanical process. Within the cement matrix, the high quantities of accumulated steam are unable to escape from the section of the element, give rise to high pressure values on the surface of the pores, reaching and exceeding the tensile strength of the concrete. Parallel to this phenomenon, compression stresses are generated, due to thermal gradients. The combination of these two events leads to the violent expulsion of the surface layer of the element.

The fundamental purpose of this study was to observe and analyze individually how the water/cement ratio, the percentage of air and the presence of fibers inside the material can affect the permeability level of the section and therefore on the occurrence or otherwise of the degrading phenomenon of spalling. To do this, twelve different types of concrete mixtures were studied.

During the experimental tests, conducted inside a Fire Lab, a total of 24 cylinders of concrete were tested, with dimensions d = 150 mm and h = 300 mm. These were subjected to a standard ASTM E-119 fire curve for the duration of 90 minutes, reaching 1850 ° F in an oven powered by propane gas.

The data acquired before, after and during the tests were: the measurement of the initial and final weight of the specimen, the constant monitoring of the superficial temperature during the entire period of

exposure to the fire and for the following 8 hours post firing, photographic documentation to analyze the resulting damage and finally the calculation of the average compressive strength throughout destructive testing.

The resulting data indicate that all of the cylinders show a percentage relative to the mass loss ranging from a minimum of 6.8% to a maximum of 9.8%. As the detachment of large portions of solid material did not occur, this value refers only to the evaporation of the water present inside sample cylinder. The spalling phenomenon occurred only in very light form and impacted only the superficial part of some specimens. This result shows clearly that the high permeability of the concrete matrix is a determining factor in all types of mixtures, allowing steam to escape from the section avoid catastrophic damage.

Parole chiave: spalling, fire resistence, concrete, fibers, air.

1 Introduzione

Il calcestruzzo risulta essere un materiale che presenta un'elevata resistenza nel caso in cui venga esposto ad alte temperature. È incombustibile, non aumenta il carico d'incendio e ha un'eccellente capacità termica che rallenta in maniera significativa la diffusione del calore attraverso la sezione dell'elemento. In molteplici casi presenta ottime proprietà di resistenza al fuoco, rappresentando un'ideale soluzione per la sicurezza di persone, di cose e dell'ambiente circostante. Funzioni principali sono la protezione dei ferri d'armatura dalla temperature elevate, ritardando e impedendo crolli strutturali, e la protezione delle vie di fuga, garantendo requisiti di sicurezza durante lo sviluppo dell'incendio. Si evince che per numerosi motivi economici, pratici, architettonici e di resistenza al fuoco il calcestruzzo risulta essere uno dei materiali più ampiamente utilizzati all'interno del mondo dell'edilizia. Tuttavia, il suo comportamento non deve essere dato per scontato, in quanto risulta essere un materiale molto complesso ed eterogeneo. Il verificarsi di un incendio comporta un elevato rischio per la capacità portante di una struttura e le sue proprietà (meccaniche, termiche, fisiche e chimiche) tendono a cambiare velocemente in un processo irreversibile nel momento in cui esposte a temperature elevate. L'effetto principale del fuoco sul calcestruzzo è il dannoso fenomeno dello spacco esplosivo, in inglese explosive spalling. Questo viene descritto come il distacco in maniera improvvisa e intensa di frammenti dalla superficie dell'elemento esposto ad elevate temperature. Tra le numerose tipologie di spalling, essa risulta essere la più pericolosa e più violenta ed è proprio su questa modalità che si è focalizzata la ricerca in questione. A seguito di questo evento, infatti, si può avere un drastico cambiamento della sicurezza strutturale prevista durante la fase di

progetto con una conseguente riduzione del livello di sicurezza al fuoco garantito dalla struttura oggetto d'esame. Questo fenomeno può portare alla completa disintegrazione dell'elemento, con un distacco repentino del materiale e con un notevole dissipamento di energia già in una fase iniziale dell'esposizione al fuoco, nonché a una riduzione (o in alcuni casi annullamento) del copriferro delle armature. Inoltre può provocare gravi danni all'ambiente circostante, come per esempio il rompersi delle finestre, facendo sì che nuove quantità di ossigeno alimentino il fuoco, e danni agli operatori addetti allo spegnimento, ostacolando così le procedure per l'estinzione dell'incendio. Il fatto che non si sia ancora in grado di prevedere con massima accuratezza il fenomeno di spalling in tutte le sue forme, fa sì che ci siano numerosi problemi e complicazioni nello sviluppo di un modello impeccabile e saldo per la valutazione della risposta al fuoco delle strutture in cemento armato. Nella maggior parte dei casi si manifesta nella prima mezz'ora di un incendio, con temperature che sono comprese tra i 250 ed i 400 °C. Ma rimane pur sempre un fenomeno altamente stocastico, in funzione delle condizioni ambientali e delle caratteristiche fisico-chimiche del calcestruzzo, e richiede quindi la determinazione di numerose variabili.

La causa principale del fenomeno risulta essere la combinazione di un processo igrometrico e di un processo meccanico. Gli sforzi sviluppati all'interno del calcestruzzo soggetto a fuoco sono dati dalla somma di entrambi i contributi, ovvero uno sforzo di trazione generato dalla pressione nei pori σ_p, e uno di compressione dovuto al gradiente termico σ_t. Fattori determinanti legati al fenomeno esplosivo sono quindi la presenza di umidità all'interno della sezione e il livello di permeabilità. Metodo per evitare il fenomeno è riuscire ad ottenere un alto livello di permeabilità della sezione in modo da permettere al vapore di uscire velocemente dalla sezione evitando così l'insorgere di elevate pressioni.

Principali metodi utilizzati sono:

- l'alta percentuale di vuoti d'aria all'interno della sezione: grazie alla creazione di un fitto sistema di microbolle o pori interconnessi tra loro, il vapore che si crea all'interno della sezione ha maggiori possibilità di evadere dalla sezione di calcestruzzo, non

raggiungendo così alti valori di pressione, dovuti al suo costipamento.

- utilizzo di fibre in polipropilene: con l'aumentare della temperatura nel calcestruzzo rinforzato con le microfibre, le fibre in polipropilene si ammorbidiscono e iniziano a fondersi a causa di un progressivo cambiamento di fase che inizia a circa 150 °C quando la cristallinità comincia a rompersi e si completa a circa 200 °C. È proprio questa fusione che facilita la riduzione delle sollecitazioni interne nel calcestruzzo attraverso la connessione di tutte le regione porose all'interno della matrice cementizia con l'esterno, annullando così il fenomeno si spalling.
- utilizzo di fibre ibride: per questa tipologia di fibre, ovvero la combinazione di fibre in polipropilene con fibre di acciaio, si è scelto di scrivere solo un breve riferimento anche se non sono state oggetto di studio, in quanto la loro sinergia può offrire importanti risultati nella diminuzione del fenomeno esplosivo, andando ad agire sull'energia cinetica del frammento di calcestruzzo espulso.
- l'innalzamento del rapporto acqua/legante: si può dire che aumentando il rapporto acqua/cemento si ha una netta diminuzione della pressione all'interno del sistema di pori. Questo genera una maggiore facilità al vapore nell'uscire dalla sezione di calcestruzzo, portando così a una diminuzione degli sforzi e un abbattimento del rischio di spalling.

Tipologia più suscettibile al fenomeno di spalling risulta essere quella dei calcestruzzi ad alta resistenza, che mostrano ottime prestazioni strutturali con un'elevata classe di resistenza (anche se molto fragili) ma scarse dal punto di vista di resistenza al fuoco. Questi presentano un basso livello di permeabilità, a causa dell'elevata densità della materia in relazione al basso rapporto a/c e alla minore dimensione dei pori.

1.1 Significato del lavoro svolto

L'elaborato oggetto di discussione si posiziona all'interno del progetto "How the water/binder ratio and voids affect the performances of hardened concrete subjected to fire" commissionato dal Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). L'obiettivo principale di questo studio è quello di ottimizzare la composizione del calcestruzzo al fine di ottenere la massima resistenza in combinazione con la migliore resistenza al fuoco e con un'elevata duttilità post-picco di frattura. Novità di questa ricerca è lo studio su entrambe le proprietà con la possibilità di incrementare notevolmente la tecnologia del calcestruzzo ed ottenere standard di sicurezza molto più elevati anche in condizioni estreme.

Per lo studio sono state create 12 miscele differenti, confezionate in modo da avere una buona variazione del rapporto acqua/legante, della percentuale di vuoti d'aria e del contenuto di fibre in polipropilene.

Tabella 1-1 Caratteristiche delle 12 miscele oggetto della campagna sperimentale. Fonte: Elaborazione personale

Mix calcestruzzo	*Rapporto acqua/cemento*	*Vuoti d'aria (%)*	*Contenuto fibre (Kg/m³)*
1	0,3	5	0
2	0,3	10	0
3	0,3	15	0
4	0,3	5	2
5	0,3	10	2
6	0,3	15	2
7	0,4	5	0
8	0,4	10	0
9	0,4	15	0
10	0,5	5	0
11	0,5	10	0
12	0,5	15	0

Grazie all'utilizzo di queste caratteristiche e alla loro reciproca interazione si riesce a incrementare drasticamente la resistenza al fuoco

dell'elemento in calcestruzzo, andando ad aumentare la permeabilità della sezione.

In questo elaborato si è svolto in maniera dettagliata l'analisi della parte relativa alla resistenza al fuoco del calcestruzzo con particolare attenzione al fenomeno di spalling esplosivo. Le miscele di calcestruzzo oggetto di studio sono state testate ad elevate temperature all'interno del Fire Lab nel Worcester Polytechnic Institute (WPI). Obiettivo principale, è stato osservare il diverso comportamento delle miscele e mettere in relazione i dati ottenuti tra di loro per riuscire a trovare la miscela con il miglior comportamento ad elevate temperature. Strumenti utilizzati per confrontare il comportamento delle miscele tra di loro sono stati il calcolo della perdita di massa, l'analisi della temperatura superficiale del provino e il calcolo della resistenza media a compressione in seguito all'esposizione ad elevate temperature. Particolarità all'interno dello studio è stata anche quella di osservare attentamente il comportamento delle miscele con un'alta percentuale di vuoti, fino al 15%. In caso di risultati positivi, l'applicazione nel mondo delle costruzioni di questa tipologia di calcestruzzo caratterizzata da un così alto contenuto d'aria risulterebbe una vera innovazione in quanto fino ad ora è stata scarsamente utilizzata, (nella maggior parte dei casi un valore massimo di aria pari al 6-8 %).

Una seconda parte di studi, non trattata all'interno di questo elaborato, consisterà nel testare la resistenza a compressione e ricavare l'analisi della curva carico-deformazione. In seguito, attraverso un'analisi dei dati si avrà così un confronto tra proprietà meccaniche e resistenza al fenomeno di spalling. Ovviamente lo scopo sarà quello di trovare una combinazione che permetta di ottenere il massimo risultato in entrambi i campi, al fine di ottenere elevate proprietà di resistenza a compressione e un ottimo comportamento al fuoco.

1.2 Suddivisione della tesi

Una prima sezione fornisce un'introduzione riguardo gli argomenti oggetto di studio.

I Capitoli 2-3 offrono un'ampia analisi del fenomeno incendio e di come il materiale calcestruzzo reagisce se sottoposto ad elevate temperature, con particolare riferimento alle proprietà chimiche, fisiche, meccaniche e termiche. All'interno del Capitolo 4 si è analizzato il fenomeno esplosivo dello "spalling" andando ad indagare le principali teorie riguardo alle cause del fenomeno (processo termo-igrometrico, processo termo-meccanico e combinazione dei due), i fattori che lo influenzano, le conseguenze sull'elemento di calcestruzzo colpito e i principali modelli di previsione utilizzati. Il Capitolo 5 analizza in particolare il comportamento dei calcestruzzi ad alta resistenza (AR), in quanto risultano la tipologia più colpita dal fenomeno esplosivo. Il Capitolo 6 invece si concentra sui parametri che più influenzano la comparsa o meno del fenomeno di spalling: ovvero la permeabilità e l'energia di frattura.

A questa prima sezione seguono due ampie parti:

Parte 1. Analisi della letteratura scientifica con l'obiettivo di approfondire le tecniche di progettazione che si possono attuare per evitare il fenomeno esplosivo di "spalling" ed aumentare la resistenza al fuoco dell'elemento. Queste sono l'aumento del rapporto acqua/cemento, l'aumento della percentuale di vuoti all'interno della sezione e l'aggiunta di fibre in polipropilene. Per ognuna di queste si sono riportati una serie di esperimenti in modo da riuscire a dedurre un andamento generale del comportamento del materiale al variare di quest'ultime. Ognuno dei parametri è stato analizzato scrupolosamente, osservandolo prima da un punto di vista generale, e mostrando in seguito l'uso delle relative tecniche progettuali per la mitigazione del fenomeno esplosivo. Questa sezione è molto importante in quanto serve per avere una solida base di conoscenze e di dati numerici su cui confrontare i dati sperimentali ottenuti nella fase successiva.

Parte 2. Esperienza al Fire Lab dell'istituto WPI, dove si sono condotti gli esperimenti di resistenza al fuoco dei 24 provini oggetti dello studio.

Particolare attenzione è stata posta all'evoluzione della temperatura sulla superficie del provino e alla perdita di massa. E' stato riportato tutto l'iter progettuale svolto, le decisioni prese in fase di panificazione della procedura da eseguire, l'elaborazione dei dati acquisiti e nozioni tecniche riguardo il funzionamento del forno utilizzato e del laboratorio in cui sono stati eseguiti i testi.

1.3 University of Washington e Worcester Polytechnic Institute

Grazie al Prof. A.P. Fantilli ho avuto la possibilità di collaborare con il Prof. K. Nemati, docente presso la University of Washington, alla ricerca oggetto di studio di questa Tesi Magistrale.

Questo progetto mi ha permesso di trascorrere due mesi presso un'importante università degli Stati Uniti , la University of Washington in Seattle e 3 settimane presso il Worcester Polytechnic Institute. Ritengo che questa esperienza sia stata di fondamentale importanza e necessaria per lo sviluppo e il completamento di questo elaborato. Inoltre è stata molto formativa per la mia crescita professionale e umana.

Durante il primo periodo ho avuto la possibilità di frequentare due importanti laboratori in cui ho avuto la possibilità di apprendere nozioni scientifiche teoriche e pratiche riguardo il materiale calcestruzzo: il Concrete Lab presso l'Università e il Seattle Concrete Lab sito all'interno dell'azienda Lafarge North America. All'interno del primo laboratorio ho frequentato un corso con tema principali il mix design del calcestruzzo. Ho appreso come eseguire un corretto mix design attraverso il metodo del "Volume Assoluto", sia con il sistema metrico decimale che con il sistema consuetudinario statunitense di unità. Estremamente utile è stato approfondire questa tecnica prima da un punto di vista teorico e successivamente avere conferma attraverso un'esperienza pratica, gestendo il processo di progettazione, mix, controllo del contenuto d'aria, confezionamento dei provini, stagionatura e test a compressione monoassiale. Ho inoltrato collaborato con studenti internazionali, avendo la possibilità di apprendere e di scambiare pareri riguardo la mia ricerca.

Presso il secondo laboratorio ho avuto la possibilità di apprendere la procedura per eseguire la maggior parte dei più comuni test sul calcestruzzo in accordo con le procedure ASTM. In particolare: C-1260 con lo scopo di testate la reazione degli aggregati se sottoposti a soluzione alcalina; C-1012 con lo scopo di verificare la reazione del cemento se esposto a soluzioni con lato contenuto di solfato; C-231 per la misurazione del contenuto d'aria attraverso il metodo a pressione; C-1074 per testare la resistenza del calcestruzzo attraverso il controllo della maturità; C-672 per testare il comportamento del calcestruzzo in seguito a svariati cicli di gelo e disgelo. Inoltre ho avuto la possibilità di assistere a una Spettroscopia di Assorbimento Atomico per determinare la presenza di alcuni elementi chimici all'interno del cemento e a prove di compressione eseguite secondo ASTM C-39.

Durante il secondo periodo in Worcester, ho avuto la possibilità di frequentare il Fire Protection Departement. Ho ricevuto una formazione dove ho appreso varie procedure su come muoversi all'interno di un Fire Lab. Successivamente ho potuto preparare, eseguire e assistere ai test su i 24 provini oggetto di studio in questo elaborato, sempre sotto la supervisione di un tecnico. Questa è stata una parte fondamentale dell'esperienza in quanto sono stato immerso in un ambiente altamente specialistico dove mi sono state fornite nozioni aggiuntive e di fondamentale importanza sul fenomeno di spalling. Inoltre ho imparato molte nozioni tecniche e procedure su come condurre fire test. Quest'ultima parte è stata inserita all'interno della tesi e rappresenta una sezione fondamentale, che va a completare tutta la precedente parte teorica.

2 Fenomeno incendio

2.1 Fasi evolutive

L'incendio o combustione è un fenomeno non prevedibile definito come una reazione chimica di una sostanza infiammabile con l'ossigeno, con conseguente produzione di calore e luce, ossia una reazione esotermica. Le condizioni essenziali per cui si verifichi una combustione sono l'esistenza di tre elementi contemporaneamente:

1. una sostanza combustibile
2. una sostanza comburente (ossigeno)
3. una sorgente di energia

Questi formano ciò che viene chiamato il triangolo di fuoco. Un metodo utilizzato per rappresentare visivamente il processo della combustione. Nel momento in cui uno dei tre elementi della combustione non è presente, questa non avviene o se già in atto, si estingue. Per ottenere lo spegnimento dell'incendio si deve ricorrere quindi ai seguenti sistemi: esaurimento o sottrazione del combustibile e/o soffocamento o sottrazione del comburente e/o raffreddamento al di sotto della temperatura di accensione.

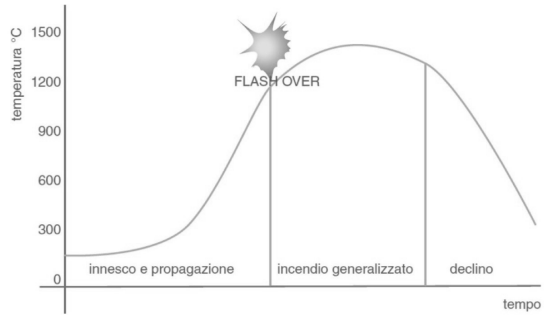


Figura 2-1 Evoluzione dell'incendio con la rappresentazione delle quattro fasi caratteristiche. Fonte: Guida pratica alla progettazione secondo uni 9494-2-2017. Aernova

Il propagarsi di un incendio in un ambiente ristretto viene illustrato attraverso una curva in relazione al tempo e alla sua temperatura media. Questa permette di individuare cinque stadi specifici:

- Innesco
- Propagazione
- Il flashover
- L'incendio generalizzato, ovvero il momento in cui l'incendio è completamente sviluppato
- Il decadimento finale

La distinzione fondamentale che deve essere fatta, in quanto il comportamento risulta essere completamente diverso, è quella tra pre e post-flashover. Questa suddivisione in fasi è stata studiata approfonditamente da Buchanan (2002) and Denoël (2007) .

La fase del pre-flashover è caratterizzata dal momento in cui tutti gli elementi del triangolo dell'incendio sono presenti all'interno di uno stesso ambiente. Una fonte di calore causa l'inizio di un incendio, una porzione di materiale inizia a bruciare e vengono emesse le prime quantità di gas e fumo che salgono verso l'alto ed si accumulano in prossimità del soffitto. Il fumo si espande molto rapidamente su tutto il soffitto. Nel momento in cui incontra il muro, scende e crea un ulteriore strato. Il processo di combustione che si è avviato richiede un gran quantitativo di ossigeno per continuare. Una volta consumato l'ossigeno all'interno del locale, un nuovo apporto potrà continuare ad entrare dalle aperture presenti. E' comune dire che il fuoco ha un effetto "pompa" richiamando aria fresca dall'esterno e buttando verso l'alto i prodotti nocivi della combustione. In un primo momento i due strati risultano ben separati, e questo è molto importante in quanto permette alle persone di poter evacuare dalla stanza in sicurezza. Man mano che il fuoco continua a bruciare, lo strato superiore raggiunge temperature molto elevate e continua a crescere. Lo strato superiore si avvicina sempre di più al pavimento, in quanto aumenta di volume. Nel momento in cui raggiunge circa i 200 °C le finestre si rompono, creando un improvviso afflusso di ossigeno che va ad alimentare il fuoco. Questa fase è descritta da un modello a due zone, considerando l'ambiente come un recipiente costituito da due strati separati e distinti ma uniti dall'incendio.

Fino nel momento in cui nella stanza ci sono materiali combustibili sufficienti e un'adeguata alimentazione di ossigeno, il fuoco nella fase pre-flashover continua a crescere. Nel momento in cui la temperatura giunge a 500-600 °C, ogni materiale combustibile presente nella stanza inizierà a bruciare, e si assiste così a un incremento della velocità di rilascio del calore e a un aumento improvviso delle temperature. Questa transizione prende il nome di flashover che indica precisamente l'accensione improvvisa dei gas accumulatisi nella parte alta del locale. Corrisponde al punto di flesso della curva tempo/temperatura e in questo momento tutto il materiale combustibile investito dall'incendio prende fuoco in un unico istante. In seguito al flashover i due strati precedentemente formatosi non esistono più, ma c'è la presenza di una grande zona comune dove i flussi di aria e gas di combustione sono in una condizione di turbolenza. Descrivendo la fase dell'incendio generalizzato si può dire che tutto il materiale combustibile è coinvolto ed il fuoco è caratterizzato da una temperatura oltre i 1000 °C. Si verifica il fenomeno della pirolisi con una grande produzione di gas combustibili. All'interno di una stanza, solitamente il fuoco è controllato dalla ventilazione, quindi il livello di combustione dipende dal numero e dalla dimensione delle aperture presenti. La fase di incendio generalizzato risulta essere la più importante ai fini della progettazione. Per lo studio di un incendio i numerosi modelli computazionali fanno riferimento a un modello a una sola zona, considerando la stanza come un recipiente ben mescolato.

Il fenomeno risulta estinto nel momento in cui la temperatura interna all'ambiante risulta al di sotto dei 200 °C. Questo viene preceduto da una netta diminuzione dell'emissione termica in seguito all'esaurimento del combustibile.

2.2 Curve di incendio

Durante la fase di progettazione è molto utile effettuare una valutazione del rischio d'incendio. Nel definire le azioni del fuoco, si determinano i principali scenari d'incendio e i relativi incendi convenzionali di progetto. Per definire l'incendio convenzionale di progetto si fa riferimento a una curva che rappresenta l'incendio in funzione del tempo e della temperatura dei gas di combustione sulla superficie dell'elemento sottoposto alla prova sperimentale. Esistono due tipologie di curva: naturale o nominale.

2.2.1 Curva di incendio naturale

Per descrivere la dinamica di sviluppo di un incendio in maniera più reale, devono essere tenute in conto considerazioni riguardo le modalità di rilascio energetico che sono associate alla potenza rilasciata dall'incendio durante l'evento. L'andamento delle modalità di rilascio energetico, viene descritto dal tasso di rilascio dell'energia termica RHR (Rate of Heat Released).

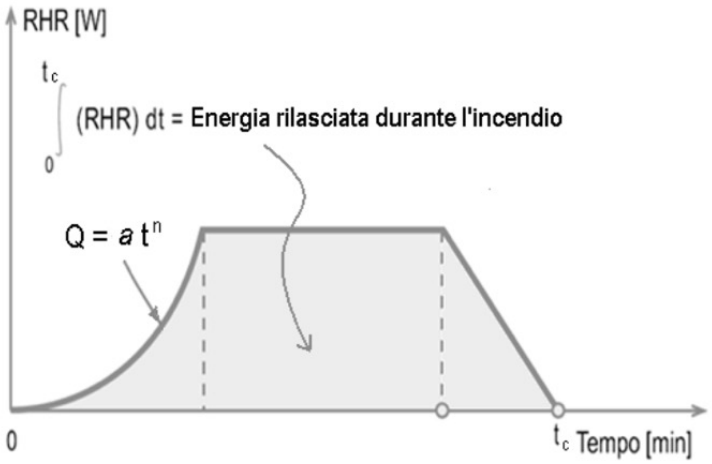


Figura 2-2 Tasso di rilascio dell'energia termica. Fonte: Marotta (2011)

Durante la prima fase di ignizione la potenza termica totale rilasciata nell'ambiente, cresce in modo parabolico fino al flashover. Dopo questo punto resta costante e infine si riduce gradualmente fino al raggiungimento

della temperatura ambiente. Le curve di incendio naturale sono calcolate con metodi semplificati di tipo parametrico in funzione dei seguenti aspetti:

- la geometria e la tipologia degli elementi costruttivi che formano compartimento, tenendo conto delle aperture presenti;
- il carico di incendio presente nel compartimento;
- temperatura massima raggiunta;

Al variare dei parametri si possono avere differenti modelli di curva parametrica ma tutte accomunate dallo stesso andamento.

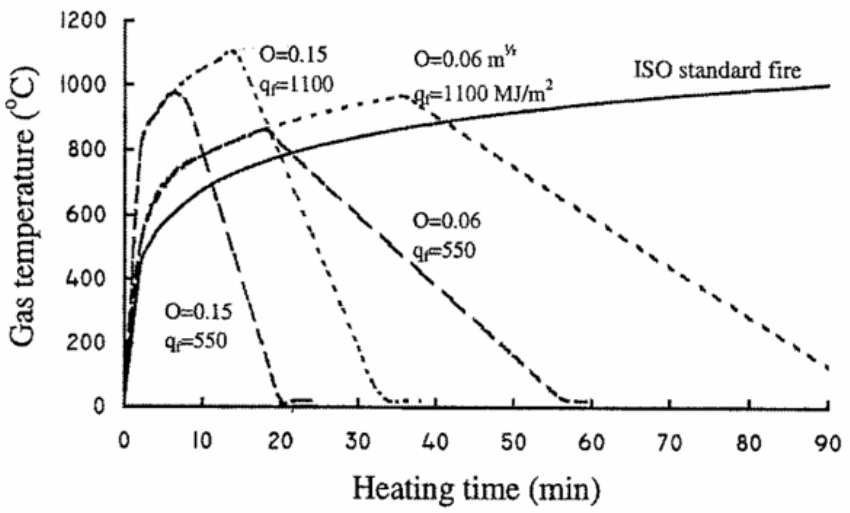


Figura 2-3 Curve di incendio parametriche per incendio controllato dalla ventilazione. Fonte: Balduzzi (2015)

Confrontando la curva d'incendio standard con la curva parametrica si nota come la seconda offre una stima molto più realistica dell'andamento dell'incendio nell'ambiento considerato. Si fa uso delle curva parametrica nel momento in cui attraverso la curva ISO si progetterebbe in modo eccessivo a vantaggio di sicurezza.

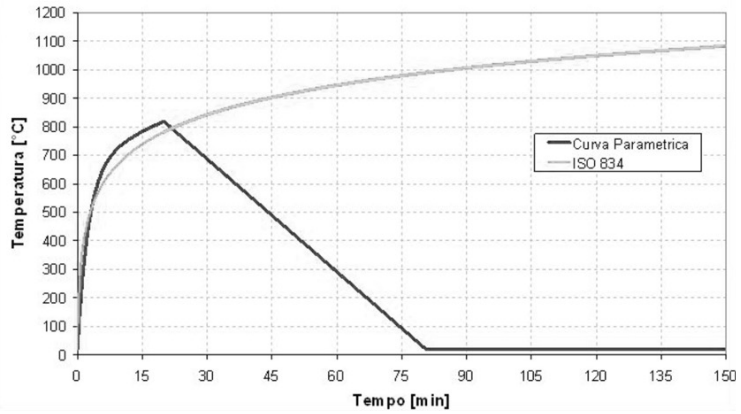


Figura 2-4 Paragone tra l'andamento di una curva parametrica e quello della curva standard ISO 834. Fonte: AICAP Roma. Gazzetta Ufficiale

La curva parametrica è quindi caratterizzata da una prima fase in cui raggiunge la temperatura massima con un andamento esponenziale e una seconda fase in cui si ha un raffreddamento con andamento lineare.

2.2.2 Curve di incendio nominale

Queste tipologie di curve vengono adottate per le verifiche sperimentali di resistenza al fuoco di elementi per scenari tra loro differenti. Nella maggior parte dei casi non si tiene conto del raffreddamento.

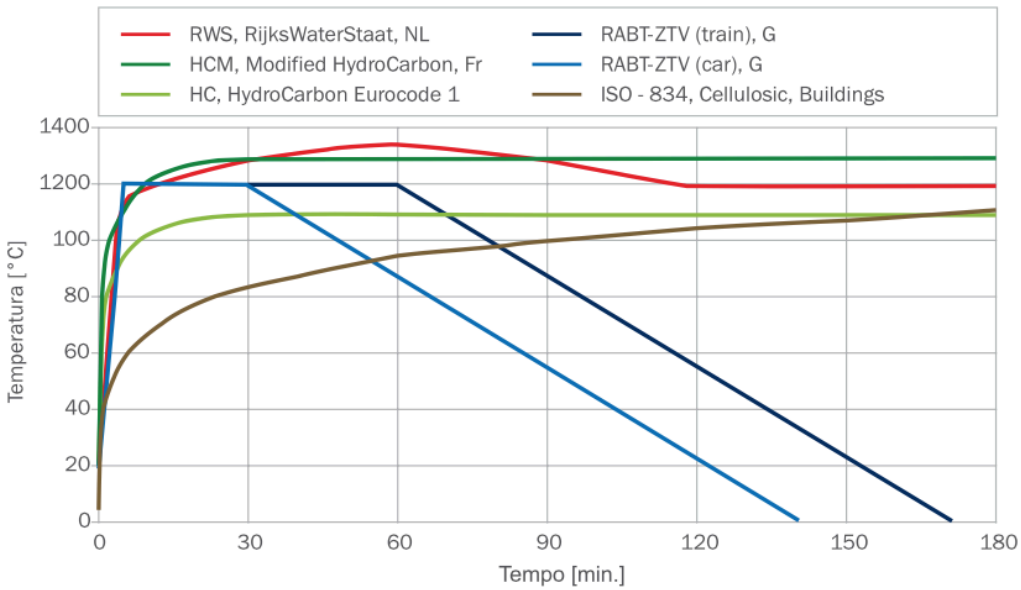


Figura 2-5 Curve d'incendio; evoluzione della temperatura secondo la tipologia d'incendio. Fonte: Atec Concrete Construction

ISO 834

Secondo l'organizzazione internazionale per la normazione questa è la curva che deve essere principalmente utilizzata se i materiali che danno origine all'incendio sono di natura cellulosica. Viene rappresentata dalla seguente espressione:

$$T = T_0 + 345 \cdot log_{10}(8 \cdot t + 1) \tag{2.1}$$

con

T_0 [°C] temperatura iniziale dell'aria nel compartimento, pari a 20°C;

T temperatura dell'aria durante l'incendio;

t [min] tempo di esposizione al fuoco.

Considerando invece l'organismo di normalizzazione statunitense, la curva in questione fa riferimento all' **ASTM E119** che mostra valori molto simili alla curva ISO, ma con qualche piccola differenza.

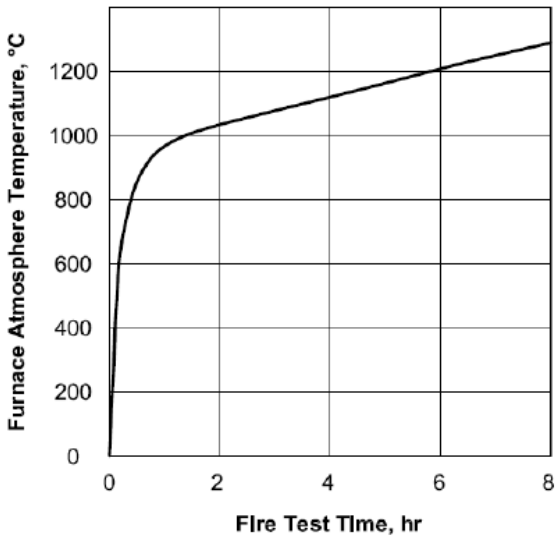


Figura 2-6 Curva tempo/temperatura ASTM E119.Fonte: ASTM E119

I test standard su campioni di elementi degli edifici, si basano su queste due curve che a differenza di quella reale mostrano un andamento monotono della temperatura in funzione del tempo di esposizione. Nonostante sia comune utilizzare questa curva, si è notato che la velocità di propagazione della fiamma nella combustione dei materiali come i derivati del petrolio è nettamente superiori a quella del legno. Per ovviare il problema si è così sviluppata la curva degli idrocarburi.

HC

In presenza di incendi che possono coinvolgere autovetture, cisterne per la benzina o più in generale prodotti a base di idrocarburi si fa riferimento alla curva da idrocarburi (HC). Questa è particolarmente usata nel caso di gallerie, tunnel, trafori o autorimesse sotterranee

$$T = 1080 \cdot (1 - 0{,}325 \cdot e^{-0{,}167 \cdot t} - 0{,}675 \cdot e^{-2{,}5 \cdot t}) + T_0 \qquad (2.2)$$

con

T_0 [°C] temperatura iniziale dell'aria nel compartimento, pari a 20°C;

T temperatura dell'aria durante l'incendio;

t [min] tempo di esposizione al fuoco.

HCM

Questa curva risulta molto simile alla curva HC con l'unica differenza che si raggiungono temperature più elevate. Questa prende il nome di curva modificata degli idrocarburi. La temperatura massima della curva HCM è di 1300 °C rispetto i 1100 °C previsti dallo standard della curva HC.

RWS

La sua particolarità deriva dall'essere stata testata attraverso una simulazione di un incendio in scala reale. Questa curva si basa sulla scelta dello scenario peggiore, in cui si ha una durata di 120 minuti con l'incendio di un serbatoio di 50 m^3 di carburante, per un carico totale di incendio pari a 300 MW.

RABT-ZTV

Questa curva è stata studiata in Germania con lo scopo di meglio descrivere gli incendi all'interno di gallerie per il trasporto. Si ha un innalzamento estremamente rapido della temperatura da 20 °C a 1200 °C in 5 minuti. Questa è la temperatura massima che viene raggiunta dalla curva e rimane stabile 30 minuti nel caso di incendio di autovettura e 60 minuti nel caso di incendio di un treno.

3 Comportamento al fuoco del calcestruzzo

In numerosi casi il calcestruzzo presenta ottime proprietà di resistenza al fuoco, rappresentando una sicurezza per le persone, le cose e l'ambiente. Il calcestruzzo risulta essere il materiale più comunemente utilizzato nel mondo dell'edilizia grazie al suo ottimo ed intrinseco comportamento quando è soggetto a fuoco, oltre che per svariati motivi economici, architettonici e di utilizzazione. Questa sua particolarità è riscontrata nella pratica in quanto: il materiale non aumenta il carico di incendio, protegge via di fuga non permettendo l'ingresso del fuoco, non impedisce la propagazione tra ambienti confinanti, non produce gas tossici, ritarda eventuali crolli strutturali riuscendo nella maggior parte dei casi a prevenire il crollo dell'edificio. Nella tabella seguente vengono messe a confronto le proprietà di resistenza al fuoco del calcestruzzo paragonate con quelle di altri materiali edili.

Tabella 3-1 Comportamento al fuoco di diversi materiali messi a confronto. Fonte: "Associazione Italiana Produttori Additivi e prodotti per Calcestruzzo" rielaborazione dei dati personale.

Materiale edile non protetto	***Resistenza al fuoco***	***Combustibilità***	***Incremento della T in sezione***	***Protezione antincendio incorporata***	***Riutilizzo in seguito all'incendio***	***Protezione per utilizzatori***
Legno	Bassa	Elevata	Molto bassa	Molto bassa	Assente	Bassa
Acciaio	Molto bassa	Assente	Molto bassa	Bassa	Bassa	Bassa
Cemento	Elevata	Assente	Bassa	Elevata	Elevata	Elevata

Tuttavia, dopo questa lista di vantaggi, il comportamento del calcestruzzo deve essere attentamente monitorato. Risulta essere un materiale molto complesso e le sue proprietà cambiano drammaticamente nel momento in cui vengono esposte a temperature elevate. Gli effetti principali del fuoco sul calcestruzzo sono il decadimento delle proprietà meccaniche con l'aumentare della temperatura. Il comportamento al fuoco del calcestruzzo è tutt'altro che facilmente definibile e modellabile. È un materiale non omogeneo costituito da pasta cementizia, aggregati e molto spesso da armature metalliche o altri rinforzi (fibre), e ognuno di questi presenta una reazione completamente diversa all'esposizione termica e all'incremento della temperatura. La costruzione in calcestruzzo si trova così generalmente a dover adempiere a una doppia funzione: componente portante di una struttura e barriera antincendio. Pertanto in un'analisi della resistenza al fuoco della costruzione è opportuno valutare le caratteristiche della struttura secondo entrambi gli aspetti, contemporaneamente.

Alla struttura viene richiesto di rispettare i criteri R, I ed E:

- Si assume che il criterio R risulti soddisfatto se la struttura conserva un'adeguata resistenza meccanica per la durata di esposizione al fuoco richiesta.
- Il criterio I è il criterio di isolamento, che si applica anche ad elementi che svolgono funzione di separazione. Si ritiene che esso sia soddisfatto se l'aumento medio di temperatura sulla superficie non esposta non supera i 140 K e l'aumento massimo non supera i 180 K.
- Il criterio E si applica ad elementi ai quali si richiede di svolgere funzione di separazione e sarà soddisfatto se viene conservata l'integrità della struttura per la durata richiesta ad evitare la propagazione di fiamme, dei gas caldi e di un calore eccessivo.

Qui di seguito il riferimento normativo per una corretta progettazione.

- D.M. 14/01/2008: "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni.

- D.M. 09/03/2007: "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco"
- UNI EN 1992-1-2: "Eurocodice 2: Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio", aprile 2005
- UNI 9502: "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso", maggio 2001
- D.M. 16/02/07: "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione"

3.1 Trasformazioni chimico-fisiche del materiale

In accordo con gli studi di Khoury (2008) nell'istante in cui il calcestruzzo è soggetto a fuoco, l'incremento di temperatura all'interno della sezione dell'elemento è graduale e tendono a svilupparsi elevati gradienti di temperatura tra la superficie esterna dell'elemento e l'interno della sezione, incrementando il danno a cui viene sottoposto l'elemento. L'elevata temperatura che impatta il calcestruzzo comporta l'instaurarsi di complessi cambiamenti, sia fisici che chimici, che si verificano all'interno del calcestruzzo durante il riscaldamento. Questi fenomeni coinvolgono sia la matrice cementizia sia i processi legati nella movimentazione di massa (i gas e i liquidi). L'analisi da effettuare risulta molto complicata in quanto il calcestruzzo è un composto costituito da tre materiali differenti: cemento e acqua, che formano la pasta cementizia e aggregati. Numerosi sono i test condotti in laboratorio su diverse tipologie di cemento e aggregati con il fine di trovare il miglior composto con la migliore reazione al fuoco.

Il materiale sottoposto a fuoco, subirà numerosi cambiamenti in tutti i suoi aspetti, ovvero nel suo comportamento microstrutturale, termico, idraulico e meccanico. Comune è la perdita di forza che avviene soprattutto a causa della formazione di fessure interne e della disintegrazione della pasta di cemento. Fattore determinante risulta essere anche la coesione tra la pasta di cemento e gli aggregati. È necessario quindi studiare i diversi

processi e comprendere il materiale a 360° per ottimizzare la composizione del materiale in modo da riuscire ad aumentare le prestazioni di resistenza al fuoco.

Come evidenziato da Bertolini (2000), l'acqua riveste un ruolo fondamentale in questo processo e questa si presenta sotto tre forme diverse:

- acqua capillare: rappresenta la porzione principale dell'acqua all'interno del calcestruzzo. La frazione di acqua contenuta nei pori di diametro maggiore di 50 nm non è vincolata da forze di legame con la superficie solida. Nel momento in cui l'umidità relativa dell'ambiente scende al di sotto del 100%, quest'acqua è libera di evaporare. L'evaporazione avviene senza che si verifichino variazioni dimensionali all'interno del calcestruzzo, grazie all'assenza di forza chimico-fisiche tra acqua e solido.
- acqua adsorbita: questa è la forma d'acqua assorbita sulla superficie del poro sotto forma di uno strato sottilissimo. Non contribuisce ai fenomeni di trasporto ed è irrilevante per i fenomeni di degrado.
- acqua nei pori o negli spazi interstrato del gel: questa è presente all'interno della matrice cementizia e viene allontanata dal calcestruzzo solo se l'umidità esterna scende al di sotto dell'11%.

L'acqua all'interno del calcestruzzo è in grado di muoversi attraverso l'effetto dell'azione capillare all'interno dei pori o per effetto di un gradiente di pressione. Il trasporto è in funzione del livello di porosità, della dimensione media dei pori, della presenza di fratture e dagli elementi che costituiscono il calcestruzzo. L'ordine in cui l'acqua viene rimossa dipende dall'energia che lega quest'ultima al solido: l'acqua libera evapora prima, seguita da acqua capillare e infine da acqua fisicamente legata.

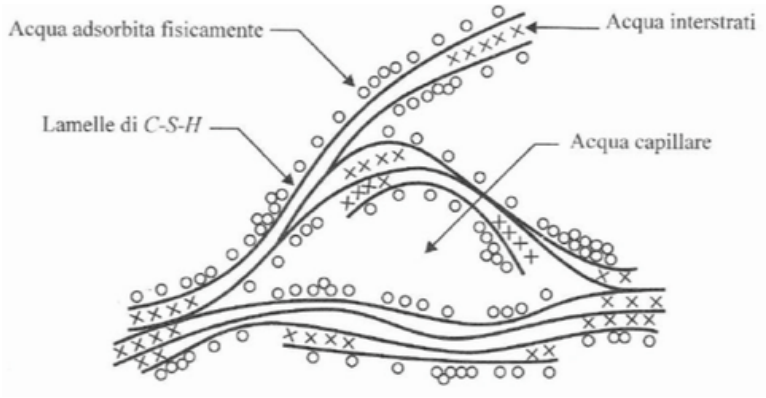


Figura 3-1 Tipi di acqua presenti nel calcestruzzo. Fonte: Bertolini (2000).

Tutta l'acqua evaporabile viene espulsa in seguito al raggiungimento dei 105° gradi. La porosità della pasta cementizia indurita si modifica con l'aumentare della temperatura, tendendo sempre verso un valore crescente con un andamento parabolico. Molto importante è evidenziare che grazie alla progressiva rottura dei legami C-S-H (idrati di silicati di calci), si verifica la crescita della dimensione media del poro e della loro superficie. Facendo invece riferimento all'acqua chimicamente legata, questa non è influenzata per temperature inferiori ai 105 °C.

Ad affiancare il processo di evaporazione dell'acqua vi è la trasformazione chimica e la decomposizione degli aggregati a causa dell'eccessivo riscaldamento. Le trasformazioni sono riassunte nella tabella.

Tabella 3-2 Trasformazioni fisico-chimiche e colorazioni nel calcestruzzo esposto ad elevate temperature. Fonte: Elaborazine dei dati personale da Giacalone (2011).

Temperatura °C	***Trasformazioni chimiche e fisiche***	***Colorazione***	***Resistenza***
< 95-100	Emissione di H_2O (vapore). a volte anche con modalità esplosiva (steam boller effect)	Inalterato	Inalterata
135	Decomposizione e disidratazione dell'ettringite. $3CaO•Al_2O_3•3CaSo•32H_2O$	Inalterato	Praticamente inalterata
135 - 350	Disidratazione del gel di silicato idrata $nCaO•SiO_2•mH_2O$	Inalterato	Modesta riduzione progressiva
450 - 520	Disidratazione dell'idrossido di calcio $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O$	Rosa/rosso	Progressiva riduzione con la temperatura
560	Trasformazione del quarzo dalla forma α alla forma β (aggregati silicei)	Rosa/rosso	Ulteriore riduzione e disgregazione dell'aggregato
700 - 900	Decomposizione del carbonato di calcio (aggregati calcarei) $CaCO_3 \rightarrow CaCO + CO_2$	Grigio chiaro	Molto ridotta
900 - 1200	Scioglimento totale del calcestruzzo	Marrone	Nulla

Molte di queste reazioni causano un notevole aumento del volume. Un esempio notevole è dato dal raffreddamento della calce libera, generata dalla decomposizione del carbonato di calcio, che si combina con l'umidità atmosferica, generando la $Ca(OH)_2$, con un aumento del volume pari al 44%. Infine, fenomeno molto importante da non sottovalutare è la relazione tra aggregato e pasta cementizia dove l'espansione differenziale può provocare fessurazioni e distacchi. Questo valore è strettamente in funzione della tipologia di aggregato utilizzata. Si è riscontra facilmente attraverso esperimenti come l'espansione dell'aggregato siliceo sia superiore rispetto a quella del calcareo.

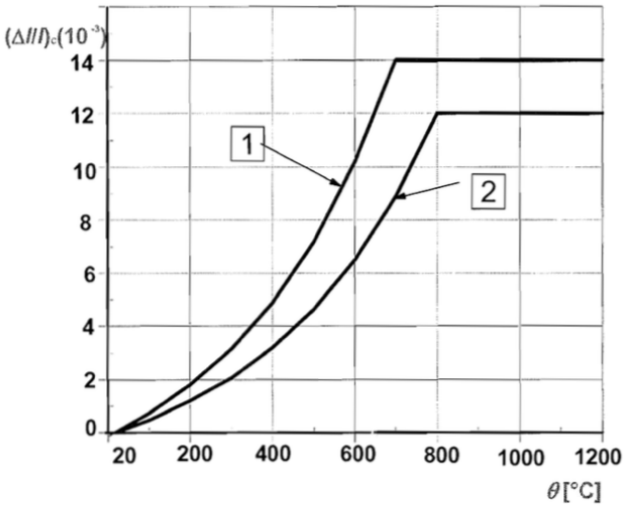


Figura 3-2 Deformazione termica degli aggregati. 1) Aggregati silicei 2) Aggregati calcarei. Fonte: EN-1992-2

3.2 Proprietà meccaniche del calcestruzzo

Le trasformazioni fisico-chimiche nella pasta cementizia e nell'aggregato, e la non compatibilità termica tra i due mezzi, generano una notevole diminuzione delle proprietà meccaniche. Con lo scopo di indagare il comportamento di queste proprietà i provini vengono sottoposti a test sperimentali. Le prove ad elevate temperatura su provini in calcestruzzo sono generalmente classificate in prove a caldo e prove a freddo.

Nelle prove a freddo, i campioni vengono riscaldati fino al raggiungimento di una specifica temperatura, questa viene stabilizzata per un periodo di tempo prestabilito e raffreddato in un secondo momento fino a raggiungere la temperatura ambiente. Il test che viene effettuato serve per determinare le proprietà meccaniche residue in seguito a questo ciclo di riscaldamento e raffreddamento.

Nelle prove a caldo, i provini sono riscaldati e portati ad una certa temperatura, una volta avvenuta la stabilizzazione, il provino viene subito testato per la valutazione delle proprietà meccaniche oggetto di studio.

Durante le prove sperimentali anche il contenuto di umidità può essere controllato, attraverso la scelto di tenere il provino sigillato (vapore libero di uscire) o non (vapore all'interno dell'elemento).

Ultima condizione da definire è, la presenza o meno di un ciclo di carico. Osservando il diagramma sforzo-deformazione di un calcestruzzo si nota subito come il modulo elastico diminuisce con l'aumento della temperatura.

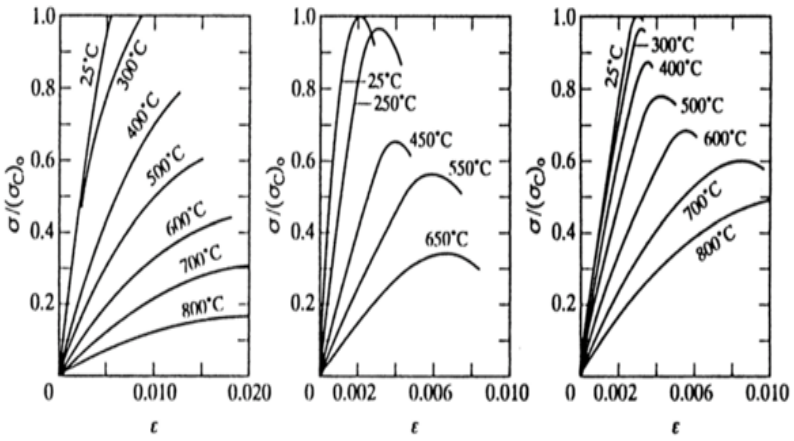


Figura 3-3 Diagramma sforzo-deformazione a temperature elevate. Fonte: Phan e al. (2010)

L'applicazione di un carico invece può portare in alcuni casi un effetto benefico. Durante il riscaldamento questo induce sforzi di compressione, che compattando il materiale riducendo e ritardando la comparsa di microfessure, e generando una riduzione del deterioramento delle proprietà meccaniche. Ovviamente il carico deve essere moderato.

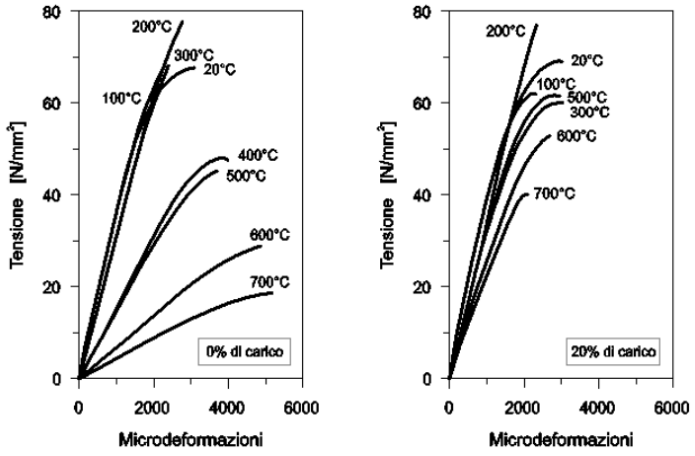


Figura 3-4 Analisi del livello di tensione in relazione alla temperatura e al livello di carico durante un riscaldamento condotto mantenendo il livello di carico a compressione costante. Fonte: Khoury (2000)

Notevole è il cambiamento del comportamento di un provino sigillato o non sigillato, in funzione della fuoriuscita del vapore. L'accumulo di umidità e quindi di vapore all'interno dell'elemento conduce quest'ultimo a un deterioramento maggiore.

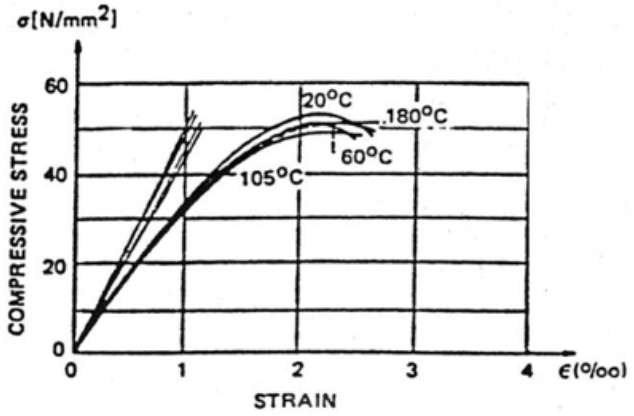


Figura 3-5 Diagramma sforzo-deformazione di un provino in calcestruzzo costituito da aggregati calcarei non sigillato. Fonte: Kottas e al. (1979)

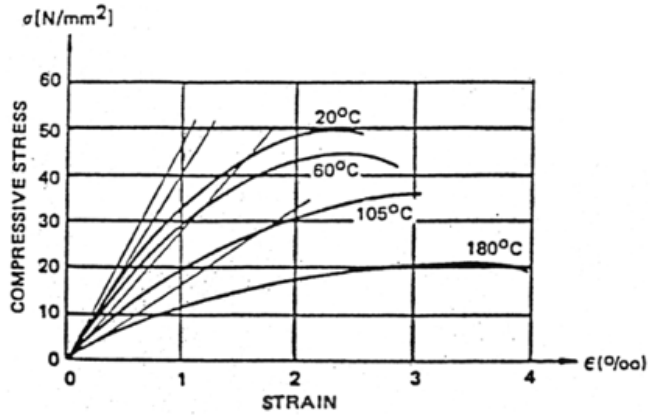


Figura 3-6 Diagramma sforzo-deformazione di un provino in calcestruzzo costituito da aggregati calcarei sigillato. Fonte: Kottas e al. (1979)

3.2.1 Resistenza a compressione

In accordo con Phan e al. (2010), come abbiamo già evidenziato, la tendenza generale della perdita di resistenza a compressione con l'aumentare della temperatura è dovuta ai cambiamenti fisici e chimici della pasta di cemento e ai relativi comportamenti degli aggregati ad elevate temperature. I fattori che più influiscono sono: danno al singolo aggregato, indebolimento del legame pasta di cemento-aggregato, indebolimento del cemento dovuto all'aumento di porosità dovuto alla disidratazione, alla rottura parziale dei legami C-S-H attraverso l'indebolimento dei legami di

Van Der Waals, allo sviluppo del percorso delle microfratture. Ovviamente ci saranno poi anche fattori ambientali e materiali che influenzeranno la risposta del materiale in condizioni di temperatura elevata. Siccome la maggior parte degli aggregati sono stabili solo fino alla temperatura di 300-350 °C (questo intervallo comprende un vasto intervallo di applicazioni), la resistenza a compressione del calcestruzzo dipende in maniera marcata dall'interazione tra il cemento e l'aggregato. Durante le prove in laboratorio, la resistenza a compressione del calcestruzzo a temperatura elevata è tipicamente valutata utilizzando tre diversi metodi di prova chiamati: test con sollecitazione di carico, test senza sollecitazione carico e test senza sollecitazione di carico e proprietà residue.

Test con sollecitazione di carico: in questo tipo di prova si applica un carico costante al campione di prova tra il 25% e il 55% della resistenza a compressione, in seguito viene scaldato alla temperatura a cui si vuole testare il materiale, lasciando il tempo per la stabilizzazione e aumentando il carico fino a rottura. Le proprietà meccaniche determinate usando questo metodo sono applicabili per il calcolo della risposta strutturale degli elementi in calcestruzzo, la cui funzione principale è quella di portare una grande porzione di carico a compressione, ad esempio pilastri.

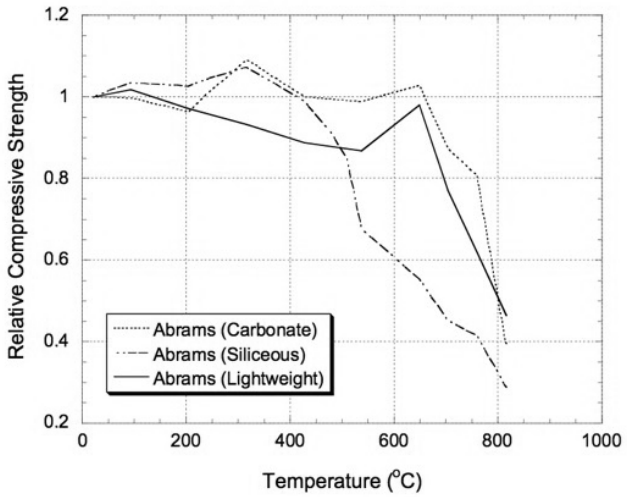


Figura 3-7 Resistenza a compressione in funzione dell'aumento di temperatura. Confronto tra calcestruzzo leggero, con aggregati calcarei e silicei durante un test con sollecitazione di carico. Fonte: Phan e al. (2010)

Test senza sollecitazione di carico: il provino viene riscaldato, senza la presenza di carico, alla temperatura che si vuole studiare, aspettare il tempo per ottenere una temperatura uniforme all'interno del campione di prova e solo a questo punto viene fatto aumentare il carico fino a rottura. Le proprietà meccaniche determinate usando questo metodo sono applicabili per il calcolo della risposta strutturale dei membri del calcestruzzo, la cui funzione principale è quella di servire come barriera e separazione come pareti divisorie e travi.

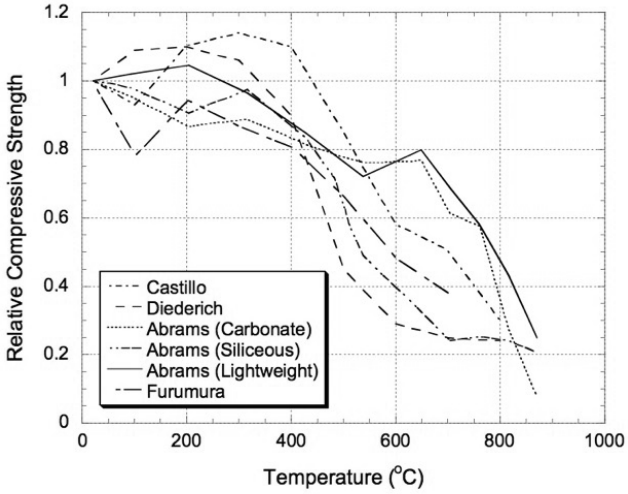


Figura 3-8 Resistenza a compressione in funzione dell'aumento di temperatura. Confronto tra calcestruzzo leggero, con aggregati calcarei e silicei durante un test senza sollecitazione di carico. Fonte: Phan e al. (2010)

Test senza sollecitazione di carico e proprietà residue: riscaldare il campione scaricato alla temperatura oggetto di studio, lasciare raffreddare il campione a temperatura ambiente e aumentare il carico fino a rottura. Queste informazioni sono particolarmente rilevanti per valutare l'integrità post-fuoco della costruzione in calcestruzzo.

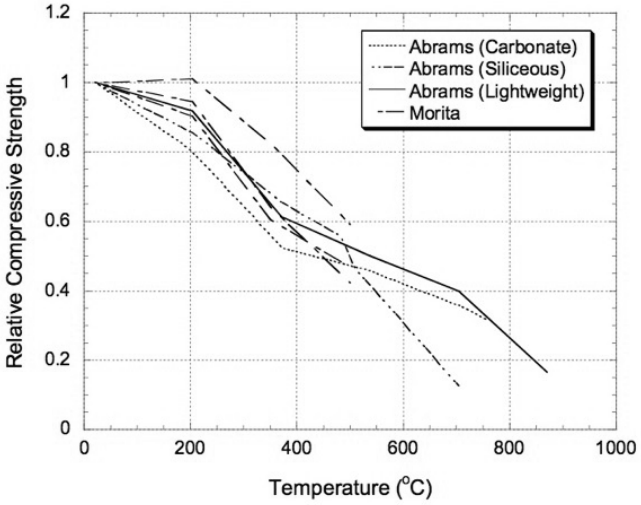


Figura 3-9 Resistenza a compressione in funzione dell'aumento di temperatura. Confronto tra calcestruzzo leggero, con aggregati calcarei e silicei durante un test senza sollecitazione di carico e inseguito al raffreddamento del provino. Fonte: Phan e al. (2010)

3.2.2 Modulo di elasticità

Il modulo elastico risente di una riduzione significativa con l'aumentare della temperatura sia in calcestruzzo normale che leggero.

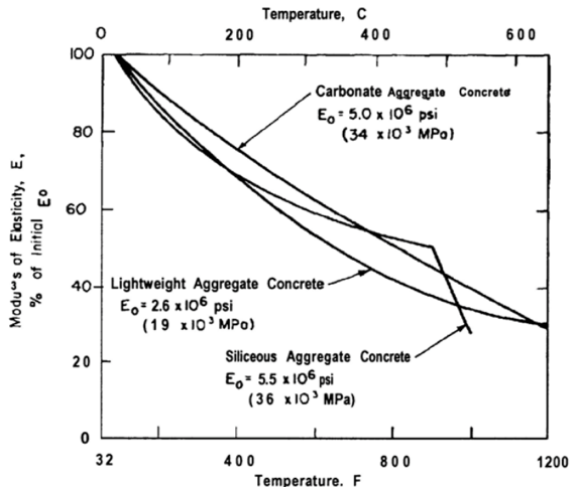


Figura 3-10 Modulo di elasticità di provini in calcestruzzo in relazione all'aumento di temperatura. Fonte: Phan e al. (2010)

3.2.3 Resistenza a trazione

In modo simile alle prove a compressione, molti sono i fattori che influenzano la resistenza a trazione e questa si riduce con l'aumentare della temperatura. La tipologia di aggregati è quella che influisce maggiormente su questa proprietà. Generalmente si può dire che calcestruzzi confezionati con aggregati calcarei si comportano peggio di quelli con aggregati silicei.

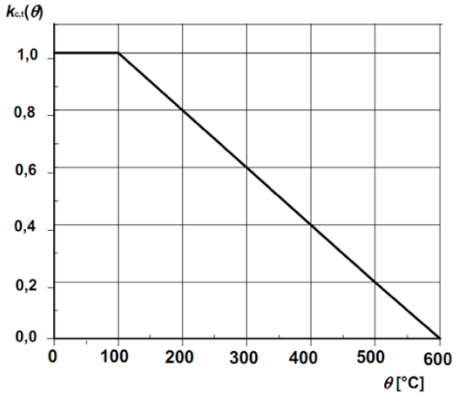


Figura 3-11 Andamento della resistenza a trazione in funzione dell'aumento della temperatura. Fonte: Bamonte (2014)

In conclusione nella grande varietà di risultati disponibili in letteratura, si possono dare le seguenti indicazioni di carattere generale

- Resistenza a compressione: fc^{600}/fc^{20} = 30-70%
- Resistenza a trazione: fct^{600}/fct^{20} = 20%
- Modulo elastico secante: Ec^{600}/Ec^{20} = 15%

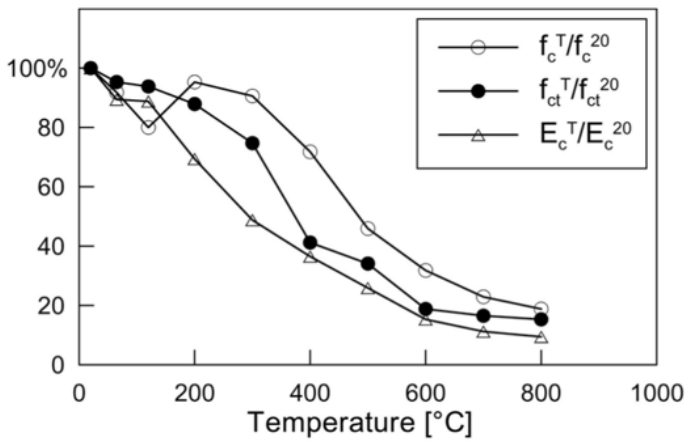


Figura 3-12 Proprietà meccaniche in funzione della temperatura. Fonte: Bamanonte (2014)

3.3 Proprietà termiche del calcestruzzo

Un elemento di calcestruzzo esposto al fuoco è soggetto ad elevati e intensi gradienti di temperatura lungo la sua sezione trasversale. L'evoluzione della distribuzione della temperatura all'interno dell'elemento è in funzione in primo luogo della forma della sezione e in secondo luogo delle proprietà termiche del calcestruzzo.

La diffusione del calore attraverso la sezione di un elemento in calcestruzzo è studiata attraverso un'analisi termica della sezione stessa. Il risultato viene rappresentato attraverso mappe di temperatura, ovvero con l'utilizzo delle isoterme

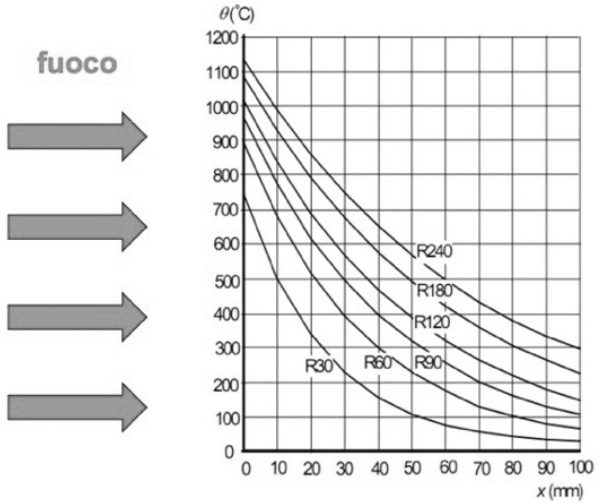


Figura 3-13 Mappe di temperatura, con isoterme in funzione della distanza dalla superfice esposta al fuoco. Fonte: Bamonte (2014)

Le principali proprietà termiche del calcestruzzo sono:

- Conducibilità termica;
- Calore specifico;
- Densità;
- Diffusività termica.

3.3.1 Conducibilità termica

La conduttività termica (λ), unità di misura: W/mK , descrive il trasporto di energia, sotto forma di calore, attraverso un corpo in seguito alla presenza di un gradiente di temperatura. È una proprietà specifica del materiale ed è in primo luogo una funzione della densità e della tipologia di aggregato. Generalmente in un ambiente ordinario a temperatura ambiente risulta essere compresa in un intervallo tra 1.4 e 3.6 W/mK.

Specifici valori di λ per diversi valori di densità sono presenti all'interno dell'UNI 10351 "Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore". Se si considera invece, la tipologia dell'aggregato, si può notare una netta differenza tra aggregati silicei e quarzite che presentano una conduttività nettamente maggiore rispetto al basalto e alla dolorite.

Prendendo invece in considerazione la temperatura, la variazione rispetto al limite superiore e inferiore della conducibilità termica del calcestruzzo è illustrata nella figura seguente.

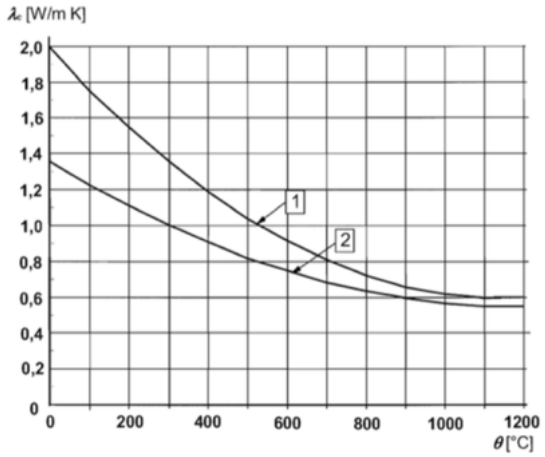


Figura 3-14 Conducibilità termica del calcestruzzo. 1) limite superiore 2) limite inferiore. Fonte: EN 1992-2.

Il valore inferiore è stato ottenuto da paragoni con le misure di temperatura in test a fuoco differenti tipologie di calcestruzzo. Questo da valori molto più realistici per strutture in calcestruzzo rispetto al limite superiore, che è stato ottenuto da test su strutture in calcestruzzo armato.

3.3.2 Calore specifico

Il calore specifico Cp è la quantità di calore che una massa unitaria di un materiale deve ottenere o perdere per cambiare la sua temperatura di un grado. Il calore specifico nel Sistema Internazionale (SI) è misurato in J/KgK. Questa proprietà misura l'indice di facilità con il quale il calcestruzzo può subire variazioni di temperatura. Il calore specifico è anche correlato alla conducibilità termica e alla diffusione termica. Come suggerito all'interno del testo Phan e al. (2010) il calore specifico è influenzato da:

- Contenuto di umidità
- Variazione di temperatura
- Densità del calcestruzzo

Il Cp aumenta con l'aumentare del contenuto di umidità. Basti pensare che l'acqua ha un calore specifico pari a 4189 J/Kg K, nettamente elevato, se paragonato al valore tipico di 1000 J/Kg K. Il calore specifico di calcestruzzo costituito da aggregati calcarei e silicei a secco con umidità pari allo 0% può essere descritta dalle seguenti relazioni in relazione all'aumento della temperatura:

$Cp(\theta) = 900$ [J/kg K]	$20°C < (\theta) < 100$ °C	(3.1)
$Cp(\theta) = 900+(8-100)$ [J/kg K]	$100°C < (\theta) < 200$ °C	
$Cp(\theta) = 1000 + (8 - 200) /2$ [J/kg K]	$200°C < (\theta) < 400$ °C	
$Cp(\theta) = 1100$ [J/kg K]	$400°C < (\theta) < 1200$ °C	

In funzione esclusivamente della temperatura il calore specifico del calcestruzzo con aggregati calcarei cresce fino ai 600°C ed in seguito mantiene un andamento costante oppure se costituito da aggregati silicei cresce fino ai 1000 °C per poi decrescere.

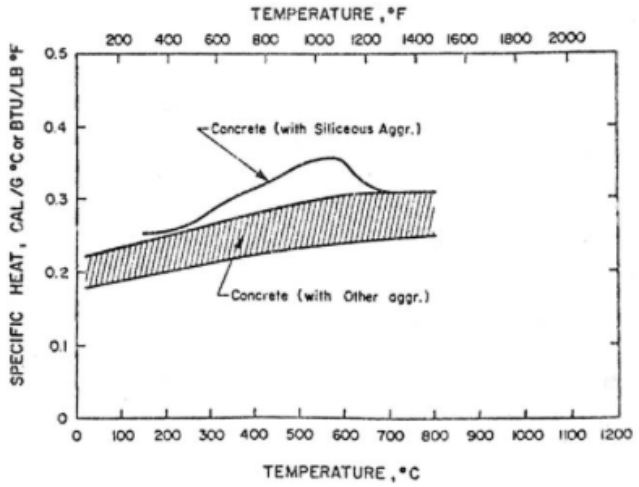


Figura 3-15 Conducibilità termica del calcestruzzo confezionato con cemento Portland, in relazione all'aumento di temperatura. Fonte: Harmathy e al. (1973)

Cp diminuisce con l'aumentare della densità ρ. Questa relazione è visibile grazie alla formula:

$$Cp = Cv / \rho \qquad (3.2)$$

con

Cv capacità termica volumetrica [J/m^3 K]

Si può quindi dire che un intervallo di valori relativi al calore specifico di calcestruzzo normale è compreso tra 840 e 1170 J/Kg K.

3.3.3 Densità

Nell'intervallo di temperatura da 20 °C a 150 °C la densità del calcestruzzo dipende dalla densità dei suoi aggregati e dal suo contenuto di umidità. Di fondamentale importanza sono le condizioni di maturazione in quanto i campioni umidi perdendo acqua evidenziano una maggiore diminuzione della densità rispetto ai calcestruzzi che hanno subito l'essiccazione. A temperature da 150 °C a 600 °C (decarbonazione del calcare) la densità del calcestruzzo calcareo è relativamente costante. Gli aggregati silicei presentano una lieve diminuzione della densità con

riscaldamento nell'intervallo da temperatura ambiente a 700 °C. Il più marcato declino della densità a temperature più elevate è dovuto all'ampia espansione termica del quarzo. Comportamento molto differente è proprio del basalto, che mostra il più piccolo calo della densità a causa della sua espansione termica inferiore.

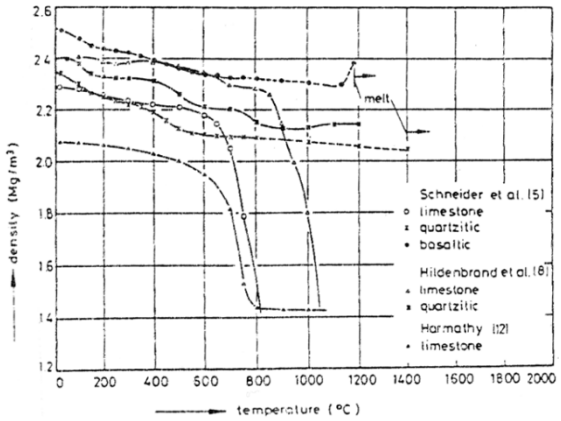


Figura 3-16 Andamento del valore della densità per differenti tipologie di calcestruzzo. Fonte: Schneider e al. (1981).

3.3.4 Diffusività termica

La diffusività termica è una misura della velocità con cui il caldo diffonde attraverso un materiale in tutte le direzioni a causa di una modificazione della temperatura ed è quindi considerato come un indice della facilità con cui il materiale trasferirà il calore a causa di un cambiamento di temperatura. È legata a tre parametri, conducibilità termica, densità del materiale e calore specifico, ma spesso è misurata mediante prove sperimentali. Gli aggregati con valori crescenti di diffusività termica sono basalto, riolite, granito, calcare, dolerite e quarzite.

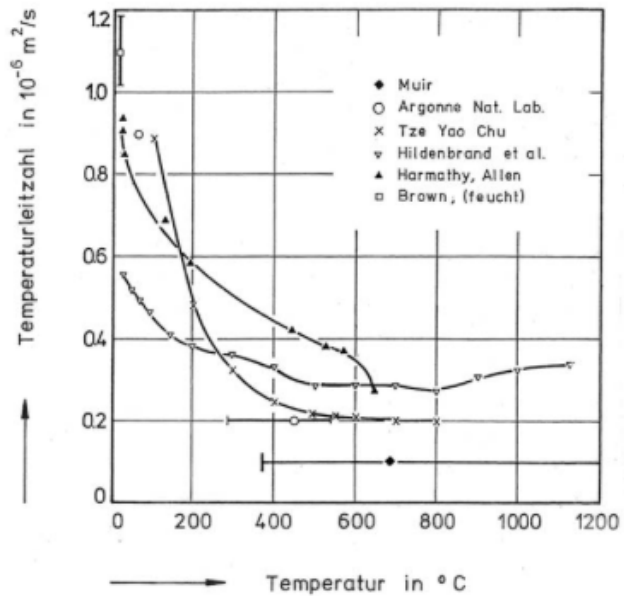


Figura 3-17 Diffusività termica del calcestruzzo calcareo. Fonte: Schneider (1982).

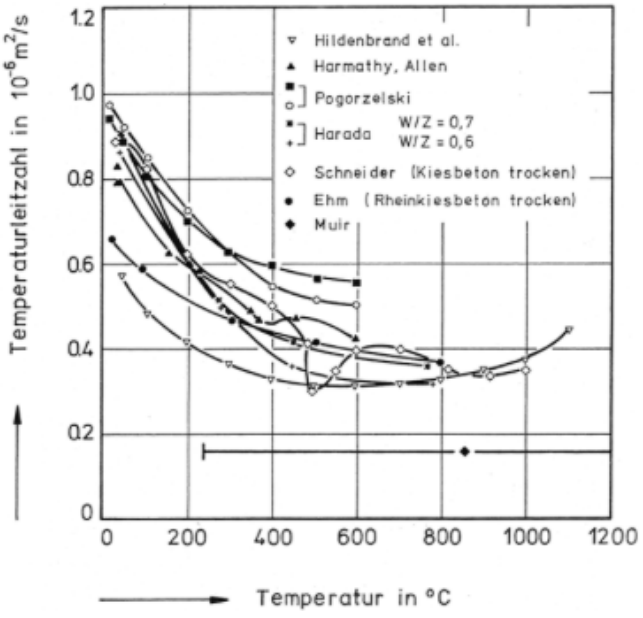


Figura 3-18 Diffusività termica del calcestruzzo siliceo. Fonte: Schneider (1982).

Generalmente si può dire che la diffusività termica degli aggregati silicei è maggiore di quelli calcarei.

4 Fenomeno Spalling

4.1 Definizione

Secondo Khoury and Anderberg (2000), lo spacco esplosivo (explosive spalling) del calcestruzzo è il distaccamento, violento o non, di strati o pezzi di materiale dalla faccia esposta di un elemento strutturale se sottoposta ad alte velocità di riscaldamento e temperature.

Quasi tutta la letteratura relativa al fenomeno dello spalling del calcestruzzo è frutto dell'esperienza diretta attraverso esperimenti su provini e l'osservazione del comportamento di costruzioni edili con strutture in calcestruzzo esposte al fuoco. Uno dei primi studi riguardo il fenomeno dello spalling risale al primo decennio del '900, esattamente nel 1916, svolto da Gary. Negli ultimi anni, di notevole importanza è stato lo studio del fenomeno nei tunnel e nelle gallerie dove si è potuto sperimentare una più intensa curva tempo-temperatura e dove il contenuto di umidità nelle strutture era molto maggiore (circa 75%) rispetto a quello delle normali costruzioni (circa 55%). Questo ha portato alla scoperta di nuove ed importanti considerazioni riguardo lo studio del fenomeno.

Gary riuscì a riconoscere che il fenomeno di spacco esplosivo si può presentare in forme diverse, che lui suddivise in quattro categorie. Le categorie suggerite sono:

- Spalling degli aggregati del calcestruzzo
- Spalling esplosivo
- Spalling superficiale
- Spalling angolare

Surface spalling.

Explosive spalling.

Figura 4-1 Spalling superficiale e spalling esplosivo. Fonte: Bastami (2011).

In seguito Khoury (2000) aggiunse due tipologie di spalling:

- Sloughing off spalling
- Spalling post-raffreddamento

I primi tre normalmente si verificano nelle prime fasi dell'incendio, durante la fase di riscaldamento, mentre gli altri si verificano nelle fasi finali in cui si hanno elevate temperature. Con il verificarsi di un'espulsione improvvisa di materiale si ha un'improvvisa riduzione della sezione resistente della struttura, nonché una riduzione (o addirittura annullamento) del copriferro delle armature.

Ovviamente, tra tutte le tipologie quella più pericolosa e più violenta risulta essere quella esplosiva. Questo fenomeno può portare alla completa disintegrazione dell'elemento, con un distacco repentino e con un notevole dissipamento di energia già in una fase precoce dell'esposizione al fuoco con una notevole riduzione del livello di sicurezza al fuoco garantito dalla struttura. Su questo fenomeno specifico si concentra la maggior parte della ricerca.

Sfortunatamente, l'incapacità di prevedere con accuratezza il fenomeno di spalling in tutte le sue forme è un fattore limitante nello

sviluppo di un modello preciso e saldo per la valutazione della risposta al fuoco delle strutture in cemento armato. Prima di analizzare in maniera dettagliata lo spalling esplosivo occorre analizzare anche le altre tipologie.

Spalling degli aggregati del calcestruzzo

E' caratterizzato da un suono scoppiettante. Come evidenziato precedentemente gli aggregati possono presentare differenti comportamenti se soggetti ad alte temperature e questo fenomeno porta alla loro separazione dalla matrice cementizia.

Spalling superficiale

Questo fenomeno molto simile a una screpolatura della superficie, colpisce esclusivamente gli strati esterni di calcestruzzo che si staccano dall'elemento strutturale.

Spalling angolare

Questa tipologia di spalling, si verifica quando un angolo di calcestruzzo si rompe in corrispondenza di una barra d'armatura. A causa di un riscaldamento non omogeneo, si genera una deformazione (ovalizzazione) del calcestruzzo nei pressi della barra di rinforzo uniformemente riscaldata. La differenza di deformazione comporta l'insorgere di fessurazioni che possono causare il distacco di un intero angolo dall'elemento.

Progressive gradual spalling (Sloughing Off)

Questa tipologia è causata dal deterioramento chimico della pasta di cemento e dalla progressiva perdita di forza dovuta al cracking interno. La causa principale è legata all'elevata temperatura raggiunta dal calcestruzzo (anziché al tasso di riscaldamento). Risulta molto comune su una lastra riscaldata dal basso, la tensione sarà troppo bassa per riuscire a tenere ancorati a sé i piccoli pezzi di calcestruzzo.

Spalling post-raffreddamento

Si verifica nel momento in cui l'incendio è finito, in seguito al raffreddamento. Questo tipo di spalling è stato osservato soprattutto all'interno di tipi di calcestruzzo che contengono aggregato calcareo. La spiegazione più plausibile è la reidratazione del CaO a $Ca(OH)_2$ dopo il raffreddamento, con un'espansione di oltre il 40%. Questa porta alla generazione di numerose e gravi cricche interne e continua fino a quando non è più presente acqua.

Si può ora analizzare in maniera più dettagliata il fenomeno dello spacco esplosivo.

4.2 Teorie riguardo il fenomeno di spacco esplosivo

Lo spacco esplosivo è considerata la forma più seria e più violenta di danneggiamento durante l'incendio. Nella maggior parte dei casi questo comporta una riduzione dello strato superficiale che può andare dai 25 ai 100 mm di spessore, e tende a manifestarsi nei primi 30 minuti di un incendio, con temperature che sono comprese tra i 250 ed i 400 °C. Risulta essere anche un fenomeno altamente stocastico, in quanto per i campioni provenienti dallo stesso lotto, e in condizioni identiche, si rilevano differenti livelli di degrado. I meccanismi per descrivere il fenomeno dello spalling possono essere suddivisi in 3 categorie (Khoury 200):

- Processo termo-igrometrico: proposto da Shotter & Harmathy nel 1965, Meyer-Ottens nel 1972 e Aktarruzzaman nel 1973.
- Processo termo-meccanico: sviluppato da Bazant e al. (1996)
- Combinazione del processo termo-meccanico e del processo termo-igrometrico: sviluppato principalmente da Zhukov nel 1975. In seguito Sertmehmetoglu nel 1977 e Connel1y nel 1995.

4.2.1 Processo termo-igrometrico.

Il riscaldamento del calcestruzzo provoca un movimento di fluidi all'interno dei pori. L'acqua all'interno della miscela crea i fenomeni di evaporazione. Come principale conseguenza di questo fenomeno, si riscontra un aumento della pressione interstiziale soprattutto nei porti chiusi, ostruiti o che non hanno un collegamento con la superficie esterna. Le pressioni del vapore generano degli sforzi di trazione elevati tali da provocare la rottura localizzata all'interno del conglomerato, che si manifesta come un distacco di porzioni più o meno grandi del rivestimento. Questo fenomeno è stato descritto nella letteratura scientifica, attraverso tre differenti modelli:

- Shotter & Harmathy propongono il "moisture clog model"
- Meyer-Ottens hanno coniato il termine "vapor drag forces"
- Akhtaruzzaman analizza la pressione all'interno dei pori attraverso un "modello di un poro di forma sferica idealizzato".

Spalling dovuto alla formazione del "moisture clog".

Considerazione iniziale per poter descrivere questo modello è sottolineare l'importanza del contenuto di umidità all'interno della sezione dell'elemento in calcestruzzo. Nel momento in cui il calore inizia a penetrare, per effetto dell'aumento di temperatura, si verifica che la fase acquosa presente nei pori capillari in piccola parte evapora verso l'ambiente esterno e in maggior parte verso l'interno del conglomerato, in direzione delle regioni più fredde dove viene assorbita dagli strati adiacenti. Cosi, come la sottile regione asciutta aumenta di spessore, uno strato saturo (dovuto alla condensazione del vapore acqueo) di spessore rilevante si viene a formare a una determinata distanza dalla superficie esposta al fuoco. Un attimo dopo si crea una sezione ben definita che divide la regione asciutta da quella satura, dove si verificherà un ulteriore rilascio di vapore. E quindi, come la temperatura della faccia esposta al fuoco continua ad aumentare, un accentuato gradiente di temperatura si sviluppa lungo la sezione asciutta, con conseguente elevato flusso di calore e vaporizzazione nella linea di divisione tra le due regioni prima citate. Si definiscono tre zone ad umidità diversa: una zona asciutta vicino la superficie riscaldata, una zona di evaporazione intermedia, e un'ultima zona satura di umidità che contiene una

percentuale di umidità molto maggiore rispetto alla condizione iniziale. Non avendo quasi nessuna via di uscita verso le regioni più fredde, il vapore è costretto a muoversi verso la faccia della sezione esposta al fuoco dove però non ha un facile passaggio verso l'esterno. Di conseguenza la pressione aumenta all'interno dei pori, superando la resistenza del materiale e generando il fenomeno esplosivo. Ruolo fondamentale in questo processo è giocato dalla permeabilità. Se la permeabilità del materiale è sufficientemente alta, la barriera di umidità creata sarà dissipata attraverso il lato della sezione non esposto al fuoco. D'altra parte se la permeabilità è bassa, come già scritto, la pressione in corrispondenza dello strato di separazione tra regione asciutta e satura continuerà a crescere fino a superare la resistenza a trazione del calcestruzzo generando così l'espulsione del conglomerato negli strati corticali. La pressione che si crea è molto più elevata in un calcestruzzo ad alta resistenza e si sviluppa in una zona molto più vicina alla parete riscaldata.

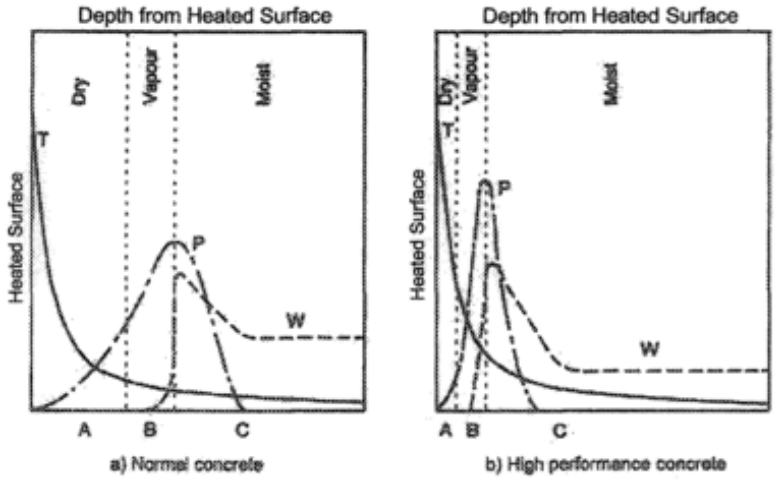


Figura 4-2 Andamento della pressione all'interno degli strati superficiale di un elemento in calcestruzzo. Paragone tra calcestruzzo normale e ad alta resistenza. Fonte: Khoury (2000)

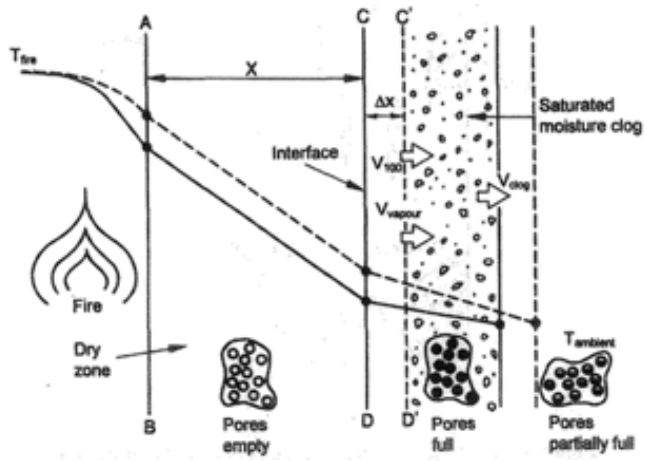


Figura 4-3 "Moisture clog model". Vnegono evidenziate le tre differenti zone di vapore. Dall'esterno all'intenro: zona asciutta, zona di interfaccia con vapore libero e zona completamente satura. Fonte: Khoury (2000)

Spalling dovuto all' elevata forza di trascinamento del vapore.

La spiegazione del modello può essere spiegata come segue: l'umidità all'interno del calcestruzzo inizia a evaporare a temperature di T = 100 °C con i relativi processi di migrazione dell'umidità. Il flusso di vapore che si crea all'interno provoca delle tensioni di taglio lungo le pareti dei pori. Questa forza di attrito è chiamata "forza di trascinamento". Il fenomeno di spacco esplosivo si verifica nel momento in cui le sollecitazioni superano la resistenza a trazione del calcestruzzo. Queste variano in funzione dell'isoterma T = 100 °C, dalla distanza dalla superficie riscaldata e del contenuto di umidità.

Modello di un poro di forma sferica idealizzato.

Viene ipotizzato che la pressione generata dal vapore si sviluppi all'interno di pori schematizzati attraverso la forma di una sfera. La sollecitazione generata è riconducibile a una tensione all'interno del guscio sferico che porta alla generazione dello spalling nel momento in cui supera la resistenza a trazione dello strato di cemento. Akhtaruzzaman ha notato che i campioni riscaldati dopo essere stati sottoposti a un accumulo di acqua hanno maggiore probabilità di essere sottoposti al fenomeno esplosivo di spalling. In questo modo, la pressione nelle sfere scresce maggiormente portando a pressioni molto più elevate, rispetto a calcestruzzi più asciutti.

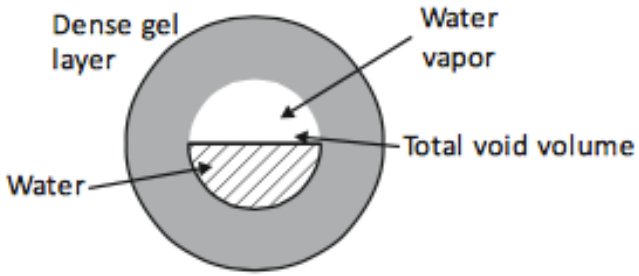


Figura 4-4 Volume sferico che rappresenta il modello di un poro. Fonte: Akhtaruzzaman (1973)

4.2.2 Processo termo-meccanico

Il riscaldamento delle strutture in calcestruzzo induce degli elevati gradienti termici nelle singole sezioni, in particolare nei primi centimetri della superficie esposta al calore. Secondo questa teoria l'espulsione del frammento è dovuta sostanzialmente alla comparsa di sforzi di compressione nelle zone limitrofe alla superficie riscaldata. Queste forze, generate a causa delle notevoli velocità di riscaldamento arrivano a superare la resistenza a compressione del materiale, causando così la comparsa del fenomeno esplosivo.

Sostenitore di questa teoria sono Bazant e al. (1996), i quali affermano che le sollecitazioni termiche sono causate da una distribuzione non uniforme della temperatura attraverso la struttura dell'elemento. Queste sollecitazioni possono portare a un'instabilità fragile della sezione. Ovviamente, si sottolinea che anche le sollecitazioni dovute alla pressione dei pori possono effettivamente servire da innesco per la frattura che porta alla scheggiatura, ma che gli stress termici costituiscono il fenomeno che guida l'esplosione. La ragione per il ruolo secondario della pressione dei pori in questo fenomeno è che quando si apre una crepa il volume disponibile per il vapore viene improvvisamente aumentato di diversi ordini di grandezza, attenuando così la pressione all'interno del sistema di pori.

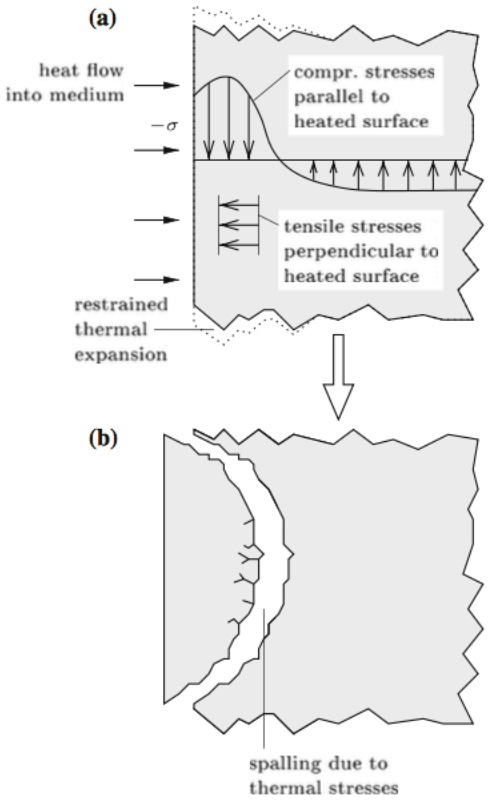


Figura 4-5 Illustrazione del processo termo-meccanico. Fonte: Jansson (2013)

4.2.3 Combinazione del processo termo-igrometrico e meccanico

Solitamente si valuta l'azione combinata dei due processi, tenendo anche in considerazione il grado di fratturazione interna.

In merito a questo, Zhukov studiò che la forza sviluppata all'interno del calcestruzzo soggetto a fuoco è dato dalla somma di entrambi i contributi, ovvero la tensione generata dalla pressione nei pori σ_p, e quella generata dal gradiente termico σ_t. Per i provini caricati, tale processo deve essere tenuto in considerazione unitamente all'effetto dovuto alle tensioni indotte dai carichi applicati. Nel momento in cui le tensioni superano la resistenza a trazione del calcestruzzo si assiste al fenomeno dello spalling, con la creazione di fessure parallele alla superficie esposta all'azione del fuoco.

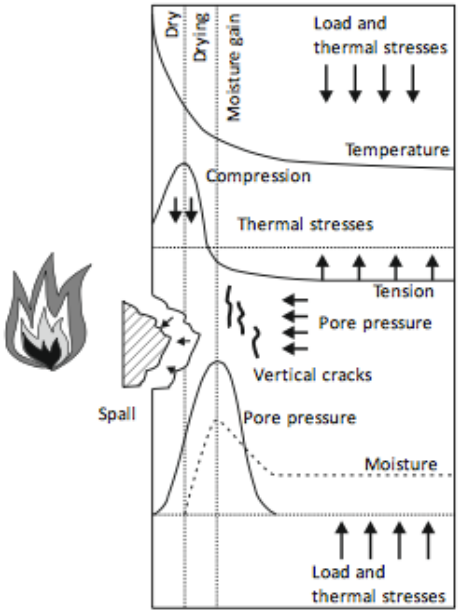


Figura 4-6 Combinazione del processo termo-igrometrico e termo-meccanico. Fonte: Khoury (2000)

4.2.4 Teorie e studi recenti

Siccome tutta la fisica coinvolta in questo processo è soggetta a diverse interpretazioni, in seguito all'esposizione dei 3 meccanismi classici che si pensi possano generare il fenomeno esplosivo dello spalling è giusto accennare l'esistenza anche di altre teorie e studi, Jansson (2013).

Nel 2000 viene introdotta da Ichikawa la teoria "The BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) theory for fire spalling". Secondo Ichikawa la teoria BLEVE può rivelarsi un tassello fondamentale nella spiegazione del fenomeno che provoca lo spacco esplosivo nel calcestruzzo ad alta resistenza. Nel momento in cui l'elevata pressione all'interno di un poro viene rilasciata verso l'esterno della sezione, la conversione in vapore avviene in maniera molto veloce. La rapidità del fenomeno avviene poiché tutta l'energia accumulata durante il processo di riscaldamento oltre i 100 °C viene rilasciata in un processo di ebollizione istantaneo, che viene definita come un'esplosione. Durante questo processo le pareti sottili tra i pori chiusi e i pori aperti comunicanti verso l'esterno (con relativa pressione più bassa) possono essere distrutte e abbattute dalla differenza di pressione, portando a una progressiva crescita della fratturazione all'interno della microstruttura.

Nel 2006 si sviluppano numerosi modelli numerici sofisticati che mirano a descrivere i meccanismi che inducono il fenomeno di spalling nel calcestruzzo. Un team di ricerca italiano ha lavorato duramente con un modello termo-chimico-meccanico chiamato modello "Padua". Attraverso l'utilizzo di questo modello si punta ad arrivare a prevedere il fenomeno. I modelli utilizzati sono basati su principi termodinamici, ma sono ancora ad un livello molto arretrato, ovvero, i modelli numerici non sono ancora in grado di sostituire in maniere affidabile i test d'incendio per la determinazione o previsione del fenomeno di spacco distruttivo nel calcestruzzo.

Nel 2008 un altro contributo molto importante sul concetto di spalling viene dato da Jannson riaffermando il concetto della teoria basata sulla riduzione della resistenza in zone sature della sezione trasversale dell'elemento, appoggiando la combinazione del processo termo-meccanico e termo-igrometrico.

Infine tra il 2005 e il 2009 Fellinger, Breunese e Ghabezloo hanno studiato il concetto di coefficiente termico di pressurizzazione dell'acqua (MPa/°C) misurando la transizione di questo valore da temperatura ambiente a 373°C e osservando un picco in corrispondenza dei 150 °C. Questo ha mostrato l'insorgere di pressioni molte elevate ben oltre la resistenza a trazione del calcestruzzo. Si è così scoperto che nel momento in cui un poro chiuso risulta riempito circa il 32% del suo volume, durante il riscaldamento la trasformazione in vapore dell'acqua porta alla creazione di elevate pressioni.

4.3 Fattori che influenzano lo spacco esplosivo

Molti sono i fattori che influenzano lo spalling esplosivo, identificati in molti anni attraverso uno svariato numero di esperimenti. I fattori possono essere in funzione di diversi aspetti:

- composizione del materiale
- geometria della sezione
- tipologia strutturale
- ambiente circostante

Una sintesi dei diversi fattori e della loro influenza è stata fatta da Khoury and Anderberg (2000) e riconfermata da Majorana e al. (2010).

Velocità di riscaldamento: questa caratteristica è una delle principali, in quanto influenza notevolmente il verificarsi di spalling esplosivo. Si nota una netta diminuzione della temperatura in corrispondenza della quale si verifica il fenomeno esplosivo. Questo porta quindi a ad avere un aumento della probabilità e della gravità con l'incremento della velocità di riscaldamento.

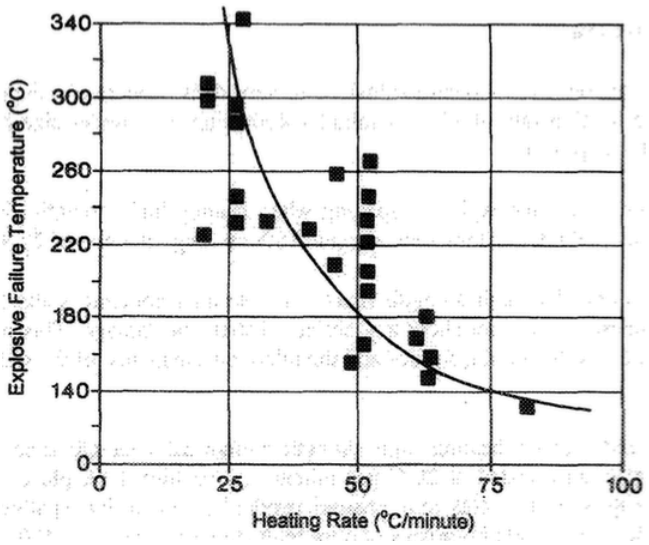


Figura 4-7 Spalling in relazione della velocità di riscaldamento. Fonte: Khoury (2000).

Esposizione al riscaldamento: più sono le facce esposte al fuoco, più alta è la probabilità che si verifichi il fenomeno spalling. Considerando ad esempio le lastre (esposizione di solo 1 faccia), queste rispondono molto meglio all'esposizione al fuoco, rispetto alle travi (da 3 a 4 facce esposte).

Forma della sezione: la rottura è molto probabile in elementi con sezione trasversale che cambia rapidamente. Gli angoli, in particolare quelli acuti, hanno una forte tendenza a essere soggetti a spalling. Le sezioni ideali sono quindi superfici piane e angoli arrotondati.

Dimensione della sezione: si è riscontrato un comportamento nettamente positivo negli elementi molto sottili rispetti a quelli più spessi. Questo viene attribuito al fatto che l'umidità tende ad uscire dalla sezione più facilmente e più velocemente, riducendo così la pressione nei pori. Detto ciò, in maniera opposta, altre prove sperimentali suggeriscono che il fenomeno è meno probabile in spessori molto grandi, come ad esempio maggiori di 300 mm.

Contenuto di umidità: generalmente il fenomeno di spalling non si verifica se il contenuto di umidità è minore del 2% in massa (ovvero il 4.4% in volume). Problema non irrilevante di questa affermazione è che questo contenuto di umidità è molto difficile da raggiungere nella pratica comune. Anche per il fatto che il calcestruzzo ad alta resistenza presenta il fenomeno dello spalling con percentuali di umidità molto contenute vicine al valore limite (2,3-3% in peso). All'interno di questa tipologia di calcestruzzi si ha un basso livello di porosità e quindi una bassa permeabilità. Questo rende davvero difficile la fuoriuscita dell'umidità, che a sua volta provoca pressioni più alte dei pori, aumentando il rischio spalling esplosivo, anche nonostante la maggiore resistenza a trazione. Altro fattore da tenere a mente è che il contenuto di umidità all'interno dell'elemento strutturale decresce con il passare degli anni. In seguito ad analisi svolte si è notato che la percentuale media di umidità, due anni dopo la costruzione, contenuta all'interno delle strutture in calcestruzzo nelle abitazioni è pari al 3% del peso. Tuttavia, questo non può essere ritenuto come un dato molto attendibile, dovuto al fatto che la quantità di umidità contenuta negli elementi è soprattutto in relazione all'ambiente e alle condizioni climatiche a cui è sottoposto. Infine, altro aspetto di assoluta importanza è la variazione dell'umidità in relazione al rapporto acqua/cemento.

Tabella 4-1 Contenuto di umidità dopo 28 giorni di maturazione. Fonte: Rielaborata da Khoury (2000)

Rapporto A/C	0,6	0,5	0,4	0,3
Contenuto di umidità (% in massa)	5,1	4,7	4,5	4,2

Permeabilità: forse uno dei fattori che gioca un ruolo fondamentale nella presenza o non del fenomeno di spalling. Questo è un fattore che influenza principalmente la velocità di rilascio del vapore. Le prove sperimentali hanno suggerito che lo spalling è molto poco probabile per un calcestruzzo con una permeabilità inferiore a 5×10^{-11} cm^2. Il calcestruzzo ad alta resistenza ha una bassa permeabilità e una tendenza molto alta ad essere soggetto a spalling.

Età del calcestruzzo: in generale la maggior parte degli studi, suggerisce che la probabilità che si verifichi il fenomeno distruttivo si abbassi con l'età ma questo potrebbe essere in diretta relazione con l'abbassamento della permeabilità nel tempo. Nonostante questo l'influenza dell'età di un calcestruzzo nella probabilità di essere soggetto a spacco esplosivo genera molte contraddizioni.

Resistenza del calcestruzzo: si è già visto come a causa della permeabilità i calcestruzzi ad alta resistenza sono affetti maggiormente dal rischio di spalling. Paradossalmente, il calcestruzzo di maggiore qualità e maggiore resistenza è molto più soggetto al fenomeno dello spalling, in quanto elevate resistenze si ottengono in presenza di bassi rapporti acqua/cemento e di additivi come i fumi di silice, che determinano la creazione di un calcestruzzo molto denso e quindi poco poroso e permeabile.

Resistenza a compressione e a trazione: nella maggiore parte dei casi si può ipotizzare che i carichi applicati aumentano la tendenza degli elementi in calcestruzzo ad essere soggetti a spalling.

Quadro fessurativo esistente: la presenza di fessure ha un duplice effetto. Il primo è un effetto estremamente positivo in quanto le micro fessure facilitano l'uscita verso l'esterno del vapore, contribuendo all'attenuazione della pressione termo-igrometrica; il secondo è negativo in quanto le micro e macro fessure contribuiscono alla propagazione della frattura in seguito all'innesco dell'evento distruttivo

Tipologia dell'aggregato: per diminuire la probabilità di spalling è consigliato l'utilizzo di aggregati che presentano una bassa espansione termica. Il rischio di innescare il fenomeno esplosivo è maggiore in presenza di aggregati leggeri, di basalto e calcarei, mentre lo è meno negli aggregati silicei.

Dimensione dell'aggregato: maggiore è la dimensione dell'aggregato, più probabile è che si verifichi spalling esplosivo.

Presenza di armature: in seguito a numerosi esperimenti su provini di calcestruzzo armato, la presenza di armature riduce il rischio di spalling. La probabilità che si verifichi l'evento è in funzione soprattutto della presenza o dell'assenza di queste, più che della quantità di armature. Tuttavia, meglio evitare un'eccessiva congestione o barre troppo ravvicinate.

Copriferro: durante numerosi test si è notato che più grande è il copriferro, più elevata è la possibilità che si verifichi il fenomeno dello spalling. Nel caso in cui il copriferro supera i 40 mm nei calcestruzzi ad alta resistenza e 50 mm nei calcestruzzi alleggeriti, le probabilità che si verifichi spalling è molto elevata. Contrariamente a questo, nei casi in cui lo spessore del copriferro sia inferiore ai 15 mm, il calcestruzzo è molto meno soggetto al fenomeno degradativo.

Presenza di fibre: l'uso di fibre riveste un ruolo fondamentale nella prevenzione del fenomeno esplosivo. Questo può avere una duplice funzione. L'uso di fibre di acciaio non previene lo spalling, ma vengono usate per incrementare la duttilità del calcestruzzo e di far si che essa abbia capacità resistenti anche dopo la fessurazione. Ultimamente però si è notato come queste riescano ad aumentare l'energia di frattura e giocare un ruolo fondamentale nella diminuzione dell'energia cinetica del materiale calcestruzzo espulso dalla sezione oggetto di esame. Viceversa, la presenza di opportuni quantitativi di fibre polipropileniche offre un grande contributo nell'eliminazione dello spalling anche nei calcestruzzi ad alta resistenza. In seguito dell'innalzamento della temperatura prodotto dall'incendio le fibre

fondono lasciando all'interno della matrice cementizia delle porosità aggiuntive in cui il vapore può espandersi riducendone la pressione responsabile dei fenomeni di espulsione del calcestruzzo.

4.4 Conseguenze del fenomeno spalling

L'estensione e la profondità dello spalling può variare notevolmente. In alcuni casi in cui il fenomeno incendio non è molto aggressivo i danni possono essere solo superficiali, in altri invece, le cause possono avere conseguenze molto gravi, fino ad arrivare al collasso strutturale. In ogni caso ogni tipologia di spalling, porta a una riduzione del periodo di resistenza al fuoco della sezione. I fenomeni elencati nella sezione precedente portano a un indebolimento dell'elemento strutturale soggetto ad elevate temperature, in particolare:

- Espulsione di frammenti ad alta velocità: questo fenomeno può essere spiegato in modo dettagliato attraverso l'analisi dell'energia cinetica rilasciata durante il fenomeno esplosivo. Ogni frammento sarà quindi dotato di una certa velocità e di una accelerazione che sono state ricollegate alla rispettiva energia cinetica. Questo particolare aspetto, verrà trattato nella sezione relativa all'energia di frattura. È di particolare importanza studiarlo in quanto può essere dannoso per le persone all'interno della struttura, per i vigili del fuoco che stanno intervenendo e per la rottura delle finestre circostanti, che porterebbe a un ulteriore incremento del rapporto di ossigeno.
- Perdita della capacità portante: il fenomeno di spalling può essere dannoso causando una riduzione della sezione resistente e/o eliminando il copriferro che fornisce una protezione delle barre di armatura. Il problema è da considerare già in una fase preventiva di progettazione in quanto la riduzione della sezione trasversale di un elemento strutturale, provoca delle sollecitazioni estremamente più elevate nella zona restante. Nel caso di diminuzione o addirittura annullamento del copriferro, l'acciaio va incontro a temperature molto più alte, riducendo la sua

resistenza e quindi tutta la resistenza della struttura in calcestruzzo nel suo complesso.

- Diminuzione della sicurezza al fuoco: il fenomeno di spalling può influenzare la funzione di separazione di un elemento, creando fori in travi o pannelli che consentono la diffusione del fuoco in altri ambienti. Questo aspetto è di vitale importanze nel momento in cui vengono considerate le vie di fuga e i luoghi sicuri.
- Progetto della sicurezza non corretto: l'evento dannoso inaspettato può rendere inappropriati e inadatti i calcoli eseguiti in fase di progettazione riguardo il progetto della sicurezza al fuoco degli elementi strutturali. Si ottiene così una significativa riduzione del livello di sicurezza delle strutture in calcestruzzo durante il fenomeno incendio.
- Reazione esplosiva: quando una porzione di cemento si rompe e viene espulsa via, questo viene scagliato ad alta velocità risultando molto dannosa per vite umane o per strutture adiacenti.

Con lo scopo di cercare di comprendere meglio il rischio e le conseguenze del fenomeno esplosivo di spalling all'interno di elementi in calcestruzzo si mostrano di seguito due esperimenti di Mindeguia e al. (2000) e di Phan (2008). In questa ricerca hanno approfondito il comportamento termo-igrometrico e meccanico del calcestruzzo, osservando i comportamenti dei campioni esposti ad elevate temperature, generando così il fenomeno di spalling. Lo studio pone particolare attenzione su tre fenomeni fondamentali:

- calcolo della perdita di massa;
- evoluzione della temperatura all'interno del provino;
- evoluzione della pressione all'interno dei pori in funzione della temperatura.

Questi tre aspetti risultano fondamentali, durante lo svolgimento di un esperimento per riuscire a definire il grado di severità del fenomeno di spalling su un provino. L'obbiettivo può essere poi quello di stilare una graduatoria delle diverse miscele studiate andando a definire quelle con il miglior e peggio comportamento ad elevate temperature.

In questo esperimento in particolare, Mindeguia e al. (2000) si sono concentrati sull'influenza della compattezza della matrice cementizia, ovvero del diverso rapporto acqua/cemento all'interno della miscela. Per studiare questo fenomeno sono state confezionate 5 miscele di calcestruzzo con differente a/c..

Tabella 4-2 Composizione della miscela (Kg), resistenza a compressione, permeabilità e contenuto iniziale di acqua dei provini sottoposto a test. Fonte: Elaborazione personale da Mindeguia e al. (2000)

Composizione	B325	B350	B400	B450	B500
CEM 1 52.5	325	350	400	450	500
Aggregato siliceo 10/20	960	960	960	960	960
Aggregato siliceo 5/10	89	89	89	89	89
Sabbia silicea 0/5	740	740	740	740	740
Acqua	202	194	177	160	143
Superfluidificante	0	0,35	1,04	1,73	2,43
Rapporto A/C	**0,62**	**0,55**	**0,44**	**0,36**	**0,29**
Resistenza a compressione (MPa) dopo 28 gg	35	36	53	62	76
Permeabilità (m^2)	$1,5 \times 10^{-16}$	$1,5 \times 10^{-16}$	$3,9 \times 10^{-17}$	$1,2 \times 10^{-18}$	$1,6 \times 10^{-20}$
Contenuto iniziale di acqua libera (%)	3,8	3,8	3,5	3,2	2,8

Il test sperimentale consiste nell'applicare un gradiente termico elevato su una faccia del campione prismatico (30x30x12 cm) utilizzando un forno radiante posto a 3 cm sopra di essa e nella misurazione del peso durante l'aumento della temperatura attraverso l'utilizzo di una bilancia posta sotto di esso. Causa principale della perdita di massa del campione è la fuga del fluido contenuto all'interno del calcestruzzo (acqua, vapore e aria secca). Per monitorare l'andamento della temperatura vengono utilizzate delle termocoppie. Questi strumenti di misurazione vengono inseriti ad altezza diverse all'interno del provino (10,20,30,40,50 mm dalla superfice riscaldata).

Sono stati effettuati due test per ciascuna miscela di calcestruzzo. La temperatura massima raggiunta dal forno è di 800 °C, raggiunta rapidamente e tenuta costante per 6 ore. Alla fine, i campioni sono raffreddati in maniera naturale. Durante il test i provini sono stati sottoposti a un grande danno. Sono stati soggetti a fenomeni di fessurazione e spalling esplosivo, con l'espulsione di numerose schegge a diverse velocità.

Valutiamo ora la perdita di massa e l'evoluzione della temperatrua.

Perdita di massa

Come abbiamo già accennato la perdita di massa è collegata alla perdita dei liquidi all'interno del provino in calcestruzzo. In tabella si possono vedere i valori relativi al contenuto iniziale di acqua e in seguito la percentuale di acqua persa durante il processo di riscaldamento. Si osserva che i cinque provini perdono circa due terzi del loro contenuto d'acqua iniziale. In particolare l'acqua chimicamente legata non può essere rimossa poiché la completa disidratazione tra del CSH si ha a temperature maggiori. Tuttavia questa risulta davvero una piccola quantità che non genera un aumento di pressioni all'interno dei pori.

Tabella 4-3 Composizione delle miscele di calcestruzzo dei provini sottoposti a test. Fonte: Rielaborazione da Mindeguia e al. (2000)

Composizione	B325	B350	B400	B450	B500
Contenuto totale di acqua (%)	8,72	8,32	7,50	6,67	5,88
Acqua persa (%)	5,17	5,43	4,67	4,37	3,89
Acqua persa relativa (%)	59	65	62	66	66
Rilascio di acqua legata chimicamente (%)	1,37	1,63	1,17	1,17	1,09

Di notevole importanza, è stato anche osservato la rapidità con cui i diversi calcestruzzi perdono massa. Si nota che la velocità di fuga dell'acqua aumenta con il rapporto acqua/legante. Infatti, la bassa compattezza del calcestruzzo con alto rapporto a/c porta a una maggiore permeabilità e quindi rende più facile la fuoriuscita dell'acqua. In seguito in altri esperimenti vedremo come la perdita di massa sia un parametro fondamentale da correlare con il rischio di spalling o il degrado generato sul provino. Il peso finale e il monitoraggio di questo durante il graduale aumento della temperatura ci offre un ottime indicatore per capire il grado di severità del fenomeno di spacco esplosivo.

Evoluzione della temperatura

Altro aspetto fondamentale che ci interessa conoscere è l'evoluzione della temperatura all'esterno e all'interno del provino a diverse profondità.

Aspetto particolare da segnalare è la presenza di un leggero plateau, cioè una perturbazione, nell'aumento della temperatura. Questo è dovuto al cambio di fase dell'acqua (evaporazione) ed è in stretta relazione con la compattezza del calcestruzzo. Si notta una netta differenza tra calcestruzzo con il più alto contenuto di acqua e per quello con la minore quantità: 100 °C per il primo e 175 °C per il secondo. Questo fenomeno può essere spiegato attraverso lo studio delle forze capillari che influenzano il processo di vaporizzazione in cui in un poro di dimensioni maggiori non hanno grande rilevanza, mentre in poro piccolo c'è bisogno di temperature molto più elevate per estrarre le molecole di vapore dall'acqua liquida, influendo così sula temperatura di ebollizione all'interno dei pori. Tuttavia, essendo l'andamento delle temperature uguale in tutte e cinque le miscele di calcestruzzo si deduce che il flusso termico non viene influenzato dalla compattezza del materiale.

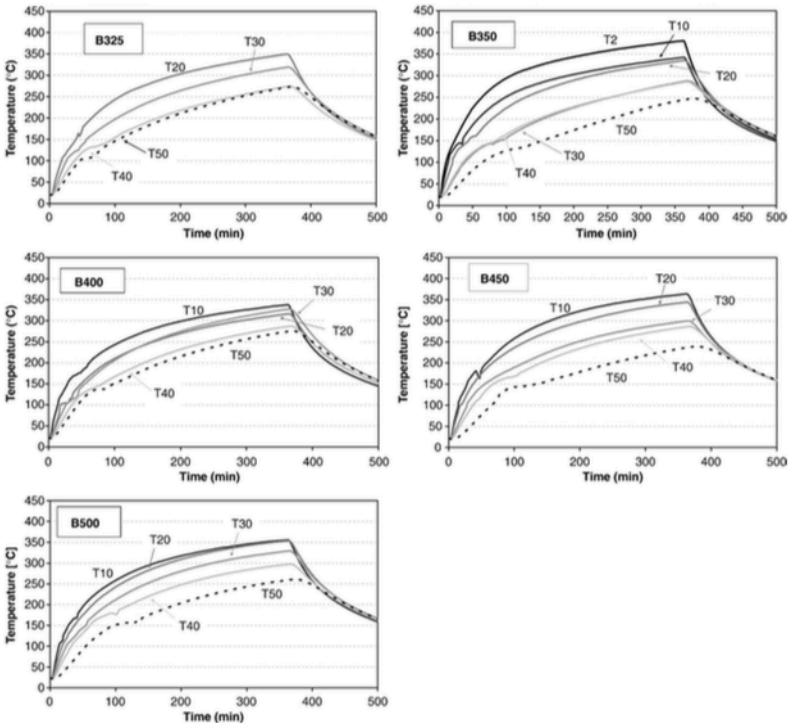


Figura 4-8 Andamento della temperatura in funzione del tempo per tutte le tipologie di miscele testate. Il numero dopo la T indica la distanza in mm dalla superficie riscaldata. Fonte: Mindeguia e al. (2000)

Ultimo aspetto che gioca un ruolo fondamentale nello sviluppo del fenomeno di spalling e che offre notevole informazioni è la misurazione della pressione all'interno dei pori, che cresce con l'aumentare della temperatura

Pressione all'interno dei pori

Per la valutazione di questo aspetto si è scelto un esperimento svolto da Phan (2008), attraverso uno studio sperimentale che ha misurato la pressione all'interno dei pori e le corrispondenti temperature in calcestruzzi ad alta resistenza (HSC) e calcestruzzi a resistenza normale (NSC). Maggior risultato di queste prove sperimentali è stato registrare l'evoluzione dell'incremento della pressione in relazione all'andamento della temperatura. L'aumento notevole della pressione dei pori si verifica quando il calcestruzzo raggiunge l'intervallo di temperatura di 105-160 °C, che coincide con la vaporizzazione dell'acqua libera e il trasporto del vapore acqueo. A questa fase segue l'aumento più significativo che si verifica nell'intervallo di temperatura del calcestruzzo di 160-180 °C, che coincide con il rilascio dell'acqua chimicamente legata. Oltre i 180 °C, la pressione dei pori continua a salire, ma con una velocità decrescente fino al picco che si ha nell'intorno dei 230°C. Dopo questo punto, si verifica lo scheggiamento esplosivo e la pressione dei pori si attenua. Il valore delle pressioni che hanno fatto scattare il fenomeno esplosivo sono state misurate a circa 2,1 MPa.In seguito è stata sperimentata anche l'aggiunta di fibre in polipropilene (argomento discusso nei paragrafi successivi), che grazie al loro contributo si è ottenuto una notevole riduzione delle pressioni, fino al 45% in meno.

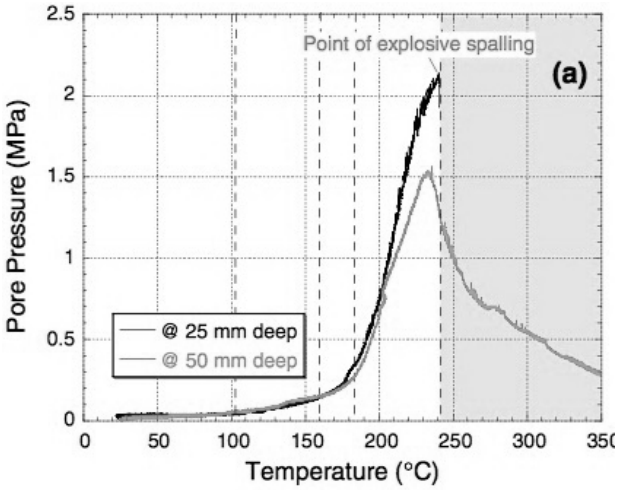


Figura 4-9 Andamento della pressione in funzione della temperatura per due differenti profondità. Fonte: Phan (2008)

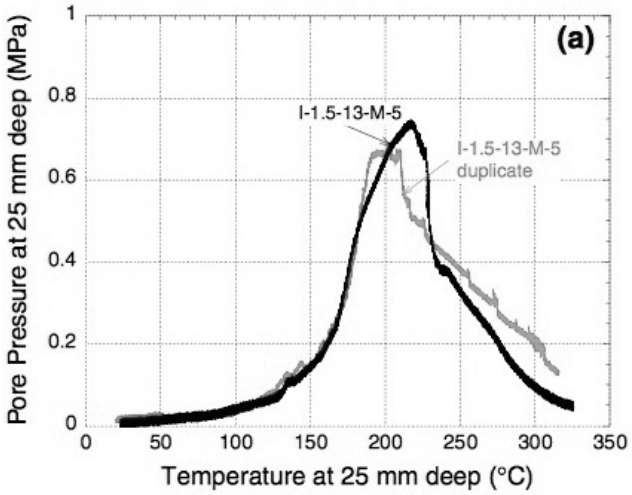


Figura 4-10 Andamento della pressione a 25 mm dalla superficie riscaldata. Fonte: Phan (2008)

4.5 Modelli di previsione dello spalling

Negli anni precedenti, la previsione dello spalling esplosivo durante il processo di riscaldamento è stato un esercizio empirico che ha portato alla realizzazione di diagrammi in funzione di tensione applicata [N/mm^2] contenuto di umidità [% in peso]. L'avvenimento del fenomeno di spalling era correlato a una combinazione tra una sollecitazione di compressione e il contenuto di umidità. Primo tentativo di previsione dello spalling è affidato a un diagramma per la progettazione di calcestruzzo preteso. Nel diagramma si evidenzia la relazione tra i livelli di pretensionamento e il livello di umidità e i punti in cui la loro combinazione danno origine al fenomeno di spalling.

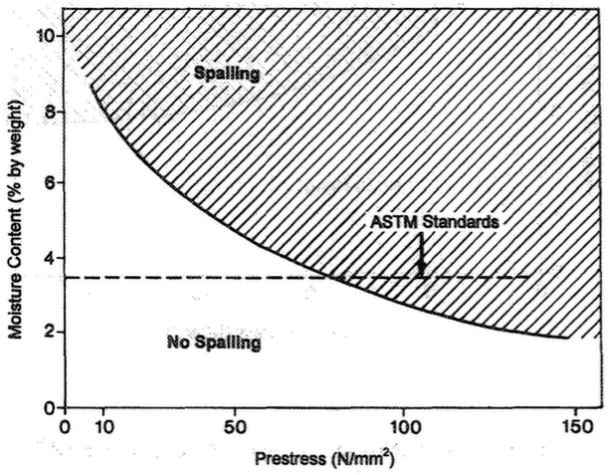


Figura 4-11 Andamento dello spalling esplosivo in funzione del contenuto di umidità e della tensione, sviluppato in seguito a Christiaanse. Fonte: Khoury (2000)

Diagramma simile mostra che il fenomeno di spacco esplosivo non si verifica se la percentuale di umidità in peso è inferiore al 3%.

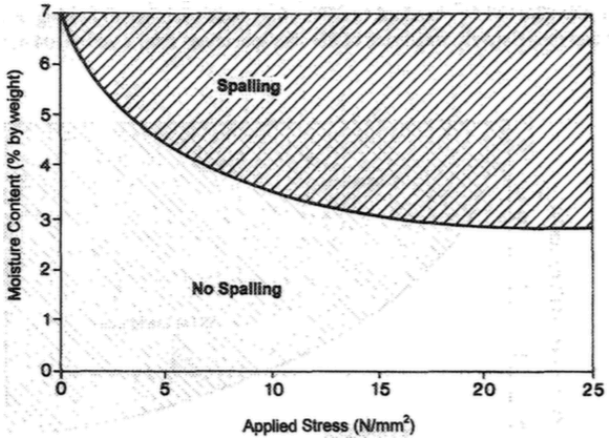


Figura 4-12 Andamento dello spalling esplosivo in funzione del contenuto di umidità e della tensione, sviluppato in seguito a Zhukov. Fonte: Khoury (2000)

Nonostante i numerosi tentavi per poter stimare lo spalling attraverso metodi analitici, nella maggior parte dei casi questi sono sempre falliti, a causa della complessa microstruttura del calcestruzzo che durante la fase di riscaldamento attraversa molte e diverse fasi.

In anni recenti, però stanno nascendo modelli che, grazie all'introduzione di elementi finiti sono in grado di considerare l'accoppiamento termo-igro-meccanico, andando ad analizzare la temperatura e la pressione all'interno dei pori durante le varie fasi del riscaldamento. Con questi metodi avanzati si riesce così a stimare in modo molto più accurato la formazione e la probabilità dell'evento esplosivo. L'unico problema da risolvere è ancora quello relativo al bisogno di prendere in considerazione la natura altamente stocastica di questi processi. Numerose sono le proposte per sviluppare un metodo di previsione pratico basato sulla semplificazione dei modelli numerici e sull'approccio probabilistico.

Per quanto riguarda l'Eurocodice, questo prescrive che lo spalling (esplosivo) debba essere evitato con misure appropriate o in alternativa, i suoi effetti sui requisiti di prestazione devono essere presi in considerazione. Come regola di progettazione si descrive che non è probabile che si verifichi il fenomeno di spalling esplosivo quando il tenore di umidità del calcestruzzo è inferiore al k% in peso. Si suppone che il valore k sia uguale a 3. In alternativa, la riduzione della capacità di carico e / o della funzione di separazione a causa dello spacco esplosivo necessita di una valutazione dei rischi.

Come evidenziato da Van Straalen ed al. (2013), per prevedere in modo più realistico lo spalling del calcestruzzo, è necessario trovare un metodo di previsione del fenomeno che bilanci i dettagli richiesti dalla precisione teorica e dalla applicabilità pratica. Strumento molto sviluppato è il progetto BRITE EURAM III con il software HiTeCo, sviluppato in una seconda fase nel progetto UPTUN e rinominato HiTeCoSp2. I modelli esaminati che descrivono i processi all'interno del calcestruzzo riscaldato si basano sulla meccanica del continuo e per la loro complessità le soluzioni vengono approssimate utilizzando procedure numeriche. Nella maggior parte dei casi viene applicato un metodo ad elementi finiti (FEM). Tuttavia, l'implementazione numerica è applicabile solo allo studio di spalling del calcestruzzo nelle gallerie.

Un altro inconveniente è la quantità di parametri di input (materiali) difficili da determinare. A giudicare dalla ricerca in corso, sembra ancora una sfida per alimentare il modello con i dati di input appropriati. Infine, tutti i modelli sviluppati sono di natura deterministica. I modelli deterministici forniscono risposte negative quando applicate a problemi altamente stocastici come spalling del calcestruzzo. L'influenza forte del comportamento stocastico del processo di spalling sottolinea l'opinione che i metodi di predizione deterministici non si tradurranno in previsioni adeguate. Ciò sottolinea la necessità di creare strumenti di previsione basati su approcci probabilistici ed è proprio questa la strada verso cui si sta lavorando.

5 Calcestruzzo ad alta resistenza

L' "American Concrete Institute" lo definisce come un calcestruzzo con speciali requisiti di prestazione che non possono essere raggiunti utilizzando componenti convenzionali e normali procedure di miscelazione, getto e maturazione. È una tipologia di calcestruzzo progettato per essere più resistente del calcestruzzo convenzionale e per garantire una maggiore durata contro il deterioramento, soprattutto in caso di cicli di gelo-disgelo. Proprio grazie a queste ottime proprietà, può essere applicato in una notevole varietà di strutture ed edifici, come e grattacieli, ponti, autostrade, gallerie, tunnel, strutture offshore, e altre forme di infrastrutture. Nonostante le sue ottime proprietà, numerose indagini hanno dimostrato che questo materiale è soggetto in maniera violenta al fenomeno di spalling nel momento in cui viene sottoposto a fuoco. Questo non deve essere dato per scontato in quanto risulta un enorme rischio per l'utenza e per l'ambiente circostante.

Caratteristica principale del calcestruzzo ad alta resistenza (AR) a differenza del calcestruzzo ordinario è il rapporto a/c minore di 0,35. Questo, insieme ad altri elementi, conferisce una classe di resistenza caratteristica cubica superiore a 75 N/mm2 ed inferiore o uguale a 115 N/mm2.

Seguendo le "Linee guida sul calcestruzzo strutturale ad alta resistenza" fornite dalla Presidenza del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, possiamo dire che i conglomerati ad alta resistenza vengono confezionati con l'utilizzo:

- di cementi di classe di resistenza 52,5 e 42,5. Differenza sostanziale tra le due tipologie è la maggiore finezza di macinazione e l'alto contenuto di silicato tricalcico all'interno dei cementi di classe 52.5.

- di additivi riduttori di acqua. Questi additivi, in quanto generano una diminuzione della tensione superficiale dell'acqua all'interno dell'impasto, permettono di ridurre il fabbisogno d'acqua riuscendo così ad ottenere la consistenza desiderata e il raggiungimento di resistenze elevate. Questi prendono il nome di fluidificanti. Nella pratica spesso vengono abbinati a ritardanti, con la funzione di ridurre il grado di idratazione del cemento nelle prime ore, quando c'è il rischio che si acceleri l'idratazione del cemento per evitare una perdita di lavorabilità.

- di aggiunte di minerali attive, come il fumo di silice e le ceneri volanti. In particolare il fumo di silice permette l'utilizzo in quantità maggiore degli additivi riduttori di acqua che possono essere utilizzati fino al 3-4% rispetto alla massa del legante. Funzione principale del fumo di silice è quella di impedire la segregazione. Questo, in presenza di microsilice, consente di ottenere impasti con rapporto acqua/legante minore a 0.35 e, pertanto, capaci di attingere resistenze a compressione molto elevate. Inoltre contribuisce all'ottenimento delle elevate prestazioni meccaniche attraverso: la generazione di una maggiore densità della struttura della matrice andando a colmare i vuoti tra i granuli di cemento; la riduzione della porosità capillare e alla diminuzione della dimensione media dei pori grazie alla generazione di silicati secondari; la maggiore qualità del rapporto nell'interfaccia pasta-aggregato;

- di aggregati con massa volumica non inferiore a 2.7 Kg/l. Si ricerca un ottima qualità degli aggregati, con il fine di evitare che aggregati scadenti si frantumino per valori inferiori rispetto a quelli che determinano il collasso della matrice cementizia.

A causa del miglioramento della qualità della pasta di cemento, dovuto sia al basso rapporto acqua/legante che alla presenza del fumo di silice nell'impasto, vi è un'ottima distribuzione degli sforzi di compressione. Nonostante questo si hanno due risultati potenzialmente negativi: in primo luogo si rischia di avere una rapida propagazione del percorso fessurativo nel momento in cui il calcestruzzo viene soggetto alla massima tensione di deformazione. Questo è dovuto principalmente al fatto che lo sforzo non può essere ridistribuito tra fasi a diversa resistenza, mostrando un comportamento molto più fragile. In secondo luogo l'aumento della densità,

dovuto al minor rapporto a/c e alla diminuzione del diametro dei pori sono altamente sfavorevoli per la diminuzione del rischio di spalling ma tendono ad aumentarlo in maniera esponenziale.

5.1 Comportamento ad elevate temperature

Vediamo in questa sezione qual è il comportamento tipico di un calcestruzzo AR nel momento in cui viene sottoposto ad elevate temperature. Si può dire che se si effettua un confronto fra i calcestruzzi normali e ad alta resistenza si evidenzia che le perdita di resistenza a compressione è nettamente superiore nei calcestruzzi AR fino all'intorno dei 400 °C, per poi essere meno significativa a temperature maggiori. Portando il calcestruzzo a una temperature finale di 800 °C , si nota una diminuzione totale della proprietà pari al 30% del valore iniziale.

Il fenomeno di spalling compare nell'intorno dei 300 °C e questo si presenta in maniera molto aggressiva. Nella maggior parte dei casi si ha una riduzione della sezione resistente con una conseguente esposizione diretta delle barre di armatura all'elevate temperature. Questo ovviamente porterà a una diminuzione della loro tensione di snervamento.

Il peggior comportamento della resistenza a compressione e la maggiore aggressività del fenomeno di spalling è dovuto sostanzialmente, a causa della loro bassa permeabilità, dall'impossibilità di mitigare con successo l'accumulo di pressione interna. Non permettendo al vapore di fuoriuscire rapidamente dalla sezione, si sviluppa un elevato gradiente di pressione che insieme alle tensioni create dai gradienti termici danno origine al fenomeno esplosivo. Come già evidenziato, ma sottolineato anche da un'indagine di Peng e al. (2007) il contenuto di umidità e il grado di resistenza del calcestruzzo sono due fattori principali che regolano la formazione di schegge esplosive. Se la resistenza del calcestruzzo è inferiore ad un certo valore, 60 MPa, sarà meno probabile che si verifichi il fenomeno di scheggiatura, anche a un livello elevato di umidità. Quando la resistenza del calcestruzzo supera tale valore di resistenza, maggiore è il contenuto di umidità, maggiore è la probabilità di scheggiatura, a condizione che il

contenuto di umidità sia maggiore di un valore di soglia. Questi argomenti saranno trattati in modo completo nelle sezioni successive.

Uno studio significativo riguardo il comportamento del calcestruzzo AR ad elevate temperature è stato studiato da Bastami e al. (2011). Oggetto della pubblicazione è mostrare i risultati delle alte temperature sulle proprietà meccaniche e termiche, considerando l'influenza di tre fattori: rapporto acqua cemento, la quantità di fumo di silice e di sabbia. Contrariamente a quanto si potrebbe pensare, dal punto di vista delle proprietà termiche, il calcestruzzo di bassa qualità è superiore rispetto al calcestruzzo di buona qualità. Il calcestruzzo classificato ad alte prestazioni a temperatura ambiente, a causa della sua elevata resistenza, bassa permeabilità e di conseguenza buona durata è in realtà un calcestruzzo con uno scarso livello di prestazioni ad elevate temperature a causa della sua elevata suscettibilità al fenomeno di spalling. Una delle scoperte più importanti è stato capire che a governare questo fenomeno è il rapporto acqua/legante: più questo rapporto sarà basso più il calcestruzzo sarà suscettibile al fenomeno esplosivo. Questa osservazione ha avuto un notevole impatto, soprattutto nel dosaggio del fumo di silice. I provini sono dei cilindri, e vengono esposti a una temperatura massima di 800°C e poi portati a temperatura ambiente. Il parametro principale analizzato è stato il variare della resistenza a compressione. A temperatura ambiente le miscele contenenti fumo di silice hanno una resistenza maggiore rispetto a quelli senza. L'effetto delle alte temperature porta a una riduzione drastica di questa caratteristica e questo può essere attribuito alla disidratazione del calcestruzzo e all'evento improvviso del fenomeno esplosivo di spalling. La quantità di fumo di silice non influisce su questa caratteristica. Per quanto riguarda il fenomeno di spalling possiamo dire che questo si è verificato in entrambe le tipologie di miscele, con e senza la presenza dell'additivo, ma la sua presenza ha avuto un effetto statisticamente significativo sull'aumento della gravità del danno causato al provino. Tuttavia, si ha una drastica riduzione del fenomeno con l'aumentare del rapporto acqua/cemento.

Di fondamentale importanza è la conclusione di questo esperimento in quanto vengono evidenziati una serie di intervalli in cui variare i 4 parametri studiati, per ottenere un ottimale comportamento della miscela di calcestruzzo: rapporto acqua/cemento 0.23–0.32, percentuale di aggregato fine 0.33%–0.44%, percentuale di fumo di silice 4.8%–13.6% e quantità di fumo di silice 25–89 kg.

6 Permeabilità ed energia di frattura

In questo elaborato si è cercato di eseguire un'attenta analisi del comportamento al fuoco del calcestruzzo, di studiare i dettagli dei processi chimici e fisici che si instaurano sottoponendo il materiale ad elevate temperature, ponendo particolare attenzione a quel fenomeno di natura esplosiva che prende il nome di explosive spalling. In seguito ad attente analisi, basate su alcuni esperimenti presenti in letteratura, si è dedotto che i parametri relativi alla miscela di calcestruzzo che più influenzano il fenomeno dello spacco esplosivo sono:

- la permeabilità
- l'energia di frattura

Questi due fattori non sono solo stati selezionati in quanto le principali caratteristiche relative al fenomeno di spalling, ma soprattutto perché sono fattori importanti dal punto di vista progettuale per aumentare la resistenza al fuoco del materiale calcestruzzo. Lavorando su questi due aspetti e studiandoli attentamente si possono confezionare delle miscele con ottimi risultati di resistenza al fenomeno esplosivo.

6.1 Permeabilità

Questa proprietà viene definita in funzione della quantità di acqua spostata attraverso il calcestruzzo, nel momento in cui l'acqua viene posta sotto pressione. Inoltre e si riferisce anche all'abilità del calcestruzzo di resistere alla penetrazione di qualsiasi altra sostanza, liquida o gas.

L'acqua introdotta nell'impasto del calcestruzzo, necessaria per l'idratazione e per la lavorabilità, in seguito alla maturazione, lascia nella matrice cementizia una rete di fitti cunicoli. Si possono riscontrare tre differenti livelli di porosità.

La "porosità capillare" dipende dal rapporto a/c e dal grado di idratazione e varia da zero a 40% del volume della pasta. I pori capillari hanno un diametro dell'ordine del micron (tra 0,1 e 10 micron o 100-104 nm), la loro forma è variabile e creano una fitta rete di cunicoli all'interno del materiale: la permeabilità del calcestruzzo risulta quindi non essere solo in funzione del livello di porosità ma è strettamente legata alla distribuzione dei pori, della loro dimensione e delle loro caratteristiche. Di natura ben differente è la "porosità del gel" che ammonta al 28% del volume occupato dalle particelle solide costituenti la matrice cementizia. Spesso si rischia di incorrere nel rischio di avere "aria intrappolata" nel calcestruzzo fresco, che teoricamente dovrebbe essere espulsa da una corretta compattazione del conglomerato attraverso la vibrazione. Se questo non avviene con alta probabilità si creeranno macrovuoti della dimensione di qualche millimetro. In aggiunta si può osservare un ulteriore tipologia di porosità, ovvero la "zona di transizione" (ZTN) cioè quella parte della pasta cementizia molto sottile che si trova a diretto contatto con l'aggregato. Questa presenta un livello di porosità maggiore. Infine, ci può essere una risalita di acqua sulla superficie del conglomerato, detta di "bleeding".

La permeabilità è uno dei parametri fondamentali che influenza lo spalling nel momento in cui si considera l'insieme di fenomeni che caratterizzano il processo termo-igrometrico del calcestruzzo soggetto ad elevate temperature. Il vapore acqueo che si è formato in seguito all'evaporazione dell'acqua, scorre verso la superficie riscaldata attraverso il sistema di pori, caratterizzato da una condizione secca. Inversamente, una parte del vapore acque scorre verso l'interno, dove andrà a formare uno strato saturo, che funge da parete impermeabile per il flusso dei gas. Se la permeabilità della zona secca dell'elemento in calcestruzzo non è sufficiente per evitare un accumulo di pressione, si verifica il fenomeno esplosivo di spalling. Maggiore sarà la permeabilità del calcestruzzo, minore sarà il rischio del verificarsi dell'effetto di spalling.

La permeabilità può essere controllata in modo volontario agendo a livello della composizione della miscela. Metodo più comune è l'utilizzo di fibre in polipropilene, ultimamente si è anche iniziato a modificare il rapporto acqua/cemento o la percentuale di vuoti d'aria all'interno della miscela di calcestruzzo. Obbiettivo principale di questa tesi è proprio quello di riuscire ad ottimizzare la composizione di una miscela in maniera da avere un buona permeabilità che permetta la fuoriuscita del vapore, evitando così il fenomeno di spalling, e contemporaneamente mantenendo ottime proprietà meccaniche di resistenza a compressione e un comportamento duttile post-picco di rottura.

D'altra parte, la permeabilità è anche strettamente correlata al deterioramento del calcestruzzo, e quindi legata a un comportamento non volontario, ovvero non prevedibile del calcestruzzo. Nel momento in cui il calcestruzzo viene sottoposto a carichi estremi oppure ad elevate temperature, si instaurano una serie di crepe e fessurazioni. Questo processo porta a un notevole aumento della permeabilità. Le crepe generalmente interconnettono i percorsi di flusso, consentendo a gas, acqua e ioni chimici di penetrare nel calcestruzzo. Questi fenomeni generano un maggiore deterioramento del materiale, con conseguenze molto dannose, fino al caso limite del collasso struttura stessa. In un importante studio di Wang e al. (2001), si è analizzato l'aumento della permeabilità dovuto allo sviluppo delle fessurazioni. Attraverso la tecnica del controllo dello spostamento, sono stati effettuati diversi test per generare fessurazioni controllate all'interno dei provini. I percorsi delle crepe sviluppati vengono analizzati attraverso un microscopio ottico ed in seguito valutata la permeabilità ad acqua. Obbiettivo principale di studiare la relazione tra permeabilità e fessurazioni è trovare soluzioni per la progettazione di un calcestruzzo più durevole e per indagare metodi di riparazione per un calcestruzzo deteriorato. In seguito al test di permeabilità si evidenzia come questa caratteristica aumenta con l'ampiezza della fessura. Ovviamente oltre alla larghezza della fessura, anche la lunghezza e il numero di fessure influenzano il grado di permeabilità.

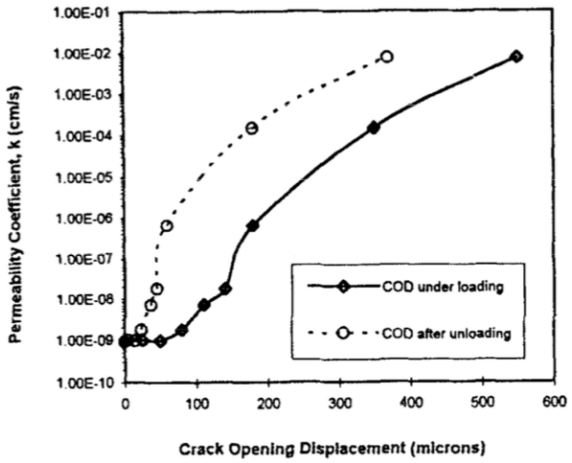


Figura 6-1 Relazione tra la permeabilità all'acqua e l'apertura delle fessure per provini sotto carico e in seguito all'applicazione del carico. Fonte: Wang e al. (2001)

Altro parametro da considerare è l'effetto delle temperature elevate sulla permeabilità del calcestruzzo. Noumowe e al. (2008) hanno deciso di eseguire una serie di prove sperimentali per studiare l'effetto del tipo di aggregato e l'effetto delle fibre di polipropilene sulla permeabilità del calcestruzzo ad alte prestazioni esposto a temperature elevate fino a 600 °C. Come già accennato, molti studi presenti in letteratura hanno dimostrato che l'aggiunta di fibre di polipropilene è una soluzione efficiente per ridurre il rischio di spalling in calcestruzzi sottoposti ad alte temperature. Questo verrà approfondito nella sezione inerente alla progettazione per evitare il fenomeno di spacco esplosivo. I provini analizzati sono cilindri costituiti da cemento Portland, con aggiunta di fumo di silicio (10% del peso del cemento). In tutto sono state confezionate 3 tipologie di miscele (B2, B3 e B4), la prima senza fibre PP, la seconda con aggiunta di fibre e la terza senza fibre ma con aggregati leggeri. In seguito alla stagionatura, i campioni sono stati sottoposti a cicli di riscaldamento e raffreddamento. La temperatura massima del ciclo è stata mantenuta a 200 o 600 °C. Si nota come la permeabilità nell'intorno dei 200 °C sia nettamente maggiore grazie all'utilizzo delle fibre in polipropilene all'interno della miscela. Per temperature più elevate il loro effetto non è più considerabile valido in relazioni agli elevati danni a cui è sottoposto il provino.

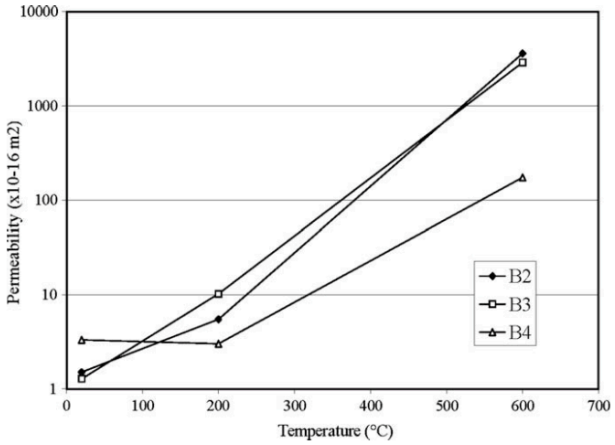


Figura 6-2 Evoluzione della permeabilità di tre differente campioni di calcestruzzo in relazione alla temperatura. Fonte: Noumowe e al. (2008)

6.2 Energia di frattura

Carpinteri (1995). Il miglior modo per descrivere correttamente il comportamento dei materiali è quello di utilizzare una coppia di leggi costitutive:

- una relazione tensione-deformazione, grazie alla quale si riesce a descrivere il comportamento elastico e incrudente del materiale integro sino alla tensione massima, analizzando anche il tratto in cui il materiale viene scaricato.
- una relazione tensione-apertura della fessura, che viene utilizzata per descrivere il comportamento softening del materiale fessurato, sino all'apertura critica. Oltre questo punto si avrà in seguito l'annullamento dell'interazione tra le facce della fessura.

Nella pratica comune i materiali strutturali vengono catalogati in funzione della curva tensione-deformazione, in due categorie distinte: materiali duttili e materiali fragili. I primi sono caratterizzati da tratti non lineari nel diagramma σ (ε), prima di giungere a rottura, i secondi si rompono in modo improvviso, nel momento in cui la risposta è ancora principalmente elastica e lineare. Il fattore di danneggiamento dipende principalmente dalla regolarità del solido. Prendendo come esempio il calcestruzzo, questo si presenta come un materiale eterogeneo dove le microfessure e la segregazione tra i componenti granulari e la matrice,

possono dare il via a un processo degenerativo che porta alla generazione di una fessura macroscopica in grado di separare in due parti l'elemento strutturale. Questo mostra un comportamento duttile in compressione e fragile in trazione e presenta una resistenza ultima a compressione che è un ordine di grandezza maggiore di quella a trazione.

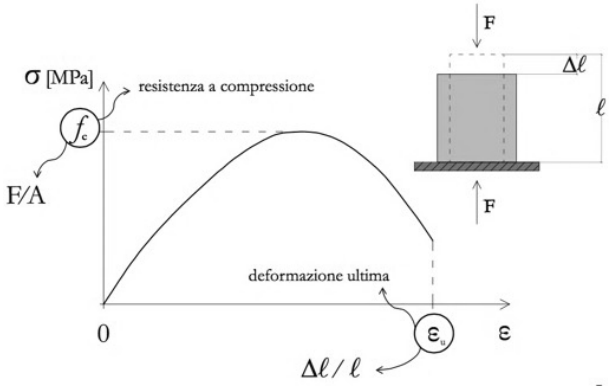


Figura 6-3 Prova a compressione: legame costitutivo tensione-deformazione. Fonte: Tecnologia e proprietà meccaniche del calcestruzzo.

Una prova di trazione eseguita in controllo di forza, presenta nella prima fase una risposta elastica e lineare e successivamente una repentina caduta del carico che equivale all'istantanea creazione della fessura. Pilotando invece la deformazione attraverso il controllo di spostamento, si riesce a ricavare il tratto cha si ha in seguito alla formazione della fessura nel materiale. Questa rappresenta un ramo di incrudimento negativo ee evidenzia la possibilità di dissipare, da parte del materiale, una notevole quantità di energia per unità di volume. Questa corrisponde all'area sottesa alla curva.

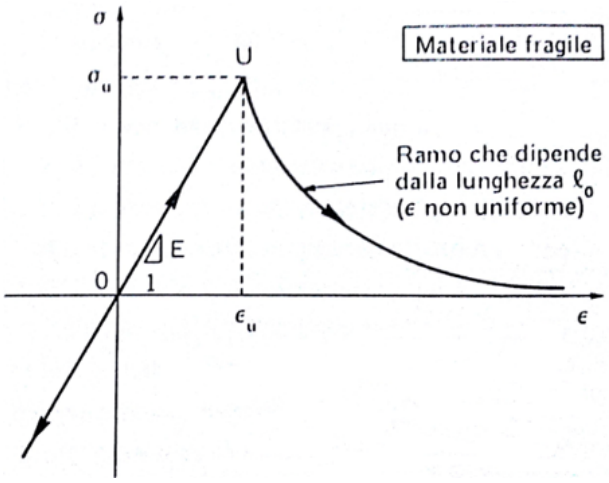


Figura 6-4 Prova a trazione. Legame tensione-deformazione. Fonte: Carpinteri (1995)

In realtà si è dimostrato come l'energia sia dissipata su una banda localizzata, che diventa in seguito una fessura (modello della fessura coesiva). Si può quindi ipotizzare che la dilatazione non è una funzione costante, ma mostra un notevole picco in corrispondenza della fessura che si sta per formare.

Il ramo decrescente σ(ε) è in funzione della lunghezza l_0 della base di misura. Al contrario, il diagramma σ(w), risulta essere una caratteristica intrinseca del materiale che rappresenta la tensione trasmessa attraverso la fessura in funzione dell'apertura della fessura stessa. Attraverso tale legge si indica un indebolimento dell'interazione all'aumentare della distanza w tra le facce (o superfici libere) della fessura. Nel momento in cui w raggiunge il valore limite w_c, l'interazione smette di esistere e la fessura diventa una sconnessione completa che divide in due parti distinte il materiale. L'energia dissipata sulla superficie unitaria di frattura corrisponde all'area sottesa dalla curva σ(w). Essendo questa una caratteristica del materiale, di conseguenza anche l'energia di frattura G_{IC} risulta essere una proprietà intrinseca del materiale:

$$G_{IC} = \int_0^{w_c} \sigma(w)\, dw \tag{6.1}$$

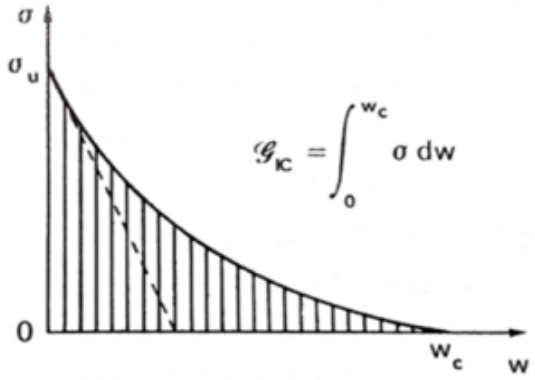


Figura 6-5 Tensione trasmessa attraverso la fessura in funzione dell'apertura. Fonte: Carpinteri (1995)

L'energia dissipata sulla superficie della fessura vale $G_{IC}A_0$, essa ha le dimensioni di un'energia per unità di superficie e, quindi, di una forza per unità di lunghezza. Supponendo che la dissipazione energetica avvenga soltanto sulla superficie fessurata e non nel volume del materiale integro, l'energia dissipata globalmente nel volume $A_0 l_0$ è ancora pari a $G_{IC}A_0$.

Mantenendo invariati il materiale e la forma geometrica, aumentando solo la scala dimensionale, si è notato una netta transizione vero comportamenti di tipo fragile, con una caduta improvvisa della capacità di carico e quindi una rapida propagazione della fessura. Al contrario, con provini di dimensioni modeste, si ha un comportamento duttile e una propagazione lenta della frattura

Questo comportamento può essere approfondito attraverso l'esposizione dei teoremi fondamentali della meccanica della frattura, ovvero quel ramo della meccanica che si occupa dello studio della propagazione delle crepe nei materiali, in modo da poter quantificare la forza che si sviluppa all'apice di una frattura e per poter migliorare il comportamento meccanico del materiale. Tre sono le teorie fisico-matematiche che meglio possono descrivere questi fenomeni:

- Criterio energetico di Griffit
- Metodo Westergaard
- Metodo Williams

che però non verranno approfonditi in questa trattazione.

Un ulteriore modo chiaro e intuitivo per descrivere lo sviluppo della fessura è il modello della fessura coesiva. In questo modello la distribuzione delle forze coesive all'interfaccia della disconnessione è in funzione dell'aumentare dell'apertura della fessura. La zona vicina all'estremità della fessura inizia a risultare danneggiata e si nota la presenza di microfessure. In questo punto si osserva un tratto della macrofessura in evoluzione, ma parzialmente cucito da aggregati o fibre. Questa zona prende il nome di zona di processo. L'estremità della fessura coesiva coincide con l'estremità della zona di processo, in cui l'apertura w si annulla e la tensione di richiusura è pari alla resistenza a trazione. All'estremo opposto, invece, si trova l'estremità della fessura reale, dove l'interazione tra i due lembi di materiale viene interrotta.

Le strutture in calcestruzzo sono generalmente costituite da numerose micro-fessurazioni che possono provocare la frattura della struttura sotto carichi di servizio, carico accidentale e/o esposizione a condizioni ambientali regolari. Quindi una micro-fessura nel calcestruzzo può diventare una potenziale fonte di propagazione della cricca che porta al collasso strutturale. Per prevenire questi incidenti è utile conoscere e prevenire questo comportamento durante la fase di servizio. Questo meccanismo è studiato quantificando l'energia di frattura, ovvero l'energia dissipata nella propagazione della cricca e nella formazione di nuove superfici di frattura.

6.2.1 Tecnica RILEM e valutazione di G_f

Il metodo maggiormente utilizzato per quantificare l'energia di frattura è una tecnica sperimentale approvata da RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures). Lo studio presentato da Uday (2017), prevede prove sperimentali di travi incise in mezzeria flesse su tre punti soggette a un carico P, caratterizzate da un diverso rapporto tra dimensione dell'intaglio a [m] e spessore della trave w [m].

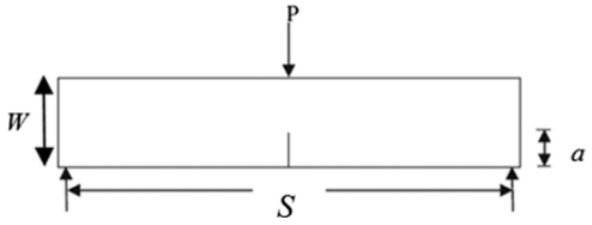


Figura 6-6 Schema della trave caricata su tre punti. Fonte: Uday (2017)

In breve, la procedura di prova consiste nei seguenti passaggi:

- Le proporzioni della trave vengono definite in relazione alla dimensione massima dell'aggregato. La profondità minima d è circa sei volte la dimensione dell'aggregato.
- La flessione verticale della trave viene misurata e tracciata in modo continuo insieme al carico applicato P. Di particolare importanza è il calcolo della freccia elastica.
- Il test deve essere eseguito utilizzando la tecnica del controllo di carico.
- Nel momento in cui il carico si avvicina al valore massimo, in seguito a un piccolo aumento improvviso della flessione, il carico comincia a diminuire in modo graduale, rendendo nuovamente il sistema stabile. Cos' facendo si riesce ad osservare il ramo di softening.
- Output: curva carico-spostamento (P-δ), curva carico-apertura della fessura.

L'energia di frattura viene poi in seguito calcolata come

$$G_f = \frac{\int P d\delta + \mathrm{m}(1-\omega_u)\, \mathrm{g} \left(\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{S}}\right)\left(2-\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{S}}\right) d\delta_0}{(W-a)B} \tag{6.2}$$

dove B è la profondità della trave, P è il carico applicato, δ è la freccia elastica nella mezzeria del campione. L'integrale $\int P\, d\delta$ rappresenta l'area sottesa dalla curva carico-spostamento, mentre il secondo termine rappresenta la forza gravitazionale esercitato dal peso proprio della trave. Dove, $\left(\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{S}}\right)\left(2-\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{S}}\right)$ è usato per eliminare la parte a sbalzo della trave al di fuori dei supporti. Mentre il termine $\mathrm{m}(1-\omega_u)$ rappresenta la massa della

trave di calcestruzzo realmente scaldata, tenendo conto della perdita di peso in percentuale ω_u nel caso in cui vengano effettuati test ad elevate temperature. Questo ultimo termine è inoltre riferito a δ_0 che rappresenta lo spostamento ultimo in condizioni di collasso. Supponendo che la maggior parte dell'energia richiesta per lo sviluppo della frattura sia consumata all'interno della zona di processo, l'energia di frattura G_f viene in questo modo correlata alla formula che tiene conto dell'apertura di una fessura sotto sforzo.

6.2.2 G_f in funzione della temperatura

Trattando, l'argomento di come l'energia di frattura varia al variare della temperatura, l'esperimento di Nielsen, Bicanic e Zhang, presenta una raccolta di dati riguardo l'energia di frattura residua relativa a provini confezionati con due miscele di calcestruzzo diverse, testati a temperature elevate.

Un primo test eseguito da Nielsen e Bicanic (2013) è stato eseguito su 80 travi di calcestruzzo ad alte prestazioni basaltico e su calcestruzzo ordinario costituito da aggregati ghiaiosi. Le travi (100x100x50 mm) sono state fino al raggiungimento della temperatura massima (550°C) e mantenute a questa temperatura per 8 ore prima di essere raffreddate a temperatura ambiente ed essere testate secondo la metodologia di carico a tre punti RILEM. I risultati ottenuti mostrano l'energia di frattura residua.

Gli effetti della temperatura sull'andamento del grafico carico-spostamento sono evidenti dal suo andamento. Con l'aumento di T si ha una diminuzione del carico massimo, e quindi una diminuzione della resistenza, ma un aumento della lunghezza della "coda" della curva (P-δ), rendendo il materiale molto più duttile rispetto alla temperatura ambiente. Le travi soggette ad alti gradienti termici mostrano più di una fessura che si dirama dall'intaglio principale, andando poi a generare la frattura finale.

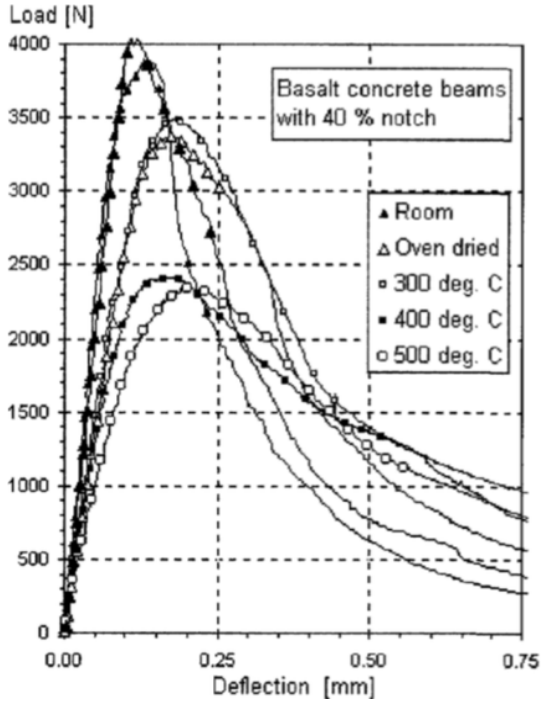


Figura 6-7 Carico residuo in relazione alla deformazione per varie temperature. Fonte: Nielsen e Bicanic (2013)

Importanti considerazioni si possono anche dedurre dall' andamento dell'energia di frattura per diverse temperature del calcestruzzo ad alta resistenza. Questo una volta scaldato in forno, mostra un aumento dell'energia di frattura rispetto alla temperatura ambiente.

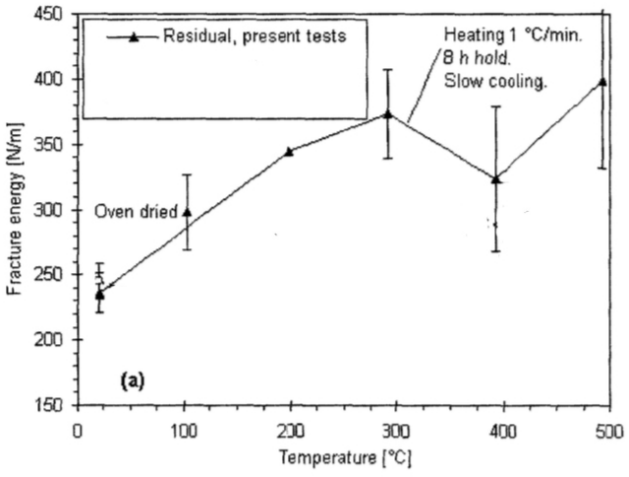


Figura 6-8 Andamento dell'energia di frattura in relazione all'aumento della temperatura. Fonte: Nielsen e Bicanic (2013)

L'andamento del calcestruzzo ad alta resistenza messo a confronto con quello normale costituito da ghiaia mostra un andamento abbastanza simile

dai 4 ai 300 °. Il calcestruzzo AR, ovviamente mostra valori molto più elevati. In seguito per valori più alti di T, gli andamenti dei due calcestruzzi sono differenti. Per quanto riguarda il calcestruzzo normale l'energia di frattura continua a crescere fino ai 500 °C, mentre in seguito diminuisce con l'aumentare della temperatura. Il calcestruzzo AR, mostra un incremento di energia nell'ultima fase, in seguito a un breve tratto precedente in cui diminuisce.

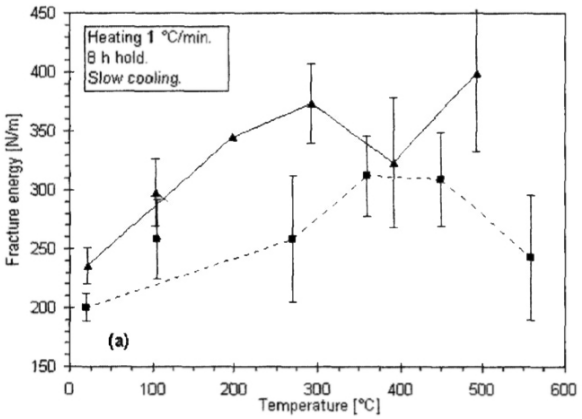


Figura 6-9 Energia di frattura e aumento della temperatura. Confronto tra un calcestruzzo normale e un calcestruzzo ad alta resistenza. Fonte: Nielsen e Bicanic (2013)

Infine, definendo il rapporto G_f / G_{f0},indicando con il pedice 0 l'energia di frattura relativa alla temperatura ambiente, si sono messi a confronto i comportamenti delle due tipologie di calcestruzzo.

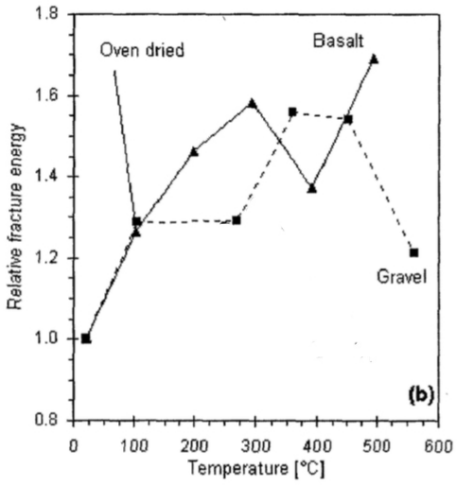


Figura 6-10 Andamento dell'energia di frattura relativa in relazione all'aumento di temperatura. Fonte: Nielsen e Bicanic (2013)

Di molta importanza è anche un secondo test sviluppato da Zhang e Bicanic (2006) eseguito su 80 provini in calcestruzzo di dimensione 500x100x100 mm. Queste vengono riscaldate da temperatura ambiente fino a 450 °C attraverso otto temperature di monitoraggio dei parametri (T= 105, 150, 200, 250, 300, 350, 400 and 450°C), mantenute costanti per 16 ore in modo da raggiungere un equilibrio termico e igrometrico. Il parametro principale studiato è nuovamente l'energia di frattura G_f attraverso il metodo RILEM di flessione su tre punti in provini ad alta temperatura (hot) e in seguito al loro raffreddamento (cold).

Osservando la figura si può vedere come l'aumento della temperatura influenza il valore relativo all'energia di frattura. Per quanto riguarda i test condotti sul calcestruzzo riscaldato si verifica un processo di decremento-incremento con l'aumento di T. Per quanto riguarda l'andamento dei campioni di calcestruzzo prima riscaldati e poi raffreddati, si ha uno stesso andamento ma presentando valori di energia di frattura maggiori. Inoltre una volta raggiunto il picco a 350 °C si ha un decremento per temperature maggiori.

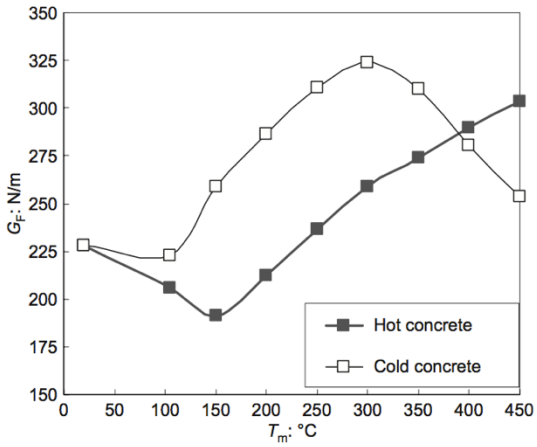


Figura 6-11 Energia di frattura per differenti valori di temperatura. Fonte: Zhang e Bicanic (2006).

Seconda parte delle prove sperimentali, sempre all'interno della medesima ricerca, ha l'obbiettivo di analizzare il rapporto tra l'energia di frattura e la perdita di peso ω_u . Nel calcestruzzo a temperatura elevta G_f ha un'iniziale diminuzione fino a un valore ω_{u1} di transizione per poi

crescere linearmente. L'energia di frattura tende a crescere in quanto l'umidità presente all'interno evapora completamente e rende il calcestruzzo più resistente. Questo andamento può essere rappresentato da una relazione bilineare tra G_f / ω_u.

$$G_f = \begin{cases} -8{,}253\omega_u + 230{,}3 & \omega_u \leq \omega_{u1} \\ 51{,}583\omega_u - 49{,}6 & \omega_u > \omega_{u1} \end{cases} \quad (6.3)$$

Nel calcestruzzo raffreddato invece si notano 3 differenti andamenti. Una prima leggerissima diminuzione per poi salire dolcemente fino al primo stage ω_{u1}. Al secondo stadio, G_f aumenta rapidamente fino a quando non viene raggiunta un altro valore di transizione pari a ω_{u2}. Nella fase finale, l'energia di frattura diminuisce drasticamente. Il raffreddamento ha danneggiato in modo significativo il calcestruzzo e ha ridotto l'energia di frattura anche se la perdita di peso non è stata molto influenzata. In questo caso la curva G_f - ω_u è descritta usando una combinazione tra una relazione cubica e una lineare

$$G_f = \begin{cases} 0{,}542\ \omega_u^3 + 0{,}854\ \omega_u^2 - 7{,}813\ \omega_u\ + 228{,}2 + 230{,}3 & \omega_u \leq \omega_{u2} \\ -85{,}352\omega_u + 838{,}9 & \omega_u > \omega_{u2} \end{cases} \quad (6.4)$$

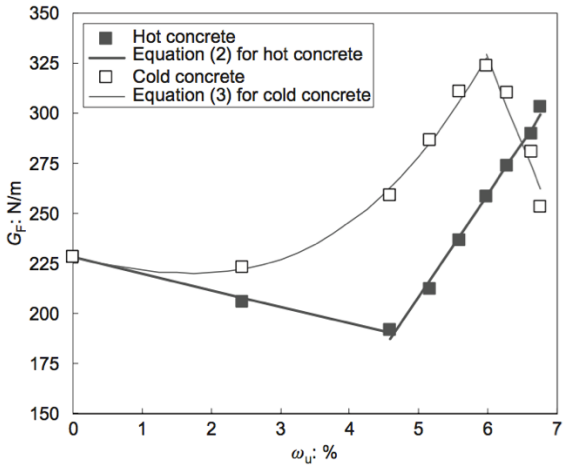


Figura 6-12 Energia di frattura in relazione la percentuale di peso perso. Fonte: Zhang e Bicanic (2006).

Un'altra indagine sperimentale è stata condotta da Peng e al. (2007) riguardo il calcolo dell'energia di frattura residua di provini in calcestruzzo fibrorinforzato precedentemente esposto a temperature elevate dai 200 agli 800 °C. I metodi di raffreddamento a cui sono stati sottoposti i provini sono stati vari: raffreddamento naturale, attraverso irrorazione con acqua per da 5 a 60 minuti e con immersione. Le miscele di calcestruzzo preparate sono di 5 tipi e sono stati usate travi 100x100x300 mm. Hanno tutte uguale rapporto acqua/cemento (0,26) e stessa quantità di fumo di silice (64 kg/m^3), ma diversa quantità di fibre. La miscela 26C è quella di controllo, ovvero senza nessun tipo di aggiunta; la 26P1 e la 26P2 hanno rispettivamente 0,91 kg/m^3 e 2,73 kg/m^3 di fibre PP; le miscele 26H1 e 26H2 sono caratterizzate da un contenuto di fibre ibride ovvero fibre di polipropilene (0,60 e 1,82 kg/m^3) con l'aggiunta di fibre di acciaio (80 e 70 kg/m^3). I campioni sono stati esposti a temperature elevate in un forno elettrico, rispettivamente a 200, 400, 600 e 800 °C, mantenendo la temperatura costante 1 ora ad ogni livello. In seguito all'esposizione a temperature elevate i campioni sono sottoposti ai vari regimi di raffreddamento e una volta giunti a temperatura ambiente vengono sottoposti alla prova RILEM per la determinazione dell'energia di frattura residua. Mettendo a confronto il comportamento del calcestruzzo 26C con quello con fibra ibrida 26H1, ovvero miscela composta da fibre in polipropilene e acciaio, si nota che la fibra ibrida ha un notevole effetto indurente sul calcestruzzo. Questo presenta un'energia di frattura di 14486 W/m^2, mentre quella del calcestruzzo normale era solo di 247 W/m^2. In seguito al raffreddamento naturale, l'energia residua di frattura del calcestruzzo normale 26C per una temperatura target di 400 o 600 °C è aumentata di una quantità ridotta, rispetto al valore originale a temperatura ambiente.

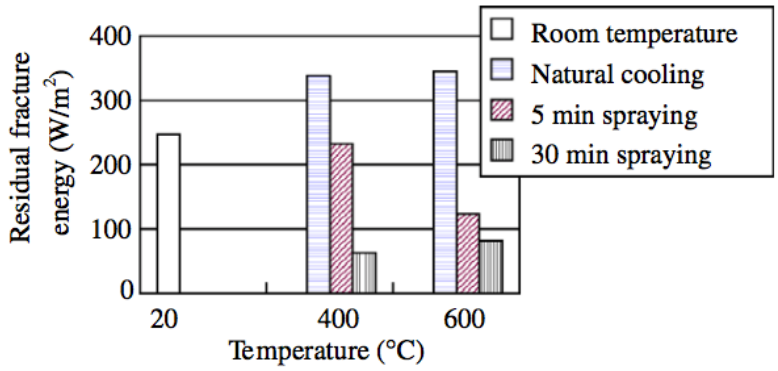


Figura 6-13 Energia di frattura residua per il provino costituito dalla miscela 26C. Fonte: Peng e al. (2007)

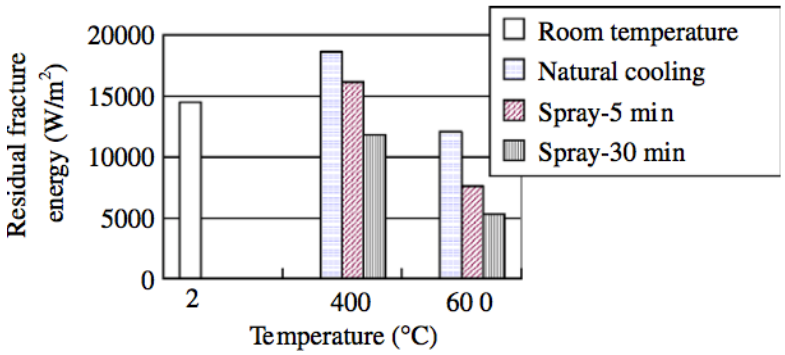


Figura 6-14 Energia di frattura residua per il provino rinforzato con fibre ibride costituito dalla miscela 26H1. Fonte: Peng e al. (2007)

Caso simile si è verificato nel caso del calcestruzzo 26H dove l'energia di frattura del calcestruzzo ibrido è aumentata a 400 °C, ma è diminuita a 600 °C. Il netto divario di misure tra le due tipologie conferma come la fibra ibrida può migliorare in modo significativo la resistenza al fuoco. Nella sezione riguardante il progetto contro lo spalling utilizzando fibre ibride (ovvero fibre di acciaio in aggiunta alla fibre in polipropilene) verrà approfondito questo argomento.

7 Parte 1. Tecniche di progetto contro lo spalling

7.1 Obiettivo della progettazione

La progettazione contro il fenomeno dello spalling può quindi avvenire in primo luogo attraverso la gestione del livello della permeabilità e in secondo luogo in maniera minore attraverso il controllo dell'energia di frattura. Si possono così evidenziare differenti interventi che se applicati in maniera corretta permettono di diminuire l'influenza del fenomeno distruttivo sull'elemento in calcestruzzo.

Il livello di permeabilità può essere variato attraverso:

- l'utilizzo di fibre in polipropilene
- la variazione del rapporto acqua/legante
- la variazione del contenuto d'aria all'interno della miscela

L'energia di frattura viene controllata attraverso:

- l'utilizzo di fibre ibride, ovvero fibre in acciaio più fibre in polipropilene.

Ovviamente per la scelta di questi parametri si è fatto riferimento alle miscele di calcestruzzo oggetto di studio. Sono state create 12 miscele differenti, confezionate in modo da avere una buona variazione del rapporto acqua/legante, della percentuale di vuoti d'aria e del contenuto di fibre in polipropilene. Grazie all'utilizzo di queste caratteristiche si riesce a incrementare drasticamente la resistenza al fuoco dell'elemento in calcestruzzo, andando ad aumentare la permeabilità della sezione.

Tabella 7-1 Caratteristiche delle 12 miscele oggetto della campagna sperimentale. Fonte: Elaborazione personale

Mix calcestruzzo	*Rapporto acqua/cemento*	*Vuoti d'aria (%)*	*Contenuto fibre (kg/m³)*
1	0,3	5	0
2	0,3	10	0
3	0,3	15	0
4	0,3	5	2
5	0,3	10	2
6	0,3	15	2
7	0,4	5	0
8	0,4	10	0
9	0,4	15	0
10	0,5	5	0
11	0,5	10	0
12	0,5	15	0

Sono presenti

- 9 miscele di calcestruzzo senza aggiunta di fibre al cui interno variano i parametri di rapporto acqua/cemento e % dei vuoti d'aria;
- 3 miscele fibrorinforzate con un contenuto di 2 kg/m^3 e con un rapporto acqua/cemento fissato a 0,3. L'unico parametro che si fa variare è la % dei vuoti d'aria.

In aggiunta allo studio di questi tre parametri, che rappresentano l'obiettivo principale della ricerca, è stata studiata anche l'influenza delle fibre ibride, ovvero la combinazione, all'interno dello stesso impasto, di fibre in acciaio a fibre in polipropilene, con lo scopo di scoprire nuove soluzioni alternative.

I quattro parametri presi in esame risultano quindi:

- Variazione del rapporto a/c
- Variazione della percentuale di vuoti d'aria
- Utilizzo di fibre in polipropilene
- Utilizzo di fibre ibride (fibre in polipropilene + fibre acciaio)

L'obiettivo della ricerca è quello di trovare la miglior resistenza a compressione, associata alla miglior resistenza al fuoco del calcestruzzo attraverso la variazione di questi parametri. Questo rappresenta una grande novità nella tecnologia del calcestruzzo, in quanto non sono mai state studiate contemporaneamente queste due proprietà. Ed è proprio per questo che si sono create 12 miscele in modo da riuscire ad analizzare il maggior numero di combinazioni possibili.

Grande importanza è stata data all'influenza di questi parametri (rapporto a/c, % aria e presenza fibre) contro il fenomeno di spalling esplosivo, in questo risulta l'aspetto oggetto di studio dell'elaborato, senza però tralasciare le implicazioni sulle proprietà meccaniche, sulla lavorabilità o su altri aspetti connessi utili per gli studi successivi. Le metodologie di intervento sopra descritte, sono state ampiamente studiate negli ultimi anni, e per ognuno di questi quattro aspetti sono state ricercate all'interno della letteratura scientifica internazionale delle prove sperimentali, per descrivere il comportamento del calcestruzzo in seguito della loro variazione, sia a temperature ordinarie che ad elevate.

Questa parte teorica è di fondamentale importanza in quanto serve per avere delle solide basi da utilizzare come linea guida nella seconda parte sperimentale della tesi e in modo da riuscire a prevedere il comportamento delle miscele studiate in seguito. In seguito all'analisi della letteratura scientifica relativa al parametro oggetto di studio, per ogni tipologia di intervento, ci sarà una breve overview, in modo da riuscire a riassumere come varia il comportamento al fuoco e le proprietà meccaniche, in relazione ai cambiamenti delle proporzioni nella miscela di calcestruzzo. Obiettivo di questa overview è proprio quello di riuscire ad evidenziare un confronto tra i valori dei parametri delle nostre miscele e quelli trovati all'interno delle prove sperimentali studiate.

7.2 Variazione del rapporto acqua/cemento

All'interno del nostro studio il rapporto acqua/cemento assume tre valori: 0,3 – 0,4 – 0,5.

Questo viene fatto variare in modo crescente all'interno delle 12 miscele e viene combinato con la variazione della percentuale dei vuoti d'aria. La variazione del rapporto a/c varia in 3 tipologie di miscela:

- Vuoti d'aria = 5% - 0 kg/m^2 di fibre PP
- Vuoti d'aria = 10% - 0 kg/m^2 di fibre PP
- Vuoti d'aria = 15% - 0 kg/m^2 di fibre PP

Per quanto riguarda i calcestruzzi fibrorinforzati, questi verranno analizzati in una sezione successiva, tenendo il rapporto acqua/cemento bloccato a 0,3 e facendo variare solo il rapporto di vuoti d'aria

Tabella 7-2 Variazione del rapporto acqua/cemento all'interno delle 12 miscele. Fonte: Elaborazione personale

Mix calcestruzzo	Rapporto acqua/cemento	Vuoti d'aria (%)	Contenuto fibre (kg/m^3)
1	0,3	5	0
2	0,3	10	0
3	0,3	15	0
4	0,3	5	2
5	0,3	10	2
6	0,3	15	2
7	0,4	5	0
8	0,4	10	0
9	0,4	15	0
10	0,5	5	0
11	0,5	10	0
12	0,5	15	0

In seguito alla scoperta di come questo rapporto sia fondamentale per ottenere delle buone resistenze meccaniche, si sono analizzati alcuni

esperimenti per controllare come questa variazione abbia anche un effetto sul rischio di spalling:

- Esperimenti di Mindeguia e al. (2000): come la pressione all'interno dei pori è influenzata dal rapporto acqua/cemento.
- Esperimento di Bastami al. (2011): come il rapporto acqua/legante influisce direttamente sul fenomeno di spalling.
- Esperimento di Korten e Wetzig (2013): come la porosità influisce sull'espansione dell'acqua vaporizzata.

La quantità di acqua adoperata nella miscela rivesta un'importanza decisiva sulla resistenza e sulla qualità del calcestruzzo. In linea generale si può dire che diminuendo l'acqua di impasto, a parità di altre condizioni, si migliora la qualità del calcestruzzo, ovvero impasti con minore quantità d'acqua hanno una resistenza alla compressione e alla trazione maggiore di quella offerte ad impasti più fluidi. Questa non potrà più aumentare oltre un certo limite, con la diminuzione della percentuale d'acqua.

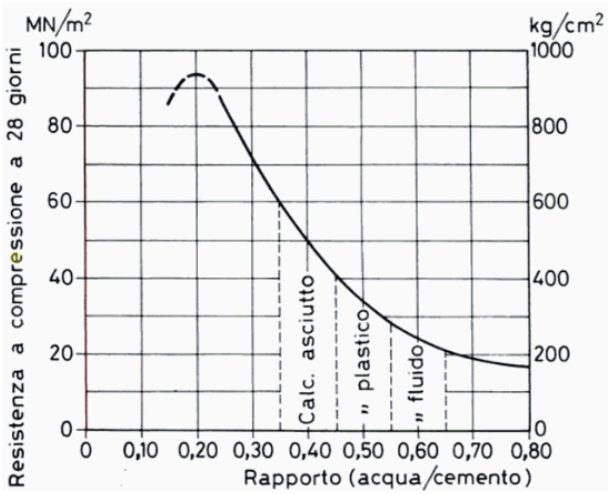


Figura 7-1 Rappresentazione schematica della variazione della resistenza alla compressione con il variare del rapporto acqua/cemento. Fonte: Proprietà strutturali del calcestruzzo

Il quantitativo d'acqua d'impasto si misura con il rapporto a/c e legge fondamentale in questo campo è la famosa Legge di Abrams. Già nel 1918, si stabilì che il dosaggio del cemento non determina da solo la qualità del

calcestruzzo, in termini di resistenza meccanica, ma bensì il rapporto di questo con l'acqua di impasto (a/c).

$$R = \frac{a_1}{a_2^{a/c}} \tag{7.1}$$

con

R [N/mm2] resistenza media a compressione

a_1 e a_2 sono costanti in funzione del tipo di cemento, del tempo di stagionatura, della temperatura in cui questa avviene e dalla forma del provino

Questa legge sperimentale ci mostra come la resistenza a compressione del calcestruzzo dipenda da quella della pasta di cemento, a parità di qualità di materiali, di costipamento e di temperatura ambiente durante la stagionatura. La quantità d'acqua "a" si riferisce solo all'acqua che si mescola effettivamente con il cemento, pari all'acqua d'impasto impiegata meno la quantità assorbita dall'aggregato, dalle casseforme, evaporata o dispersa durante il getto di calcestruzzo. Se si osserva il fenomeno da un punto di vista chimico l'elevata resistenza meccanica del calcestruzzo è dovuta alle proprietà che scaturiscono in seguito alla reazione del clinker con l'acqua, con la successiva creazone dei prodotti di idratazione.

$$3CaO\,.\,2SiO_2 + 3H_2O = 2(3CaO\,.\,SiO_2) + 6H_2O \tag{7.2}$$

Da un punto di vista stechiometrico, il rapporto acqua/cemento, con riferimento alla pasta di cemento è quindi pari a 0,42 . La maggior parte dei calcestruzzi ha un a/c da 0,45 a 0,60. E' anche ben risaputo che l'azione dell'acqua è fondamentale durante la fase di stagionatura, per riuscire ad ottenere il massimo livello delle caratteristiche e delle prestazioni. Questo serve per impedire l'evaporazione dell'acqua necessaria per l'idratazione profonda, ottenendo così prestazioni maggiori in termini di resistenza fino all' 80% percento. (Schede tecniche azienda calcestruzzo Azichem)

7.2.1 Rapporto acqua/cemento vs. Pressione all'interno dei pori

Analizzando il fenomeno dello spalling si è evidenziato come questo sia strettamente connesso e in parte causato dall'alto valore di pressione all'interno dei pori. Questo eccedendo il valore di resistenza a trazione del calcestruzzo fa si che si inneschi la reazione esplosiva.

Attraverso lo studio condotto da Mindeguia e al. (2000), la prima cosa che si è notata, è che più alto è il rapporto W/C, più basso è la pressione all'interno dei pori. Ottenendo un basso valore di pressione all'interno dei pori, si riesci così ad abbassare notevolmente il rischio di spalling

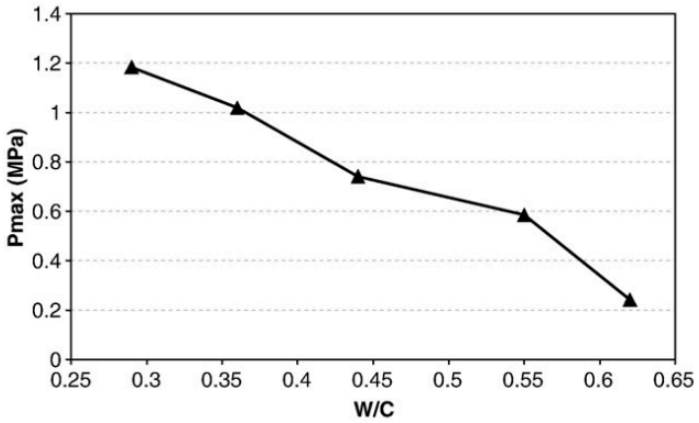


Figura 7-2 Andamento della pressione all'interno dei pori in funzione del rapporto acqua/cemento. Fonte: Mindeguiae al. (2000)

7.2.2 Rapporto acqua/cemento vs. Fenomeno di spalling

Un altro risultato importante dedotto sugli effetti del rapporto acqua/cemento è stato evidenziato in una serie di esperimenti effettuati da Bastami e al. (2011). Analizzando una serie di miscele di calcestruzzo ad alte prestazioni (HSC) ha evidenziato come il rapporto acqua/legante influisca sul fenomeno degradante dello spalling.

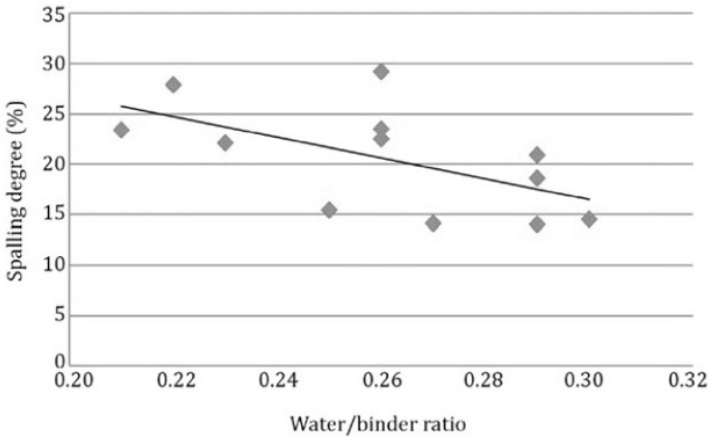


Figura 7-3 Grado di spalling esplosivo in funzione del rapporto acqua/legante all'interno della miscela di calcestruzzo. Fonte: Bastami e al. (2011)

Dall'osservazione di questo grafico si può notare come una riduzione del 10% del rapporto a/c possa portare a un incremento pari al 10% del fenomeno degradante di spalling.

7.2.3 Porosità vs. Espansione dell'acqua vaporizzata

In uno studio condotto da Korten e Wetzig (2013) si è cercato di analizzare l'effetto della porosità sul comportamento del fenomeno spalling durante un incendio. La porosità favorisce l'espansione dell'acqua vaporizzata attraverso le interconnessioni dei pori e questa caratteristica è fortemente influenzata in maniera positiva dal rapporto acqua/cemento.

Nello studio sperimentale condotto si è scelto di effettuare due serie di test. Nella serie A viene considerata l'influenza della porosità in funzione del rapporto acqua/legante, dove il valore a/c e il contenuto di vuoti d'aria sono i parametri variabili. La geometria del campione e la rigidità sono stati indagine dalla serie di test B, con gli stessi parametri della serie A, ma mentre nella prima serie è stato utilizzato un provino con spessore 150 mm, nella serie B si è utilizzato un provino con uno spessore aggiuntivo di 350 mm. La miscela scelta è stata unica per entrambe le serie, ed è stata caratterizzata dall'aggiunta di 1 kg/m^3 di fibre in polipropilene. Durante l'analisi dei risultati si è scelto come parametro significativo di riferimento il volume di materiale scheggiato, in modo da esprimere una relazione lineare tra il fenomeno di spalling, il rapporto a/c e il contenuto di aria.

Analizzando i risultati dei test della serie A e dal confrontato di due diversi rapporti di a/c, 0,42 e 0,52, come la differenza di solo 0,1 abbia un effetto di riduzione sul fenomeno di spalling. Ancora più ovvio è osservare come un contenuto di aria elevato minimizzi il rischio di spalling. Analizzando i risultati della serie B si nota come con lo stesso rapporto a/c (0,42), il volume scheggiato sia addirittura 3 volte superiore rispetto a quello della serie A. Questo a causa della differenza di spessore tra i provini delle due serie. Concludendo si è quindi osservato come per ottenere una buona durabilità e una buona resistenza del calcestruzzo sia fondamentale avere una bassa porosità, andando però contro la resistenza al fuoco. Minore è la porosità, maggiore è il rischio di scheggiatura.

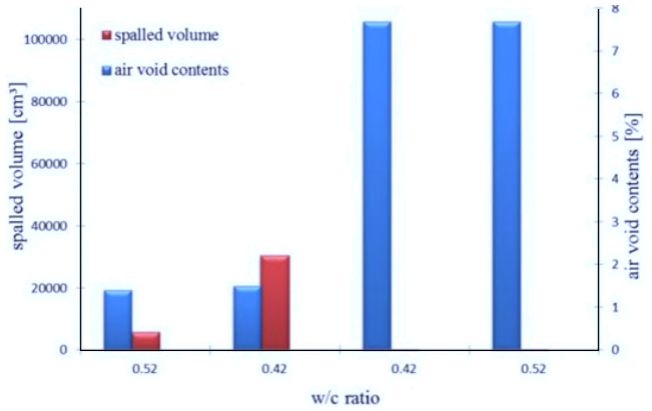


Figura 7-4 Volume di calcestruzzo soggetto al fenomeno di spalling nei provini di 150 mm. Fonte: Korten e Wetzig (2013)

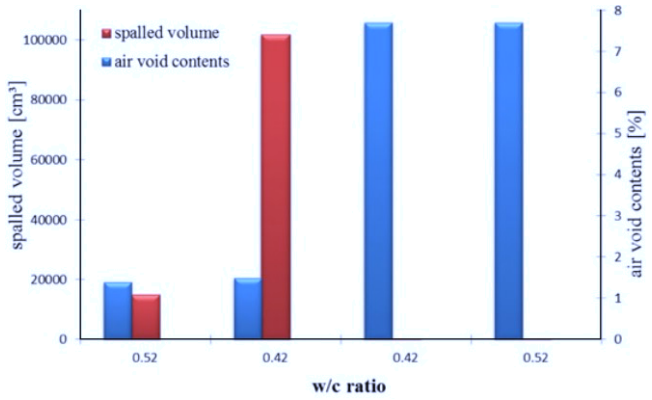


Figura 7-5 Volume di calcestruzzo soggetto al fenomeno di spalling nei provini di 300 mm. Fonte: Korten e Wetzig (2013)

7.2.4 Overview

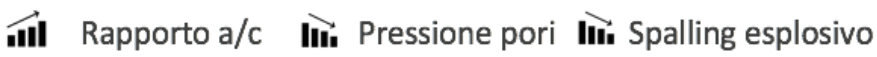
Valori mix progetto: 0,3 – 0,4 – 0,5 a/c

Fenomeno spalling

In generale si può dire che aumentando il rapporto acqua/cemento si ha una netta diminuzione della pressione. Questo genera una maggiore facilità al vapore nell'uscire dalla sezione di calcestruzzo, portando così a una diminuzione degli sforzi e un abbattimento del rischio di spalling.

Dall'analisi delle prove sperimentali si deduce che:

- Il rapporto acqua/cemento teorico, riferito alla pasta di cemento per un calcestruzzo dalla resistenza normale è quindi pari a 0,42.
- Un calcestruzzo ad alta resistenza è caratterizzato da un rapporto a/c inferiore a 0,35 in modo da ottenere resistenza a compressione > 75 KN/m^2
- Variando il rapporto acqua/cemento da 0,3 a 0,6 si ha una netta diminuzione della pressione all'interno dei pori, che sale in maniera molto accentuata tra i 100 e i 200 °C.
- Il grado di spalling risulta massimo per valori di a/c pari a 0,2 e mostra una forte tendenza a diminuire per valori crescenti di a/c in modo lineare. Mostra grandi variazioni anche solo per piccole differenze nella quantità d'acqua. Un esempio è stato dato nell'esperimento di Korten e Wetzig (2013) dove si osserva una grande variazione del grado di spalling passando da un a/c=0,42 ad a/c= 0,52.



Proprietà meccaniche

Il rapporto a/c ha un influenza decisiva sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo. In linea generale si può dire che diminuendo l'acqua di impasto, a parità di altre condizioni, si migliora la qualità del calcestruzzo, ovvero impasti più asciutti hanno una resistenza alla compressione e alla trazione maggiore di quella offerte ad impasti più fluidi. Questo aspetto ovviamente è in netto contrasto con la resistenza al fuoco.

7.3 Variazione della percentuale di vuoti (aria)

All'interno del nostro studio la percentuale di vuoti d'aria assume tre valori: 5 % - 10% - 15 %. Questa variazione si ha per 4 tipologie di miscela:

- a/c = 0,3 – 0 kg/m^2 di fibre PP
- a/c = 0,3 – 2 kg /m^2 di fibre PP
- a/c = 0,4 – 0 kg /m^2 di fibre PP
- a/c = 0,5 – 0 kg /m^2 di fibre PP

Tabella 7-3 Variazione della % di vuoti d'aria all'interno delle miscele di calcestruzzo. Fonte: Elaborazione personale

Mix calcestruzzo	Rapporto acqua/cemento	Vuoti d'aria (%)	Contenuto fibre (kg/m^3)
1	0,3	**5**	0
2	0,3	**10**	0
3	0,3	**15**	0
4	0,3	**5**	2
5	0,3	**10**	2
6	0,3	**15**	2
7	0,4	**5**	0
8	0,4	**10**	0
9	0,4	**15**	0
10	0,5	**5**	0
11	0,5	**10**	0
12	0,5	**15**	0

In seguito ad una breve spiegazione su quali sono gli aspetti principali del metodo che porta a un aumento della percentuale di vuoti d'aria all'interno della miscela di calcestruzzo, si sono analizzati due esperimenti significativi per trovare la correlazione con il fenomeno di spalling:

- Esperimento Khaliq e Waheed (2017).: prestazioni di un calcestruzzo sottoposto a processo "air entrained" a temperature elevate.

- Esperimento D'Aloia e al. (2013).: contributo della rete di bolle d'aria all'interno del calcestruzzo contro il fenomeno di spalling.

In funzione del fatto che l'aria e l'acqua non si mescolano vi è il problema dei vuoti all'interno della miscela generati delle bolle d'aria. Conseguenza principale di questo fenomeno è che l'aria intrappolata nel calcestruzzo fresco si trova normalmente sotto forma di bolle di gas circondate da un sottile strato di liquido e sospese all'interno miscela acquosa. Queste bolle variano in dimensione e forma da sfere microscopiche, a sfere cave della dimensione dei grani di cemento e fino a dimensioni più grandi e irregolari. Durante la fase di miscelazione tutte queste bolle hanno la possibilità di muoversi liberamente e soprattutto possono essere eliminate in parte attraverso il processo di vibrazione. Solo nel momento in cui il calcestruzzo è indurito le bolle d'aria rimangono fisse nella loro posizione. Lo spazio vuoto formato da una bolla è un così detto vuoto. Nel caso in cui i vuoti all'interno del calcestruzzo sono per la maggior parte dei grandi vuoti irregolari, l'effetto è generalmente dannoso. La mancata rimozione di questi vuoti genera un calcestruzzo poroso e poco resistente. Contrariamente, la presenza di micro bolle disposte in modo uniforme nell'impasto è un aspetto positivo. Con il termine "air entrained" si intende quella la procedura volontaria di creazione di piccole bolle all'interno del calcestruzzo durante la fase di miscelazione. Questo risultato si riesce ad ottenere aggiungendo nell'impasto un agente chimico, chiamato tensioattivo. Proprietà principale è quella di abbassare la tensione superficiale, permettendo a liquidi diversi di mescolarsi in modo ottimale.

Il contenuto di aria all'interno del materiale calcestruzzo è un fattore molto importante che gioca un ruolo fondamentale nella prevenzione del fenomeno di spalling. Comunemente per aumentare la porosità, e quindi la percentuale di aria nel calcestruzzo ad alta resistenza vengono usate le fibre in polipropilene. Tuttavia queste richiedono uno sforzo e un costo extra per ottenere una miscelazione uniforme e riducono lo slump flow, richiedendo un maggiore sforzo meccanico in fase di getto, compattazione e finitura. Discorso molto simile può essere fatto anche per le fibre di acciaio, anche loro utili per diminuire il fenomeno di spalling, aumentando la resistenza a

trazione e la duttilità del calcestruzzo, soprattutto nell'intervallo di temperatura critico che va dai 100 ai 400 °C. Tuttavia in modo analogo alle fibre PP, l'utilizzo delle fibre in acciaio rendono il calcestruzzo inadatto alla maggior parte delle applicazioni pratiche.

Il trattamento "air entrained" può costituire una valida alternativa, giocando essenzialmente sull'aumento della porosità intrinseca del calcestruzzo. Questo metodo riesce a fornire una maggiore lavorabilità grazie all'effetto del cuscinetto a sfera allo stato fresco che crea un'azione lubrificante quando il calcestruzzo si trova allo stato plastico. Questo significa un aumento della lavorabilità, maggiore facilità di pompaggio richiedendo una minor energia e con la possibilità di coprire maggiori distane, maggiore pulizia nel prodotto finito, riduzione dell'effetto di ritiro igrometrico, riduzione dello sgretolamento del materiale e infine un maggior tempo di lavorazione. Il raggiungimento di una maggiore resistenza nel calcestruzzo aerato è una vera sfida e richiede una progettazione attenta, in quanto l'incorporazione di aria diventa difficile da gestire in presenza di super-fluidificanti. Si creano delle incompatibilità chimiche tra gli additivi usati per il processo di immissione dell'aria e i super-fluidificanti.

Il sistema di vuoti d'aria all'interno del calcestruzzo è misurato attraverso l'utilizzo di due fattori, che sono il fattore di spazio (L) e la superficie specifica dei vuoti d'aria (α). Il fattore di spaziatura fa riferimento alla distanza che l'acqua deve percorrere per entrare in vuoto, in modo da ridurre la pressione esercitata. Ovviamente, una spaziatura piccola è migliore. La superficie specifica indica il numero relativo e la dimensione delle bolle d'aria contenute in un determinato volume d'aria. In questo caso una superficie specifica maggiore è migliore. Si ritiene necessario un fattore di spaziatura inferiore a 0,2 mm e una superficie specifica superiore a 24 mm^2/mm^3. Normalmente, i parametri del fattore di spaziatura e della superficie specifica sono studiati per aumentare la durabilità del calcestruzzo, soprattutto nei climi soggetti al crioclastismo. In climi in cui ci può essere un'elevata probabilità dell'alternarsi di cicli di gelo-disgelo, si può instaurare all'interno di un materiale roccioso, e quindi anche all'interno del calcestruzzo, un processo che porta alla disgregazione meccanica. Questo è causato dalla presenza di acqua all'interno del materiale che ghiacciando

aumenta di volume e genera delle nuove pressione all'interno dei pori. In conseguenza a questo fenomeno si creano delle piccole crepe che con il passare dei cicli di gelo – disgelo portano a rottura il materiale. Le micro bolle presenti hanno la proprietà di poter essere comprimibili e quindi hanno un effetto benefico andando a ridurre o ad assorbire le sollecitazioni all'interno del conglomerato.

In conseguenza, con l'emergere del problema del comportamento al fuoco e del rischio di spalling, si è notato, che il sistema di vuoti d'aria progettato per il ciclo di gelo e disgelo è adatto anche per l'incremento della resistenza al fuoco del calcestruzzo. Grazie a un elevato numero di pori interconnessi tra loro, il vapore che si crea all'interno della sezione ha maggiori possibilità di evadere dalla sezione di calcestruzzo, non raggiungendo così alti valori di pressione, dovuti al suo costipamento. Unico problema rimane la definizione del giusto quantitativo di vuoti d'aria per permettere una buona risposta all'aumento della temperatura parallelamente all'ottenimento di un'elevata resistenza meccanica.

L'insieme di tutte le micro bolle viene chiamato "sistema di vuoti d'aria". Le bolle hanno tutte una dimensione che varia da 10 micrometri a 1 millimetro e sono distribuite uniformemente in tutto il calcestruzzo. Per quanto riguarda il contenuto d'aria standard all'interno di una miscela, questo viene misurato in relazione al volume totale di calcestruzzo. Generalmente per evitare il fenomeno dannoso causato dal gelo e disgelo la quantità minima di aria viene indicata pari al 3% con un massimo del 8%. Nelle specifiche tecniche, il contenuto dell'aria è generalmente indicato come un valore più o meno una percentuale (che può variare dal 1,5% al 2%). Ecco una classificazione che tiene conto della dimensione massima dell'aggregato:

10 millimetri	8 ± 2 %
13 millimetri	7 ± 2 %
19 millimetri	6 ± 2 %
25 millimetri	5 ± 1.5 %
38 millimetri	4.5 ± 1.5 %
51 millimetri	4 ± 1.5 %
76 millimetri	3 ± 1.5 %

Queste sono solo delle linee guida, in quanto è molto difficile considerare una percentuale univoca, siccome il contenuto di aria è influenzato da molti fattori quali, la dimensione dell'aggregato, la quantità di acqua, tipologia del cemento e temperatura del calcestruzzo. Esistono tre differenti metodi per misurare il contenuto d'aria all'interno del calcestruzzo. Il primo metodo è definito il metodo della pressione. Questo metodo si basa sul principio secondo cui l'unico ingrediente della miscela significativamente comprimibile nel calcestruzzo fresco è l'aria. Questo metodo non è valido però per i calcestruzzi realizzati con aggregati leggeri o caratterizzati da elevata porosità. In questo caso viene utilizzato il metodo volumetrico. Il metodo si basa sul semplice spostamento dell'aria con l'acqua in una vasca di un volume prefissato. Ultimo metodo e più antico è il metodo gravimetrico. Devono essere note tutte le densità dei materiali che compongono la miscela in modo da riuscire a determinare il peso teorico senza aria e poi in seguito confrontarlo con il peso effettivo dell'unità per determinare il contenuto dell'aria.

In seguito a questa breve spiegazione si può notare come lo studio di miscele con un contenuto di aria pari al 10% e al 15% per evitare il fenomeno di spalling sia estremamente innovativo. Comunamente è veramente raro trovare una così alta percentuale d'aria, ma pensando alle potenzialità di avere un materiale altamente poroso, con una buona disposizione dei pori e una buona interconnessione tra di loro, ci sono buone potenzialità per ottenere risultati positivi durante l'esposizione dei provini ad elevate temperature.

7.3.1 Prestazioni di un calcestruzzo sottoposto a "air entrained"

A favore dell'alternativa che utilizza il procedimento di aumento d'aria all'interno del calcestruzzo per diminuire il fenomeno di spalling, è stato proposto un programma sperimentale svolto da Khaliq e Waheed (2017), in modo da studiare le sue prestazioni a temperature elevate in un intervallo che va dai 20 ai 800 °C. In questo studio sono state analizzate le proprietà meccaniche e materiali del calcestruzzo ad alta resistenza con un volume d'aria pari a 4% e 8% (AEH-4 e AEH-8), confrontato con il calcestruzzo convenzionale (NAEH-1 e NAEH-2). Le proprietà studiate sono la resistenza

a compressione, la resistenza a trazione, la curva sforzo-deformazione e il fenomeno si spalling correlato alla perdita di massa e al fenomeno della propagazione della fessura. I risultati ottenuti mostrano un peggioramento delle proprietà meccaniche ad elevate temperature con una maggiore mitigazione del fenomeno di spacco esplosivo. Per queste prove sperimentali sono state preparate quattro diverse tipologie di miscela, le prime due senza trattamento "air entrained" (di controllo) e le altre due rispettivamente con il 4% e l'8% di contenuto d'aria. Si è scelto di usare un basso rapporto a/c poiché il contenuto idrico iniziale è il parametro chiave correlato alla densità e alla permeabilità del calcestruzzo ad alta resistenza. Sono stati eseguiti test di resistenza a compressione a temperatura ambiente a 7,14 e 28 giorni. Si osserva subito come è stato più facile ottenere resistenze più elevate in campioni di calcestruzzo con una bassa percentuale di aria al suo interno. In questa sezione ci concentreremo soprattutto sul fenomeno esplosivo, sul percorso fessurativo e sulla perdita di massa dovuto al calcestruzzo soggetto a fuoco.

Il fenomeno di spacco esplosivo è principalmente attribuito all'elevata pressione all'interno dei pori, agli stress termici dovuti all'elevate velocità di riscaldamento e ai percorsi fessurativi che si creano all'interno della matrice cementizia. Nel campione NAEH-1 è stato registrato a una temperatura oltre i 400 °C, nel campione NAEH-2 oltre i 600 °C con un esito molto più distruttivo e quindi un grado di scheggiatura più elevato. Questo fatto è essenzialmente dovuto alla differenza di rapporto acqua/legante tra le due miscele. A causa della minore resistenza, ma della maggiore porosità, NAEH-2 riesce a sopportare temperature molto più elevate rispetto a NAEH-1 prima del fenomeno di spacco esplosivo. Tuttavia, a causa di una maggiore umidità e di una maggiore energia termica immagazzinata all'interno del provino NAEH-2, la pressione nei pori è estremamente maggiore. Contrariamente, non è stato osservato alcun fenomeno di spalling nei campioni AEH-4 e AEH-8 anche a temperature fino a 800°C con un tempo di stabilizzazione della temperatura di 2,5 ore. Ovviamente, la differenza all'interno dei due campioni nel comportamento al fuoco è attribuita al sistema di vuoti d'aria ben distribuito che implica una maggiore porosità. La porosità del calcestruzzo "air entrained" è in grado di adattarsi

alle variazioni di fase dell'acqua, in particolare nell'intervallo di temperatura critico di 100-400 °C, quindi maggiore è la permeabilità all'interno dei calcestruzzi AR, minori sono le possibilità di scheggiatura esplosiva. Inoltre si è notato un comportamento positivo ed efficace anche rispetto alle tensioni create dagli elevati gradienti termici. Le incompatibilità tra la pasta di cemento che tende a stringersi e l'aggregato grossolano che invece tende ad espandersi sono ben mitigate dall'alto grado di porosità. Si è notato, infatti, come a causa della dilatazione termica differenziale, non si è verificato un'eccessiva rottura del legame anche a temperature più elevate di 800°C. Questo è un ottimo risultato, che conferisce un'elevata resistenza al fuoco al materiale.

Aspetto da non sottovalutare è il percorso fessurativo che si crea all'interno del calcestruzzo a causa delle temperature elevate, che comportano la disidratazione dei composti idrati, l'evaporazione dell'acqua, la dilatazione termica differenziale e i gradienti termici che comportano l'insorgere di tensioni parallele alla faccia riscaldata. Nelle miscele studiate si è notato che nel provino NAEH-2 le prime crepe compaiono già sotto i 400 °C, a causa degli stress interni indotti dalla disidratazione del gel C-S-H e dall'espansione termica degli aggregati. Contrariamente nel calcestruzzo areato compaiono intorno agli 800 °C, dove la porosità distribuita fornita dall'aria intenzionalmente intrappolata offre spazio per l'espansione degli aggregati. Una maggiore quantità di fessurazioni si osserva nel calcestruzzo NAEH-2 alla temperatura di 600 °C. Questo è attribuito alla decomposizione di $Ca(OH)_2$, dilatazioni termiche differenziali in pasta e aggregati e disidratazione del gel C-S-H che si verifica sopra 450 °C. Viceversa, tale cracking è assente nei campioni AEH-4, il che dimostra che questo calcestruzzo sopporta cambiamenti nella microstruttura a temperature elevate.

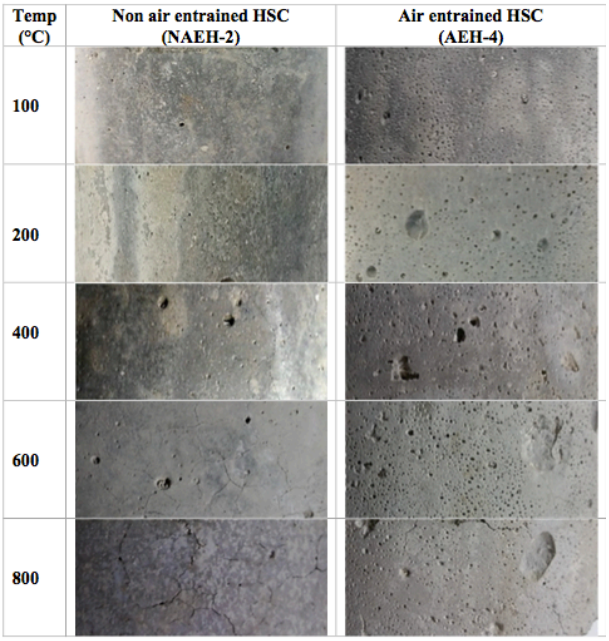


Figura 7-6 Fessurazioni indotte dal gradiente termico. Confronto tra calcestruzzo ad alta resistenza con e senza agenti chimici areanti. Fonte: Khaliq e Waheed (2017).

Fenomeno strettamente legato allo spacco esplosivo è la perdita di massa. Attraverso l'analisi di questo dato si possono trovare numerose corrispondenze con il fenomeno di spalling. Questa si presenta in varie forme all'interno del calcestruzzo: perdita di acqua libera, capillare, assorbita e legata chimicamente. Con l'aumentare della temperatura, la perdita di umidità avviene a varie velocità in base alle condizioni di riscaldamento, ai processi idro-termici, alle condizioni di legame dell'acqua e alla densità microstrutturale del calcestruzzo. Si è osservato che la perdita di massa avviene a velocità diverse con l'aumento della temperatura in tutti e quattro i tipi di campioni di calcestruzzo testati, e come previsto si osserva una maggiore perdita di massa nei campioni di calcestruzzo aerati. Inoltre si nota che il tasso di perdita di massa è inferiore dalla temperatura ambiente a 100 °C, siccome non è ancora avvenuto il cambio di fase dell'umidità da liquido a vapore; aumenta tra 100 e 200 °C, in cui si ha l'effettivo cambio di fase dell'acqua e una maggiore serie di processi idro-termici che portano all'apertura e allo sviluppo di fessure che permettono un aumento della permeabilità del calcestruzzo con un facile spostamento del vapore; di conseguenza si assesta fino a 600 °C. Questo è l'intervallo in cui l'acqua legata chimicamente inizia ad allentarsi. Infine aumenta

nuovamente con una frequenza maggiore tra 600 e 800°C all'interno dei calcestruzzi con l'alto contenuto d'aria. Fattore significativo è il deterioramento della microstruttura del calcestruzzo con crepe, fessure e con conseguente aumento della permeabilità che consente di liberare lo zoccolo di vapore creatosi all'interno, nonché l'acqua chimicamente combinata. Concludendo, si è notato che la massima perdita di massa è stata osservata nei campioni AEH-8 dovuto a un elevato contenuto d'aria e a un sistema di vuoti che consente all'umidità di sfuggire facilmente in quantità maggiore. Al contrario, la perdita di massa più bassa è stata osservata nei campioni di NAEH-1 che è attribuita a una microstruttura densa che non consente una facile fuoriuscita del vapore acqueo.

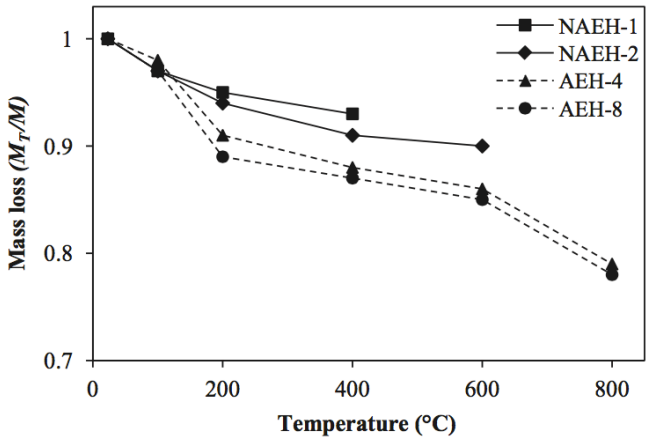


Figura 7-7 Massa relativa persa in funzione della temperatura per calcestruzzo ad alta resistenza con e senza agenti chimici areanti. Fonte: Khaliq e Waheed (2017).

7.3.2 Rete di bolle d'aria all'interno del calcestruzzo.

Altre prove sperimentali significative, riguardo l'utilizzo di un agente chimico areante al posto delle fibre in polipropilene sono state condotte da un gruppo di ricercatori gestito da D'Aloia e al. (2013). Nuovamente, questa opzione è stata esaminata valutando il contributo della rete di bolle d'aria all'interno del calcestruzzo contro il fenomeno di spalling. La valutazione è stata essenzialmente effettuata sotto carico termico ISO 834 su provini in calcestruzzo di varie forme e dimensioni. L'esperimento è stato suddiviso in due fasi. Nella prima (fase 1) si è creata una miscela con resistenza a compressione media di 60 MPa, senza aggiunta di agenti minerali. Inoltre

partendo dalla miscela base, si sono aggiunti agenti chimici per innalzare il contenuto d'aria in due quantità diverse. Ovviamente queste due nuove composizioni sono caratterizzate da resistenza minori. In seguito nella fase successiva (fase 2), sono state progettate due ulteriori miscele senza aggiunta di agenti chimici areanti ma con un maggiore a/c. Grazie alla progettazione di questi nuovi mix si è riuscito a distinguere sia il contributo della rete di connessione delle bolle d'aria sia quello del cambiamento della porosità indotto dall'aumento del rapporto acqua/cemento.

Tabella 7-4 Composizione miscela calcestruzzo e indicazione del grado di spalling. Fonte: Rielaborazione personale di D'Aloia e al. (2013).

Mix	M60	M60A EA1	M60A EA2	M43	M52
A/C	**0,46**	**0,46**	**0,46**	**0,62**	**0,55**
Agente areante (%)	**1,6**	**5,5**	**8,5**	**1,6**	**1**
Resistenza a compressione 28 gg	64,5	47,0	39,0	44,5	54,0
Area spalling/superficie espsota al fuoco (%)	79,2	4,8	3,6	10,3	3,9
Profondità media spalling (mm)	13	1	1	5	2

Durante la fase 1 sono stati eseguiti esperimenti ad alte temperature su campioni di calcestruzzo di varie dimensioni e forme. I risultati più attendibili e coerenti sono stati ottenuti esponendo alla curva ISO prismi di 30x30x75 cm su tutti e 4 i lati. Analizzando visivamente gli esemplari in seguito alla prova, si osserva che grossi pezzi di cemento si sono staccati dai bordi del prisma M60. Tuttavia, nei provini trattati con agenti chimici, il fenomeno di spalling è stato molto meno invadente. Il prisma M60AEA1 ha mostrato scheggiature angolari limitate, non scoprendo i ferri d'armatura, mentre nell'esemplare M60AEA2 non è stato osservato alcun tipo di scheggiatura.

Figura 7-8 Prismi di calcestruzzo in seguito all'esposizione in una fornace alla curva standard di fuco ISO. a) M60; b) M60AE1; c) M60AE2. Fonte: Rielaborazione personale di D'Aloia al. (2013).

Il miglior comportamento al fenomeno di spalling del calcestruzzo trattato, viene evidenziato anche attraverso l'analisi del fenomeno della perdita di massa (in questo caso considerando la perdita di materiale solido). Questo è inferiore per il prisma M60AEA2.

Per comprendere meglio la diminuzione della resistenza a compressione dovuta ad un aumento nel rapporto a/c o all'aggiunta dell'agente chimico areante è stata chiarita attraverso lo studio delle due miscele M43 e M52. Quello che si è osservato confrontando M60AEA1 e M43, le cui resistenze a compressione sono equivalenti si è notato che la diminuzione della resistenza avviene sia per aggiunta di aerante che per aumento del rapporto a/c. Inoltre per forze intorno ai 40 MPa, l'uso di un agente chimico non contribuisce in maniera aggiuntiva rispetto a quello che si potrebbe ottenere semplicemente con un aumento della porosità attraverso un aumento del rapporto acqua/legante. D'altra parte, per forze superiori sembra che l'effetto dell'aerante sia benefico in quanto per la stessa resistenza meccanica la resistenza al fuoco appare maggiore.

7.3.3 Overview

Valore mix di progetto: 5% - 10% - 15% di vuoti d'aria

Fenomeno spalling

In generale si è dimostrato come aumentando il contenuto di vuoti d'aria all'interno della miscela si ha una riduzione del fenomeno di spalling.

Risultati di questi esperimenti possono essere così riassunti:

- Temperatura a cui si verifica il fenomeno di spalling in relazione alla % di vuoti:
  - 1,5 % = 400 °C
  - 1,8% = 600 °C
  - 4% = non si verifica il fenomeno
  - 8% = non si verifica il fenomeno
- Sviluppo di un percorso fessurativo
  - 1,5 % = 350 °C
  - 1,8% = 400 °C
  - 4% = piccole fessurazioni a 600 °C
  - 8% = non si verifica il fenomeno

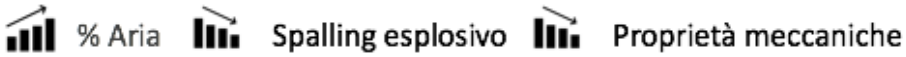
La differenza all'interno delle tipologie di campioni nel comportamento al fuoco è attribuita al sistema di vuoti d'aria ben distribuito che implica una maggiore porosità. La porosità del calcestruzzo "air entrained" è in grado di adattarsi alle variazioni di fase dell'acqua, in particolare nell'intervallo di temperatura critico di 100-400 °C, quindi maggiore è la permeabilità all'interno dei calcestruzzi AR, minori sono le possibilità di scheggiatura esplosiva.

- Perdita di massa (acqua libera, capillare, assorbita e legata chimicamente)

La miscela con la maggior percentuale di vuoti d'aria è quella che presenta il maggior livello di massa persa in quanto è facilitata a raggiungere l'esterno della sezione attraverso le fessure formate dalle bolle d'aria.

Proprietà meccaniche

Con l'aumento della percentuale di aria all'interno si ha una netta diminuzione della resistenza a compressione e trazione.



7.4 Utilizzo di fibre in Polipropilene

Le miscele di calcestruzzo oggetto di studio mostrano due contenuti differenti di fibre: 0 – 2 kg/m^3. Questo parametro è fatto variare in corrispondenza dei tre diversi livelli di percentuale di vuoti d'aria per un valore fissato e univoco del rapporto a/c pari a 0,3.

Tabella 7-5 Quantità di fibre in polipropilene utilizzate all'interno delle miscele n.4-5-6. Fonte: Elaborazione personale.

Mix calcestruzzo	Rapporto acqua/cemento	Vuoti d'aria (%)	Contenuto fibre (kg/m^3)
1	0,3	5	0
2	0,3	10	0
3	0,3	15	0
4	0,3	5	2
5	0,3	10	2
6	0,3	15	2
7	0,4	5	0
8	0,4	10	0
9	0,4	15	0
10	0,5	5	0
11	0,5	10	0
12	0,5	15	0

Nostro obbiettivo, per comprendere meglio il comportamento del calcestruzzo fibrorinforzato con differenti livelli di fibre è stato quello di analizzare tre differenti prove sperimentali:

- Esperimento di Zeiml e al. (2006): come la permeabilità è strettamente connessa al volume e alla struttura dei pori, individuata attraverso tecniche porosimetriche.
- Esperimento di Debicki e al. (2012): scelta della quantità di fibre PP ottimale per ottenere le miscele con le migliori prestazioni contro lo spalling.

- Esperimento di Heo e al. (2012): come il diametro, la lunghezza e la tipologia di fibra possono influenzare il rischio di spalling.

Le fibre di polipropilene (PP) impiegate all'interno del calcestruzzo hanno la funzione principale di prevenire il fenomeno dello spacco esplosivo. La tipologia di fibre più usata è quella anisotropica a monofilamento con diametro d_f compreso tra 10 e 100 μm e una lunghezza L_f tra 3 e 20 mm. È stato sperimentalmente verificato che questo tipo di fibre non è in grado di aumentare la rigidità del materiale, ma a temperature elevate il rischio di spalling esplosivo diminuisce se il contenuto di volume nel mix-design della miscela è compreso tra 1 e 3 kg per m^3 di calcestruzzo. Al di sotto di 1 kg al m^3 tale efficacia è ridotta.

La materia prima del polipropilene deriva dall'idrocarburo monomerico C_3H_6 e presenta una struttura chimica regolare. A temperatura ambiente, l'aggiunta di fibre PP, durante il getto di calcestruzzo, genera uno strato sottile intorno alle fibre stesse, con caratteristiche diverse rispetto alla pasta di cemento e una porosità maggiore. Questa zona a porosità elevata prende il nome di ITZ (Interfacial Transition Zone). Durante la miscelazione del calcestruzzo le fibre creano una rete che aumenta la connessione tra tutti i pori, in modo da riuscire a collegare tra di loro anche la zona ITZ attorno agli aggregati e le micro-bolle d'aria rimaste intrappolate nel calcestruzzo durante la miscelazione. La somma di tutti questi effetti aumenta la porosità iniziale già basse temperature.

Le fibre PP a temperatura ambiente sono un materiale solido con le seguenti proprietà:

- bassa densità: 0,85-0,95 g/cm^3)
- basso modulo elastico: 0,5-2,4 GPa
- resistenza a trazione: 0,5 - 0,75 GPa
- allungamento alla rottura: 10-15 %

Durante la fase di riscaldamento, si verificano due cambiamenti di fase:

1. $T_{PP0} \approx 165°C$ temperatura di scioglimento.
2. $T_{PP1} \approx 200°C$ temperatura di fine scioglimento.
3. $T_{PP2} \approx 325°C$ temperatura di evaporazione.
4. $T_{PP3} \approx 475°C$ temperatura di fine evaporazione.

Con l'aumentare della temperatura nel calcestruzzo rinforzato con le microfibre, le fibre PP si ammorbidiscono e iniziano a fondersi a causa di un progressivo cambiamento di fase che inizia a circa 150 °C quando la cristallinità comincia a rompersi e trasformando le molecole in un polimero amorfo. Sorge a 165 °C (il punto di fusione comunemente indicato) ed è completo a circa 200 °C. È proprio questa fusione che si facilita la riduzione delle sollecitazioni interne nel calcestruzzo che causano l'evento dannoso di spacco esplosivo.

I test sperimentali hanno dimostrato che la presenza di fibre di polipropilene nel mix di calcestruzzo con l'aumentare della temperatura provoca un'ulteriore aumento della porosità. Questo comportamento può essere spiegato considerando i diversi effetti che la presenza di fibre di polipropilene causa all'interno del materiale calcestruzzo.

Valutiamo ora la porosità del calcestruzzo senza l'utilizzo di fibre e poi in seguito come cambia questa caratteristica in seguito all'aggiunta di fibre PP all'interno della miscela.

La porosità n all'interno del calcestruzzo è la parte di vuoti, connessa tra di loro, che può permettere il movimento di gas e acqua. Considerando il volume totale V e V_v il volume dei vuoti connessi:

$$n = \frac{\mathrm{Vv}}{V} \tag{7.3}$$

Attraverso lo studio di Mazzucco e al. (2015) possiamo definire le varie porosità all'interno del calcestruzzo sia in una fase iniziale che ad elevate temperature.

Inizialmente, a temperatura ambiente la porosità può essere suddivisa in tre tipologie:

- porosità capillare n_c: tali micro pori hanno forma irregolare e dimensioni comprese fra 0,1 e 10 µm. Questa può essere ridotta agendo sul rapporto a/c. Se la quantità di acqua è minore, nel momento in cui evapora non lascia un eccessivo numero di vuoti. Al fine di non danneggiare la lavorabilità, è solito utilizzare

additivi fluidificanti oppure aumentare il grado di idratazione del cemento.

- porosità da gel n_m: hanno dimensioni ridotte, pari a circa 3-7 nm, e occupano il l' 8% del volume occupato dal cemento. In quanto si presenta come una proprietà intrinseca del materiale non si sono metodi per rimuoverla.
- macro porosità n_M: questa è caratterizzati da vuoti che possono essere introdotti accidentalmente per effetto di vortici durante la miscelazione o in seguito a un difettoso costipamento e allora possono avere dimensioni fino a qualche mm. Viceversa possono essere aggiunti intenzionalmente con l'ausilio di agenti tensioattivi all'impasto in modo da conferire al calce- struzzo resistenza all'azione del gelo/disgelo n questo caso risultano di circa 0,05-0,2 mm di diametro.

La porosità totale a temperatura ambiente è cosi data da 3 contributi

$$n_{cls} = n_c + n_m + n_M \tag{7.4}$$

Analizziamo ora la porosità all'interno del calcestruzzo in seguito all'aggiunta di fibre in PP.

Gli effetti benefici delle fibre sul comportamento al fuoco del calcestruzzo, possono essere spiegati considerando i seguenti aspetti:

- collegamento dei pori nelle regioni ITZ attorno agli aggregati $n_{a,ITZ}$
- creazione di una zona ITZ attorno alle fibre $n_{f,ITZ}$
- variazione della percentuale di vuoti causata dal rilassamento tensionale delle fibre n_{relax}
- connessione delle micro-bolle con aumento della porosità n_{air}
- collegamento dei vuoti creato in seguito allo scioglimento delle fibre ad alte temperature n_f

Tutti questi termini portano a un incremento significativo della porosità iniziale n_{cls} all'interno del materiale calcestruzzo. Si ottiene così una porosità totale a temperatura diversa da quella ambiente:

$$n = n_c + n_m + n_M + n_{a,ITZ} + n_{f,ITZ} + n_{relax} + n_{air} + n_f \quad (7.5)$$

La regione ITZ attorno agli aggregati è costituita da un sottile strato di pasta di cemento caratterizzato da una porosità maggiore di circa il 15% se confrontata con la porosità media del materiale calcestruzzo. Questa regione ha uno spessore di una decina di µm e dipende dalle dimensioni degli aggregati e dal contenuto di acqua. La presenza delle fibre interconnette i vuoti all'interno di questa zona ITZ, sia tra di loro, sia con tutti gli altri pori presenti all'interno del calcestruzzo. Ovviamente la percentuale e la quantità di pori collegati sarà in stretta funzione del volume e dalla lunghezza dei filamenti di polipropilene.

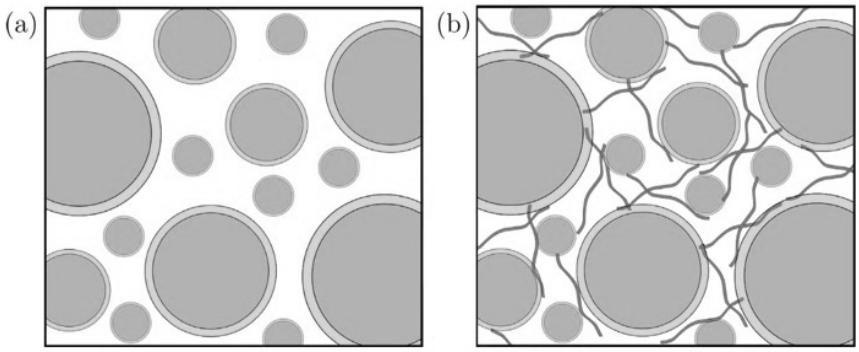


Figura 7-9 Calcestruzzo senza fibre, composto da cemento aggregati e relative ITZ. b) Connessioni tra le regioni ITZ degli aggregati a causa della presenza delle fibre in polipropilene. Fonte: Mazzucco e al. (2015)

Inoltre si nota la presenza della regione ITZ anche attorno alle fibre PP, che porta ad un ulteriore aumento della porosità.

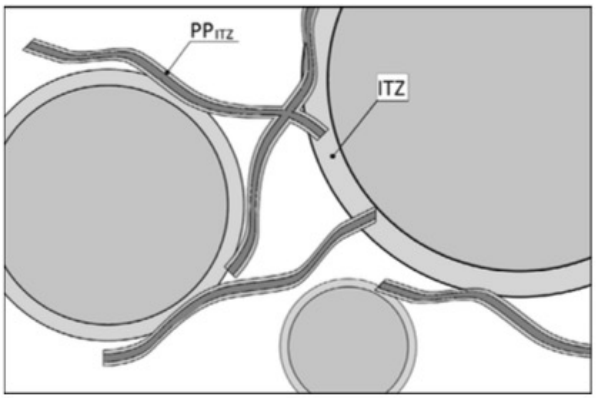


Figura 7-10 Connessione dei vuoti. Fonte: Mazzucco e al. (2015)

Analizzando invece il fenomeno dell'effetto del rilassamento generato dalle fibre si è osservato che durante il processo di idratazione e stagionatura, la matrice cementizia cerca di restringersi, ma con la presenza delle fibre, la rigidezza di quest'ultime riduce gli effetti del ritiro e questo porta ad ottenere un calcestruzzo lievemente pre-teso in una piccola zona attorno alle fibre. Nel momento in cui il calcestruzzo è soggetto a una temperatura compresa tra T_{PP0} e T_{PP1} le fibre subiscono un cambiamento di fase, da solido a liquido, la loro rigidità diminuisce, la pasta di cemento ha un recupero elastico e il volume vuoto aumenta.

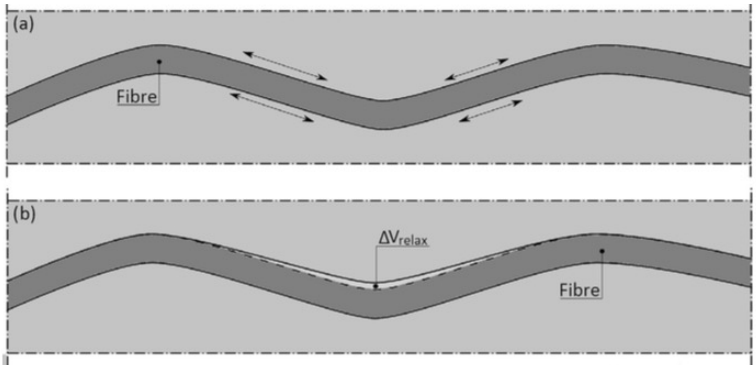


Figura 7-11 Effetti del rilassamento delle fibre in polipropilene. Fonte: Mazzucco e al. (2015)

Per quanto riguarda le micro bolle d'aria (MAB), queste sono intrappolate all'interno del calcestruzzo durante la fase di miscelazione quando il materiale è ancora liquido. Il volume di queste bolle aumenta nel momento in cui si usano aggregati di piccole dimensioni o attraverso l'utilizzo di

agenti chimici. A temperatura ambiente le fibre attraversano queste bolle, e le connettono tra loro attraverso le zone ITZ e portando così un aumento dal 7,5% al 9%. Con l'aumentare della temperatura e con lo scioglimento delle fibre PP le connessioni aumento, generando un ulteriore incremento della porosità.

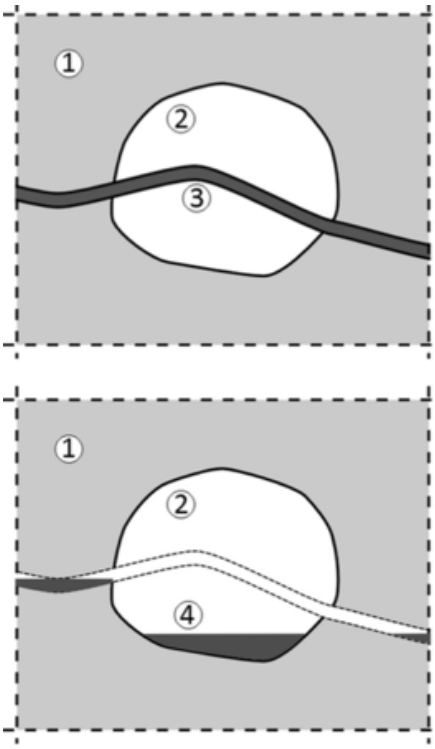


Figura 7-12 Connessione delle macro-bolle d'aria. 1) pasta di cemento; 2) micro-bolle d'aria; 3) fibre a temperatura ambiente; 4) fibre allo stato liquido. Fonte: Mazzucco e al. (2015)

Quindi si può dire che la porosità del calcestruzzo con l'aumentare della temperatura è principalmente causata da una condizione fisica: in un primo momento, quando le fibre sono in una fase liquida, il processo riguarda la zona ITZ, e successivamente, nel momento in cui le fibre evaporano, si crea una rete di canali che connette i vuoti gli uni con gli altri, riducendo la pressione di vapore all'interno del materiale.

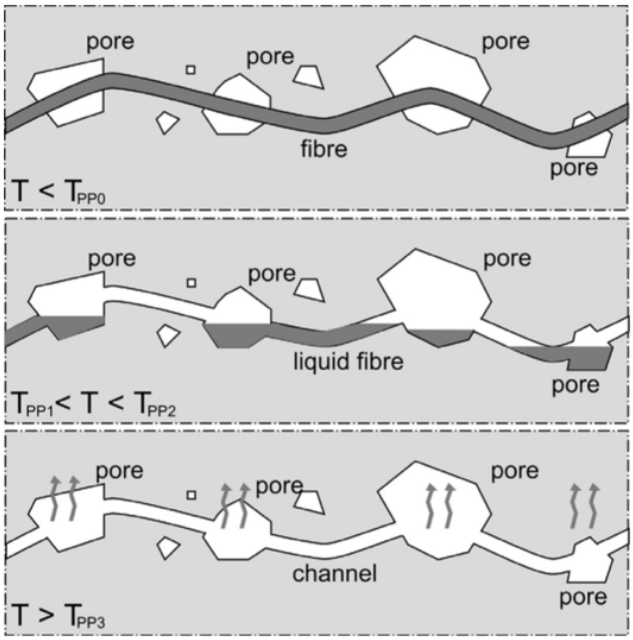


Figura 7-13 Evoluzione dello stato delle fibre in polipropilene. Fonte: Mazzucco e al. (2015)

Il massimo volume di vuoti $V_{vf,max}$ relativo alle fibre (senza tenere conto degli effetti delle interconnessioni create dalle superfici ITZ delle fibre), nella situazione in cui tutte queste sono evaporate, è ritenuto uguale al volume di fibre aggiunte nella miscela V_f. La variazione di volume di vuoti è quindi data da

$$\Delta_{vf,max} = \frac{V_f}{V} \tag{7.6}$$

In conseguenza all'aggiunta di fibre, si può calcolare la porosità del materiale n_f in funzione della temperatura (T) e della lunghezza delle singole fibre (L_f) con la formula seguente:

$$n = \frac{\Delta_{vf,max}(T)}{1+e^{[a(b-L_f)]}} \tag{7.7}$$

Con

a e b pari a 2,5 e 3.

Come già evidenziato nei paragrafi precedenti, lo spalling è generato principalmente da due contributi principali: elevato gradiente termico generato tra la superficie esterna riscaldata e superfice interna e un incremento della pressione dei pori nel calcestruzzo che si verifica quando l'acqua interna evapora. Come dimostrato, le fibre PP riducono la pressione dei pori nella pasta di cemento, andando ad aumentare la porosità, ovvero aumentando il volume dei vuoti all'interno del materiale e riducendo così il rischio di spacco esplosivo.

7.4.1 Permeabilità connessa al volume e alla struttura dei pori.

Un esperimento significativo per comprendere come l'aumento di permeabilità generato dallo scioglimento delle fibre, influenzi il fenomeno di spacco esplosivo è stato svolto da Zeiml e al. (2006), presentando i risultati di test eseguiti su calcestruzzi normali con e senza l'aggiunta di fibre PP. In questo esperimento i risultati mostrano numericamente come i valori di permeabilità, che si sono ottenuti sottoponendo il calcestruzzo a diversi livelli di temperatura, sono strettamente correlati alla struttura dei pori, individuata attraverso tecniche porosimetriche.

Le fibre in polipropilene utilizzate hanno una lunghezza di 6 mm. Le miscele sono caratterizzate da un rapporto acqua/cemento di 0,60. I test per la misura della permeabilità sono stati condotti sia su provini a temperatura ambiente senza essere stati riscaldati sia su provini pre riscaldati ad elevate temperature (80, 105, 140, 200, 300, 400 e 600 °C) con un gradiente pari a 1 °C/min. Si è scelto un aumento lento della temperatura per evitare elevati gradienti di temperatura che avrebbero indotto un elevato livello di microfratture, alterando i risultati. Per quanto riguarda i test sugli elementi riscaldati, una volta portato alla temperatura desiderata il campione viene fatto raffreddare a temperatura ambiente. Un provino cilindrico viene prelevato e sottoposto in un anello di acciaio, dove viene collocato all'interno della camera di pressione. All'inizio del test la pressione all'interno del provino, nella parte superficiale, è mantenuta costante per un tempo sufficientemente lungo in modo da stabilire un gradiente di pressione costante e un flusso di aria stazionario attraverso il campione.

Successivamente, l'alimentazione di aria viene chiusa è la diminuzione di pressione per passaggio d'aria attraverso il provino viene registrata.

I risultati sono stati riportati in un grafico dove è stato rappresentato l'andamento della permeabilità in funzione della temperatura per le due tipologie di calcestruzzo.

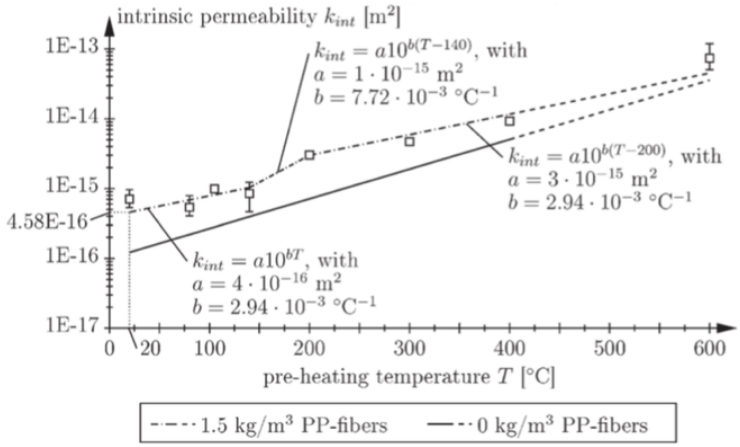


Figura 7-14 Permeabilità intrinseca a confronto in provini di calcestruzzo con e senza fibre in polipropilene 1,5 Kg/m³. Fonte: Zeiml e al. (2006).

Osservando il fenomeno hanno dedotto le seguenti conclusioni: per temperature comprese tra i 140-200 °C, la permeabilità del calcestruzzo con fibre PP è risultata da tre a quattro volte maggiore della permeabilità del calcestruzzo senza fibre; per temperature superiori ai 200 °C la differenza diminuisce, a causa del danneggiamento indotto dalla temperatura al calcestruzzo, riducendo l'effetto complessivo delle fibre PP sulla permeabilità; per temperature superiori a 600°C è stato invece osservato un danno molto grave dei campioni. Di conseguenza, nell'intervallo di temperatura di pre-riscaldamento da 400 a 600 °C, i risultati ottenuti sono meno esatti e fortemente influenzati dalla nascita di fessure durante il processo di riscaldamento e raffreddamento.

In seguito, per spiegare le caratteristiche osservate, sono stati eseguiti degli esperimenti tramite una porosimetria a mercurio su piccoli campioni di calcestruzzo sottoposti alle stesse condizioni di riscaldamento dei provini corrispondenti. In seguito alle analisi la differenza molto piccola del volume

dei pori nel calcestruzzo con e senza fibre non è sufficiente a spiegare la grande differenza di permeabilità ottenuta nei test.

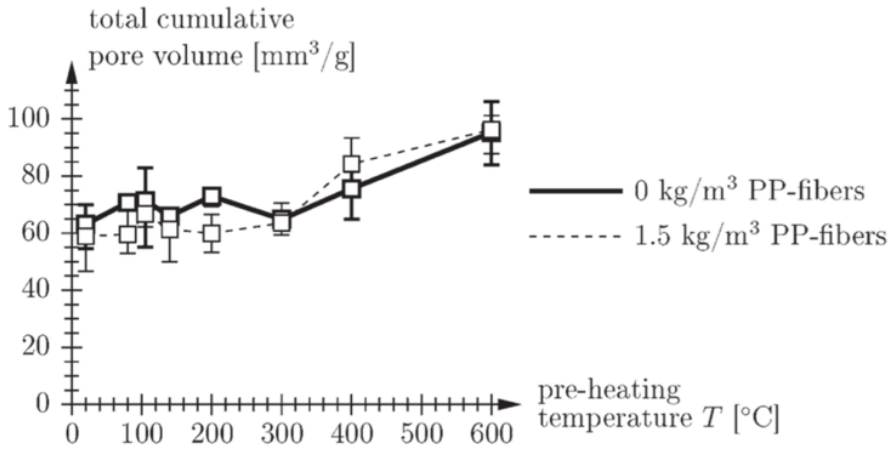


Figura 7-15 Volume totale dei pori in relazione a differenti temperature. Confronto tra calcestruzzo con e senza fibre in polipropilene 1,5 kg/m³. I quadrati rappresentano i valori medi, mentre i segmenti in linea continua i valori massimi e minimi. Fonte: Zeiml e al. (2006).

Utilità di questo test però è stata quella di osservare la distribuzione dei pori sul volume dell'intero provino in funzione del loro raggio. Inoltre, soprattutto nel calcestruzzo con fibre PP viene osservato l'incremento del volume dei singoli pori con l'aumento della temperatura.

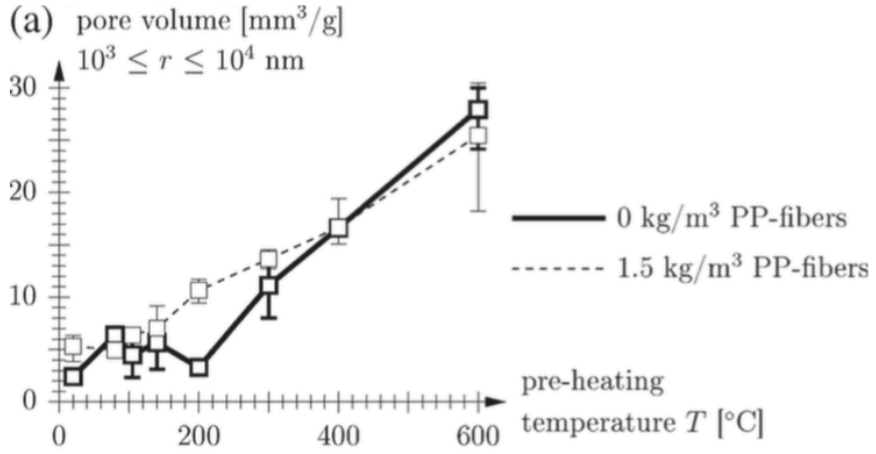


Figura 7-16 Volume totale dei pori con un determinato valore di raggio. Confronto tra calcestruzzo con e senza fibre in polipropilene 1,5 kg/m³. I quadrati rappresentano i valori medi, mentre i segmenti in linea continua i valori massimi e minimi. Fonte: Zeiml e al. (2006).

Ulteriormente a questo hanno eseguito un'analisi numerica attraverso un metodo ad elementi finiti monodimensionale tenendo in considerazione il trasporto di massa e di calore. Oltre alla distribuzione della temperatura, le analisi forniscono anche dati relativi alla pressione e alla saturazione del vapore acqueo all'interno dell'elemento in calcestruzzo. Mentre la saturazione supera il valore iniziale del 40% in caso di calcestruzzo senza fibre di PP, indicando la formazione di uno strato di umidità (moisture clog), la permeabilità all'interno del calcestruzzo fibrorinforzato è sufficiente per evitare questo fenomeno. Fondamentale è la differenza del valore massimo di pressione : 3,3 bar sopra la pressione atmosferica contro quello del calcestruzzo con fibre PP, dove la pressione del gas supera la pressione atmosferica di solo 1,7 bar.

A questo punto hanno valutato la differenza tra la produzione e il passaggio del vapore acqueo attraverso la sezione dell'elemento di calcestruzzo. Analizzando i risultati si nota come la quantità di moli vaporizzate siano uguali in entrambi le tipologie di calcestruzzo, mentre le quantità di moli trasportate attraverso la sezione, sono in funzione della permeabilità. All'interno del calcestruzzo senza fibre si nota come la quantità di moli spostate attraverso il materiale diventa minore della quantità di moli vaporizzate in corrispondenza di T=160-190-200 °C. Questo risultato comporta un innalzamento della pressione e di conseguenza un elevato rischio di scheggiatura esplosiva (spalling).

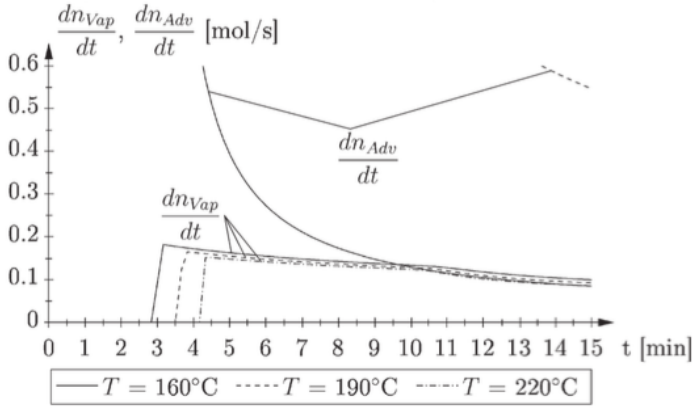


Figura 7-17 Rappresentazione della differenza tra la produzione e il passaggio del vapore acqueo attraverso la sezione dell'elemento in calcestruzzo senza fibre in polipropilene. Fonte: Zeiml e al. (2006).

D'altra parte, il grafico per il calcestruzzo contenente fibre PP mostra una prestazione diversa. Per tutte le temperature scelte la quantità di moli trasportate è maggiore della quantità di moli vaporizzate. Pertanto, in questo caso non si verificherà alcun accumulo di pressione e il rischio di scheggiatura si riduce notevolmente.

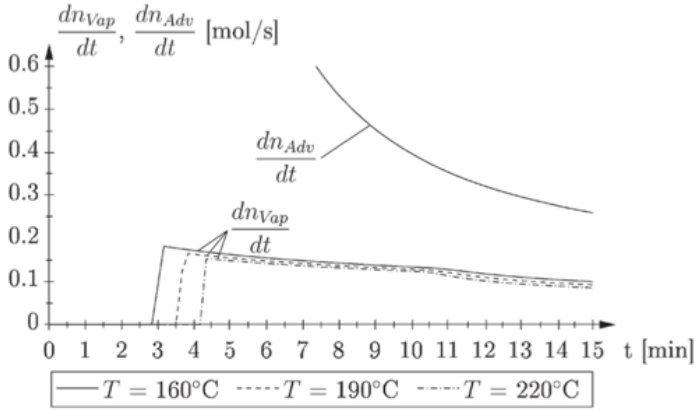


Figura 7-18 Rappresentazione della differenza tra la produzione e il passaggio del vapore acqueo attraverso la sezione dell'elemento in calcestruzzo con fibre in polipropilene. Fonte: Zeiml e al. (2006).

7.4.2 Quantità ottimale di fibre in polipropilene.

Parte fondamentale di una corretta progettazione della miscela attraverso l'uso di fibre in polipropilene è la scelta ottimale della quantità di fibre da utilizzare. In questo primo esperimento questo aspetto è stato studiato in maniera approfondita da Debicki e al. (2012). Lo spalling test è stato eseguito su quattro miscele di calcestruzzo (HPC0, HPC0.5, HPC1 e HPC2), ognuna con un quantitativo di fibre diverso.

Tabella 7-6 Proporzioni all'intenro della miscela. Fonte: Rielaborazione personale da Debicki e al. (2012)

Mix	HPC0	HPC0,5	HPC1	HPC2
Cemento (kg/m³)	450	450	450	450
Acqua (kg/m³)	160	160	160	160
Sabbia (kg/m³)	840	840	840	840
Ghiaia (kg/m³)	960	960	960	960
Fumo di silice (kg/m³)	22	22	22	22
Riduttore d'acqua (kg/m³)	3,5	7	7	7
Fibre PP (kg/m³)	**0**	**0,5**	**1**	**2**
Agente areante (%)	**2,9**	**2,4**	**2,4**	**2,4**

La tipologia di fibre usata in queste prove hanno un diametro di 0,015 mm con una lunghezza di 6 mm. La loro temperatura di scioglimento è pari a 165 °C. I provini, invece, sono costituti da tre sfere con diverso diametro: 0,12-0,18-0,24 m. I campioni sono stati testati almeno 28 giorni e la velocità di riscaldamento è stata di 5 °C/min. Le misurazioni effettuate durante il riscaldamento sono state la temperatura al centro della sfera con una termocoppia, la temperatura sulla superficie con due termocoppie e la massa del campione. Analizzando il fenomeno di spalling, si nota che il 100% del calcestruzzo senza fibre PP è soggetto al fenomeno esplosivo. Per un contenuto di fibre di 1 kg/m³, si evita la scheggiatura delle sfere, indipendentemente dal diametro. Per un contenuto in fibra di 0,5 kg/m³, nessuna sfera di 0,12 m di diametro è stata scheggiata, mentre il 50% delle sfere di 0,24 m di diametro e il 100% delle sfere di 0,18 m di diametro sono stati scheggiati. Di conseguenza, si può dedurre che i campioni di piccolo diametro costituiti con miscele contenenti una quantità molto bassa di fibre, sono meno sensibili alla scheggiatura.

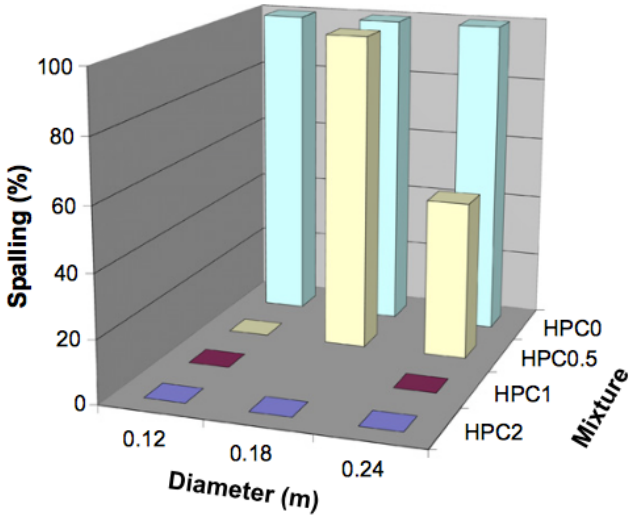


Figura 7-19 Percentuale di materiale soggetto al fenomeno di spalling in funzione del diametro della sfera e della quantità di fibre inserite nella miscela. Fonte: Debicki e al. (2012)

Le dimensioni del campione influenzano in maniera significativa il meccanismo di spalling. Per sfere di 0,12 m di diametro, la zona satura, dove si verifica il picco di pressione si trova vicino al centro e comporta una scheggiatura totale ed esplosiva dell'intero provino. Per sfere di 0,24 m di diametro, il picco di pressione sembra essere situato tra il centro e la superficie, coinvolgendo una scheggiatura del campione più superficiale.

Figura 7-20 Provini in seguito al fenomeno di spalling. Sfere senza aggiunta di fibre in PP di vario diametro a) 0,12 m; b) 0,18 m; c) 0,24 m. Fonte: Debicki e al. (2012).

7.4.3 Diametro, lunghezza e tipologia di fibra in polipropilene

In seguito ad aver chiarito il processo chimico e meccanico con il quale le fibre in polipropilene sono in grado di ridurre la pressione all'interno dei pori ed avere osservato come la scelta quantità delle fibre [kg/m^3] ha un ruolo fondamentale per l'annullamento del fenomeno esplosivo, possiamo ora analizzare in maniera più scrupolosa e precisa l'effetto del diametro, della lunghezza e della temperatura di fusione sul rischio di spalling. In un

esperimento condotto da Heo e al. (2012) e altri si sono studiate fibre con tre diversi diametri (0,012-0,02-0,04 mm), tre diverse lunghezze (9-12 -19 mm) e di due differenti tipologie di fibre (nylon e polipropilene). I parametri comunemente usati per esprimere la quantità di fibre da inserire nell'impasto sono sempre stati espressi in una percentuale in volume (v%) oppure attraverso il peso delle fibre per unità di volume di calcestruzzo, notando che sono in funzione del diametro. Si è così deciso di esprimere questa quantità attraverso l'utilizzo di un parametro migliore, indipendente dal diametro, ovvero il numero di fibre per cm^3 (N). Potenzialità di questo metodo è quella che per fibre della stessa lunghezza ma con diametro diverso il parametro sarà uguale in ogni caso. La temperatura di fusione ottimale viene studiata, andando ad analizzare il comportamento delle due tipologie diverse di fibre.

Si è così trovato che i parametri critici per il corretto utilizzo di fibre sono:

- numero totale di fibre per unità di volume N [numero/cm^3]
- lunghezza delle fibre L [cm]
- punto di fusione T_m [°C]

Grazie all'utilizzo di questi tre parametri è stato creato un buon modello per la descrizione del fenomeno di spalling. Questo mette in relazione la perdita di peso con il parametro NL^3k, dove k è un fattore introdotto per tenere in conto il punto di fusione delle fibre, attraverso il rapporto $160/T_m$. Si è in questo modo dimostrato che quando NL^3k è maggiore di 190, la perdita di massa è minore del 20% (definito come il limite per non avere rischio di spalling esplosivo).

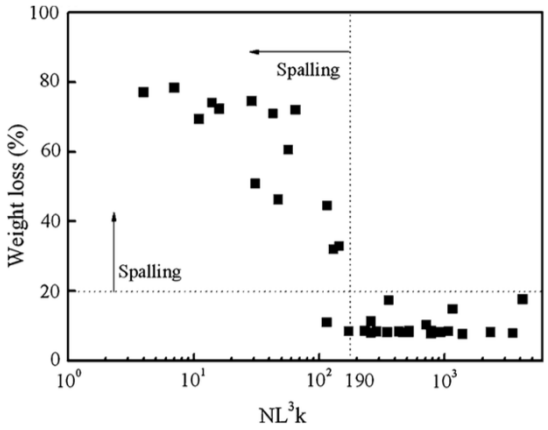


Figura 7-21 Massa persa dai provini in provini di calcestruzzo costituiti da vari tipi di fibre con diverse lunghezze in relazione al numero NL^3k. Fonte: Heo e al. (2012).

Volendo analizzare come la differenza di diametro e lunghezza influisce sul rischio di spalling, hanno creato miscele con lo stesso rapporto acqua/legante, fissato sul valore di 0,25. Il legante è costituito dal 20% di cenere volante, 10% di fumo di silice e 70% di cemento. I provini creati sono cilindri di diametro 100 mm e altezza 200 mm e sono stati sottoposti a prova a compressione e resistenza a fuoco sotto l'azione della curva ISO-384.

In seguito all'analisi di test sperimentali si è notto che nella scelta del diametro e della lunghezza della fibra è necessario tenere in conto due espetti contemporaneamente: in primo luogo il diametro della fibra dovrebbe essere il più piccolo possibile per aumentare il numero di fibre per unità di volume che è molto vantaggioso; in secondo luogo con fibre di diametro molto piccolo c'è un elevata probabilità di aggrovigliamento, con la diminuzione della capacità di fornire connessioni con altri pori nel calcestruzzo durante l'incendio . Si tende così ad utilizzare il rapporto di forma. La relazione concettuale offre la possibilità di selezionare la dimensione ottimale delle fibre in base al fatto che un elevato rapporto di forma (fine e lungo) delle fibre può causare l'aggrovigliamento e un basso rapporto (grossolano e corto) invece non crea sufficiente percorsi per collegare i pori. Per controllare al meglio il processo quindi, il rapporto di forma deve essere inferiore ad a_{max} per evitare un aggrovigliamento, ma superiore ad a_{min}. Tutto questo si traduce nella disuguaglianza

$$a_{min} < L_f/D_f < a_{max}$$

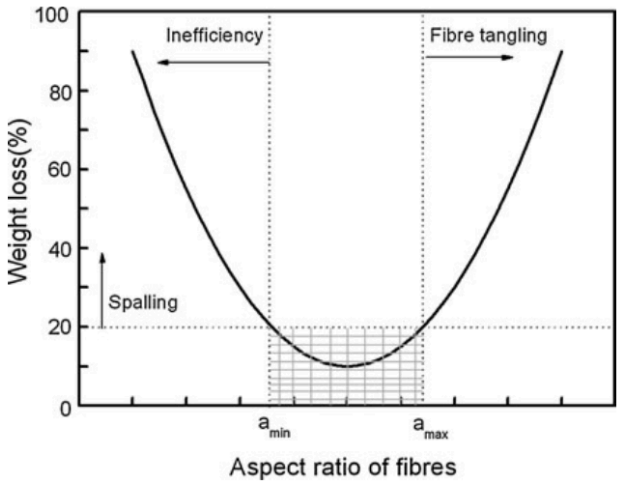


Figura 7-22 Diagramma che mostra l'andamento del coefficiente di forma. Fonte: Heo e al. (2012).

7.4.4 Overview

Valore miscele di progetto: 2 kg/m^3 contenuto di fibre in Polipropilene

Fenomeno spalling

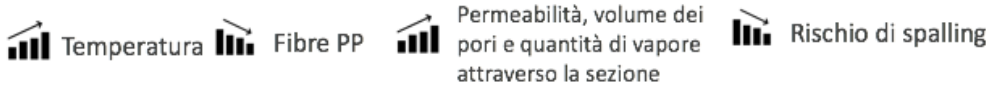
In generale si può dire che con l'aumento della temperatura, si verifica lo scioglimento delle fibre in polipropilene con un conseguente aumento della permeabilità, del volume totale di pori e un aumento della quantità di vapore che riesce a passare attraverso la sezione. Tutto questo porta così a una netta diminuzione del fenomeno di spalling.

Possiamo dire che:

- con l'aggiunta di fibre si ha un aumento della porosità iniziale sia a temperatura ambiente che soprattutto a temperature elevate.

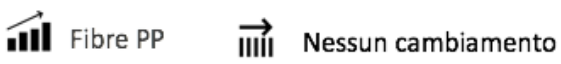
$$n = n_c + n_m + n_M + n_{a,ITZ} + n_{f,ITZ} + n_{relax} + n_{air} + n_f$$

- confrontando calcestruzzi privi e con l'aggiunta di fibre (0-0,5-1- 2 kg/m^3) si nota come il miglior comportamento rispetto al fenomeno degradante viene registrato da calcestruzzi fibrorinforzati.
- la giusta quantità di fibre consigliate è tra 1,5 e 3 kg/m^3. Inoltre si è evidenziato un modo migliore per esprimere la quantità minima di fibre, ovvero attraverso il numero NL^{3}k.
- il giusto rapporto tra la lunghezza e il diametro è in funzione del coefficiente di forma, $a_{min} < L_f/D_f < a_{max}$



Proprietà meccaniche

Con l'aggiunta di fibre in polipropilene non si sono registrati importanti cambiamenti nell'andamento della resistenza a compressione, della resistenza a trazione.



7.5 Utilizzo di fibre ibride

In seguito alla valutazione di come le fibre d'acciaio riescono ad aumentare le proprietà meccaniche di un calcestruzzo, anche per questa modifica della miscela, si sono scelte tre prove sperimentali:

- Esperimento di Peng e al. (2006) : relazione tra lo spalling esplosivo e l'energia di frattura. Confronto tra l'utilizzo di fibra d'acciaio, di polipropilene o ibrida
- Esperimento di Zeiml e al. (2008) : energia di frattura connessa al rilascio di energia cinetica nel momento in cui si verifica il fenomeno di spacco esplosivo.
- Esperimento di Czoboly e al. (2016) : come l'utilizzo di diverse tipologie di fibre ha migliorato le proprietà di resistenza al calore del calcestruzzo.

Partendo dal fatto che questo aspetto non è stato preso in considerazione all'interno delle 12 miscele oggetto di studio, si deciso comunque di fornire un breve accenno all'utilizzo delle fibre ibride in quanto mostrano un'elevata potenzialità e in modo da permettere l'apertura verso nuovi studi futuri.

Il calcestruzzo rinforzato con fibre ibride nasce con l'obiettivo di combinare contemporaneamente fibre con diversa geometria e/o materiale all'interno della stessa miscela, in modo da ottenere un composto che ottenga proprietà e benefici dalla loro sinergia.

Un esempio di notevole importanza per contrastare in maniera ottimale il fenomeno di spalling è la combinazione all'interno della stessa miscela di fibre in polipropilene e fibre in acciaio. La riduzione del fenomeno di spalling, è da attribuire principalmente alle fibre in polipropilene. Le fibre di acciaio, invece, aumentano nettamente le proprietà meccaniche, ovvero la resistenza a trazione post-fessurazione, la resistenza a taglio e aumentano la duttilità in seguito al raggiungimento della resistenza di picco. Scoperta di notevole importanza, è che, anche quest'ultime, in maniera secondaria possono collaborare alla riduzione del fenomeno di spalling, agendo sull'aumento dell'energia di frattura. Nuova frontiera della ricerca scientifica è quindi quello di migliorare la resistenza al fuoco del

materiale attraverso l'utilizzo contemporaneo di diverse tipologie di fibre per ottenere il comportamento ottimale.

Le proprietà delle fibre in PP sono già state ampiamente descritte nella sezione precedente, mentre per quanto riguarda le fibre in acciaio, è ormai consolidato che una delle proprietà più importanti del calcestruzzo rinforzato con questa tipologia di fibre è la sua maggiore resistenza alla propagazione di fessurazioni e crepe. Come risultato di questa capacità di diminuire la formazione e la propagazione delle crepe, questi composti possono aumentare la loro capacità di deformazione e incrementare la resistenza a trazione. In questo modo si riesce ad attribuire al composto fibrorinforzato un'elevata duttilità in seguito alla nascita delle fessurazioni. Si assiste così alla trasformazione del materiale da duttile a fragile. Questo processo porta ad un incremento dell'assorbimento dell'energia, e quindi ad un aumento della tenacità del materiale .

Con l'obiettivo di analizzare l'effetto delle sole fibre di acciaio all'interno di un calcestruzzo fibrorinforzato si è fatto riferimento alle prove sperimentali svolte da Chanh (2013) in uno studio riguardo l'investigazione delle sue proprietà meccaniche, tecnologiche e delle sue possibili applicazioni. Si possono quindi fare alcune particolari considerazioni riguardo questi composti.

Nella maggior parte dei casi, le miscele rinforzate con fibre in acciaio contengono contenuti di cemento rapporti di aggregato fine su aggregato grosso molto elevati. Inoltre, per migliorare la lavorabilità viene eseguito un trattamento di "air entrained" e vengono aggiunti degli agenti chimici "super plasticizzanti". Interessante è vedere come la lavorabilità, valutata attraverso il grado di compattazione (rapporto fra la densità ρ_{v0} di un provino prelevato durante il getto del calcestruzzo, e quella ρ_v di una carota estratta dalla struttura) vari in funzione della percentuale del contenuto di fibre e in funzione del rapporto di forma della fibra. Si nota che la lavorabilità diminuisce con l'aumento del rapporto di forma, evidenziando come sia difficile ottenere un mix uniforme se questo rapporto è maggiore di 100.

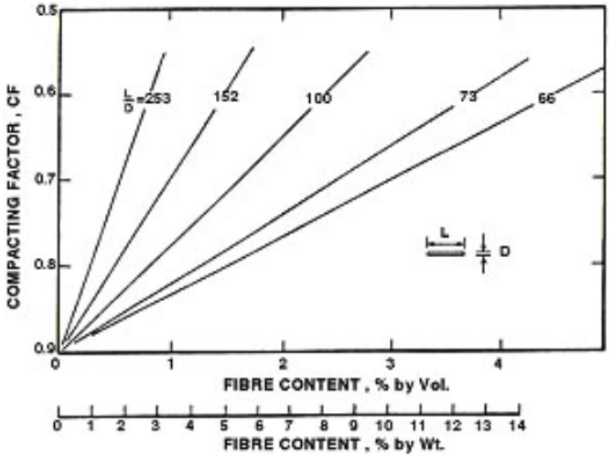


Figura 7-23 Effetto del fattore di forma delle fibre sulla lavorabilità del calcestruzzo, in relazione al loro contenuto percentuale. Fonte: Chanh (2013).

Il problema di base, nel confezionamento di una miscela, è quindi quello di introdurre un sufficiente volume di fibre disperse in modo uniforme per ottenere i miglioramenti desiderati nel comportamento meccanico, senza andare ad intaccare la lavorabilità, in modo da poter consentire una perfetta miscelazione e una buona posa in opera. In generale, i problemi di lavorabilità e distribuzione uniforme aumentano con l'aumentare della lunghezza e del volume delle fibre. Una delle principali difficoltà nell'ottenere una distribuzione uniforme delle fibre è la tendenza delle fibre di acciaio a formare una palla o un aggregato. L'aggregazione può essere causata da una serie di fattori:

- Le fibre possono essere già raggruppate prima di essere aggiunte al mix.
- Aggiunta troppo rapida delle fibre.
- Volume troppo elevato di fibre.

Considerando invece, le proprietà meccaniche, per quanto riguarda la resistenza a compressione, non si hanno grandi aumenti sulla resistenza di picco ma si hanno grandi vantaggi nel momento in cui si considera la duttilità post-fessurazione, con annesso aumento di assorbimento dell'energia.

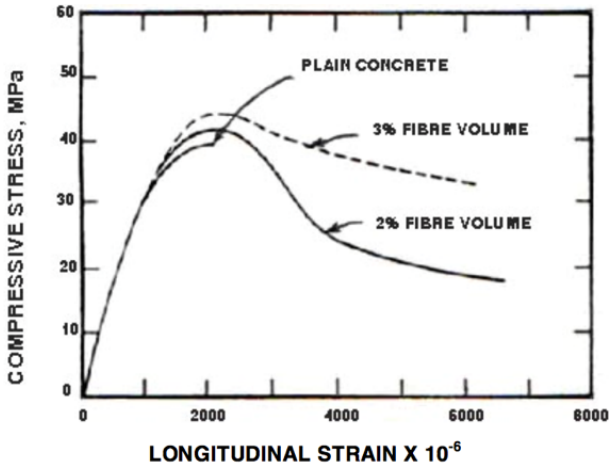


Figura 7-24 Diagramma sforzo-deformazione durante una prova di compressione per un calcestruzzo rinforzato con fibre in acciaio. Fonte: Chanh (2013).

Analizzando invece la resistenza a trazione, le fibre allineate in maniera corrette nella giusta direzione dello sforzo di trazione possono determinare aumenti fino al 133% per il 5% di fibre d'acciaio lisce. Tuttavia, per fibre più o meno distribuite casualmente, l'aumento della forza è molto più piccolo di circa il 60%.

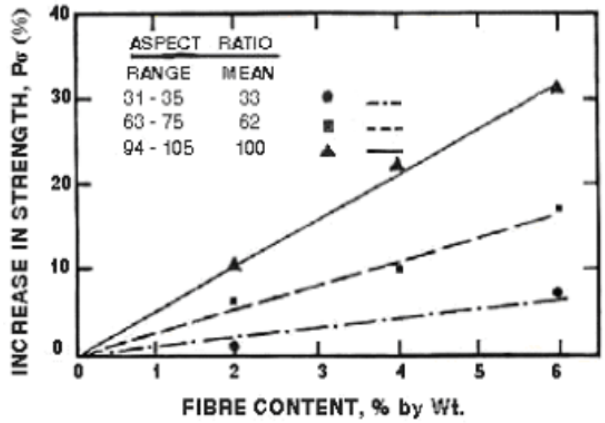


Figura 7-25 Influenza del contenuto di fibre in acciaio sulla resistenza a trazione. Fonte: Chanh (2013).

7.5.1 Confronto tra l'utilizzo di fibra ibrida, d'acciaio o polipropilene.

Con l'obiettivo di studiare il comportamento del calcestruzzo al variare della tipologia e delle quantità di fibre si sono analizzati una serie di esperimenti condotti da Peng e al. (2006). Scopo principale è quello di valutare come le fibre d'acciaio combinate con le fibre in polipropilene possono contribuire in maniera significativa alla riduzione del fenomeno di spalling. Per dimostrare questo viene esposta la relazione tra lo spalling esplosivo e l'energia di frattura, attraverso l'analisi di 5 differenti tipologie di miscela di calcestruzzo fibrorinforzate, esposte a temperature elevate. Le miscele sono state rinforzate con fibre in polipropilene, in acciaio e con fibre ibride, ovvero con l'utilizzo di entrambe le tipologie all'interno della stessa miscela. Conclusione importante di queste prove sperimentali è evidenziare come sia migliore il comportamento al fuoco del calcestruzzo fibrorinforzato attraverso l'utilizzo di fibre ibride. Le miscele oggetto di studi hanno un rapporto acqua/cemento pari a 0,26, una quantità di cemento Portland pari a circa 500 kg/m^3, una modesta quantità di fumo di silice (60 kg/m^3) e con una quantità variabile di fibre in polipropilene e fibre di acciaio.

Tabella 7-7 Quantità di fibre all'interno delle diverse miscele. Fonte: rielaborazione personale da Peng e al. (2006)

Tipologia	Fibre – PP (kg/m^3)	Fibre Acciaio (kg/m^3)	Quantità di provini soggetti a spalling (T=800 °C)
CHPC	0	0	16/16
PHPC	1	0	7/16
HHPC1	0,6	40	2/16
HHPC2	0,3	70	0/16
SHPC	0	100	3/16

I test di spalling sono stati condotti su travetti di calcestruzzo rinforzato con fibre di 100×100×300 mm. Per la determinazione dell'energia di frattura i provini, intagliati in mezzeria, sono stati esposti a una temperatura di 105 °C per due giorni e in seguito riscaldati a una temperatura di 400 °C, mantenendola stabile per un'ora. I campioni sono stati raffreddati e portati

naturalmente a temperatura ambiente. Anche in questo caso l'energia di frattura è stata ottenuta secondo il metodo RILEM, registrando l'intera curva carico–deformazione fino al collasso. Nella tabella sono riportati i risultati della frequenza dell'evento spalling all'interno dei provini. Tra i provini fibrorinforzati solo una tipologia non ha mostrato segni di spalling, quello con un valore medio (0,6 kg/m^3) di fibre in polipropilene e 40 kg/m^3 di fibre in acciaio, HHPC1. Osservando l'energia di frattura residua in seguito all'esposizione a 400 °C delle travi in calcestruzzo, nel complesso, il calcestruzzo fibroso presenta una G_f molto più elevata, in particolare quelli che incorporano fibre di acciaio, rispetto al calcestruzzo normale ed è significativamente più alta rispetto a quella misurata a temperatura ambiente. Questo è dovuto a un processo di estrazione della fibra di acciaio molto più severo e alla relazione che si crea tra le fibre in acciaio e gli aggregati. Per calcestruzzo fibroso, l'energia residua di frattura era significativamente più alta di quella prima del riscaldamento.

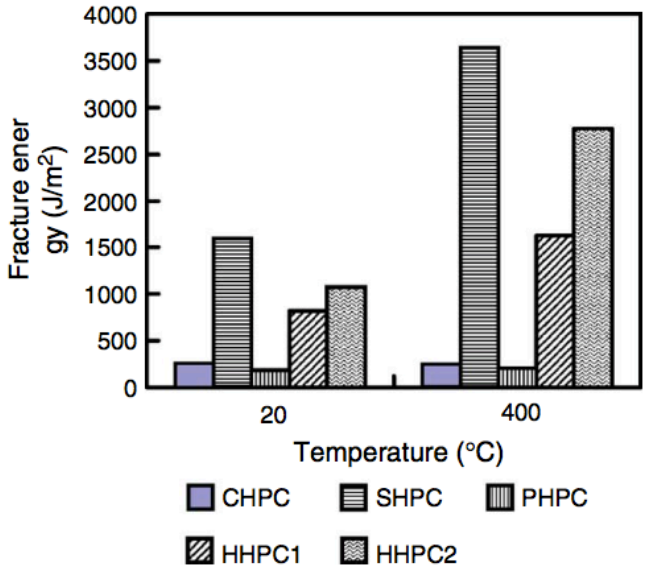


Figura 7-26 Energia di frattura per 5 tipologie di calcestruzzo prima e dopo essere stati esposti ad alte temperature. Fonte: Peng e al. (2006).

Questi risultati ottenuti possono anche essere correlati con il fenomeno di spalling esplosivo. Anche se nella maggior parte dei casi, le fibre in polipropilene sono in grado di sciogliersi a 170 °C, formando così un sistema di pori, diminuendo così la tensione all'interno dei pori, in questo test si sono

verificati alcuni casi in cui i campioni PHPC e HHPC2 sono stati soggetti a un fenomeno di spalling. Questo fenomeno è correlato al basso rapporto acqua/cemento (W/B=0,26), che rende il calcestruzzo così denso da mantenere la pressione elevata, e generare il fenomeno esplosivo, nonostante il sistema di vuoti creato. In seguito a queste considerazioni, l'aggiunta della fibra di acciaio è utile per superare l'accumulo di tensione di vapore ed evitare il fenomeno esplosivo, prevenendo le fessurazioni all'interno del calcestruzzo nel punto in cui si accumula l'umidità. Inoltre, siccome si è verificato il fenomeno distruttivo anche nei provini che contenevano fibre in polipropilene, è necessario aumentare la dose, passando da 1 kg/m^3 a 2 kg/m^3.

In conclusione, si è quindi evidenziato come l'incorporazione della fibra ibrida (fibra di acciaio e fibre in polipropilene) sembra essere una metodologia promettente per migliorare la resistenza al fenomeno di spacco esplosivo.

7.5.2 Energia di frattura vs. Energia cinetica.

Estremamente collegato al fenomeno dello spalling esplosivo c'è il discorso dell'energia cinetica, ovvero l'energia che possiede il frammento di calcestruzzo scagliato all'esterno dell'elemento soggetto al fenomeno esplosivo.

A favore di questa riflessione è lo studio eseguito da Zeiml e al. (2008) e altri, in cui possiamo vedere come l'energia di frattura sia connessa al rilascio di energia nel momento in cui si verifica il fenomeno di spacco esplosivo, e come questa può andare a diminuire l'effetto distruttivo. L'energia rilasciata viene trasformata in energia cinetica di movimento accelerando l'espulsione del pezzo soggetto a spalling. Quindi si può dire che la velocità del frammento v_p [m/s] è connessa alla rispettiva energia cinetica dalla seguente formula:

$$E_{kin} = \frac{m v_p^2}{2} \tag{7.8}$$

con

m [kg] massa del frammento di calcestruzzo.

Nel caso di spalling dovuto al processo termo-meccanico i risultati numerici mostrano che in corrispondenza del punto in cui si verifica il fenomeno esplosivo, ovvero in cui si registra il valore massimo di pressione, l'energia cinetica totale del frammento è la differenza tra l'energia di deformazione elastica rilasciata in seguito, e l'energia dissipata attraverso la frattura. Nella maggior parte dei casi sperimentali si è notato che l'energia cinetica rilasciata corrisponde a una velocità del frammento di calcestruzzo v_p compresa tra i 4-5 m/s.

Un ulteriore contributo all'aumentato di energia cinetica del materiale esploso è dato dall'aumento di pressione causato dal vapore acqueo.. Considerando quindi la combinazione dei due fenomeni, l'energia cinetica totale porta a una velocità del pezzo scagliato via dal calcestruzzo pari a 6,7 m/s. Ovviamente in calcestruzzi ad alta resistenza, dove si possono raggiungere valori di pressione elevati si raggiungono valori di energia cinetica pari a 3-4 volte maggiori con una velocità di 12,4 m/s. Ovviamente questa è solo un'analisi quantitativa, basata su diverse ipotesi come l'espansione adiabatica del gas, le dimensioni della frattura e dei pezzi di calcestruzzo soggetti a spalling. Inoltre si trascurano alcuni fenomeni fisici, quali la dissipazione di energia, il comportamento più complesso del vapore acqueo che viene assunto come gas perfetto, la rapida diminuzione della pressione in conseguenza all'apertura della fessura. Ma nonostante ciò si dimostra che l'energia elastica racchiusa in un elemento di calcestruzzo riscaldato è sufficiente per lo sviluppo di fessure e per trasmettere una notevole quantità di energia cinetica ai frammenti scheggiati. Inoltre come si è evidenziato la pressione del gas all'interno dei pori, contribuisce all'incremento di questa energia cinetica che fa si che il fenomeno di spalling sia esplosivo attribuendo una forte accelerazione. Tuttavia, la condizione necessaria per che avvenga questo è la presenza di un sistema di fessure: maggiore è la loro lunghezza iniziale, maggiore è la velocità raggiungibile dei frammenti di calcestruzzo. Quindi si può riconfermare, come già evidenziato in precedenza che anche da un punto di vista energetico lo spalling è dovuto a una combinazione tra il processo termo-meccanico e termo-igrometrico.

Si procederà ora con una breve spiegazione di quali meccanismi sono generati all'interno del calcestruzzo in seguito all'evoluzione dei due processi sopra descritti. A questo proposito si vuole calcolare l'energia cinetica e la velocità cinetica associata ai due processi ($E_{kin}^{th}, v_p^{th}, E_{kin}^{tm}, v_p^{tm}$) sopra descritti, portando così al calcolo dell'energia cinetica e alla velocità totale (E_{kin}, v_p).

Nel caso del processo termo-igrometrico l'effetto dell'espansione del vapore è considerato attraverso le condizioni di equilibrio osservate per il frammento soggetto a spalling nell'istante t, riuscendo così a determinare la sua massa e accelerazione.

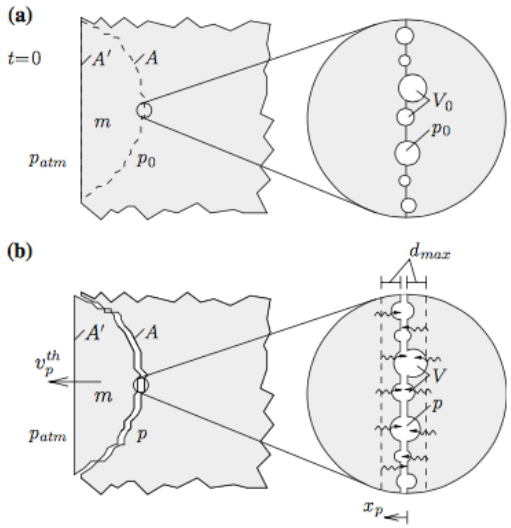


Figura 7-27 Modello per la descrizione dello spalling in seguito al processo termo-igrometrico. a) prima e b) dopo dell'espulsione del frammento. Fonte: Zeiml e al. (2008).

Oltre al vapore acqueo nel volume dei pori direttamente collegato alla crepa di apertura, V_0 , il vapore situato vicino a questo spazio di apertura contribuisce anch'esso all'accelerazione del pezzo scheggiato. La dimensione del dominio d_{max} attorno alla fessura che contribuisce all'efflusso di vapore acqueo all'interno della fessura di apertura è ottenuto attraverso una simulazione numerica del trasporto di vapore all'interno dell'elemento di calcestruzzo.

L'energia cinetica che deriva dalla velocità v_p^{th}[m/s] e dalla massa m [kg] è ricavata dall'equazione

$$E_{kin} = \frac{m{v_p^{th}}^2}{2} \tag{7.9}$$

Prendendo in considerazione il processo termo-meccanico, l'energia cinetica E_{kin}^{tm} è data dal calcolo dell'energia elastica di deformazione U[J] a meno del contributo dell'energia di frattura E_F[J] dissipata durante la frattura, ottenuta da

$$E_F = G_F A \tag{7.10}$$

con

G_F[J/m^2] l'energia specifica di frattura del calcestruzzo

A [m^2] la superficie di frattura.

L'energia cinetica viene così calcolata attraverso un integrale di volume facendo riferimento alla dimensione del frammento espulso dal calcestruzzo e al suo stato tensionale e deformativo utilizzando i tensori.

$$E_{kin}^{tm} = \frac{1}{2}\int \left(\frac{1-\nu}{E(T)}\sigma^2(T)\right) dV \tag{7.11}$$

con

$E(T)$ modulo di Young in funzione della temperatura

ν coefficiente di Poisson

$\sigma^2(T)$ condizione di tensione piana all'interno dell'elemnto

V volume del pezzo espulso

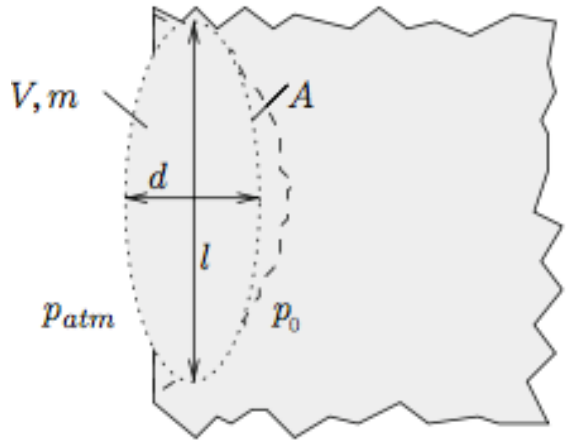


Figura 7-28 Approssimazione geometrica delle proprietà del frammento generico di calcestruzzo esposto al fenomeno di spalling. Fonte: Zeiml e al. (2008).

Riassumendo si può quindi dire che:

L'energia cinetica associata al processo termo-igrometrico è quasi del tutto indipendente dallo spessore del frammento espulso dal calcestruzzo e mostra un incremento all'aumentare della pressione di vapore nei momenti che precedono lo spalling.

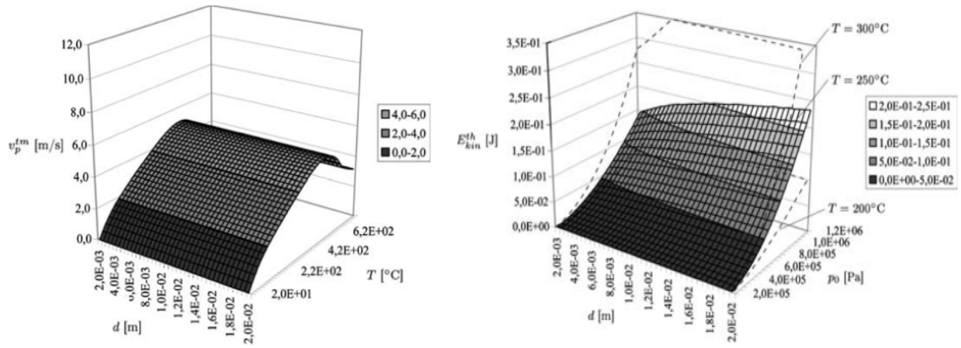


Figura 7-29 a) Energia cinetica e b) velocità associate al processo termo-igrometrico in funzione dello spessore d del frammento e della pressione di vapore all'interno dei pori per tre differenti valori di temperatura. Fonte: Zeiml e al. (2008).

Contrariamente la velocità del frammento espulso diminuisce con l'aumentare del diametro poiché l'energia cinetica rimane quasi costante per diversi valori di d e la massa da accelerare aumenta linearmente con lo spessore. Inoltre, la velocità aumenta per aumentare della pressione di vapore all'interno dei pori e per aumentare la temperatura.

L'energia cinetica associata al processo termo-meccanico aumenta linearmente con l'aumentare della dimensione del frammento. Considerando la temperatura, il valore di energia aumenta fino a circa 550 °C e decresce per temperature maggiori. La corrispettiva velocità invece è indipendente dalla dimensione del diametro.

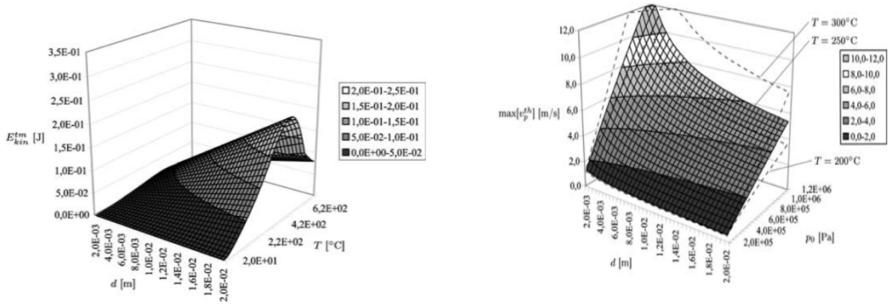


Figura 7-30 a) Energia cinetica e b) velocità associate al processo termo-igrometrico in funzione dello spessore d del frammento e della pressione di vapore all'interno dei pori per tre differenti valori di temperatura. Fonte: Zeiml e al. (2008).

L'energia cinetica totale immagazzinata dal frammento di calcestruzzo soggetto al fenomeno di spalling è quindi uguale a

$$E_{kin} = E_{kin}^{th} + E_{kin}^{tm} - E_F \tag{7.12}$$

Proprio questa relazione ha un importante validità su come riuscire a diminuire il fenomeno di spalling, cercando di ottenere elevati valori di energia di frattura in modo da ridurre il più possibile l'energia cinetica responsabile del fenomeno esplosivo.

Tuttavia questi risultati sono affetti da una forte variabilità in quanto dipende da un numero molto alto di variabili associate ai due processi termo-igrometrico e termo-meccanico.

7.5.3 Come le fibre ibride migliorano la resistenza al fuoco.

In conclusione, si è analizzato l'esperimento condotto da un team di ricercatori ungheresi capitanato da Czoboly e al. (2016), che hanno studiato come attraverso l'utilizzo di diverse tipologie di fibre si sono riusciti a migliorare le proprietà di resistenza alle elevate temperature del calcestruzzo. Si sono utilizzati tre tipologie di fibra diversa: fibre di acciaio, fibre polimeriche e fibre in cellulosa. In particolare hanno studiato l'influenza del tipo di fibra e della quantità sulla flessione e sulla resistenza residua in seguito all'esposizione del provino a 150, 500 o 800 °C. Inoltre, aspetto fondamentale per la nostra ricerca, è lo studio sui provini, per verificare come l'aggiunta di queste tipologie di fibre e la loro combinazione possa diminuire il fenomeno di spalling esplosivo. I provini sono stati scaldati fino alle temperature di riferimento, dove la temperatura è rimasta costante per un'ora e poi in seguito fatti raffreddare fino a temperatura ambiente

Tabella 7-8 Uitlizzo delle fibre all'interno delle diverse miscele. Fonte: Elaborazione personale da Czoboly e al. (2016).

Mix	Mix1	Mix2	Mix3	Mix4	Mix5	Mix6	Mix7	Mix8
Acciaio	-	-	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
PP	-	0,1	-	-	0,1	0,2	-	-
Cellulosa	-	-	0,1	-	-	-	0,1	0,2

Analizzando l'influenza delle fibre ibride sul fenomeno di spacco esplosivo, si è osservato che nel momento in cui i campioni sono stati riscaldati alla temperatura massima di 800 °C, il fenomeno distruttivo di spalling è stato evitato quando sono state utilizzate fibre polimeriche o fibre di cellulosa (0,1 V%). Allo stesso modo, la scheggiatura dovuta alle elevate temperature è stata evitata quando si sono utilizzate contemporaneamente fibre di acciaio (0,1 V%) e fibre polimeriche (0,1 o 0,2 V%) oppure fibre di acciaio (1,0 V%) e fibre di cellulosa (0,1 o 0,2 V%). Al contrario, non è stato evitato quando si sono aggiunte solo le fibre d'acciaio (1,0 V%).

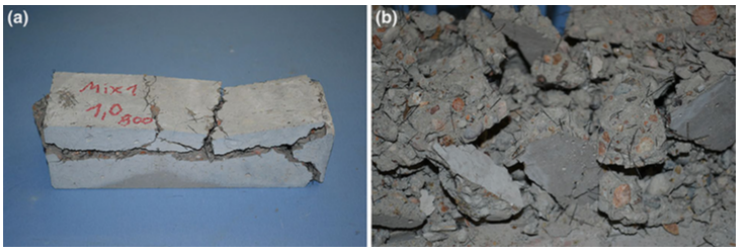


Figura 7-31 Spalling esplosivo per provini in calcestruzzo rinforzato con 1,0%V di fibre corte in acciaio in seguito all'esposizione ad una temperatura massima di 800 °C. Fonte:Czoboly e al. (2016)

Si è quindi evidenziato come il fenomeno di spalling può essere evitato, non solo grazie all'utilizzo di fibre in polipropilene ma anche attraverso l'aggiunta a quest'ultime delle fibre in acciaio.

7.5.4 Overview

Fenomeno spalling

Si è osservato che oltre ad aumentare le proprietà meccaniche, le fibre in acciaio combinate con le fibre in polipropilene agiscono in modo ottimale per diminuire il fenomeno di spalling. In alcuni esperimenti si ha avuto la conferma di come questa combinazione sia addirittura migliore rispetto all'utilizzo di un basso contenuto di fibre in polipropilene. Si può così concludere che:

- le fibre in acciaio generano un aumento dell'energia di frattura, in quanto risulta molto più difficoltoso l'estrazione di quest'ultime dalla matrice cementizia;
- Risultato significativo si ha osservando un campione con un valore medio (0,6 kg/m^3) di fibre in polipropilene e 40 kg/m^3 di fibre in acciaio, che non mostra segni di spalling, anche ad elevate temperature.
- Risultati negativi si hanno invece se la quantità di fibre in polipropilene assume un valore minore di 0,6.
- In un altro esperimento analizzato, la scheggiatura dovuta alle elevate temperature è stata evitata quando si sono utilizzate contemporaneamente fibre di acciaio (0,1 V%) e fibre polimeriche (0,1 o 0,2 V%) oppure fibre di acciaio (1,0 V%) e fibre di cellulosa (0,1 o 0,2 V%).
- L'aggiunta della fibra di acciaio è utile per superare l'accumulo di tensione di vapore ed evitare il fenomeno esplosivo, prevenendo le fessurazioni all'interno del calcestruzzo.
- Aumentando l'energia di frattura si diminuisce l'energia cinetica dei frammenti di calcestruzzo, andando così a diminuire la velocità con cui questi vengono scagliati dallo strato superficiale dell'elemento di calcestruzzo; la velocità del frammento espulso diminuisce con l'aumentare del diametro della scheggia di calcestruzzo poiché l'energia cinetica rimane quasi costante per diversi valori di d e la massa da accelerare aumenta linearmente con lo spessore. Inoltre, la velocità aumenta per aumentare della

pressione di vapore all'interno dei pori e per aumentare la temperatura.

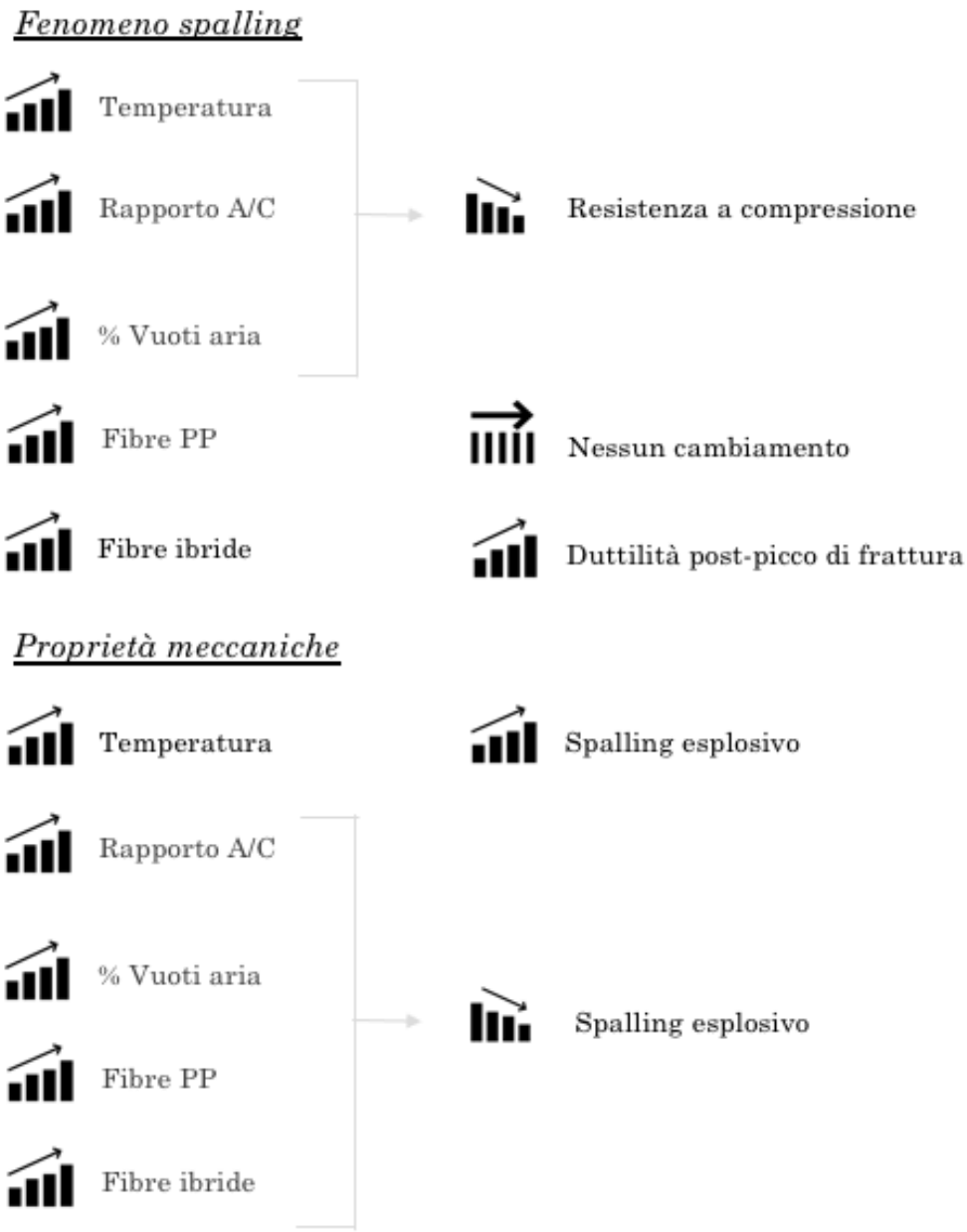
- l'energia di frattura, oltre che essere aumentata dell'aggiunta di fibre in acciaio, aumenta involontariamente anche con l'aumento della temperatura, generando così un contributo positivo contro il fenomeno esplosivo.

Proprietà meccaniche

Trasformazione del materiale da fragile a duttile. E' consolidato che una delle proprietà più importanti del calcestruzzo rinforzato con fibre in acciaio è la sua maggiore resistenza alla propagazione di fessurazioni e crepe. Come risultato di questa capacità di diminuire la formazione e la propagazione delle crepe, questi composti possono aumentare la loro capacità di deformazione e incrementare la resistenza a trazione. L'obiettivo di tutto ciò è quello di attribuire al composto fibrorinforzato un'elevata duttilità in seguito alla nascita delle fessurazioni.

7.6 Overview generale sul comportamento del calcestruzzo

In seguito all'analisi di tutti gli aspetti e all'aver raccolto tutte le informazioni riguardo l'andamento del fenomeno di spalling esplosivo e delle proprietà meccaniche si può concludere che



In seguito all'analisi delle numerose prove sperimentali presenti in letteratura questo è l'andamento generale che è stato dedotto. Ovviamente, questi andamenti sono frutto di condizioni al contorno, delle dimensioni del provino, della curva di incendio utilizzata e delle temperature massime raggiunte. Queste sono importanti conclusioni, in quanto si è visto che attraverso la modifica di alcune caratteristiche della miscela di calcestruzzo si possono ottenere importanti e significativi risultati contro il fenomeno di spalling, riuscendo a renderlo così il meno imprevedibile possibile. Inoltre, le tecniche per l'aumento della resistenza al fuoco sono state studiate in maniera singola, analizzando ogni aspetto singolarmente.

.

8 Parte 2. Analisi del caso studio- Test di resistenza al fuoco

Punto cruciale di questa seconda parte sperimentale è stato quello testare le 12 miscele oggetto di studio presentate nel Capitolo 7 e di studiare come varia il comportamento del materiale soggetto ad elevate temperature al variare di più di uno dei parametri contemporaneamente.

Si ricordano i parametri oggetto di studio:

- Rapporto acqua/legante
- % dei vuoti d'aria
- Quantità di fibre PP

Le miscele di calcestruzzo oggetto di studio sono state testate all'interno del Fire Lab nel Worcester Polytechnic Institute (WPI). Durante le prove sperimentali sono stati testati 24 cilindri di calcestruzzo, con dimensioni d=150 mm e h=300 mm, sottoposti a una curva di fuoco standard ASTM E119 per la durata di 90 minuti raggiungendo i 1850 °F. I dati acquisiti sono stati la perdita di massa, la temperatura superficiale del provino e la resistenza media a compressione.

In seguito all'esposizione dei provini a temperature elevate, prendendo come valore di riferimento la percentuale di massa persa si è stilato una graduatoria in funzione di quest'ultima. Si riesce così a caratterizzare il comportamento della miscela sottoposta ed elevate temperature.

In questa sezione sono evidenziate le procedure e i criteri seguiti per la corretta esecuzione dei test e sono riportate le analisi relative a tutti i dati acquisiti.

Tabella 8-1 Ipotesi di reazione al fenomeno di spalling. Fonte: Elaborazione personale.

Livello di massa persa	Mix calcestruzzo	Rapporto acqua/cemento	Vuoti d'aria (%)	Contenuto fibre (kg/m³)
1°				
2°				
3°				
4°				
5°				
6°				
7°				
8°				
9°				
10°				
11°				
12°				

Prima di procedere all'analisi delle procedure adottate per eseguire i test si forniscono ulteriori indicazioni riguardo il criterio di progetto e la composizione delle miscele oggetto delle prove sperimentali

8.1 Criterio del mix design

Le 12 miscele oggetto di studio sono state create in un fase antecedente a questo elaborato seguendo i criteri di seguito riportati.

Come prima cosa è importante osservare il rapporto tra la quantità d'acqua presente nell'impasto e la percentuale di vuoti d'aria. Questo è stato fatto incrociando tra di loro le diverse composizioni dell'impasto in modo da riuscire a studiare l'andamento generale delle variazioni apportate.

Tabella 8-2Variazione del rapporto acqua/cemento. Fonte: Elaborazione personale

% vuoti d'aria	A/C = 0,3	A/C = 0,4	A/C = 0,5
5			
10			
15			

L'unione di un elevato rapporto acqua/cemento con un'elevata presenza di vuoti è a favore di un ottimo comportamento contro lo spalling esplosivo, in quanto essi sono due fattori che agiscono in maniera contemporanea all'aumento della permeabilità. Questo, però, da un altro punto di vista, porta a un netto peggioramento delle proprietà meccaniche che tendono ad abbassarsi notevolmente.

Prima soluzione pensata per cercare di non abbattere troppo il valore delle proprietà meccaniche è quella di tenere un basso rapporto acqua/cemento fisso (a/c=0,3) e andare ad aggiungere una modesta quantità di fibre in polipropilene (2 kg/m^3). Attraverso questo metodo si riesce ad ottenere un calcestruzzo dalle ottime proprietà a compressione, grazie al basso rapporto a/c, ma con buona resistenza al fenomeno di spalling, grazie

all'incremento della permeabilità iniziale durante la fase di incendio, avvenuta in seguito allo scioglimento delle fibre.

In seguito a questo, resta ancora la possibilità di variare la percentuale di vuoti d'aria. Anche in questo caso, verrà fatta variare entro tre valori, in modo da riuscire ad analizzare se è possibile aumentare ulteriormente la permeabilità grazie ad un'elevata rete di pori, senza però andare ad intaccare le proprietà meccaniche. Una delle singolarità di questo studio è quella di studiare miscele con un contenuto di vuoti e quindi di aria molto elevato, fino al 15%, Questa tipologia di calcestruzzi non risulta essere molto utilizzata all'interno del mondo dell'edilizia e le sue buone potenzialità contro il fenomeno di spalling esplosivo non sono state ampiamente sviluppate.

Tabella 8-3 Variazione delle fibre in polipropilene. Fonte: Elaborazione personale

Fibre in polipropilene	**Vuoti d'aria = 5%**	**Vuoti d'aria = 10%**	**Vuoti d'aria = 15%**
2			

Di fondamentale importanza risultano essere le miscele con un basso rapporto a/c e la presenza di fibre in polipropilene. Come già evidenziato questo accoppiamento è stato dichiarato da molti studi come un ottima soluzione per ottenere calcestruzzi di ottima resistenza con un buon comportamento al fenomeno di spalling. Meno chiaro e definitivo risulta il comportamento delle miscele con un'alta percentuale di vuoti.

Obiettivo sarà dunque anche quello di andare ad osservare se la quantità di fibre utilizzata possa essere realmente sostituita da una perfetta combinazione di valori relativi alla percentuale dei vuoti d'aria e al rapporto a/c. In questo modo la permeabilità non sarà aumentata dallo scioglimento delle fibre, ma sarà una proprietà intrinseca della matrice cementizia, che presenterà un'elevata porosità già a temperatura ambiente, permettendo così al vapore di avere una rapida via d'uscita verso l'esterno della sezione.

8.2 Composizione delle miscele di calcestruzzo

L'azienda che ha creato le miscele e ha confezionato i campioni di calcestruzzo è Lafarge North America.

Lafarge North America è il più grande fornitore di materiali da costruzione negli Stati Uniti e in Canada con oltre 900 sedi attive. I loro prodotti sono utilizzati in progetti di costruzione di edifici residenziali, commerciali e pubblici in tutto il Nord America.

Per quanto riguarda la produzione del cemento, è il principale produttore con oltre 20 tipologie di miscele ingegnerizzate per ottenere soluzioni innovative e soddisfare qualsiasi esigenza. Lafarge è leader nell'uso di materie prime e carburanti alternativi per alimentare le operazioni di produzione. I processi per la derivazione del carburante utilizzano pneumatici di scarto e plastiche non riciclabili, come complementi del carbone, per alimentare i cementifici. Questo approccio sostenibile al funzionamento ha il duplice effetto di conservare le risorse naturali e l'energia limitando allo stesso tempo gli sprechi di discarica. Molto interessanti sono le metodologie innovative che utilizzano per la produzione di aggregati, cemento e calcestruzzo. Di grande innovazione è la linea che produce calcestruzzo, puntando ad elevate qualità tecniche e sostenibili.

Tutte le informazioni dettagliate possono essere trovate sul sito internet: http://www.lafarge-na.com.

8.2.1 Proprietà dei materiali costituenti le miscele

Prima di procedere con l'illustrazione delle prove sperimentali, si illustra la composizione delle miscele oggetto di studio. Tutte le miscele di calcestruzzo sono state confezionate con prodotti di Lafarge North America e Basf (azienda chimica per gli agenti chimici aeranti e super fluidificanti). Le miscele sono composte da:

- Cemento Portland ordinario di Tipologia 1: è costituito almeno per il 95% da clinker e in misura variabile da 0 a 5% da costituenti minori.
- Aggregato fine: Costituito principalmente da sabbia naturale dello stato di Washington.
- Aggregato grossolano: la dimensione massima dell'aggregato è pari a 19 mm
- Acqua

La gravità specifica è una grandezza adimensionale, definita come il rapporto tra la densità di un materiale e quella dell'acqua.

Tabella 8-4 Gravità specifica. Fonte: Elaborazione personale dei dati forniti da Lafarge.

Elemento	Gravità specifica
Cemento Portland Tipo 1	3,15
Sabbia	2,65
Aggregato grossolano	2,68
Acqua	1

Inoltre, sappiamo che gli aggregati contengono una certa porosità e di conseguenza l'acqua può essere assorbita nel corpo delle particelle o trattenuta sulla superficie. Viene quindi indiato il valore di "capacità di assorbimento" e il contenuto percentuale totale di umidità. La capacità di assorbimento percentuale (AC o assorbimento) indica la quantità massima di acqua che l'aggregato è in grado di assorbire. Viene calcolato dalla differenza di peso tra gli stati SSD e OD. SSD è definito quando tutti i pori sono pieni d'acqua, senza pellicola d'acqua sulla superficie; OD quando tutta

l'umidità viene rimossa dall'aggregato riscaldando in un forno a 105 °C. In questo modo si ottiene un aggregato con tutti i pori privi di acqua.

Tabella 8-5 Capacità di assorbimento degli aggregati all'interno della miscela in calcestruzzo. Fonte: Elaborazione personale dei dati forniti da Lafarge.

Elemento	Valore di assorbimento	Contenuto totale di umidità
Sabbia	1,69%	4,50%
Aggregato grossolano	1,00%	0,66%

- Agente chimico areante: il prodotto utilizzato è AE-90 che permette di avere un'alta percentuale di vuoti d'aria all'interno della miscela.
- Fluidificante: il prodotto utilizzato è Glenium 3030. E' un additivo che permette di ottenere un'alta lavorabilità in funzione di un basso rapporto acqua/cemento. Rappresenta una nuova tipologia di Fluidificanti a base di chimica di policarbossilato.

Tabella 8-6 Dosaggio consigliato da scehde tecniche per agente chimico areante e fluidificante. Fonte: Schede tecniche Beston.

Agente chimico	Dosaggio consigliato
AE-90	da 16 a 260 mL/100 kg
Glenium 3030	da 195 a 1170 mL/100 kg

- Fibre in Polipropilene: il marchio utilizzato è MasterFiber MAC 2200 CB. Questo prodotto è una macro-fibra sintetica potenziata chimicamente che presenta un legame superiore con le matrici cementizie. Le prestazioni superiori derivano da una nuova tecnologia di resina polimerica che fornisce un legame chimico ingegnerizzato. Attraverso questa tecnologia avanzata le capacità di incollaggio del prodotto superano di gran lunga quelle delle altre macrofibre sintetiche a base di poliolefine disponibili in commercio.

Tabella 8-7 Proprietà fisiche delle fibre in polipropilene utilizzate all'interno della miscela in calcestruzzo. Fonte: Scheda tecnica MasterFiber® MAC 2200 CB.

Proprietà fisiche	Valori
Peso specifico	0,91
Punto di fusione	160 °C
Resistenza a trazione	585 MPa
Lunghezza	54 mm

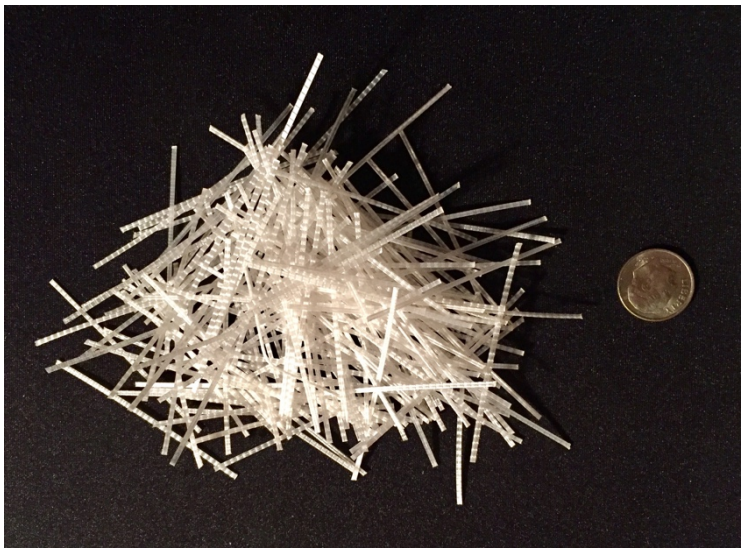


Figura 8-1 Fibre in polipropilene. Fonte: Elaborazione personale

Le tabelle seguenti rappresentano la composizione di ognuna delle singole miscele oggetto di studio. Sono state compilate a seguito di un'elaborazione personale a partire dai fogli di calcolo Excel relativi al mix design forniti dal Concrete Lab di Seattle.

Tabella 8-8 Caratteristica e composizione delle miscele oggetto di studio. Fonte: Elaborazione personale a partire dai fogli di calcolo Excel relativi al mix design forniti dal Concrete Lab di Seattle

Miscela numero 1

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*5,4 %*
Rapporto acqua/cemento	*30 %*
Contenuto fibre	*0 kg*
Rapporto cemento/aggregato	48 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m^3]	335
PP fibre [kg/m3]	0
Sabbia [kg/m3]	1064
Aggregato 19 mm [kg/m^3]	945
Acqua [kg/m^3]	72
AE-90 [mL/ m^3]	108
Glenium 3030 [L/ m^3]	2,4
Peso totale [kg/m^3]	*2416*

Miscela numero 2

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*10,5 %*
Rapporto acqua/cemento	*30 %*
Contenuto fibre	*0 Kg*
Rapporto cemento/aggregato	51 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	12,7 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m^3]	335
PP fibre [kg/m3]	0
Sabbia [kg/m3]	902
Aggregato 19 mm [kg/m^3]	949
Acqua [kg/m^3]	77
AE-90 [mL/ m^3]	263
Glenium 3030 [L/ m^3]	2,8
Peso totale [kg/m^3]	*2263*

Miscela numero 3

Caratteristica	[-]
Vuoti d'aria	*14,4 %*
Rapporto acqua/cemento	*30 %*
Contenuto fibre	*0 Kg*
Rapporto cemento/aggregato	55 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	[-]
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m^3]	335
PP fibre [kg/m3]	0
Sabbia [kg/m3]	791
Aggregato 19 mm [kg/m^3]	946
Acqua [kg/m^3]	80
AE-90 [mL/ m^3]	456
Glenium 3030 [L/ m^3]	2,6
Peso totale [kg/m^3]	*2152*

Miscela numero 4

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*6,1 %*
Rapporto acqua/cemento	*30 %*
Contenuto fibre	*2 Kg/m³*
Rapporto cemento/aggregato	48 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m³]	335
PP fibre [kg/m3]	2
Sabbia [kg/m3]	1083
Aggregato 19 mm [kg/m³]	946
Acqua [kg/m³]	50
AE-90 [mL/ m³]	108
Glenium 3030 [L/ m³]	3,2
Peso totale [kg/m³]	*2416*

Miscela numero 5

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*10,5 %*
Rapporto acqua/cemento	*30 %*
Contenuto fibre	*2,5 Kg/m³*
Rapporto cemento/aggregato	52 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m³]	335
PP fibre [kg/m3]	2
Sabbia [kg/m3]	943
Aggregato 19 mm [kg/m³]	946
Acqua [kg/m³]	57
AE-90 [mL/ m³]	240
Glenium 3030 [L/ m³]	3
Peso totale [kg/m³]	*2283*

Miscela numero 6

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*16,0 %*
Rapporto acqua/cemento	*30 %*
Contenuto fibre	*2 Kg/m³*
Rapporto cemento/aggregato	56 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m³]	335
PP fibre [kg/m3]	2
Sabbia [kg/m3]	803
Aggregato 19 mm [kg/m³]	946
Acqua [kg/m³]	65
AE-90 [mL/ m³]	371
Glenium 3030 [L/ m³]	2,8
Peso totale [kg/m³]	*2151*

Miscela numero 7

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*5,4 %*
Rapporto acqua/cemento	*40 %*
Contenuto fibre	*0 Kg/m³*
Rapporto cemento/aggregato	50 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m³]	335
PP fibre [kg/m3]	0
Sabbia [kg/m3]	969
Aggregato 19 mm [kg/m³]	946
Acqua [kg/m³]	110
AE-90 [mL/ m³]	132
Glenium 3030 [L/ m³]	2,1
Peso totale [kg/m³]	*2360*

Miscela numero 8

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*9,5 %*
Rapporto acqua/cemento	*40 %*
Contenuto fibre	*0 Kg/m³*
Rapporto cemento/aggregato	54 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m³]	335
PP fibre [kg/m3]	0
Sabbia [kg/m3]	833
Aggregato 19 mm [kg/m³]	946
Acqua [kg/m³]	110
AE-90 [mL/ m³]	162
Glenium 3030 [L/ m³]	1,9
Peso totale [kg/m³]	*2224*

Miscela numero 9

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*14,5 %*
Rapporto acqua/cemento	*40 %*
Contenuto fibre	*0 Kg/m³*
Rapporto cemento/aggregato	58 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m³]	335
PP fibre [kg/m3]	0
Sabbia [kg/m3]	697
Aggregato 19 mm [kg/m³]	946
Acqua [kg/m³]	118
AE-90 [mL/ m³]	282
Glenium 3030 [L/ m³]	1,7
Peso totale [kg/m³]	*2096*

Miscela numero 10

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*5,1 %*
Rapporto acqua/cemento	*50 %*
Contenuto fibre	*0 Kg/m³*
Rapporto cemento/aggregato	53 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m³]	335
PP fibre [kg/m3]	0
Sabbia [kg/m3]	875
Aggregato 19 mm [kg/m³]	949
Acqua [kg/m³]	148
AE-90 [mL/ m³]	132
Glenium 3030 [L/ m³]	0
Peso totale [kg/m³]	*2307*

Miscela numero 11

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*11 %*
Rapporto acqua/cemento	*50 %*
Contenuto fibre	*0 Kg/m³*
Rapporto cemento/aggregato	57 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m³]	335
PP fibre [kg/m3]	0
Sabbia [kg/m3]	739
Aggregato 19 mm [kg/m³]	946
Acqua [kg/m³]	152
AE-90 [mL/ m³]	263
Glenium 3030 [L/ m³]	0
Peso totale [kg/m³]	*2172*

Miscela numero 12

Caratteristica	**[-]**
Vuoti d'aria	*15.5 %*
Rapporto acqua/cemento	*50 %*
Contenuto fibre	*0 Kg/m³*
Rapporto cemento/aggregato	62 %
Fluidificante	Glenium 3030
Agente areante	AE90
Slump test	15 cm

Composizione	**[-]**
Tipo 1-cemento ordinario [kg/m³]	335
PP fibre [kg/m3]	0
Sabbia [kg/m3]	602
Aggregato 19 mm [kg/m³]	946
Acqua [kg/m³]	155
AE-90 [mL/ m³]	414
Glenium 3030 [L/ m³]	0
Peso totale [kg/m³]	*2038*

8.2.2 Caratteristiche Provini

Il numero totale di provini confezionati è pari a 70.

I provini sono cilindri

- H (altezza) = 300 mm
- D (diametro) = 150 mm

Sono 5 provini per ogni tipologia di miscela più un campione-test per la miscela numero.

Tabella 8-9 Caratteristiche delle 12 miscele oggetto della campagna sperimenale. Fonte: Elaborazione personale

Mix calcestruzzo	*Rapporto acqua/cemento*	*Vuoti d'aria (%)*	*Contenuto fibre (kg/m³)*
1	0,3	5	0
2	0,3	10	0
3	0,3	15	0
4	0,3	5	2
5	0,3	10	2
6	0,3	15	2
7	0,4	5	0
8	0,4	10	0
9	0,4	15	0
10	0,5	5	0
11	0,5	10	0
12	0,5	15	0

I provini sono stati prodotti all'interno del Seattle Concrete Lab in Lafarge. Il confezionamento è avvenuto a mano, in un locale con temperatura di 22 °C e con umidità relativa non inferiore al 65%. Il calcestruzzo in seguito è stato confezionato in casseforme di materia plastica ed assestato con la vibrazione; la forma è stata riempita in tre differenti strati. La stagionatura dei provini sperimentali si è svolta in ambiente a temperatura costante di 20 °C, con umidità del 100%.

Figura 8-2 Provino 300x150 mm in casseforme di PVC, marchiata con la tipologia della miscela. Fonte: Elaborazione personale.

Una volta terminato il periodo di stagionatura i provini sono stati collocati all'interno del laboratorio "Materials LAB" situato nella struttura Sandpoint Facility. I provini sono così stati suddivisi nelle 12 categorie.

Figura 8-3 Stoccaggio dei provini all'interno del laboratorio in Sandpoint. Fonte: Elaborazione personale.

Una volta catalogati e identificati, si è proceduto con la spedizione. Tre provini per ogni miscela sono stati spediti al Politecnico di Torino per effettuare le prove a compressione, mentre due per tipologia di miscela sono

stati spediti al WPI (Worcester Polytechnic Institute), dove si effettuerrano i test di ressitenza al fuoco presso il “Fire Department”.

Figura 8-4 Ricontrollo dei provini. Assegnazione della miscela. Fonte: Elaborazione personale.

8.3 WPI "Worcester Polytechnic Institute". Combustion Lab

I test sono stati eseguiti presso il Combustion Lab, sito all'interno del Worcester Polytechnic Institute, in Worcester, Boston. Questo risulta essere il più grande e prestigioso laboratorio in ambito accademico di tutti gli Stati Uniti d'America, sia per dimensioni che per qualità e precisione della strumentazione utilizzata. Questo è costituito da uno spazio di 190 m^2 con un soffitto alto fino a 9,2 metri. Particolarità del laboratorio risulta essere quella di poter eseguire test su scala reale, ovvero la possibilità di poter testare la resistenza al fuoco su strutture alte fino a due piani. Questo avviene grazie alla presenza di un potente calorimetro che sviluppa una potenza di 6 MW posizionato sotto una cappa di 6 m x 6m.

All'interno di questo scenario si inseriscono i nostri esperimenti, che avranno l'obbiettivo di studiare il comportamento dei 24 cilindri di calcestruzzo sottoposti a temperature elevate.

Gli esperimenti sono stati organizzati e pianificati il primo giorno con l'aiuto e la supervisione del manager del Combusiton Lab. Come prima cosa si è stilato una lista degli obbiettivi e delle misurazioni che si volevano ottenere. Questi sono:

- Sottoporre i provini alla curva tempo-temperatura ASTM E-119. per un periodo di tempo pari a 90 minuti.
- Posizionare i provini in modo da poter raccogliere facilmente il possibile materiale espulso.
- Numero di termocoppie da utilizzare.
- Metodi di fissaggio.
- Misurazione della massa prima del test.
- Misurazione della massa dopo il test.
- Misurazione della resistenza media a compressione del calcestruzzo con lo sclerometro.

In seguito a un brainstorming si è quindi potuto definire una procedura standard per effettuare il test in maniera rapida e ripetitiva, senza correre il rischio di commettere errori.

I test sono stati suddivisi in 6 Run ognuna di 4 cilindri:

Tabella 8-10 Organizzazione provini seria A. Fonte: Elaborazione personale

Run N.	N. sample	W/C	% Air Voids	Fiber PP (lb)
1	1A	0,3	5	0
	2A	0,3	10	0
	3A	0,3	15	0
	4A	0,3	5	4
2	5A	0,3	15	4
	6A	0,3	10	4
	7A	0,4	15	0
	8A	0,4	10	0
3	9A	0,4	5	0
	10A	0,5	5	0
	11A	0,5	15	0
	12A	0,5	10	0

Tabella 8-11 Organizzazione provini seria B. Fonte: Elaborazione personale.

Run N.	N. sample	W/C	% Air Voids	Fiber PP (lb)
4	1B	0,3	5	0
	2B	0,3	10	0
	3B	0,3	15	0
	4B	0,3	5	4
5	5B	0,3	15	4
	6B	0,3	10	4
	7B	0,4	15	0
	8B	0,4	10	0
6	9B	0,4	5	0
	10B	0,5	5	0
	11B	0,5	15	0
	12B	0,5	10	0

Avendo due esemplari per ogni tipologia di miscela si è deciso di organizzare il test dei provini in modo da finire prima la serie A e in seguito iniziare al serie B per avere più conoscenze ed effettuare possibili correzioni.

8.3.1 Strumentazione utilizzata

Gli esperimenti oggetto di studio sono stati condotti all'interno di un forno costruito appositamente per questa ricerca.

Figura 8-5 Dimostrazione potenza del forno. Fonte: fotografia, elaborazione personale, WPI.

Il forno ha le dimensioni di parallelepipedo con dimensioni pari a (1,60x1,60x1,00) m.. Il materiale con cui è stato fabbricato è acciaio al carbonio, con un punto di fusione pari a 2600 – 2800 °F. Per evitare la dispersione del calore l'interno è stato completamente rivestito con lana isolante per elevate temperature (HTIW), meglio nota come kaowool, progettata per resistere a temperate superiori ai 1800 °F.

Figura 8-6 lana isolante per elevate temperature, kaowool. Fonte: Scheda tecnica.

La chiusura è effettuata tramite una porta costituita dallo stesso materiale del forno e posizionata su ruote in modo da poter permettere un rapido spostamento. Il forno vanta la presenza di due bruciatori (superiore e inferiore) ognuno dei quali costituito da 38 uscite dove aria e gas si mescolano insieme per dare vita alla fiamma. Il sistema di alimentazione è costituito da gas propano.

Figura 8-7 Chiusura forno. Fonte: fotografia, elaborazione personale, WPI.

Questo viene stoccato in un serbatoio all'esterno del laboratorio e vaporizzato attraverso due vaporizzatori. Una volta passato dal pannello di controllo questo viene immesso all'interno delle tubazioni poste nella parte posteriore del forno. La parte posteriore del forno che contiene il centro operativo per l'accensione e per la modulazione della temperatura è organizzata nel seguente modo. Le tubazioni dei due burner sono collegate singolarmente con la tubazione del gas e con quella dell'aria. Quella del gas è collegata direttamente con la tubazione proveniente dall'esterno. Il gas prima di essere miscelato con l'aria passa attraverso una valvola, un misuratore di pressione che modula la quantità di gas immesso nel sistema. Questa valvola è in contatto con la pressione presente all'interno della tubazione dell'aria. La tubazione dell'aria è collegata a un ventilatore che

ha il compito di immettere aria nel sistema. Il ventilatore è collegato a sua volta alla centralina elettronica del forno.

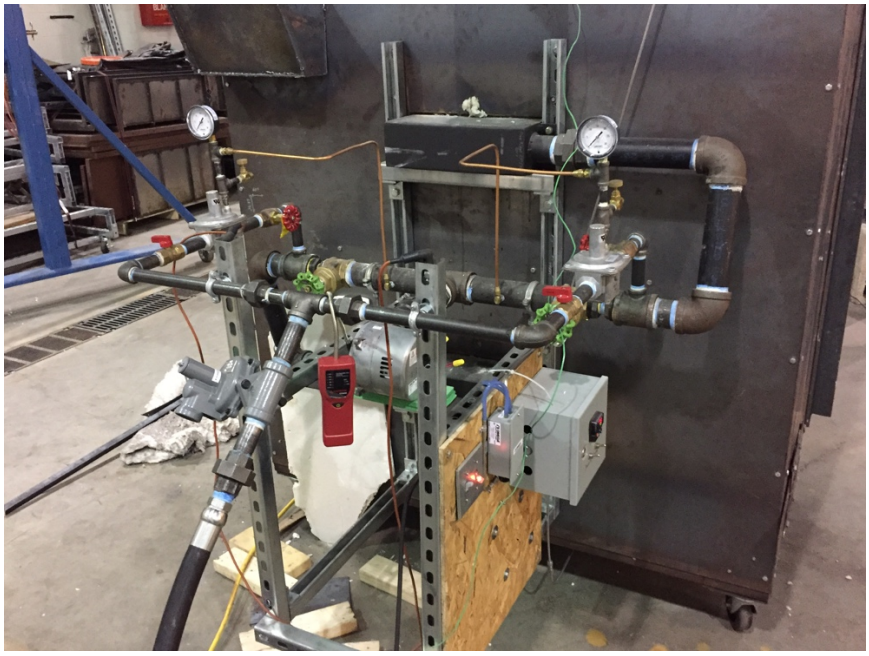


Figura 8-8 Sistema elettronico per il controllo dell'alimentazione. Fonte: fotografia, elaborazione personale, WPI.

La temperatura all'interno del forno è rilevata da una speciale termocoppia immersa nell'acqua contenuta all'interno di una pipetta in ceramica. In questo modo leggendo la temperatura presente nel forno e paragonandola a quella che si vuole ottenere il ventilatore entra in funzione generando una pressione che andrà a dialogare e modulare la fuoriuscita del gas propano. In questo modo impostando un programma nella centralina si riesce ad ottenere e modulare in maniera costante la temperatura voluta. L'accensione dei due bruciatori è fatta in due momenti distintiti e deve essere eseguita in maniera manuale attraverso l'utilizzo di una lancia. Oltre all'interruttore generale ci sono due valvole secondarie che permettono l'immersione del propano nei due bruciatori separatemene.

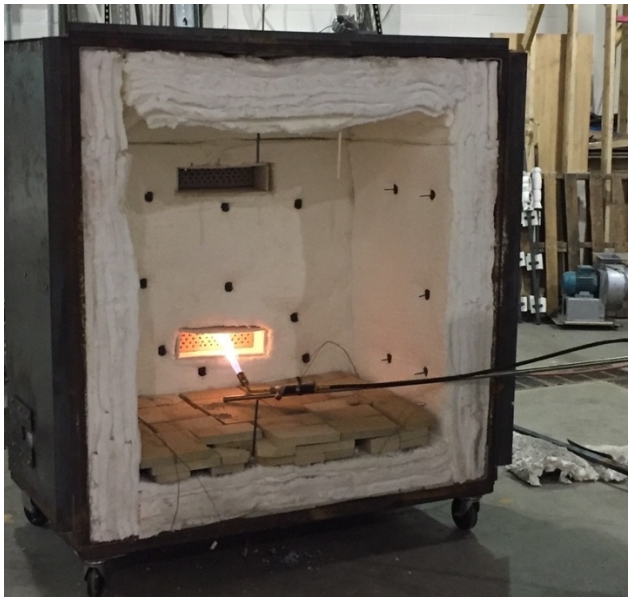
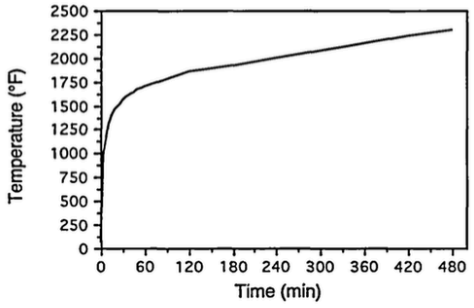


Figura 8-9 Metodo di accensione del forno. Fonte: fotografia, elaborazione personale, WPI.

Il programma è stato settato in modo da seguire la curva tempo-temperatura secondo lo standard dell' ASTM E-119. La durata totale dell'esperimento risulta essere pari a 90 minuti con una temperatura corrispondente a 1792 °F. La temperatura massima raggiunta dal forno è pari a 1850 °F. Si è scelta una temperatura leggermente maggiore in quanto, in primo luogo è normale avere un'incertezza relativa ai 50 °F e in secondo luogo non si ha la complete certezza di avere una temperatura completamente uniforme all'interno del forno. A causa di questi due motivi si è preferito stare al di sopra della temperatura richiesta.



Time (min)	Temperature (°F)
0	68
5	1000
10	1300
20	1462
30	1550
60	1700
90	1792
120	1850
180	1925
240	2000
300	2075
360	2150
420	2225
480	2300

Figura 8-10 Curva tempo-temperatura ASTM E-119. Fonte: ASTM E-119

Per quanto riguarda il raffreddamento dei provini e del forno si è scelto un metodo consono a non creare shock termici. Nel momento in cui il forno raggiunge la massima temperatura, si spegne la fonte di alimentazione aspettando che la temperatura sia minore di 1100 °F. A questo punto si tolgono i morsetti a C e si sposta leggermente la porta per agevolare il raffreddamento del forno. La porta verrà aperta completamente nel momento in cui si raggiungono i 500 °F.

Ultimo accorgimento all'interno del forno sono due misuratori di pressione posti nell'estremità superiore e inferiore per poter controllare eventuali ed indesiderati valori di pressione elevata dovute alla cessata ignizione.

Per garantire la sicurezza durante lo svolgimento della prova il laboratorio è provvisto di una notevole serie di accorgimenti. Parte più importante è il grande sistema di aspirazione e ventilazioni di cui è provvisto. Questo è interamente gestito attraverso un'interfaccia elettronica.

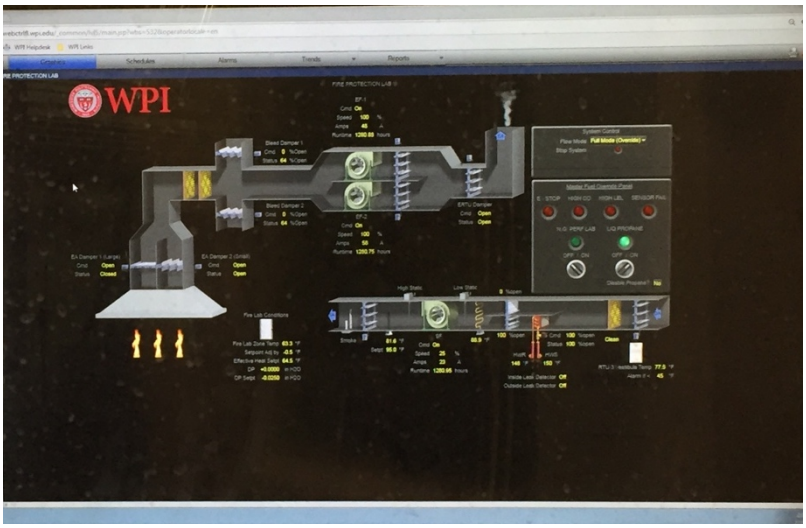


Figura 8-11 Interfaccia del programma per gestire la ventilazione. Font: fotografia, elaborazione personale, WPI.

Inoltre il laboratorio è provvisto di 8 rilevatori di monossido di carbonio e propano periferici.

La capacità del forno è di 4 provini alla volta. Questi sono stati posizionati ai lati dei due bruciatori per evitare che venissero investiti direttamente dalle fiamme. Sono quindi disposti nel seguente ordine: posteriore sinistro, frontale sinistro, posteriore destro e frontale destro. Per la misurazione della

temperatura superficiale dei provini sono state utilizzate 16 termocoppie, ovvero 4 per ogni campione. Queste sono di tipo K e sono state fabbricate utilizzando un filo speciale prodotto da Omega per resistere a temperature superiori a 1800 °F. In seguito alla loro preparazione e al loro test sono state inserite all'interno del forno e sono state collegate un programma presente sul computer per ottenere cosi un output digitalizzato dell'andamento secondo per secondo della temperatura. Queste sono state fissate ai provini tramite un filo metalliche e si è assicurato che fossero in contatto con la parte integra della superficie.

Figura 8-12 Posizionamento dei cilindri all'interno del forno. Fonte: fotografia, elaborazione personale, WPI.

In seguito all'esecuzione del test i provini sono stati rimossi e pesati sopra una bilancia.

Figura 8-13 Registrazione del peso. Fonte: fotografia, elaborazione personale, WPI.

Infine dopo un periodo di stoccaggio all'interno del laboratorio i provini sono sati sottoposti a una prova non distruttiva per il calcolo della resistenza media a compressione del calcestruzzo in MPa.

Di fondamentale importanza sarà il paragone tra la serie A e la serie B, per poter notare le variazioni dei risultati.

8.3.2 Procedura utilizzata

In questa sezione viene presentato il modello della procedura eseguita per lo svolgimento di tutti i test.

University of Washington

Furnace Testing Experimental Procedure

Data:	
Numero della serie: **Provini testati :** **Note:**	

Pima del Test

Provino #

- □ Rimuovere il provino cilindrico dalla cassaforma. Rimuovere il tappo ed effettuare una o più incisioni sulla plastica, in modo da riuscire ad estrarre il provino.
- □ Nominare il provino e indicare un sistema di riferimento (#A, #B, Front, Back, Right, Left)
- □ Pesare il provino e registrar il valore
- □ Fotografare il provino per documentare le sue condizioni iniziali.

Ripetere lo stesso procedimento per gli altri provini.

Tutti i provini insieme

- □ Posizionare i pannelli per il contenimento dei cilindri
- □ Posizionare i cilindri al centro dei pannelli
- □ Collegare le termocoppie alla superficie del provino
- □ Verificare attraverso il programma infromatico che tutte le termocoppie e il termometro all'interno del forno siano attivati.
- □ Fotografare ogni provino singolarmente
- □ Fotografare l'insieme di tutti i provini all'intenro della furnace.
- □ Inizio della procedura per l'emissione del gas propano.
- □ Apertura delle valvole per l'emissione del gas.

- Controllo del flusso
- Accensione del bruciatore inferiore
- Accensione del bruciatore superiore
- Verificare la positiva accensione dei bruciatori
- □ Chiusura della porta del forno con l'utilizzo di due morsetti a C
- □ Premere il pulsante per l'avvio del programma, settare timer per 90 minuti.
- □ Verificare per il primo minuto il corretto aumento della temperatura
- □ Nel caso la temperatura salga con velocità ridotta, resettare la procedura. Un bruciatore potrebbe essere spento.

During Test

Durata: 90 min

- □ Monitorare la temperature rilevata dal termometro all'interno del forno e modulare (solo se necessario) la Potenza dei bruciatori attraverso il controllo manuale.
- □ Monitorare la temperatura superficiale dei cilindri per controllare che non ci siano problemi alle termocoppie.

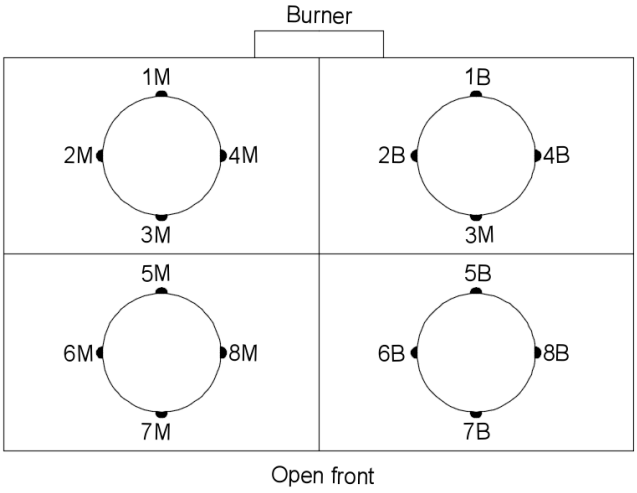
Post Test

- □ Spegnere il progamma
- □ Verificare che la temperature massima raggiunta sia circa 1850 °F (1010 °C)
- □ Iniziare la procedura per lo spegnimento del gas propano e attivare il bruciatore secondario
- □ Chiudere il gas propano
- □ Aprire la valvola dell'azoto per pulire le tubazioni ed assicurarsi che tutto il propano sia espulso dal sistema.
- □ Aspettare che la temperature sia minore di 1100 °F
- □ Togliere i morsetti a C e spostare leggermente la porta per agevolare il raffreddamento del forno.
- □ Aprire completamento la porta una volta raggiunti I 500 °F
- □ Fotografare i cilindri all"interno della fornace
- □ Raggiunta la temperature ambiente nominare nuovamente i provini

- □ Rimuovere i cilindri
- □ Rimuovere i frammenti all'interno dei pannelli
- □ Rimuovere i frammenti all'esterno dei pannelli
- □ Eseguire il test per il calcolo della resistenza a compressione utilizzando lo sclerometro
- □ Stoccare i provini

8.4 Calcolo temperature superficiale del provino

Il calcolo della temperatura superficiale è stata calcolata attraverso l'utilizzo di termocoppie di tipo K. Il programma utilizzato per l'acquisizione dei dati è Labview Signalecpress offerto da National Instruments. La mappatura delle termocoppie è la seguente (vista in pianta):



Provino posteriore sinistra:

1M: Posteriore

2M: Sinistra

3M: Fronte

4M: Destra

Provino fronte sinistra:

5M: Posteriore

6M: Sinistra

7M: Fronte

8M: Destra

Provino posteriore destro:

1B: Posteriore

2B: Sinistra

3B: Fronte

4B: Destra

Provino fronte destro:

1B: Posteriore

2B: Sinistra

3B: Fronte

4B: Destra

Queste sono state fatte passare attraverso due piccoli fori, uno nella parte frontale sinistra e l'altro nella parte frontale destra.

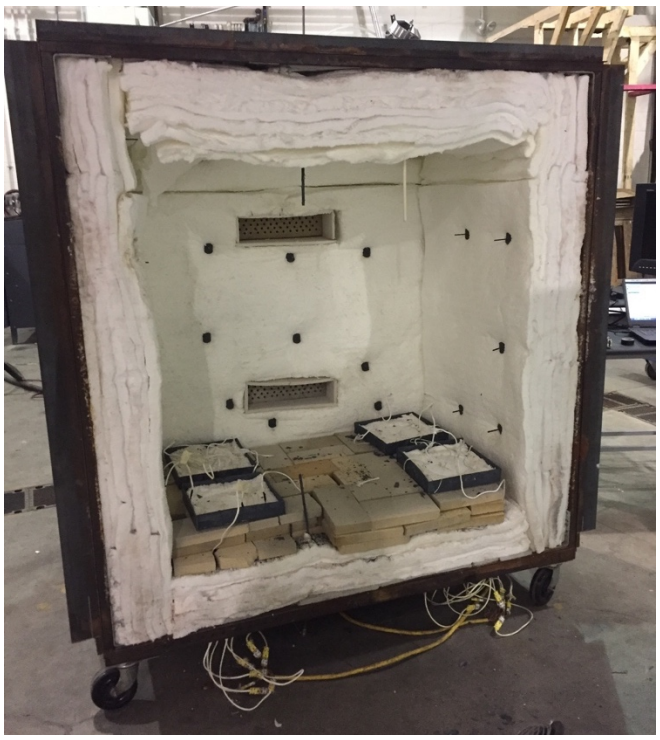


Figura 8-14 Disposizione delle termocoppie all'intenro del forno. Fonte: fotografia, elaborazione personale, WPI.

L'output è stato gestito ed elaborato attraverso Excel.

Le temperature sono state registrate con la frequenza del secondo. La misura iniziale viene presa con l'avvio del programma per l'incremento della temperatura e termine in media circa 17 ore dopo il raggiungimento della massima, quando la temperatura superficiale del provino si è stabilizzata e

ha raggiunto quella ambiente. La decisione di utilizzare 4 termocoppie per ogni provino è in funzione del fatto che si è cercato di meglio tenere in conto le differenze che si possono creare a causa della posizione della fonte di alimentazione (i bruciatori). In seguito alla prima run si è seguita la media delle temperature tenendo in conto tutte le possibili combinazioni ovvero la media della temperatura fronte, posteriore, destra e sinistra; destra e sinistra; sinistra e fronte; destra e posteriore. Analizzando i dati ottenuti si è notato una certa variazione e si è così deciso di continuare ad utilizzare tutte le termocoppie al completo.

La metodologia utilizzata per l'analisi dei dati per ogni singolo provino è la seguente:

- raccolta dei dati e suddivisione in funzione della posizione della termocoppia
- analisi dell'andamento delle singole termocoppie in relazione con l'andamento della temperatura all'interno del forno in 90 minuti

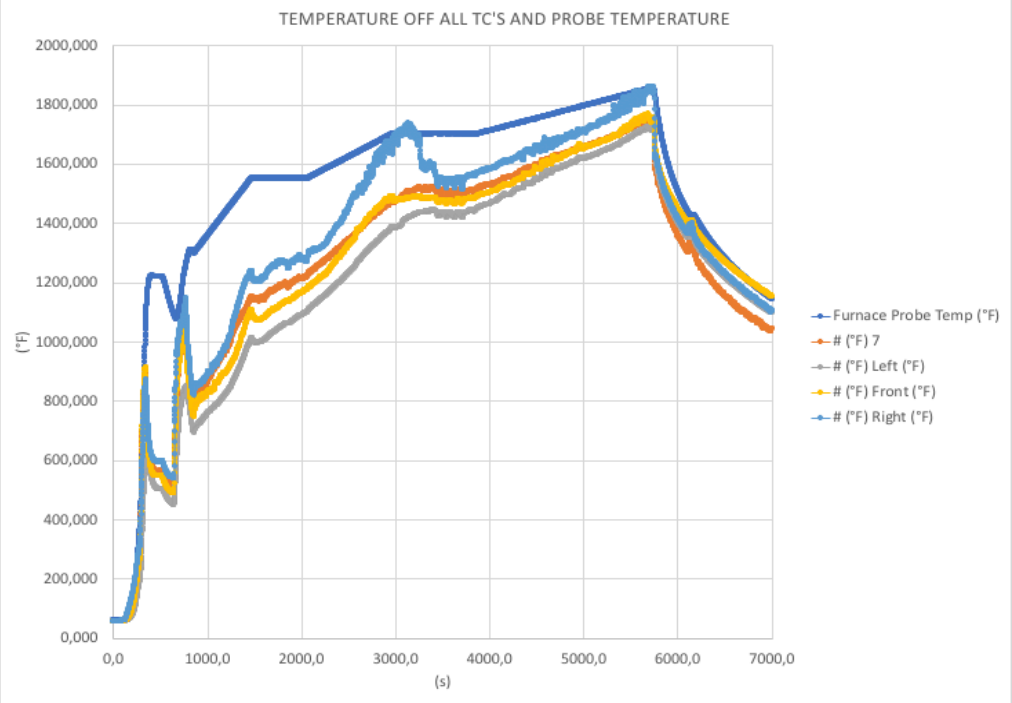


Figura 8-15 Confronto tra l'andamento della temperatura superficiale registrato dalle termocoppie e l'andamento della temperatura all'interno del forno. Fonte: elaborazione personale

- calcolo del massimo della temperatura raggiunta all'interno del forno. Calcolo della massima temperatura raggiunta singolarmente dalle 4 termocoppie.

Tabella 8-12 Calcolo dei valori massimi della temperatura registrata. Fonte: elaborazione personale.

Max Value
Max probe furnace (°F)
1853,06
Max Back (°F)
1752,30
Max Left (°F)
1725,34
Max Front (°F)
1769,76
Max Right (°F)
1861,44

- Il risultato non è accettabile se questa presenta un massimo nell'intorno dei 1850 °F. Questo significa che la termocoppia si è staccata dal provino, misurando la temperatura dell'aria e non quella della superficie.

Tabella 8-13 Condizione di accettabilità o non dei valori registrati. Fonte: elaborazione personale.

TC's TEST
Max Back (°F)
Accettable
Max Left (°F)
Accettable
Max Front (°F)
Accettable
Max Right (°F)
Non accettable

- in seguito all'analisi si riesce a intuire quali termocoppie forniscono un output corretto e quali sono state affette da errori
- media di tutte e 4 le temperature
- media corretta. Esclusione dal calcolo delle termocoppie che si sono staccate dalla superficie a causa dei flussi d'aria generati della fiamme emesse dai bruciatori.

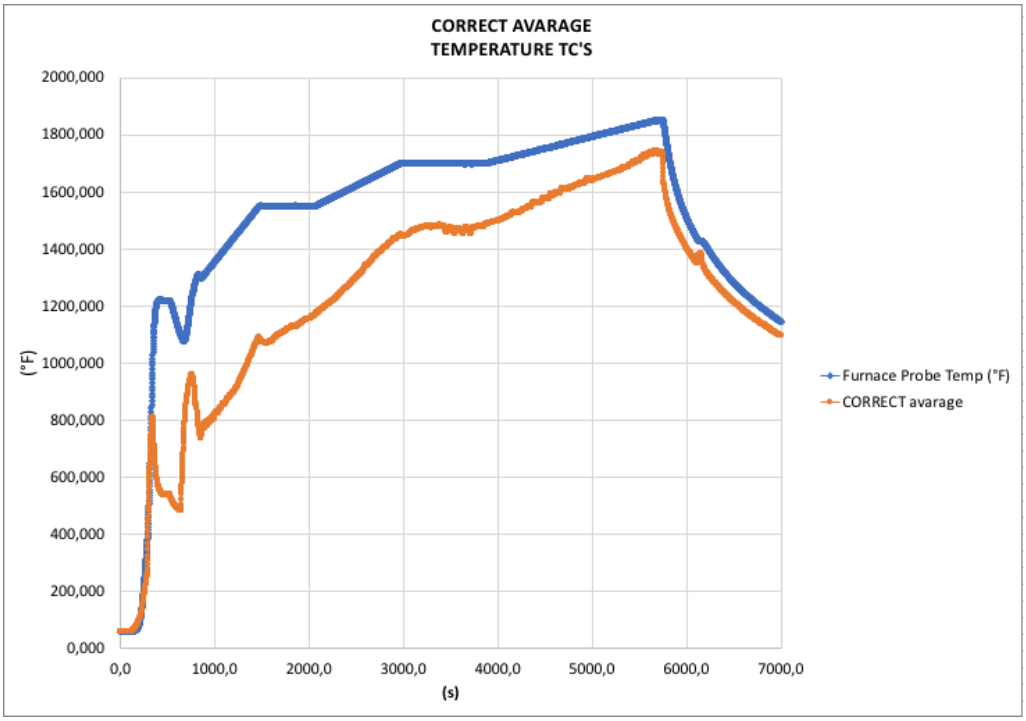


Figura 8-16 Media corretta.Fonte: elaborazione personale.

- Calcolo del valore massimo ottenuto dalla media corretta
- Analisi grafica e analisi della differenza di temperatura tra i valori ricavati dalla media corretta e l'andamento della temperatura all'interno del forno.
- Analisi grafica dell'intero processo dall'inizio al raggiungimento della temperatura media.

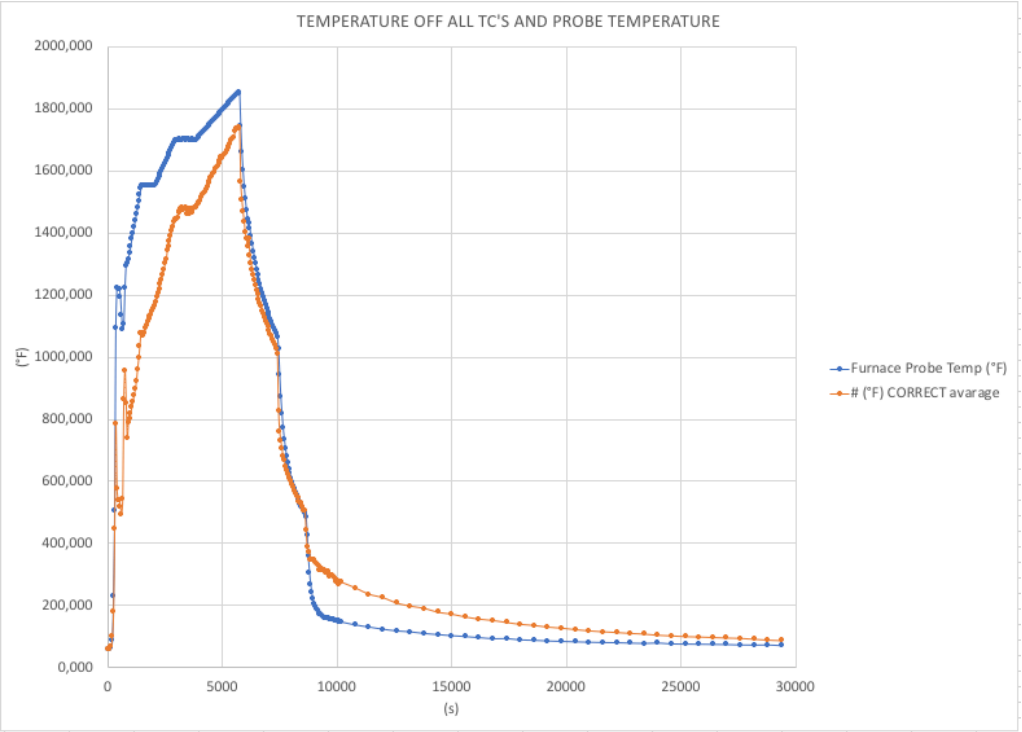
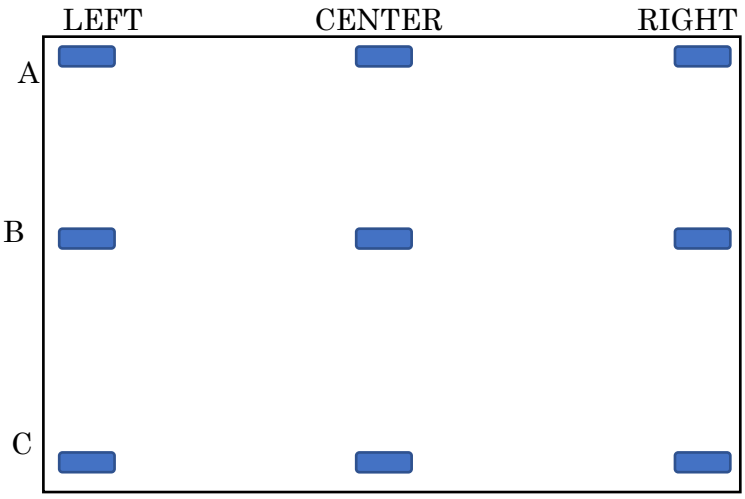


Figura 8-17 Confronto tra la media delle temperature registrate e l'andamento della temperatura all'interno del forno. Fonte: elaborazione personale.

Temperatura del forno

Il forno come già accennato, è stato progettato per seguire la curva tempo-temperatura ASTM E119. La curva è stata progettata attraverso un software e per la calibrazione sono stati utilizzati una serie di termometri disposti lungo tutto il perimetro con l'obbiettivo di misurare tutte le variazioni della temperatura all'interno dell'ambiente. I termometri sono stati posti nel forno, a media altezza nel seguente modo (vista in pianta):



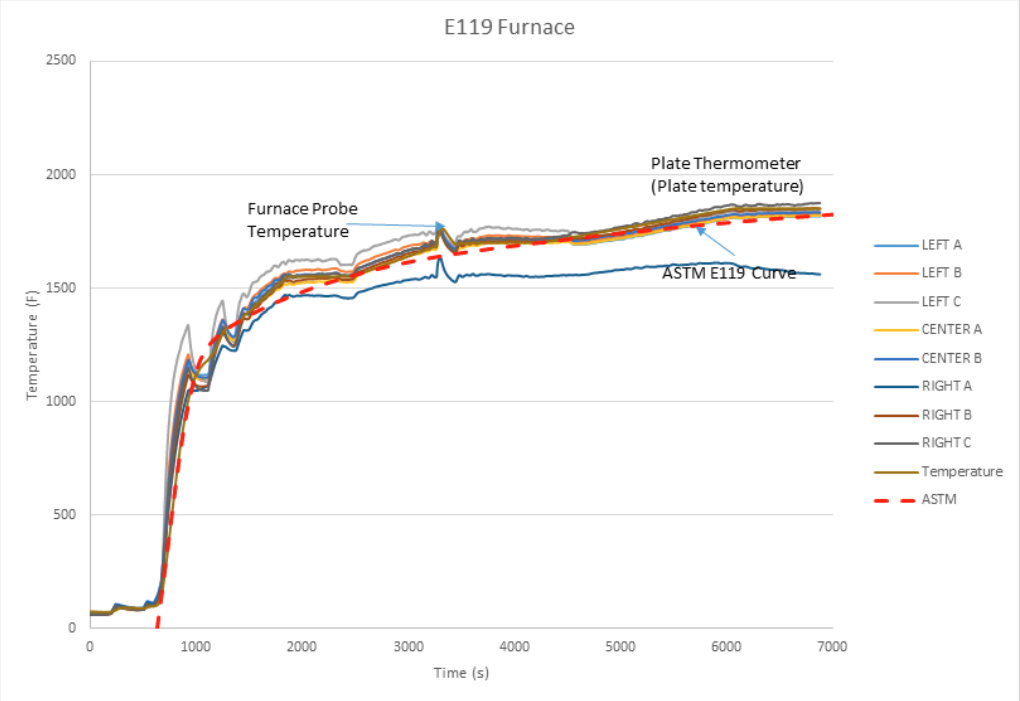


Figura 8-18 Confronto tra la media delle temperature registrate all'interno del forno e la curva standard ASTM E-119. Fonte: WPI.

La curva tratteggiata in rosso mostra l'andamento della curva standard. Quella che si distacca dalle altre è dovuta al fatto che uno dei termometri è stato danneggiato durante l'esperimento di prova, e non è stata tenuta in considerazione. Come si può notare dall'immagine le curve dei termometri seguono abbastanza fedelmente la curva richiesta dallo standard, e i loro valori rientrano all'interno del 10 % richiesto dalla normativa. Le approssimazioni che si vedono soprattutto nel primo periodo di esposizione, che sono assolutamente irrilevanti se paragonate con il resto della curva sono dovute all'utilizzo di un PID controller, ovvero un sistema di Proporzionale-Integrativo-Derivativo, dai costi contenuti. In sviluppi successi si potrà ottenere una migliore approssimazione, attraverso l'acquisto di un dispositivo più performante.

L'immagine seguente mostra l'andamento completo della temperatura all'interno del forno nei primi 90 minuti.

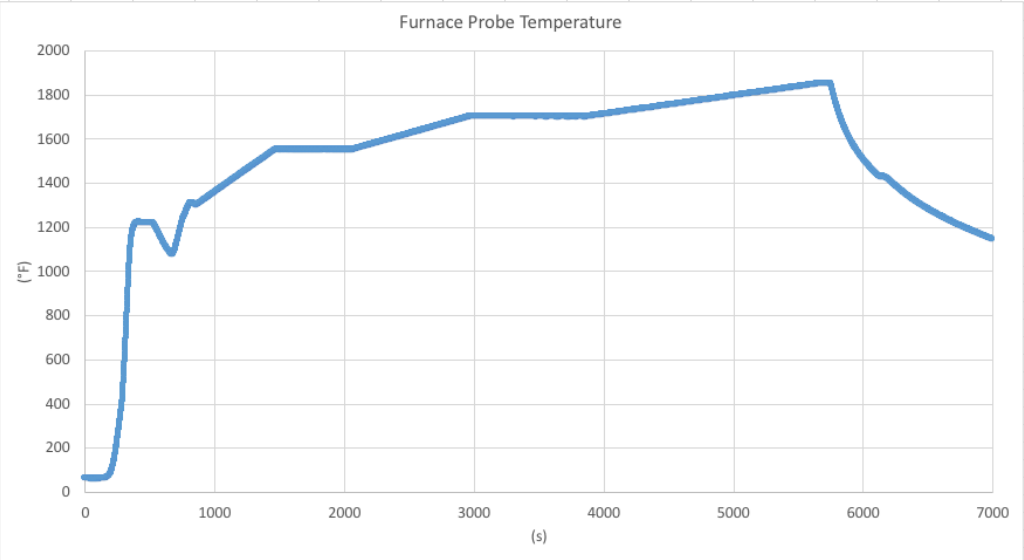


Figura 8-19 l'andamento completo della temperatura all'interno del forno nei primi 90 minuti. Fonte: elaborazione personale.

Nei primi 6 minuti si ha un'incredibile incremento della temperatura con un passaggio da temperatura ambiente a 1200 °F. In seguito a un brevissimo tempo di stabilizzazione si ha un abbassamento della fiamma, per permetter al sistema di erogare nell'istante successivo una potenza maggiore con un conseguente aumento delle temperature. Questo è ben evidente dal salto che si ha nell'intorno dei 700 s. In seguito a questo la temperatura cresce in maniera abbastanza costante fino alla temperatura massimo di 1850 °F.

Per quanto riguarda il raffreddamento questo viene eseguito senza la creazione di shock termici in maniera naturale

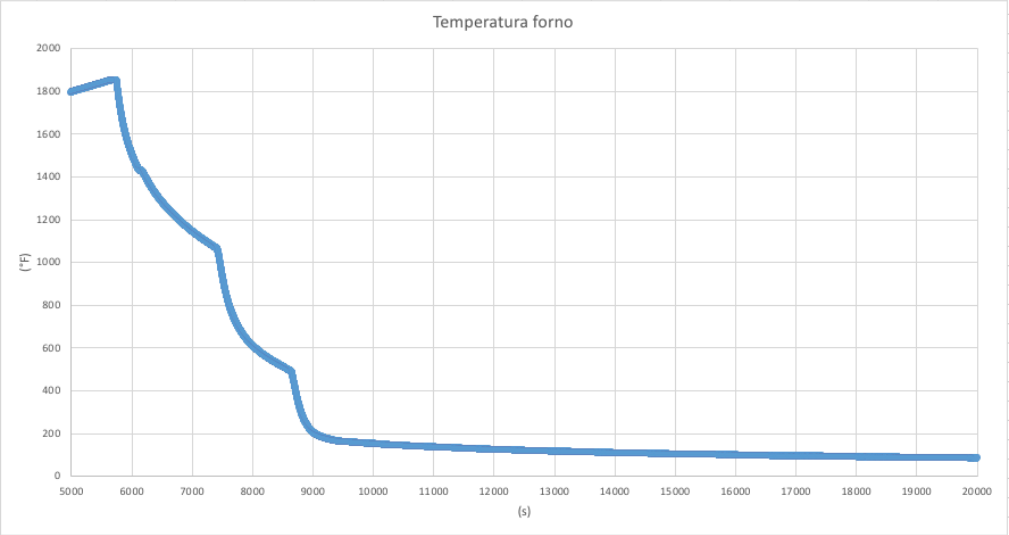


Figura 8-20 Raffreddamento del forno. Fonte: elaborazione personale

Stop fire [°F]	**First open [°F]**	**Completly open [°F]**
1850	1064	500

Si può così anche osservare il parallelo tra il raffreddamento dei provini e del forno. In una prima fase questo avviene con un'intensità simile, mentre in un secondo momento, si crea un netto divario tra i due. Questa è una situazione ricorrente in tutte le serie di provini testati.

Problemi riscontrati - Termocoppie

Uno dei più grandi problemi riscontrati è stato il buon fissaggio delle termocoppie. A causa dei notevoli e turbolenti flussi d'aria creati dalle fiamme emesse dai bruciatori in alcuni casi si sono ottenuti variazioni della temperatura causata dal continuo movimento delle termocoppie, che in alcuni momenti si scostavano e perdevano il contatto con la superficie del provino. Questo tipo di problema è ben visibile grafico. Nel momento in cui il valore della termocoppia eguaglia il valore della temperatura all'interno del forno vuol dire che ha perso il contatto con la superficie del provino. Non essendoci molte soluzioni, in quanto a 1850 °F i materiali che resistono non sono molti e non essendo possibile ottenere temperature così alte senza provocare alti flussi d'aria, si è cercato di serie in serie di fissare al meglio le termocoppie. Nei casi in cui si riscontrano valori poco credibili questi sono esclusi dalla media.

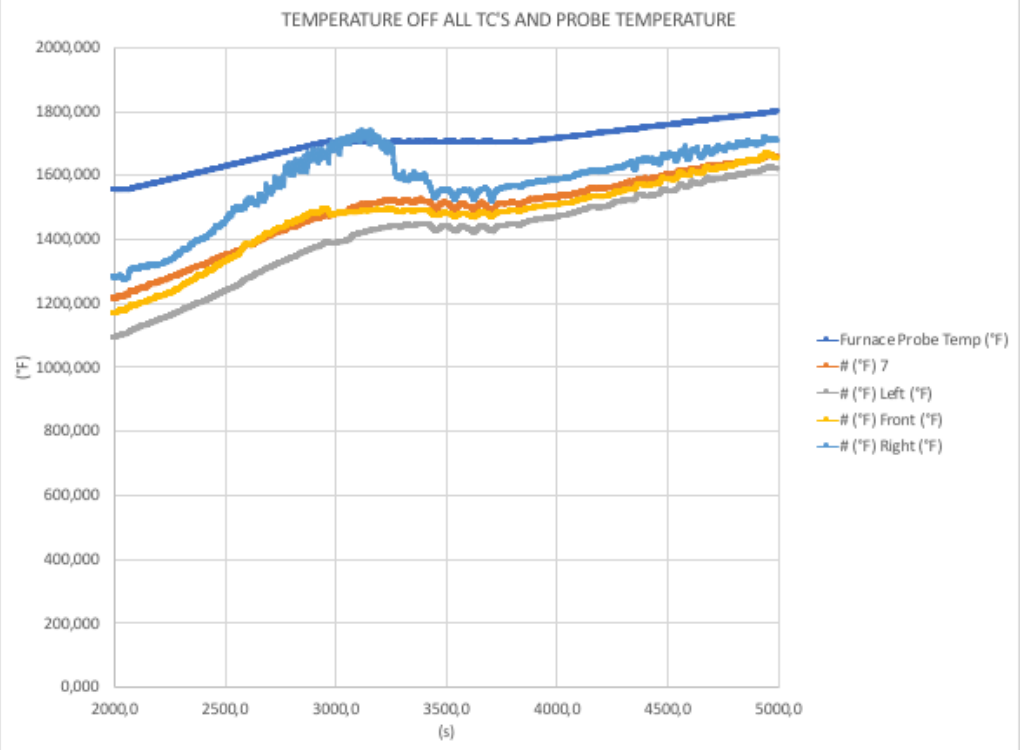


Figura 8-21 Registrazione del momento in cui la termocoppia registra la temperatura dell'aria all'interno del forno. Fonte: elaborazione personale.

8.4.1 Analisi dei dati

Siccome le temperature di ogni termocoppia sono state prese con la frequenza di una misurazione al secondo e per ogni provino sono state utilizzate 4 termocoppie la quantità di dati raccolta è estremamente elevata. Questo però ci ha permesso di poter condurre un'analisi molto dettagliata del fenomeno, avendo una buona mappatura della temperatura superficiale e il numero elevato ci anche permesso di correggere i risultati escludendo dei dati nel caso di anomalie. I dati relativi ai singoli provini verranno allegati alla fine dell'elaborato. In questa sezione invece, si cercano di evidenziare i risultati significativi e mettendo in relazione tra di loro le diverse temperature superficiali.

Tabella 8-14 Temperature massime. Fonte: elaborazione personale.

	Position	Back (°F)	Left (°F)	Front (°F)	Right (°F)	Avarage (°F)	Correct avarage (°F)
1A	B-L	1752,30	1725,34	1769,76	1861,44	1774,76	1747,70
2A	F-L	1837,45	1733,45	1844,24	1869,48	1819,75	1733,45
3A	B-R	1712,05	1849,44	1710,31	1728,48	1746,35	1728,48
4A	F-R	1722,96	1894,71	1781,75	1768,74	1771,92	1757,37
5A	B-L	1751,62	1704,92	1777,48	1793,11	1756,05	1728,20
6A	F-L	1766,86	1732,06	1800,25	1815,06	1777,30	1765,29
7A	B-R	1676,87	1879,97	1770,00	1796,66	1779,28	1781,83
8A	F-R	1878,64	1943,04	1852,29	1819,51	1873,36	1819,51
9A	B-L	1704,66	1665,56	1703,01	1759,03	1706,82	1706,82
10A	F-L	1734,80	1684,35	1716,25	1784,48	1729,00	1710,51
11A	B-R	1691,60	1811,16	1668,16	1707,47	1707,62	1687,00
12A	F-R	1816,92	1876,98	1759,34	1709,50	1781,21	1732,78
1B	B-L	1705,12	1677,29	1716,78	1777,57	1719,11	1719,11
2B	F-L	1732,12	1699,94	1715,10	1769,17	1727,80	1727,80
3B	B-R	1741,17	1839,93	1740,97	1789,96	1777,62	1757,22
4B	F-R	1875,24	1949,03	1809,62	1782,44	1853,49	1795,12
5B	B-L	1721,46	1694,01	1732,53	1776,83	1731,16	1715,94
6B	F-L	1728,96	1710,56	1718,32	1779,36	1733,53	1718,52
7B	B-R	1745,96	1850,61	1747,02	1773,26	1778,84	1755,28
8B	F-R	1861,20	63,99	1838,00	1792,98	1387,55	1792,98
9B	B-L	1793,61	1695,35	1761,43	1800,57	1762,51	1749,83
10B	F-L	1773,20	1717,49	1749,31	1784,03	1755,68	1733,15
11B	B-R	1760,44	1922,59	1740,79	1818,56	1807,77	1750,62
12B	F-R	1911,56	1946,12	1832,21	1845,17	1882,79	1837,95

All'interno di questa tabella sono stati riportati tutti i valori massimi relativi alle diverse temperature superficiali in funzione della posizione del provino e del punto di applicazione della termocoppia. I valori sottolineati sono quelli che sono stati scartati per il calcolo della media "corretta". Questi sono stati ritenuti errati in quanto si possono essere verificati i seguenti errori:

- distaccamento della termocoppia della superficie del provino
- deterioramento dell'involucro isolante della termocoppia dovuto a un suo utilizzo ripetuto
- contatto dei due metalli all'interno della termocoppia

Osservando i valori relativi ai massimi della media corretta si può dire che la temperatura si aggira attorno ai 1800 °F.

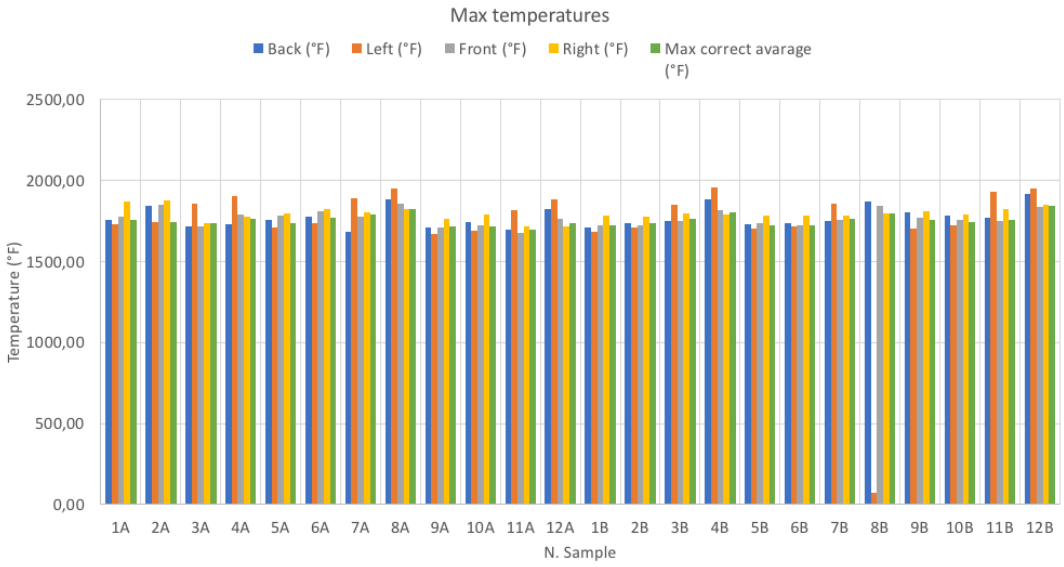


Figura 8-22 Rappresentazione dei massimi delle temperature. Fonte: elaborazione personale

Dal grafico si può osservare visivamente come i massimi siano distribuiti sulla superficie di ogni singolo provino. Qui si può notare come le temperature massime siano sempre raggiunte dalle termocoppie poste verso l'interno del forno. Esempio: 1A-2A la temperatura massima è raggiunta sul lato destro (colonna gialla); 3A-4A la temperatura massima è raggiunta sul lato sinistro (colonna arancione). Ovviamente questi dati risultano essere solo indicativi, in quanto sono affetti da un alto livello di incertezza. Come

già accennato il problema più grande è stato combattere gli elevati moti dei flussi d'aria che si sono creati all'interno del forno.

All'interno degli allegati verranno mostrati i grafici che mostrano l'andamento della temperatura al variare del tempo. Gli allegati saranno suddivisi per Run, e per ognuna di questa vengono mostrati i dati relativi a 4 provini. Questi saranno organizzati nel seguente modo:

- andamento della temperatura all'interno del forno in relazione all'andamento della temperatura delle singole termocoppie. Analisi specifica relativi ai 90 minuti.
- andamento della temperatura all'interno del forno in relazione all'andamento della temperatura media delle singole termocoppie, depurata dai valori relativi alla temperatura dell'aria all'interno del forno e non della superficie, dovuto al loro distacco. Analisi specifica relativi ai 90 minuti.
- andamento della temperatura all'interno del forno in relazione all'andamento della temperatura media delle singole termocoppie. Analisi effettuata sull'intero periodo di registrazione dati. Questo risulta essere utile per osservare la differenza di temperatura durante il raffreddamento.

Vengono riportati solo i dati relativi alla serie A in quanto i risultati della serie B risultano molto simili, ad eccezione di qualche variazione dovuta al distaccamento delle termocoppie. In ogni caso tutti i per ricerche approfondite sono disponibili su file Excel.

Tutti questi dati sono fondamentali per monitorare la differenza tra la temperatura superficiale del provino e quella realmente calcolata all'interno del forno. Risulta un ottimo strumento di indagazione per conoscere la reale temperatura a cui il provino viene sottoposto. Inoltre durante il trest le temperature sono state costantemente monitorate per assicurarsi si avere una distribuzione uniforme della temperatura su tutto il perimetro dei cilindri. Sviluppato futuro potrà essere quello di implementare un procedimento che riesca a calcolare la temperatura interna del provino partendo dallo sviluppo di questa sulla superficie esterna laterale.

8.5 Perdita di massa

La risposta al fuoco del calcestruzzo verrà analizzata attraverso lo studio della perdita di massa, ovvero attraverso l'analisi della migrazione del vapore e quindi dell'acqua dall'interno all'esterno del provino. Questa caratteristica verrà monitorata all'inizio e alla fine del test. Con termine massa si intende quindi l'acqua, il vapore e l'umidità presente all'interno della sezione.

Come già evidenziato precedentemente esistono tre tipologie di acqua all'interno dell'elemento in calcestruzzo. L'acqua può essere classificata in funzione di come occupa lo spazio all'interno dei pori della pasta cementizia. Si ha quindi: acqua capillare, acqua gel e acqua legata chimicamente. Ad intervalli diversi di temperatura corrisponderanno diversi processi chimici o fisici che interessano in maniera diverse le diverse forme di acqua. In generale considerando l'intero periodo di esposizione di un provino di calcestruzzo si può dire che la perdita di peso, come processo continuo non reversibile per rappresentare la migrazione di umidità nel calcestruzzo, aumenta in modo monotono con l'aumento della temperatura di riscaldamento e del tempo di esposizione. Una temperatura di riscaldamento più elevata comporta sempre una maggiore perdita di peso, ma è possibile raggiungere uno stato di equilibrio igrometrico se il tempo di esposizione è sufficientemente lungo. Un tempo di esposizione più lungo comporta sempre una maggiore perdita di peso, ma il tempo di esposizione che può portare ad uno stato di equilibrio igrometrico deve essere relativamente più lungo per temperature di riscaldamento più basse.

Rapporto tra la perdita di massa prima e dopo è stato misurato attraverso la seguente formula:

$$Perdita\ massa(\%) = \frac{W_C - W_L}{W_C} \tag{8.1}$$

Con

W_C : peso prima del test al fuoco

W_L: il peso in seguito al test al fuoco

I dati ottenuti verranno collocati nella seguente tabella.

Date	Sample Number	Initial mass [lb]	Final mass [lb]	Spalled fragments [-]	Mass loss [lb]	Mass loss (%)	Outside the pan [-]
27/02							
27/02							
27/02							
27/02							

Sia per le serie A che per la serie B viene effettuata un'analisi

- della perdita di massa in relazione al rapporto acqua/cemento

W/C	Mass loss (%)	Type
0,3		5% air voids no fibers
0,4		
0,5		
0,3		5% air voids with fibers
0,3		10% air voids no fibers
0,4		
0,5		
0,3		10% air voids with fibers
0,3		15% air voids no fibers
0,4		
0,5		
0,3		15% air voids with fibers

- della perdita di massa in relazione alla percentuale di vuoti

W/C	Mass loss (%)	Type
5		
10		0,3 w/c no fibers
15		
5		
10		0,3 w/c with fibers
15		
5		
10		0,4 w/c no fibers
15		
5		
10		0,5 w/c no fibers
15		

Infine si stila una lista con il comportamento di tutte le miscele indicando il comportamento dal migliore al peggiore

Lowest to Highest	N. sample	W/C	% Air Voids	Fiber PP (lb)	Mass loss (%)
1°					
2°					
3°					
4°					
5°					
6°					
7°					
8°					
9°					
10°					
11°					
12°					

Molto importante sarà confrontare la serie A con la serie B per ottenere una media e per poter effettuare un paragone.

8.5.1 Analisi dei dati

L'analisi dei dati relativa alla perdita di massa viene riportata evidenziando i dati di ciascuna serie.

Tabella 8-15 Percentuale della perdita di mass relativa alla serie A. Fonte: elaborazione personale.

RUN 1

Date	Sample Number	Initial mass [lb]	Final mass [lb]	Spalled fragments [-]	Mass loss [lb]	Mass lost (%)	Outside the pan [-]
27/02	1A	29,75	27,70	/	2,05	6,89%	/
27/02	2A	27,05	25,10	/	1,95	7,21%	
27/02	3A	27,50	25,50	/	2,00	7,27%	
27/02	4A	29,30	27,15	/	2,15	7,34%	

RUN 2

Date	Sample Number	Initial mass [lb]	Final mass [lb]	Spalled fragments [-]	Mass loss [lb]	Mass lost (%)	Outside the pan [-]
28/02	5A	29,55	27,30	/	2,25	7,61%	Chippings Color: Brown/red Position: between 5A-6A
28/02	6A	28,80	26,65	Chippings Color: Brown/red	2,15	7,47%	
28/02	7A	29,30	26,85	/	2,45	8,36%	
28/02	8A	28,35	26,10	/	2,25	7,94%	

RUN 3

Date	Sample Number	Initial mass [lb]	Final mass [lb]	Spalled fragments [-]	Mass loss [lb]	Mass lost (%)	Outside the pan [-]
01/03	9A	28,05	25,90	Chippings Color: Brown/red*	2,15	7,66%	Chippings Color: Brown/red Position: center of furnace
01/03	10A	28,70	25,95	/	2,75	9,58%	
01/03	11A	28,50	25,65	/	2,85	10,00%	
01/03	12A	28,90	26,10	/	2,80	9,69%	

Si può quindi stilare una prima classifica evidenziando come la perdita di massa varia tra i vari campioni

Tabella 8-16 Classifica relativa alla perdita di massa. Fonte: elaborazione personale

Lowest to highest	N. sample	Mass loss (%)	w/c	Air Voids (%)	Fiber PP (lb)
1°	1A	6,89%	0,3	5	0
2°	2A	7,21%	0,3	10	0
3°	3A	7,27%	0,3	15	0
4°	4A	7,34%	0,3	5	4
5°	6A	7,47%	0,3	15	4
6°	5A	7,61%	0,3	10	4
7°	9A	7,66%	0,4	15	0
8°	8A	7,94%	0,4	10	0
9°	7A	8,36%	0,4	5	0
10°	10A	9,58%	0,5	5	0
11°	12A	9,69%	0,5	15	0
12°	11A	10,00%	0,5	10	0

Perdita di massa (%) – A/C

Analizziamo l'andamento in funzione del differente rapporto acqua/cemento

Tabella 8-17 % di massa persa-rapporto a/c. Fonte: elaborazione personale

W/C	Mass loss (%)	Type
0,3	6,89%	5% air voids no fibers
0,4	8,36%	
0,5	9,58%	
0,3	7,34%	5% air voids with fibers
0,3	7,21%	10% air voids no fibers
0,4	7,94%	
0,5	10,00%	
0,3	7,61%	10% air voids with fibers
0,3	7,27%	15% air voids no fibers
0,4	7,66%	
0,5	9,69%	
0,3	7,47%	15% air voids with fibers

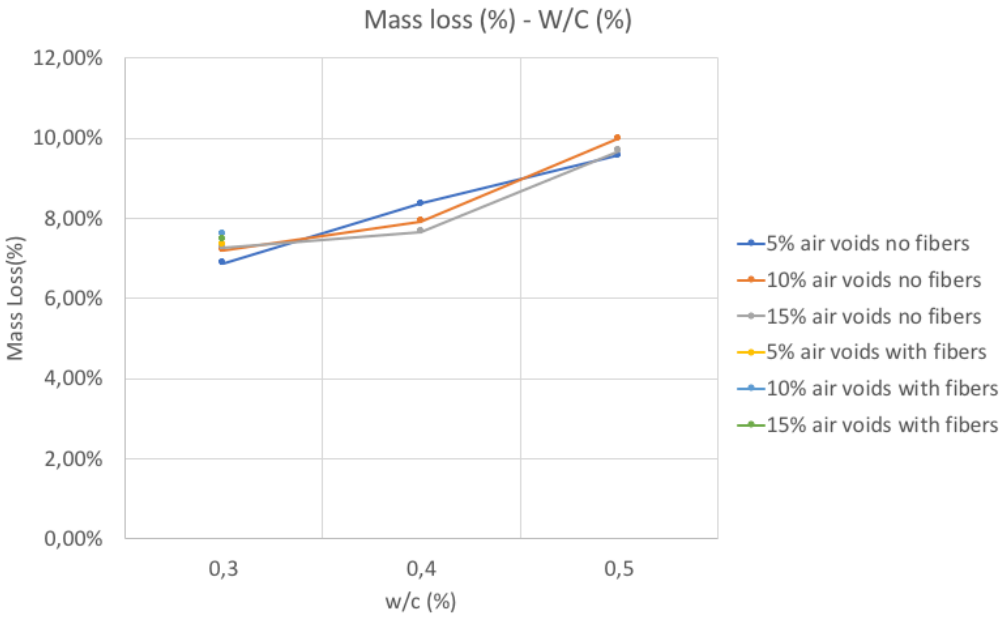


Figura 8-23 Perdita di massa (%) – A/C. Fonte: elaborazione personale

Da questo grafico risulta chiaro come l'incremento del rapporto acqua/cemento porti a un aumento della perdita di massa. Il calcestruzzo con un alto livello idrico mostra una bassa compattezza, e quindi un'alta permeabilità consentendo così al vapore acqueo di evadere facilmente dalla sezione. L'andamento risulta molto simile in tutte e tre le miscele.

Perdita di massa (%) – Vuoti d'aria (%)

Inoltre si può anche rappresentare l'andamento della perdita di massa in relazione alla percentuale di vuoti.

Tabella 8-18 Perdita di massa(%)-vuoti d'aria (%). Fonte: Elaborazione personale.

W/C	Mass loss (%)	Type
5	6,89%	0,3 w/c no fibers
10	7,21%	
15	7,27%	
5	7,34%	0,3 w/c with fibers
10	7,61%	
15	7,47%	
5	8,36%	0,4 w/c no fibers
10	7,94%	
15	7,66%	
5	9,58%	0,5 w/c no fibers
10	10,00%	
15	9,69%	

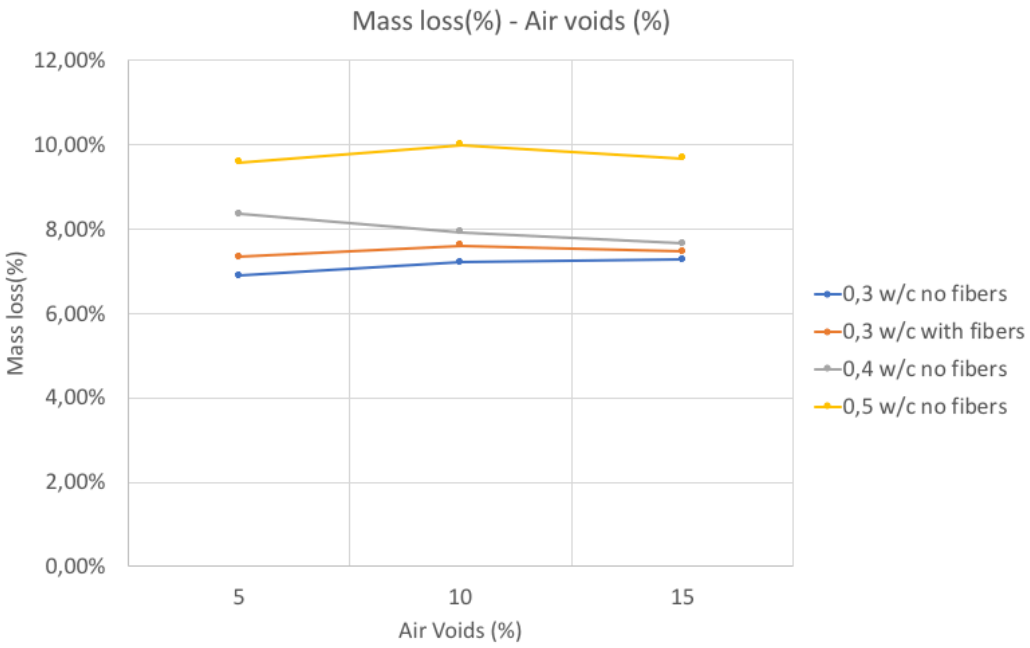


Figura 8-24 Perdita di massa(%)-vuoti d'aria (%). Fonte: Elaborazione personale.

Per quanto riguarda la percentuale dei vuoti, in questa serie non si riesce a stabilire un netta differenza di comportamento tra i diversi livelli di percentuale di vuoti 5%, 10% e 15%. I valori risultano essere molto simili tra di loro mostrando a volte valori in salita e a volte valori in aumento. Ovviamente la presenza di un alto contenuto d'aria aiuta ad avere una maggiore permeabilità ad una maggiore rete di pori per far evadere il vapore dalla sezione.

Perdita di massa (%) – Quantità di fibre in polipropilene (lb)

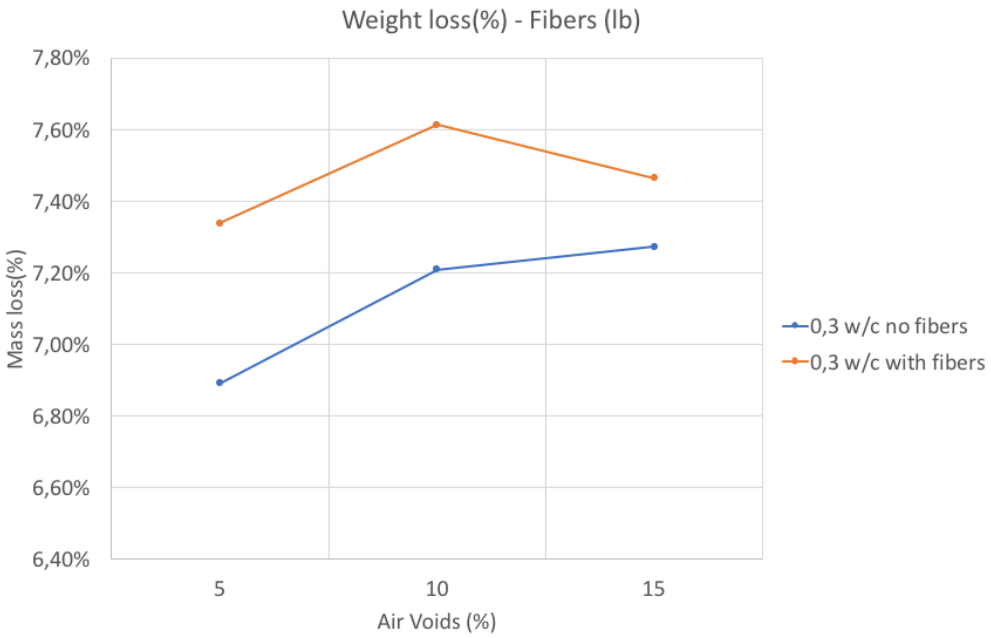


Figura 8-25 Perdita di massa(%)-fibre (lb). Fonte: Elaborazione personale.

Considerando invece lo stesso rapporto d'acqua ma la presenza o meno delle fibre in PP si può affermare che la massa persa è maggiore all'interno della miscela fibro-rinfrozata. La fusione della fibra migliora i trasferimenti idrici e la velocità di vaporizzazione dell'acqua dal cuore del campione alla superficie esterna del provino.

A questo punto l'obiettivo della RUN 4,5,6 è quello di andare a confermare i dati ottenuti dalla RUN 1,2,3.

Tabella 8-19 Percentuale della perdita di mass relativa alla serie B. Fonte: elaborazione personale.

RUN 4

Date	Sample Number	Initial mass [lb]	Final mass [lb]	Spalled fragments [-]	Mass loss [lb]	Mass lost (%)	Outside the pan [-]
02/03	1B	29,75	27,75	/	2,00	6,72%	
02/03	2B	28,00	25,95	/	2,05	7,32%	
02/03	3B	27,40	25,40	2 chippings Color: Brown/red*	2,00	7,30%	/
02/03	4B	29,25	27,15	/	2,10	7,18%	

RUN 5

Date	Sample Number	Initial mass [lb]	Final mass [lb]	Spalled fragments [-]	Mass loss [lb]	Mass lost (%)	Outside the pan [-]
05/03	5B	29,45	27,25	/	2,20	7,47%	
05/03	6B	28,60	26,45	/	2,15	7,52%	/
05/03	7B	29,05	26,85	/	2,20	7,57%	
05/03	8B	28,85	26,65	/	2,20	7,63%	

RUN 6

Date	Sample Number	Initial mass [lb]	Final mass [lb]	Spalled fragments [-]	Mass lost [lb]	Mass lost (%)	Outside the pan [-]
09/03	5B	28,05	25,80		2,25	8,02%	
09/03	6B	28,90	26,00		2,90	10,03%	
09/03	7B	28,70	26,00		2,70	9,41%	
09/03	8B	28,70	25,85		2,85	9,93%	

Possiamo ora stilare la classifica in relazione alla perdita di massa.

Tabella 8-20 Classifica relativa alla perdita di massa. Fonte: elaborazione personale

Lowest to highest	N. sample	Mass loss (%)	w/c	Air Voids (%)	Fiber PP (lb)
1°	1B	6,72%	0,3	5	0
2°	4B	7,32%	0,3	5	4
3°	3B	7,30%	0,3	15	0
4°	2B	7,32%	0,3	10	0
5°	5B	7,47%	0,3	10	4
6°	6B	7,52%	0,3	10	4
7°	7B	7,57%	0,4	15	0
8°	8B	7,63%	0,4	10	0
9°	9B	8,02%	0,4	5	0
10°	11B	9,41%	0,5	15	0
11°	12B	9,93%	0,5	10	0
12°	10B	10,03%	0,5	5	0

Perdita di massa (%) – A/C

Tabella 8-21 % di massa persa-rapporto a/c. Fonte: elaborazione personale

W/C	Mass loss (%)	Type
0,3	6,72%	5% air voids no fibers
0,4	7,57%	
0,5	10,03%	
0,3	7,18%	5% air voids with fibers
0,3	7,32%	10% air voids no fibers
0,4	7,63%	
0,5	9,41%	
0,3	7,47%	10% air voids with fibers
0,3	7,30%	15% air voids no fibers
0,4	8,02%	
0,5	9,93%	
0,3	7,52%	15% air voids with fibers

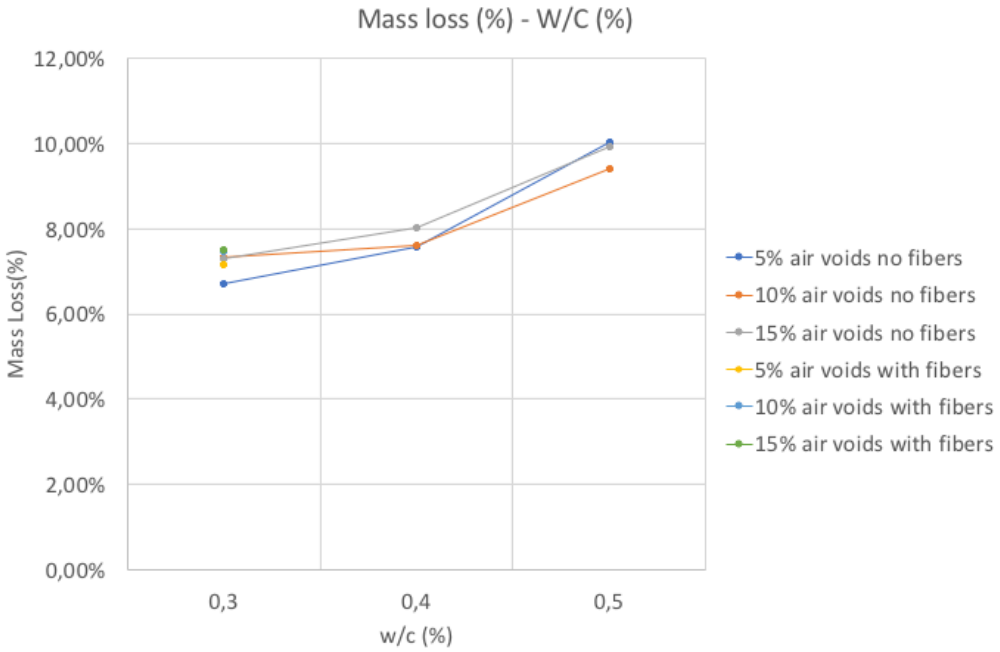


Figura 8-26 % di massa persa-rapporto a/c. Fonte: elaborazione personale

Perdita di massa (%) – Vuoti d'aria (%)

Tabella 8-22 % di massa persa-% vuoti aria. Fonte: elaborazione personale

W/C	Mass loss (%)	Type
5	6,72%	0,3 w/c no fibers
10	7,32%	
15	7,30%	
5	7,18%	0,3 w/c with fibers
10	7,47%	
15	7,52%	
5	7,57%	0,4 w/c no fibers
10	7,63%	
15	8,02%	
5	10,03%	0,5 w/c no fibers
10	9,41%	
15	9,93%	

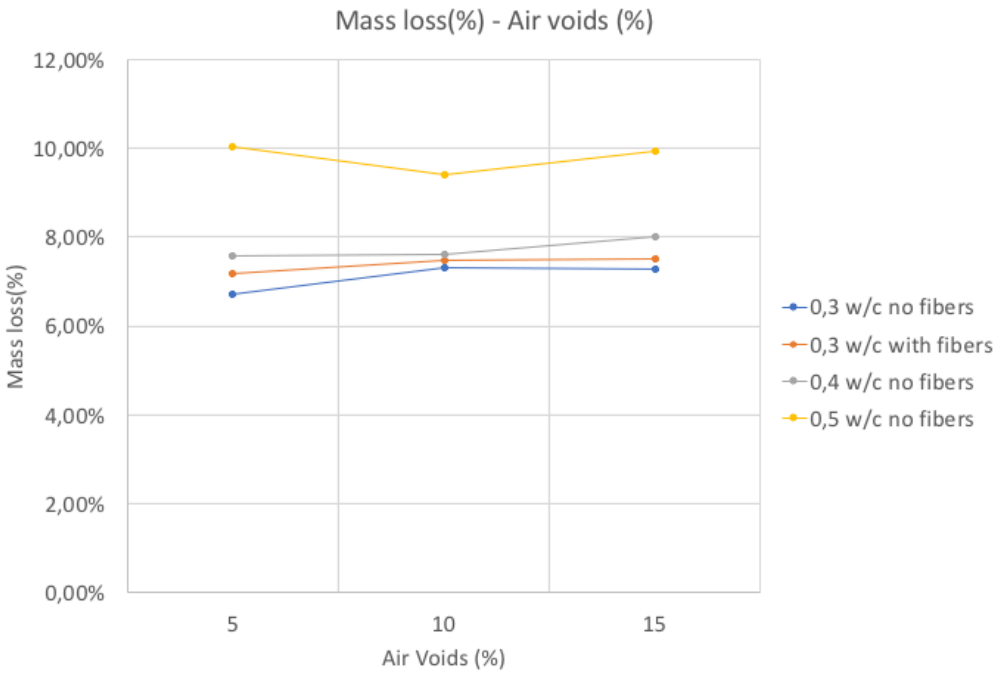
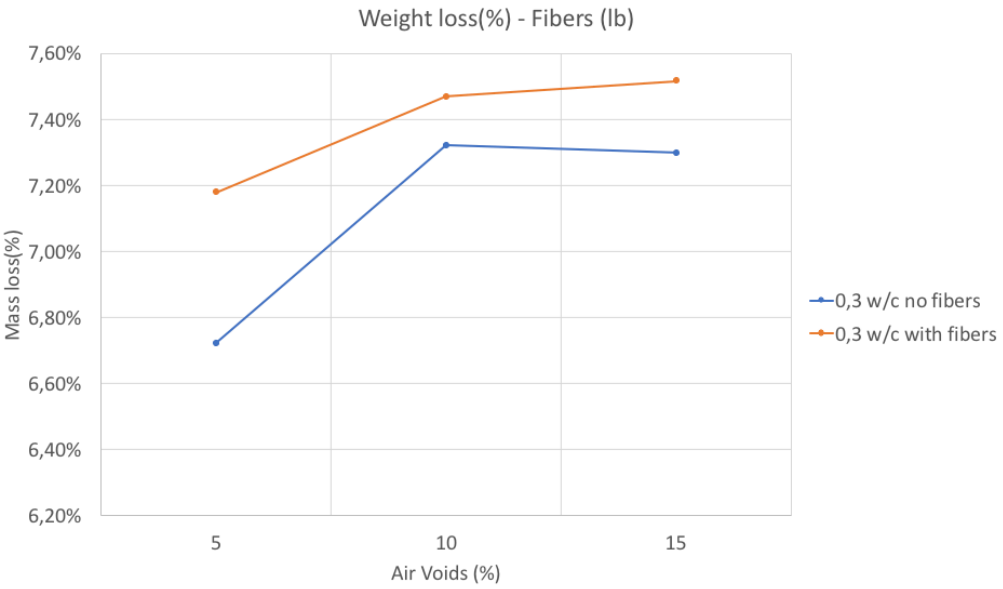


Figura 8-27 % di massa persa-vuoti aria. Fonte: elaborazione personale

Perdita di massa (%) – Quantità di fibre in polipropilene (lb)



Come nel caso della serie A la miscela con la presenza di fibre mostra una perdita di massa maggiore rispetto alla compagna senza.

Paragonando serie A e serie B, si può quindi offrire una stima delle miscele con la perdita di massa più alta e più bassa .

Tabella 8-23 Confronto A-B. Fonte: elaborazione personale

	N. sample	Mass loss (%)	w/c	Air Voids (%)	Fiber PP (lb)
Lower A	1A	6,89%	0,3	5	0
Highest B	1B	6,72%	0,3	5	0
Lower A	11A	10,00%	0,5	10	0
Highest B	10B	10,03%	0,5	5	0

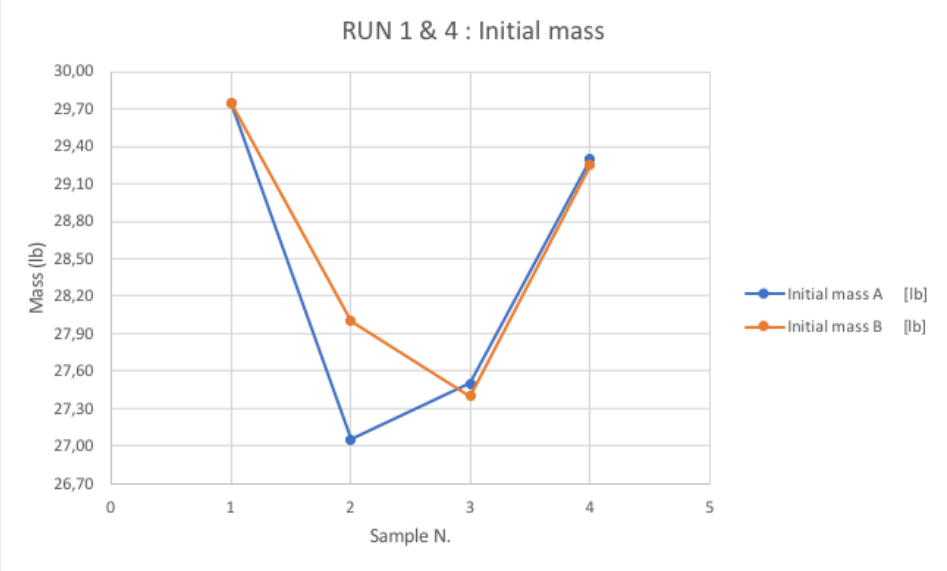
In seguito all'analisi delle due serie singolarmente si sono messi insieme i dati delle due serie effettuando una media tra i due risultati. Obiettivo di questo passaggio è quindi quello di trovare un valore della massa persa dai provini che tenga in considerazione tutte e due le serie. Inoltre attraverso il paragone tra le due serie si riescono ad evidenziare le differenze.

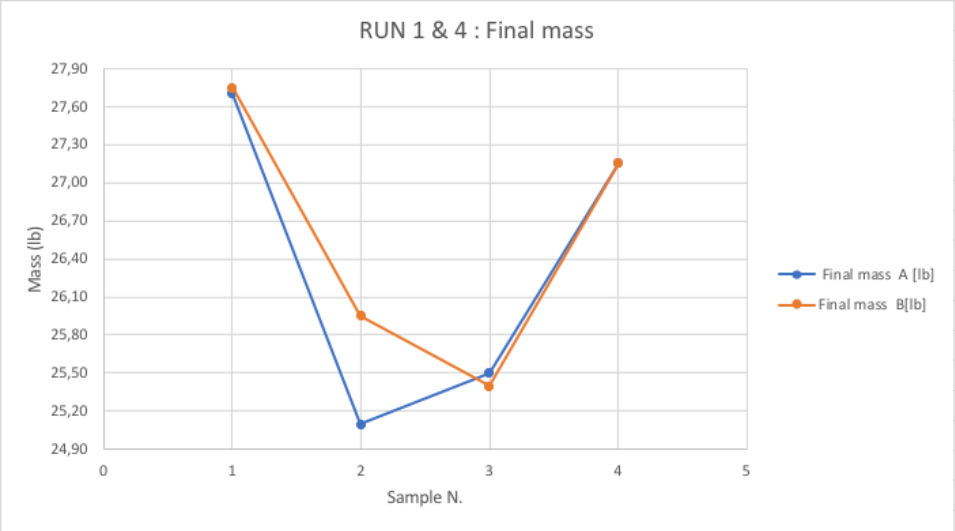
RUN 1 & RUN 4

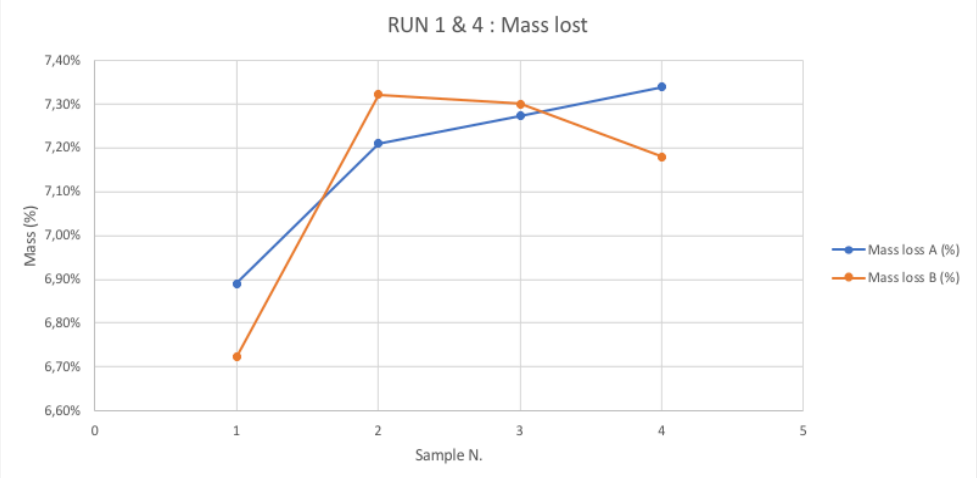
Tabella 8-24 Media % di massa persa A-B. Run 1-4. Fonte: elaborazione personale.

Sample N.	Avarage Initial mass [lb]	Avarage Final mass [lb]	Avarage Mass loss [lb]	Avarage Mass loss (%)
1	29,75	27,73	2,03	6,81%
2	27,53	25,53	2,00	7,27%
3	27,45	25,45	2,00	7,29%
4	29,28	27,15	2,13	7,26%

Figura 8-28 Media % di massa persa A-B. Run 1-4. Fonte: elaborazione personale.





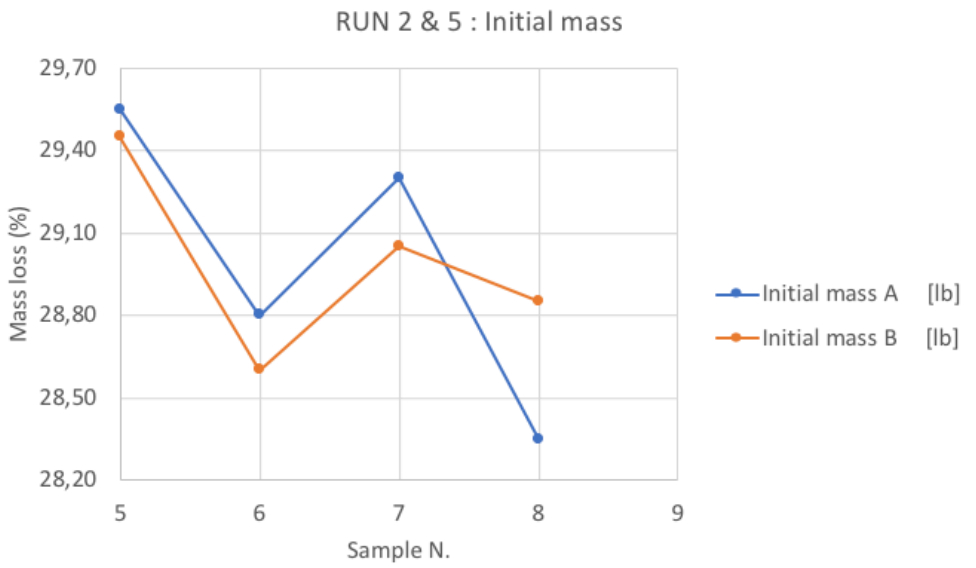


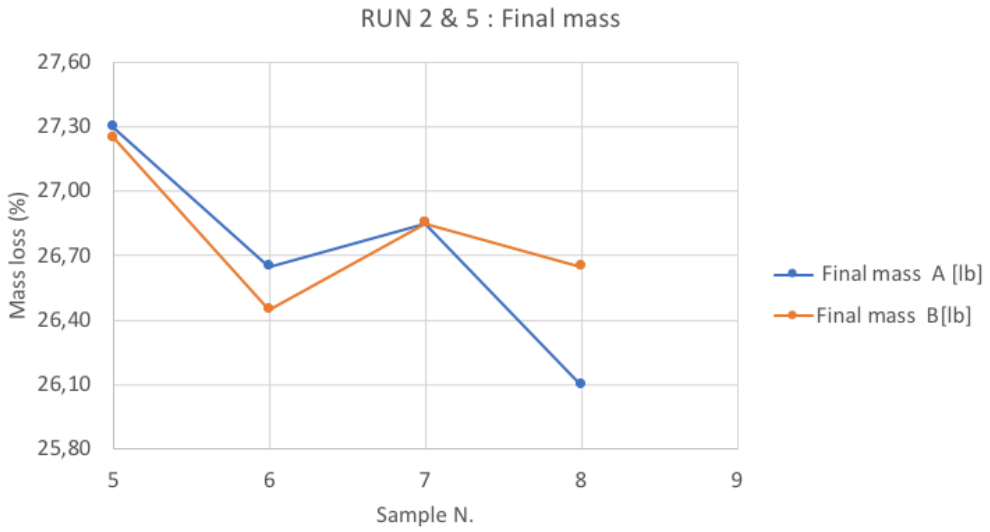
RUN 2 & RUN 5

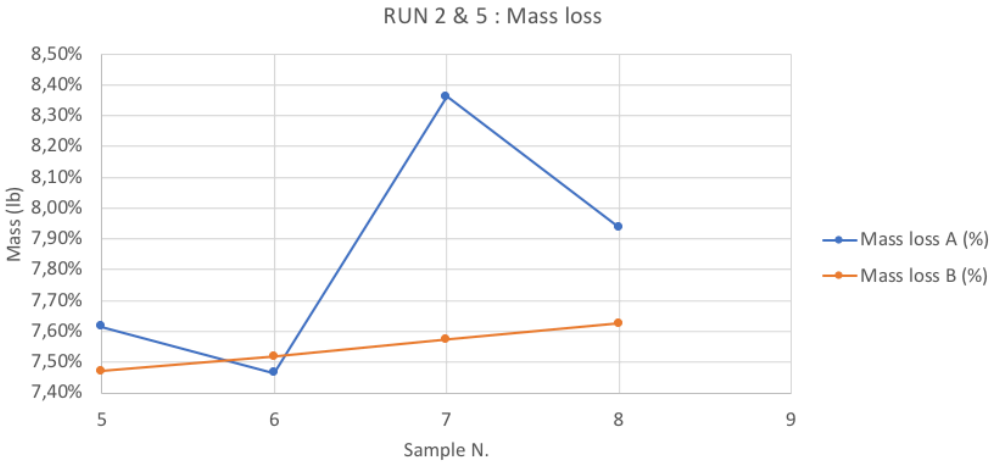
Tabella 8-25 Media % di massa persa A-B. Run 2-5. Fonte: elaborazione personale.

Sample N.	Avarage Initial mass [lb]	Avarage Final mass [lb]	Avarage Mass loss [lb]	Avarage Mass loss (%)
5	29,50	27,28	2,23	7,54%
6	28,70	26,55	2,15	7,49%
7	29,18	26,85	2,33	7,97%
8	28,60	26,38	2,23	7,78%

Figura 8-29 Media % di massa persa A-B. Run 2-5. Fonte: elaborazione personale.





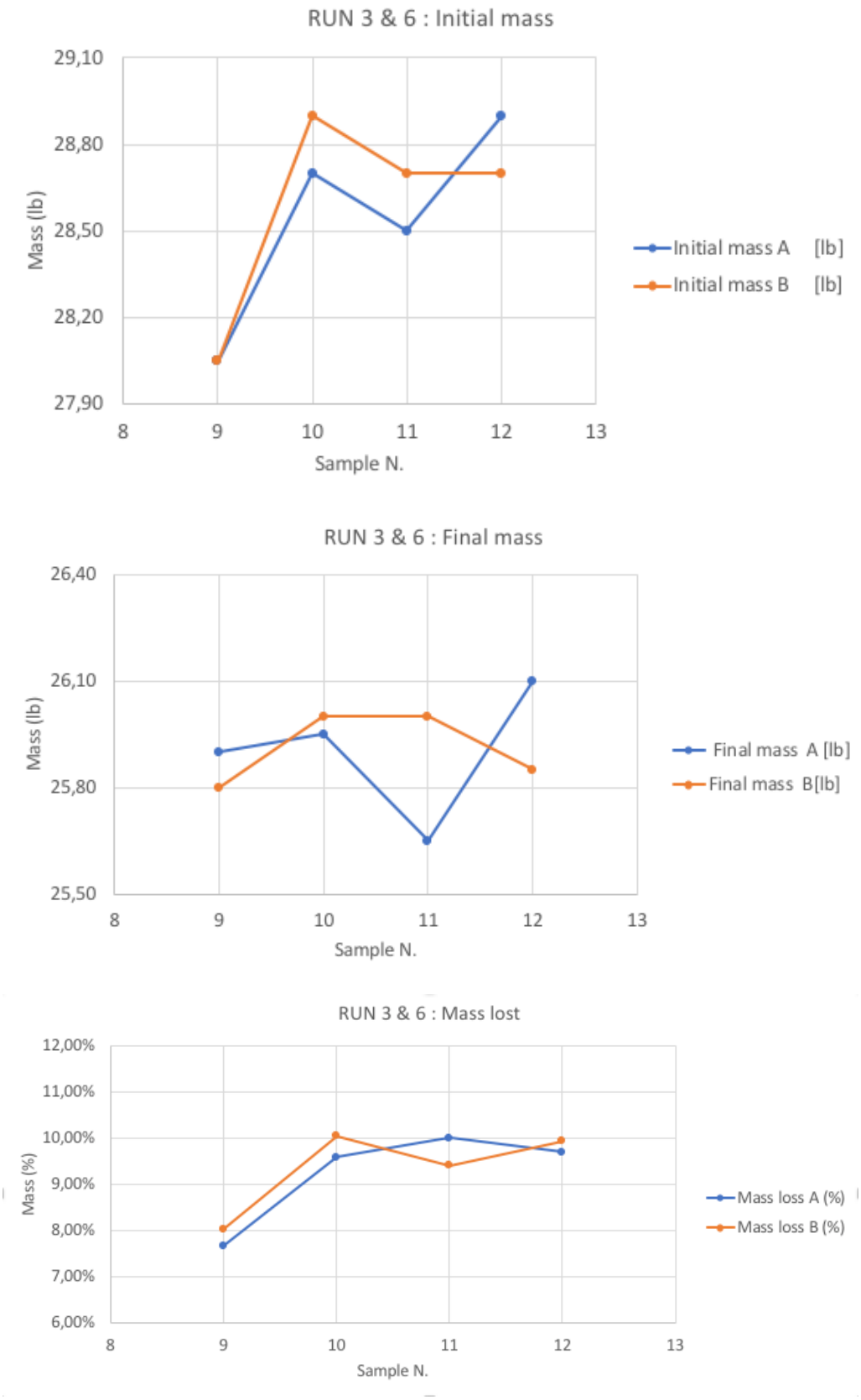


RUN 3 & RUN 6

Tabella 8-26 Media % di massa persa A-B. Run 3-6. Fonte: elaborazione personale.

Sample N.	Avarage Initial mass [lb]	Avarage Final mass [lb]	Avarage Mass loss [lb]	Avarage Mass loss (%)
9	28,05	25,85	2,20	7,84%
10	28,80	25,98	2,83	9,81%
11	28,60	25,83	2,78	9,70%
12	28,80	25,98	2,83	9,81%

Figura 8-30 Media % di massa persa A-B. Run 3-6. Fonte: elaborazione personale.



A questo si può quindi stilare una classifica finale per evidenziare qual è il comportamento in media delle miscele.

Tabella 8-27 Media % di massa persa A-B. Run 3-6. Fonte: elaborazione personale.

Highest to Lower	Mix N.	Mass loss (%)	w/c	Air Voids (%)	Fiber PP (lb)
1°	1	6,81%	0,3	5	0
2°	4	7,26%	0,3	5	4
3°	2	7,27%	0,3	10	0
4°	3	7,29%	0,3	15	0
5°	6	7,49%	0,3	15	4
6°	5	7,54%	0,3	10	4
7°	8	7,78%	0,4	10	0
8°	9	7,84%	0,4	15	0
9°	7	7,97%	0,4	5	0
10°	11	9,70%	0,5	10	0
11°	10	9,81%	0,5	5	0
12°	12	9,81%	0,5	15	0

Perdita di massa (%) – A/C

Tabella 8-28 % perdita di massa- rapporto a/c. Fonte: elaborazione personale.

W/C	Mass loss (%)	Type
0,3	6,81%	5% air voids no fibers
0,4	7,97%	
0,5	9,81%	
0,3	7,26%	5% air voids with fibers
0,3	7,27%	10% air voids no fibers
0,4	7,78%	
0,5	9,70%	
0,3	7,54%	10% air voids with fibers
0,3	7,29%	15% air voids no fibers
0,4	7,84%	
0,5	9,81%	
0,3	7,49%	15% air voids with fibers

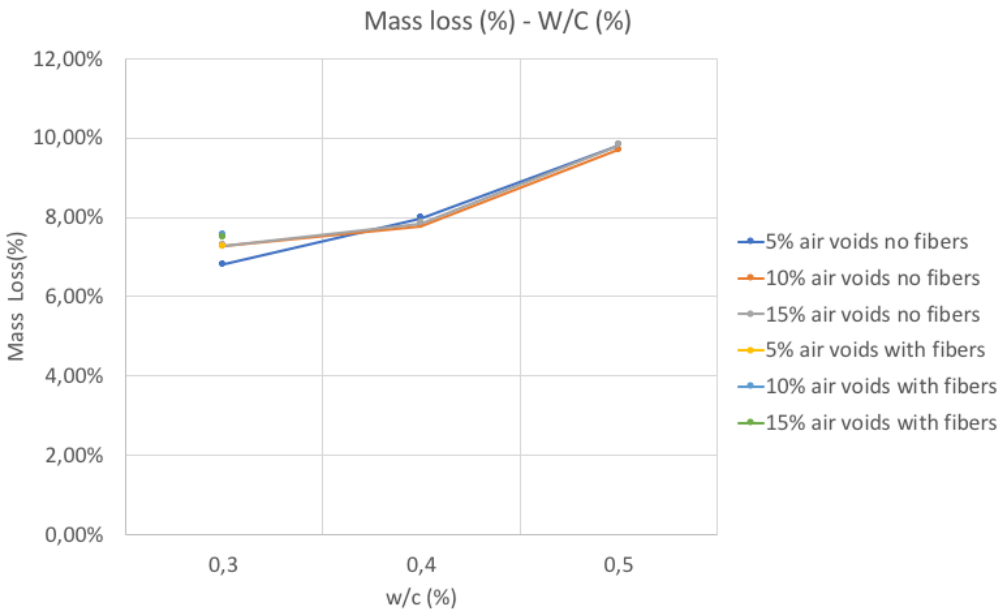


Figura 8-31 % di massa persa-rapporto a/c. Fonte: elaborazione personale.

Perdita di massa (%) – Vuoti d'aria (%)

Tabella 8-29 % perdita di massa- vuoti aria. Fonte: elaborazione personale.

W/C	Mass loss (%)	Type
5	6,81%	0,3 w/c no fibers
10	7,27%	
15	7,29%	
5	7,26%	0,3 w/c with fibers
10	7,54%	
15	7,49%	
5	7,97%	0,4 w/c no fibers
10	7,78%	
15	7,84%	
5	9,81%	0,5 w/c no fibers
10	9,70%	
15	9,81%	

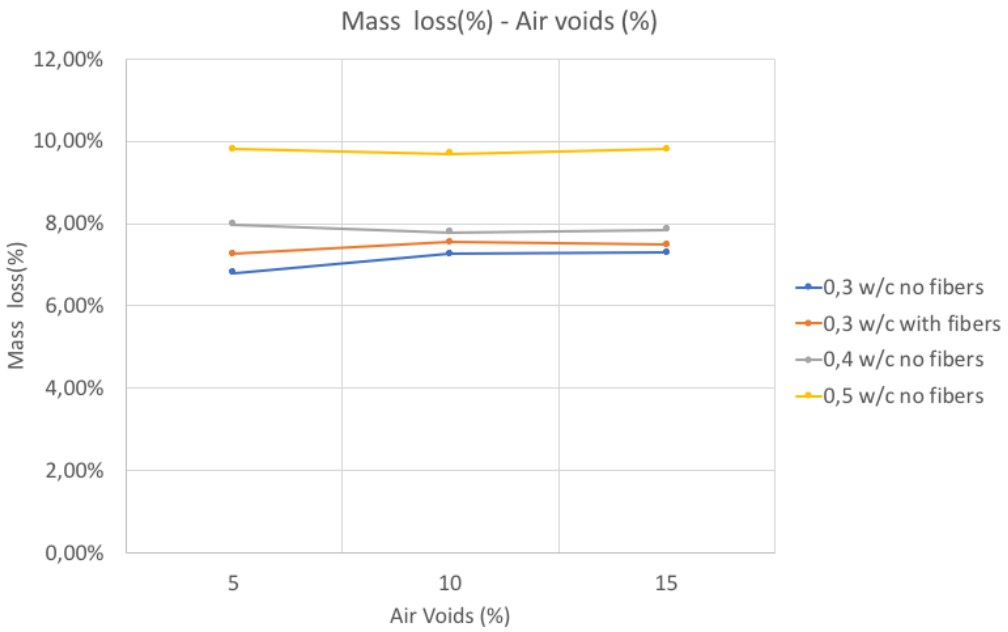


Figura 8-32 % di massa persa-vuoti d'aria %. Fonte: elaborazione personale.

Perdita di massa (%) – Quantità di fibre in polipropilene (lb)

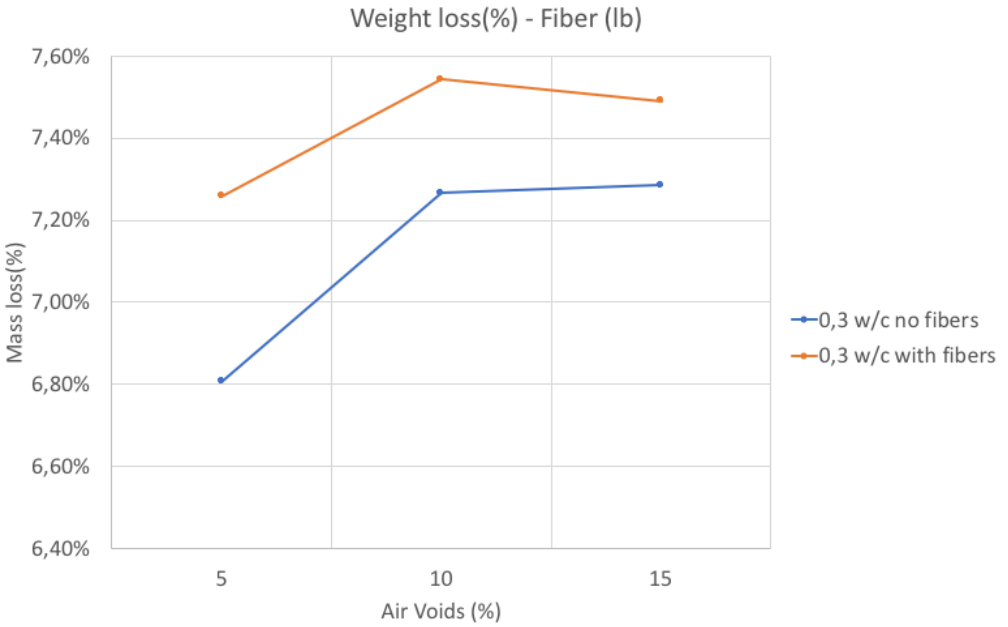


Figura 8-33 % di massa persa-quantità fibre. Fonte: elaborazione personale.

Volendo ora fare un paragone con la teoria presentata precedentemente possiamo affermare che:

- maggiore è la quantità d'acqua all'interno del provino in calcestruzzo, maggiore sarà la perdita di massa, a causa dell'elevato tenore idrico all'interno della sezione. Si nota che la velocità di fuga del vapore aumenta con il rapporto a/c. Infatti, la bassa compattezza del calcestruzzo con alto rapporto a/c crea una maggiore permeabilità e quindi rende più facile la fuoriuscita del vapore acqueo.

Tabella 8-30 Composizione delle miscele di calcestruzzo. Variazione del rapporto a/c. Fonte: rielaborazione personale dei dati da Mindeguia e al. (2000)

Caratteristica	B325	B350	B400	B500
a/c	0,62	0,55	0,44	0,36
% vuoti aria (%)	2,5%	2,3%	2,1%	1,8%
PP fibre (kg/m³)	0	0	0	0

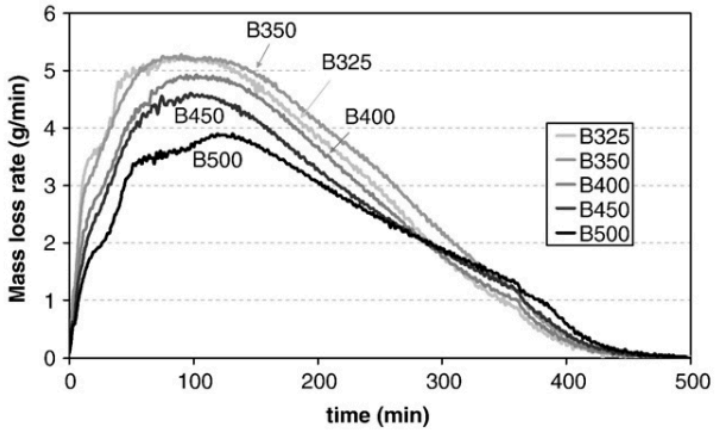


Figura 8-34 Rappresentazione della perdita di massa in relazione al tempo di esposizione ad alte temperature. Fonte: Mindeguia e al. (2000)

- maggiore è la % di vuoti all'interno del provino in calcestruzzo, maggiore sarà la perdita di massa, a causa dei numerosi vuoti presenti e dei numerosi collegamenti tra i pori, che permette una facile via d'uscita per il vapore che si crea durante l'esposizione ad elevate temperature.

Tabella 8-31 Composizione delle miscele di calcestruzzo. Variazione della % di vuoti. Fonte: rielaborazione personale dei dati da Khaliq e Waheed (2017)

Caratteristica	NAEH-1	NAEH-2	AEH4	AEH8
a/c	0,30	0,32	0,30	0,30
% vuoti aria (%)	1,5 %	2,3%	4%	8%
PP fibre (kg/m³)	0	0	0	0

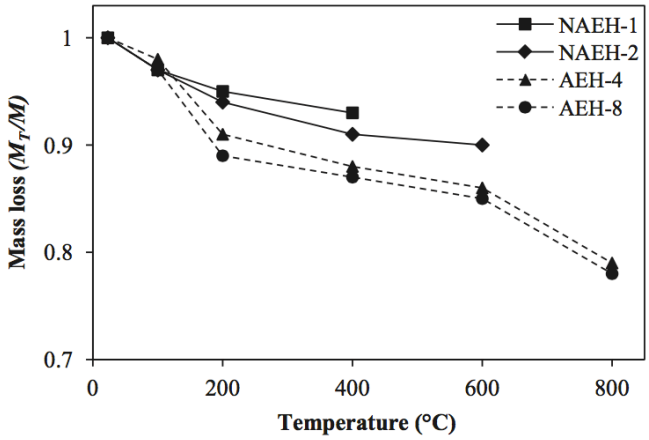


Figura 8-35 Rappresentazione della perdita di massa in relazione al tempo di esposizione ad alte temperature. Fonte: Khaliq e Waheed (2017)

- La fusione della fibra migliora i trasferimenti idrici e la velocità di vaporizzazione dell'acqua dal cuore del campione alla superficie esterna del provino.

Tabella 8-32 Composizione delle miscele di calcestruzzo. Variazione della quantità di fibre. Fonte: rielaborazione personale dei dati da Debicki (2012)

Caratteristica	HPCO	HPC0.5	HPC1	HPC2
a/c	0,30	0,32	0,30	0,30
% vuoti aria (%)	1,5 %	2,3%	4%	8%
PP fibre (kg/m³)	0	0,5	1	2

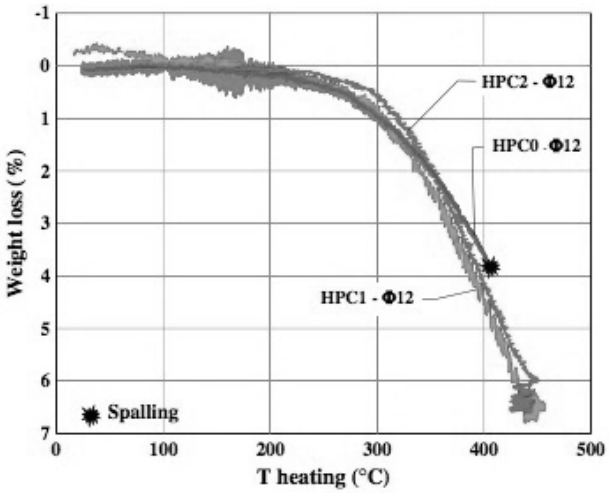


Figura 8-36 Rappresentazione della perdita di massa in relazione al tempo di esposizione ad alte temperature. Fonte: Debicki e al. (2012)

8.5.2 Rapporto tra la perdita di massa e il fenomeno di spalling

I provini oggetto di studio hanno mostrato un comportamento nettamente positivo in quanto la massa persa risulta essere frutto solo dell'acqua e del vapore presenta nella matrice cementizia. Il fenomeno di spalling si è verificato solo in maniere molto lieve in alcuni provini. Questo si è verificato nella forma di piccole schegge di materiale espulse dalla superficie. La profondità osservata risulta molto limita e il peso dei pezzi espulsi è talmente basso che risulta essere irrilevante ai fini del calcolo della massa

finale. I provini soggetti a questo fenomeno vengono mostrati ed elencati nella sezione successiva.

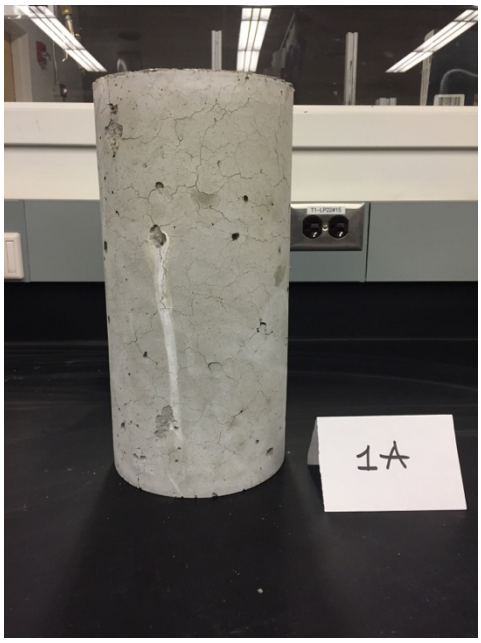
Come evidenziato da Heo e al. (2012), si ritiene che il fenomeno di spalling esplosivo sia dannoso nel momento in cui il cilindro perde il 20% della massa. Il risultato positivo risulta quindi quello di avere un perdita di massa che va da un minimo del 6,8% a un massimo del 9,8%, relativa solo all'acqua presente nella sezione. Dopo un periodo di esposizione di 90 minuti ad elevate temperature i provini risultano integri e visivamente non danneggiati dal fenomeno esplosivo dello spalling. Questo è dovuto essenzialmente alla buona permeabilità all'interno della sezione, che è riuscita a mitigare in maniera ottima gli elevati valori di pressione generati dagli accumuli di vapore. Ovviamente, bisogna sottolineare che questi risultano essere molto fragili, e con una resistenza a compressione molto bassa.

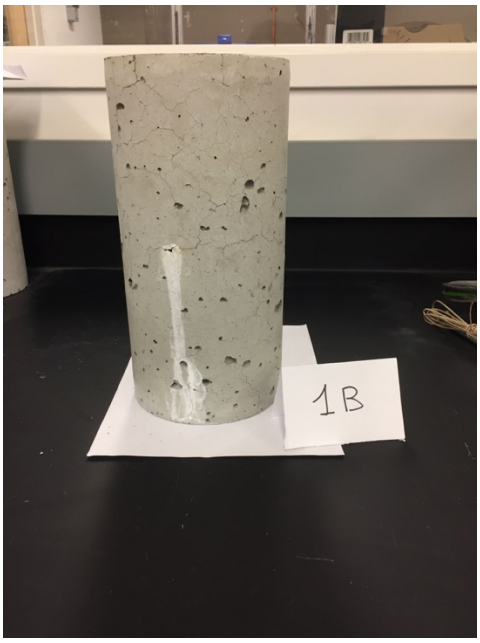
8.6 Osservazione visiva dei provini

L'osservazione visiva dei provini è stata una parte fondamentale in quanto si riesce ad individuare e classificare in maniera chiara lo stato di alterazione a cui è stato sottoposto il provino. Le fotografie, per testimoniare lo stato del provino sono state scattate in diversi momenti:

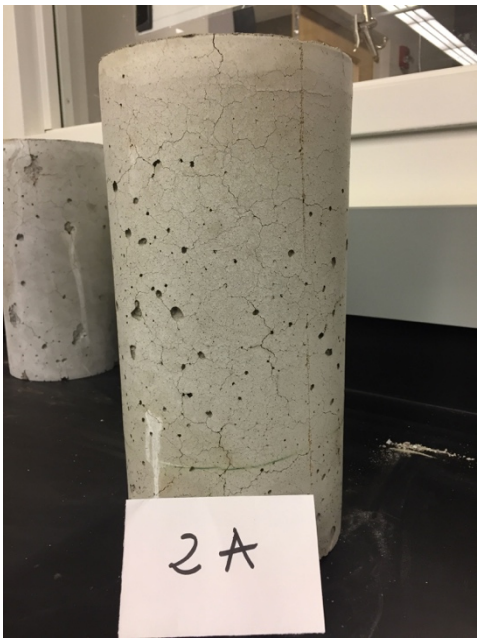
- In seguito all'apertura delle casseforme in plastica , in modo da evidenziare tutti i danni connessi alla normale realizzazione e sformatura del campione
- Durante la misurazione del peso
- All'interno del forno prima di iniziare la prova
- All'interno del forno a fine prova a 500 °F
- All'intenro del forno a 70 °F
- Fuori dal forno, singolarmente, con particolare attenzione a tutti I dettagli, con lo scopo di fornire una corretta rappresentazione di tutti
- i danni subiti dal provino

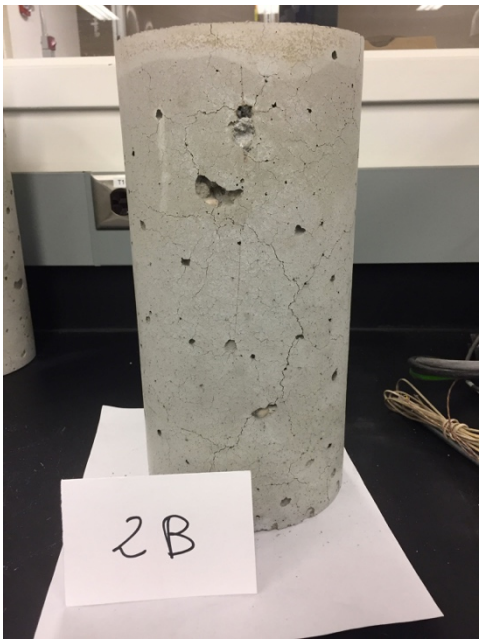
Provini n. 1



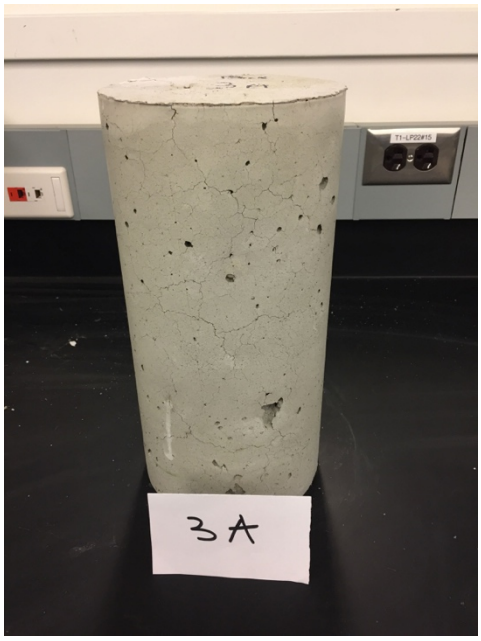


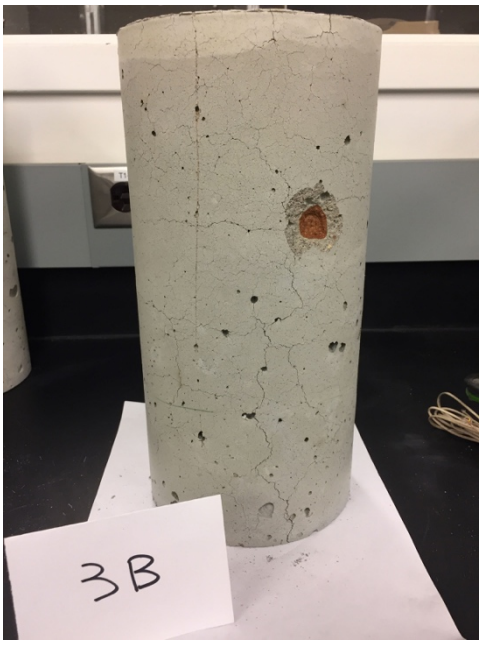
Provini n. 2



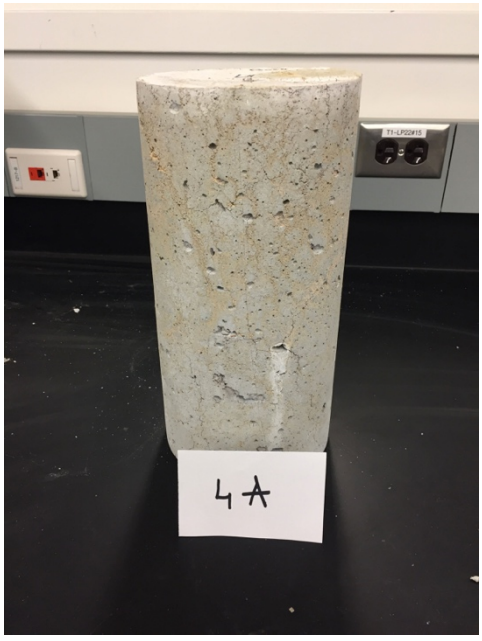


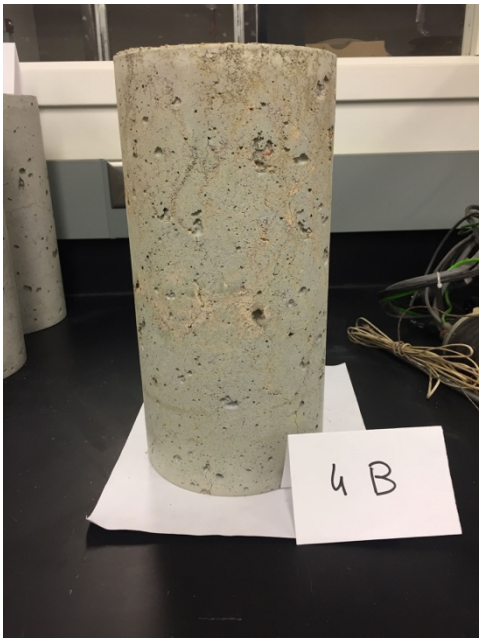
Provini n. 3



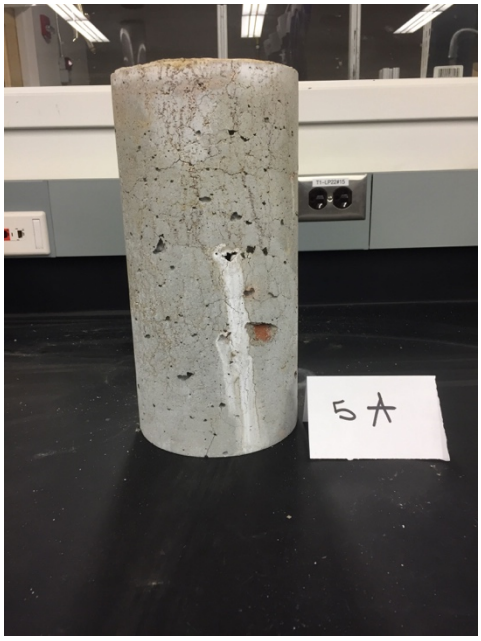


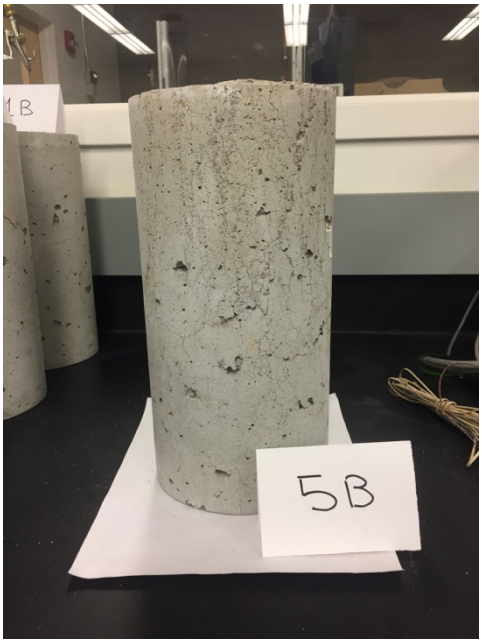
Provini n. 4



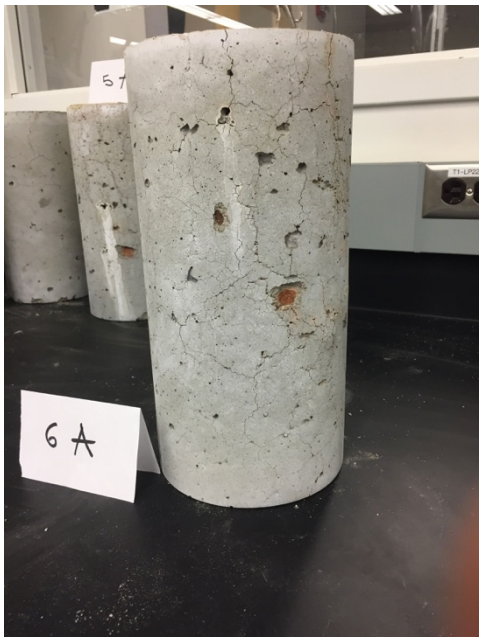


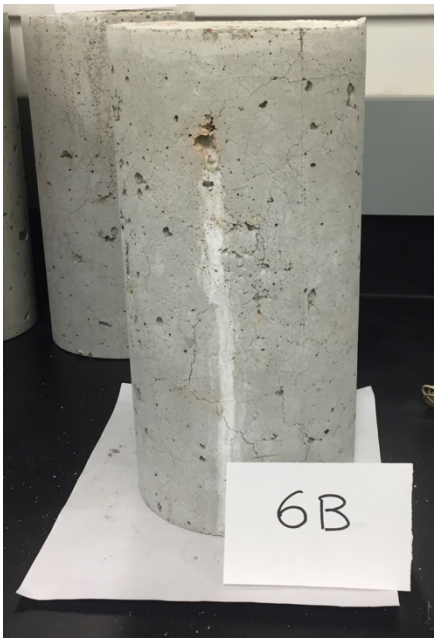
Provini n. 5



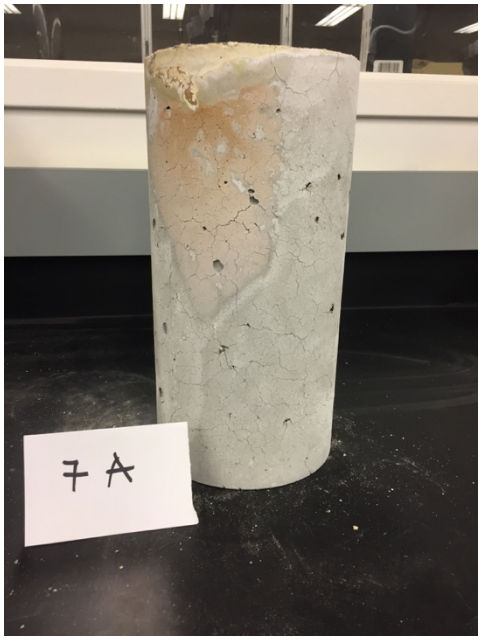


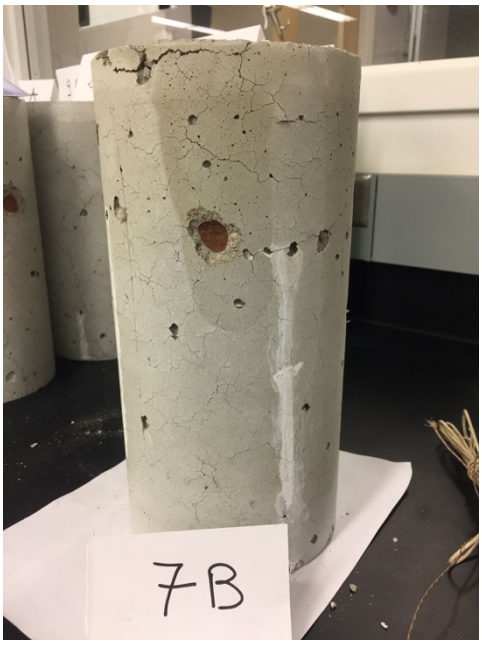
Provini n. 6



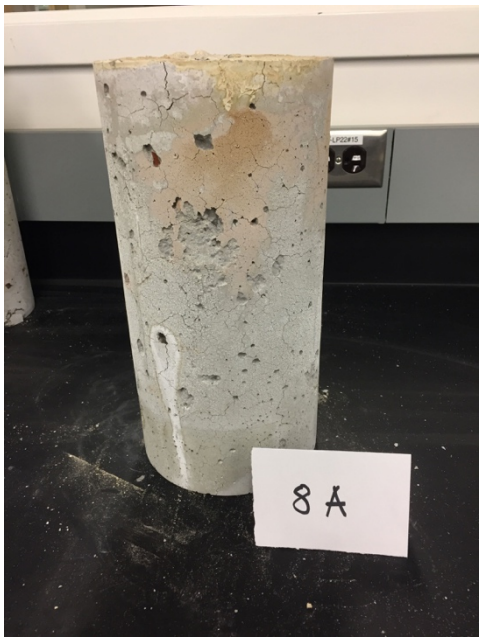


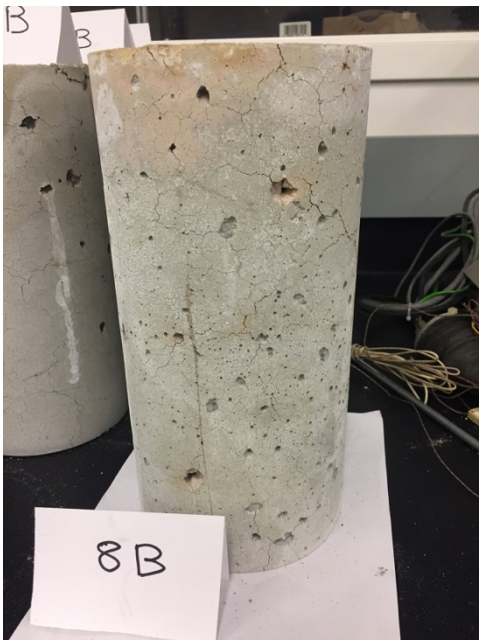
Provini n. 7



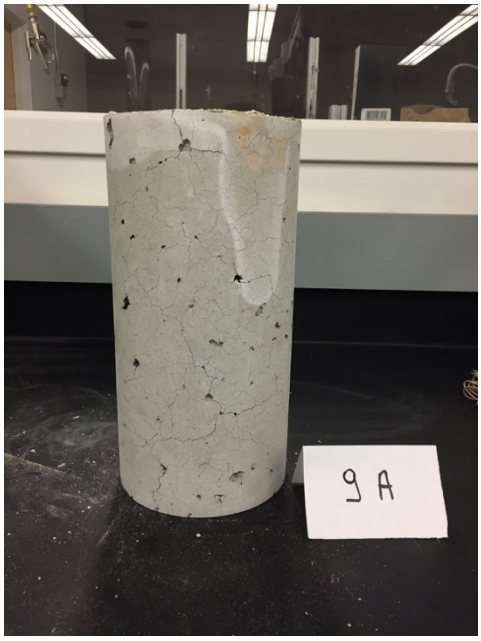


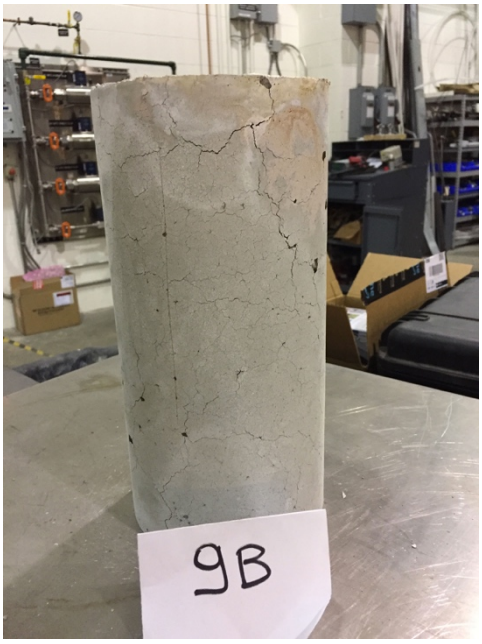
Provini n. 8



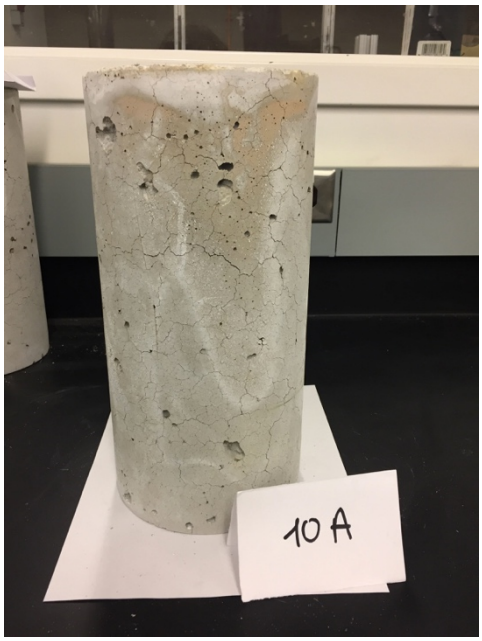


Provini n. 9

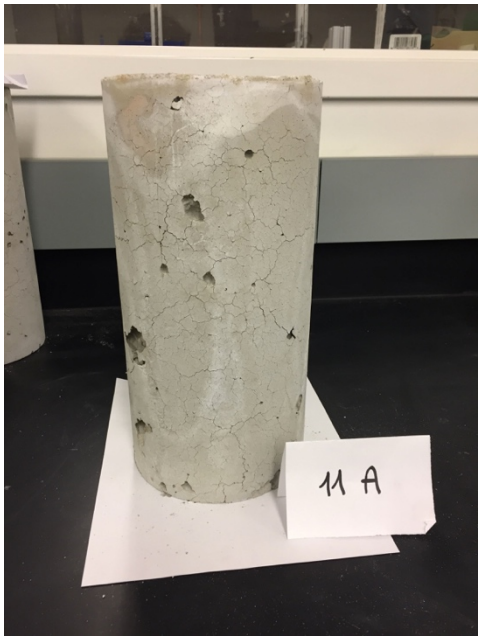




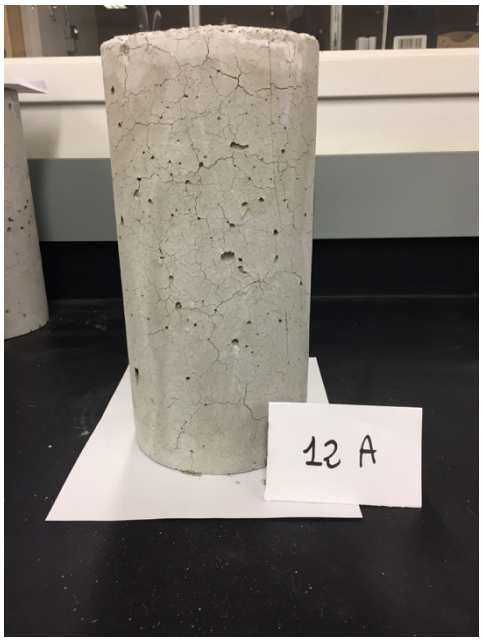
Provini n. 10



Provini n. 11



Provini n. 12



Particolari relativi al fenomeno di spalling

- **Scheggia dovuta al fenomeno di spacco esplosivo**

I provini soggetti a questo fenomeno sono:

1A, 5A, 6A, 8A, 9A,3B,7B,8B

Questo risulta essere il massimo segno di degrado a cui sono stati sottoposti. Il cratere formato dall'espulsione della scheggia solitamente risulta essere del diametro di massimo 2 cm e con una profondità di massimo 1 cm. Presenta una colorazione rossa tendente al marrone. La maggior parte delle schegge sono state trovate all'interno del contenitore che ospitava il cilindro, mentre altre erano collocate nel mezzo del forno. La parte interna risulta sempre essere contornata da uno strato più esterno meno profondo. Durante l'esperimento in alcuni casi si è sentito suono scoppiettante tipico del fenomeno.

Figura 8-37 Provino 3B.Fonte: foto. Elaborazione personale, WPI

Questo risulta essere un danneggiamento molto lieve se confrontato con il risultato ottenuto su altri provini studiati in letteratura. Un esempio si può trovare in Heo (2011), dove alcuni provini cilindrici sottoposti a una curva di fuoco ISO 834 per un'ora mostrano segni evidenti di spalling esplosivo, con la perdita e la rimozione di intera sezioni dell'elemento.

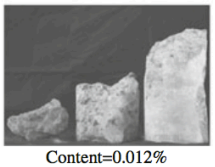
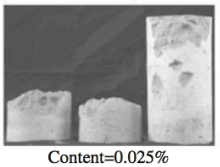
Diameter of polypropylene fibres	Number of fibres/cm^3	
	33/cm^3	66/cm^3
0.04 mm fibres	Content = 0.050%	Content=0.100%
0.02 mm fibres	 Content=0.012%	 Content=0.025%

Figura 8-38 Provini soggetti ad explosive spalling. Fonte: Heo (2012)

- **Colata bianca dai fori**

Questa caratteristica è stata riscontrata nella maggior parte dei provini. A seguito dei difetti dovuti alla compattazione e alla vibrazione durante la fase di fabbricazione, numerosi provini presentano dei grossi fori. Da questi risulta essere uscito parte di materiale, che colando ha conferito la colorazione bianca alla superficie.

Figura 8-39 Provino 7B. Fonte: foto. Elaborazione personale, WPI

- **Superficie di colore rosa**

I provini soggetti a questo fenomeno sono:

4A,5A,7A,9A,10A,11A

4B,8B,9B

Molti provini presentano ampie porzioni della superficie striate di rosa. Questa colorazione è tipica della disidratazione dell'idrossido di calcio e trasformazione del quarzo dalla forma α alla forma β che avvengono intorno ai 600 °C.

Figura 8-40 Provino 7A. Fonte: foto. Elaborazione personale, WPI

- **Crepe profonde**

Questo fenomeno si è sviluppato solo nel provino 12B.

Figura 8-41Fonte: foto. Provino 12B.Elaborazione personale, WPI

- **Piccole crepe**

Ovviamente questa tipologia di danneggiamento si ha in tutte le tipologie di calcestruzzo . La cosa che si nota facilmente è che la maggior parte si dipartono dai pori presenti sulla superficie.

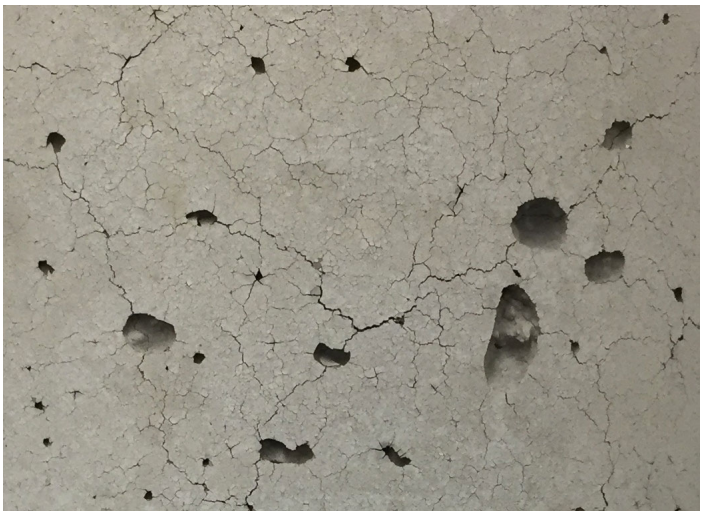


Figura 8-42 Provino 1B. Fonte: foto. Elaborazione personale, WPI

8.7 Determinazione della resistenza a compressione

In seguito all'osservazione visiva dei campioni e a un periodo di stoccaggio nel laboratorio si è proceduto con i test per il calcolo della resistenza a compressioni dei cilindri in seguito all'esposizione ad elevate temperature. Per fare questo si è utilizzata una macchina standard all'interno del laboratorio di Ingnegneria Civile del WPI. Essendo i cilindri molto fragili si è impostato un incremento del carico minore rispetto a una normale prova a compressione: si è utilizzato 1100 psi/min (7,5 Mpa/min).

Figura 8-43Prova a compressione provino 1A. Fonte: foto. Elaborazione personale, WPI

I cilindri hanno mostrato un comportamento estremamente fragile, in quanto hanno perso completamente tutta la loro resistenza. Questo comportamento è dovuto essenzialmente alla perdita di tutta l'acqua presente all'interno della matrice cementizia. Inoltre si è dovuto ricorrere alle prove distruttive in quanto si è provato a utilizzare lo sclerometro ma questo non è stato in grado di leggere una resistenza a compressione minore di 10 Mpa.

Figura 8-44 Prova a compressione provino1B. Fonte: foto. Elaborazione personale, WPI

Per evitare la dispersione dei pezzi si è utilizzata della piccola trasparente di plastica in modo da contenere i pezzi espulsi. Di seguito vengono esposti i risultati ottenuti.

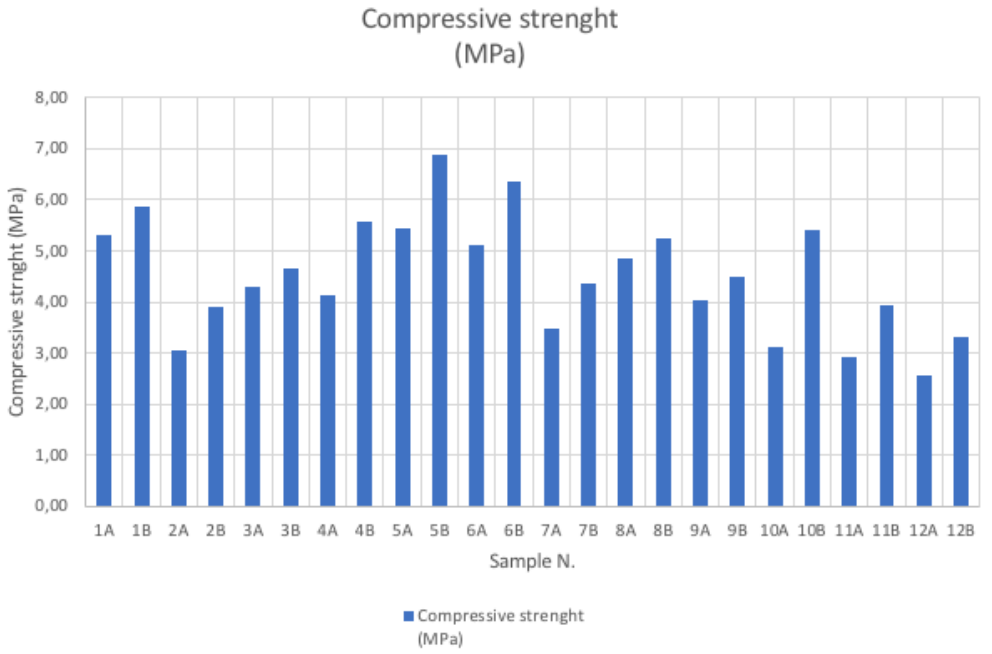
Tabella 8-33 Resistenza a compressione. Fonte: elaborazione personale.

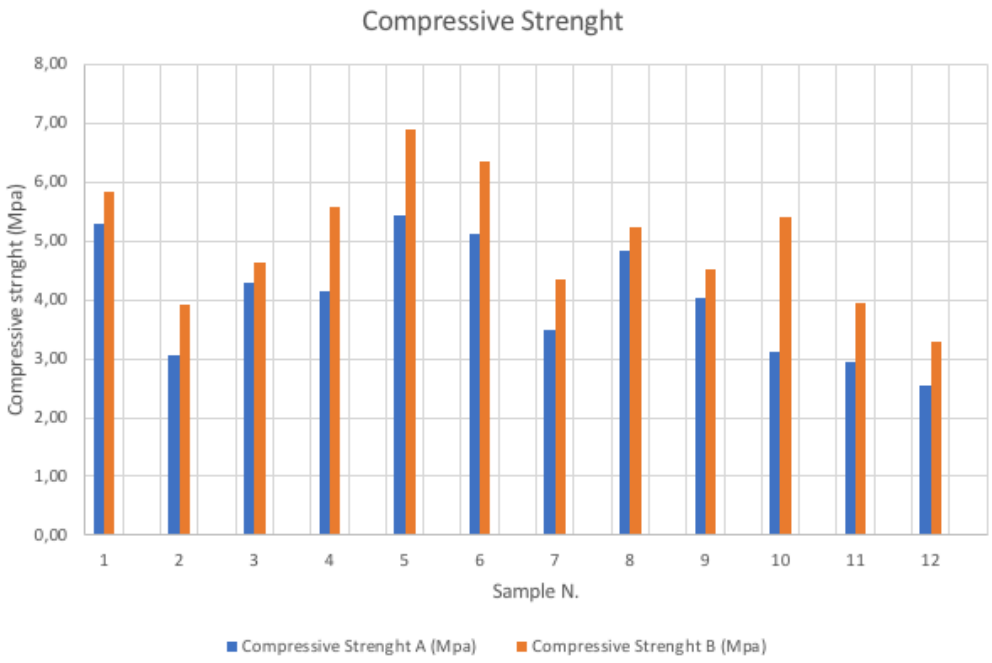
	Compressive strenght (psi)	Compressive strenght (MPa)	Peak Load (lbf)	Peak Load (Kg)
1A	768,65	5,30	21733,00	9857,92
1B	848,30	5,85	23985,00	10879,41
2A	442,17	3,05	12502,00	5670,81
2B	567,55	3,91	16047,00	7278,80
3A	622,90	4,29	17612,00	7988,67
3B	672,94	4,64	19027,00	8630,50
4A	600,83	4,14	16988,00	7705,63
4B	807,23	5,57	22824,00	10352,79
5A	789,37	5,44	22319,00	10123,73
5B	998,86	6,89	29381,00	13327,00
6A	741,59	5,11	20968,00	9510,92
6B	920,16	6,34	26019,00	11802,02
7A	506,50	3,49	14347,00	6507,69
7B	630,50	4,35	17827,00	8086,19
8A	703,04	4,85	19878,00	9016,51
8B	760,80	5,25	21511,00	9757,23
9A	586,15	4,04	16590,00	7525,10
9B	653,35	4,50	18473,00	8379,21
10A	452,07	3,12	12782,00	5797,82
10B	782,02	5,39	22111,00	10029,38
11A	425,79	2,94	12039,00	5460,80
11B	571,54	3,94	16160,00	7330,05
12A	370,80	2,56	10484,00	4755,46
12B	478,95	3,30	13545,00	6143,91

Migliore comportamento

Peggior comportamento

Figura 8-45 Resistenza a compressione Fonte: elaborazione personale.





Dal confronto tra la serie A e B si nota come la resistenza della serie B sia sempre maggiore, seppur di poco, della prima serie. Questo probabilmente è legato alle condizioni di fabbricazioni dei provini.

Volendo procedere nelle analisi, con lo stesso metodo utilizzato per la perdita di massa possiamo visualizzare l'andamento in relazione al contenuto iniziale d'acqua e alla percentuale dei vuoti d'aria.

Perdita di massa (%) – A/C

Tabella 8-34 Compressive strenght-w/c. Fonte:elborazione personale

W/C	Compressive strenght (MPa)	Type
0,3	5,57	5% air voids no fibers
0,4	3,92	
0,5	4,25	
0,3	4,85	5% air voids with fibers
0,3	3,44	10% air voids no fibers
0,4	5,05	
0,5	3,44	
0,3	3,30	10% air voids with fibers
0,3	4,47	15% air voids no fibers
0,4	4,27	
0,5	2,93	
0,3	5,73	15% air voids with fibers

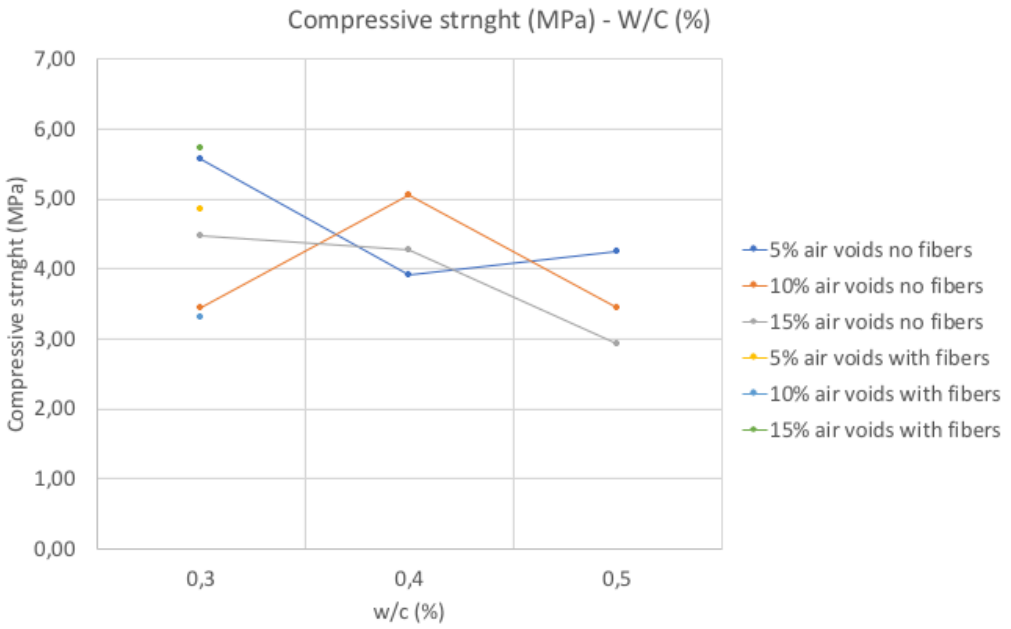


Figura 8-46 Compressive strenght-w/c. Fonte:elborazione personale

Da questo grafico non risulta chiaro come l'incremento del rapporto acqua/cemento abbia influenzato la resistenza a compressione

Perdita di massa (%) – Vuoti d'aria (%)

Tabella 8-35 Compressive strenght-vuoti aria. Fonte: elborazione personale

W/C	Compressive strenght (MPa)	Type
5	5,57	0,3 w/c no fibers
10	3,48	
15	4,47	
5	4,85	0,3 w/c with fibers
10	6,16	
15	5,73	
5	3,92	0,4 w/c no fibers
10	5,05	
15	4,27	
5	4,25	0,5 w/c no fibers
10	3,44	
15	2,93	

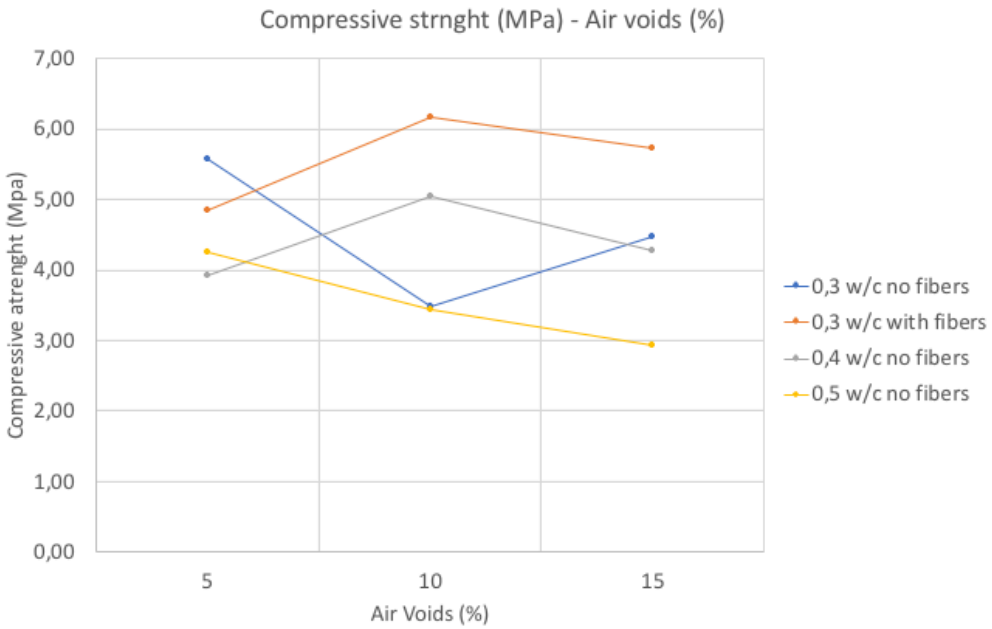


Figura 8-47 Compressive strenght-vuoti aria. Fonte:elborazione personale

Per quanto riguarda la percentuale dei vuoti, in questa serie non si riesce a stabilire un netta differenza di comportamento tra i diversi livelli di percentuale di vuoti 5%, 10% e 15%.

Come sviluppo successivo si è già pianificato di studiare la microstruttura del calcestruzzo attraverso un microscopio elettronico a scansione. Durante lo svolgimento delle prove disruttive sono stati raccolti frammenti dei provini da sottoporre a questo test. Importanza del test è quello di poter osservare come la struttura delle molecole del calcestruzzo cambi ad elevate temperature. Questo potrebbe risultare molto utile per la scelta dei componenti e per fare un confronto tra le diverse miscele.

9 Sviluppi successivi

In quanto obiettivo della nostra sperimentazione è quello di riuscire ad ottimizzare la composizione del calcestruzzo in modo da riuscire ad ottenere contemporaneamente

- la più elevata resistenza a compressione unita a un'elevata duttilità post-fessurazione
- la migliore resistenza a fuoco, ovvero alla migliore risposta al fenomeno di spalling esplosivo.

Novità di questa ricerca è lo studio su entrambe le proprietà con la possibilità di incrementare notevolmente la tecnologia del calcestruzzo ed ottenere standard di sicurezza molto più elevati anche in condizioni estreme.

Oltre al calcolo della temperatura all'intenro del cilindro attraverso la temperatura superficiale e lo studio della struttura attraverso l'analisi SEM, il test in programma è la prova a compressione monoassiale su provini non sottoposti alle elevate temperature. Questo verrà svolto presso il Politecnico di Torino.

9.1 Test prova a compressione

Questo studio sarà svolto in un periodo successivo con l'obbiettivo di andare a determinare la resistenza a compressione e la curva sforzo deformazione delle 12 miscele oggetto di studio. Le prove verranno svolte all'interno del Politecnico di Torino su un totale di 36 provini (3 per ogni tipologia di miscela) più due extra-provini per eseguire le prime prove di collaudo.

La prova di compressione consiste nel posizionare il provino, tra i piatti di acciaio di una pressa idraulica, senza alcuna interposizione di materiale deformabile trai i piatti della macchina. Il carico viene aumentato gradualmente in modo che si verifichi un incremento di tensione di compressione pari a 0,2-1,0 N/(mm^{2}s). All'interno del certificato che accerta la validità della prova oltre al valore di rottura ottenuto (N/mm^2) sono dichiarati: la data della prova, il tipo di rottura, il peso del provino ed eventuali difetti. La tipologia di rottura è un indice strettamente correlato alla resistenza del calcestruzzo. Il tipo di rottura è soddisfacente se è del tipo:

- Bipiramidale
- Sfaldamento piramidale
- Sfaldamento obliquo
- Sgretolamento

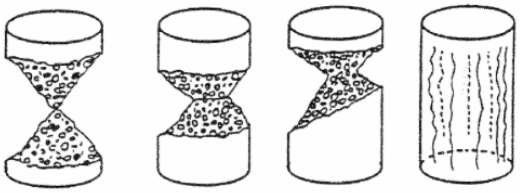


Figura 9-1 Rappresentazione della rottura corretta di un provino cilindrico di calcestruzzo. Fonte: Materiale calcestruzzo. Università firenze

La formazione delle "piramidi di rottura" (visibile nei primi tre esempi), con le facce a 45°, è conseguenza degli sforzi tangenziali, che hanno origine dalla compressione. Tali sforzi raggiungono il massimo del valore in corrispondenza dei piani inclinati a 45°. Questo è molto più comune nel provino cubico e meno nel provino cilindrico. In quest'ultimo, visti i rapporti tra altezza e diametro, l'effetto di confinamento non si propaga alla zona centrale, che, quindi, non risulta soggetta ad azioni taglianti. Nella maggior parte dei casi sarà caratterizzato da una serie di fessure verticali.

In altro caso si possono verificare delle rotture non soddisfacenti, che possono essere dovute ad insufficiente attenzione durante i procedimenti di prova (posizionamento e/o rettifica del provino), a difetti della macchina di prova, o ad una cattiva qualità del provino.

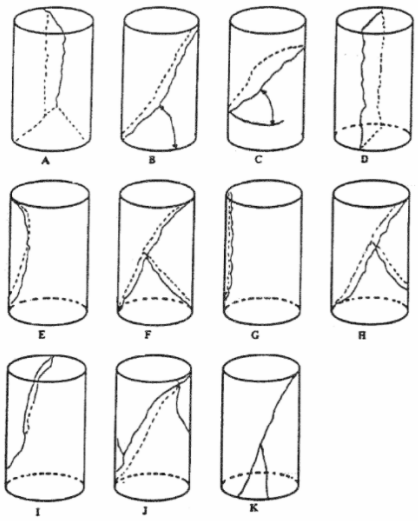


Figura 9-2 Rappresentazione delle rotture non accettate di provini cilindrici in calcestruzzo. Fonte: Materiale calcestruzzo. Università firenze

Il risultato ottenuto dalla prova a rottura è il valore di carico massimo a rottura F (N). La resistenza a compressione è data quindi dall'equazione

$$f_c = \frac{F}{A_C}$$

con:

- f_c= resistenza alla compressione (N/mm2)
- Ac= area della sezione traversale del provino su cui agisce la forza(mm2)

I provini verranno inoltre dotati di estensimetri sulle facce laterali con l'obiettivo di ottenere l'andamento della curva di deformazione post-picco di rottura. Si riesce ad ottenere così il legame costitutivo tensione-deformazione del calcestruzzo. La prova viene condotta imponendo spostamenti crescenti e misurando le corrispondenti forze. In questo modo si può seguire anche il tratto decrescente del legame, in cui a un incremento di spostamento corrisponde una diminuzione della forza applicata (softening). Il legame costitutivo del calcestruzzo è caratterizzato da un primo breve tratto (per valori di tensione dell'ordine del 30% della tensione di picco) che, a livello macroscopico, può essere considerato elastico lineare. Si verifica, quindi un comportamento non lineare, con riduzione di rigidezza,

fino al raggiungimento della tensione di picco. Al crescere dello spostamento, si verificherà un comportamento post-picco di tipo degradante, con riduzione del carico al crescere della deformazione, fino al raggiungimento della rottura.

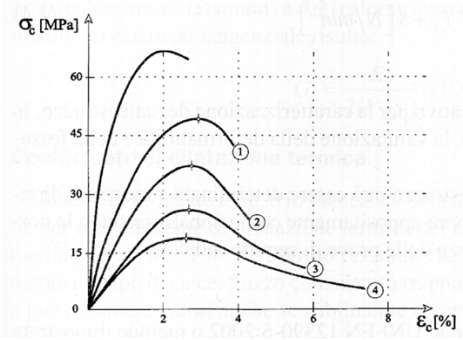


Figura 9-3 Rappresentazione dell'andamento della curva sforzo-deformazione per diverse tipologie di calcestruzzo. Fonte: Materiale calcestruzzo. Università firenze

Le curve in figura corrispondono a calcestruzzi di diversa resistenza.

10 Conclusione

Obbiettivo principale del lavoro è stato quello di studiare il comportamento del calcestruzzo sottoposto ad elevate temperature al variare del rapporto acqua/cemento, della percentuale di aria contenuta nella sezione e della presenza o meno di fibre. L'attenzione è stata posta particolarmente sul fenomeno di spacco esplosivo.

Il fenomeno dell'explosive spalling è stato in primo luogo studiato da un punto di vista teorico, definendo le principali teorie riguardo alle sue cause (processo termo-igrometrico, processo termo-meccanico e combinazione dei due), i fattori che lo influenzano, le conseguenze sull'elemento di calcestruzzo colpito e i principali modelli di previsione utilizzati. In secondo luogo sono stati analizzati una vasta serie di esperimenti precedentemente condotti per acquisire una maggiore competenza in materia, per studiare come il comportamento dei provini varia in relazione alle caratteristiche sopra citate e soprattutto per avere un database di conoscenze, utili per organizzare, pianificare e svolgere al meglio i test sperimentali sui nostri provini.

Le condizioni al contorno per lo svolgimento dei test sono state definitive insieme al direttore del Combustion Lab presso il Worcester Polytechnic Institute avendo così la possibilità di unire una competenza altamente tecnica relativa all'utilizzo di macchinari con la teoria derivata dallo studio del fenomeno. I 24 provini sono stati così sottoposti a una curva standard tempo-temperatura ASTM E-119 per una durata di 90 minuti. In seguito ad aver stilato una procedura univoca per la realizzazione di tutti i test si è così potuto iniziare.

La procedura è così articolata:

- Annotazione del peso iniziale del provino non appena tolto dalla casseforme di plastica
- Analisi dello stato iniziale del provino. Documentazione fotografica
- Monitoraggio costante della temperatura superficiale del provino durante tutto il periodo di esposizione al fuco e durante le 8 ore seguenti
- Annotazione del peso finale del provino in seguito all'esposizione ad elevate temperature
- Attenta osservazione visiva dei provini, attraverso l'analisi dei fenomeni degradanti subiti. Documentazione fotografica.
- Calcolo della resistenza media a compressione attraverso la prova a compressione monoassiale distruttiva

I test pianificati per il futuro sono:

- Prova a compressione sulla stessa tipologia di provini non sottoposti ad elevate temperature
- Analisi SEM di alcuni frammenti di calcestruzzo appartenenti alle diverse miscele

Il parametro fondamentale monitorato, oltre all'osservazione visiva, è stato la perdita di massa. Questo è un dato fondamentale che ci ha permesso di capire in modo analitico le trasformazioni avvenute all'interno dei provini e ci ha permesso di confrontarli tra di loro.

Risultato sorprendente è stato quello di osservare che tutti i cilindri mostrano una percentuale relativa alla massa che va da un minimo di 6,8 % (miscela 1) a un massimo del 9,8 % (miscela 12). Questo valore fa riferimento solo all'evaporazione dell'acqua presente all'interno della sezione, in quanto non si è verificato il distaccamento di grandi porzioni di materiale solido. Il fenomeno di spalling è stato osservato solo in forma molto leggera ed ha coinvolto esclusivamente la parte superficiale di alcuni provini. Questo risultato mostra in maniera chiara ed evidente che la permeabilità della sezione ha svolto un ruolo fondamentale in tutte le tipologie di miscele, permettendo al vapore di evadere dalla sezione senza comportare alcun

danneggiamento. Analizzando singolarmente il rapporto acqua/cemento, la percentuale di vuoti d'aria e il contenuto di fibre si può dire che:

- Rapporto acqua/cemento: l'andamento della perdita di massa risulta essere lineare e crescente con l'aumentare del rapporto a/c. Infatti si è ottenuto un minimo con il rapporto 0,3 e un massimo con il rapporto 0,5. Il calcestruzzo con un alto livello idrico mostra una bassa compattezza, e quindi un'alta permeabilità consentendo così al vapore acqueo di evadere facilmente dalla sezione. L'andamento risulta molto simile in tutte e tre le miscele.
- Percentuale di vuoti d'aria: nonostante le aspettative positive relative al miglior comportamento dei calcestruzzi con un alto livello d'aria, la % della perdita di massa ha un andamento casuale se messo in relazione alle diverse percentuali di vuoti. Senza dubbio un alta presenza di vuoti aiuta ad avere una maggiore permeabilità ed una maggiore rete di pori per far evadere il vapore dalla sezione.
- Contenuto di fibre in polipropilene: considerando la presenza o meno delle fibre in PP si può affermare che la massa persa è maggiore all'interno della miscela fibro-rinfrozata. Questo è dovuto al fatto che la fusione della fibra migliora i trasferimenti idrici e la velocità di vaporizzazione dell'acqua dal cuore del campione alla superficie esterna del provino.

Risulta quindi difficile definire la miscela con il miglior comportamento al fuoco, in quanto hanno mostrato tutte risultati positivi. I provini hanno reagito in maniera ottimale mostrandosi tutti prevalentemente intatti e non mostrando nessun grande danno, con una perdita della percentuale di massa proporzionale al loro rapporto d'acqua e al contenuto di fibre.

Al contrario, aspetto negativo risultano essere i dati ottenuti dalla prova a compressione. I provini sono risultati estremamente fragili privi di resistenza a compressione. La resistenza a compressione media risulta essere pari a 4,5 MPa, con un minimo di 2,56 MPa per il provino 12A e un massimo di 6,9 MPa per il provino 5B. Questo è dovuto essenzialmente al fato che all'interno dei cilindri non è più presente acqua e che la materia interna risulta altamente segregata e non più compatta come a temperatura

normale. In questo caso non si è riusciti a trovare una spiegazione all'andamento delle misurazioni che risultano avere un andamento non propriamente collegato alla composizione della miscela. Importante sarà svolgere i test sui provini non soggetti a degrado per evidenziare il cambiamento della resistenza da una condizione normale a una condizione estrema. Questo dato sarà di fondamentale importanza per definire attraverso un criterio qual è la miscela con migliori proprietà meccaniche e miglior resistenza al fuco.

Per quanto riguarda i dati relativi alla temperatura questi sono stati di fondamentale importanza per il monitoraggio dell'evoluzione di quest'ultima sulla superficie del provino durante tutto lo svolgimento del test, consentendo la possibilità di individuar i massimi, i minimi e la differenza rispetto alla temperatura interna al forno. Inoltre i dati acquisiti saranno utilizzati per implementare un modello che permetta il calcolo della temperatura nel cuore del provino, partendo da quella superficiale.

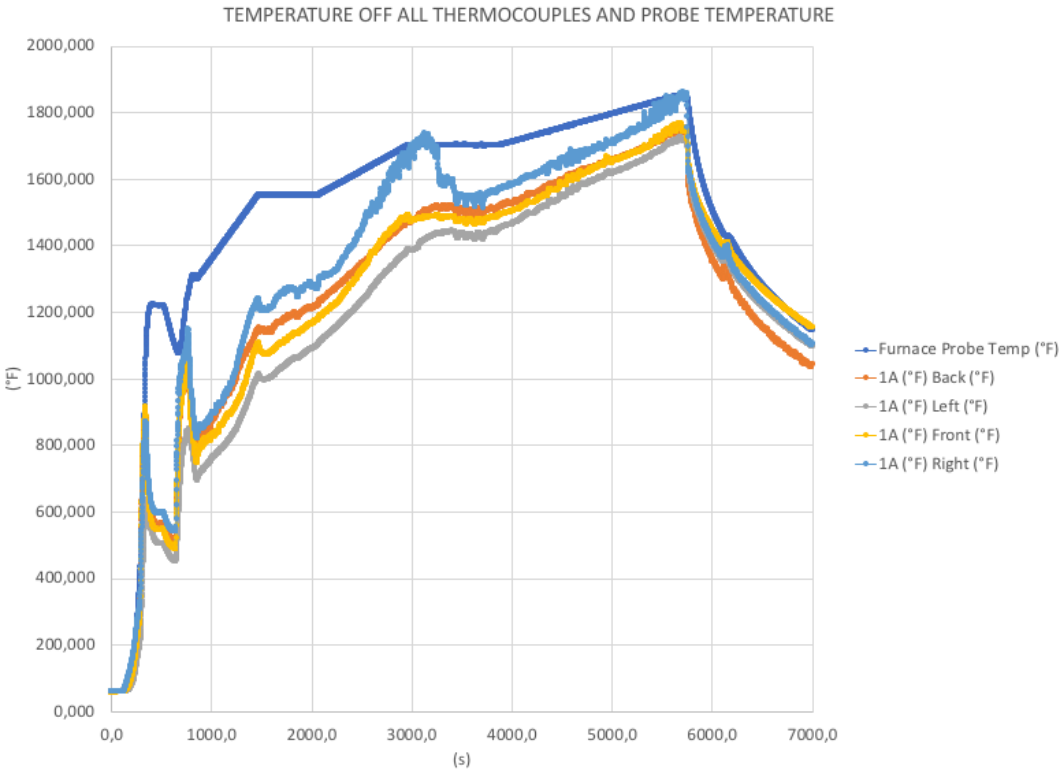
Si può così dire che questo elaborato si propone di offrire un contributo allo studio dello spacco esplosivo (explosive spalling) offrendo uno stato dell'arte riguardo le ricerche svolte fino ad oggi e un contributo all'avanzamento dello studio sperimentale del comportamento al fuoco del calcestruzzo, apportando nuove conoscenze e nuovi dati utili riguardo allo studio della composizione di una miscela che possa essere in grado di resistere in maniera "ottimale" alle elevate temperature.

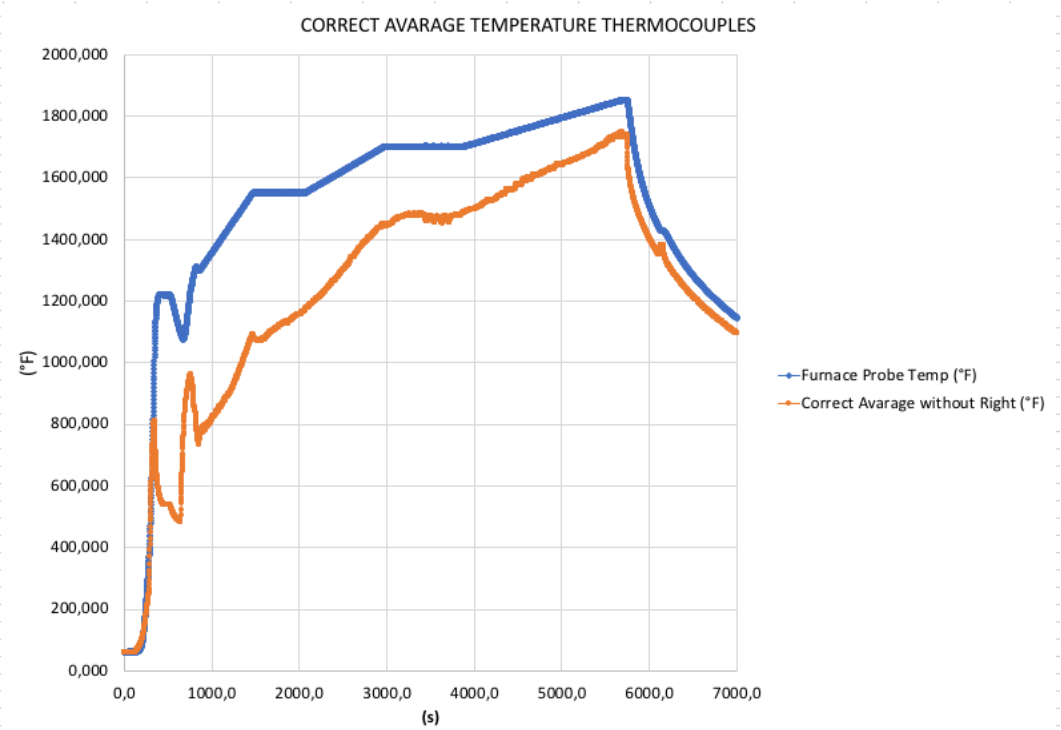
11 Allegati

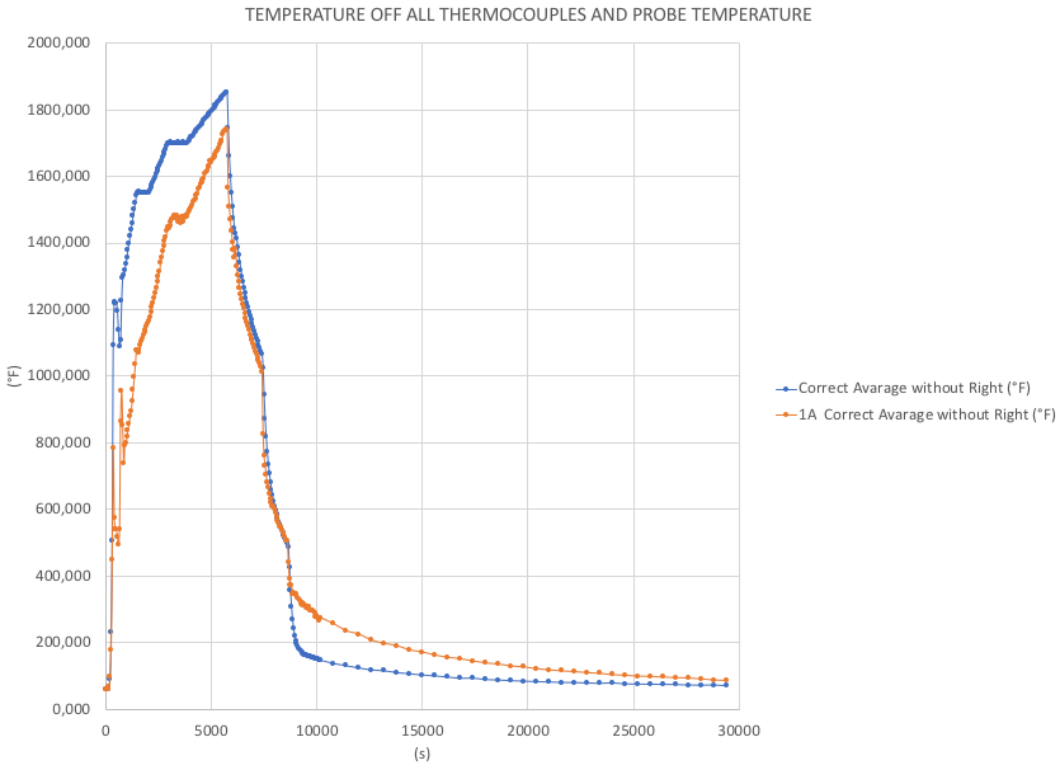
11.1 Dati temperatura

RUN 1

Sample 1A

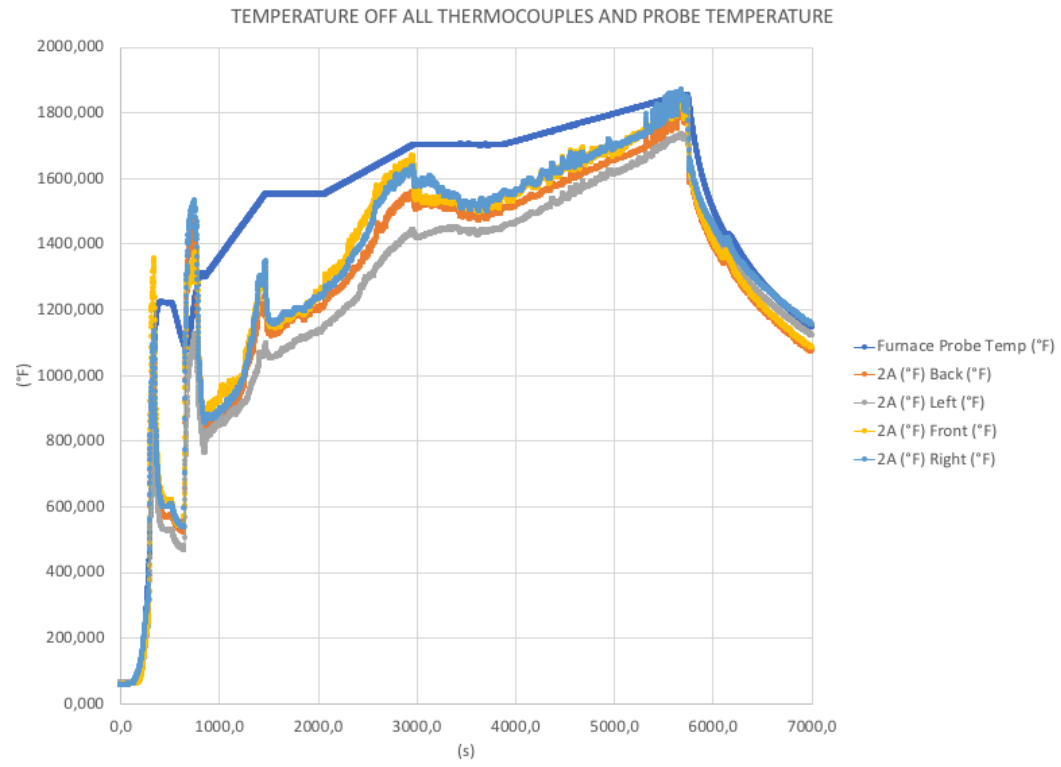


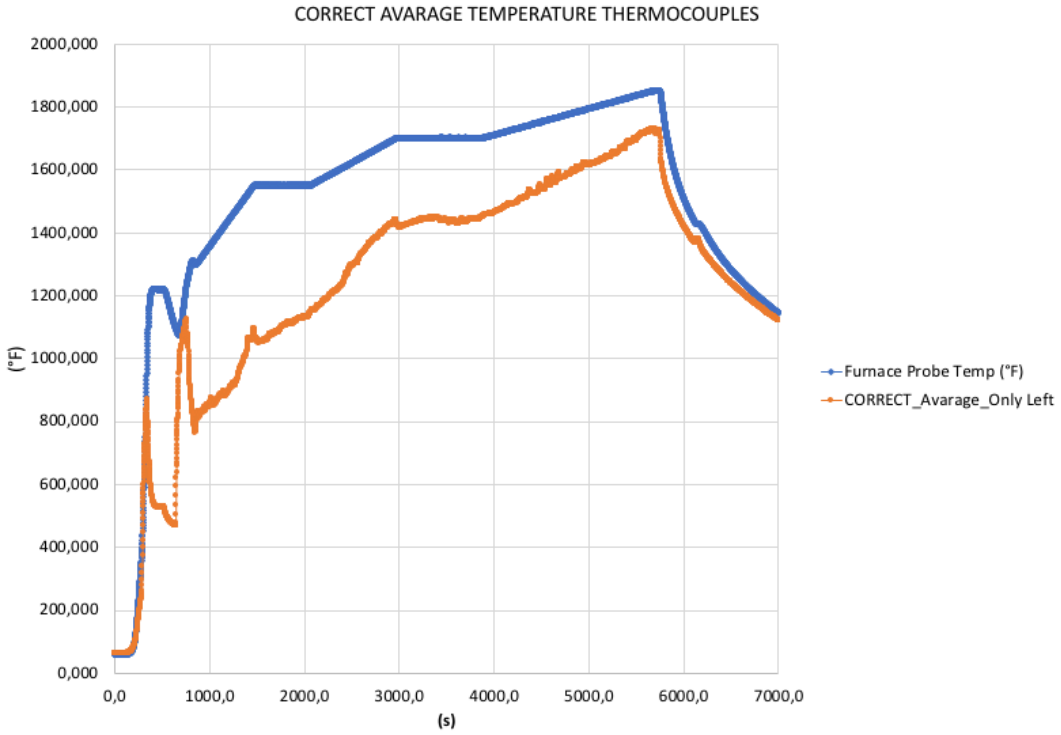

CORRECT AVARAGE TEMPERATURE THERMOCOUPLES
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0,0
1000,0
2000,0
3000,0
4000,0
5000,0
6000,0
7000,0
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
Correct Avarage without Right (°F)

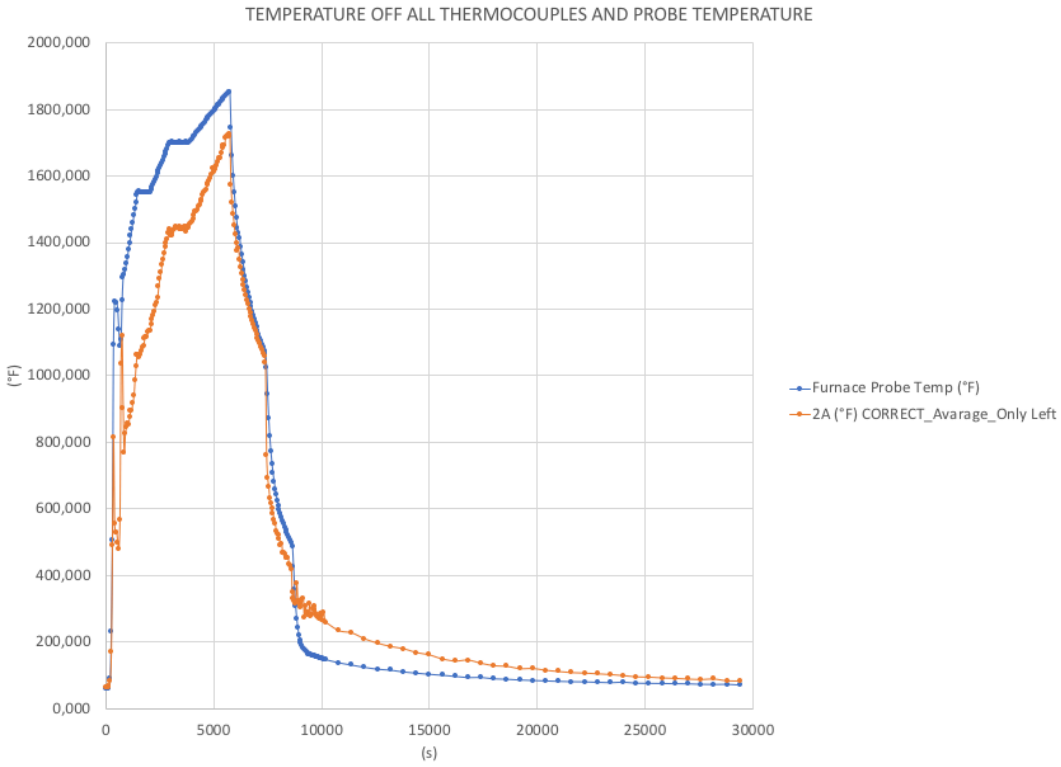

TEMPERATURE OFF ALL THERMOCOUPLES AND PROBE TEMPERATURE
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
(s)
Correct Avarage without Right (°F)
1A Correct Avarage without Right (°F)

RUN 1

Sample 2°

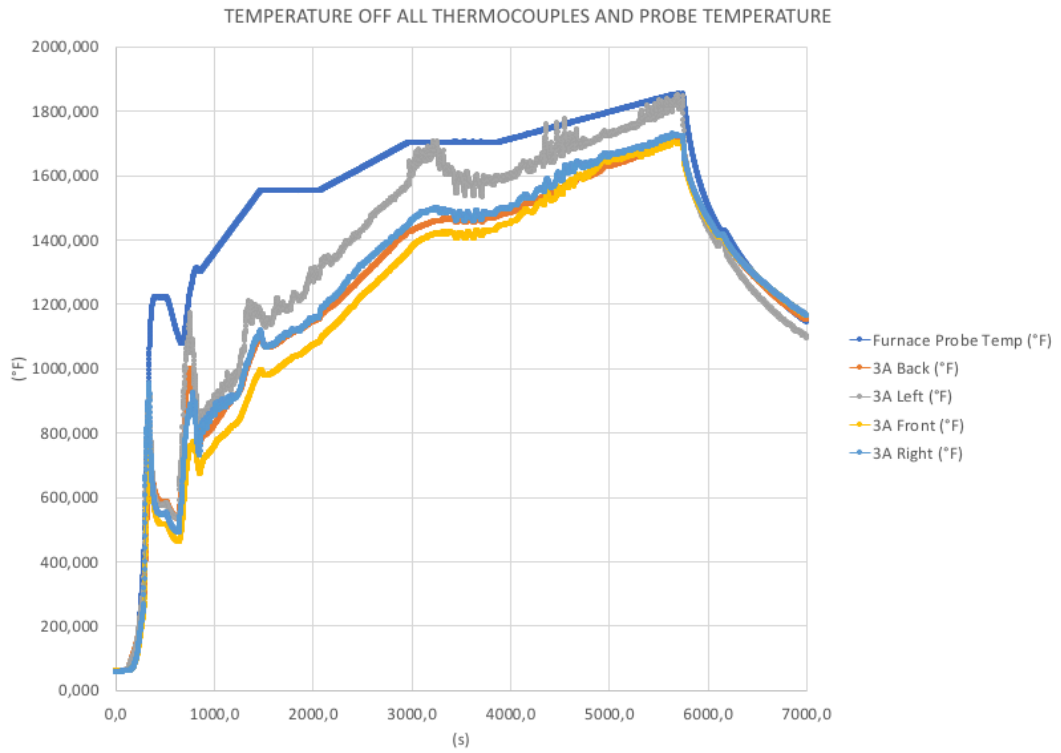


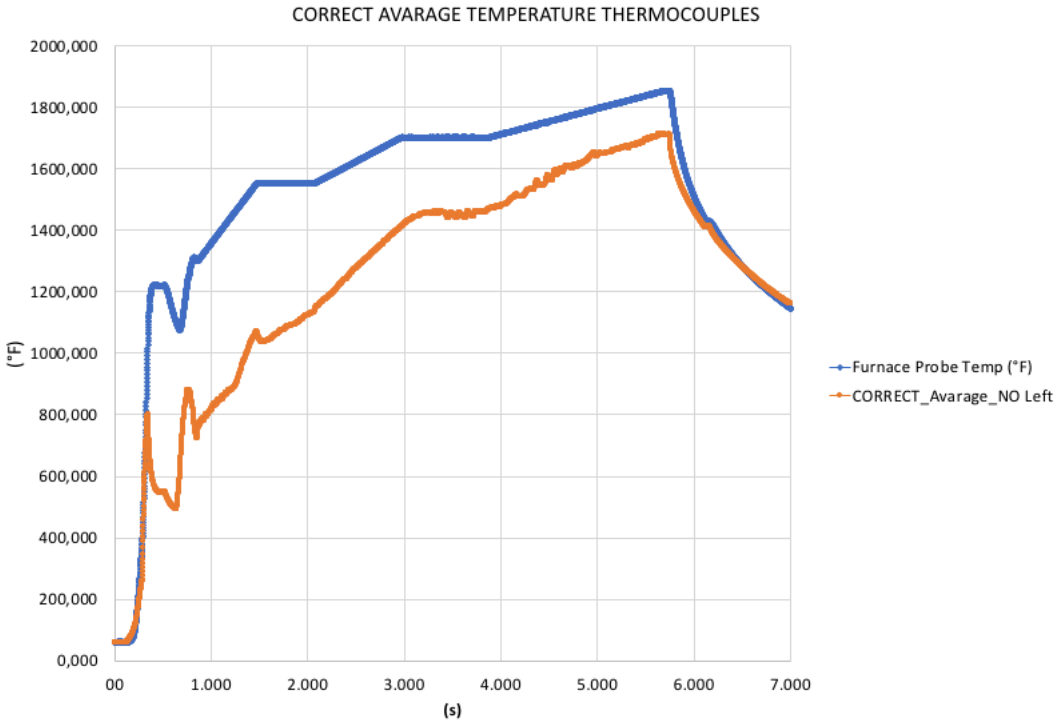


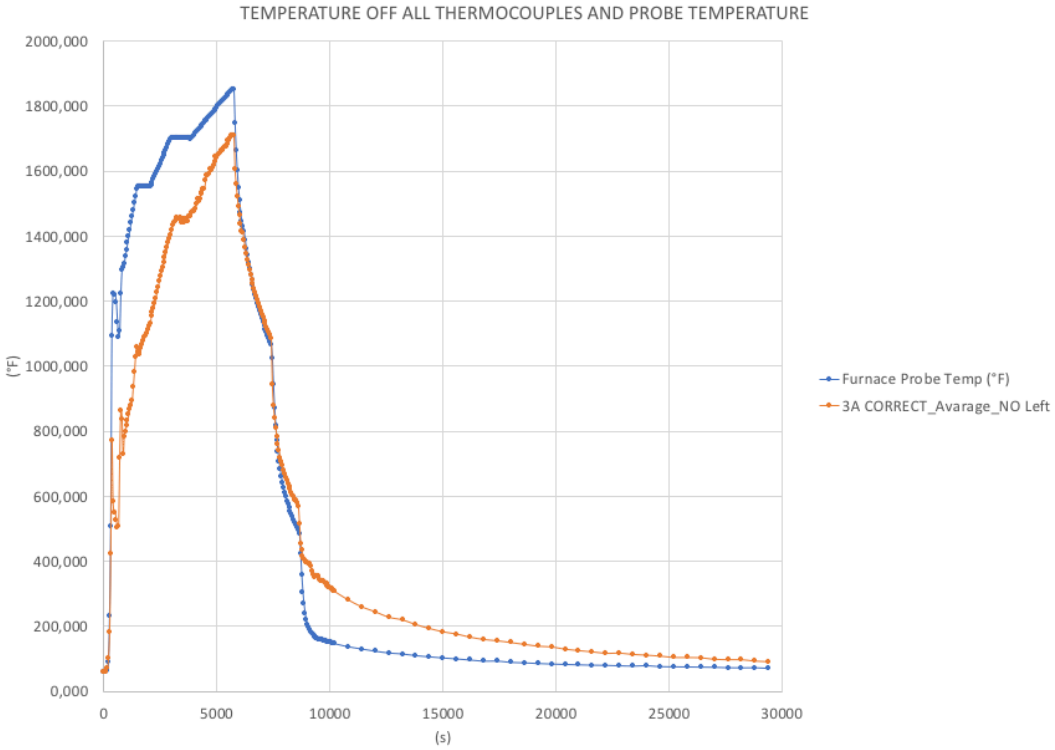


RUN 1

Sample 3A

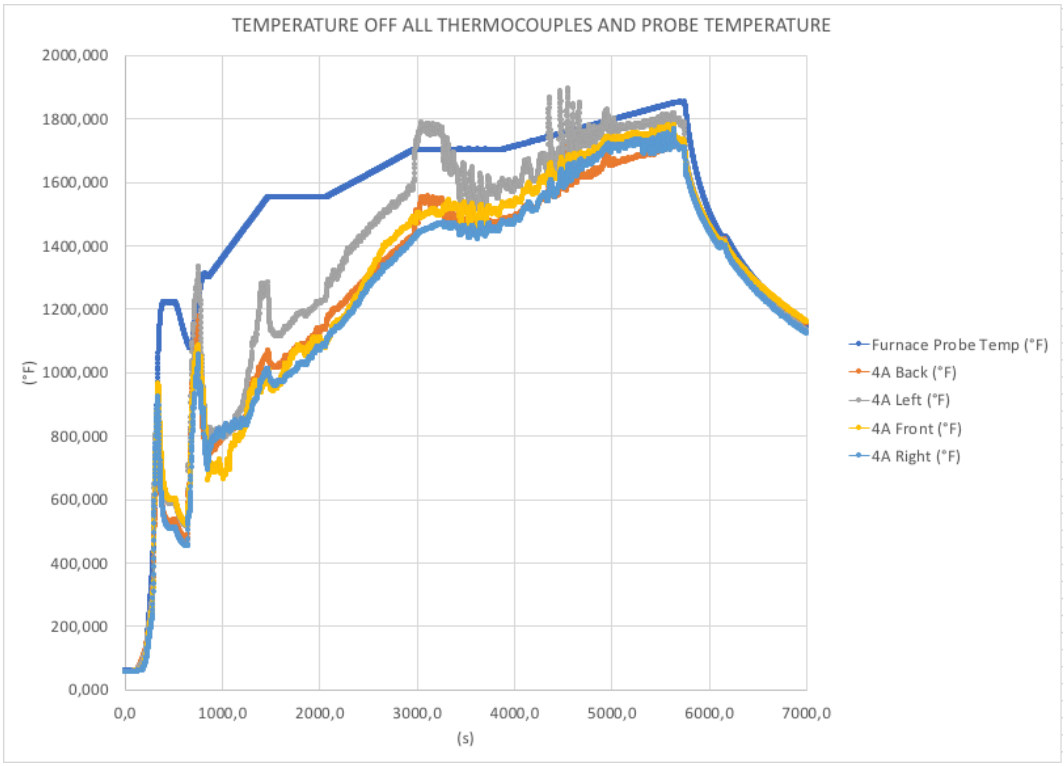


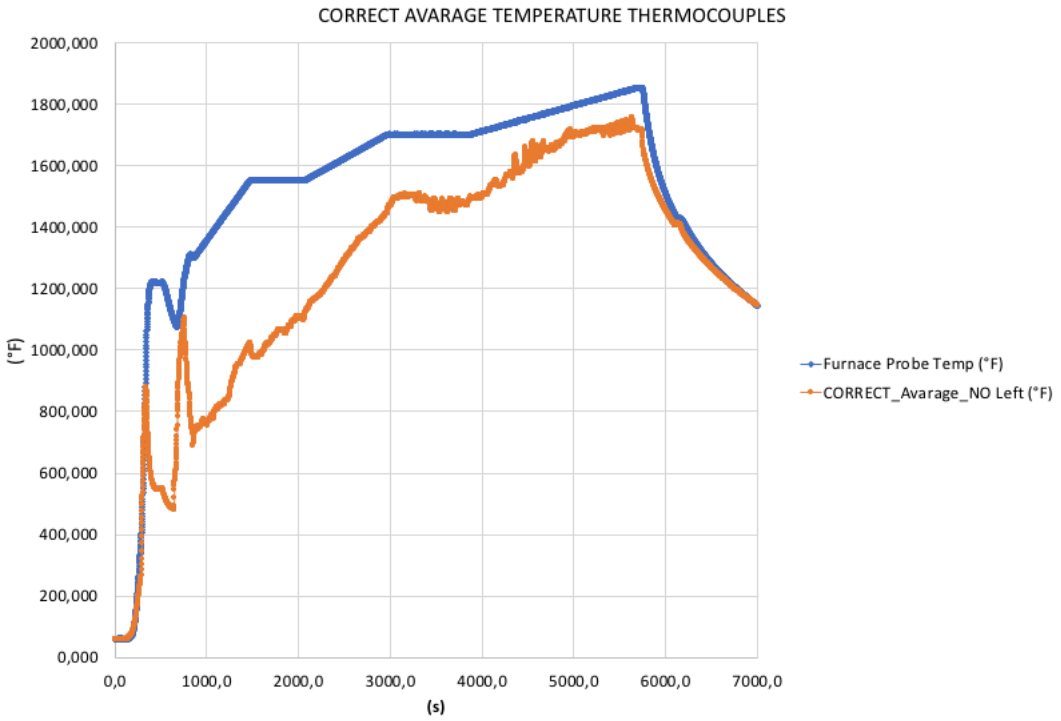

CORRECT AVARAGE TEMPERATURE THERMOCOUPLES
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
00
1.000
2.000
3.000
4.000
5.000
6.000
7.000
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
CORRECT_Avarage_NO Left

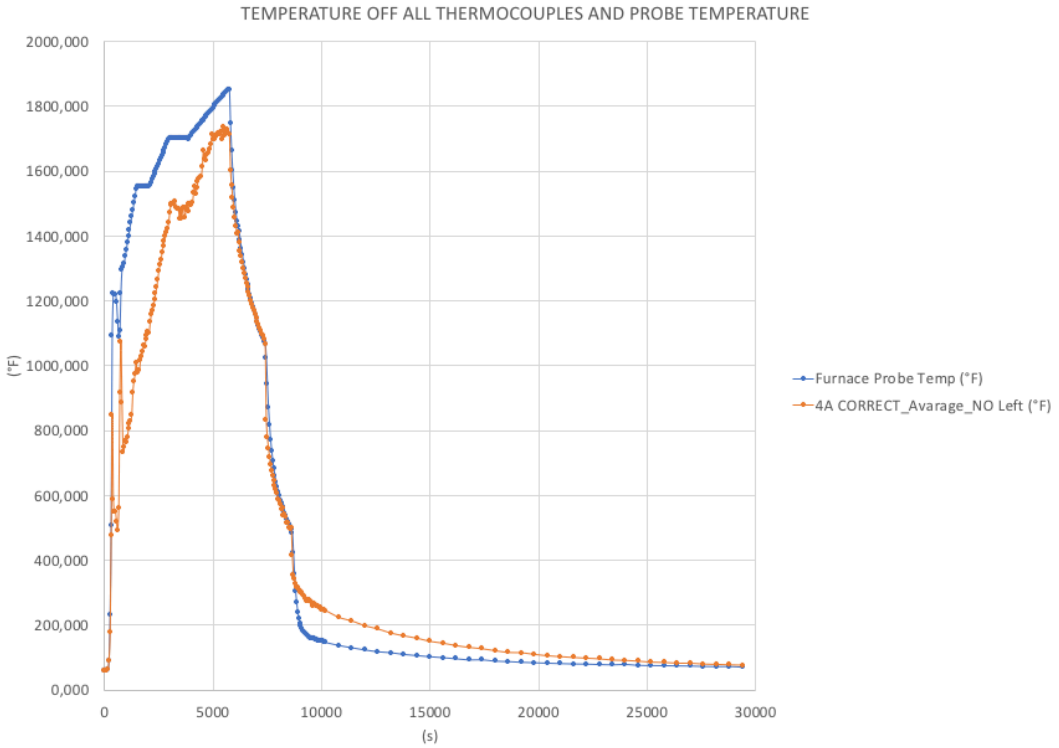

TEMPERATURE OFF ALL THERMOCOUPLES AND PROBE TEMPERATURE
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
3A CORRECT_Avarage_NO Left

RUN 1

Sample 4A

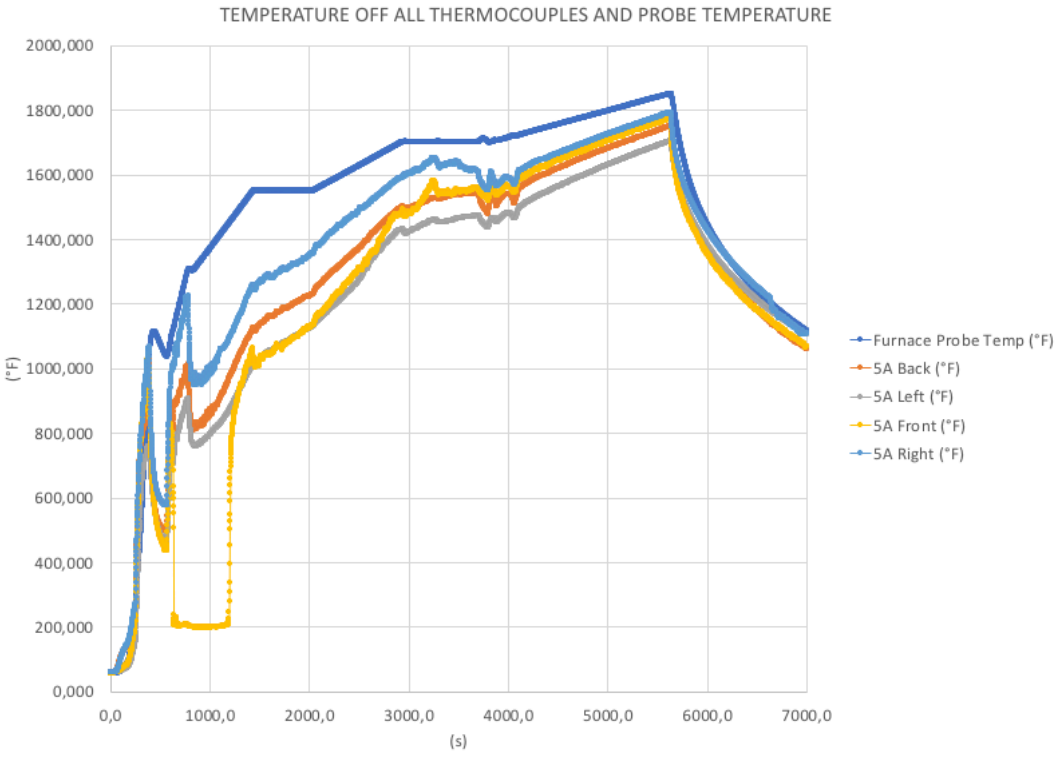


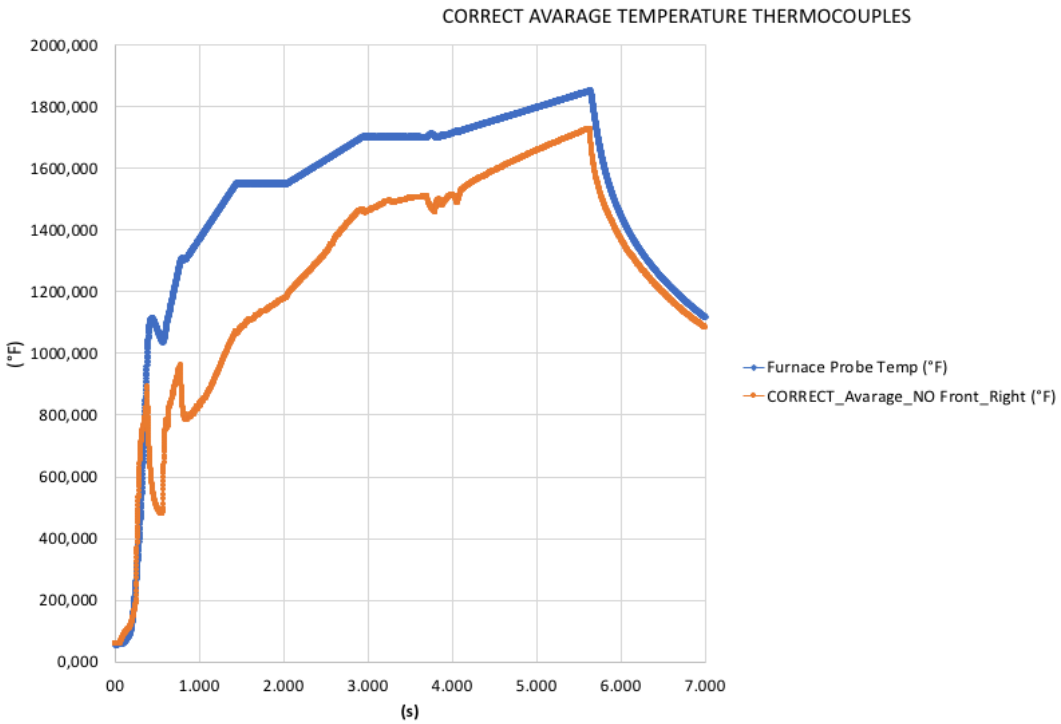


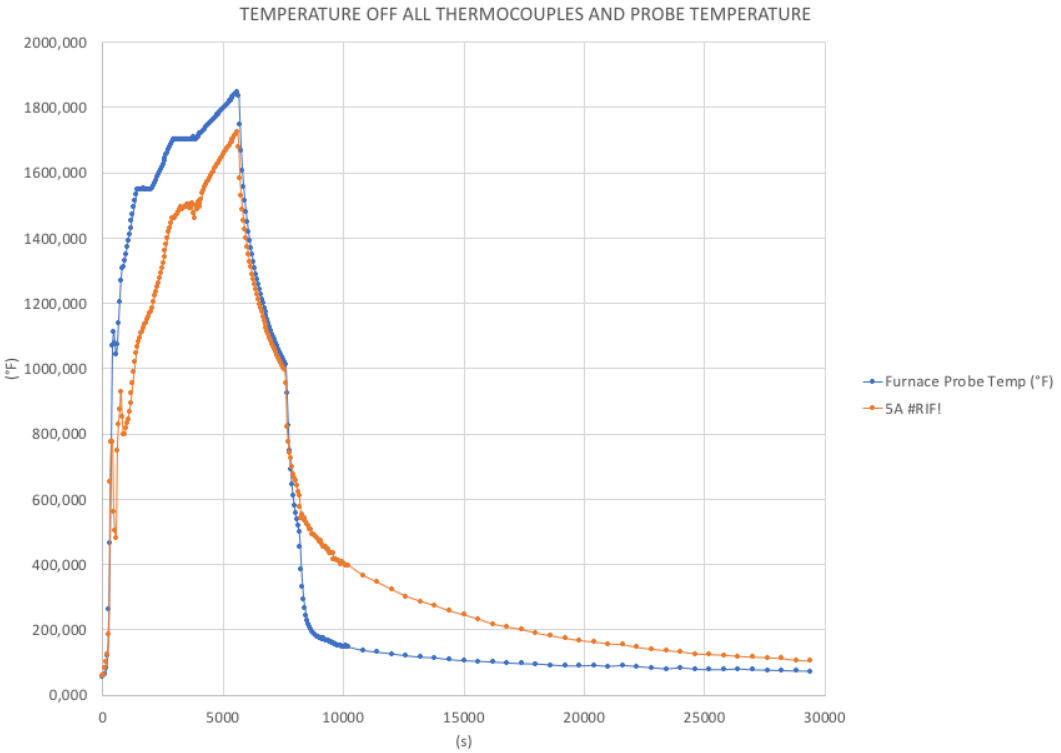


RUN 1

Sample 5A

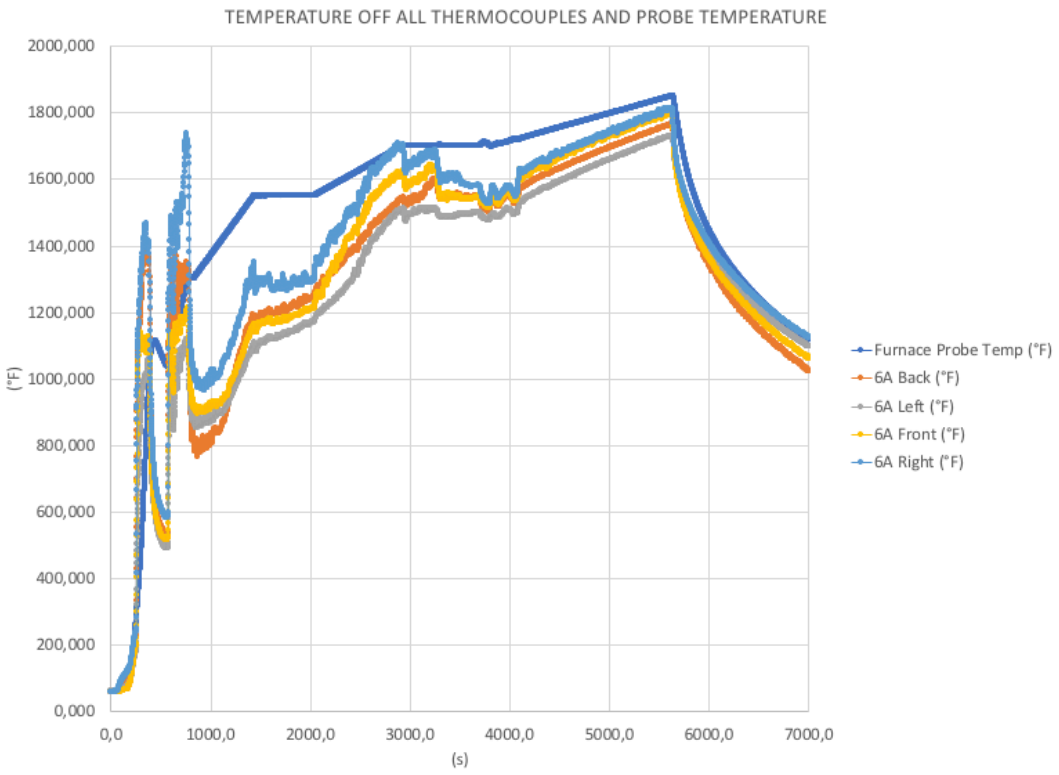


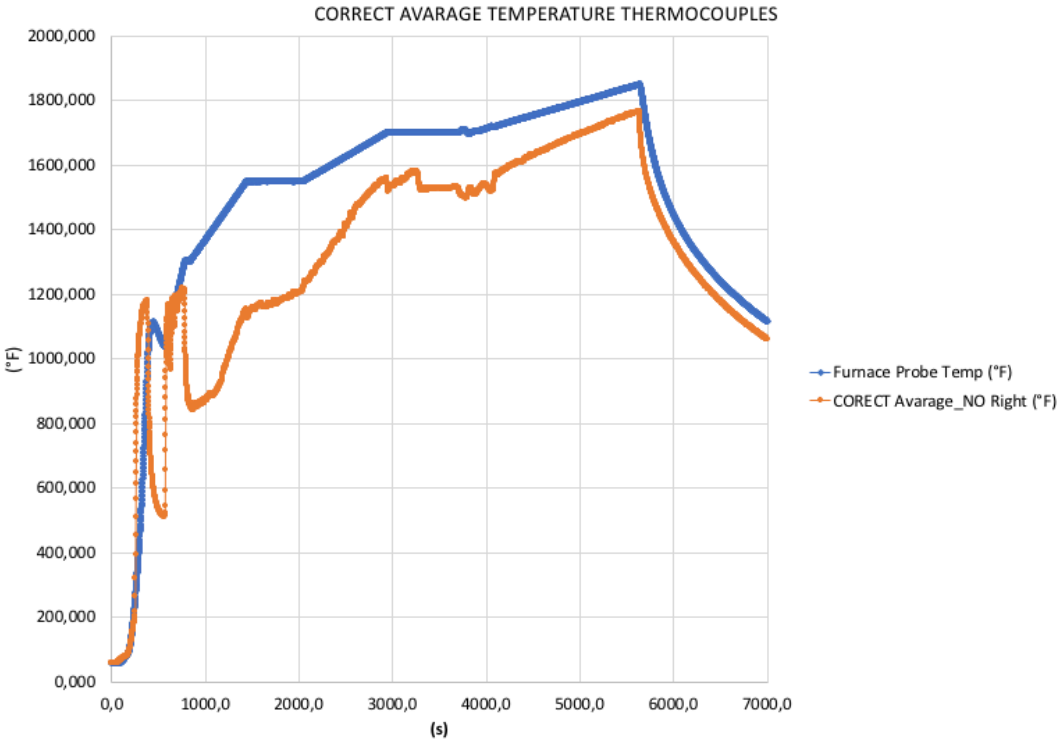

CORRECT AVARAGE TEMPERATURE THERMOCOUPLES
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
00
1.000
2.000
3.000
4.000
5.000
6.000
7.000
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
CORRECT_Avarage_NO Front_Right (°F)

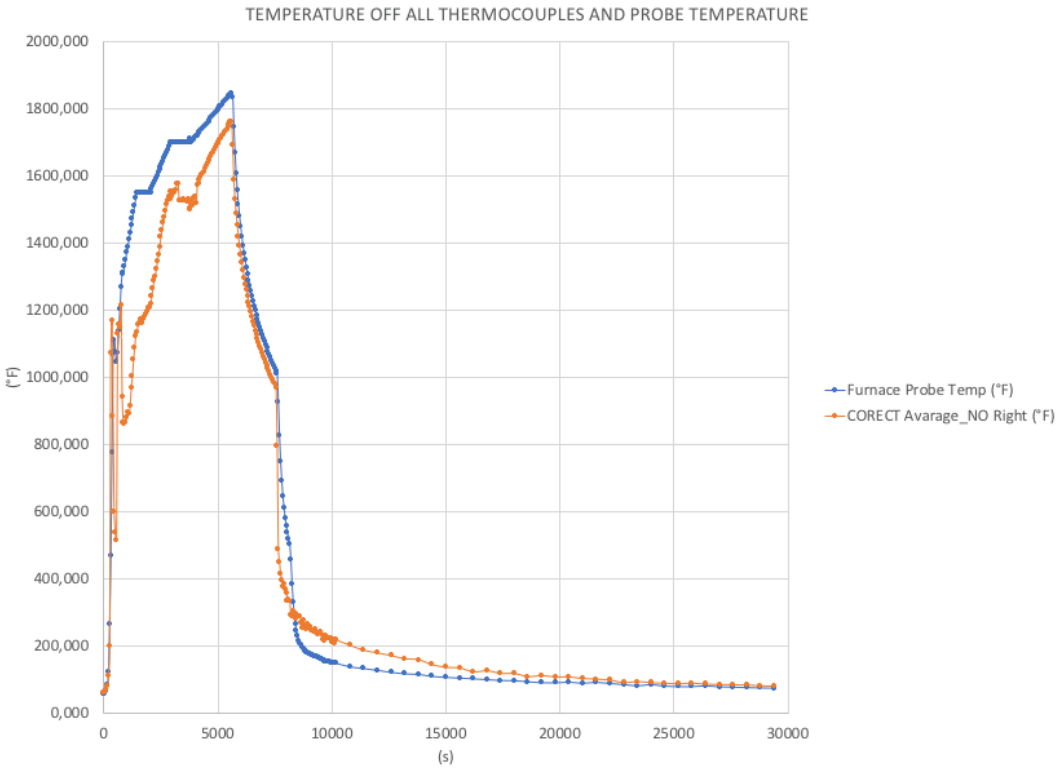

TEMPERATURE OFF ALL THERMOCOUPLES AND PROBE TEMPERATURE
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
5A #RIF!

RUN 1

Sample 6A

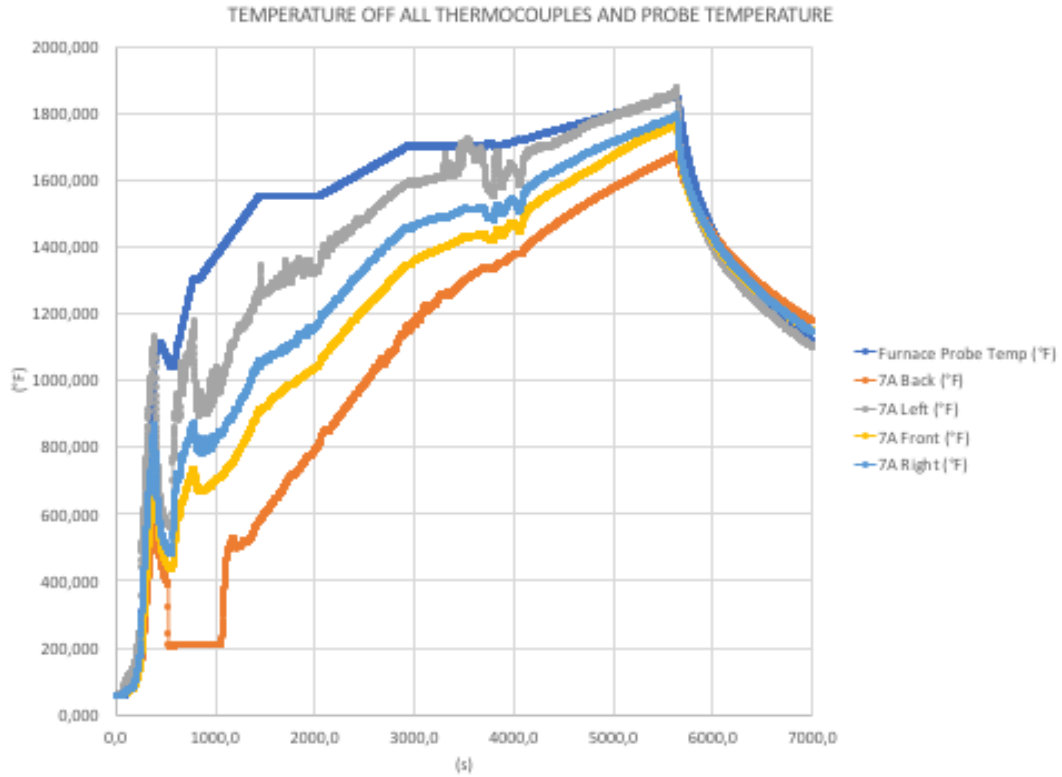


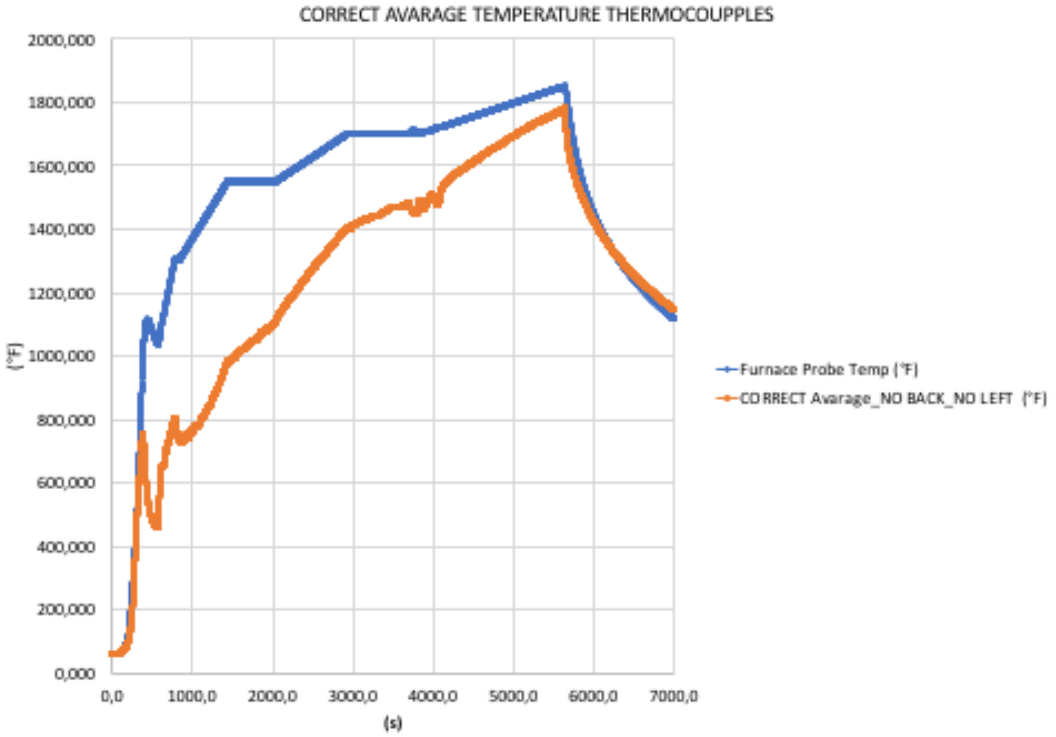


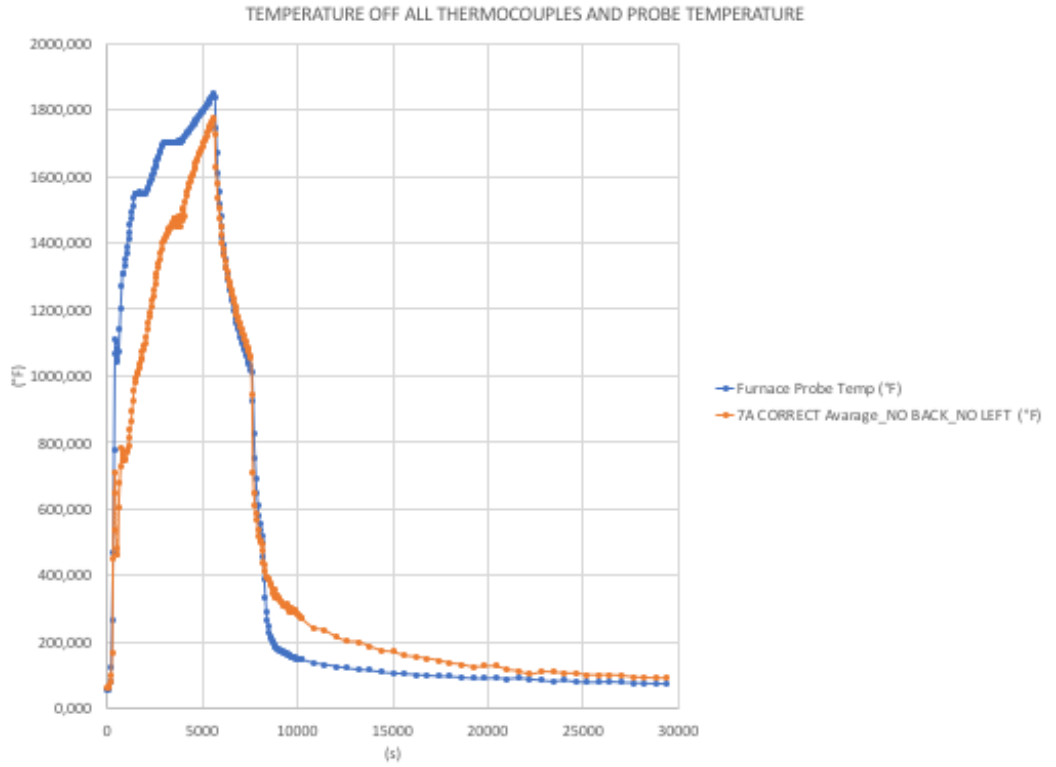


RUN 1

Sample 7A

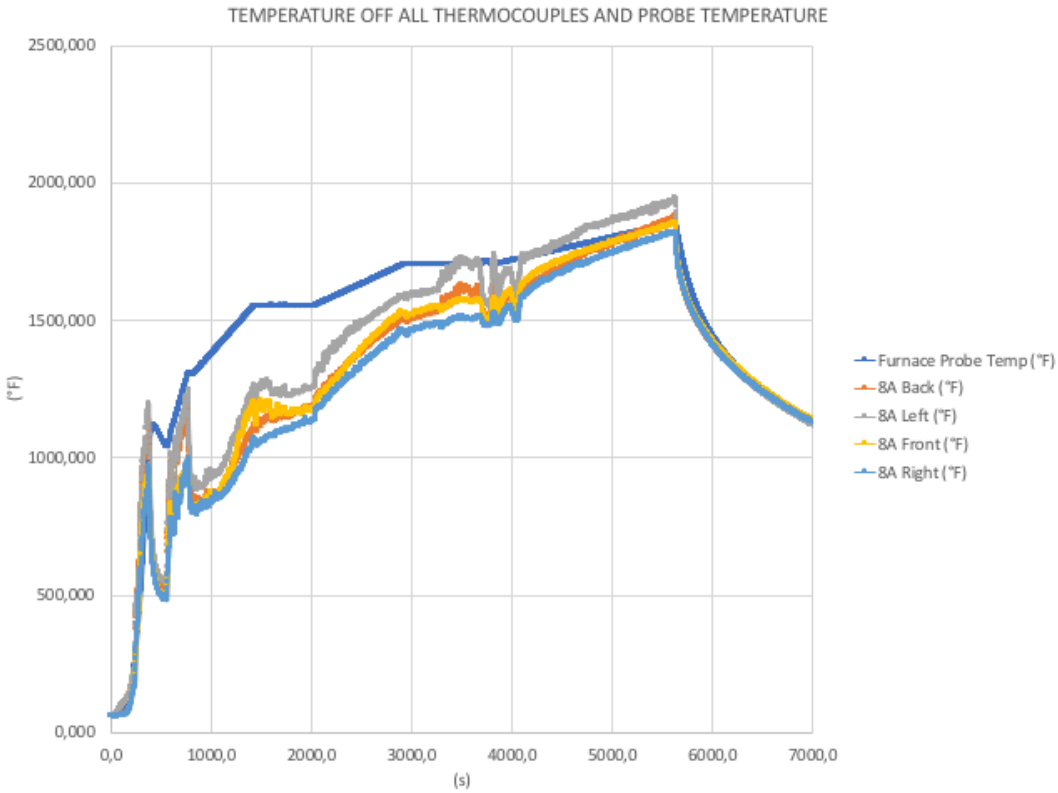


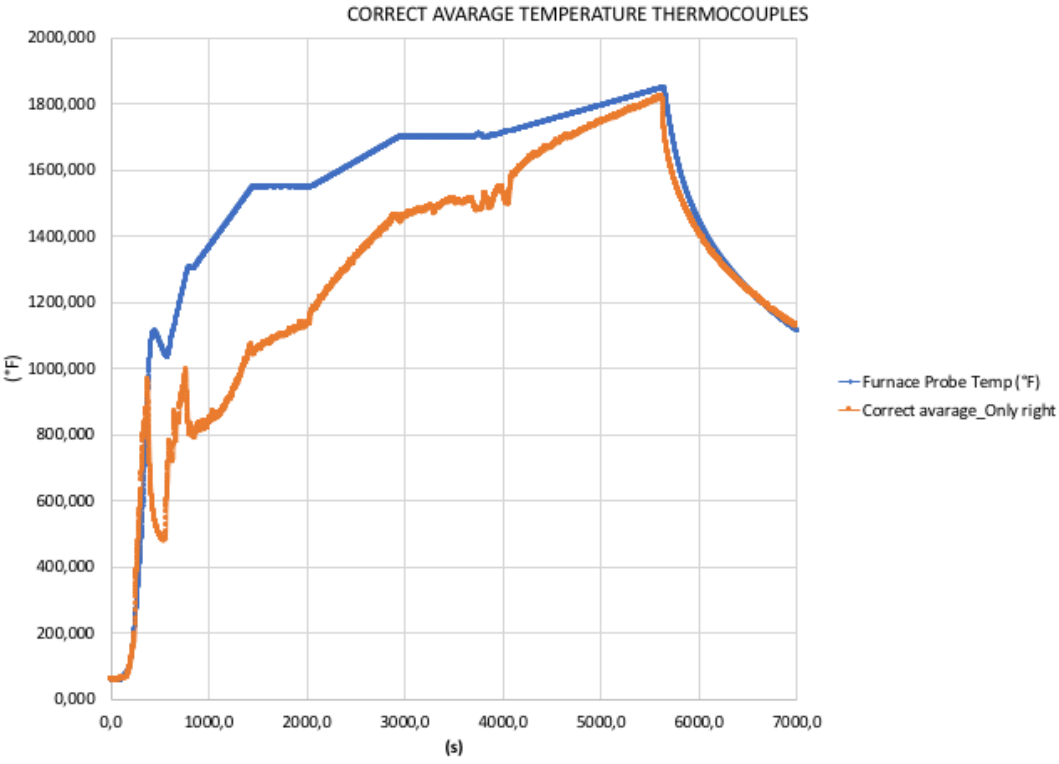

CORRECT AVARAGE TEMPERATURE THERMOCOUPPLES
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0,0
1000,0
2000,0
3000,0
4000,0
5000,0
6000,0
7000,0
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
CORRECT Avarage_NO BACK_NO LEFT (°F)

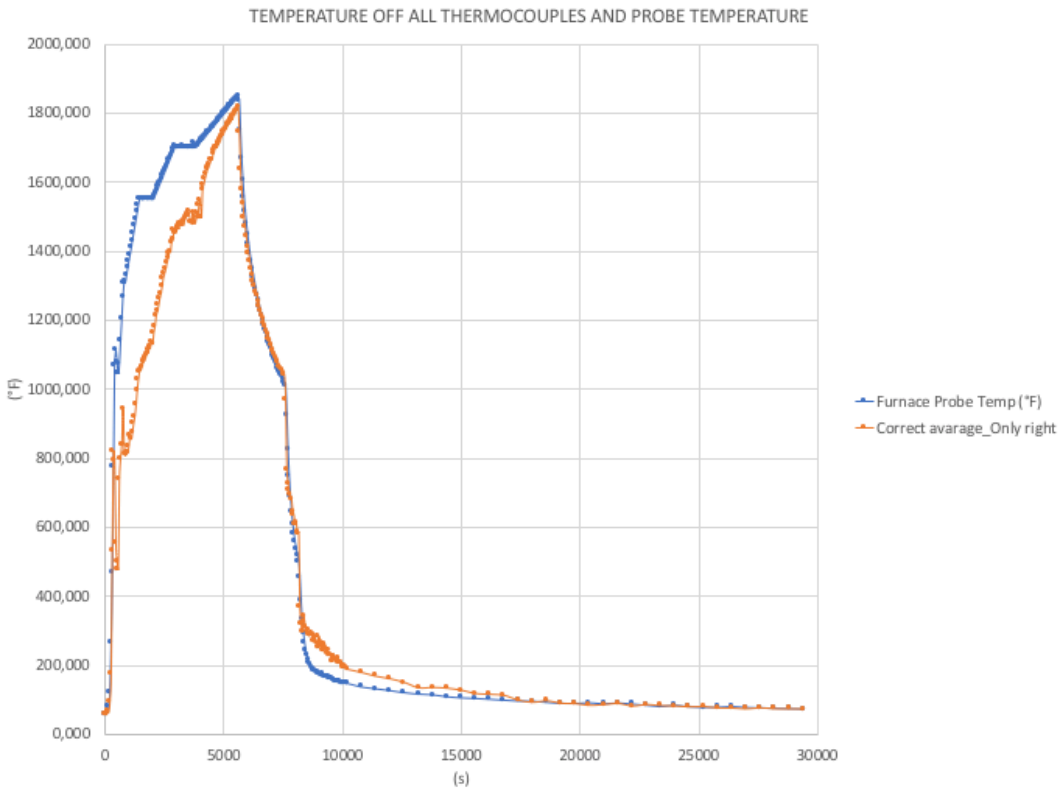

TEMPERATURE OFF ALL THERMOCOUPLES AND PROBE TEMPERATURE
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
7A CORRECT Avarage_NO BACK_NO LEFT (°F)

RUN 1

Sample 8A

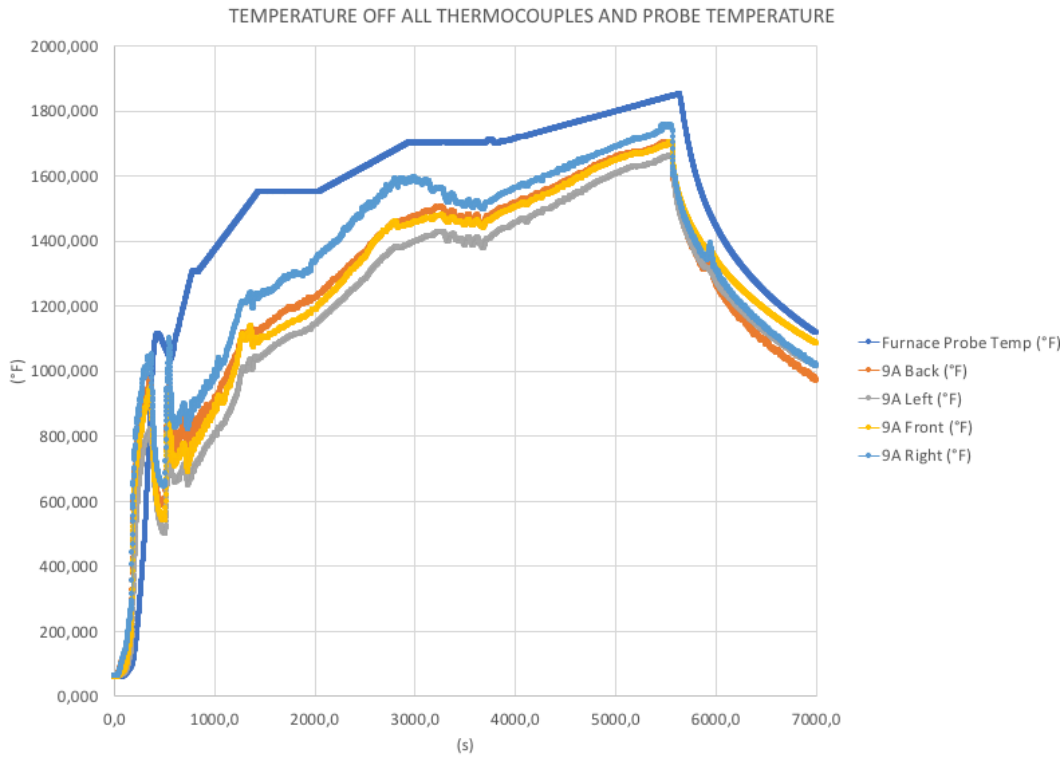


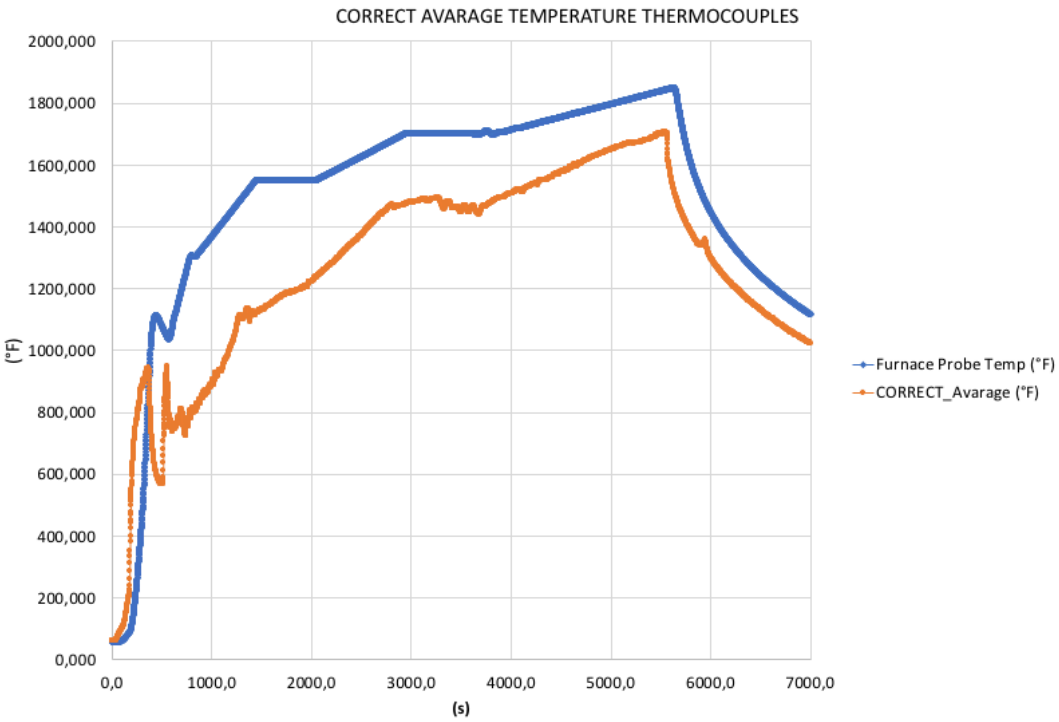


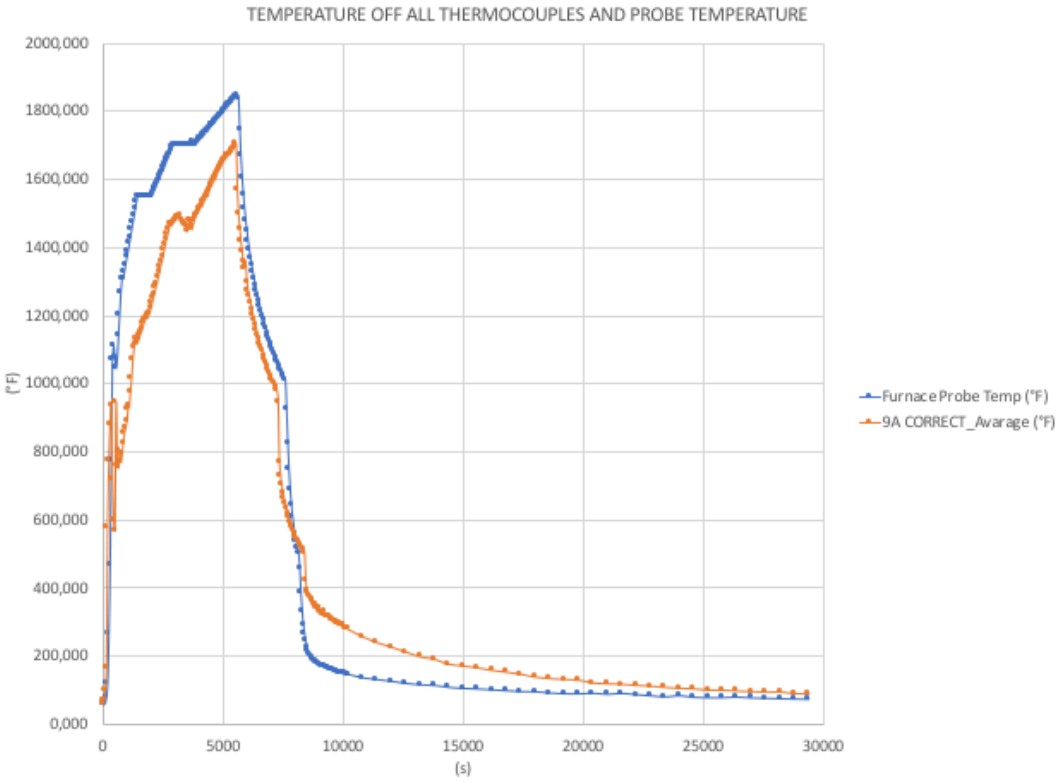


RUN 1

Sample 9A

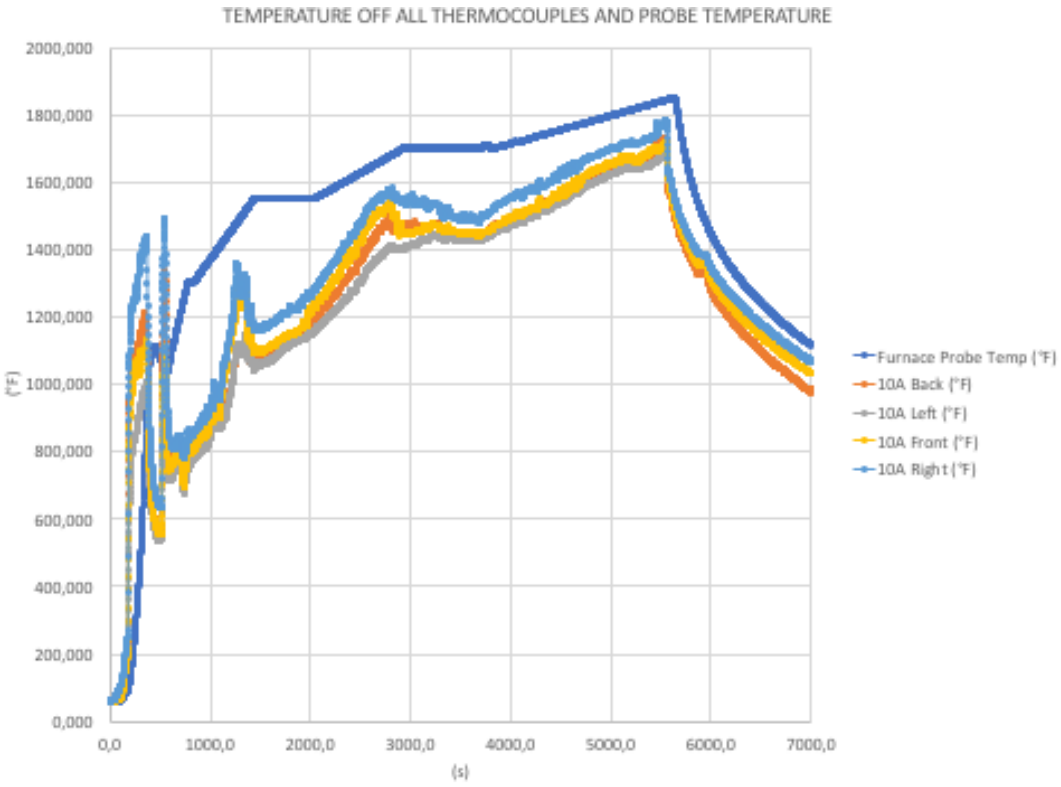


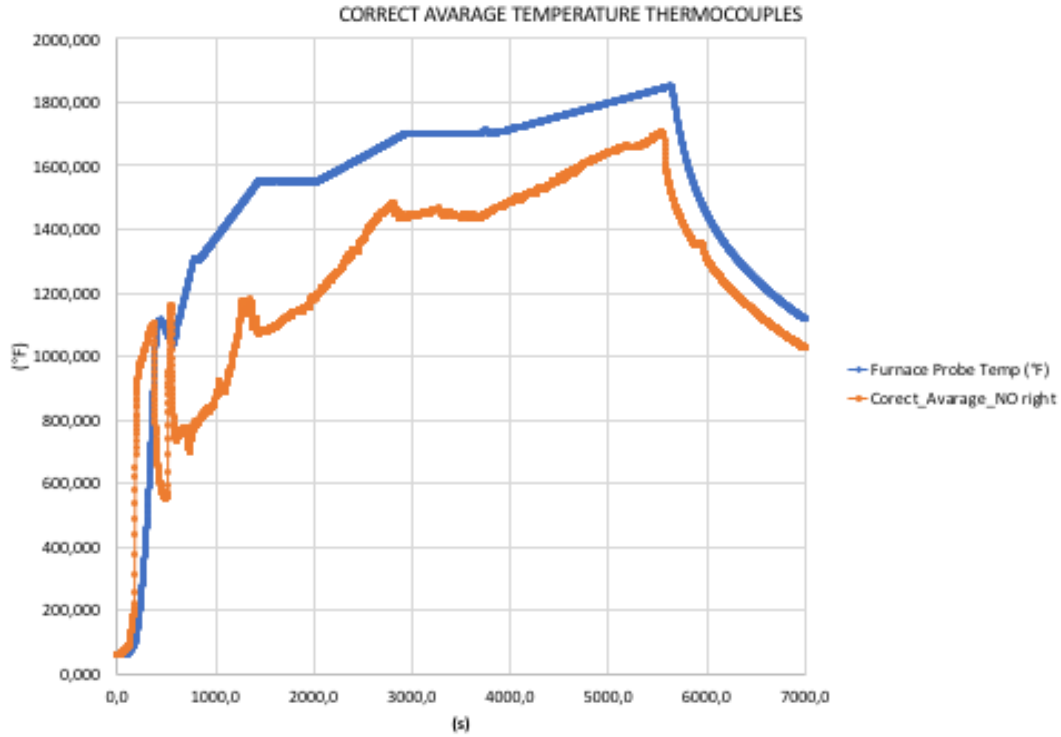

CORRECT AVARAGE TEMPERATURE THERMOCOUPLES
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0,0
1000,0
2000,0
3000,0
4000,0
5000,0
6000,0
7000,0
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
CORRECT_Avarage (°F)

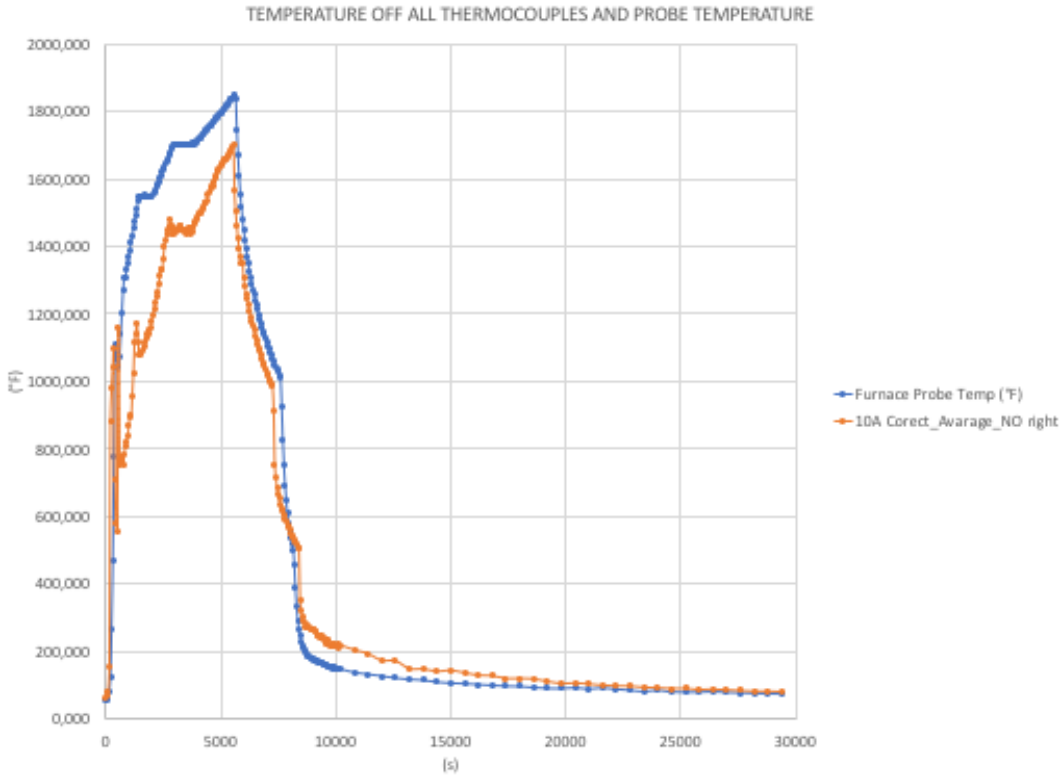

TEMPERATURE OFF ALL THERMOCOUPLES AND PROBE TEMPERATURE
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
9A CORRECT_Avarage (°F)

RUN 1

Sample 10A

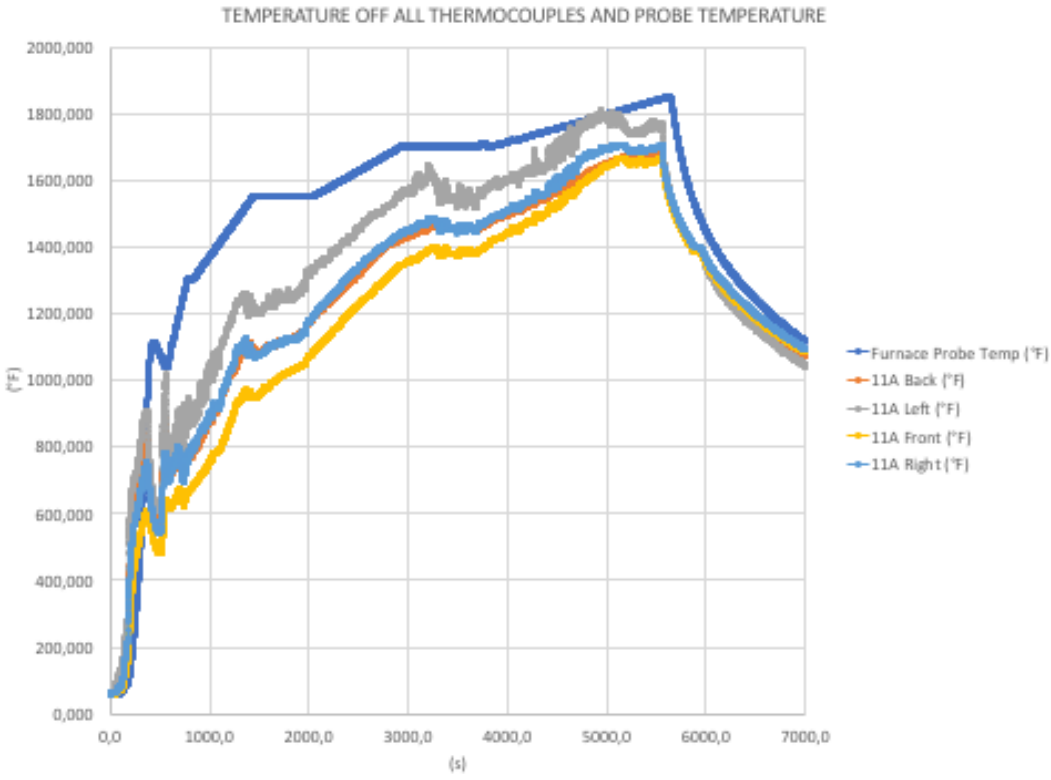


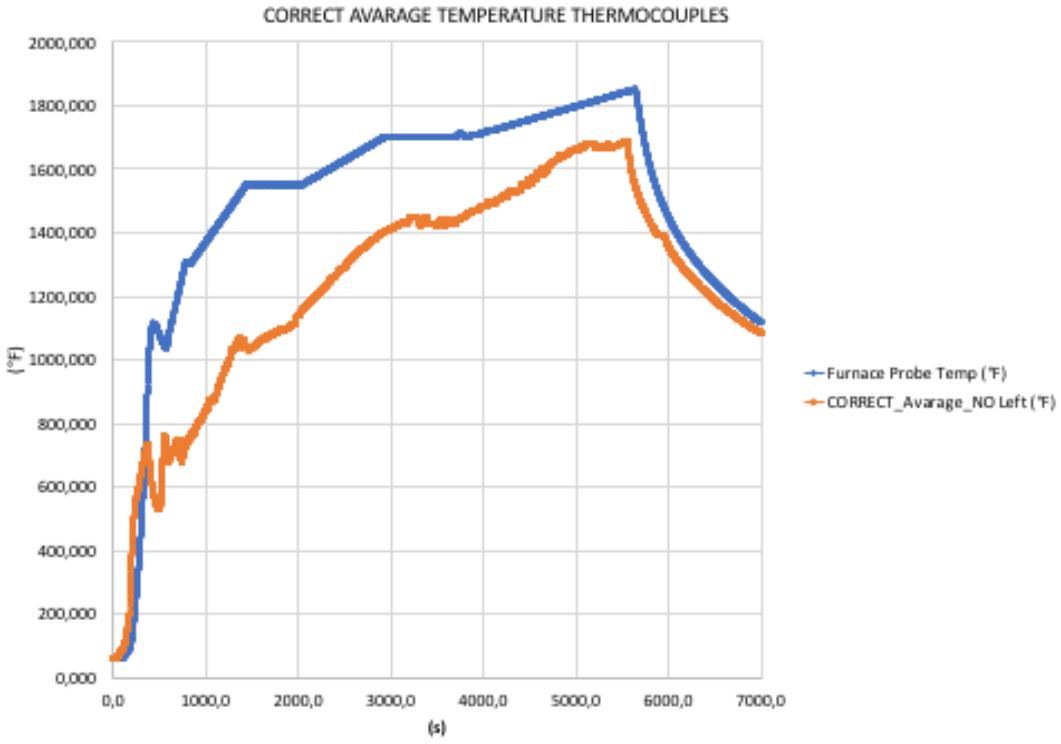


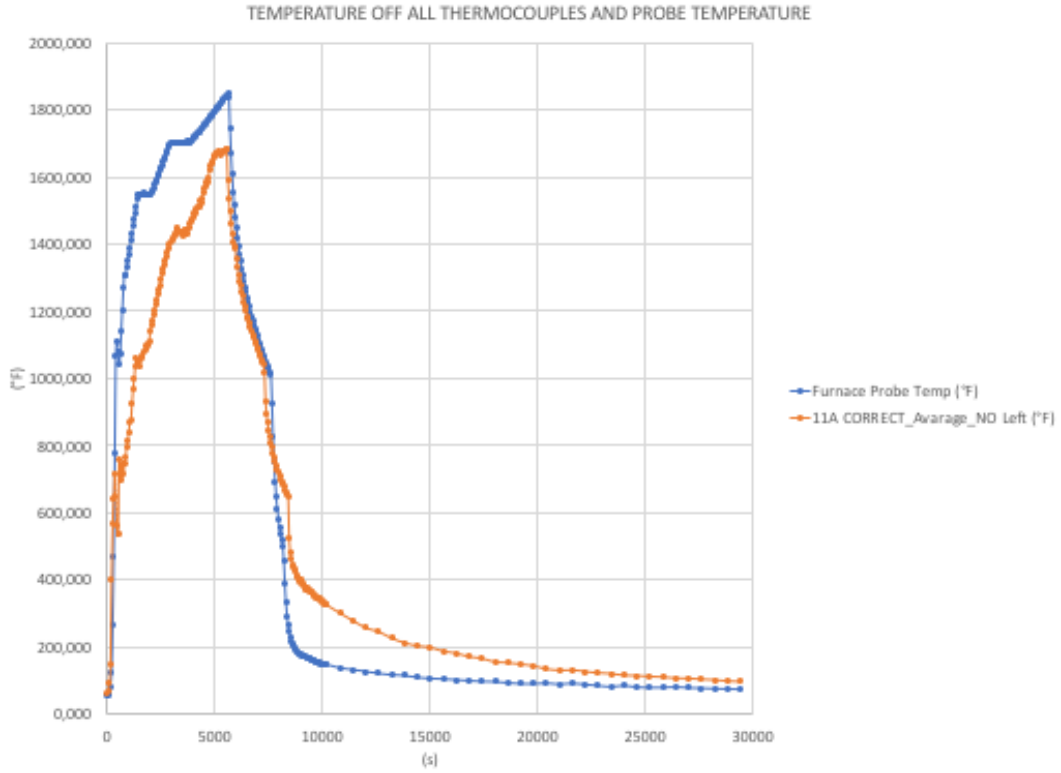


RUN 1

Sample 11A

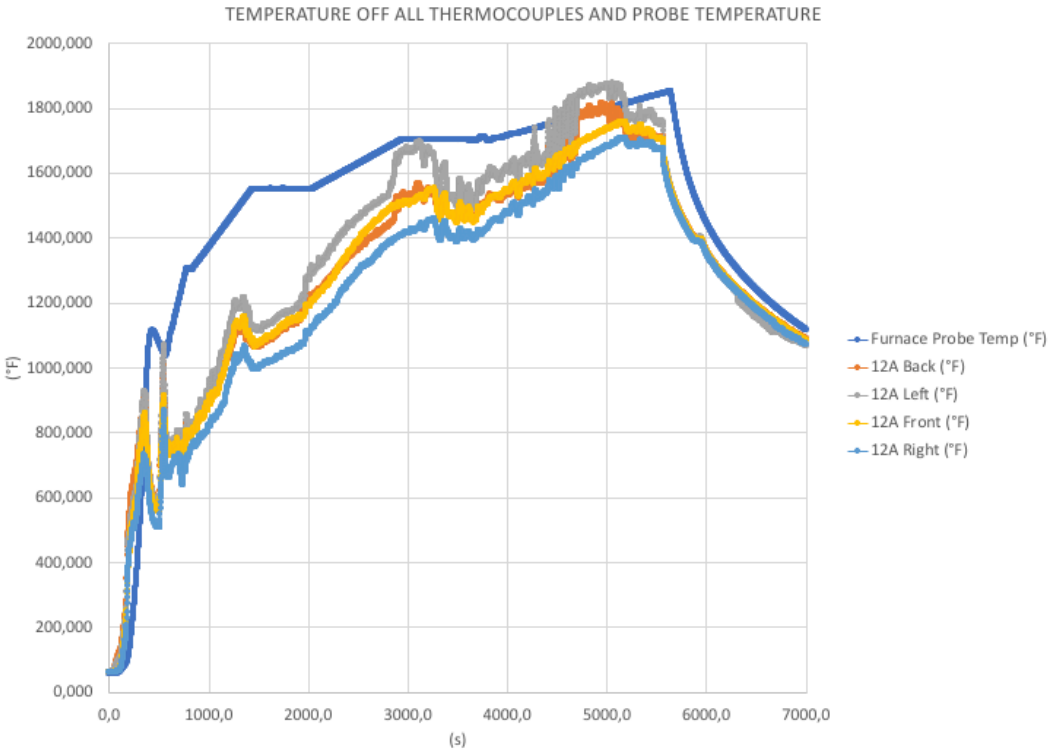


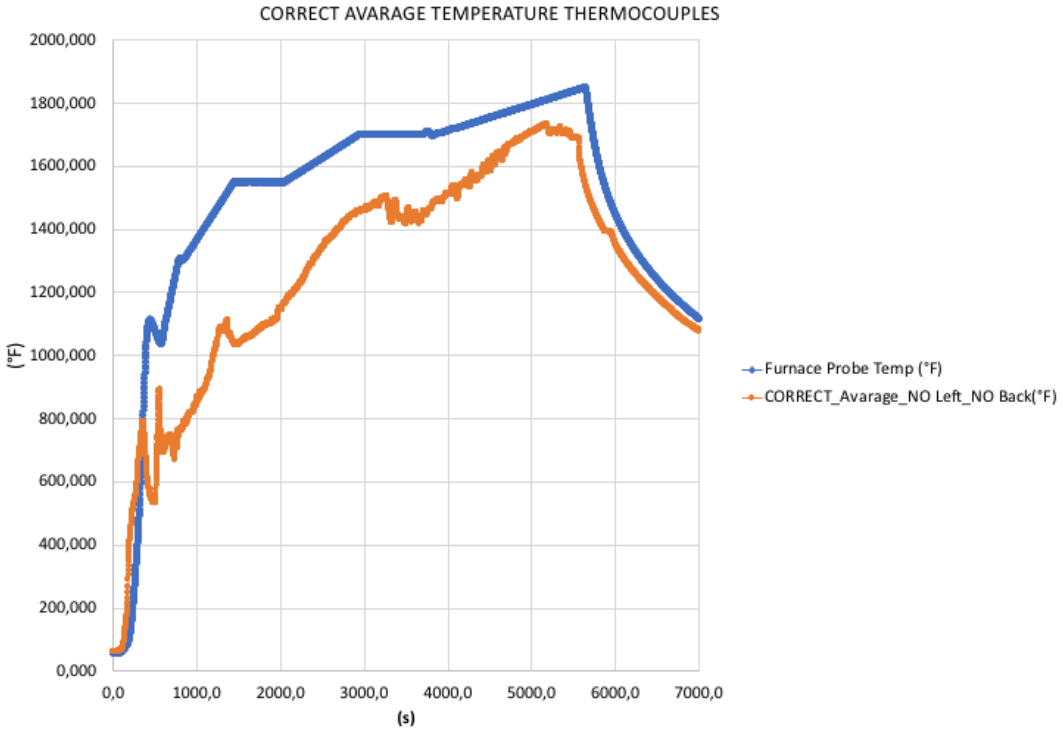

CORRECT AVARAGE TEMPERATURE THERMOCOUPLES
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0,0
1000,0
2000,0
3000,0
4000,0
5000,0
6000,0
7000,0
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
CORRECT_Avarage_NO Left (°F)

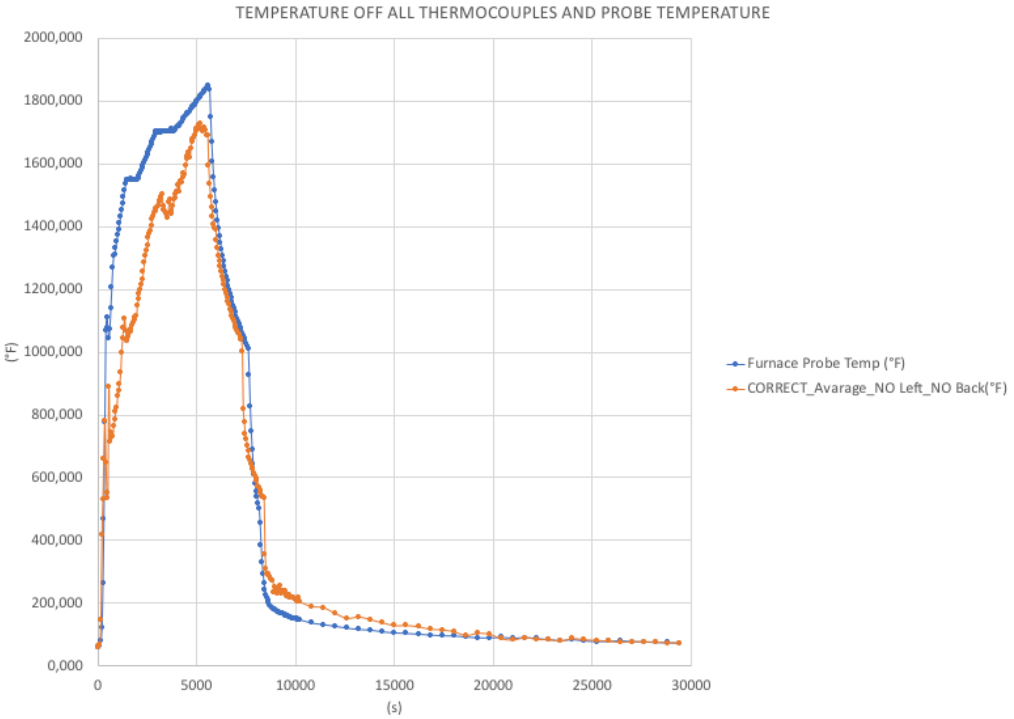

TEMPERATURE OFF ALL THERMOCOUPLES AND PROBE TEMPERATURE
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
11A CORRECT_Avarage_NO Left (°F)

RUN 1

Sample 12A






TEMPERATURE OFF ALL THERMOCOUPLES AND PROBE TEMPERATURE
2000,000
1800,000
1600,000
1400,000
1200,000
1000,000
800,000
600,000
400,000
200,000
0,000
(°F)
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
(s)
Furnace Probe Temp (°F)
CORRECT_Avarage_NO Left_NO Back(°F)

12 Bibliografia

ABRAMS D.A.(2010), “Design of Concrete Mixture”, Lewis Institute, Chicago.

AKHTARUZZAMAN, A.A. (1973), “The effect of transient and stationary temperature on concrete”, Publication, Imperial College, Londra.

BASTAMI M., CHABOKI-KHIABANI A., BAGHBADRANI M., KORDI M. (2011), “Performance of high strength concretes at elevated temperatures”, Sharif University of Technology, Scientia Iranica, Civil Engineering, pp. 1028-1036.

BALDUZZI B., (2015), “La stima della curva parametrica”, Dispense, Ordine degli ingegnerie di Mantova.

BAMONTE P. (2014), “Resistenza al fuoco delle strutture”, Dispense, Politecnico di Milano

BAZANT Z. P., KAPLAN M. F., (1996), “Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models”, Longman Group Limited, Essex, UK.

BERTOLINI L., (2000), “La durabilità del calcestruzzo armato”, Pedeferri , Mc Graw Hill, Italia.

BUCHANAN A. H. (2002), "Structural Design for Fire Safety", John Wiley and Sons, New York, USA.

CARPINTERI A. (1995), “Scienza delle costruzioni 1”, Pitagora editrice Bologna.

CARPINTERI A. (1995), “Scienza delle costruzioni 2”, Pitagora editrice Bologna.

CHANH N, (2013), “Steel fiber reinforced concrete”, Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology.

CORSI F., SCHREFLER B.A., MAJORANA C., PESAVENTO F., GAWIN D., WORKPACKAGE, (2013) "Fire effects and tunnel performance: system structural response", Technical Report FP5 Contract.

CZOBOLY O., LUBLOY E., HLAVICKA V., BALAZS L., KERI O., SZILAGYI I., (2016), "Fibers and fiber cocktails to improve fire resistance of concrete", J Thermal Analysis, pp. 1453–1461.

D'ALOIA L., ROBERT F., ROUGEAU P., MOREAU B., FLAHAULT N. e COLLIGNON C., (2013) "Improving the behavior of concrete exposed to fire by using an air entraining agent (AEA): Assessment of spalling", MATEC Web of Conferences 6, EDP Sciences.

DEBICKI G., HANICHE R., DELHOMME F. (2012), "An experimental method for assessing the spalling sensitivity of concrete mixture submitted to high temperature", Cement & Concrete Composites 34, pp. 958–963.

DENOËL J., (2007), "Fire Safety and Concrete Structures", FEBELCEM - Federation of Belgian Cement Industry, pp. 90.

DE WIT A. (2011), "Behaviour and structural design of concrete structures exposed to fire", Master of Science Thesis Stockholm, Sweden.

Federation internationale du beton (2007), "Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling".Bulletin 38, Lausanne.

GIACALONE R. (2011), "La resistenza al fuoco delle strutture.Principi e applicazioni", Maggioli editore.

HARMATHY T.Z. (1993), "Fire safety deign & concrete", Concrete design & construction series, Longman Scientific & Tecjnical.

HARMATHY T.Z., ALLEN L. W. (1973), "Thermal Properties of Selected Masonry Unit Concretes," J. American Concrete Institute 70, pp. 132–142.

HEO Y., SANJAYAN J., HAN C., HAN M., (2012)"Limited effect of diameter of fibres on spalling protection of concrete in fire", Materials and Structures, RILEM, pp. 325–335.

HOVER K. (1993), "Why ther ids air in concrete?", Publication C930011, The Abadern Group.

JANSSON R. (2008): "Material properties related to fire spalling of concrete", Report conference, Lund University.

JANSSON R (2013): "Fire spalling of concrete – A historical overview", MATEC Web of Conferences 6, EDP Sciences, 2013

JANSSON R (2013): "Fire spalling of concrete – Theoretical and Experimental Studies", Phd, KTH University, 2013.

KHALIQ W., WAHEED F., (2017), "Mechanical response and spalling sensitivity of air entrained high-strength concrete at elevated temperatures", National University of Sciences and Technology (NUST), Pakistan, Construction and Building Materials, pp. 747–757.

KHOURY G. A. (2000). «Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures». In: Progress in Structural Engineering and Materials 2, pp. 429–447.

KHOURY G. A. and ANDERBERG Y. (2000), "Concrete spalling review", Report submitted to the Swedish National Road Administration, June 2000.

KHOURY G. A. (2008), "Passive fire protection of concrete structures", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings 161, Issue SB3, June 2008, pp. 135-145.

KORTEN A., WETZIG V., (2013) "Spalling of concrete – influence of porosity and specimen size and its critical factors regarding safety", VSH Hagerbach Test Gallery, Switzerland, MATEC Web of Conferences 6.

KOTTAS R., SEEBERGER J., HILSDORF H.K. (1979), "Strenght Characteristics of Concrete in the Temperature Range of 20° to 200°C", International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Elsevier, pg. 8

KRZEMIEN K., HAGER I. (2015), "Assessment of concrete susceptibility to fire spalling: A report on the state-of-the-art in testing procedures", 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering, Elsevier.

MAROTTA N., (2014), "Carico d'incendio. Scienza e tecnica della prevenzioni incendi", Università di Pisa.

MAZZUCCO G., MAJORANA C.E., SALOMONI V.A. (2015), "Numerical simulation of polypropylene fibers in concrete materials under fire conditions", Department of Civil, Environmental and

Architectural Engineering (DICEA), University of Padua, Computers and Structures 154, pg. 17–28

MAJORANA C. E., SALOMONI V. A., MAZZUCCO G. and KHOURY G. A. (2010): "An approach for modelling concrete spalling in finite strains", Mathematics and Computers in Simulation, Volume 80, Issue 8, April 2010, pp. 1694-1712.

MINDEGUIA J., PIMIENTA P., NOUMOWÉ A., KANEMA M. (2000), "Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk", Elsevier, Cement and Concrete Research 40, pp. 477–487

NAUS D. J. (2005), "The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures - A Literature Review", U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Under Interagency Agreement No. 1886.

NIELSEN C., BICANIC N. (2003) "Residual fracture energy of high-performance and normal concrete subject to high temperatures", Materials and Structure, Vol.36, October 2003, pp. 515-521.

NOUMOWE A., SIDDIQUE R., DEBICKI G., (2008), "Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600 °C)", Construction and Building Materials, pp. 1855-1861.

PENG G., BIAN S., GUO Z., ZHAO J., PENG X., JIANG Y.,(2007) "Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures", Science Direct, Construction and Building Materials, pp. 949-955.

PENG G., YANG W., ZHAO J., LIU Y., BIAN S., ZHAO L., (2006), "Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures", Cement and Concrete Research 36, pp. 723–727.

PHAN L., (2008), "Pore pressure and explosive spalling in concrete", Rilem, Materials and Structures, pp. 1623–1632.

PHAN L., McALLISTER T., GROSS J., HURLEY M., (2010), "Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete

and Steel Buildings", NIST Technical Note 1681, National Institute of Standards and Technology, pp. 66

RILEM TC 50-FMC (1985), Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend tests on notched beams, Mater. Struct. 18, pp. 285–290.

SANTARELLA L. (1998), "Il Cemento armato: la tecnica e la statica", Hoepli Editore.

SCHNEIDER U. , (1982), "Behavior of Concrete at High Temperature," HEFT 337, Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Germany.

SCHNEIDER U., DIERERICHS C., EHM C., (1981), "Effect of Temperature on Steel and Concrete for PCRV's," Nuclear Engineering and Design 67, pp.245–258.

UDAY N. (2017), " Experimental Determination of Fracture Energy by RILEM Method", Department of Civil Engineering, MGM College of Engineering, Kamothe, The International Journal Of Engineering And Science (IJES), Volume 6, Issue 3, pp. 106-115

VAN STRAALEN I., STEENBERGEN R., LENTZEN S., DE VRIES R., (2013), "Simplified stochastic modeling of concrete spalling due to fire", MATEC Web of Conferences 6

ZEIML M., LEITHNER D., LACKNER R., MANG H. (2006), "How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?", Cement and Concrete Research, pp. 929–942.

ZEIML M., LACKNER R., MANG H. (2008), "Experimental insight into spalling behavior of concrete tunnel linings under fire loading", Acta Geotechnica, Springer-Verlag.

ZHANG B., BICANIC N., PEARCE C., PHILLIPS D. (2001), "Relationship between brittleness and moisture loss of concrete exposed to high temperatures", Cement and Concrete Research 32, pp. 363–371

ZHANG B., BICANIC N. (2006), "Fracture energy of high-performance concrete at high temperatures up to 4508C: the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold)", Magazine of Concrete Research, 2006, 58, No. 5, June, pp.277–288.

ZHANG B. (2011), “Effects of moisture evaporation (weight loss) on fracture properties of high performance concrete subjected to high temperatures”, Fire Safety Journal, pp. 543–549.

WANG K., JANSEN d., SHAH S., KARR A. (2001), “Permeability study of cracked concrete”, National Institute of Statistical Sciences. Support from the NSF Center for Science and Technology of Advanced Cement Based Materials (ACBM)