

POLITECNICO DI MILANO  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale



**CARATTERIZZAZIONE MECCANICA  
ED IDENTIFICAZIONE DEL  
COMPORTAMENTO “COSTITUTIVO” A  
TRAZIONE DI COMPOSITI CEMENTIZI  
FIBRORINFORZATI AD ELEVATE  
PRESTAZIONI**

Relatore: Prof. Liberato Ferrara

Correlatore: Ing. Francesco Lo Monte

Tesi di laurea di:  
Angelo Alferi 904930  
Luca Famiani 905406

Anno accademico 2018/2019



# Ringraziamenti

I nostri più sentiti ringraziamenti vanno anzitutto al nostro relatore, il Professor Liberato Ferrara, per averci inseriti nel mondo della ricerca dei nuovi composti cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni e per averci guidato costantemente con professionalità e dedizione durante tutto il lavoro di tesi.

Infinite grazie all'Ingegnere Francesco Lo Monte, per essere stato disponibile in ogni momento e per qualunque necessità, aiutandoci con preziosi consigli e smisurata pazienza.

Ringraziamo anche tutto il personale del Laboratorio Prove Materiali Strutture e Costruzioni del Politecnico di Milano per averci assistito durante tutti i mesi trascorsi in laboratorio; grazie in particolar modo al Sig. Paolo Broglia, persona cordiale e sempre attenta a noi studenti.

Un doveroso grazie ad Andrea Cervini e Nicola Borgioni, senza di voi questo lavoro di tesi non sarebbe stato lo stesso!

Grazie a tutti i nostri amici conosciuti al POLI per aver reso piacevoli e indimenticabili questi anni di studio.

Un ringraziamento speciale ai nostri genitori per averci consentito di studiare e formarci.

Angelo e Luca.



## Sintesi

La durabilità è oggi uno degli aspetti più importanti che interessano il mondo delle costruzioni; in un periodo storico in cui la sostenibilità ambientale è diventata di interesse globale, nuove sfide tecnologiche sono state proposte atte a migliorare l'impatto ecologico del calcestruzzo. In questo contesto si inserisce il progetto ReSHEALience con il proposito di promuovere la realizzazione di nuovi materiali maggiormente resistenti e durabili nel tempo. La diminuzione del consumo di calcestruzzo e la riduzione degli interventi di manutenzione permettono di abbattere le emissioni di anidride carbonica in atmosfera, rendendo l'intero processo più rispettoso per l'ambiente. I calcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni si prestano ad essere considerati come materiale ad alta durabilità, infatti le fibre permettono di creare uno stato multifessurativo dalle aperture ridotte, conferendo altresì al composito una maggiore capacità di auto-rigenerazione. I calcestruzzi studiati, oltre alla aggiunta di fibre e loppa d'altoforno, sono caratterizzati dall'ulteriore aggiunta dell'additivo cristallizzato PENETRON ADMIX®, con l'intento di aiutare l'auto-rigenerazione del calcestruzzo una volta fessurato.

Le caratteristiche meccaniche sono state valutate attraverso prove di compressione, di flessione e di trazione indiretta; al fine di verificare la validità delle prove di flessione sono state eseguite delle analisi teoriche inverse, attraverso la definizione di un legame costitutivo calibrato con le prove a trazione indiretta (DEWS), onde verificarne altresì la affidabilità ai fini delle pratiche applicazioni progettuali. Da ultimo, al fine di verificare la capacità di autoriparazione e l'eventuale connesso recupero delle prestazioni meccaniche, sono stati eseguiti su appositi campioni quattro cicli di fessurazione, con periodi di "guarigione" in immersione continua o in esposizione a cicli di asciutto/bagnato. A partire da componenti comuni, loppa d'altoforno, sabbia e acqua, si sono considerate tre diverse miscele, distinguendole per tipologia di cemento e fibre. La miscela di riferimento è composta da cemento tipo CEMI e fibre metalliche (MIX 0); gli altri due compositi, oltre che dai componenti comuni, sono caratterizzati da CEMI e fibre metalliche amorfe (MIX 1) o da CEMIII e fibre metalliche (MIX 2). I risultati sperimentali hanno mostrato una maggiore capacità di richiusura dei campioni dotati di fibre metalliche, confermando l'effetto benefico di una multifessurazione dalle aperture di dimensione assai ridotte, rivelando ottimi risultati, nel breve periodo, per i calcestruzzi a base di CEMIII. La definizione di indici di recupero

---

meccanico ha conferito un'idea della capacità di auto-rigenerazione dei compositi cementizi studiati, mostrando che superato il primo ciclo di fessurazione, i campioni sono stati in grado di recuperare parte della resistenza e della rigidità. In particolare, il mix di riferimento ha mostrato recuperi migliori in termini di resistenza, mentre i recuperi maggiori di rigidità sono stati raggiunti dalla miscela composta da CEMIII e fibre metalliche.

Lo studio dei diversi compositi cementizi è stato funzionale alla scelta della miscela da essere utilizzata per la realizzazione dei progetti pilota. Il comportamento dei calcestruzzi fibrorinforzati ad alte prestazioni è stato studiato in ambienti altamente aggressivi, quali le acque solfuree, con lo scopo di poter essere applicati alla realizzazione delle vasche di raccolta fanghi e acque di raffreddamento al servizio di centrali geotermiche in Toscana. La scelta definitiva è ricaduta sulla miscela di riferimento, grazie oltre che dai buoni risultati ottenuti dagli indici di richiusura e dal recupero meccanico, anche dalla facile ripetibilità del calcestruzzo e quindi alla standardizzazione dei risultati.

# Abstract

Nowadays the durability is one of the most important aspects that interest the world of building; in a historical period in which the environment sustainability has become worldwide interest and new technological challenges have been proposed as an improvement of ecological impact of concrete. The ReSHEALience project is included in this context, with the aim of promoting the design of new more resistant and more durability materials. The decrease of concrete consuming and the reduction in the number of maintenance operations allow to cut the carbon dioxide emissions in the atmosphere and so the entire process is more respectable for the environment.

The high performance fiber reinforced concrete are considered as high durability material, in fact the fibers allow to generate a multi-cracking with small crack-opening, giving a greater capacity to self-heal. The different concretes that have been studied, as well as the addition of fibers and blast, they have been characterized by the addition of PENETRON ADMIX<sup>®</sup>, i.e. a crystallizing additive which has helped the cracks' self-reclosing.

The mechanical characteristics have been evaluated through compression test, bending test and indirect tension test. In order to verify the validity of bending results, the inverse analysis have been implemented starting from the definition of constitutive law calibrated on the indirect tension test (DEWS). Four cycles of cracking on determined specimens, with healing period in continuous immersion or dry/wet cycles, have been performed in order to verify the self-healing capacity and the eventually recovery of mechanical characteristics.

Three different mixes have been considered starting from the common components such as blast, sand and water, then they have been distinguished by the typology of cement and fiber. The reference mix was composed by CEMI and steel fiber (MIX 0); the other two composites, as well as the common components, were characterized by CEMI and metallic amorphous fiber (MIX 1) or by CEMIII and steel fiber (MIX 2).

From analysing the data, the mixes with steel fiber have showed a greater capacity to reclose the cracks, thanks to the benefit of multi-cracking with small crack opening; the best results have been achieved by the concrete with CEMIII in the short period. The definition of the mechanical recovery index has given an idea of the self-healing capacity of composites studied, they showed that, when the first cycle of cracking has been surpassed, the specimens were able

---

to recovery part of the resistance and stiffness. In particular, the reference mix has showed the best recovery in terms of resistance, instead of the greatest one in terms of stiffness was MIX1. The survey about these different cementitious composites was functional to the choice of the mix that it was used to the design of pilot projects. The behaviour of high performance fiber reinforced concrete has been studied in highly aggressive environment, as sulphurous waters, with the aim to be applied in the design of sedimentation and water-cooling tanks for geothermal power plants in Tuscany. The definitive choice was the reference mix, due to good results in terms of reclosing index and mechanical recovery, as well as the easy repeatability of the concrete and results' standardization.

# Indice dei contenuti

<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>I</b>
<b>SINTESI.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>INDICE DEI CONTENUTI.....</b>	<b>VII</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE.....</b>	<b>X</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE.....</b>	<b>XVII</b>
<b>INDICE DELLE EQUAZIONI .....</b>	<b>XIX</b>
<b>CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAZIONI	1
1.2 RESHEALIENCE	2
1.3 OBBIETTIVI	4
1.4 STRUTTURA DEL DOCUMENTO	5
<b>CAPITOLO 2 STATO DELL'ARTE .....</b>	<b>7</b>
2.1 CALCESTRUZZO	9
2.1.1 <i>Cemento</i>	9
2.1.2 <i>Aggiunte minerali</i>	10
2.1.3 <i>Additivi</i>	11
2.1.4 <i>Aggregati</i>	13
2.2 DEGRADO DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ARMATO	14
2.2.1 <i>Degrado del calcestruzzo</i>	15
2.2.2 <i>Degrado precoce</i>	16
2.2.3 <i>Gelo-disgelo</i>	16
2.2.4 <i>Attacco solfatico</i>	18

---

2.2.5 <i>Reazione alcali-aggregati</i>	18
2.3 DEGRADO DELLE ARMATURE	20
2.3.1 <i>Corrosione del ferro</i>	20
2.3.2 <i>Corrosione da carbonatazione</i>	21
2.3.3 <i>Corrosione da cloruri</i>	23
2.3.4 <i>Corrosione acciai ad alta resistenza</i>	24
2.4 CALCESTRUZZO SELF-HEALING O AUTORIGENERANTE	25
2.4.1 <i>Fattori di influenza del self-healing</i>	29
2.4.2 <i>Auto-rigenerazione autogena</i>	30
2.4.3 <i>Auto-rigenerazione ingegnerizzata</i>	33
2.5 CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO	50
2.5.1 <i>Self-healing nei calcestruzzi fibrorinforzati</i>	53
<b>CAPITOLO 3 CAMPAGNA SPERIMENTALE.....</b>	<b>59</b>
3.1 REALIZZAZIONE DEI PROVINI	59
3.1.1 <i>Progettazione della composizione delle miscele</i>	60
3.1.2 <i>Getto, taglio e maturazione dei provini</i>	66
3.1.3 <i>Nomenclatura dei provini</i>	72
3.2 ORGANIZZAZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE	76
3.2.1 <i>Travetti</i>	76
3.2.2 <i>Lastrine</i>	79
3.2.3 <i>Dischi</i>	81
3.2.4 <i>DEWS</i>	82
3.2.5 <i>Cubi</i>	84
3.3 PROVE PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	85
3.3.1 <i>Pressa elettromeccanica</i>	85
3.3.2 <i>Prova a flessione su quattro punti</i>	88
3.3.3 <i>Prova DEWS (Double Edge Wedge Splitting)</i>	94
3.3.4 <i>Prova di compressione</i>	97
3.3.5 <i>Prefessurazione e rifessurazione</i>	99
<b>CAPITOLO 4 ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI.....</b>	<b>103</b>
4.1 ANALISI PROVE A FLESSIONE SU QUATTRO PUNTI	103
4.1.1 <i>Prove di rottura monotona</i>	105
4.1.2 <i>Prove di rottura con cicli di carico-scarico</i>	109
4.2 PROVE DI COMPRESSIONE	118
4.3 PROVE DI TRAZIONE INDIRETTA	123
4.4 ANALISI INVERSA	125

---

4.5 CARATTERIZZAZIONE DEL RECUPERO MECCANICO	134
4.5.1 Prove di fessurazione	134
4.5.2 Indice di recupero della resistenza 1 (ISR*)	135
4.5.3 Indice di recupero della resistenza 2 (ISR)	140
4.5.4 Indice di recupero del danno 1 (IDaRo)	144
4.5.5 Indice di recupero del danno 2 (IDaR)	148
4.5.6 Rapporto delle rigidzze 1 (StRo)	152
4.5.7 Rapporto delle rigidzze 2 (StR)	155
4.5.8 Indice di recupero della rigidzza (IStR)	159
4.5.9 Confronto tra gli indici di recupero meccanico e l'indice di richiusura	163
<b>CAPITOLO 5 CONCLUSIONI</b> .....	<b>167</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>171</b>
<b>APPENDICE A</b> .....	<b>175</b>
<b>APPENDICE B</b> .....	<b>185</b>
<b>APPENDICE C</b> .....	<b>207</b>
<b>APPENDICE D</b> .....	<b>219</b>
<b>APPENDICE E</b> .....	<b>245</b>

---

# Indice delle figure

Figura 1.1: Emissioni di gas serra in CO <sub>2</sub> eq divisa per settori economici [1]	1
Figura 1.2: Slogan di ReSHEALience	2
Figura 1.3: Sei programmi pilota in UHDC	3
Figura 2.1: Confronto tra calcestruzzo classico e ad alte prestazioni	8
Figura 2.2: Particolare sulle componenti del calcestruzzo	9
Figura 2.3: Aggregati del calcestruzzo	13
Figura 2.4: Curve granulometriche di progetto	14
Figura 2.5: Degrado da gelo-disgelo	17
Figura 2.6: a) curva numero di cicli gelo-disgelo e rapporto a/c per calcestruzzi con e senza aria inglobata b) visione microscopica di un calcestruzzo con aria inglobata [5].	17
Figura 2.7: legame idrossido-concentrazione di alcali [5].	19
Figura 2.8: Esempio di degrado dato dalla reazione alcali-aggregati	19
Figura 2.9: Reazione chimica dell'ossidazione del ferro	21
Figura 2.10: Evoluzione della carbonatazione nel tempo [5].	22
Figura 2.11: Velocità di carbonatazione in relazione all'umidità relativa [5].	22
Figura 2.12: Profondità di carbonatazione al variare del tempo [5].	23
Figura 2.13: Attacco localizzato da cloruri	24
Figura 2.14: definizione del calcestruzzo auto-rigenerante/riparante [JCI 2009, Igarashi et al., 2009]	25
Figura 2.15: Definizione del calcestruzzo auto-rigenerante basato su azioni e processo, RILEM-TC221 [De rooij & Schlangen, 2011]	26
Figura 2.16: Definizione del calcestruzzo auto-rigenerante proposta [Mihashi e Nishiwaki, 2012]	27
Figura 2.17: Classificazione dei principali meccanismi di autorigenerazione del calcestruzzo	27
Figura 2.18: Idratazione degli alluminati e dei solfati nel tempo	28
Figura 2.19: Interazione tra Ca(OH) <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O [Edvardsen, 1999]	29
Figura 2.20: Miglioramento dell'auto-rigenerazione: A) restrizione della fessura, B) apporto continuo d'acqua, C) additivi che aiutano l'idratazione e/o la carbonatazione	31

Figura 2.21: a) Fessura al valore ultimo di carico b) fessura alla fine della fase di scarico. [Kuang, 2008]	34
Figura 2.22: a) fessura alla fine della fase di scarico b) fessura riparata dalla resina c) nuova fessura dopo una seconda prova di carico. [Kuang, 2008]	34
Figura 2.23: Richiusura di una fessura mediante proliferazione batterica e precipitazione del carbonato di calcio	35
Figura 2.24: Esempio di argilla espansa con batteri e composti organici per alimentare la produzione di CaCO <sub>3</sub> [Jonkers, 2011]	36
Figura 2.25: Meccanismo potenza di auto-rigenerazione con SAP [Wong, Buenfeld, 2010]	37
Figura 2.26: Provini senza SAP; A) cicli asciutto/bagnato a 3, 7, 14, 28 giorni, B) 90% di UR, C) 60% di UR [Snoeck, 2012]	38
Figura 2.27: Provini con SAP; A) cicli asciutto/bagnato a 3, 7, 14, 28 giorni, B) 90% di UR, C) 60% di UR [Snoeck, 2012]	39
Figura 2.28: Composizione dei 4 mix per i confronti con impasto avente aggiunte cristalline, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]	40
Figura 2.29: Confronto aperture a 7 giorni rispetto all'apertura iniziale, campione OPC, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]	41
Figura 2.30: Indice di richiusa, $\beta(t)$ , al variare del tempo, per fessurazioni a 3 giorni, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]	42
Figura 2.31: Indice di richiusa, $\beta(t)$ , al variare del tempo, per fessurazioni a 28 giorni, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]	43
Figura 2.32: Richiusura fessure per i diversi mix, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]	44
Figura 2.33: Rilascio del sigillante incapsulato: A, B) reazione con acqua, umidita e temperatura; C) reazione con componenti presenti nell'impasto; D) reazione con altri componenti presenti in capsule separate	45
Figura 2.34: Grafico di confronto tra i diversi campioni: a) curva carico-spostamento della prima e seconda fessurazione; b) istogramma del recupero delle resistenze [Huang e Ye, 2011]	46
Figura 2.35: Auto-rigenerazione vascolare: A) adesivo monocomponente; B) adesivo bicomponente	47
Figura 2.36: Procedimento di auto-rigenerazione vascolare	48
Figura 2.37: Geometria di campioni preliminari: a) singolo layer di tubi; b) doppio layer di tubi [Joseph et al., 2010]	48
Figura 2.38: a) Grafico carico-apertura fessura, b) grafico carico-flessione, confronto tra campione auto-rigenerato a 24 ore e campione di controllo portato a rottura [Joseph et al., 2010]	49

---

Figura 2.39: Fibre metalliche in calcestruzzo fibrorinforzato	50
Figura 2.40: Comportamento incrudente e degradante di calcestruzzi fibrorinforzati per prove a trazione e flessione, [Naaman et al., 2006]	51
Figura 2.41: Curve carico/spostamento per a) basso contenuto di fibre b) alto contenuto di fibre	51
Figura 2.42: Tipologie di fibre	52
Figura 2.43: Caratteristiche di ciascun mix. [Homma et al., 2008-2009]	53
Figura 2.44: Spessore della cristallizzazione in rapporto alle dimensioni della fessura [Homma et al., 2008-2009]	54
Figura 2.45: Variazione della permeabilità in funzione dell'apertura [Homma et al., 2008-2009]	54
Figura 2.46: Dettaglio dei prodotti di richiusura delle fessure per le diverse tipologie di mix, [Homma et al., 2008-2009]	55
Figura 2.47: Costituenti del mix utilizzato nella campagna sperimentali, [Ferrara et al.(2012)]	56
Figura 2.48: Orientamento delle fibre e schema di prova a flessione su quattro punti, [Ferrara et al.,2011]	56
Figura 2.49: Curve sforzo-allungamento: a) multifessurazione di un campione avente le fibre parallele all'asse, b) localizzazione della fessura su campione con le fibre ortogonali all'asse, [Ferrara et al.(2012)]	57
Figura 2.50: Distribuzione delle fessure, a) multifessurazione in campione con fibre parallele all'asse, b) localizzazione in campione con fibre ortogonali all'asse, [Ferrara et al.(2012)]	57
Figura 3.1: Fibre metalliche d'acciaio (a sinistra) e fibre metalliche amorfe (a destra)	65
Figura 3.2: Curva granulometrica della sabbia utilizzata	65
Figura 3.3: Tipologie di casseri utilizzati. A partire da sinistra: Lastra, Travetti e Cilindri.	67
Figura 3.4: Getto di un travetto (sinistra) e di una lastra (destra).	69
Figura 3.5: Rappresentazione della disposizione delle fibre durante il getto	69
Figura 3.6: Lastra e cilindro segnati pronti per il taglio	70
Figura 3.7: Taglio di una lastra con sega circolare GREGORI	70
Figura 3.8: Operatore occupato al taglio dei cilindri con clipper Major (NORTON)	71
Figura 3.9: Tagli eseguiti per l'ottenimento di lastrine e DEWS (vista dall'alto)	71
Figura 3.10: Tagli eseguiti per l'ottenimento dei cubi	72
Figura 3.11: Posizione lastrine del MIX 0 nella lastra dalle quali sono state tagliate	73
Figura 3.12: Posizione lastrine del MIX 1 e del MIX 2 nella lastra dalle quali sono state tagliate	75

Figura 3.13: Pressa elettromeccanica INSTRON 8562 del Laboratorio Prove Materiali Strutture e Costruzioni del Politecnico di Milano.	86
Figura 3.14: Quadro di controllo della pressa elettromeccanica INSTRON	86
Figura 3.15: Sostegni necessari per l'utilizzo degli LVDT	87
Figura 3.16: Gondola	87
Figura 3.17: Centralina e computer impiegati per l'acquisizione dei dati	88
Figura 3.18: Set up della pressa elettromeccanica per lo svolgimento della prova a flessione su quattro punti	89
Figura 3.19: Posizionamento degli strumenti di misura per travetto sottoposti a prova di flessione su quattro punti	90
Figura 3.20: Posizionamento degli strumenti di misura per lastrina sottoposta a prova di flessione su quattro punti	90
Figura 3.21: Linee di riferimento	91
Figura 3.22: Lastrine pronte per essere sottoposte a prova di flessione su quattro punti	91
Figura 3.23: Prova a flessione su quattro punti (su una lastrina)	92
Figura 3.24: Curve P-COD (a sinistra) e P-Freccia (a destra) di travetti sottoposti a prove monotone di rottura con flessione su quattro punti	93
Figura 3.25: Curve P-COD (a sinistra) e P-Freccia (a destra) di lastrine sottoposte a prove monotone di rottura con flessione su quattro punti	93
Figura 3.26: Curve P-COD (a sinistra) e P-Freccia (a destra) di un travetto sottoposto a prova di rottura con cicli di carico-scarico per mezzo di flessione su quattro punti	94
Figura 3.27: Curve P-COD (a sinistra) e P-Freccia (a destra) di una lastrina sottoposta a prova di rottura con cicli di carico-scarico per mezzo di flessione su quattro punti	94
Figura 3.28: Orientamento delle fibre nei provini per prove DEWS	94
Figura 3.29: Dimensione campione sottoposto a prova DEWS e posizionamento degli strumenti di misura	95
Figura 3.30: Prova di trazione indiretta (DEWS)	96
Figura 3.31: Curve P-COD risultanti da prove DEWS su campioni con comportamento incoerente	97
Figura 3.32: Curve P-COD risultanti da prove DEWS su campioni con comportamento incoerente	97
Figura 3.33: Pressa Controls AUTOMAX 5 del Laboratorio Prove Materiali Strutture e Costruzioni del Politecnico di Milano.	98
Figura 3.34: Termini utilizzati per il calcolo del $COD_{LVDT, r}$	100
Figura 3.35: Curve di prefessurazione e rifessurazione di un travetto	101

---

Figura 3.36: Curve di prefessurazione e rifessurazione di una lastrina	101
Figura 4.1: Prova a flessione su quattro punti a) Schema statico; b) Diagramma dei momenti flettenti agenti sul provino	104
Figura 4.2: Curva di rottura monotona del travetto IIIM_2 in funzione del carico (grafico a sinistra) e dello sforzo nominale (grafico a destra)	105
Figura 4.3 Curva di rottura monotona della lastrina IIIM_2 in funzione del carico (grafico a sinistra) e dello sforzo nominale (grafico a destra)	105
Figura 4.4: Curve di rottura monotona dei travetti sottoposti a prova di flessione su quattro punti. Le linee più spesse rappresentano le curve di riferimento	106
Figura 4.5: Curve di rottura monotona delle lastre sottoposte a prova di flessione su quattro punti. Le linee più spesse rappresentano le curve di riferimento	106
Figura 4.6: Curve di rottura monotona delle lastre del MIX_CEMI_SF sottoposte a prova di flessione su quattro punti ad un anno dal getto (in marrone maturate in camera umida, in azzurro immerse in acqua geotermica dopo sei mesi)	108
Figura 4.7: Curve di rottura monotona delle lastre del MIX_CEMI_AF sottoposte a prova di flessione su quattro punti ad un anno dal getto (in marrone maturate in camera umida, in azzurro immerse in acqua geotermica dopo sei mesi)	108
Figura 4.8: Curve di rottura monotona delle lastre del MIX_CEMIII_SF sottoposte a prova di flessione su quattro punti ad un anno dal getto (in marrone maturate in camera umida, in azzurro immerse in acqua geotermica dopo sei mesi)	109
Figura 4.9: Rigidezze di carico	110
Figura 4.10: Rigidezze di scarico	112
Figura 4.11: Equazione polinomiale di sesto grado che esprime la rigidezza di carico in funzione dell'apertura di fessura	113
Figura 4.12: Curve di danno travetti	114
Figura 4.13: Curve di danno lastre	115
Figura 4.14: Confronto curve di rottura ciclica	116
Figura 4.15: Variazione rigidezza di carico da un ciclo all'altro per i travetti	117
Figura 4.16: Variazione rigidezza di carico da un ciclo all'altro per le lastre	117
Figura 4.17: a) Resistenze in funzione della frequenza col quale si verificano; b) Definizione dell' $R_{ck}$ [30]	118
Figura 4.18: Istogramma raffigurante le resistenze cubiche dei campioni del MIX_CEMI_SF	121

Figura 4.19: Istogramma raffigurante le resistenze cubiche dei campioni del MIX_CEMI_AF	121
Figura 4.20: Istogramma raffigurante le resistenze cubiche dei campioni del MIX_CEMIII_SF	122
Figura 4.21: Prove DEWS eseguite sul MIX_CEMI_SF	124
Figura 4.22: Prove DEWS eseguite sul MIX_CEMI_AF	124
Figura 4.23: Prove DEWS eseguite su sul MIX_CEMIII_SF	124
Figura 4.24: Curva sforzo/spostamento di un calcestruzzo con capacità incrudente	125
Figura 4.25: Legame costitutivo incrudente alla trazione	126
Figura 4.26: Posizionamento dalla DEWS	126
Figura 4.27: Curva modello e prove DEWS incrudenti sul MIX_CEMI_SF	127
Figura 4.28: Curva modello e prove DEWS incrudenti sul MIX_CEMI_AF	128
Figura 4.29: Curva modello e prove DEWS incrudenti sul MIX_CEMIII_SF	128
Figura 4.30: Grafici sforzo nominale/COD, travetti MIX_CEMI_SF	130
Figura 4.31: Grafici sforzo nominale/COD, lastrine MIX_CEMI_SF	131
Figura 4.32: Grafici sforzo nominale/COD, travetti MIX_CEMI_AF	131
Figura 4.33: Grafici sforzo nominale/COD, lastrine MIX_CEMI_AF	132
Figura 4.34: Grafici sforzo nominale/COD, travetti MIX_CEMIII_SF	132
Figura 4.35: Grafici sforzo nominale/COD, lastrine MIX_CEMIII_SF	133
Figura 4.36: Traslazione delle curve di rifessurazione del provino IA_4	135
Figura 4.37: Rappresentazione grafica dei punti significativi per il calcolo dell'indice ISR*	136
Figura 4.38: Indici ISR* dei travetti del MIX_CEMI_AF	137
Figura 4.39: Indici ISR* medi dei travetti immersi	138
Figura 4.40: Indici ISR* medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato	139
Figura 4.41: Indici ISR* medi delle lastrine	139
Figura 4.42: Rappresentazione grafica dei punti significativi per il calcolo dell'indice ISR	141
Figura 4.43: Indici ISR dei travetti del MIX_CEMI_AF	141
Figura 4.44: Indici ISR medi dei travetti immersi	142
Figura 4.45: Indici ISR medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato	143
Figura 4.46: Indici ISR medi delle lastrine	143
Figura 4.47: Rappresentazione grafica dei parametri significativi per il calcolo dell'indice IDaRo	145
Figura 4.48: Indici IDaRo dei travetti del MIX_CEMI_AF	145
Figura 4.49: Indici IDaRo medi dei travetti immersi	146
Figura 4.50: Indici IDaRo medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato	147
Figura 4.51: Indici IDaRo medi delle lastrine	147

---

Figura 4.52: Rappresentazione grafica dei parametri significativi per il calcolo dell'indice IDaR	149
Figura 4.53: Indici IDaR dei travetti del MIX_CEMI_AF	149
Figura 4.54: Indici IDaR medi dei travetti immersi	150
Figura 4.55: Indici IDaR medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato	151
Figura 4.56: Indici IDaR medi delle lastrine	151
Figura 4.57: Indici StRo dei travetti del MIX_CEMI_AF	153
Figura 4.58: Indici StRo medi dei travetti immersi	154
Figura 4.59: Indici StRo medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato	154
Figura 4.60: Indici StRo medi delle lastrine	155
Figura 4.61: Indici StR dei travetti del MIX_CEMI_AF	156
Figura 4.62: Indici StR medi dei travetti immersi	157
Figura 4.63: Indici StR medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato	158
Figura 4.64: Indici StR medi delle lastrine	158
Figura 4.65: Valutazione delle rigidezze di carico del materiale vergine	160
Figura 4.66: Indici IStR dei travetti del MIX_CEMI_AF	160
Figura 4.67: Indici IStR medi dei travetti immersi	161
Figura 4.68: Indici IStR medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato	162
Figura 4.69: Indici IStR medi delle lastrine	162
Figura 4.70: Confronto tra l'indice ISR e l'indice di richiusura per i travetti del MIX_CEMI_SF	164
Figura 4.71: Confronto tra l'indice IDaRo e l'indice di richiusura per i travetti del MIX_CEMI_SF	165
Figura 4.72: Confronto tra l'indice IStT e l'indice di richiusura per i travetti del MIX_CEMI_SF	165

# Indice delle tabelle

Tabella 3.1: Mix design “MIX 0”	60
Tabella 3.2: Parametri rappresentativi “MIX 0”	60
Tabella 3.3: Mix design “MIX 1”	61
Tabella 3.4: Mix design “MIX 2”	61
Tabella 3.5: Classificazione dei cementi secondo l’UNI EN 197-1	62
Tabella 3.6: Requisiti meccanici e fisici dei cementi dettati dalla l’UNI EN 197-1	63
Tabella 3.7: Composizione chimica della loppa d’altoforno usata nelle miscele studiate	64
Tabella 3.8: Tipologia casseforme e calcolo volume calcestruzzo necessario per realizzare i provini	66
Tabella 3.9: Quantità dei componenti per la realizzazione dei provini del MIX 0	67
Tabella 3.10: Quantità dei componenti per la realizzazione dei provini del MIX 1	68
Tabella 3.11: Quantità dei componenti per la realizzazione dei provini del MIX 2	68
Tabella 3.12: Lista dei travetti composti dal MIX 0	77
Tabella 3.13: Lista dei travetti composti dal MIX 1	78
Tabella 3.14: Lista dei travetti composti dal MIX 2	78
Tabella 3.15: Lista delle lastrine composte dal MIX 0	80
Tabella 3.16: Lista delle lastrine composte dal MIX 1	80
Tabella 3.17: Lista delle lastrine composte dal MIX 2	81
Tabella 3.18: Lista dei dischi composti dal MIX 0	82
Tabella 3.19: Lista provini del MIX 0 sottoposti a prove DEWS	83
Tabella 3.20: Lista provini del MIX 1 sottoposti a prove DEWS	83
Tabella 3.21: Lista provini del MIX 2 sottoposti a prove DEWS	83
Tabella 3.22: Lista cubi del MIX 0	84
Tabella 3.23: Lista cubi del MIX 1	84
Tabella 3.24: Lista cubi del MIX 2	84
Tabella 3.25: Massa dei cubi del MIX 0	98
Tabella 3.26: Massa dei cubi del MIX 1	99
Tabella 3.27: Massa dei cubi del MIX 2	99
Tabella 4.1: Parametri fondamentali curve di rottura monotona	107
Tabella 4.2: Rigidezze di carico campione IIIM_7	111

---

Tabella 4.3: Rigidezze di carico campione IIIM_7	112
Tabella 4.4: Indici di danno travetti	114
Tabella 4.5: Indici di danno lastrine	115
Tabella 4.6: Dati registrati durante le prove a compressione e calcolo della densità per il MIX_CEMI_SF	119
Tabella 4.7: Dati registrati durante le prove a compressione e calcolo della densità per il MIX_CEMI_AF	120
Tabella 4.8: Dati registrati durante le prove a compressione e calcolo della densità per il MIX_CEMIII_SF	120
Tabella 4.9: Resistenza cubica e cilindrica dei provini del MIX_CEMI_SF	120
Tabella 4.10: Resistenza cubica e cilindrica dei provini del MIX_CEMI_AF	121
Tabella 4.11: Resistenza cubica e cilindrica dei provini del MIX_CEMIII_SF	122
Tabella 4.12: Parametri fondamentali delle prove di compressione	122
Tabella 4.13: Resistenze caratteristiche cilindriche e cubiche a compressione	123
Tabella 4.14: Lunghezze caratteristiche	127
Tabella 4.15: Confronto dei risultati sperimentali ottenuti da prove a flessione e analisi inversa	130
Tabella 4.16: COD residui prefessurazione e rifessurazione del provino IA_4	135
Tabella 4.17: Calcolo indici ISR* per il campione IA_4	137
Tabella 4.18: Indici ISR* medi	138
Tabella 4.19: Calcolo indici ISR per il campione IA_4	140
Tabella 4.20: Indici ISR medi	142
Tabella 4.21: Calcolo indici IDaRo per il campione IA_4	144
Tabella 4.22: Indici IDaRo medi	146
Tabella 4.23: Calcolo indici IDaR per il campione IA_4	148
Tabella 4.24: Indici IDaR medi	150
Tabella 4.25: Calcolo indici StRo per il campione IA_4	152
Tabella 4.26: Indici StRo medi	153
Tabella 4.27: Definizione indice StR	155
Tabella 4.28: Calcolo indici StR per il campione IA_4	156
Tabella 4.29: Indici StR medi	157
Tabella 4.30: Calcolo indici IStR per il campione IA_4	159
Tabella 4.31: Indici IStR medi	161
Tabella 4.32: Indici ICH del MIX_CEMI_SF	163
Tabella 4.33: Indici ICH del MIX_CEMI_AF	164
Tabella 4.34: Indici ICH del MIX_CEMIII_SF	164

# Indice delle equazioni

Equazione 3.1: COD residuo all'altezza degli LVDT	100
Equazione 3.2: COD residuo all'intradosso del provino	100
Equazione 3.3: COD residuo atteso una volta scaricato il provino	100
Equazione 4.1: Formula di Navier	103
Equazione 4.2: Momento massimo agente su un provino sottoposto a prova di flessione su quattro punti	104
Equazione 4.3: Sforzo nominale per provini soggetti a prova di flessione su quattro punti	105
Equazione 4.4: Variabile di danno	113
Equazione 4.5: Calcolo della resistenza caratteristica cilindrica a compressione	118
Equazione 4.6: Errore statistico standard	119
Equazione 4.7: Calcolo della deformazione	129
Equazione 4.8: Calcolo del momento sezionale	129
Equazione 4.9: Definizione indice ISR*	136
Equazione 4.10: Definizione indice ISR	140
Equazione 4.11: Definizione indice IDaRo	144
Equazione 4.12: Definizione indice IDaR	148
Equazione 4.13: Definizione indice StRo	152
Equazione 4.14: Definizione indice IStR	159
Equazione 4.15: Definizione indice ICH	163



# CAPITOLO 1

## INTRODUZIONE

### 1.1 Motivazioni

Al giorno d'oggi la sostenibilità ambientale è uno dei temi che appassiona il mondo; lo sviluppo tecnologico deve essere indirizzato verso la realizzazione di nuovi modelli di utilizzo e riutilizzo delle risorse, onde evitare di compromettere le generazioni future. La sfida è rivolta tanto al presente quanto al futuro, coinvolgendo il mondo economico, politico e sociale, cercando di modificare i processi produttivi di tutti i beni necessari al sostenimento moderno dell'uomo attraverso lo sviluppo di nuove tecnologie e materiali, atti al rispetto dell'ambiente e di chi lo abita.

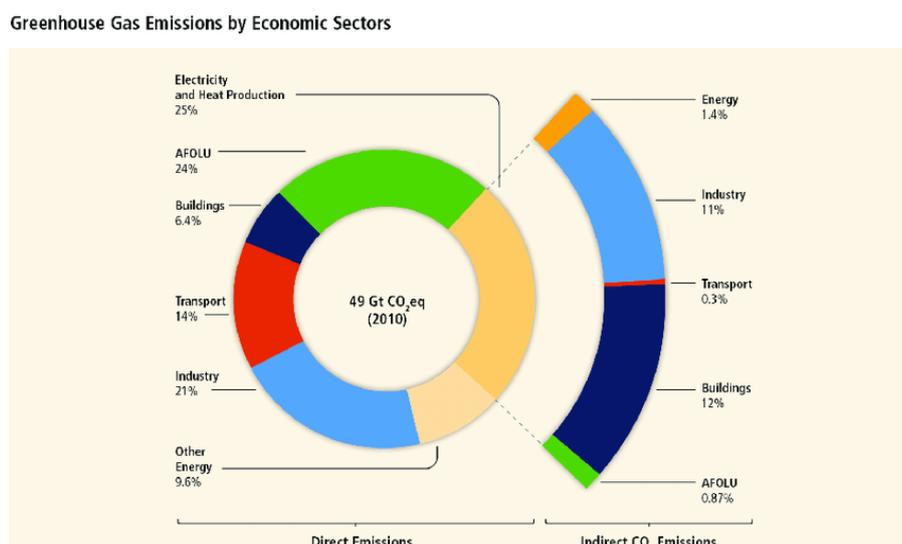


Figura 1.1: Emissioni di gas serra in CO<sub>2</sub>eq divisa per settori economici [1]

Il mondo delle costruzioni è uno dei maggiori responsabili delle emissioni di gas serra in atmosfera (Figura 1.1), prestare attenzione alla sostenibilità ha significato non solo modificare la progettazione strutturale ma altresì il processo di produzione, il trasporto e lo smaltimento del calcestruzzo. La durabilità è perciò diventata un aspetto peculiare delle costruzioni, affiancando il concetto di vita utile: la realizzazione con materiali ultra-performanti ha consentito di ridurre il consumo di calcestruzzo e se accostati a capacità di auto-riparazione anche gli interventi di manutenzione possono essere limitati. In questa prospettiva è stato avviato nel 2018 il progetto ReSHEALience, con il fine di studiare la dinamica di richiusura delle fessure, la via principale di ingresso degli agenti degradanti, di calcestruzzi aventi alta durabilità.

## 1.2 ReSHEALience

Il progetto ReSHEALience ha come scopo la realizzazione di un calcestruzzo ad alta durabilità (UHDC) ed una nuova metodologia di progettazione, definita Durability Assessment-based Design (DAD), al fine di migliorare la resistenza al degrado e la predizione a lungo termine delle performance della struttura in condizioni ambientali particolarmente aggressive.



"Rethinking coastal defence and Green-Energy Service  
infrastructures through enhanced-durability  
high-performance fibre reinforced cement-based materials"

Figura 1.2: Slogan di ReSHEALience

Il progetto si inserisce all'interno di una visione ecosostenibile di tutta l'industria delle costruzioni promuovendo la realizzazione di nuovi materiali maggiormente resistenti e durabili negli anni, diminuendo il consumo di calcestruzzo e gli interventi di manutenzione, abbattendo le emissioni di anidride carbonica. I nuovi materiali sono caratterizzati da un comportamento incrudente alla trazione con l'abilità di creare uno stato multifessurativo, superando così la modesta e poco affidabile resistenza a trazione del calcestruzzo, uno dei principali limiti di questo materiale. Pur utilizzando le medesime componenti di base (alto contenuto di cemento, utilizzo di aggiunte pozzolaniche come la loppa, solo aggregato fine, bassi rapporti acqua cemento, alto dosaggio di superfluidificante e elevato quantitativo di fibre), è sufficiente un corretto dosaggio dei costituenti per avere un comportamento

incrudente. Se poi sono affiancati da specifici additivi in grado di promuovere, in sinergia con il rinforzo fibroso, l'auto-richiusura delle fessure ed il recupero meccanico, allora l'elevata prestazione meccanica diviene anche elevata durabilità non solo in stadio non fessurato, grazie all'elevata compattezza e alla ridotta porosità, ma persino in stadio fessurato. L'obiettivo è allora riuscire ad inserire tale caratteristica come un proposito della corretta progettazione.

ReSHEALience è un progetto finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del programma Horizon 2020, che coinvolge sei università coordinate dal Politecnico di Milano e otto partner industriali. Horizon 2020 è il programma di ricerca ed innovazione per il periodo 2014-2020, lo scopo è incrementare la competitività dell'Europa attraverso l'interconnessione tra ricerca scientifica, industria e richiesta sociale.

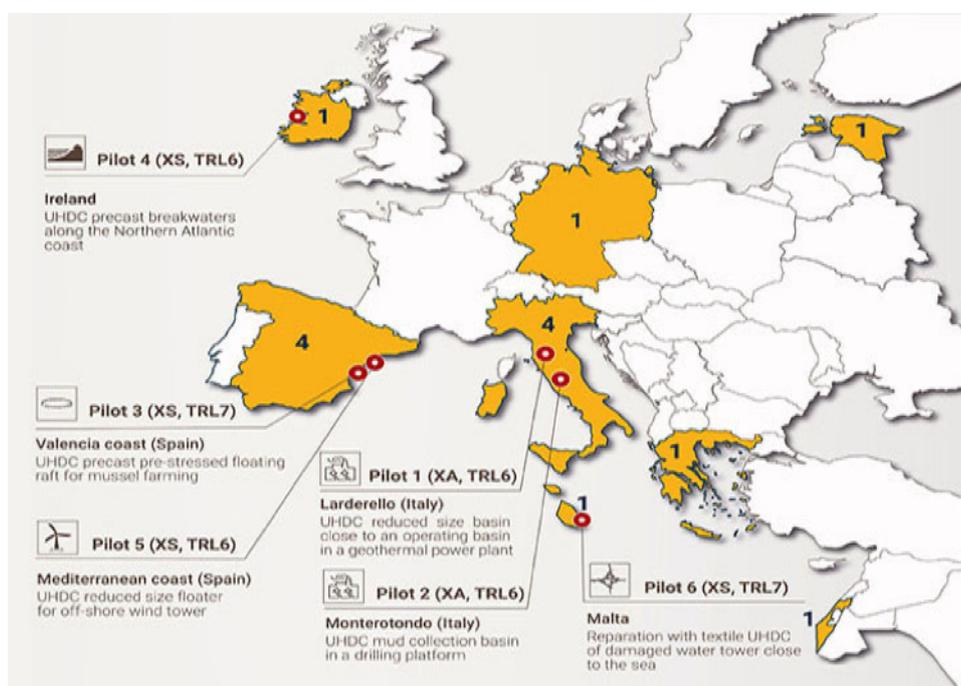


Figura 1.3: Sei programmi pilota in UHDC

Alla ricerca scientifica è affiancata la progettazione e la realizzazione di strutture pilota in ambienti estremamente aggressivi, scelte per monitorare il comportamento e il degrado di calcestruzzi ad alta durabilità (UHDC, Ultra High Durability Concrete). Le sei opere rappresentano settori strategici del prossimo futuro come le energie rinnovabili, lo sfruttamento delle acque marine, la geotermica e il recupero di edifici esistenti:

- due vasche di decantazione di acqua e fanghi al servizio di impianti geotermici, Toscana, Italia;
- zattere-graticcio per la mitilo-coltura, Valencia; Spagna;
- galleggiante per torri eoliche offshore, Valencia; Spagna;

- ripristino strutturale di una torre piezometrica, La Valletta, Malta;
- pontile galleggiante, baia di Galway, Irlanda.

## 1.3 Obiettivi

Lo studio ha come scopo la definizione del comportamento di tre diversi compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni:

- MIX 0 (o MIX\_CEMI\_SF): rappresenta il mix di riferimento ed è costituito da CEM I, fibre metalliche ed altri costituenti comuni ai tre composti;
- MIX 1 (o MIX\_CEMI\_AF): costituito da CEM I, fibre metalliche amorfe ed altri costituenti comuni ai tre composti;
- MIX 2 (o MIX\_CEMIII\_SF): costituito da CEM III, fibre metalliche ed altri costituenti comuni ai tre composti.

I costituenti comuni sono composti oltre che da acqua, loppa d'altoforno, sabbia e additivo fluidificante, anche da un additivo cristallino PENETRON ADMIX®, inserito al fine di stimolare la capacità autogena di auto-riparazione. La campagna sperimentale ha previsto di definire il comportamento meccanico e l'auto-rigenerazione di campioni aventi due diverse geometrie (lunghezza • base • altezza):

- travetti: (500 • 100 • 100) mm
- lastre: (500 • 100 • 25) mm

In particolare, sono state eseguite prove di caratterizzazione meccanica (prove monotone di flessione e trazione indiretta a rottura) e quattro cicli di fessurazione: il primo a sei mesi dal getto e in successione a un mese, tre mesi e sei mesi dalla prima. L'obiettivo era valutare la capacità di richiusura delle fessure e di recupero meccanico di ciascun MIX e geometria. Durante i periodi di riposo i campioni sono stati lasciati in acqua geotermica o sottoposti a cicli asciutto/bagnato. L'elaborato si concentra sui risultati del comportamento meccanico dei tre composti, con la definizione di diversi indici di recupero di resistenza, di danno e di rigidità e sul confronto dei dati sperimentali con analisi computazionale, quest'ultima basata sulla definizione del legame costitutivo. I dati numerici relativi al mix 0, utilizzati per lo svolgimento delle analisi, sono stati tratti dall'elaborato di L. Papa e S. Passoni [2]; per lo studio della capacità di richiusura delle fessure si rimanda al lavoro svolto da A. Cervini e N. Borgioni [3]; redatto in contemporanea a questa tesi.

## 1.4 Struttura del documento

La tesi è stata strutturata in cinque capitoli:

- Il primo capitolo è l'introduzione all'elaborato, nel quale vengono espone le motivazioni che hanno spinto allo studio e il contesto in cui si inserisce.
- Il secondo capitolo riporta lo stato dell'arte, descrivendo in sintesi la chimica del calcestruzzo e le cause del suo degrado. È stata riportata inoltre una raccolta della letteratura sulla capacità auto-rigenerante del calcestruzzo, soffermandosi sulle indagini relative ai fibrorinforzati.
- Il terzo capitolo è la sezione in cui si illustra l'intera campagna sperimentale, vengono descritte le caratteristiche dei mix e la loro realizzazione, le prove e la strumentazione necessaria ad effettuarle.
- Il quarto capitolo è la sezione dedicata all'analisi dei risultati, in cui si introducono le analisi inverse, utili come validazione delle indagini sperimentali ai fini della definizione di un legame costitutivo da impiegarsi per le applicazioni progettuali. In questa sezione sono descritti gli indici di recupero di resistenza, di danno e di rigidità e tutti i parametri considerati, atti a caratterizzare il recupero meccanico dopo i periodi di riposo.
- Il quinto capitolo è la conclusione del lavoro svolto, in cui, alla luce delle analisi svolte, si commentano i risultati ottenuti.



## **CAPITOLO 2**

# **STATO DELL'ARTE**

In un periodo storico che mostra grande interesse verso la sostenibilità ambientale di qualsiasi attività umana, la durabilità delle strutture diventa un aspetto da non sottovalutare, onde anche il settore delle costruzioni e della ingegneria civile possa apportare il suo contributo al miglioramento delle prospettive di sviluppo per le future generazioni. Molte delle costruzioni realizzate oltre 50anni fa oggi soffrono di un forte degrado e sono sottoposte a continui interventi di manutenzione costosi, sotto un profilo sia economico e sia ambientale. Il rispetto dell'ambiente e la riduzione dell'inquinamento sono diventati principi cardine anche per le attività di concezione e progettazione delle opere di ingegneria civile, spingendo i ricercatori alla formulazione e realizzazione di nuove miscele di calcestruzzo, caratterizzate da elevate prestazioni non solamente in termini di resistenze meccaniche, ma anche di durabilità nei confronti degli agenti aggressivi.

Al concetto di durabilità è affiancata la definizione di vita utile di un'opera. Tenendo presente che il processo di produzione, trasporto e messa in opera del calcestruzzo è caratterizzato da un forte impatto ambientale, si è resa indispensabile la realizzazione di nuovi materiali. Le prestazioni superiori dei nuovi composti consentono non solo di ridurre i quantitativi impiegati a parità di prestazione strutturale, ma anche di estendere la vita utile delle strutture stesse riducendo contemporaneamente la necessità e la frequenza degli interventi manutentivi.

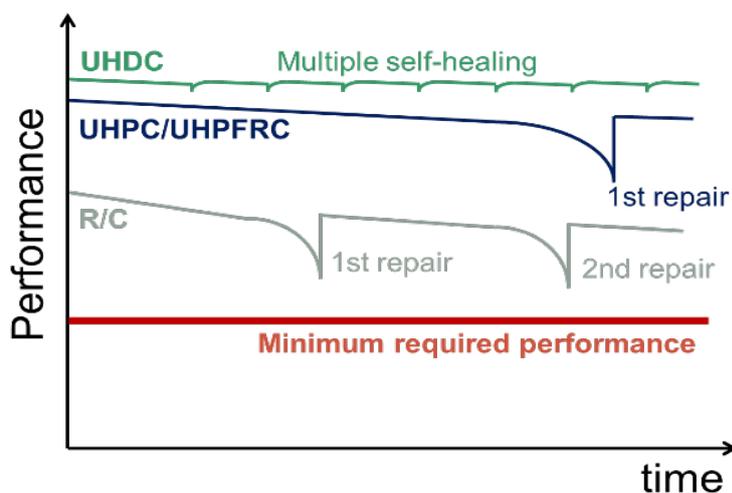


Figura 2.1: Confronto tra calcestruzzo classico e ad alte prestazioni

Le costruzioni realizzate con calcestruzzi tradizionali sono soggette al consueto deterioramento del materiale e se non sottoposte a ciclici interventi di manutenzione conducono ad una seria riduzione della capacità resistente. Le fessure che inequivocabilmente si possono creare nell’arco di vita utile della struttura sono una via di ingresso agli agenti aggressivi, i quali avviano il processo di degradazione. L’utilizzo invece di calcestruzzi ad alte prestazioni, a fronte di un costo iniziale maggiore, permettono di ridurre il numero di interventi di riparazione, trasformandosi nel lungo periodo nella scelta economicamente più vantaggiosa. I calcestruzzi con capacità di auto-rigenerazione associano a buone capacità prestazionali la possibilità di una richiusura autonoma della fessura, con conseguente recupero meccanico, permettendo così di ridurre al minimo gli interventi di manutenzione straordinaria. In luoghi di difficile accesso o in condizioni di elevata aggressività dell’ambiente in cui la struttura si trova, la scelta di calcestruzzi auto-rigeneranti (UHDC, Ultra High Durability Concrete) si rivela essere la più sicura e la migliore sotto il profilo prestazionale ed economico, allungando la vita utile delle opere e consentendo realizzazioni più ardite nelle forme e nel rispetto della sostenibilità ambientale.

La predilezione dei calcestruzzi UHDC è ancora fortemente limitata, tuttavia nel prossimo futuro potrebbe cambiar il metodo di concepire una struttura, permettendone la realizzazione con un quantitativo ridotto di materiale, rispetto a quanto previsto dal tradizionale calcestruzzo a parità di prestazione. La riduzione degli interventi di manutenzione e un mantenimento costante nel tempo delle risorse meccaniche, rendono questo materiale particolarmente affine in contesti eccezionali o difficilmente accessibili: fondazioni profonde, cisterne di liquidi pericolosi, contenitori per materiale radioattivo, strutture in ambienti fortemente corrosivi.

## 2.1 Calcestruzzo

Il calcestruzzo è un materiale artificiale utilizzato nelle costruzioni costituito da un legante, acqua e aggregati; ciascuno dei tre costituenti ha un ruolo fondamentale per la resa in opera del materiale. Nella prima fase deve garantire lavorabilità e fluidità, mantenendo però omogeneità e coesione, nella seconda fase deve indurire e manifestare buone resistenze meccaniche, bassa deformabilità e resistenza al degrado.



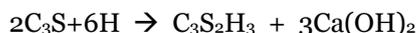
Figura 2.2: Particolare sulle componenti del calcestruzzo

### 2.1.1 Cemento

Il cemento portland è un legante idraulico, che se mescolato con acqua indurisce e acquista notevoli proprietà meccaniche. Esso è alla base della realizzazione della maggior parte dei calcestruzzi oggi utilizzati ed è costituito dal clinker (una miscela di argilla, calcare e sabbia) con aggiunta di gesso e talvolta di loppa d'altoforno, pozzolana, cenere volante etc. Il clinker, dopo la macinatura, omogeneizzazione e cottura dei suoi componenti, è costituito da molecole quali silicati (bicalcici o tricalcici), alluminati ed altri composti, che definiscono la fase ferrica. Aggiungendo acqua al cemento si ottiene un impasto che in un breve periodo di tempo acquista una forma e capacità resistente, nelle prime fasi il composto risulta essere plastico e lavorabile. All'avanzare delle reazioni di idratazione del cemento, il composto diventa sempre meno lavorabile e solidificandosi termina il processo di presa. Da questo momento inizia la stagionatura del calcestruzzo, in cui l'idratazione dei componenti del cemento, anche se con velocità decrescente, prosegue nello sviluppo dei legami che ne definiscono la resistenza meccanica.

I primi a reagire sono gli alluminati ( $C_3A$  e  $C_2A$ ) responsabili del processo di presa iniziale, maggiore è la finezza delle particelle di cemento minor è il tempo in cui reagiscono, talvolta però accade che la reazione sia fin troppo rapida da ridurre eccessivamente il periodo in cui il calcestruzzo resta lavorabile. Al fine di posticipare il processo di presa, al composto viene aggiunto del gesso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), il quale libera ioni solfati ( $SO_4^{2-}$ ) e ioni di calcio ( $Ca^{2+}$ ) che reagendo con gli alluminati generano un trifosfato, che avvolgendo le particelle di cemento ne rallentano l'idratazione. La pellicola di trifosfato (ettringite) in breve tempo diventa permeabile, riavviando l'idratazione e le conseguenti reazioni di presa.

Dall'idratazione dei silicati tricalcici ( $C_3S$ ) e bicalcici ( $C_2S$ ) si forma il silicato di calcio idratato ( $C_3S_2H_3$ ) o gel C-S-H, responsabile del processo di indurimento, di maturazione e dello sviluppo della resistenza meccanica del calcestruzzo.



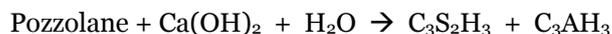
Come ulteriore prodotto della reazione si ha l'idrossido di calcio ( $Ca(OH)_2$ ) o portlandite, il quale non contribuisce allo sviluppo della resistenza meccanica del composto, ma è la causa dell'alcalinità dell'ambiente. La velocità di produzione del gel C-S-H dipende dalla composizione del cemento e, in particolare, dalla quantità di silicato tricalcico. Agendo sul rapporto tra  $C_3S/C_2S$  si modifica la velocità di sviluppo della resistenza meccanica, all'aumentare del rapporto cresce la rapidità del processo di indurimento, poiché il silicato tricalcico si idrata più rapidamente.

### **2.1.2 Aggiunte minerali**

Diverse sostanze minerali possono essere aggiunte alla miscela di cemento portland al fine di migliorarne le caratteristiche meccaniche ed aiutarne l'idratazione. Le aggiunte pozzolaniche e la loppa d'altoforno sono i supplementi maggiormente inclusi all'interno dell'impasto.

#### ***AGGIUNTE POZZOLANICHE***

I materiali pozzolanici sono ricchi di silice e di alluminati, singolarmente non possiedono proprietà leganti ma se considerati all'interno della pasta cementizia sono in grado di reagire con l'idrossido di calcio ( $Ca(OH)_2$ ), prodotto dell'idratazione dei silicati. Le pozzolane quindi contribuiscono alla formazione del silicato di calcio idrato (gel C-S-H) responsabile del processo di indurimento e sviluppo della capacità resistente.



#### ***POZZOLANE NATURALI***

La pozzolana è un prodotto di deposito che deriva da eruzioni vulcaniche che nei secoli ha subito diverse trasformazioni chimiche. La pozzolana fu largamente usata dagli antichi romani per le costruzioni, alcune delle quali ancora esistenti dopo 2000 anni. Tutte le aggiunte pozzolaniche godono della proprietà di essere porose, favorendo il processo di idratazione e il potere legante del cemento.

### *CENERE VOLANTE*

Le ceneri volanti sono un rifiuto delle centrali termoelettriche derivanti dalla combustione del carbone. Sono polveri fini, di particelle sferiche e vetrose, composte per lo più da silice ( $\text{SiO}_2$ ) e da ossidi di alluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), che affiancandosi ai prodotti di idratazione permettono di raggiungere resistenze meccaniche maggiori. Inoltre, la loro finezza contribuisce di avere una porosità capillare ridotta.

### *FUMO DI SILICE*

Il fumo di silice è un materiale finissimo prodotto di scarto della lavorazione della silice, composto prevalentemente da  $\text{SiO}_2$  ed in minima parte da impurezza di origine minerale; ha dimensione fino a 100 volte inferiore alle particelle di cemento, per cui è in grado di ridurre la porosità capillare e la permeabilità del calcestruzzo. Il fumo di silice ha capacità idraulica, a differenza della cenere volante e delle pozzolane naturali, per cui se a contatto con acqua ed in virtù della grande superficie specifica, favorisce la presa dell'impasto, ma riducendone la lavorabilità.

### *LOPPA D'ALTOFORNO*

La loppa d'altoforno è un materiale derivante dal processo industriale di produzione della ghisa: i liquidi di scarto, molto caldi vengono raffreddati bruscamente dando origine ad un materiale poroso e vetroso costituito principalmente da silicio, ossidi di calcio e alluminio. Tuttavia, la loro attività idraulica è latente e spesso deve essere attivata da materiali presenti già nella miscela del cemento come l'idrossido di sodio, il potassio o solfato di calcio. La loppa ha potere legante autonomo al contrario delle pozzolane, promuovendo così lo sviluppo della resistenza meccanica.

## **2.1.3 Additivi**

Gli additivi sono composti chimici che vengono aggiunti durante la miscelazione dell'impasto in quantità non superiori al 5% in massa del legante principale, con il fine di modificare le proprietà meccaniche e fisiche del calcestruzzo, agendo sia sul materiale fresco sia indurito.

### *FLUIDIFICANTI E SUPERFLUIDIFICANTI*

Permettono di aumentare la lavorabilità del calcestruzzo senza intervenire sul rapporto acqua/cemento; le molecole da cui sono costituiti hanno gruppi funzionali a carica negativa, per cui, grazie alla naturale repulsione, operano come agenti disperdenti. Per essere

considerati come additivi superfluidificanti devono garantire una riduzione del 12% dell'impiego di acqua rispetto ad un calcestruzzo privo di additivo. La grande peculiarità di queste aggiunte è la possibilità di avere getti lavorabili, la cui fluidità permette una facile compattazione ma con resistenze tipiche di calcestruzzi dal basso rapporto acqua/cemento.

### *ACCELERANTI DI PRESA*

Permettono di velocizzare il tempo di presa del calcestruzzo, soprattutto in condizioni di basse temperature. Vengono utilizzati prevalentemente nella realizzazione di pavimentazioni industriali per la rapidità con la quale possono essere calpestabili e per i rivestimenti provvisori delle gallerie per evitare la caduta di qualunque detrito.

### *ACCELERANTI DI INDURIMENTO*

Tali additivi permettono attraverso una più rapida idratazione del cemento di sviluppare più velocemente la resistenza meccanica, l'effetto si esaurisce intorno al settimo giorno e durante la stagionatura si può osservare una resistenza inferiore rispetto ai calcestruzzi non additivati. Il loro principale utilizzo avviene nella stagione fredda, quando le basse temperature e le gelate notturne possono compromettere l'idratazione.

### *RITARDANTI DI PRESA*

Questi additivi se aggiunti alla miscela permettono di conservare il più possibile la lavorabilità del calcestruzzo e vengono quasi sempre impiegati insieme agli additivi fluidificanti. La resistenza alle basse stagionature è fortemente limitata, motivo per il quale è necessario porre particolare attenzione all'indurimento del calcestruzzo fresco mantenendo sempre il giusto grado di umidità.

### *AERANTI*

Permettono di inglobare all'interno del calcestruzzo una quantità di aria non superiore al 5% del volume, al fine di migliorare il degrado da gelo-disgelo. Hanno la capacità di incrementare la lavorabilità, motivo per il quale è possibile ridurre la quantità di sabbia in favore dell'utilizzo di aggregati dalle forme sfavorevoli. È importante controllare la dislocazione delle bolle oltre alla loro dimensione, favorendo la realizzazione di un materiale omogeneo ed evitando zone dalla resistenza ridotta.

## 2.1.4 Aggregati

Gli aggregati rappresentano uno dei componenti principali del calcestruzzo, i quali hanno diversa natura, dimensione, densità e forma. Possono essere di origine naturale, derivanti dalla frantumazione di rocce oppure artificiali, ottenuti dallo sgretolamento di detriti derivanti da demolizione o da scarti industriali. Gli aggregati occupano gran parte del volume del calcestruzzo: il loro scopo non è solo di abbattere i costi ma anche quello di conferire stabilità volumetrica alla miscela, ridurre il calore di idratazione e il ritiro della pasta cementizia.



Figura 2.3: Aggregati del calcestruzzo

Le dimensioni sono le più varie possibili e devono rispettare la curva granulometrica di riferimento, in Figura 2.4, tenendo presente le dimensioni dell'elemento da realizzare e le disposizioni delle armature. Le forme sono altresì numerose variando da sferiche, onde ottimizzare il riempimento degli spazi ad angolari, difficilmente incastrabili. È opportuno che gli aggregati derivino da siti non lontani dal cantiere o dalla centrale di betonaggio, così da evitare che il trasporto incida eccessivamente sul costo complessivo, condizionando la tipologia di aggregato disponibile per la miscela. Le proprietà meccaniche non vengono quasi mai considerate, poiché nei calcestruzzi ordinari la resistenza globale dello stesso è governata dalla resistenza del legante e dai legami d'interfaccia tra aggregato e pasta cementizia. Situazione opposta vi è nei calcestruzzi ad alte prestazioni, nei quali la resistenza alla compressione, agli urti e il modulo elastico degli aggregati intervengono nella determinazione della risposta del calcestruzzo, in quanto la resistenza dei prodotti di idratazione supera quella dell'aggregato stesso.

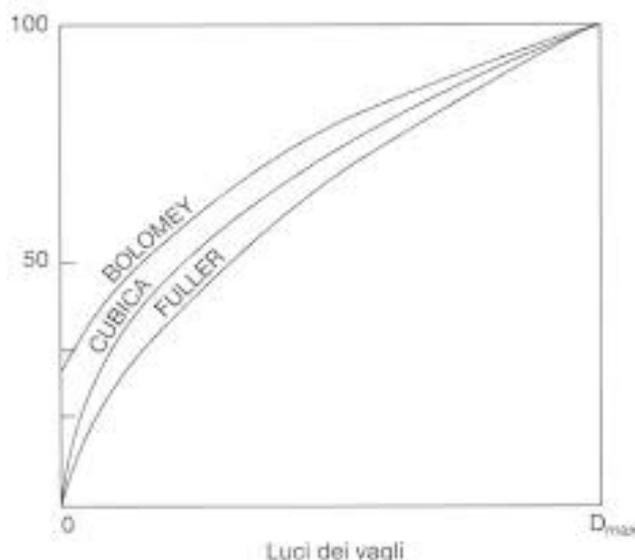


Figura 2.4: Curve granulometriche di progetto

Gli aggregati in passato venivano denominati inerti, in quanto si pensava che non alterassero il comportamento del calcestruzzo, tuttavia si è dimostrato come essi possono influire, anche negativamente sulle prestazioni finali della miscela. In particolare, si possono verificare:

- interferenze con il processo di idratazione ed indurimento;
- riduzione dell'adesione con la pasta cementizia dovuta a particelle fini che possono depositarsi sugli aggregati più grandi;
- elementi troppo deboli da comprometterne la stabilità;
- presenza di cloruri che innescano la corrosione o solfati che reagiscono provocando cricche dovute a fenomeni di espansione.

## 2.2 Degradamento delle opere in calcestruzzo armato

Fino a pochi decenni fa si pensava che il calcestruzzo fosse un materiale eterno; si è dovuto constatare purtroppo che in determinate condizioni ambientali il deterioramento esiste, in ambienti aggressivi le caratteristiche meccaniche possono essere compromesse anche piuttosto velocemente. Le cause di tale degrado possono essere di differente natura:

- fisica:
  - variazioni di temperatura naturali (gelo e disgelo) oppure artificiali (incendi);
  - ritiro da essiccamento;
  - calore di idratazione;
  - sali disgelanti;

- chimica:
  - solfati ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e solfuri ( $\text{S}^{2-}$ ), presenti naturalmente nei terreni o nell'acqua di falda;
  - anidride carbonica  $\text{CO}_2$ ;
  - cloruri ( $\text{Cl}^-$ );
  - alcali ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ );
  - magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ );
  - ammonio ( $\text{NH}_4^+$ );
- meccanica:
  - carichi accidentali e fatica;
  - urti ed esplosioni;
  - terremoti e vibrazioni;
  - assestamenti;
  - erosione ed abrasioni.

Raramente il fenomeno del degrado può dipendere da un solo fenomeno, spesso infatti accade che le cause siano molteplici, con effetti moltiplicativi; tuttavia è possibile ricondursi all'evento principale reso più gravoso dalla presenza di altre concause. Il deterioramento può avvenire prima nel calcestruzzo e poi nelle armature o più frequentemente viceversa.

La porosità e la permeabilità del calcestruzzo risultano essere la causa principale del deterioramento delle proprietà meccaniche, poiché permettono alle sostanze chimiche di penetrare in profondità nel materiale innescando ed alimentando i fenomeni di degrado. Nei seguenti paragrafi si andranno a distinguere le diverse cause di degradazione: lato calcestruzzo e lato armatura.

### **2.2.1 Degrado del calcestruzzo**

La prima differenziazione è tra degrado precoce e degrado a lungo periodo, il primo si può manifestare già nelle prime ore dopo la sua messa in opera dovuto a fenomeni di ritiro, di assestamento, allo sviluppo di calore di idratazione o al gelo nella fase di maturazione iniziale.

La seconda invece può avvenire per diverse cause, tra cui:

- gelo-disgelo;
- attacco solfatico;
- reazione alcali-aggregati.

### **2.2.2 Degrado precoce**

Le erronee proporzioni dei costituenti del calcestruzzo o errori in fase di realizzazione della costruzione sono possibili cause di degrado precoce, fenomeni di fessurazione possono essere causati anche da:

- fenomeni legati al ritiro impedito del calcestruzzo, che si verifica sia in fase plastica, nelle prime ore dopo il getto, sia nella fase di maturazione, a causa del consumo ed evaporazione dell’acqua presente all’interno dell’impasto, con conseguente ritiro del calcestruzzo. Se tale fenomeno è impedito, da vincoli esterni o dalle armature stesse, si creano degli stati di tensione che ne inducono la fessurazione;
- nei getti di grande dimensione può avvenire che il nucleo di calcestruzzo risulti essere ad una temperatura maggiore rispetto alle zone superficiali, la variazione dell’ordine dei 20-25 °C è tale da indurre fenomeni di trazione. Il calore di idratazione generato durante le reazioni di presa e indurimento è responsabile dei fenomeni di fessurazione che si possono verificare per esempio nelle dighe, in cui la parte più interna del calcestruzzo, a causa delle dimensioni della sezione, dissipa molto meno velocemente il calore prodotto, al contrario delle superfici esterne a contatto con l’ambiente;
- fenomeni legati all’assestamento del calcestruzzo dopo il getto o eventi gelanti nelle primissime fasi possono condurre a gravi fessurazioni, tali da comprometterne la sicurezza dell’elemento.

### **2.2.3 Gelo-disgelo**

L’acqua contenuta nei pori alle basse temperature può gelare e aumentare il proprio volume, generando così sforzi di trazione che fessurano il calcestruzzo. L’azione degradante è maggiore nei pori capillari perché essendo piccoli con alta probabilità sono saturi d’acqua; viceversa i vuoti di grande dimensione non essendo saturi sono in grado di accogliere l’aumento di volume del ghiaccio. La pressione che si genera sulle pareti del foro è quindi responsabile delle fessure. In uno scenario che prevede la possibilità di temperature molto basse è quindi importante che all’interno del calcestruzzo si sviluppi un sistema di vuoti adeguatamente dimensionato e distribuito, in modo tale da poter accogliere l’acqua che man mano defluisce a causa del congelamento in alcune zone, evitando così accumuli di pressione.



Figura 2.5: Degrado da gelo-disgelo

In Figura 2.6 sono riportati i grafici di resistenza a cicli di gelo-disgelo per differenti rapporti  $a/c$  e per la presenza di additivo aerante. La porosità capillare concede maggiore libertà di movimento dell'acqua all'interno dei pori consentendo anche al ghiaccio di avere maggiore spazio in cui svilupparsi, tuttavia sono soggetti ad una repentina saturazione particolarmente sensibile ai fenomeni di gelo. Riducendo il quantitativo di acqua nell'impasto, la porosità capillare diminuisce, aumentandone la resistenza a tale tipo di attacco. L'uso di additivi aeranti consente l'introduzione all'interno del composto di bolle di piccole dimensioni, che sommandosi a quelle rimaste intrappolate, nonostante la vibrazione del getto, sono in grado di migliorarne il comportamento generale nei fenomeni di gelo-disgelo. La presenza di aria all'interno del calcestruzzo ne riduce la resistenza, è per cui indispensabile porre un limite al volume di bolle presenti e compensare la riduzione di resistenza con un minor rapporto  $a/c$ .

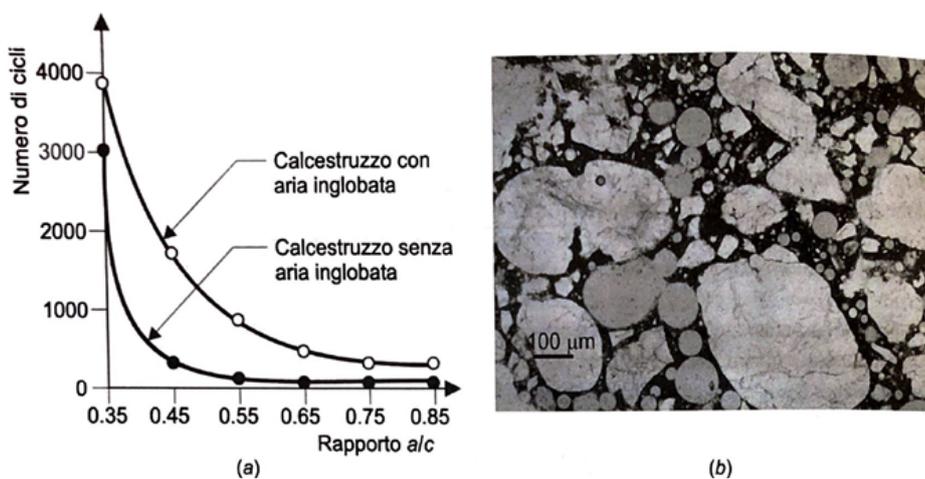
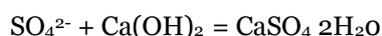


Figura 2.6: a) curva numero di cicli gelo-disgelo e rapporto  $a/c$  per calcestruzzi con e senza aria inglobata b) visione microscopica di un calcestruzzo con aria inglobata [5].

### 2.2.4 Attacco solfatico

Gli ioni solfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) sono responsabili di una delle forme di degrado più aggressive, tipiche di calcestruzzi a contatto con acqua di falda o in ambienti marini. Gli ioni, reagendo con alcuni elementi della pasta cementizia, generano prodotti come il solfato di sodio, di potassio, calcio e magnesio, che avendo volume maggiore rispetto alla situazione iniziale sono responsabili del disgregamento del calcestruzzo. L’attacco inizia con la penetrazione degli ioni all’interno del calcestruzzo, successivamente avvengono le reazioni con l’idrossido di calcio, già presente all’interno della pasta cementizia, a formare gesso:



Quest’ultimo, insieme all’alluminato, producono come prodotto di reazione l’ettringite:



Il composto formatosi presenta 32 molecole di acqua al suo interno, definendo un prodotto espansivo che avvia il processo di degradazione del calcestruzzo. I solfati sono particolarmente aggressivi se disciolti in acqua; una buona difesa nei riguardi dell’attacco solfatico consiste nell’aver un calcestruzzo di bassa permeabilità, basso rapporto a/c, aggiunte pozzolaniche consumando l’idrossido di calcio oppure riducendo la percentuale di alluminati presenti nella matrice.

Un’ulteriore reazione che può avvenire e dalle conseguenze ancora più gravose, è la formazione di thaumasite come prodotto della reazione tra i solfati e i silicati di calcio. Tale reazione è complessa ed avviene in determinate condizioni di umidità e temperatura, in presenza di anidride carbonica e calce viva. La gravità di processo è dovuta al consumo dei silicati di calcio e alla conseguente perdita del potere legante del cemento. Le vasche, di decantazione dei fanghi e di raccolta delle acque, a servizio di centrali geotermiche rappresentano un esempio di un ambiente ricco di solfati; i calcestruzzi oggetto di questo lavoro di tesi, sono stati testati per studiarne il comportamento quando sottoposti a perenne o ciclica immersione in acqua solfurea.

### 2.2.5 Reazione alcali-aggregati

Gli aggregati, un tempo definiti come componente inerte del composto calcestruzzo, possono reagire con gli ioni presenti all’interno della matrice cementizia. È importante quindi essere consapevoli della natura non più inerte degli aggregati.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  sono gli ioni con i quali avvengono le reazioni che danno origine a prodotti espansivi che degradano il calcestruzzo. Il cemento contiene piccole quantità di alcali ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ); durante il processo di idratazione si originano idrossido di sodio,  $\text{Na}(\text{OH})$  e idrossido di potassio,  $\text{K}(\text{OH})$ .

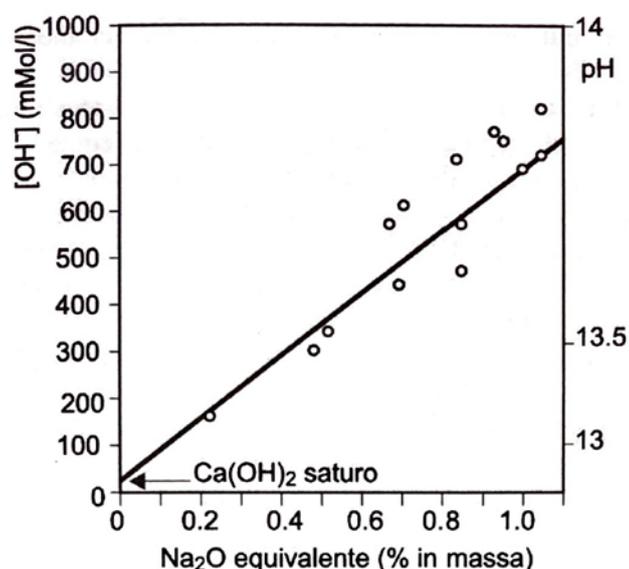


Figura 2.7: legame idrossido-concentrazione di alcali [5].

All'aumentare della concentrazione degli alcali cresce la percentuale degli idrossidi, la cui presenza è fondamentale per attivare la reazione degli aggregati silicei con gli ioni metallici alcalini. I primi rompono i legami silicei, mentre i secondi reagiscono a formare un composto di idrossido di calcio e silice che a contatto con acqua rigonfia, fessurando il calcestruzzo a causa degli sforzi di trazione generati. La forma tipica è una ragnatela casuale di fessure oppure è una espulsione del calcestruzzo a causa dei rigonfiamenti interni dello stesso. Spontanea è la diminuzione degli alcali presenti attraverso aggiunte pozzolaniche o loppa d'altoforno per ridurne il pH, avendo così un controllo sulla reattività dei minerali degli aggregati. La quantità di silice presente in quest'ultimi deve essere controllata al fine di evitare concentrazioni tali, che, in presenza di prodotti espansivi, possano degradare eccessivamente il calcestruzzo.



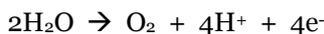
Figura 2.8: Esempio di degrado dato dalla reazione alcali-aggregati

I sali di litio possono essere utilizzati per ridurre le reazioni alcali-aggregati, presentati sotto forma di idrossido di litio (LiOH), fluoruro di litio (LiF), carbonato di litio (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) e nitrato di litio (LiNO<sub>3</sub>), ma non sono particolarmente utilizzati come inibitori delle reazioni a causa del loro costo, limitando il loro impiego ad interventi di restauro.

## 2.3 Degradamento delle armature

La condizione ottimale per la preservazione delle armature è mantenere l’ambiente di passività, creatosi naturalmente all’interno del calcestruzzo. La corrosione, oltre che ridurre l’area di acciaio utile a resistere alle azioni di progetto, genera come prodotto di reazione un materiale avente volumetria maggiore tale da disgregare il calcestruzzo circostante.

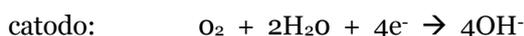
La soluzione nei pori crea un ambiente fortemente alcalino, costituito prevalentemente da idrossido di sodio e di potassio, in percentuale variabile a seconda del tipo di cemento. Il pH della soluzione, variabile in base alla composizione del calcestruzzo, in generale è sempre maggiore di 13 e mai inferiore a 12.5, situazione nella quale l’acciaio rimane passivo. La reazione anodica che avviene sulle superfici dell’acciaio:



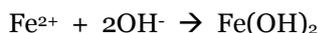
se l’acidità prodotta è tale da rompere il film di passività la corrosione ha inizio.

### 2.3.1 Corrosione del ferro

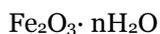
La corrosione dei metalli è una reazione chimica che avviene spontaneamente in determinate condizioni, distinguendosi in corrosione chimica ed elettrochimica. La prima avviene solo per alte temperature in ambienti asciutti, la seconda in ambienti umidi a temperature normali ed è quella di interesse per gli edifici. Una zona anodica e una catodica si possono verificare sulla superficie del ferro: dalla prima, in cui il ferro si ossida, gli elettroni migrano verso la seconda a contatto con l’aria, dove avviene la riduzione dell’ossigeno:



Gli ioni del ferro a contatto con l’idrossido danno origine all’idrossido ferroso solido:



Quest’ultimo, a contatto con acqua e ossigeno, genera il prodotto solido detto ruggine:



I prodotti della corrosione occupano un volume fino a sei volte superiore ai reagenti di partenza.

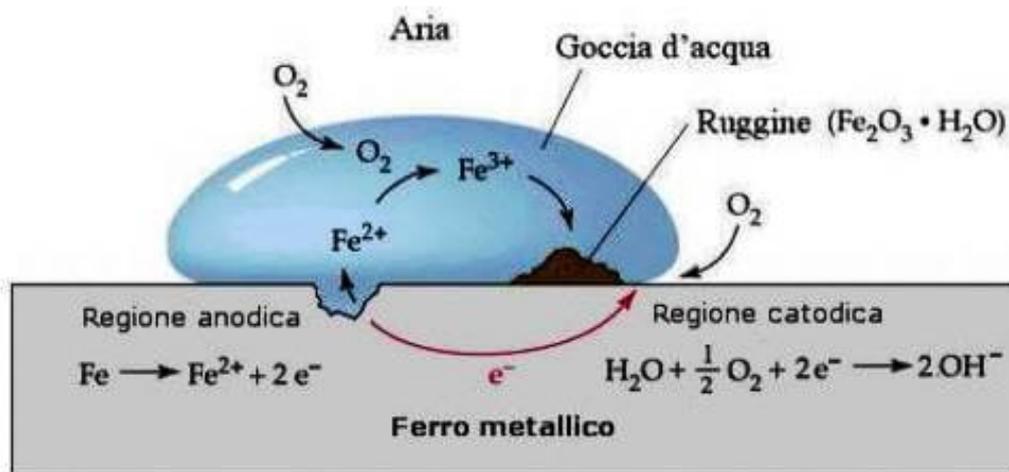
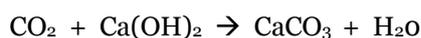


Figura 2.9: Reazione chimica dell'ossidazione del ferro

### 2.3.2 Corrosione da carbonatazione

La carbonatazione è il processo più diffuso di innesco della corrosione delle armature. L'anidride carbonica presente in atmosfera, reagendo con l'idrossido di calcio presente nella matrice cementizia, produce carbonato di calcio. Tale reazione consuma idrossidi, riducendo l'alcalinità nei pori e rompendo il film di protezione delle armature, innescando così la corrosione:



La carbonatazione porta il pH a valori inferiori; tale fenomeno interessa tutte le costruzioni in calcestruzzo armato dopo poche decine di anni. In fase di progettazione è quindi importante considerare il tempo che la reazione impiega ad arrivare all'armatura, onde dimensionare adeguatamente il copriferro, poiché a partire da questo momento, si avvia il periodo di propagazione del degrado, caratterizzato dallo sviluppo della corrosione delle armature con progressiva riduzione della loro sezione. L'evoluzione nel tempo della carbonatazione è riportata in Figura 2.10

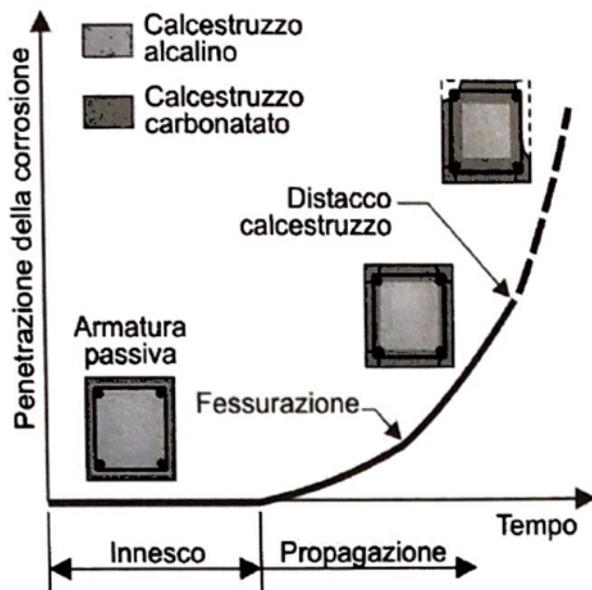


Figura 2.10: Evoluzione della carbonatazione nel tempo [5].

La velocità di carbonatazione è trascurabile in ambienti secchi e saturi; nel primo caso manca l’acqua necessaria affinché avvenga la reazione con gli alcali, nel secondo caso l’anidride carbonica non penetra perché i pori sono saturi, Figura 2.11. Al contrario, la velocità è massima in ambienti umidi riparati dalle piogge dirette: di fatto può capitare di avere maggiori carbonatazioni nelle pareti interne piuttosto che in quelle esterne. Particolarmente influenti risultano essere anche i cicli asciutto/bagnato, per i quali la bassa frequenza e la lunga durata ne aumentano notevolmente la velocità, Figura 2.12.

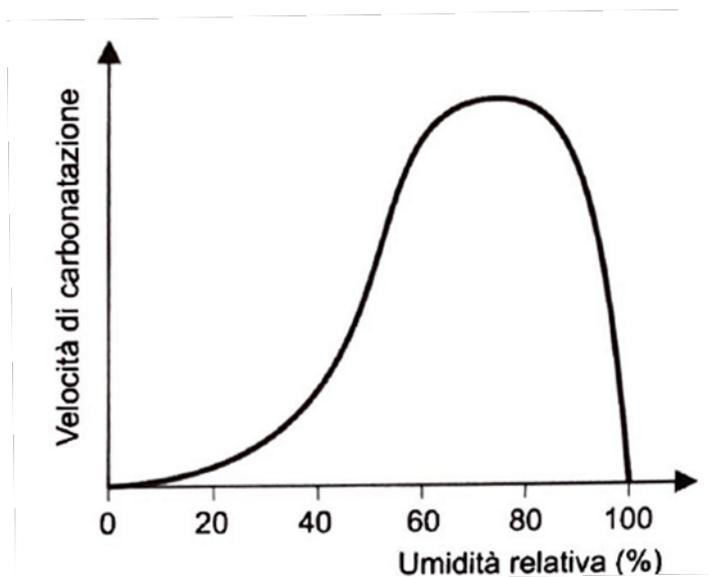


Figura 2.11: Velocità di carbonatazione in relazione all’umidità relativa [5].

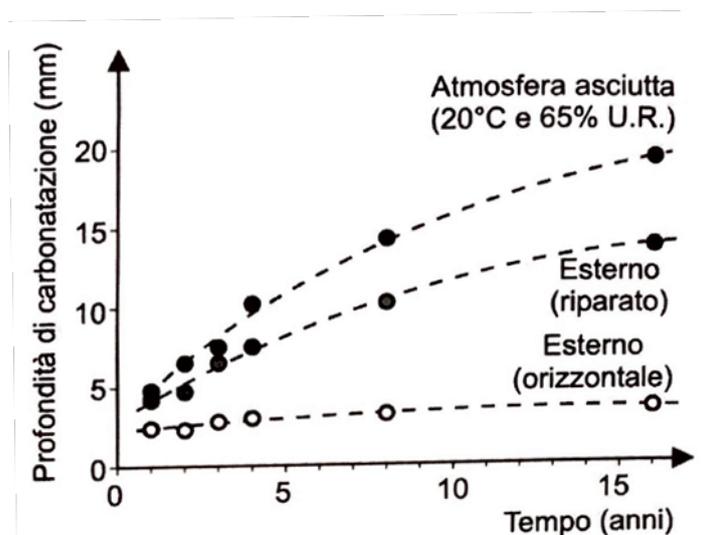


Figura 2.12: Profondità di carbonatazione al variare del tempo [5].

Una particolare attenzione è riservata alla stagionatura del calcestruzzo poiché ad una corretta idratazione corrisponde una minore porosità e quindi una minore penetrazione delle sostanze esterne. Inoltre, le aggiunte minerali portano al consumo dell'idrossido di calcio e alla formazione aggiuntiva di silicato idrato di calcio (C-S-H), rendendo il calcestruzzo meno permeabile e poroso. Una volta che il calcestruzzo è carbonatato la corrosione può avvenire; il livello di saturazione dei pori, dal quale dipende la disponibilità di ossigeno, diventa il fattore principale che determina la velocità di corrosione.

### 2.3.3 Corrosione da cloruri

I cloruri disciolti nei pori, anche per calcestruzzo non carbonatato, possono rompere il film di passività dell'armatura, provocando una corrosione localizzata del ferro, con una riduzione piuttosto veloce dell'area e una perdita di duttilità, difficilmente individuabile. I cloruri presenti all'interno possono essere trasportati da un solvente, oppure adsorbiti da elementi costituenti la matrice cementizia. È importante controllare il valore percentuale dei cloruri presenti nell'impasto, tenendo conto anche dell'ambiente in cui la struttura si trova. Le condizioni di esposizione, l'umidità, l'ambiente, la geometria dell'elemento e della costruzione, così come la composizione del calcestruzzo sono alcune delle molteplici cause che possono influire sulla penetrazione dei cloruri. La complessità nel comprendere l'intera natura del trasporto dei cloruri e l'esatta determinazione di un contenuto critico ha indotto alla definizione di modelli semplificati. La definizione del profilo di penetrazione è quindi espressa attraverso funzioni matematiche, basate su osservazioni empiriche. Tuttavia, la penetrazione è fortemente influenzata dal grado di saturazione, dall'esposizione, dalla porosità e dal tipo di cemento, elementi che rendono particolarmente complicata la caratterizzazione del fenomeno.

Una volta che il profilo di penetrazione ha raggiunto l’armatura, i cloruri devono raggiungere un contenuto critico affinché si inneschi la corrosione; la valutazione della criticità dipende:

- dal potenziale dell’acciaio, legato all’umidità del calcestruzzo e al trasporto di ossigeno all’armatura;
- dal pH della soluzione nei pori, in ambienti acidi il contenuto critico diminuisce ovvero quando gli ioni cloruro raggiungono una concentrazione elevata rispetto agli ioni idrossido;
- dalla presenza di bolle d’aria tra calcestruzzo e armatura.

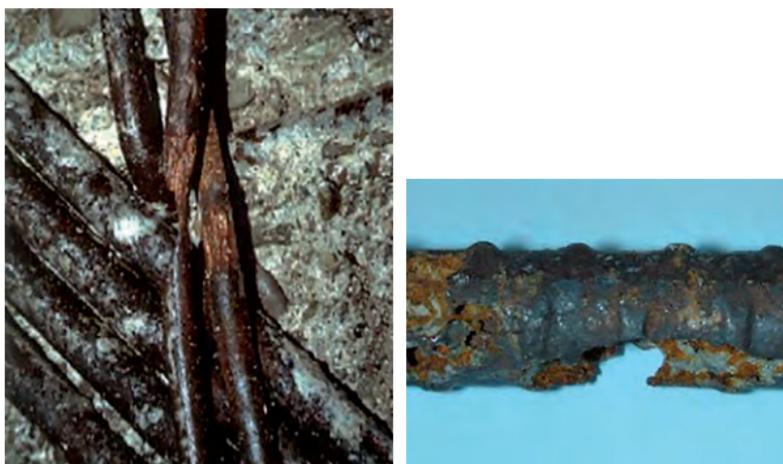


Figura 2.13: Attacco localizzato da cloruri

### 2.3.4 Corrosione acciai ad alta resistenza

L’ utilizzo di tali acciai è riservato, nella maggior parte dei casi, alla precompressione del calcestruzzo armato. La bassa tenacità e il valore dei carichi a cui sono sottoposti li rende particolarmente vulnerabili alla corrosione. Poiché eventi di corrosione localizzati possono innescare un collasso fragile dell’intero elemento strutturale, è indispensabile una particolare attenzione al loro studio. Oltre ai diversi deterioramenti riportati nei paragrafi precedenti, gli acciai ad alta resistenza sono soggetti ad infragilimento da idrogeno. A partire dallo ione idrogeno, sulla superficie dell’armatura, si forma dell’idrogeno atomico, successivamente dall’unione di una coppia di atomi si forma una molecola ( $H_2$ ) avente volume maggiore. Quest’ultima può essere adsorbita dall’acciaio e provocare una cricca che nel tempo può espandersi. La formazione di idrogeno molecolare è facilitata da ambienti in cui il pH è basso, motivo per il quale l’infragilimento da idrogeno spesso accompagna i fenomeni di degrado, discussi nei precedenti paragrafi, aggravando così la corrosione che probabilmente sarebbe già in atto.

## 2.4 Calcestruzzo self-healing o autorigenerante

Tra i materiali definiti intelligenti ci sono quelli che hanno capacità auto-rigenerante, in determinate condizioni sono in grado di ricostruire la frazione danneggiata e ristabilire, in parte o integralmente, le caratteristiche meccaniche. Nel 1836 l'accademia francese delle scienze notò questa proprietà, ma il suo interesse si sviluppò solo negli ultimi decenni. La ricerca è da molti anni focalizzata sul miglioramento dell'auto-rigenerazione del calcestruzzo e sulla possibilità di effettuare il passaggio dalle esperienze di laboratorio e dalle realizzazioni pilota ad un impiego su scala sempre più ampio e diffuso, nelle reali applicazioni di ingegneria civile ed edile.

Mihashi e Nishiwaki [6], in un lavoro del 2012 relativo allo stato dell'arte sul calcestruzzo auto-rigenerante, hanno riportato alcune classificazioni del fenomeno, di seguito illustrate.

La commissione tecnica JCI del 2009 riguardante i calcestruzzi auto-rigeneranti, ha suggerito di considerare tre distinti fenomeni: 1) rigenerazione naturale o autogena; 2) rigenerazione autonoma e 3) riparazione attivata.

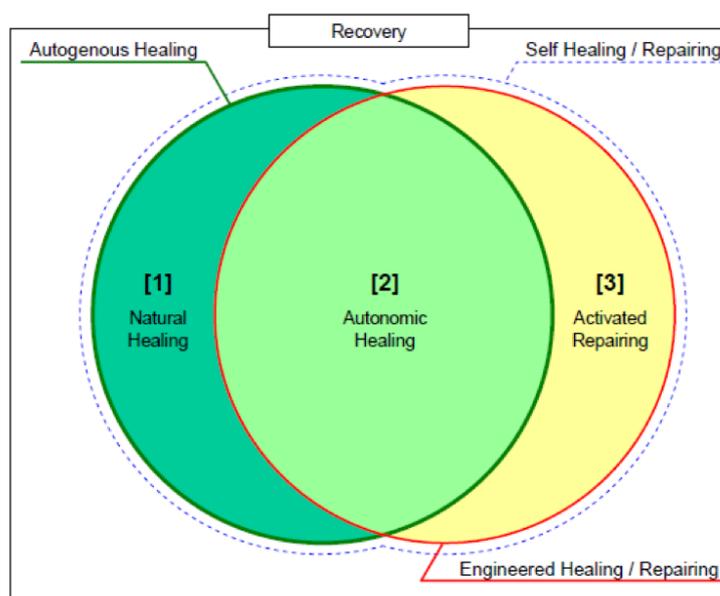


Figura 2.14: definizione del calcestruzzo auto-rigenerante/riparante [JCI 2009, Igarashi et al., 2009]

Si definisce:

**Rigenerazione naturale:** realizzabile attraverso la scelta di adeguati componenti fra quelli normalmente impiegati nel confezionamento di un calcestruzzo (leganti, aggregati, ceneri volanti, loppa d'altoforno, fumo di silice,

etc.) ed in grado di generare opportuni processi chimico-fisici, che insieme contribuiscono a conferire al calcestruzzo stesso le funzionalità di auto-rigenerazione;

Rigenerazione attivata: si verifica attraverso l’utilizzo di adeguati additivi o materiali, che aggiunti in fase di getto si attivano all’apertura della fessura e con lo scopo di favorirne la riparazione.

Dall’altro lato, la commissione tecnica RILEM 2011 propose una classificazione dividendo l’azione in auto-chiusura e auto-rigenerazione; distinguendo in base al tipo di processo, autogeno o autonomo, dividendo quindi il campo in quattro settori:

- auto-richiusura autogena; il materiale grazie ai suoi normali componenti è in grado di richiudere le fessure;
- auto-rigenerazione autogena; il materiale grazie ai suoi normali componenti è in grado di recuperare le sue proprietà;
- auto-richiusura autonoma; il materiale è in grado di richiudere le fessure grazie alla aggiunta di specifici componenti al suo interno;
- auto-rigenerazione autonoma; il materiale è in grado di recuperare le sue proprietà grazie alla aggiunta di specifici componenti al suo interno;

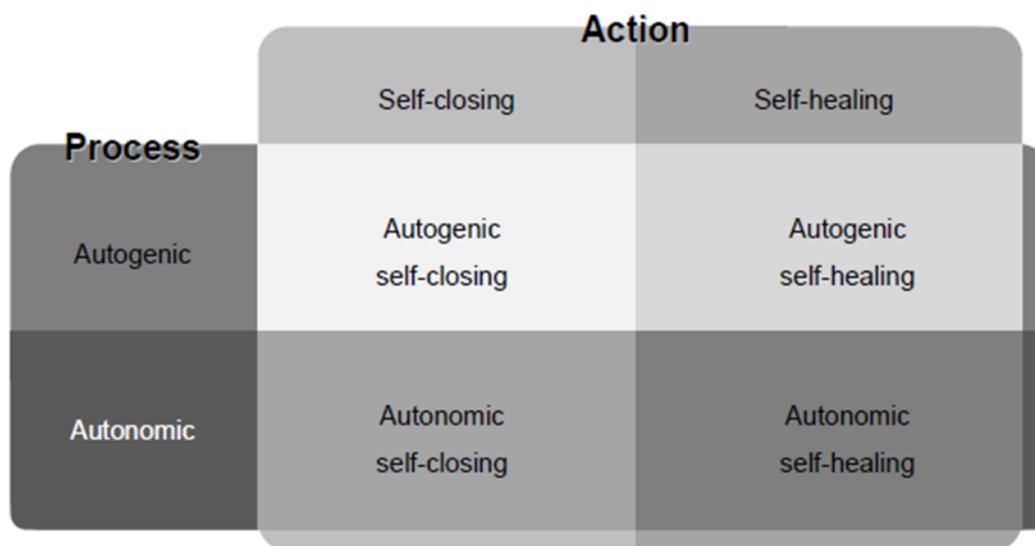


Figura 2.15: Definizione del calcestruzzo auto-rigenerante basato su azioni e processo, RILEM-TC221 [De rooij & Schlangen, 2011]

La classificazione proposta da Mihashi e Nishiwaki [6] prevede la classificazione dei materiali autoriparanti in due famiglie distinte. Materiali propriamente detti auto-rigeneranti distinti in: calcestruzzi capaci di richiudere le fessure attraverso normali costituenti presenti al suo

interno e quelli con aggiunta di specifici componenti che si attivano quando che la fessura si propaga. La seconda famiglia, definita dei materiali auto-riparanti, si distingue in auto-riparazione attiva e passiva: la prima sfrutta sensori di monitoraggio per il controllo della fessura ed eventualmente sistemi di riparazione vengono attivati se una soglia critica è stata superata; la seconda prevede la predisposizione di elementi funzionali nelle zone critiche, come i lembi tesi delle travi.



Figura 2.16: Definizione del calcestruzzo auto-rigenerante proposta [Mihashi e Nishiwaki, 2012]

La studio di Schlangen e Van Breugel [7] ha individuato quattro principali cause della rigenerazione autogena, due delle quali hanno natura chimica e due natura meccanica.

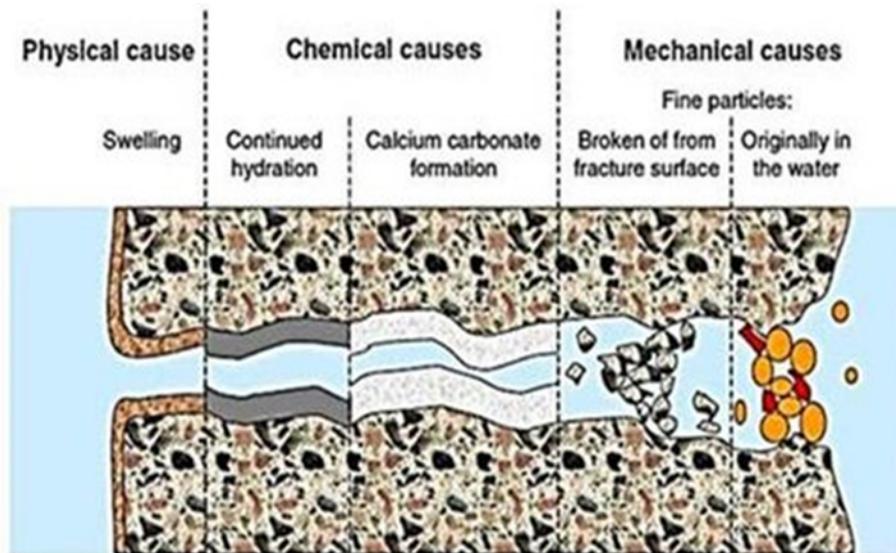


Figura 2.17: Classificazione dei principali meccanismi di autorigenerazione del calcestruzzo

- L’idratazione continua comporta, soprattutto nei calcestruzzi giovani, una richiusura della fessura; i tradizionali impasti hanno tempi di maturazione prorogati negli anni, manifestando pertanto una resistenza superiore a quella che le normative fissano a 28giorni. Poiché il calcestruzzo presenta al suo interno una parte di cemento non ancora idratata e variabile a seconda del rapporto acqua/cemento, la presenza di eventuale umidità conduce ad un prolungamento dell’idratazione fino a diversi anni. Alla nascita di uno stato fessurativo, l’umidità nell’aria o direttamente l’acqua entrano in contatto con il legante ancora non idratato, attivando così il processo di presa e indurimento. Nella seguente figura si nota come i silicati di calcio, in particolare il silicato bicalcico, anche a 100 giorni dal getto presentino circa il 50% di grado di idratazione ancora da sviluppare.

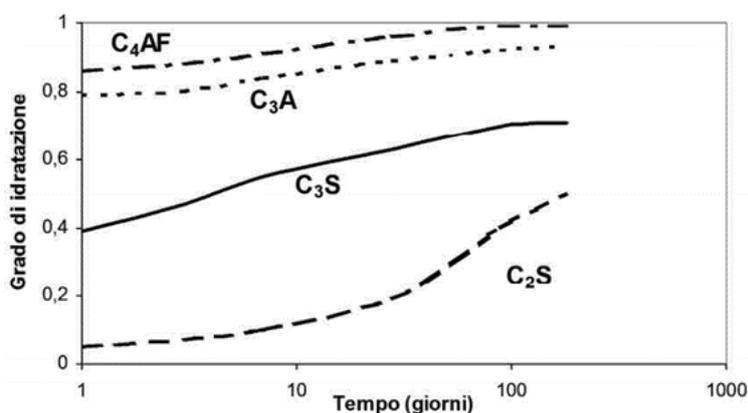
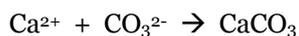
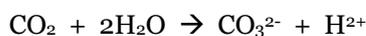


Figura 2.18: Idratazione degli alluminati e dei solfati nel tempo

- L’idrossido di calcio,  $\text{Ca(OH)}_2$  o portlandite, è uno dei prodotti della reazione chimica di idratazione dei silicati del cemento. Secondo la reazione di seguito schematizzata, dalla sua scissione nei due ioni e reagendo con anidride carbonica e acqua si forma carbonato di calcio, il quale precipita e occlude la fessura.



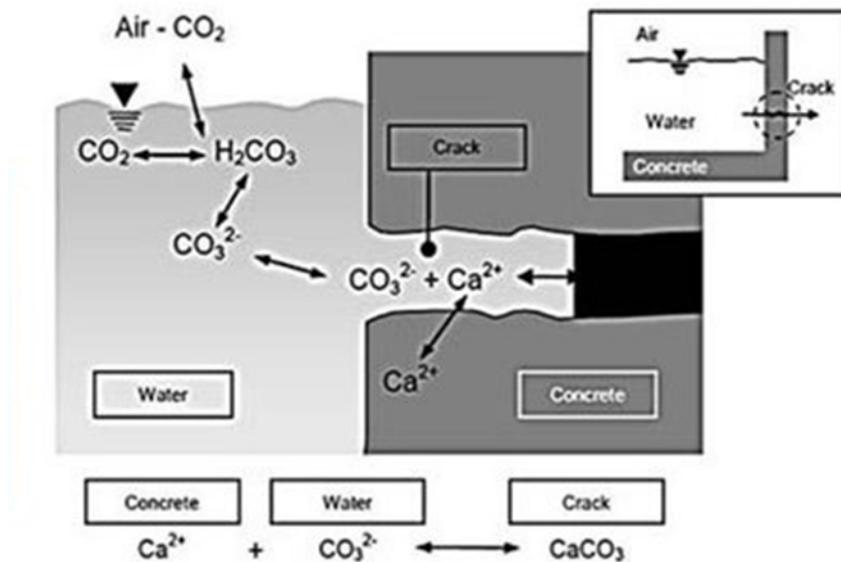


Figura 2.19: Interazione tra  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  [Edwardsen, 1999]

- Le cause meccaniche che possono dar luogo ad un fenomeno di auto-richiusura della fessura sono dovute all'occlusione per deposizione di particelle trasportate dal liquido oppure dal distacco di materiale del calcestruzzo stesso. Tuttavia, quel che si verifica è una rigenerazione apparente. Diverse prove sono state infatti effettuate per verificare come il flusso con particelle solide in sospensione all'interno dell'apertura vari nel tempo e, si è dimostrato che dopo diverse inversioni di flusso le particelle vengono di fatto rimosse, per cui nessuna cicatrizzazione si è realmente riscontrata.
- Esiste un ulteriore meccanismo, oltre ai quattro descritti, legato al rigonfiamento della pasta cementizia, anch'esso rappresenta una rigenerazione apparente poiché al passaggio dell'acqua la pasta cementizia si gonfia avvicinando i lembi della fessura. La richiusura che avviene non è permanente ed è dipendente dalla permeabilità e dalla saturazione del calcestruzzo, potendo la pasta stessa ritirare al diminuire del suo contenuto di acqua.

### 2.4.1 Fattori di influenza del self-healing

La riparazione delle fessure è dipendente da molteplici fattori, tra i quali:

- i. ampiezza della fessura;
- ii. tipologia di miscela;
- iii. caratteristiche dell'acqua.

i. L’apertura della fessura influenza notevolmente l’auto-rigenerazione. Non è possibile stabilire valori specifici di larghezza per il quale si ha completa richiusura, dipendendo questi da molteplici variabili. In generale, la curva di indice di richiusura ha un andamento a campana, ovvero un picco di richiusura per valori compresi tra 15-30  $\mu\text{m}$  e parziale richiusura sia per valori inferiori poiché le molecole di  $\text{H}_2\text{O}$  hanno difficoltà a penetrare, sia per valori maggiori poiché la cicatrizzazione non è completa. La geometria della fessura non è comunque l’unica causa dal quale dipende la rimarginazione, tipo di miscela e liquido penetrante partecipano attivamente alla rigenerazione del calcestruzzo.

ii. Il calcestruzzo è costituito da acqua, cemento e aggregati e a secondo del rapporto tra i primi due si definisce la porosità e la quantità di cemento da idratare. L’aggiunta di componenti come la loppa o le ceneri volanti, contribuiscono a ridurre le dimensioni dei pori e costituiscono una riserva di materiale con capacità di reazione più lente. L’aggiunta di fibre all’impasto permette di creare uno stato multifessurativo dalle ridotte aperture, più agevoli da rimarginare.

iii. L’acqua è il principale artefice della auto-rigenerazione e dalle sue caratteristiche dipende l’efficacia del processo di richiusura. A seconda dello stato in cui si trova (velocità, pH e temperatura) ha conseguenze sulla rigenerazione:

- La velocità di flusso riduce la richiusura delle fessure, la pressione del fluido all’interno di una apertura può essere causa di una parziale rimarginazione, la dimostrazione potrebbe essere data ipotizzando che per alte velocità avviene un continuo dilavamento dei prodotti di rigenerazione. Tale aspetto è tuttavia soggettivo alla geometria della fessura, apertura e lunghezza influenzano notevolmente gli effetti del flusso.
- Il pH incide sulla percentuale di richiusura, di fatti ambienti acidi riducono la rigenerazione.
- La temperatura diventa fattore di accelerazione o rallentamento, si è dimostrato come per valori alti la richiusura sia decisamente maggiore rispetto alle basse temperatura, il tutto è amplificato dalla dimensione delle fessure.

### **2.4.2 Auto-rigenerazione autogena**

La rigenerazione autogena del calcestruzzo è da imputare principalmente all’idratazione delle particelle di cemento ancora non idratate, ai fenomeni di cristallizzazione del carbonato di calcio o ai fenomeni meccanici, come la richiusura per apporto di materiale o per sgretolamento dei lembi della fessura. Quale sia il meccanismo principale contribuente alla rigenerazione dipende dall’età del calcestruzzo: per calcestruzzi giovani, in cui la quantità di

cemento non idratato è ancora elevata, l'idratazione ritardata risulterà essere il principale fenomeno; al contrario in calcestruzzi più stagionati, la precipitazione del carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) sarà il maggiore contribuente. Comunque sia, l'acqua è l'elemento indispensabile affinché avvenga la richiusura delle fessure.

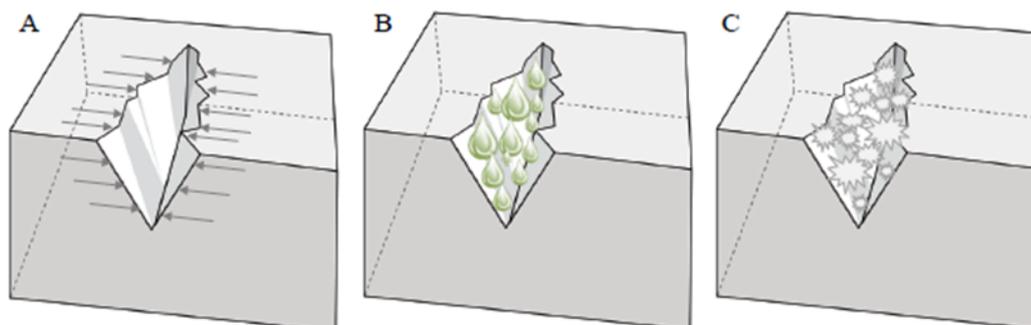


Figura 2.20: Miglioramento dell'auto-rigenerazione: A) restrizione della fessura, B) apporto continuo d'acqua, C) additivi che aiutano l'idratazione e/o la carbonatazione

L'auto-rigenerazione può essere migliorata attraverso un restringimento delle fessure o un flusso costante di acqua o promuovendo la cristallizzazione e l'idratazione.

La tecnica più semplice e immediata è l'aumento delle quantità di cemento nell'impasto e la diminuzione dell'acqua, aumentando così il numero di molecole da idratare nel lungo periodo. Poiché l'idratazione ritardata è alla base del processo di auto-rigenerazione autogena, per favorire il fenomeno possono essere integrate nella miscela delle aggiunte minerali, a base silicea o calcarea. Le ceneri volanti, il fumo di silice così come la loppa d'altoforno, oltre ad essere utili al miglioramento della resistenza meccanica, favoriscono l'auto-riparazione delle fessure sfruttando la loro tardiva idratazione.

Nel 2012 uno studio condotto da Van Tittelboom et al. [8] ha dimostrato che sostituendo parte del cemento tradizionale con ceneri volanti o loppa d'altoforno, l'auto-rigenerazione migliorava grazie alla tardiva idratazione mentre la quantità di carbonato di calcio rimaneva invariata. Diverse prove di flessione sono state effettuate su provini con diverse percentuali di loppa e ceneri volanti; i campioni una volta fessurati sono stati immersi in acqua per sei settimane e controllati periodicamente. Dall'analisi dei dati si è osservato che il calcestruzzo senza alcuna aggiunta, ha mostrato il migliore comportamento auto-rigenerante. Il motivo è stato ricondotto al fatto che le aggiunte pozzolaniche hanno atteso che parte del cemento non idratato reagisse con l'acqua per produrre l'idrossido di calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), indispensabile per la reazione delle pozzolane. Nelle prime settimane è stata osservata una velocità di richiusura elevata, soprattutto per aperture ridotte, dovuta per lo più a fenomeni di idratazione della pasta cementizia; al contrario le fessure più ampie hanno mostrato notevoli difficoltà a richiudersi. In ogni caso, alla seconda fessurazione lo sforzo di picco è risultato essere inferiore

rispetto al primo ciclo, tuttavia la rigidità in entrambi i tratti di carico dei due cicli è rimasta simile, mostrando quindi un recupero meccanico.

In uno studio proposto da Sahmaran et al. nel 2012 [9] ha sviluppato una campagna sperimentale in cui campioni costituiti da cemento portland e ceneri volanti in diverse quantità sono stati sottoposti a prove di compressione fino a carichi prossimi alla rottura con lo scopo di fessurarli. Successivamente sono stati immersi in acqua per studiarne il recupero meccanico. Dalle prove di permeabilità effettuate prima e dopo il periodo di cura in acqua, è stato osservato un recupero superiore nei campioni contenenti maggior quantità di cenere volante. Similmente anche per le prove di compressione eseguite una seconda volta, i recuperi maggiori si sono verificati nei campioni con le aggiunte.

Prove su calcestruzzi dotati di fibre poli-vinil-alcol (PVA) e una notevole quantità di cenere volante sono state effettuate da Herbert et Li nel 2011 [10], esponendo i campioni alle condizioni atmosferiche naturali. Si è osservato come la richiusura delle fessure di ampiezza inferiore ai 20  $\mu\text{m}$  sia stata rapida e completa, dovuta alla progressiva idratazione delle pozzolane artificiali ed inoltre come la rigidità si avvicini con il tempo a quella registrata per campioni integri. I dati misurati sono stati ritenuti convincenti, nonostante i valori fossero peggiori rispetto ai risultati di laboratorio.

Ulteriori studi furono effettuati su calcestruzzi giovani di simile composizione da Yang et al. [11] nel 2012, con provini sottoposti a cicli asciutto/bagnato esposti a diverse temperature e in ambienti a umidità variabile al fine di valutarne la diversità di risposta dell’auto-rigenerazione. In tutti i campioni dopo pochi cicli da 48 ore la percentuale di richiusura si è allineata ad un valore costante. Ulteriori prove sono state svolte con il fine di verificare il recupero meccanico, tuttavia i risultati ottenuti sono stati deludenti, probabilmente perché influenzati dalla giovane età del calcestruzzo.

Nishiwaki et al. [12] ha inoltre proposto uno studio per dimostrare come la polarità delle fibre polietileniche possa agire da ricettore dei precipitati della reazione tra il carbonato di calcio e l’acqua. A tale scopo sono stati studiati quattro campioni, ciascuno con fibre a base di un diverso polimero: poli-vinil-alcol (PVA), alcol-vinil-etilene (EVOH), poliacetato (POM) e polipropilene (PP). Le prove effettuate presentavano una natura alquanto semplice: il campione è stato portato a rottura fino a dividerlo in due metà e con le fibre visibili immerso in acqua. La verifica è stata effettuata misurando e studiando i prodotti di cristallizzazione depositati. Un rilevante quantità di cristalli si era depositata sulle fibre dotate di maggiore polarità, dimostrando così la predisposizione di alcune fibre sintetiche ad attrarre carbonato di calcio ed a favorire la richiusura delle fessure.

### **2.4.3 Auto-rigenerazione ingegnerizzata**

L'ingegnerizzazione dell'auto-rigenerazione del calcestruzzo consiste nell'aggiungere alla classica composizione della miscela additivi o materiali, utili al solo scopo di promuovere la richiusura delle fessure. Questi supplementi sono attivati solo nel momento in cui il calcestruzzo si danneggia, rimanendo nel normale utilizzo in uno stato passivo. I componenti aggiunti possono essere dispersi o concentrati nell'impasto ed una volta attivati reagiscono, favorendo la richiusura delle fessure e la trasmissione degli agenti degradanti, i quali limitano la durabilità del calcestruzzo.

#### ***FIBRE ELASTICHE CON MEMORIA DI FORMA***

Fibre elastiche con memoria di forma sono utilizzate nella realizzazione di calcestruzzi ingegnerizzati. Attraverso stimoli esterni come variazioni di temperatura, campi elettrici, magnetici o azioni fisiche, le fibre replicano con risposte predeterminate. Con memoria di forma si intende quindi la capacità del materiale di ricordare la sua forma originaria, nonostante la deformazione subita.

Nell'osservare durante un ciclo di carico/scarico il comportamento di una generica fessura si denota in fase di scarico una diminuzione dell'apertura, tale comportamento è stato oggetto di studio per valutarne possibili miglioramenti. La ricerca condotta da Sakai et al. nel 2003 [13] è stata concentrata sul comportamento di fibre elastiche con memoria di forma. La prima campagna sperimentale consisteva nel portare a rottura, attraverso prove di flessione su tre punti, dei campioni dotati di cavi in lega di titanio e nichel, aventi modulo di rigidità e tensione di snervamento decisamente inferiori all'acciaio tradizionale, ma una resistenza a trazione doppia. Una volta raggiunta l'apertura di fessura desiderata, il provino è stato scaricato gradualmente, notando una richiusura della fessura fino ad avere un decimo dell'apertura iniziale e conferendo al campione oltre ad una grande duttilità anche un ottimo recupero di deformazione. Tuttavia, la rottura è avvenuta per sfilamento dei cavi stessi per l'enorme carico assiale raggiunto, non riuscendo a cogliere in pieno il comportamento della lega e la memoria di forma. Lo studio si è limitato a descrivere la risposta dei cavi senza però approfondire il percorso di recupero del materiale.

Una ricerca successiva, svolta da Kuang & Ou nel 2008 [14], ha previsto una campagna sperimentale molto simile alla precedente incentrata sul recupero meccanico. Sono stati testati provini di matrice identica con l'aggiunta di tubi fragili che rompendosi hanno rilasciato un agente sigillante. Le prove effettuate sono state le medesime, i provini sono stati portati a rottura con una prova flessionale su tre punti e scaricati gradualmente, Figura 2.21.

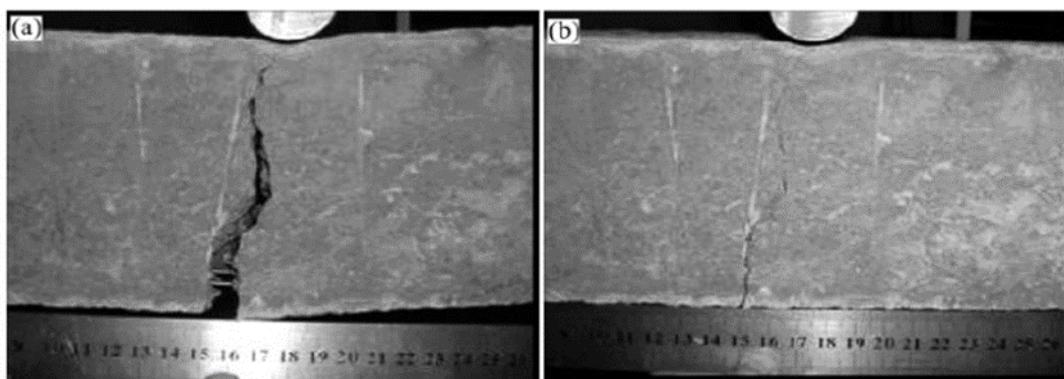


Figura 2.21: a) Fessura al valore ultimo di carico b) fessura alla fine della fase di scarico. [Kuang, 2008]

La richiusura osservata è stata quasi completa, ma la condizione iniziale non è stata ripristinata poiché il campione risultava comunque fessurato e non appena fosse stata ricominciata una nuova fase di carico la fessura si sarebbe riaperta immediatamente. Per ripristinare una resistenza meccanica al campione sono stati aggiunti dei tubicini in vetro di piccolo diametro contenenti resina epossidica che solidificando hanno dato origine ad un materiale solido e resistente. Quando il campione è stato testato nuovamente e ha raggiunto il massimo carico, le capsule in vetro si sono rotte e la prova è stata interrotta. Il campione è stato lasciato a riposto 10 giorni, con lo scopo di far agire la resina; dopodiché è stato ritestato, manifestando una rigidità maggiore del 28% per il calcestruzzo con cavi in lega titanio/nichel e 21% per armature convenzionali.

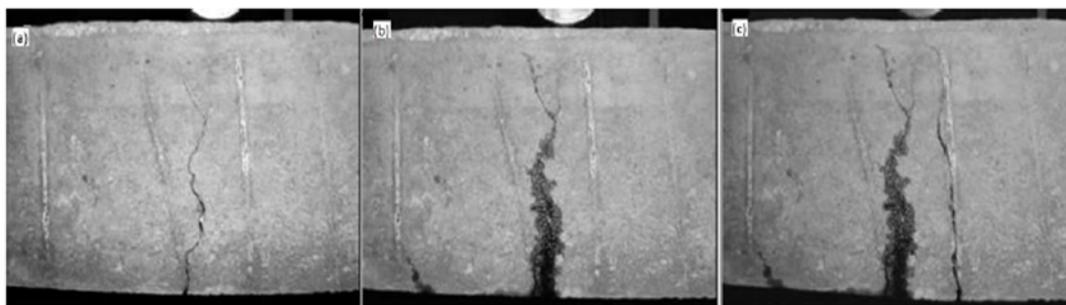


Figura 2.22: a) fessura alla fine della fase di scarico b) fessura riparata dalla resina c) nuova fessura dopo una seconda prova di carico. [Kuang, 2008]

Durante la seconda fase di carico, il campione è giunto a rottura sviluppando una seconda fessura e dimostrando come la resina sia stata sufficientemente resistente da impedire una riapertura nel medesimo punto, Figura 2.22. Tuttavia, questo non può essere considerato un autentico meccanismo di autoriparazione dato che è stato necessario l'intervento esterno per fornire il giusto quantitativo di resina. L'utilizzo di adesivi sigillanti come strumento di recupero di resistenza è approfondito successivamente.

## ***ADDITIVI BIOLOGICI***

Incrementare la precipitazione del carbonato di calcio è uno dei metodi per favorire l'autoriparazione: additivi biologici a base di spore batteriche sono in grado di produrre minerali utili alla richiusura delle fessure.

Nella ricerca condotta da Jonkers nel 2007 [15] è stato studiato l'effetto di particolari batteri che attraverso la digestione dell'urea, mediante acqua, anidride carbonica e ammoniaca, hanno prodotto carbonato di calcio che cristallizzando ha definito la calcite. È stato di fondamentale importanza che il comportamento meccanico del provino non sia stato alterato dalla presenza dei batteri e dei loro nutrienti, in modo tale da essere inseriti all'interno dell'impasto e considerare l'auto-riparazione un processo del tutto spontaneo. I risultati ottenuti sono stati piuttosto soddisfacenti, a patto di considerare batteri in grado di resistere in un ambiente ostico come quello altamente alcalino del calcestruzzo e che vi fosse sufficiente nutriente per l'intera vita utile batterica. Nella seguente figura si schematizza il processo di funzionamento di tale metodo, particolarmente utile per la difesa delle armature.

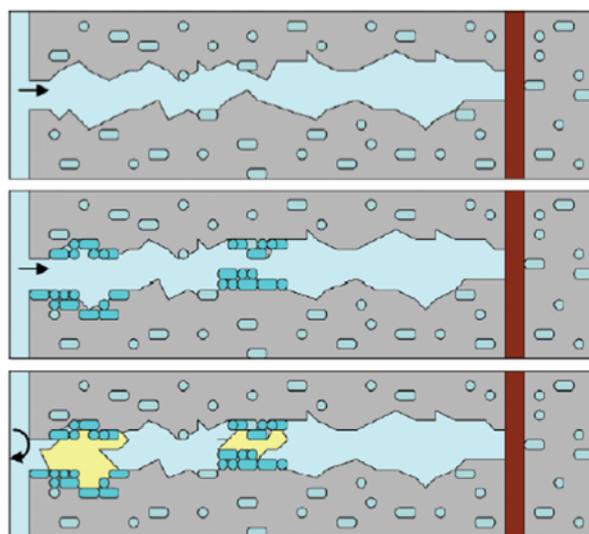


Figura 2.23: Richiusura di una fessura mediante proliferazione batterica e precipitazione del carbonato di calcio

Una ricerca sempre dello stesso Jonkers ma più recente [16], ha previsto l'inserimento di batteri all'interno di argilla espansa; lo scopo era di mantenerli dormienti all'interno di una struttura porosa, resistente ad azioni fisiche ed attacchi chimici, che se idratata avrebbe permesso l'attivazione dei batteri stessi. Una volta avviate le azioni metaboliche, le componenti organiche sono state trasformate in carbonato di calcio.

L'argilla espansa è stata considerata un materiale fragile e poco resistente riducendo le prestazioni meccaniche del calcestruzzo. In ambiente secco i batteri sono in grado di resistere

anche 50 anni, differente invece il loro comportamento all’interno dell’impasto, ambiente umido e alcalino che ne riduce la vita.

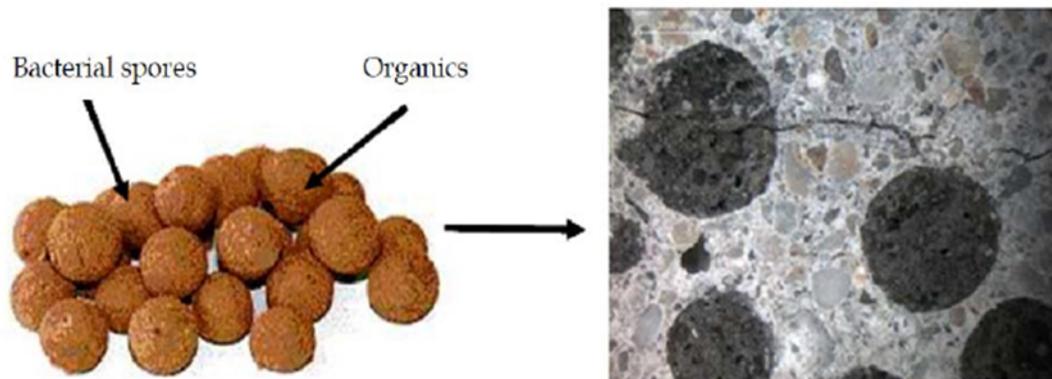


Figura 2.24: Esempio di argilla espansa con batteri e composti organici per alimentare la produzione di  $\text{CaCO}_3$  [Jonkers, 2011]

Pei et al. nel 2013 [17] proposero uno studio su calcestruzzi dotati di pareti cellulari e non di batteri vivi; questo ha permesso di eliminare il problema di mantenere in vita per un lungo periodo i batteri stessi. L'utilizzo di tale tecnica ha fornito una migliore prestazione in termini di precipitazione del carbonato di calcio. La carbonatazione che si è avviata all'interno ebbe molteplici effetti: il primo è stato sicuramente la produzione del carbonato di calcio, il quale ha permesso di richiudere le fessure; tuttavia riducendo l'alcalinità dei pori si è creata la condizione per rompere quel film di passività delle armature che le avrebbe protette dalla corrosione. L'utilizzo delle pareti cellulari al posto dei batteri è risultato essere il migliore in differenti aspetti, ad oggi essi devono ancora essere valutati in funzione degli effetti negativi sulle armature.

I batteri aggiunti all'impasto, insieme ai loro nutrienti, non devono possibilmente alterare le capacità meccaniche del calcestruzzo; alcune differenze tuttavia sono state osservate nella resistenza a compressione per le miscele arricchite di batteri, le quali sono risultate essere più resistenti per valori superiori a 28 giorni, mentre nel breve periodo non sono state osservate significative differenze. I campioni con pareti cellulari hanno mostrato un miglioramento della resistenza anche nei primi giorni di maturazione, provocando una riduzione sostanziale della porosità nel breve e lungo periodo.

### ***POLIMERI SUPER ASSORBENTI SAP***

Diversi ricercatori hanno provato ad aggiungere nell'impasto i polimeri assorbenti SAP (Super Absorbent Polymers) definiti anche idrogel. I polimeri hanno una struttura reticolare che se a contatto con acqua si gonfia, creando un gel soffice e insolubile. La capacità di espansione

volumetrica è strettamente legata all'alcalinità e alla presenza di ioni nella soluzione; questo fa sì che i polimeri siano poco reattivi quando il calcestruzzo è allo stato fresco. Dopo il processo di idratazione, i SAP sono in grado di liberare l'acqua accumulata e sgonfiandosi lasciano un piccolo macro-poro al suo posto. Quando la fessura si propaga, i polimeri posti a contatto con l'umidità, si gonfiano nuovamente espandendosi nel poro che precedentemente avevano formato, andando di fatto a richiudere la lesione, determinando così una sigillatura fisica che impedisce l'ingresso di sostanze degradanti. Durante il periodo secco i polimeri rilasciano l'acqua accumulata che stimola l'idratazione ritardata e quindi l'auto-rigenerazione.

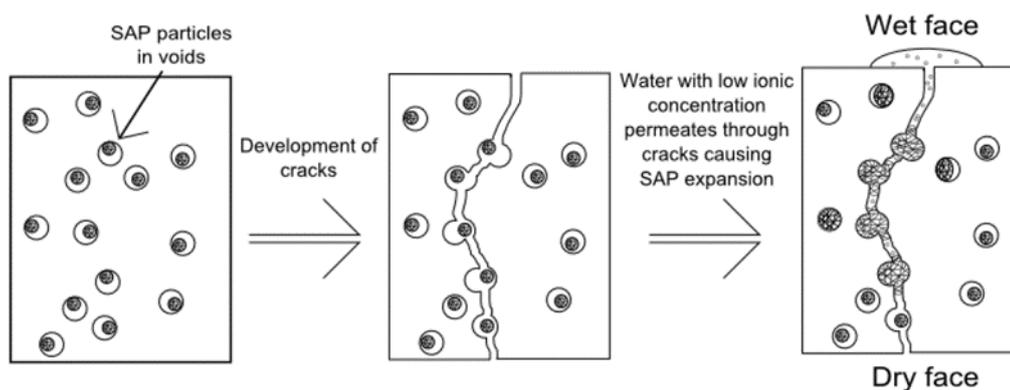


Figura 2.25: Meccanismo potenzia di auto-rigenerazione con SAP [Wong, Buenfeld, 2010]

I SAP aiutano particolarmente lo sviluppo della rigidità durante le prime fasi di maturazione, permettendo, grazie alla capacità di accumulare e rilasciare acqua, una migliore idratazione del cemento. Non sono state osservate differenze sostanziali nelle prestazioni a 28 giorni. È stato altresì notato come per cicli asciutto/bagnato e in condizione di bagnato permanente, i polimeri abbiano partecipato ad un ripristino della rigidità, seppur limitato; all'aria aperta invece, non si dimostrarono particolarmente attivi nell'accumulare l'umidità in atmosfera e rilasciarla per favorire l'idratazione.

Snoeck et al. [19] hanno studiato il comportamento di alcuni calcestruzzi con aggiunta di polimeri assorbenti SAP, cercandone di misurarne la capacità di auto-rigenerazione. I campioni sono stati fessurati con una prova flessionale su quattro punti, al fine di ottenere fessure di ampiezza variabile da  $6\mu\text{m}$  fino ad oltre i  $100\mu\text{m}$ . I provini sono stati poi lasciati a riposo, differenziando tra ambienti al 60% e 90% di umidità relativa e quelli che invece sono stati sottoposti a cicli di asciutto/bagnato. In Figura 2.26 sono riportati i risultati di una miscela priva di SAP, in Figura 2.27 invece una miscela dotata del 1% in massa di polimeri assorbenti. Nei grafici di sinistra sono riportate le aperture di fessure ad un determinato tempo rispetto all'apertura iniziale; a destra invece le percentuali di richiusura in funzione sempre delle aperture iniziali.

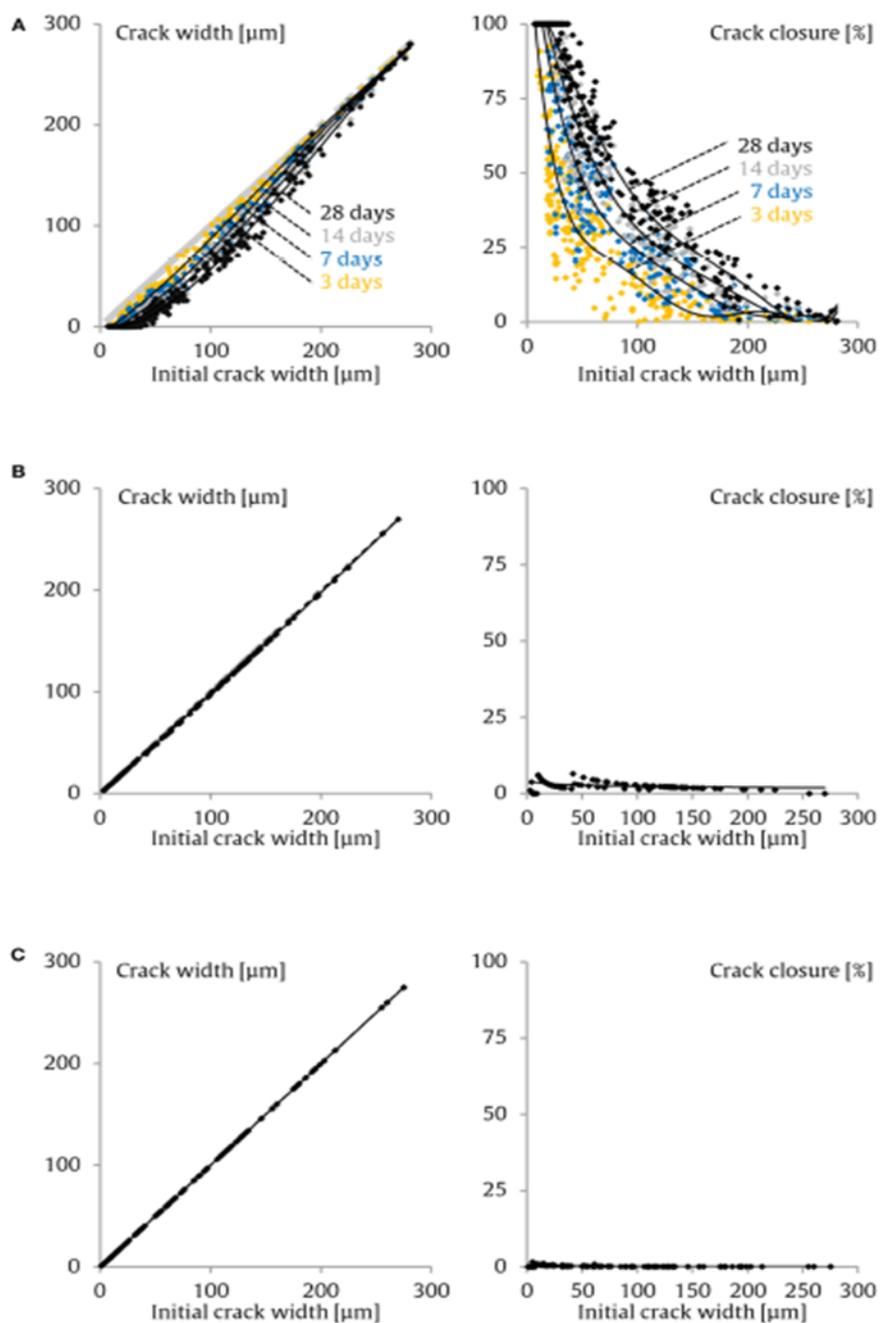


Figura 2.26: Provini senza SAP; A) cicli asciutto/bagnato a 3, 7, 14, 28 giorni, B) 90% di UR, C) 60% di UR [Snoeck, 2012]

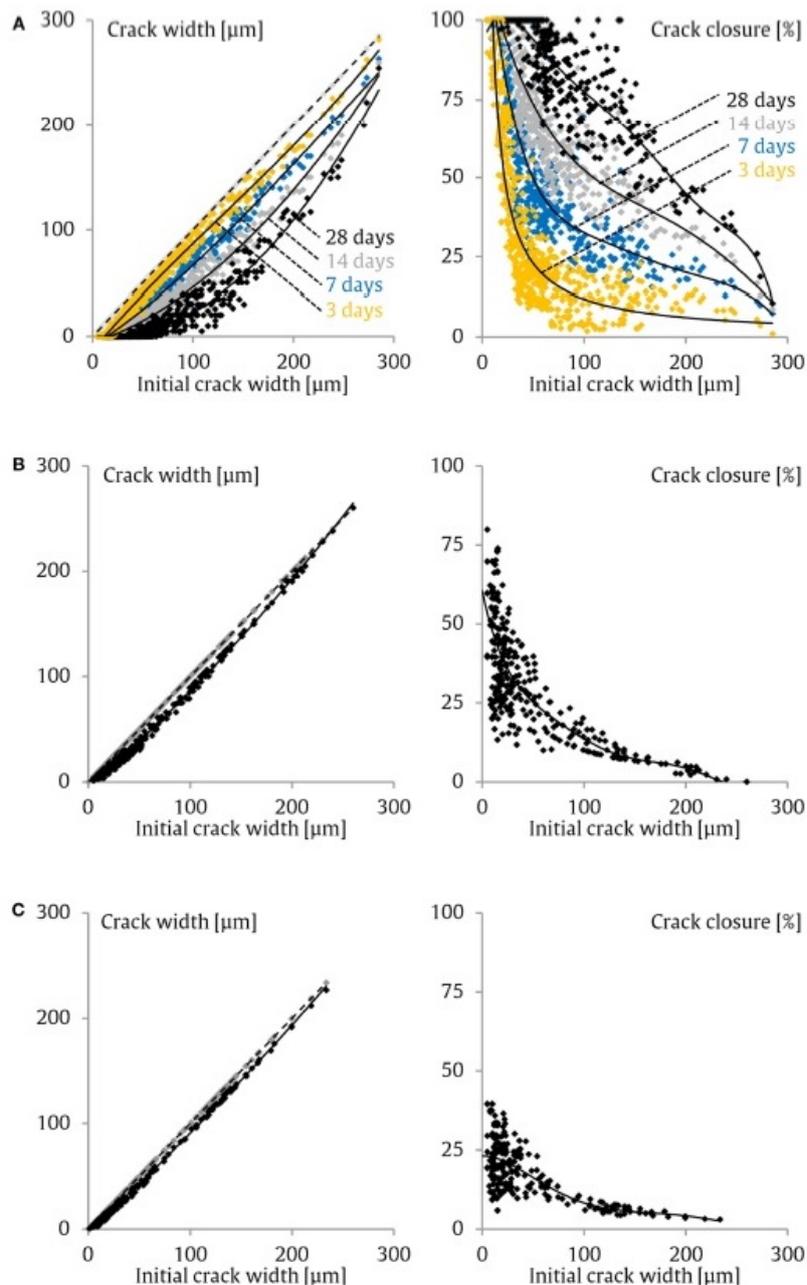


Figura 2.27: Provini con SAP; A) cicli asciutto/bagnato a 3, 7, 14, 28 giorni, B) 90% di UR, C) 60% di UR [Snoeck, 2012]

Si è osservato che i provini privi di SAP presentavano completa richiusura per fessure di ampiezza di  $30\mu\text{m}$  ed una parziale riparazione per quelle fino  $150\mu\text{m}$ , dopodiché essa è diventata trascurabile. Significative richiusure non si sono avute per i provini esposti in ambiente ad UR 90% e 60%. Discorso diverso invece per i campioni in cui erano presenti i SAP, in cui si è osserva una riparazione dove per i calcestruzzi tradizionali non avevano manifestato alcun fenomeno. Questo dimostra che i polimeri sono stati in grado di veicolare l'umidità esterna verso la pasta cementizia ancora da idratare. Gli autori hanno concluso

affermando come i calcestruzzi contenenti SAP potrebbero avere un largo impiego in quelle situazioni in cui l’elemento è soggetto a medio/alti tenori di umidità relativa, tenendo sempre in considerazione che nei calcestruzzi con percentuali di SAP superiori all’1% in massa, si producono sufficienti vuoti da limitarne la resistenza meccanica.

## ***ADDITIVI CRISTALLINI***

Gli additivi cristallini sono miscele a base di silice, polvere di cemento e attivatori chimici, che reagendo con acqua e idrossido di calcio permettono la cristallizzazione del carbonato di calcio a formare calcite. I cristalli prodotti riempiono i vuoti ed interrompendo le connessioni tra essi, oltre a limitarne la porosità, riducono la permeabilità del calcestruzzo. In assenza di acqua mantengono uno stato di inattività, mentre se a contatto con l’umidità risultano essere molto reattivi. La richiusura delle fessure è un processo che dipende da diversi fattori ambientali come la temperatura, umidità e alcalinità dell’ambiente. Gli additivi cristallizzanti vengono utilizzati prevalentemente nella preparazione delle malte per la riparazione di elementi fessurati oppure vengono inseriti direttamente, come polvere, nella preparazione dell’impasto.

Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol[20] promossero uno studio su calcestruzzo con diverse aggiunte minerali e di additivi cristallini, con lo scopo di individuare quale fosse il migliore impasto che favorisse la richiusura delle fessure. I mix proposti furono quattro: (OPC) solo CEMI; (FA) OPC + 35% di cenere volante; (SF) OPC 10% di fumi di silice; (CA) OPC + 1% di additivi cristallini.

	<b>Material</b>			
	<b>OPC</b>	<b>FA</b>	<b>SF</b>	<b>CA</b>
<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	20.16	35.50	85.40	16.81
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	4.66	20.40	0.42	1.93
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	3.49	13.83	2.76	1.98
<b>CaO (%)</b>	64.52	17.49	1.14	34.58
<b>MgO (%)</b>	0.64	2.74	2.15	1.29
<b>SO<sub>3</sub> (%)</b>	3.27	2.46	0.41	1.16
<b>Na<sub>2</sub>O (%)</b>	0.02	1.46	0.02	15.22
<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	0.41	2.20	2.39	0.16
<b>TiO<sub>2</sub> (%)</b>	0.25	0.38	< 0.01	0.11
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b>	0.06	0.20	0.11	0.05
<b>LOI (%)</b>	2.10	2.81	4.94	26.43
<b>Blaine fineness (cm<sup>2</sup>/g)</b>	4941	4790	1151*	5765
<b>Specific gravity</b>	3.15	2.15	2.20	2.90

Figura 2.28: Composizione dei 4 mix per i confronti con impasto avente aggiunte cristalline, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]

La campagna sperimentale ha previsto che alcuni campioni fossero fessurati a 3 giorni dal getto, mentre altri a 28 giorni; le indagini sono state effettuate misurando l'apertura delle fessure alla fine di ogni determinato intervallo temporale, in cui il campione era rimasto immerso in acqua.

L'indice di richiusura è stato valutato come parametro atto a descriverne la rigenerazione, calcolato come il rapporto tra l'area della fessura al tempo di misurazione e l'area alla prima fessurazione. Il grafico in Figura 2.29 confronta l'apertura di fessura dopo 7 giorni del mix di riferimento (OPC) con l'apertura iniziale, osservando così come le richiusure quasi integrali si limitavano alle sole fessure di ampiezza ridotta.

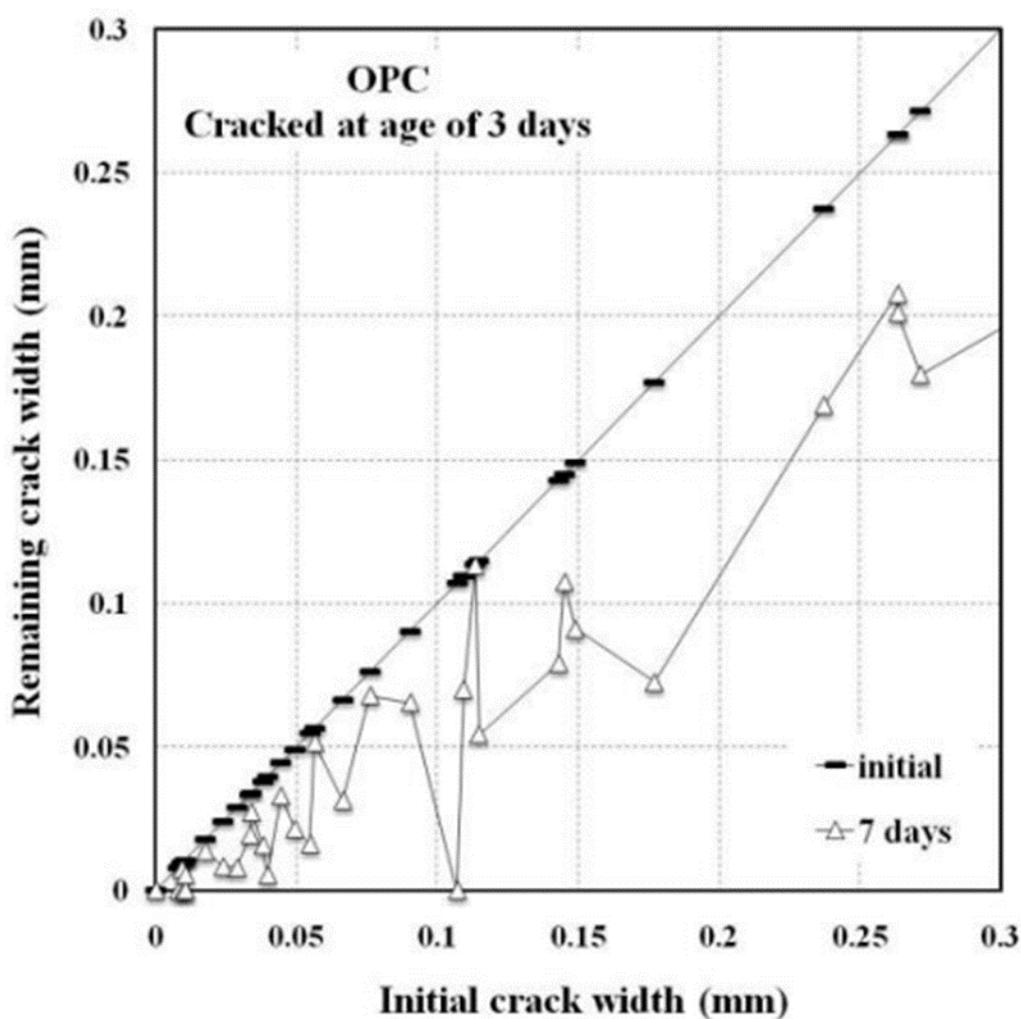


Figura 2.29: Confronto aperture a 7 giorni rispetto all'apertura iniziale, campione OPC, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]

I grafici di Figura 2.30 e Figura 2.31 riportano gli indici di richiusura in funzione del tempo dei quattro composti fessurati a 3 e 28 giorni, distinguendo per apertura di fessura iniziale.

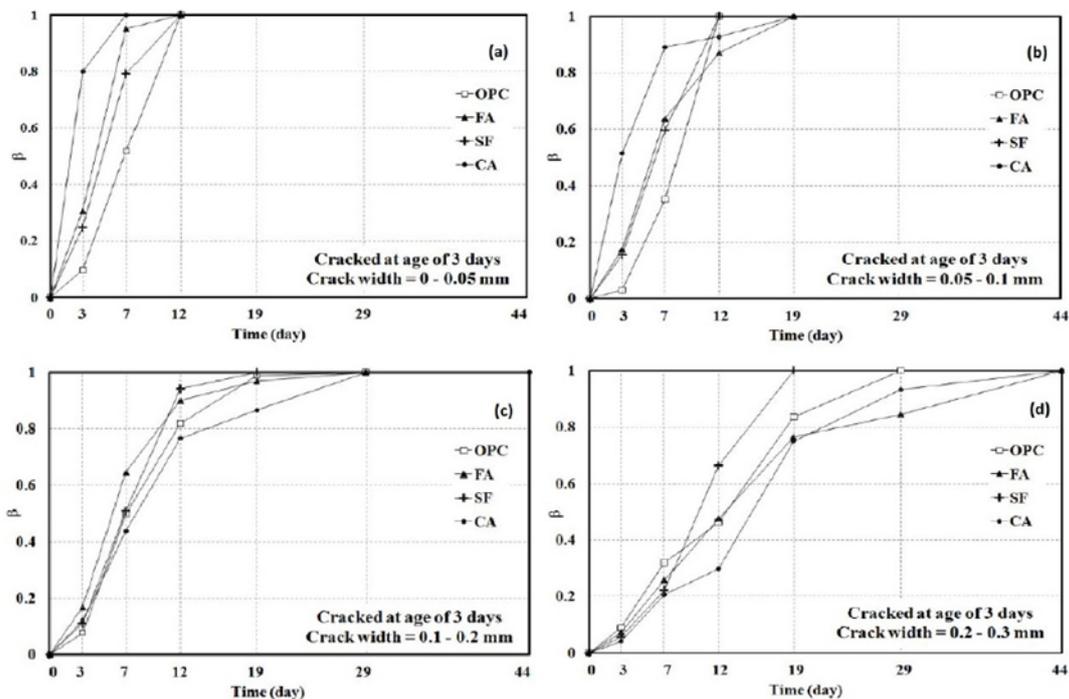


Figura 2.30: Indice di richiusa,  $\beta(t)$ , al variare del tempo, per fessurazioni a 3 giorni, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]

Dai grafici si evince come su fessure molto piccole non sono emerse particolari differenze tra i mix con aggiunte minerali; al contrario, come ci si sarebbe aspettato, il mix di riferimento ha avuto una risposta in recupero più tardiva.

Differenze più marcate sono state osservate per fessure comprese tra  $5\mu\text{m}$  e  $10\mu\text{m}$ , in cui gli impasti contenenti additivi cristallini hanno avuto una rapida richiusura, più lente invece per i mix aventi ceneri volanti e fumo di silice.

Situazione opposta per le fessure più ampie, in cui i campioni con aggiunte pozzolaniche hanno avuto una crescita rapida con richiusura fino al 90% e quasi lineare nel tempo, mentre quelli con additivi hanno subito un brusco rallentamento, impiegando ben più tempo a richiudere le fessure.

Molto simile il comportamento per fessure superiori a  $20\mu\text{m}$  in cui il mix dotato di fumo di silice è risultato essere il più performante con completa richiusura già a 19 giorni.

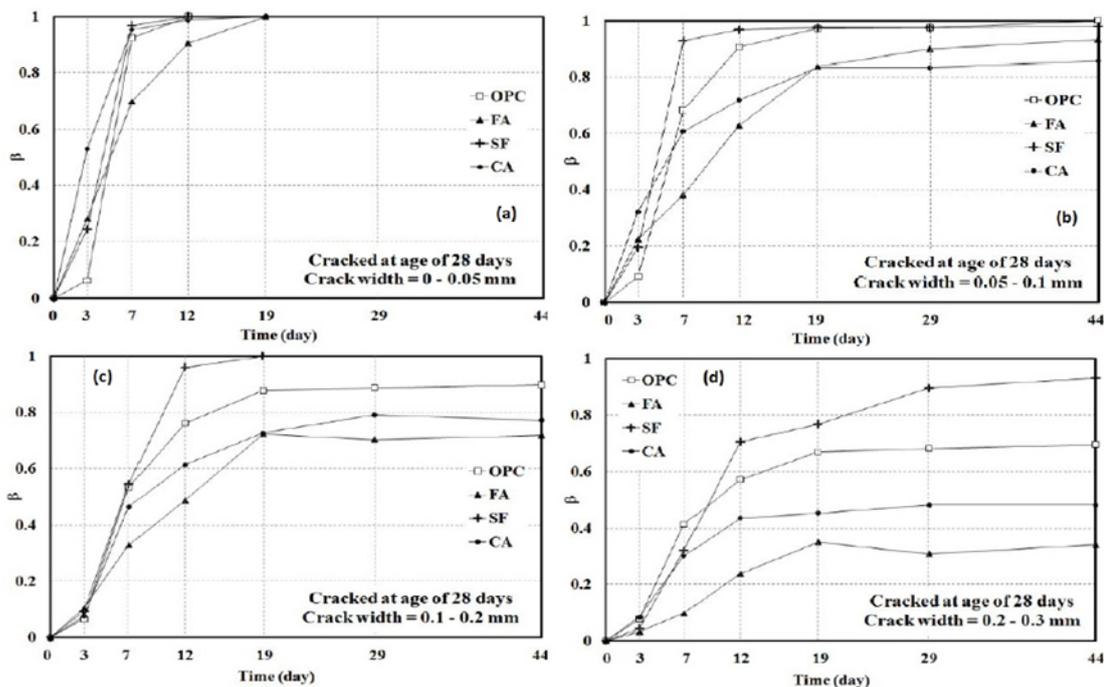


Figura 2.31: Indice di richiusa,  $\beta(t)$ , al variare del tempo, per fessurazioni a 28 giorni, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]

I campioni fessurati a 28 giorni hanno presentato alcune differenze rispetto alle fessurazioni svolte a 3 giorni. Per fessure inferiori a  $5\mu\text{m}$  l'impasto con gli additivi cristallini è stato quello avente una risposta migliore, con chiusura quasi completa già a 7 giorni.

Diversa invece il responso dell'additivo per fessure da  $5\mu\text{m}$  e  $10\mu\text{m}$ , che è risultato essere meno efficace rispetto al fumo di silice e al mix tradizionale di riferimento, i quali hanno dimostrato di poter richiudere le fessure già a 19 giorni. Per le aperture di fessura maggiori di  $10\mu\text{m}$  il fumo di silice è stato in assoluto il superiore, l'unico a portare a richiusura le fessure inferiori ai  $20\mu\text{m}$  e con risultati migliori anche per le aperture maggiori.

L'analisi dei prodotti di reazione porta ad affermare che tutti i mix hanno sviluppato la richiusura delle fessure attraverso la produzione di cristalli di carbonato di calcio, aventi però differente dimensione. Gli additivi cristallini hanno portato alla creazione di cristalli più piccoli, motivo per il quale, secondo gli autori, hanno avuto effetti molto positivi sulle aperture di ampiezza modesta, poiché la cristallizzazione ha richiesto meno tempo; per lo stesso motivo per le fessure di più ampia apertura non sono risultati particolarmente efficaci.

In Figura 2.32 sono riportate le fotografie delle ispezioni visive, svolte a verificare lo spessore dei prodotti di cristallizzazione che determinano la richiusura delle fessure.

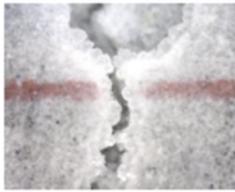
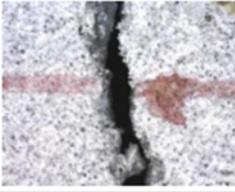
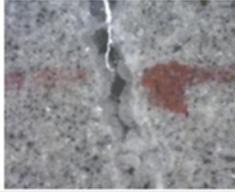
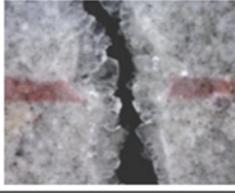
<b>OPC</b> (cracked at the age of 3 days)		
<b>Photo at</b>	Initial (0.3051 mm)	19 days (0.0698 mm)
<b>FA</b> (cracked at the age of 3 days)		
<b>Photo at</b>	Initial (0.3051 mm)	29 days (0.1397 mm)
<b>SF</b> (cracked at the age of 28 days)		
<b>Photo at</b>	Initial (0.6787 mm)	19 days (0.1502 mm)
<b>CA</b> (cracked at the age of 3 days)		
<b>Photo at</b>	Initial (0.0649 mm)	3 days (0.0176 mm)

Figura 2.32: Richiusura fessure per i diversi mix, [Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol, 2010]

## ***PRODOTTI INCAPSULATI***

Uno dei metodi più studiati per la ingegnerizzazione della capacità di autoriparazione del calcestruzzo è l’aggiunta di capsule, sferiche o cilindriche, in grado di rompersi in determinate condizioni, fessurazione o danneggiamento dell’elemento, che attraverso le sostanze presenti al loro interno e alle successive reazioni sono in grado di avviare l’autoriparazione. La reazione può avvenire per contatto con acqua o umidità, oppure per variazioni termiche o per contatto con alcuni componenti del calcestruzzo. Numerose indagini sono state effettuate utilizzando all’interno delle capsule colla liquida, la quale indurisce quando rilasciata dalla capsula rotta una volta danneggiata dalla propagazione della fessura. Le campagne sperimentali sono molto simili a quelle fin qui studiate, con campioni fessurati, riposti a riposare e fessurati nuovamente. I risultati dimostrano una buona capacità di rigenerazione alla seconda

fessurazione, con recuperi di rigidità fino al 20%. Ai fini della efficacia della rigenerazione, oltre alla buona tenuta delle colle, non va sottovalutata la capacità degli adesivi di conservare, se incapsulati, le loro prestazioni, anche a distanza di anni dal getto.

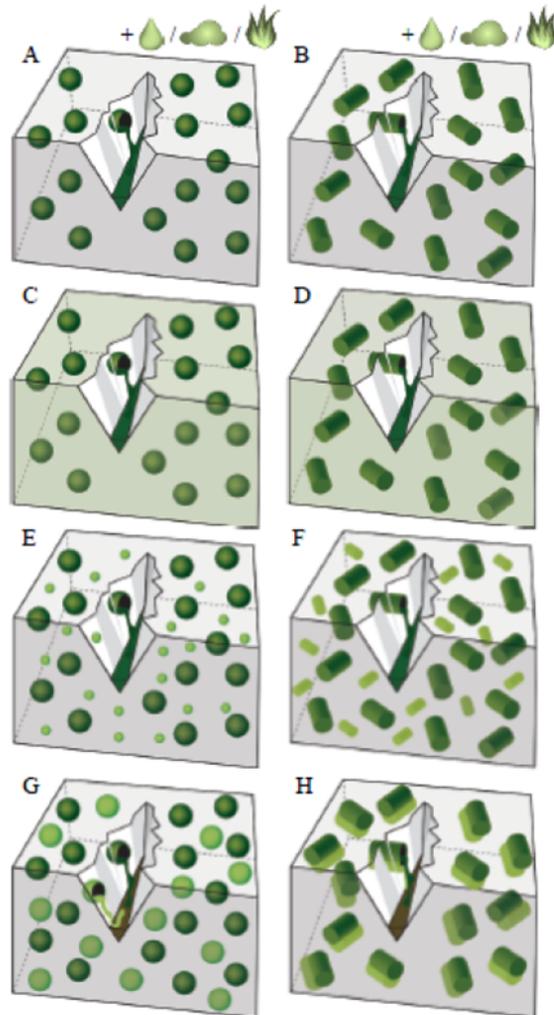


Figura 2.33: Rilascio del sigillante incapsulato: A, B) reazione con acqua, umidità e temperatura; C) reazione con componenti presenti nell'impasto; D) reazione con altri componenti presenti in capsule separate

Una indagine sperimentale condotta nel 2011 da Huang e Ye [21], utilizzando capsule sferiche e un adesivo a base di silicato di sodio, ha previsto lo studio di una serie di campioni realizzati con diverse miscele di calcestruzzo. I campioni sono stati realizzati in calcestruzzo arricchito, oltre che dalle capsule, con loppa d'altoforno e fibre poliviniliche; per studiarne gli effetti dell'adesivo sono state considerate capsule con diversi quantitativi di colla al loro interno o con sola acqua. Una serie di campioni contenenti capsule vuote è stato realizzato per studiarne il comportamento meccanico e per essere da confronto con i risultati ottenuti con le altre miscele.

Dopo 14 giorni di stagionatura, i campioni sono stati fessurati attraverso prove a flessione su tre punti, successivamente sono stati lasciati a riposare per 42 giorni e fessurati nuovamente con lo scopo di valutare il recupero di rigidità, resistenza a flessione e deformazione.

Il silicato di sodio rilasciato dalle capsule, a contatto con l'idrossido di calcio presente all'interno dell'impasto, ha permesso di ricreare il gel C-S-H alla base dell'indurimento dell'impasto cementizio.

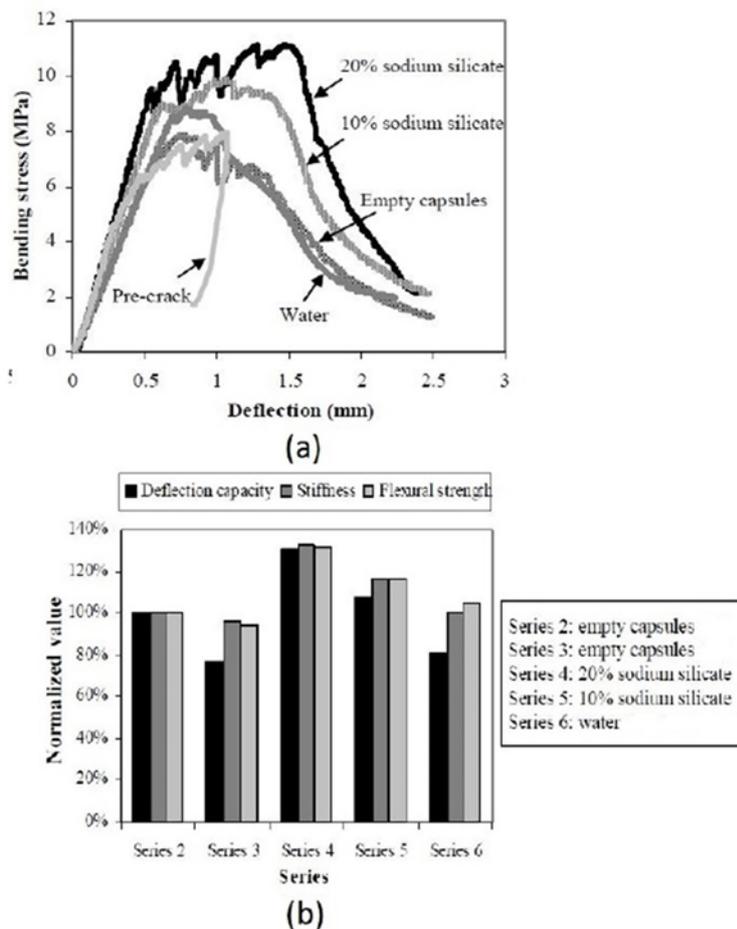


Figura 2.34: Grafico di confronto tra i diversi campioni: a) curva carico-spostamento della prima e seconda fessurazione; b) istogramma del recupero delle resistenze [Huang e Ye, 2011]

Tuttavia, la resistenza alla flessione è stata fortemente compromessa dalla presenza delle capsule stesse, le quali hanno provocato una riduzione della resistenza in media pari al 20%. Pertanto, risulta molto importante trovare un compromesso tra le capacità meccaniche iniziali, influenzate anche dal dosaggio di capsule, e il recupero di resistenza atteso.

Le prove hanno dimostrato come i calcestruzzi con il maggiore contenuto di adesivo abbiano registrato il migliore recupero. Al contrario, le capsule con l’acqua non state in grado di realizzare reazioni sufficienti da portare dei risultati interessanti sotto il profilo applicativo, risultando marginale la differenza con i calcestruzzi dalle capsule vuote.

In Figura 2.34(b) si riportano i grafici in relazione al calcestruzzo ordinario alla prima fessurazione, mostrando come gli adesivi abbiano conferito una resistenza superiore fino al 30%, rispetto al primo ciclo di fessurazione; con le capsule riempite di acqua si è avuto un calo di prestazione.

Altre ricerche, tra cui quella proposta da Van Tittelboom et al.[22], si sono concentrate sulla definizione della giusta viscosità dell'adesivo per permettere a tutta la fessura di essere richiusa, cercandone quindi la giusta composizione in relazione anche al grado di alcalinità dell'impasto. Infatti, il pH molto elevato è in grado di compromettere la stabilità dell'adesivo. L'auto-rigenerazione è stata valutata con controlli periodici sullo stato dei campioni verificandone la permeabilità ad un flusso d'acqua.

## ***SISTEMI VASCOLARI***

L'auto-rigenerazione vascolare prevede l'utilizzo di tubi fragili riempiti di materiale sigillante disposti appositamente dove è possibile una fessurazione.

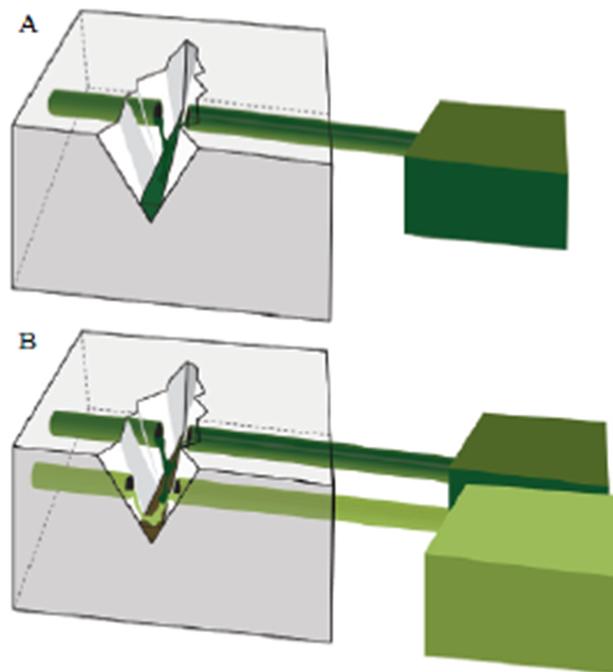


Figura 2.35: Auto-rigenerazione vascolare: A) adesivo monocomponente; B) adesivo bicomponente

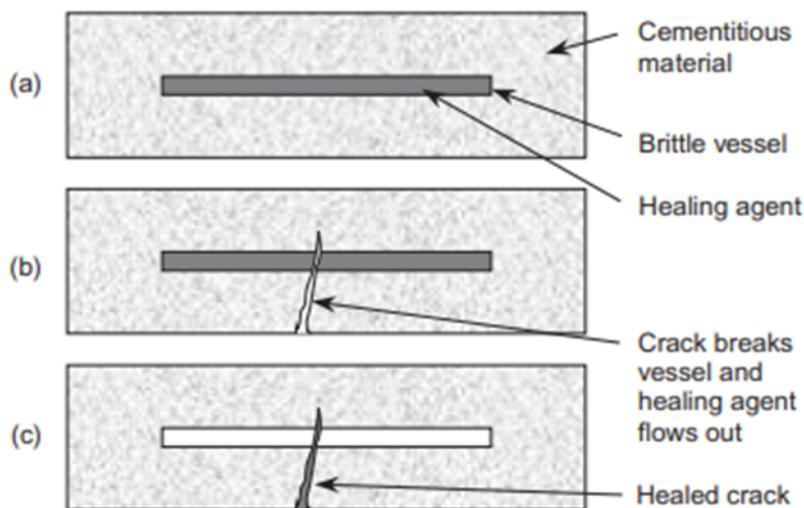


Figura 2.36: Procedimento di auto-rigenerazione vascolare

Una indagine dell’università di Cardiff condotta da Joseph et al. nel 2010 [23] ha analizzato il comportamento di campioni di sezione rettangolare in calcestruzzo con la presenza di tubi in vetro riempiti di adesivo. Prove preliminari sono state effettuate ponendo all’interno dei tubi dell’inchiostro per valutare al meglio il set-up di prova da adottare.

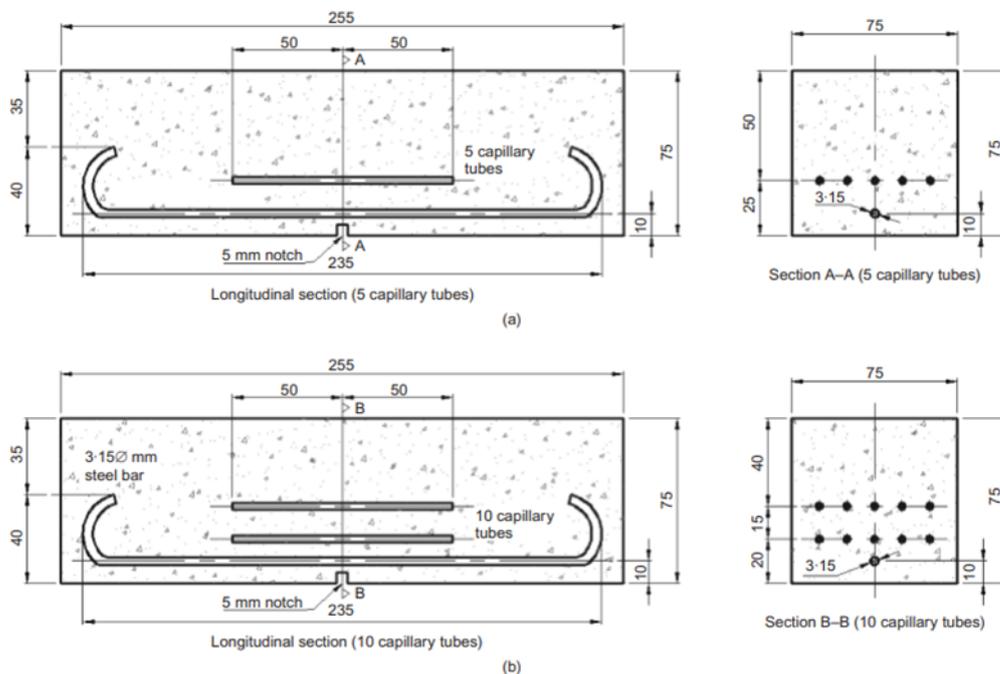


Figura 2.37: Geometria di campioni preliminari: a) singolo layer di tubi; b) doppio layer di tubi [Joseph et al., 2010]

La campagna sperimentale prevedeva la fessurazione, mediante prove di flessione su tre punti, di campioni in calcestruzzo armato con tubi di vetro disposti su singolo strato; in mezzera dei campioni un piccolo intaglio era stato realizzato per favorire la localizzazione della fessura.

Verificata la rottura del tubo e la fuoriuscita dell'adesivo, i campioni furono lasciati riposare per 24 ore e testati nuovamente fino alla rottura. Le prove sono state effettuate considerando due diverse età del calcestruzzo all'atto della prefessurazione, al fine di verificare la stabilità della colla e l'effetto della maturazione sul comportamento finale.

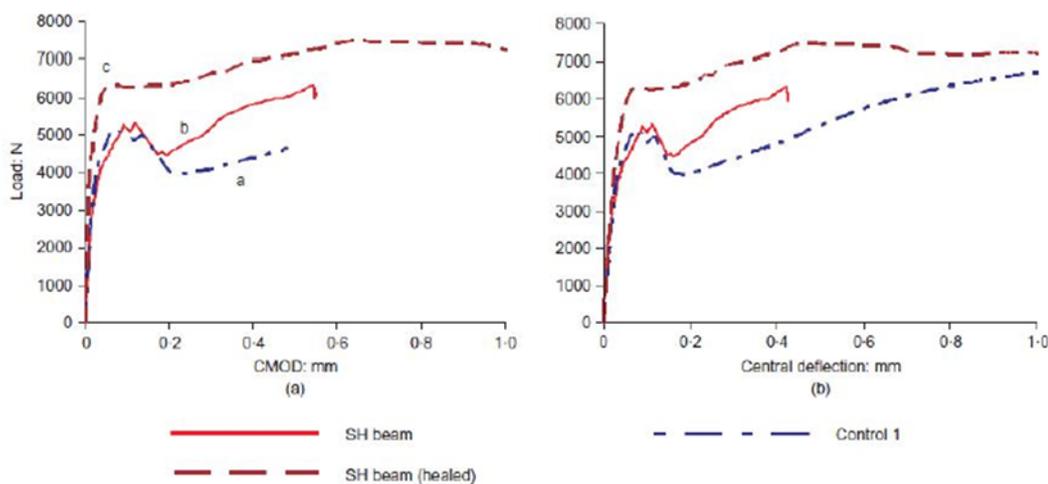


Figura 2.38: a) Grafico carico-apertura fessura, b) grafico carico-flessione, confronto tra campione auto-rigenerato a 24 ore e campione di controllo portato a rottura [Joseph et al., 2010]

Come si osserva dai grafici soprariportati, i campioni fessurati e rigenerati manifestano una rigidità superiore rispetto alla situazione iniziale, con valori dell'incremento prossimi al 20%. Il rapido indurimento dell'adesivo era evidente anche durante la prova: la curva b di Figura 2.38(a) di fatti riporta il grafico del campione con i tubi riempiti di adesivo, per il quale, durante la prima fessurazione, rispetto alla curva di controllo si è rilevato un recupero di resistenza piuttosto repentino. Alla seconda ri-fessurazione i campioni sono stati portati a rottura; come mostrato in Figura 2.38(b) i campioni di controllo portati a rottura alla prima prova mostrano un valore ultimo prossimo ai provini rigenerati. Non sono state osservate sostanziali differenze tra i campioni rimasti a maturare più a lungo; questo assicura che dopo i 28 giorni, quando i processi di idratazione sono rallentati, il principale agente dell'auto-rigenerazione è l'adesivo dei tubi. Studi affini, con campioni dotati di fibre di vetro cave riempite di adesivo a base di acido cianoacrilico, hanno portato a risultati simili a quelli proposti da Joseph.

Gli esiti finora ottenuti dimostrano la buona predisposizione di tale tecnica alla richiusura della fessura di calcestruzzi danneggiati. Tuttavia, è importante sottolineare che il quantitativo realmente utilizzato di sigillante non era noto, poiché l'apporto di adesivo era avvenuto tramite vasche esterne collegate con tubi all'interno del campione.

## 2.5 Calcestruzzo fibrorinforzato

I calcestruzzi fibrorinforzati sono una speciale categoria nata con lo scopo di superare le debolezze tradizionali quali la fragilità e la resistenza a trazione, conferendo al materiale tenacità e duttilità. Dagli inizi del nuovo millennio i loro impieghi sono aumentanti, sia per motivi puramente tecnologici sia per richieste architettoniche.



Figura 2.39: Fibre metalliche in calcestruzzo fibrorinforzato

Una principale classificazione dipende dal tipo di comportamento che assume il calcestruzzo una volta raggiunto il suo limite a trazione, il quale può essere incrudente (nasce una microfessurazione, all'accumulo di deformazione plastica corrisponde un aumento dello sforzo) oppure degradante (localizzazione della fessura, all'accumulo di deformazione irreversibile corrisponde una diminuzione dello sforzo).

- FRC (Fiber Reinforced Concrete) ordinari: aventi generalmente un comportamento quasi fragile;
- HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites): aventi comportamento incrudente ma resistenza a compressione inferiore a 200MPa;
- UHPRFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites): aventi comportamento incrudente e resistenza a compressione superiore a 200MPa;
- ECC (Engineered Cementitious Composites): sono una sottocategoria degli HPFRCC presentando una resistenza a trazione fino a 6MPa e una duttilità variabile tra 3% e 7%, con resistenze a compressione ordinarie.

La presenza delle fibre non modifica sostanzialmente il comportamento a compressione, lo stesso non si può dire della lavorabilità e della trazione. Se la poca fluidità dell'impasto ne rappresenta un difetto, il comportamento in trazione risulta essere il grande vantaggio di questi calcestruzzi.

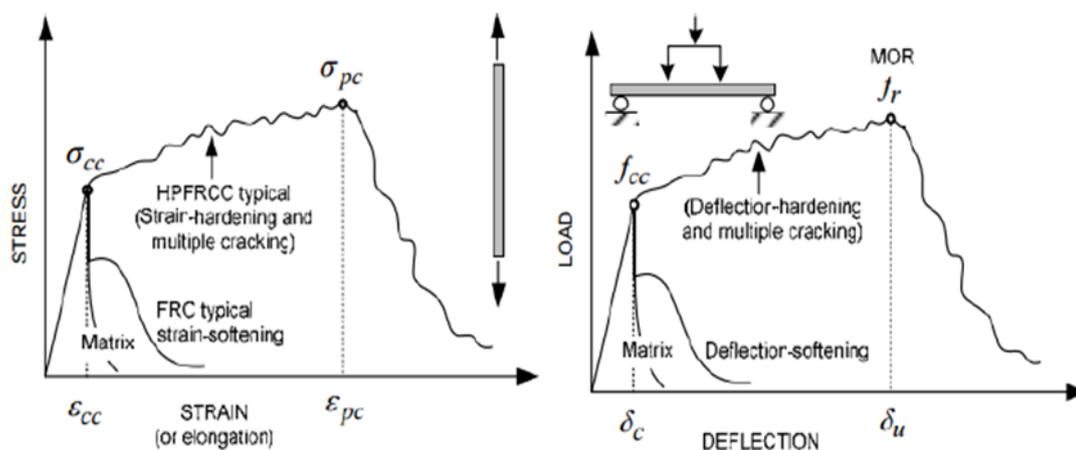


Figura 2.40: Comportamento incedente e degradante di calcestruzzi fibrinforzati per prove a trazione e flessione, [Naaman et al., 2006]

L'aggiunta di fibre influenza notevolmente la resistenza post-fessurativa, esse si attivano all'atto della formazione della fessura, impedendone la progressiva apertura e fornendo una residua capacità di sostenere tensioni di trazione, sostanzialmente assente e poco affidabile nel calcestruzzo tradizionale. In Figura 2.41 si osserva come la percentuale di volume delle fibre presenti all'interno del composto, possa modificare completamente la risposta post-fessurativa in caso di trazione uniassiale. Nel dettaglio si nota un ramo discendente (softening) per basse quantità di fibre mentre al crescere del quantitativo si palesa un comportamento incedente (hardening), dovuto all'azione di ricucitura indotta dalle fibre stesse: si crea uno stato multi-fessurativo in cui la propagazione delle fessure è stabile fino al valore di picco, dal quale si ha localizzazione.

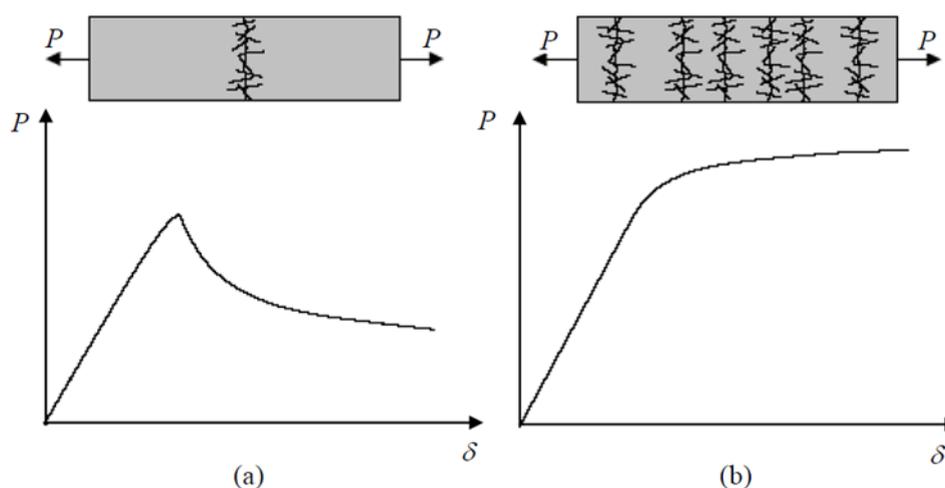


Figura 2.41: Curve carico/spostamento per a) basso contenuto di fibre b) alto contenuto di fibre



Figura 2.42: Tipologie di fibre

Le fibre possono essere metalliche (ferro-cromo o acciaio con diversi tenori di carbonio), oppure polimeriche (polipropilene, nylon, poliestere etc.), di vetro oppure naturali derivanti per esempio dalla cellulosa. Le normative nazionali ed europee riportano le caratteristiche con classificazione e tolleranze in termini di:

- Lunghezza  $L$ , definita come distanza tra l'estremità della fibra;
- Diametro equivalente  $D_e$ , è il diametro di un cerchio di area uguale all'area media delle sezioni trasversali, per sezioni rettangolari o irregolari è calcolato tenendo conto delle misure di base e altezza secondo formule date da normativa;
- Rapporto d'aspetto,  $\lambda = L / D_e$ ;
- Resistenza a trazione  $R_i$ , ovvero lo sforzo corrispondente alla massima forza di trazione agente;
- Forma: rettilinee o sagomate;
- Processo produttivo: filo trafilato, lamiera tagliata etc;
- Composizione chimica: acciaio inox, con o senza carbonio;

Oltre alle caratteristiche soprascritte, è opportuno descrivere per le fibre non metalliche anche il modulo elastico, allungamento a rottura e tensione allo 0.2 di deformazione residua. Le fibre riducono la lavorabilità del calcestruzzo, in particolare quelle con geometria complessa, e diventa necessario l'utilizzo di aggregati di piccole dimensioni assieme ad additivi fluidificanti. L'omogenea dispersione delle fibre è proprietà fondamentale per poter prevedere il comportamento del calcestruzzo; inoltre opportuni accorgimenti si possono adottare in fase di getto, sia per governare la direzione delle fibre sia per evitare zone di accumuli o prive di fibre. La segregazione delle fibre a getto avvenuto deve essere monitorata, al fine di evitare la deposizione verso il fondo del cassero e dare luogo ad una disomogeneità del materiale.

## 2.5.1 Self-healing nei calcestruzzi fibrorinforzati

Nel 2012 Mihashi e Nishiwaki [4] hanno elaborato un interessante documento in cui si ripercorreva lo stato della ricerca, fino ad allora prodotta, riguardante la rigenerazione dei calcestruzzi fibrorinforzati. I primi studi relativi all'aggiunta di fibre metalliche e polimeriche iniziarono negli anni 80 e proseguirono nel corso del decennio in maniera sempre più attiva, dimostrando come il recupero di rigidità nei composti fibrorinforzati fosse molto maggiore rispetto al calcestruzzo tradizionale. Altri studi verificarono come la presenza di fibre avvantaggiasse la riparazione spontanea delle fessure di piccola ampiezza [Li et al.,1998 [24]]. Studi condotti da Yang et al. (2005) e successivamente da Homma et al. nel biennio 2008-2009 [25] hanno dimostrato come le fibre, in particolare quelle polimeriche, migliorassero la capacità di recupero e come la richiusura della fessura fosse da imputare principalmente alla cristallizzazione del carbonato di calcio. In particolare, lo studio condotta da Homma et al. ha osservato come le fibre plastiche agissero da ricettori di  $\text{CaCO}_3$  avviando più rapidamente la cristallizzazione. Lo studio si è concentrato su provini di medesima geometria, ma differenziandosi per tipologia di fibra e matrice cementizia; i campioni sono stati sottoposti a prove di trazione con il fine di studiarne il recupero meccanico. Nella seguente figura si riportano le prescrizioni di ciascun mix.

Types of Mix	Water/Binder	Sand/Binder	Silica fume/Binder	SP/Binder	PE fiber (Vol. %)	SC fiber (Vol. %)	fiber content (piece/m <sup>3</sup> )
FRCC(SC)	0.45	0.45	0.15	-	-	0.75	$187 \times 10^4$
FRCC(PE)				0.09	1.5	-	$221 \times 10^5$
HFRCC				0.09	0.75	0.75	$111 \times 10^5$

Figura 2.43: Caratteristiche di ciascun mix. [Homma et al., 2008-2009]

Una volta che i provini sono stati fessurati con prove di trazione uniassiale, sono stati posti a riposare in acqua per 28 giorni per avviare l'auto-rigenerazione. Dopo il periodo di ricovero sono stati nuovamente testati con il fine di verificarne le percentuali di richiusura e il recupero di impermeabilità.

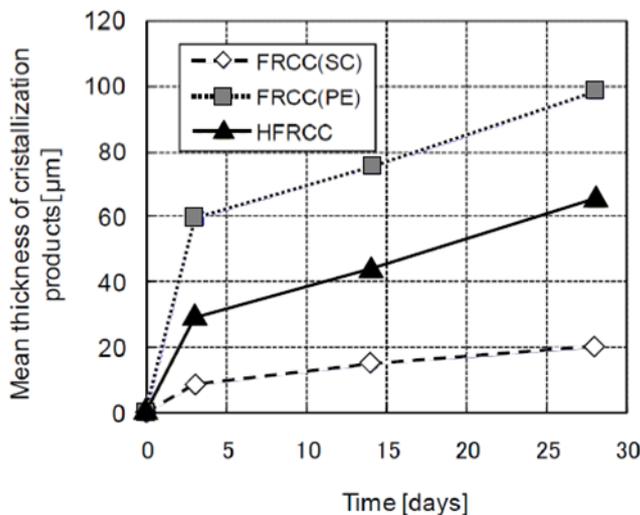


Figura 2.44: Spessore della cristallizzazione in rapporto alle dimensioni della fessura [Homma et al., 2008-2009]

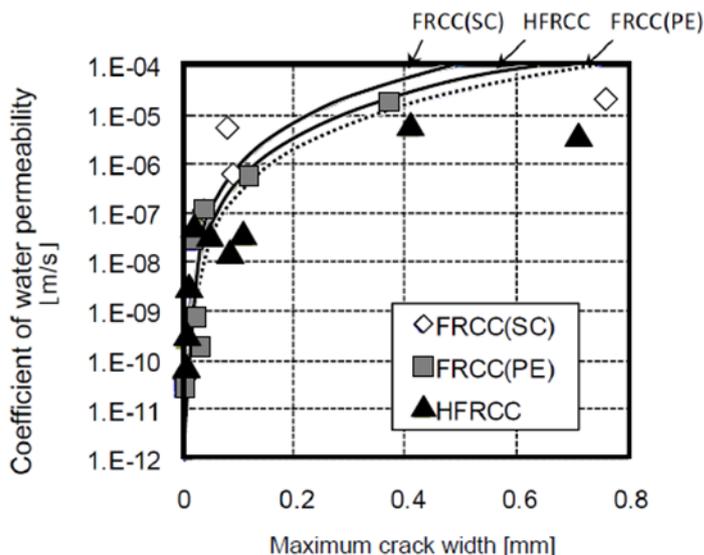


Figura 2.45: Variazione della permeabilità in funzione dell’apertura [Homma et al., 2008-2009]

In relazione ai grafici di Figura 2.44 si osserva come i campioni contenenti fibre polietileniche (PE) abbiano sviluppato uno spessore di cristallizzazione decisamente superiore rispetto a composti con fibre metalliche (SC) e miste (SC+PE). Dai confronti fotografici in Figura 2.46 si può osservare come le fibre polietileniche hanno condotto alla completa richiusura della fessura. In Figura 2.45 è stata riportata la permeabilità in funzione della dimensione della fessura, notando come questa decresca esponenzialmente al diminuire dell’apertura, condizione che si verificò in tutte le tipologie di campioni. In generale è stato riscontrato come le prove di trazione eseguite dopo 28 giorni hanno mostrato un buon recupero della rigidità, presentando tuttavia una rottura fragile con valori di picco più bassi per i campioni in solo fibre polimeriche. Al contrario le fibre metalliche hanno permesso di avere un comportamento

più duttile, presentando ancora il valore di picco inferiore rispetto alle prove eseguite su campioni intatti. La risposta migliore è stata raggiunta con il provino avente fibre miste, con comportamento simile a quello registrato il mese precedente; la differente lunghezza delle fibre, corta per le plastiche e lunga per le metalliche, ha permesso al campione di resistere meglio alle sollecitazioni di trazione.

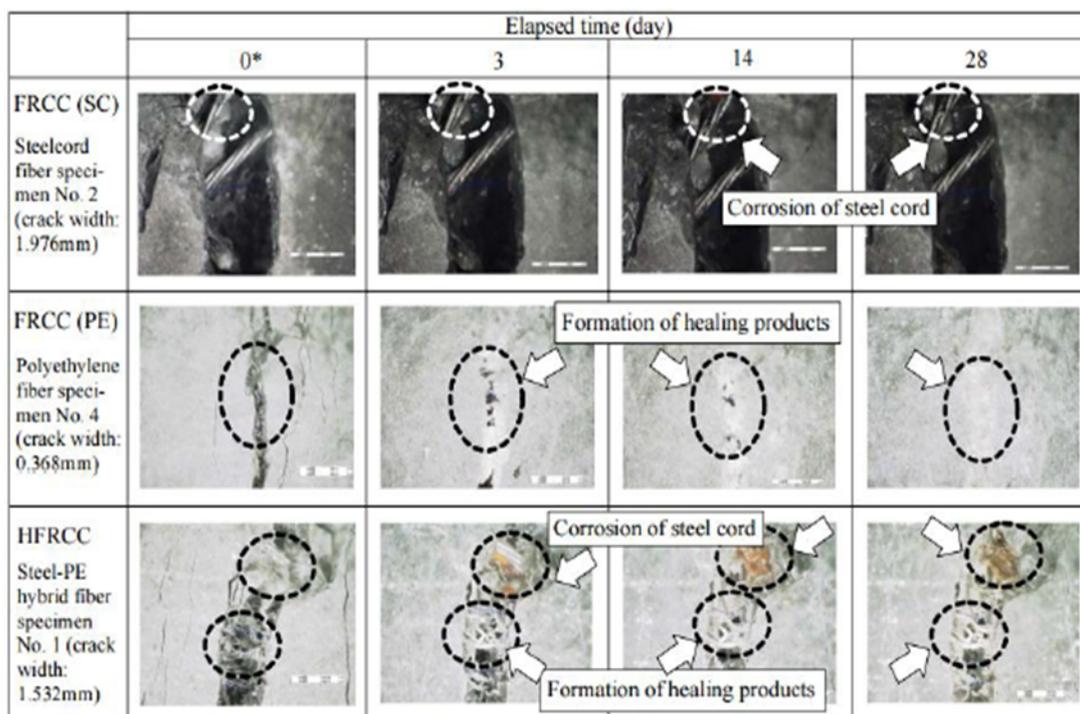


Figura 2.46: Dettaglio dei prodotti di richiusura delle fessure per le diverse tipologie di mix, [Homma et al., 2008-2009]

Studi sull'auto-rigenerazione del calcestruzzo in ambiente non controllato sono stati effettuati da Herbert & Li nel 2011 [26], i quali dimostrarono come la richiusura delle fessure esposte alle naturali condizioni ambientali erano più limitate rispetto alle condizioni da laboratorio.

Uno studio di Ferrara et al. del 2015 [27] [28] si è concentrato sulle proprietà di auto-rigenerazione di un calcestruzzo UHPFRCC con 100kg/m<sup>3</sup> di fibre di acciaio, esposto a diverse condizioni ambientali. La peculiarità di tale ricerca è stata nell'aver considerato due diversi orientamenti delle fibre, uno nella direzione del getto e l'altro in direzione ortogonale (Figura 2.48), studiandone il comportamento post fessurativo e la qualità della richiusura. I campioni sono stati divisi per orientamento delle fibre e per tipologia di ambiente in cui sono stati esposti, prendendo in considerazione cinque scenari: asciutto, ambiente esterno, umido, ciclo asciutto/bagnato e immersione permanente. Sono state effettuate prove a flessione su quattro punti con il fine di raggiungere una predeterminata deformazione residua, onde verificare poi le capacità di richiusura. In Figura 2.47, sono riportati i dosaggi delle componenti del calcestruzzo utilizzato nella campagna sperimentale.

Constituent	Dosage (kg/m <sup>3</sup> )
Cement	600
Slag	500
Sand (0–2 mm)	982
Water	200
Superplasticizer	33 (l/m <sup>3</sup> )
Straight steel fibres ( $l_f = 13 \text{ mm}$ ; $d_f = 0.16 \text{ mm}$ )	100

Figura 2.47: Costituenti del mix utilizzato nella campagna sperimentali, [Ferrara et al.(2012)]

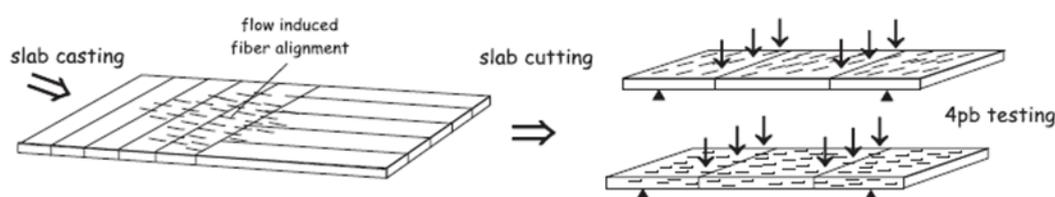


Figura 2.48: Orientamento delle fibre e schema di prova a flessione su quattro punti, [Ferrara et al.,2011]

I provini con le fibre disposte lungo il proprio asse sono quelli che hanno manifestato un comportamento migliore, in cui la risposta post-fessurazione è stata caratterizzata da un ramo incrudente fino al valore di sforzo massimo, Figura 2.49. Il comportamento post-fessurativo incrudente è stato accompagnato da una multifessurazione, Figura 2.50(a), al contrario le fibre disposte ortogonalmente al getto sono state soggette a localizzazione, con propagazione instabile di una singola fessura, Figura 2.50(b). Le analisi svolte alla determinazione degli indici di recupero meccanico e di rigidità, così come gli indici di recupero di duttilità e tenacità, hanno mostrato che i campioni posti in immersione perenne o sottoposti a cicli asciutto/bagnano hanno assicurato migliori riprese. Campioni integri sono stati esposti nelle medesime condizioni soprascritte, ancora una volta i provini posti a contatto diretto con acqua hanno mostrato un incremento delle proprietà meccaniche. La fessurazione è una situazione essenziale affinché l’acqua entri in contatto con le particelle ancora da idratare o avvii la cristallizzazione dell’idrossido di calcio. Fino a 6 mesi il processo di recupero continua a crescere rapidamente, superati i quali rallenta progressivamente a causa del consumo dei materiali alla base della rigenerazione (il lavoro ha verificato il recupero delle prestazioni fino a 24 mesi di esposizione). Nei campioni lasciati riposare in ambiente esterno o a umidità controllata, il recupero meccanico così come la richiusura è stato parziale, in particolare i provini lasciati all’esterno e in ambiente umido hanno avuti recuperi completi e superiori al 100% solo dopo periodi di riposo lunghi, pari a 6 o 24 mesi. I provini lasciati in ambiente secco hanno mostrato un recupero molto lento e comunque insoddisfacente.

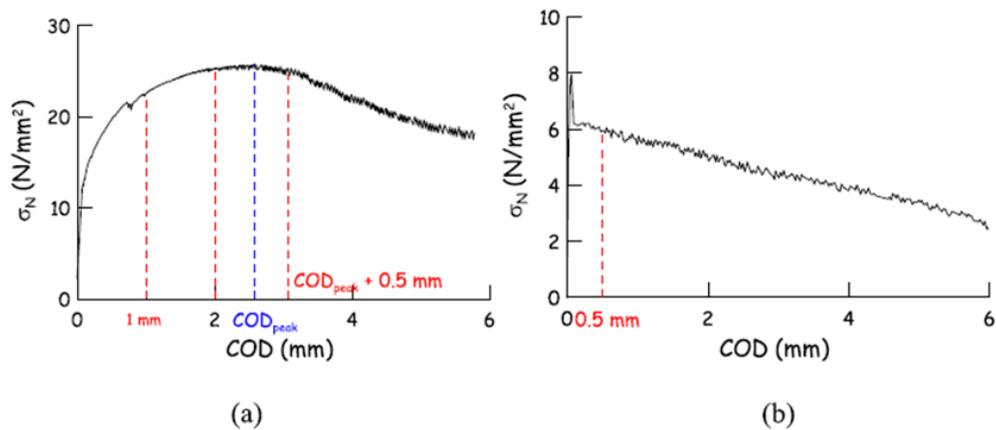


Figura 2.49: Curve sforzo-allungamento: a) multifessurazione di un campione avente le fibre parallele all'asse, b) localizzazione della fessura su campione con le fibre ortogonali all'asse, [Ferrara et al.(2012)]

Al recupero di resistenza e rigidezza non è stata accompagnata un'altrettanta significativa ripresa di duttilità. Il motivo è stato ricondotto al fatto che i prodotti di idratazione o cristallizzazione sono rimasti confinati alla sola fessura richiusa, incidendo sulla distribuzione degli sforzi all'interno del campione. Infatti, ad una seconda prova di carico, le fessure si sono riaperte dove si erano cicatrizzate e non se ne svilupparono altre.

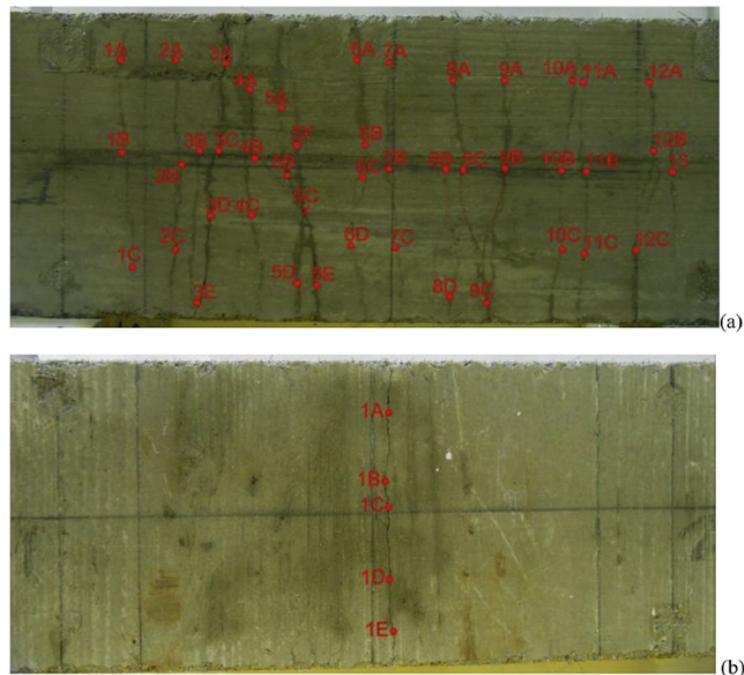


Figura 2.50: Distribuzione delle fessure, a) multifessurazione in campione con fibre parallele all'asse, b) localizzazione in campione con fibre ortogonali all'asse, [Ferrara et al.(2012)]



# CAPITOLO 3

## CAMPAGNA SPERIMENTALE

Come già introdotto nel primo capitolo, l'obiettivo finale della campagna sperimentale oggetto di questa tesi è quello di studiare il comportamento meccanico e le capacità autoriparanti (*self-healing*), in ambienti di esposizione diversi, di tre differenti miscele di calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni (HPFRCC: *High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites*).

Lo scopo del presente capitolo è dettagliare l'attività sperimentale che è stata effettuata per la caratterizzazione meccanica dei diversi tipi di HPFRCC. Quest'ultima si è rivelata importante per definire le capacità prestazionali delle diverse miscele e di conseguenza capire anche come agire successivamente nella prefessurazione e rifessurazione dei provini per lo studio delle capacità autoriparanti e del recupero meccanico.

Per prima cosa, verranno presentate in dettaglio le differenti tipologie di mix, le operazioni svolte per la preparazione dei campioni necessari per le prove e la loro maturazione. In secondo luogo, verrà descritto il programma sperimentale seguito. Infine, saranno mostrate le prove eseguite per la determinazione delle proprietà meccaniche.

Nei prossimi paragrafi, quando necessario, si farà una precisa distinzione tra le tre differenti miscele oggetto di studio.

### 3.1 Realizzazione dei provini

Per la realizzazione dei provini si è partiti dal cosiddetto *mix design*, ovvero la scelta degli elementi costituenti la miscela del calcestruzzo e delle loro quantità. In seguito, si è passati alla loro miscelazione, al conseguente getto seguendo specifiche accortezze e all'attesa della loro

maturazione. In conclusione, per la creazione di alcuni tipi di provini, che verranno di seguito presentati, si è proceduto con dei tagli a partire da provini di dimensioni maggiori.

### 3.1.1 Progettazione della composizione delle miscele

La scelta delle miscele costituenti i calcestruzzi esaminati è stata basata su ricerche precedentemente svolte dal gruppo di ricerca del relatore e alle esperienze sviluppate nel campo dei calcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni, cercando di ottenere materiali che manifestassero buone capacità di self-healing e allo stesso tempo un comportamento meccanico caratterizzato da una risposta in trazione con buoni livelli di duttilità. Le miscele ottenute si sono dimostrate auto-compattanti, caratteristica questa molto importante per composti fibrorinforzati in quanto non essendo necessaria la vibrazione del materiale durante il getto si riduce di molto la possibilità di dispersione non omogenea delle fibre. Altra peculiarità dei materiali studiati è la loro viscosità poiché da questa viene a dipendere il movimento delle fibre in fase di getto che per tali mix si dispongono lungo la direzione di scorrimento del getto.

Nelle seguenti tabelle vengono presentate le tre differenti miscele di HPFRCC studiate e i corrispondenti parametri rappresentativi.

In primis viene riportato il mix design di riferimento che verrà indicato d'ora in avanti con la sigla "MIX 0".

Componenti	Quantità [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento – CEM I 52.5R	600
Loppa d'alto forno	500
Acqua	200
Fibre metalliche (acciaio)	120
Sabbia (0-2 mm)	982
Additivo superfluidificante	33 [l/m <sup>3</sup> ]
Additivo cristallizzante (Penetron)	4.8

Tabella 3.1: Mix design "MIX 0"

Rapporto acqua cemento (a/c)	0.33
Rapporto acqua legante (a/l)	0.18
Quantità di fibre per volume	1.54 %

Tabella 3.2: Parametri rappresentativi "MIX 0"

La prima variazione rispetto alla miscela di riferimento è stata la sostituzione delle fibre metalliche con fibre amorfe. Questa miscela verrà chiamata per semplicità “MIX 1”.

Componenti	Quantità [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento – CEM I 52.5R	600
Loppa d’alto forno	500
Acqua	200
<b>Fibre metalliche amorfe</b>	111
Sabbia (0-2 mm)	982
Additivo superfluidificante	33 [l/m <sup>3</sup> ]
Additivo cristallizzante (Penetron)	4.8

Tabella 3.3: Mix design “MIX 1”

Per quanto concerne la terza miscela, anch’essa è stata creata a partire dalla miscela di riferimento, ma differisce da quest’ultima per il tipo di cemento utilizzato. Infatti, tale miscela che verrà indicata per abbreviazione “MIX 2” sostituisce al CEM I il CEM III.

Componenti	Quantità [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Cemento – CEM III 52.5R</b>	600
Loppa d’alto forno	500
Acqua	200
Fibre metalliche (acciaio)	120
Sabbia (0-2 mm)	982
Additivo superfluidificante	33 [l/m <sup>3</sup> ]
Additivo cristallizzante (Penetron)	4.8

Tabella 3.4: Mix design “MIX 2”

I parametri rappresentativi visti per il mix di riferimento restano invariati per le altre due miscele.

Dopo aver presentato le tre miscele rappresentative della nostra campagna sperimentale andiamo ora a vedere le caratteristiche principali degli elementi utilizzati per ottenerle.

## Cemento

La normativa europea UNI EN 197-1, avente come titolo “Cemento – Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni”, regola la produzione dei cementi di uso comune classificandoli in 5 tipi, 27 sottotipi e 6 classi di resistenza. Tra quelli proposti dalla normativa sono stati selezionati per le nostre miscele il CEM I 52.2R per la miscela di riferimento e per il MIX 1 e il CEM III 52.5R per la terza miscela.

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Composizione (percentuale in massa <sup>a)</sup> )										Costituenti secondari	
			Costituenti principali											
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare			
						naturale	naturale calcinata	silicea	calcareo		L	LL		
K	S	D <sup>b)</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Cemento Portland composito <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 -----→				←----- 21-35 -----→				0-5			
	CEM II/B-M	65-79	←----- 12-20 -----→				←----- 21-35 -----→				0-5			
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento pozzolanico <sup>c)</sup>	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 -----→				-	-	-	0-5		
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 -----→				-	-	-	0-5		
CEM V	Cemento composito <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 -----→		-	-	-	-	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 -----→		-	-	-	-	0-5		

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.  
b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.  
c) Nei cementi Portland composti CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi composti CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati mediante la designazione del cemento (per esempio vedere punto B).

Tabella 3.5: Classificazione dei cementi secondo l'UNI EN 197-1

Classe	Resistenza a compressione (MPa)		Resist. normalizzata 28 giorni	Tempo di inizio presa (min)	Espansione (mm)
	Resistenza iniziale 2 giorni	7 giorni			
32.5 N	-	≥ 16	≥ 32.5	≤ 52.5	
32.5 R	≥ 10	-		≥ 60	
42.5 N	≥ 10	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≤ 10
42.5 R	≥ 20	-			
52.5 N	≥ 20	-	≥ 52.5	-	≥ 45
52.5 R	≥ 30	-			

Tabella 3.6: Requisiti meccanici e fisici dei cementi dettati dalla l'UNI EN 197-1

Da quanto si evince nella Tabella 3.5, il CEM I rappresenta il cemento portland di uso comune caratterizzato da una percentuale di clinker che è pari o maggiore al 95%. Invece, il CEM III è comunemente noto come cemento d'altoforno ed è costituito da una percentuale variabile di clinker (64%-5%) che viene compensata dall'aggiunta di loppa granulata d'altoforno (36%-95%). In funzione di queste percentuali si hanno tre sottotipi di cemento. L'utilizzo di cemento d'altoforno conferisce alle strutture un grado di durabilità maggiore anche in ambienti molto aggressivi. Aspetto negativo di questo cemento è che in commercio sono presenti delle variazioni rispetto alle caratteristiche di questo prodotto a causa delle prescrizioni meno restrittive sulle percentuali di clinker e loppa. In entrambi i cementi è presente una piccola quantità di gesso che ha funzione ritardante sulla presa.

Il numero 52.5 designa la resistenza a compressione a 28 giorni, in MPa, che devono garantire provini confezionati secondo una procedura standardizzata con rapporto acqua-cemento pari a 0.5 e rapporto sabbia cemento pari a 3. Infine, la sigla R rappresenta un cemento ad indurimento veloce. Da come si può osservare in Tabella 3.6, per i cementi da noi utilizzati la resistenza a compressione dopo due giorni deve essere maggiore o uguale a 30 MPa.

### ***Loppa d'altoforno***

Per loppa d'altoforno si intendono le scorie che derivano dalla produzione della ghisa. La loppa ha proprietà leganti solo se macinata finemente e mescolata con acqua contenente idrossido di potassio o sodio o solfato di calcio che fungono da catalizzatori. Queste sostanze in un cemento sono presenti nel clinker. Inoltre, dall'idratazione del clinker si viene a formare idrossido di calcio che aumenta la velocità d'indurimento della loppa sebbene, essendo la loppa un materiale ad attività idraulica latente, non ha necessariamente bisogno di questa sostanza per indurire, a differenza di quanto accade per i materiali pozzolanici.

La loppa d'altoforno utilizzata per le nostre miscele ha la composizione chimica riassunta nella tabella sottostante e presenta una granulometria di classe 12  $\mu\text{m}$ .

Sostanza chimica	Contenuto [%]
SiO <sub>2</sub>	39.00
CaO	37.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.00
MgO	8.30
S	1.00
MnO	0.80
Fe <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	0.70
TiO <sub>2</sub>	0.55
K <sub>2</sub> O	0.30
Na <sub>2</sub> O	0.20
C	0.20

Tabella 3.7: Composizione chimica della loppa d'altoforno usata nelle miscele studiate

## **Acqua**

L'acqua utilizzata per i getti è quella che comunemente viene chiamata “*acqua del rubinetto*”, cioè l'acqua del condotto idrico. Di conseguenza l'acqua impiegata non risulta avere particolari caratteristiche. È stata utilizzata quest'acqua in quanto di facile reperibilità e accettata dalla norma UNI EN 1008 che prescrive le proprietà dell'acqua da utilizzare per l'impasto del calcestruzzo.

## **Fibre**

Le fibre metalliche impiegate nel mix di riferimento e nel MIX 2, commercializzate dall'azienda Azichem, sono micro-fibre in acciaio ottonato aventi diametro di circa 0.22 mm e lunghezza attorno ai 20 mm. Il peso specifico di queste fibre è di 7850 Kg/m<sup>3</sup>.

Diversamente, le fibre metalliche amorfe adoperate nel MIX 1, prodotte dall'azienda Saint-Gobain SEVA, sono caratterizzate da una lega composta da cromo (40%-80%), ferro (40%-80%) e fosforo (20%). Queste, rispetto a quelle d'acciaio, non hanno sezione rotonda e risultano più flessibili. Le loro dimensioni sono: lunghezza 20 mm, larghezza, 1.6 mm e spessore 29 µm. il peso specifico di queste fibre è di 7250 Kg/m<sup>3</sup>.



Figura 3.1: Fibre metalliche d'acciaio (a sinistra) e fibre metalliche amorfe (a destra)

## ***Aggregati***

L'unico aggregato utilizzato per il confezionamento delle tre miscele è stata la sabbia di granulometria pari al massimo a 2 mm. Nella figura sottostante ne è rappresentata la curva granulometrica.

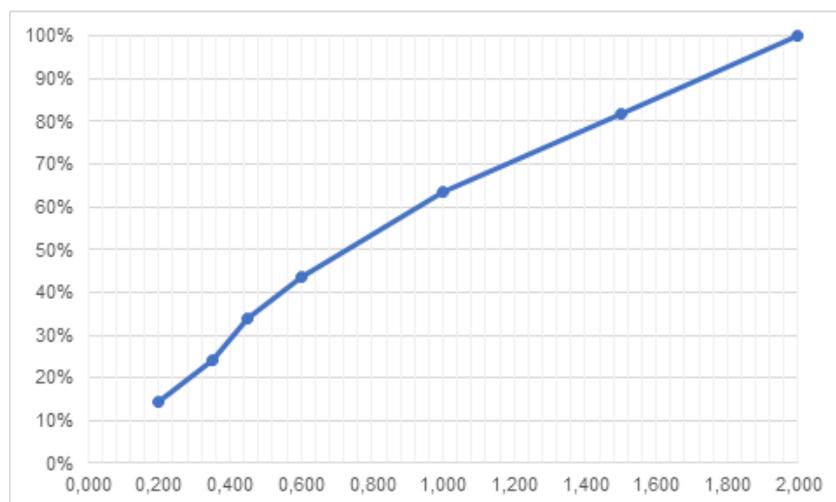


Figura 3.2: Curva granulometrica della sabbia utilizzata

## ***Additivi***

Alle miscele sono state aggiunte due tipologie di additivi: superfluidificante e cristallizzante.

Il superfluidificante ha il potere di ridurre la quantità d'acqua necessaria per raggiungere una determinata lavorabilità dell'impasto, in altre parole, ci permette di ottenere dei calcestruzzi con rapporti a/c bassi ma che allo stesso tempo abbiano una consistenza sufficientemente fluida da poter evitare vibrazioni dell'impasto troppo invasive.

Il principio che sta alla base del funzionamento di questi additivi è quello di ridurre la tensione superficiale dell'acqua d'impasto introducendo polimeri idrosolubili.

Il superfluidificante utilizzato è a base di eteri policarbossillati. È proprio grazie a questo additivo che le miscele analizzate hanno riscontrato un comportamento auto-compattante, ovvero non è stata necessaria la loro vibrazione.

Per quanto concerne l'additivo cristallizzante è stato utilizzato quello proposto dall'azienda Penetron (Penetron Admix, ®). Tale additivo, costituito principalmente da cemento portland, silice, sabbia silicea ed altri principi attivi, fornisce al calcestruzzo una proprietà impermeabilizzante attraverso la formazione di cristalli che riempiono i pori, i capillari e le microfessure presenti. Questi cristalli si formano a partire dalla presenza di umidità nella pasta cementizia che permette alle sostanze attive di reagire con l'idrossido di calcio presente nel calcestruzzo. Inoltre, il calcestruzzo può usufruire di tale proprietà anche nel caso in cui rimanga asciutto per un determinato tempo e poi venga reidratato. Per quanto detto, l'aggiunta del suddetto additivo aumenta la durabilità del calcestruzzo. Perciò le capacità auto-riparanti del calcestruzzo, oltre che alla loppa d'altoforno, vengono affidate a questo additivo.

### 3.1.2 Getto, taglio e maturazione dei provini

Per l'esecuzione dei getti la prima operazione è stata quella di preparare i casseri nel quale gettare la miscela. Questi sono gli stessi per tutti e tre i mix in quanto i tipi e il numero dei provini da realizzare per la campagna sperimentale sono i medesimi. In Tabella 3.8 sono riassunti i casseri utilizzati e il calcolo del volume di calcestruzzo teorico necessario.

Tipologia casseforme	Numero	Dimensioni [cm]			Volume [m <sup>3</sup> ]
		Lunghezza	Larghezza	Altezza	
Travetto	22	50	10	10	0.11
Lastra	2	100	50	2.5	0.025
Cilindro	10	Diametro: 10		30	0.024
Volume teorico totale [m <sup>3</sup> ]					0.159

Tabella 3.8: Tipologia casseforme e calcolo volume calcestruzzo necessario per realizzare i provini

Prima dell'utilizzo, le casseforme sono state pulite da eventuali residui di getti precedenti e oleate con un prodotto apposito noto come disarmante. Successivamente, i casseri sono stati posizionati in maniera da essere comodi per la fase di getto verificandone, mediante l'uso di una livella, l'orizzontalità in modo tale da evitare che i provini gettati potessero avere lati non in piano.

Nella figura sottostante si riportano le foto delle tipologie di casseforme adoperate presentate in Tabella 3.8.



Figura 3.3: Tipologie di casseri utilizzati. A partire da sinistra: Lastra, Travetti e Cilindri.

Una volta preparati i casseri si è passati alla miscelazione degli ingredienti, con la supervisione dei tecnici di laboratorio, previo calcolo delle quantità necessarie per l'ottenimento di un volume di circa il 10% in più rispetto al volume teorico precedentemente quantificato. Bisogna tener presente che, essendo stati i vari mix preparati in periodi diversi (in ordine cronologico dal MIX 0 al MIX 2) i volumi e il numero degli impasti non è stato sempre lo stesso per tutti i mix, ma è dipeso dalla disponibilità del laboratorio e dai problemi riscontrati in fase operativa. Tuttavia, i getti per ogni tipo di mix sono stati realizzati nella stessa giornata.

Per quanto riguarda la miscela di riferimento sono stati eseguiti due impastati, la prima di 0.066 m<sup>3</sup> e la seconda di 0.1 m<sup>3</sup>.

Componenti	Quantità 1° impasto [Kg]	Quantità 2° impasto [Kg]
Cemento – CEM I 52.5R	39.6	60.0
Loppa d'alto forno	33.0	50.0
Acqua	13.2	20.0
Fibre metalliche (acciaio)	7.9	12.0
Sabbia (0-2 mm)	64.8	98.2
Additivo superfluidificante	2.2 [l]	3.3 [l]
Additivo cristallizzante (Penetron)	0.32	0.48

Tabella 3.9: Quantità dei componenti per la realizzazione dei provini del MIX 0

Dalla prima miscelazione sono stati ricavati 10 travetti e 1 lastra. I restanti casseri sono stati riempiti col secondo getto (12 travi, 1 lastra e 10 cilindri)

Il getto dei provini con calcestruzzo a base di CEM I e fibre amorfe è stato eseguito con un'unica miscelazione di 0.176 m<sup>3</sup>.

Componenti	Quantità [Kg]
Cemento – CEM I 52.5R	105.6
Loppa d’alto forno	88.0
Acqua	35.2
Fibre metalliche amorfe	19.5
Sabbia (0-2 mm)	172.8
Additivo superfluidificante	5.8 [l]
Additivo cristallizzante (Penetron)	0.84

Tabella 3.10: Quantità dei componenti per la realizzazione dei provini del MIX 1

Poiché la scelta di produrre un unico impasto non si è rilevata ottimale, in quanto il calcestruzzo si è indurito prima ancora di finire il getto dei provini previsti (si sono infatti riuscite a gettare solo 22 travi, 2 lastre e 5 cilindri), per l’ultima miscela si è optato per dividere il getto in due. Sono stati così preparati due impasti da 0.088 m<sup>3</sup> ciascuno. In Tabella 3.11 si riportano le quantità dei materiali utilizzati per ogni mescolata.

Componenti	Quantità 1° impastata [Kg]
Cemento – CEM III 52.5R	52.8
Loppa d’alto forno	44.8
Acqua	17.6
Fibre metalliche (acciaio)	10.6
Sabbia (0-2 mm)	86.4
Additivo superfluidificante	2.9 [l]
Additivo cristallizzante (Penetron)	0.42

Tabella 3.11: Quantità dei componenti per la realizzazione dei provini del MIX 2

Dal primo impasto si sono ricavati 13 travi, 1 lastra e 5 cilindri mentre dal secondo sono stati gettati i rimanenti provini (9 travi, 1 lastra e 5 cilindri).

La procedura di miscelazione è un aspetto molto importante; un impasto con eccessiva viscosità, un tempo troppo breve di miscelazione o un’introduzione delle fibre eccessivamente veloce o setacciate approssimativamente, può portare alla formazione di agglomerati di fibre. Tale fenomeno, noto come “*fiber balling*”, ha come conseguenza una non uniformità della distribuzione delle fibre all’interno del getto. Perciò, per evitarne la manifestazione, sono stati aggiunti e miscelati gli ingredienti nell’ordine e nel tempo seguenti:

- Cemento, loppa d'altoforno e additivo cristallizzante (miscelazione 2 minuti);
- Metà acqua (miscelazione 2 minuti);
- Restante acqua e superfluidificante (miscelazione 2 minuti);
- Sabbia (miscelazione 3 minuti);
- Fibre inserite gradualmente (miscelazione 5 minuti).

Alla fine di ogni miscelazione si è avanzati col getto del calcestruzzo nei tre diversi tipi di casseri sopra definiti. Per il versamento della miscela si è fatto uso di secchi in materiale plastico. I travetti sono stati gettati dal centro, le lastre da uno dei lati più corti mentre i cilindri dall'unica apertura presente, cioè dall'alto.



Figura 3.4: Getto di un travetto (sinistra) e di una lastra (destra).

Grazie alla sua adeguata prestazione allo stato fresco il calcestruzzo si è compattato all'interno dei casseri senza l'impiego di vibratori e le fibre si sono posizionate e distribuite lungo il flusso del getto come indicato in Figura 3.5.

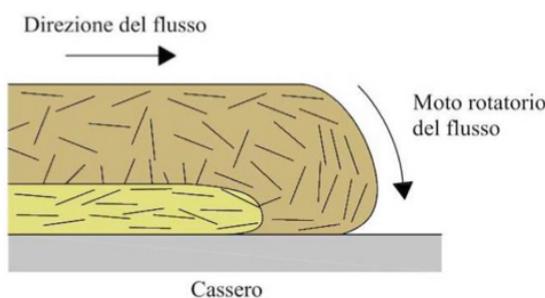


Figura 3.5: Rappresentazione della disposizione delle fibre durante il getto

Conclusa la fase di getto, gli elementi all'interno dei casseri sono stati lasciati nella sala getti del laboratorio, cercando di creare un ambiente umido bagnando la superficie sottostante e ricoprendoli con un telo di plastica. Dopo aver aspettato 24 ore gli elementi gettati sono stati scasserati e siglati secondo la nomenclatura presentata nel prossimo paragrafo. In seguito, sono stati stoccati per la maturazione (durata circa 90 giorni) in una camera umida con 50% di umidità relativa e temperatura di 20°C.

Le lastre e i cilindri gettati hanno necessitato di un'operazione di taglio per la realizzazione dei provini nelle dimensioni necessarie per le prove sperimentali. Di conseguenza, trascorsi circa

15 giorni dal getto, ogni lastra è stata segnata e tagliata in modo da ottenere 10 provini delle dimensioni di circa 9.6x 50x2.5 cm, mentre i cilindri sono stati segnati e tagliati in modo tale da ricavare da ognuno di essi 4 cilindri di altezza 6 cm.

Per quanto riguarda le lastre si è deciso di ottenere provini che avessero le fibre dirette verso il proprio asse. Per i cilindri invece, si sono ottenuti i 4 provini partendo dal basso e scartando la parte di cilindro rimanente in sommità.

Oltre a indicare le linee di taglio, sugli elementi ancora da tagliare è stata aggiunta la siglatura dei provini tenendo conto della posizione di questi all'interno dell'elemento di partenza.

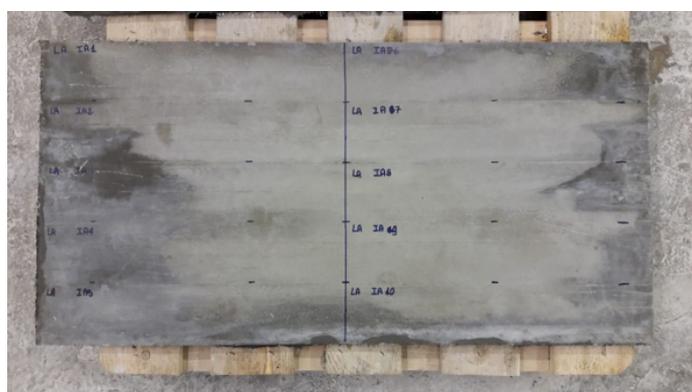


Figura 3.6: Lastra e cilindro segnati pronti per il taglio

Inoltre, nel segnare gli elementi da tagliare si è tenuto conto degli spessori delle lame delle seghe circolari utilizzate per i tagli, ovvero circa 5 mm per le lastre e circa 2,5 mm per i cilindri.



Figura 3.7: Taglio di una lastra con sega circolare GREGORI



Figura 3.8: Operatore occupato al taglio dei cilindri con clipper Major (NORTON)

I provini ricavati dalle operazioni di taglio sono stati ricollocati in camera umida per continuare la loro maturazione.

Anche per l'ottenimento dei provini necessari per le prove DEWS (Double Edge Wedge Splitting) e per le prove di compressione si sono dovuti effettuare dei tagli. Questi sono stati ricavati dalle estremità rispettivamente delle travi basse e di quelle alte che sono state portate a rottura attraverso prova di flessione su quattro punti. In aggiunta, i provini per le prove DEWS hanno richiesto anche due intagli.

La seguente figura illustra i tagli (linee tratteggiate in rosso) che sono stati necessari, a partire dalla lastra gettata, per ricavare i provini di dimensioni 9.6x50x2.5 cm (chiamati lastrine) e a sua volta i tagli necessari per ottenere i campioni per le prove DEWS.

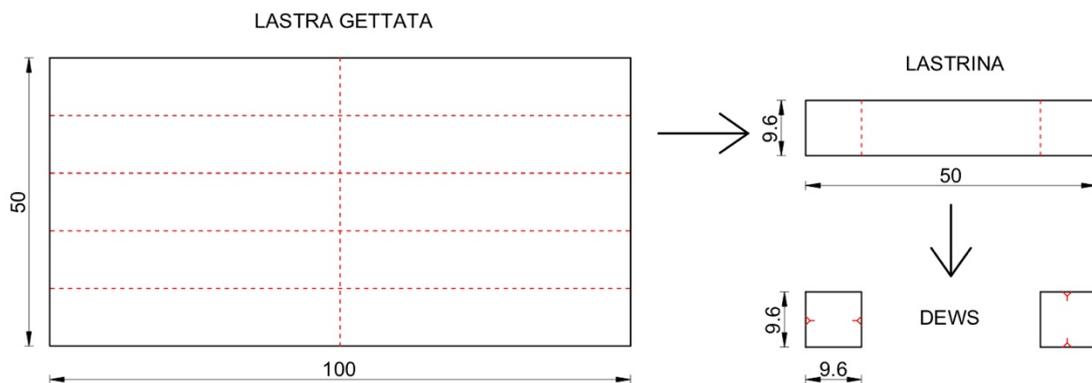


Figura 3.9: Tagli eseguiti per l'ottenimento di lastrine e DEWS (vista dall'alto)

La Figura 3.10, invece, rappresenta i punti in cui sono stati effettuati i tagli (aree tratteggiate in rosso) sui provini di dimensioni 10x50x10 cm (denominati travetti) per la creazione dei cubi utilizzati per la prova a compressione.

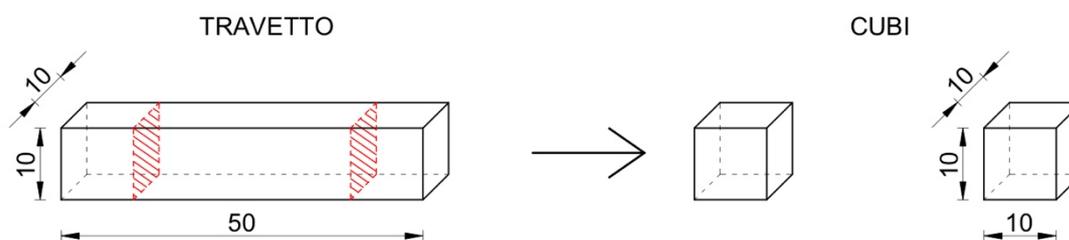


Figura 3.10: Tagli eseguiti per l'ottenimento dei cubi

Concludendo, dopo aver eseguito tutte le operazioni presentate precedentemente, per ogni mix sono stati ricavati i seguenti provini:

- 22 travetti (10x50x10 cm);
- 20 lastre (9.6x50x2.5 cm);
- 20 dischi ( $\phi=10$  cm e  $h=6$  cm);
- 12 DEWS per il MIX 0 e 10 per i MIX 1 e 2 (9.6 x9.6 cm);
- 8 cubi (10x10x10 cm).

### 3.1.3 Nomenclatura dei provini

Identificare in maniera univoca i provini è di fondamentale importanza in quanto è la modalità che permette di distinguerli l'uno dall'altro. Per questa ragione ogni provino è stato siglato. La sigla è stata composta da lettere e numeri i quali hanno un significato ben definito. Anzitutto, la nomenclatura utilizzata per i provini del mix di riferimento è stata scelta dai tesisti che avevano già iniziato la campagna sperimentale.

I travetti e le lastre sono stati siglati secondo la seguente scaletta:

- Numero del getto: 1 per il primo getto e 2 per il secondo getto;
- Due lettere rappresentanti il tipo di provino: DB o TB rispettivamente per Deep Beam e Thin Beam;
- Due lettere rappresentanti il tipo di prova: MC per Mechanical Characterization (con l'aggiunta dei caratteri CS per identificare i provini sottoposti a carico-scarico) o PC per PreCrack;
- Numero rappresentante il numero progressivo del tipo di prova.

Alla fine di tutto ciò per le lastre è stata riportata una L seguita da un numero rappresentante la posizione di questa all'interno della lastra dalla quale è stata tagliata. La numerazione delle posizioni è rappresentata in Figura 3.11 dove con le linee blu tratteggiate si è indicato il flusso del getto.

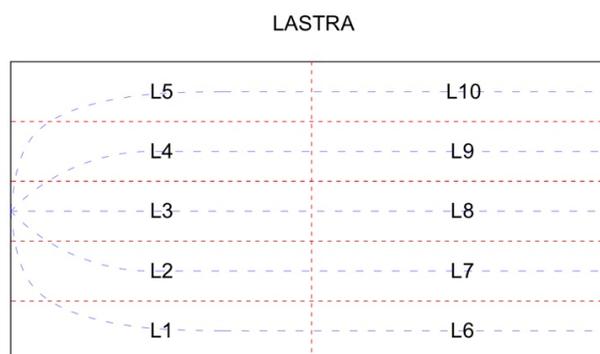


Figura 3.11: Posizione lastrine del MIX o nella lastra dalle quali sono state tagliate

Per quanto concerne i campioni per l'esecuzione delle prove DEWS la nomenclatura utilizzata è stata:

- Numero del getto: 1 per il primo getto e 2 per il secondo getto;
- Numero progressivo della prova alla quale è stata sottoposta la lastrina dal quale è stato ricavato il provino;
- Lettera rappresentante l'orientamento delle fibre: A se le fibre risultano disposte ortogonalmente rispetto alla linea passante per gli intagli, B se risultano parallele a tale linea.

I cubi sono stati siglati in modo simile ai travetti. Infatti, seguono la traccia sottostante:

- Numero del getto: 1 per il primo getto e 2 per il secondo getto;
- Lettere DB rappresentanti il tipo di provino dal quale è stato tagliato (Deep Beam);
- Lettere CC rappresentanti la prova di compressione;
- Numero rappresentante il numero progressivo del tipo di prova alla quale il travetto, dal quale è stato tagliato il cubo, è stato sottoposto;
- Lettere rappresentanti la parte del travetto dal quale il provino è stato ottenuto: SX per sinistra e DX per destra.

Infine, i dischi sono stati siglati semplicemente con tre caratteri:

- Numero del getto: 1 per il primo getto e 2 per il secondo getto;
- Lettera rappresentante il cilindro dal quale è stato tagliato il disco;
- Numero rappresentante la posizione del disco nel cilindro dal quale è tagliato: da 1 a 4 iniziando la numerazione dalla base del cilindro.

Per rendere più chiara l'esposizione, si riporta di seguito un esempio per ogni tipo di provino:

- TRAVETTO: 1\_DB\_MCCS\_3  
Il codice in questione appartiene ad un travetto (DB) ottenuto col primo getto (1) il quale è stato sottoposto alla terza (3) prova meccanica di carico-scarico (MCCS);

- LASTRINA: 2\_TB\_PC\_4\_L6  
Questo codice rappresenta una lastrina (TB) ottenuta col secondo getto (2) la quale è stata sottoposta alla quarta (4) prova di prefessurazione (PC) e che nella lastra dalla quale è stata tagliata era collocata nella posizione 6 (L6).
- DEWS: 1\_6\_A  
Il codice sopra riportato appartiene ad un provino il quale è stato sottoposto a prova DEWS, tagliato da una lastrina (con numero progressivo 6 del tipo di prova meccanica a cui è stata sottoposta) ottenuta col primo getto (1) e orientamento delle fibre del tipo A.
- CUBO: 1\_DB\_CC\_3\_SX  
Il codice indica un cubo tagliato dal lato sinistro (SX) di un travetto (DB) ottenuto col primo getto (1) il quale è stato sottoposto a prova di compressione (CC). Il numero 3 rappresenta il numero progressivo del tipo di prova alla quale il travetto, dal quale è stato tagliato il cubo, è stato sottomesso.
- DISCO: 1\_E\_4  
Il codice si riferisce ad un disco tagliato da un cilindro (identificato con la lettera E) ottenuto col primo getto (1). Il disco era collocato nella posizione più alta del cilindro (4).

Passiamo ora ad esporre i codici identificativi utilizzati per i provini costruiti con le altre due miscele.

I travetti sono stati siglati secondo la seguente scaletta:

- Numero romano e lettera: IA per indicare CEM I e fibre amorfe mentre IIIM per indicare CEMIII e fibre metalliche;
- Numero caratterizzante il provino.

Nel caso del MIX 2, essendo stati eseguiti due getti, si è aggiunto alla fine un numero rappresentante il getto.

Similmente le lastre sono state siglate secondo la seguente scaletta:

- Due lettere: LA o LB per indicare la lastra alla quale apparteneva prima di essere tagliata;
- Numero romano e lettera: IA per indicare CEM I e fibre amorfe mentre IIIM per indicare CEMIII e fibre metalliche;
- Numero rappresentante la posizione della lastrina all'interno della lastra dalla quale è stata tagliata. La numerazione seguita è rappresentata in Figura 3.12.

Per il MIX 2 è la lettera della lastra dalla quale sono state tagliate le lastre ad indicare il numero del getto (lastra A ottenuta dal primo getto mentre lastra B dal secondo).

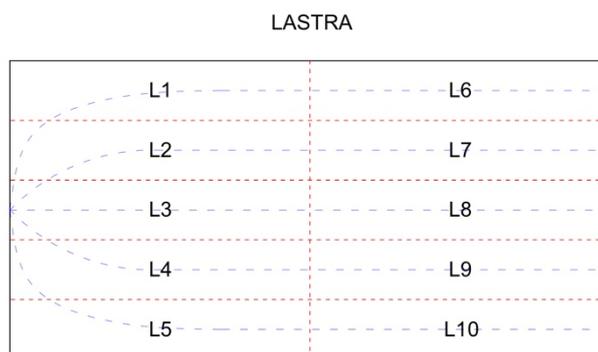


Figura 3.12: Posizione lastrine del MIX 1 e del MIX 2 nella lastra dalle quali sono state tagliate

Per quanto concerne i campioni per l'esecuzione delle prove DEWS la nomenclatura utilizzata è stata quella della lastrina dalla quale sono stati ricavati con l'aggiunta di due lettere DP o DO indicanti rispettivamente Direzione delle fibre Parallela o Ortogonale alla linea passante per gli intagli.

I cubi sono stati identificati a partire dalla sigla del travetto dal quale sono stati ricavati con l'aggiunta di un numero 1 o 2 indicante rispettivamente cubo tagliato dal lato sinistro o destro. I dischi, invece, sono stati siglati con:

- Numero romano e lettera: IA per indicare CEM I e fibre amorfe, IIIM per indicare CEMIII e fibre metalliche;
- Numero progressivo rappresentante il cilindro (a partire dal numero 23);
- Numero rappresentante la posizione del disco nel cilindro dal quale è tagliato: da 1 a 4 iniziando la numerazione dalla base del cilindro.

Nel caso del MIX 2, essendo stati eseguiti due getti, si è aggiunto alla fine un numero rappresentante il getto.

Come fatto in precedenza, per rendere più chiara l'esposizione, si riporta di seguito un esempio per ogni tipo di provino:

- TRAVETTO: IA\_01  
Il codice in questione fa riferimento ad un travetto del MIX 1 (IA) con numero identificativo 1.
- LASTRINA: LB\_IIIM\_10  
Il codice appartiene ad una lastrina del MIX 2 (IIIM). Nella lastra dalla quale è stata tagliata, lastra B (LB), era collocata nella posizione 10.
- DEWS: LA\_IIIM\_03\_DP  
Il codice indica un provino il quale è stato sottoposto a prova DEWS, tagliato da una lastrina con sigla LA\_IIIM\_03 e con orientamento delle fibre parallelo alla linea passante per gli intagli (DP).

- CUBO: IA\_20\_2  
Questo codice designa un cubo tagliato dal lato destro (2) del travetto avente identificativo IA\_20.
- DISCO: IA\_23\_1  
Quest'ultimo corrisponde a un disco tagliato da un cilindro, identificato con il numero 23, del MIX 1 (IA). Il disco era collocato alla base del cilindro.

## 3.2 Organizzazione della campagna sperimentale

Nel paragrafo precedente è stato descritto il procedimento seguito per la realizzazione dei campioni da sottoporre a indagine sperimentale. Si è detto che per ogni miscela di calcestruzzo sono stati ricavati 22 travetti, 20 lastre, 20 dischi, 10 DEWS (12 per il MIX 0) e 8 cubi. A questo punto appare opportuno focalizzarsi sulla presentazione del programma che è stato seguito per condurre la campagna sperimentale dopo aver atteso 90 giorni per la maturazione dei provini.

### 3.2.1 Travetti

Dei 22 travetti realizzati, 6 sono stati impiegati per la caratterizzazione meccanica mentre i restanti sono stati utilizzati per valutare la capacità auto-riparante del calcestruzzo.

Per la caratterizzazione meccanica, dopo tre mesi dal getto, sono state eseguite 4 o 5 prove di rottura monotona e 1 o 2 prove di rottura con cicli di carico/scarico.

Diversamente, per la caratterizzazione del self healing, a sei mesi dal getto sono stati prefessurati 16 travetti. Di questi, 8 sono stati tenuti perennemente immersi in acqua geotermica mentre gli altri 8 hanno subito cicli settimanali di asciutto/bagnato (una settimana immersi in acqua geotermica e una esposti in una camera con 50% di umidità relativa e 20°C di temperatura). Per entrambe le tipologie di esposizione, 5 provini sono stati ispezionati al microscopio e rifessurati a 1, 3 e 6 mesi dalla prefessurazione, mentre gli altri 3 sempre con la stessa ricorrenza, sono stati solo ispezionati.

In Tabella 3.12, Tabella 3.13 e Tabella 3.14 vengono riportati i travetti della campagna sperimentale, rispettivamente del MIX 0, MIX 1 e MIX 2, indicando per ognuno di essi le dimensioni reali, il tipo di prova che ha subito e l'esposizione a cui è stato sottoposto. Vengono utilizzate le seguenti abbreviazioni:

- R-M: Rottura Monotona;
- R-C/S: Rottura con cicli di Carico/Scarico;
- PF: Prefessurazione senza rifessurazione nei mesi a seguire;
- PF-RF: Prefessurazione e Rifessurazione a 1, 3 e 6 mesi;

- CU: esposizione in Camera Umida (50% di umidità relativa e 20°C);
- IMM: IMMersione continua in acqua geotermica;
- A/B: esposizione a cicli di Asciutto/Bagnato.

Provino	Dimensioni [cm]			Prova	Esposizione
	Lungh.	Largh.	Altezza		
1_DB_MC_1	50.0	10.0	9.8	R-M	CU
2_DB_MC_2	50.0	10.0	9.9	R-M	CU
1_DB_MC_3	50.0	10.0	10.0	R-M	CU
2_DB_MC_4	50.0	10.0	9.6	R-M	CU
1_DB_MCCS_3	50.0	10.0	9.6	R-C/S	CU
2_DB_MCCS_4	50.0	10.0	9.9	R-C/S	CU
1_DB_PC_1	50.0	10.0	10.1	PF-RF	IMM
2_DB_PC_2	50.0	10.0	9.7	PF	A/B
1_DB_PC_3	50.0	10.0	10.0	PF	A/B
1_DB_PC_4	50.0	10.0	9.9	PF-RF	IMM
2_DB_PC_5	50.0	10.0	9.7	PF-RF	A/B
2_DB_PC_6	50.0	10.0	9.8	PF-RF	IMM
1_DB_PC_7	50.0	10.0	9.9	PF-RF	A/B
1_DB_PC_8	50.0	10.0	10.0	PF	IMM
1_DB_PC_9	50.0	10.0	9.9	PF-RF	IMM
2_DB_PC_10	50.0	10.0	9.9	PF	IMM
2_DB_PC_11	50.0	10.0	9.7	PF	IMM
1_DB_PC_12	50.0	10.0	9.8	PF-RF	A/B
2_DB_PC_13	50.0	10.0	9.9	PF-RF	A/B
2_DB_PC_14	50.0	10.0	9.3	PF-RF	A/B
2_DB_PC_15	50.0	10.0	10.3	PF	IMM
2_DB_PC_16	50.0	10.0	10.1	PF-RF	IMM

Tabella 3.12: Lista dei travetti composti dal MIX o

Provino	Dimensioni [cm]			Prova	Esposizione
	Lungh.	Largh.	Altezza		
IA_17	50.0	10.0	9.9	R-M	CU
IA_18	50.0	10.0	10.3	R-M	CU
IA_19	50.0	10.0	10.2	R-M	CU
IA_21	50.0	10.0	10.3	R-M	CU
IA_22	50.0	10.0	10.2	R-M	CU
IA_20	50.0	10.0	10.5	R-C/S	CU
IA_1	50.0	10.0	9.7	PF-RF	IMM
IA_2	50.0	10.0	9.7	PF	IMM
IA_3	50.0	10.0	10.0	PF-RF	A/B
IA_4	50.0	10.0	10.3	PF-RF	IMM
IA_5	50.0	10.0	9.7	PF-RF	A/B

IA_6	50.0	10.0	10.1	PF-RF	A/B
IA_7	50.0	10.0	9.9	PF-RF	A/B
IA_8	50.0	10.0	10.1	PF-RF	A/B
IA_9	50.0	10.0	10.1	PF-RF	IMM
IA_10	50.0	10.0	10.1	PF-RF	IMM
IA_11	50.0	10.0	9.9	PF	IMM
IA_12	50.0	10.0	9.8	PF	IMM
IA_13	50.0	10.0	10.0	PF-RF	IMM
IA_14	50.0	10.0	10.0	PF	A/B
IA_15	50.0	10.0	10.0	PF	A/B
IA_16	50.0	10.0	10.2	PF	A/B

Tabella 3.13: Lista dei travetti composti dal MIX 1

Provino	Dimensioni [cm]			Prova	Esposizione
	Lungh.	Largh.	Altezza		
IIIM_2_1	50.0	10.0	9.8	R-M	CU
IIIM_3_1	50.0	10.0	9.5	R-M	CU
IIIM_5_1	50.0	10.0	9.8	R-M	CU
IIIM_15_2	50.0	10.0	10.0	R-M	CU
IIIM_7_1	50.0	10.0	9.7	R-C/S	CU
IIIM_14_2	50.0	10.0	10.1	R-C/S	CU
IIIM_1_1	50.0	10.0	9.7	PF	IMM
IIIM_4_1	50.0	10.0	9.9	PF	A/B
IIIM_6_1	50.0	10.0	9.8	PF-RF	IMM
IIIM_8_1	50.0	10.0	9.7	PF-RF	A/B
IIIM_9_1	50.0	10.0	9.8	PF-RF	A/B
IIIM_10_1	50.0	10.0	9.8	PF-RF	IMM
IIIM_11_1	50.0	10.0	10.0	PF-RF	IMM
IIIM_12_1	50.0	10.0	10.0	PF-RF	IMM
IIIM_13_1	50.0	10.0	9.8	PF-RF	A/B
IIIM_16_2	50.0	10.0	10.2	PF-RF	A/B
IIIM_17_2	50.0	10.0	9.8	PF	A/B
IIIM_18_2	50.0	10.0	10.0	PF	IMM
IIIM_19_2	50.0	10.0	10.1	PF-RF	IMM
IIIM_20_2	50.0	10.0	10.0	PF	A/B
IIIM_21_2	50.0	10.0	10.0	PF	IMM
IIIM_22_2	50.0	10.0	10.0	PF-RF	A/B

Tabella 3.14: Lista dei travetti composti dal MIX 2

### 3.2.2 Lastrine

Tutte le 20 lastrine a disposizione sono state adoperate per la caratterizzazione meccanica del materiale ma 8 di queste sono state sfruttate anche per lo studio del self healing. Dopo 90 giorni di maturazione, si è deciso di sottoporre 4 o 5 provini a prova di rottura monotona e 1 o 2 campioni a prova di rottura con cicli di carico scarico.

Dopo circa sei mesi sono state prefessurate 8 lastrine al fine di studiarne la capacità di self healing. Dopo 1 mese di immersione continua in acqua geotermica tutte le 8 lastrine sono state osservate al microscopio. Successivamente, 6 di queste sono state rifessurate e 2 sottoposte a prova di rottura monotona. Attesi 2 mesi, dopo aver ispezionato tutti e 6 i campioni, 3 di questi sono stati rifessurati mentre gli altri 3 portati a rottura. Infine, a sei mesi dalla prefessurazione i 3 provini rimanenti, dopo essere stati ispezionati, sono stati anch'essi sottoposti a rottura.

Le restanti 6 lastrine hanno subito una rottura monotona ad un anno dal getto. 3 di queste hanno continuato a maturare in camera umida (50% di umidità e 20°C) mentre le altre 3, dopo 6 mesi dal getto, sono state immerse continuamente in acqua geotermica.

In Tabella 3.15, Tabella 3.16 e Tabella 3.17 vengono riportate le lastrine della campagna sperimentale, rispettivamente del MIX 0, MIX 1 e MIX 2, indicando per ognuna di esse le dimensioni reali, il tipo di prova che ha subito e l'esposizione a cui è stata sottoposta. Vengono utilizzate le seguenti abbreviazioni:

- R-M: Rottura Monotona;
- R-M12: Rottura Monotona dopo 12 mesi dal getto;
- R-C/S: Rottura con cicli di Carico/Scarico;
- PF-R1: PreFessurazione e Rottura a 1 mese dalla prefessurazione;
- PF-RF1-R3: PreFessurazione, RiFessurazione a 1 mese e Rottura a 3 mesi dalla prefessurazione;
- PF-RF3-R6: PreFessurazione, RiFessurazione a 1 e a 3 mesi e Rottura a 6 mesi dalla prefessurazione;
- CU: esposizione in Camera Umida (50% di umidità relativa e 20°C);
- IMM: IMMersione continua in acqua geotermica;

Provino	Dimensioni [cm]			Prova	Esposizione
	Lungh.	Largh.	Altezza		
2_TB_MC_5_L7	49.9	9.8	2.5	R-M	CU
1_TB_MC_6_L7	49.8	9.7	2.6	R-M	CU
2_TB_MC_7_L2	50.0	9.7	2.7	R-M	CU
1_TB_MC_8_L2	49.7	9.7	2.5	R-M	CU
1_TB_MCCS_1_L5	49.7	9.7	2.4	R-C/S	CU
2_TB_MCCS_2_L5	49.8	9.6	2.6	R-C/S	CU
1_TB_MC_9_L4	50.0	9.7	2.4	R-M12	IMM
2_TB_MC_10_L4	49.8	9.7	2.6	R-M12	IMM
2_TB_MC_11_L1	49.5	9.7	2.4	R-M12	IMM
2_TB_MC_12_L3	49.8	9.7	2.5	R-M12	CU
1_TB_MC_13_L1	50.0	9.4	2.6	R-M12	CU
2_TB_MC_14_L9	49.9	9.7	2.5	R-M12	CU
2_TB_PC_1_L8	49.6	9.7	2.6	PF-RF1-R3	IMM
1_TB_PC_2_L8	50.0	9.7	2.6	PF-R1	IMM
1_TB_PC_3_L9	49.7	9.6	2.5	PF-RF3-R6	IMM
2_TB_PC_4_L6	49.9	9.6	2.3	PF-RF3-R6	IMM
1_TB_PC_5_L3	49.8	9.7	2.4	PF-RF1-R3	IMM
2_TB_PC_6_L10	49.6	9.7	2.5	PF-R1	IMM
1_TB_PC_7_L10	49.9	9.5	2.4	PF-RF1-R3	IMM
1_TB_PC_8_L6	49.7	9.6	2.6	PF-RF3-R6	IMM

Tabella 3.15: Lista delle lastre composte dal MIX 0

Provino	Dimensioni [cm]			Prova	Esposizione
	Lungh.	Largh.	Altezza		
LA_IA_1	49.8	9.4	2.6	R-M	CU
LA_IA_2	49.8	9.6	2.6	R-M	CU
LA_IA_3	49.8	9.6	2.6	R-M	CU
LB_IA_1	49.8	9.3	2.5	R-M	CU
LB_IA_2	49.8	9.7	2.5	R-M	CU
LA_IA_10	49.8	9.7	2.9	R-C/S	CU
LA_IA_6	49.8	9.8	2.7	R-M12	IMM
LA_IA_7	49.7	9.6	2.6	R-M12	IMM
LA_IA_9	49.6	9.6	2.9	R-M12	CU
LB_IA_6	49.9	8.3	2.5	R-M12	IMM
LB_IA_7	50.0	10.0	2.5	R-M12	CU
LB_IA_8	49.8	10.0	2.6	R-M12	CU
LA_IA_4	49.8	10.0	2.6	PF-RF1-R3	IMM
LA_IA_5	49.8	9.7	2.7	PF-RF1-R3	IMM
LA_IA_8	49.7	9.6	2.8	PF-R1	IMM
LB_IA_3	49.8	9.6	2.6	PF-R1	IMM
LB_IA_4	50.0	9.5	2.7	PF-RF3-R6	IMM
LB_IA_5	50.0	9.8	2.7	PF-RF3-R6	IMM
LB_IA_9	49.6	9.9	2.6	PF-RF1-R3	IMM
LB_IA_10	49.5	9.9	2.6	PF-RF3-R6	IMM

Tabella 3.16: Lista delle lastre composte dal MIX 1

Provino	Dimensioni [cm]			Prova	Esposizione
	Lungh.	Largh.	Altezza		
LA_IIM_1	49.7	9.7	2.7	R-M	CU
LA_IIM_2	49.7	9.7	2.7	R-M	CU
LA_IIM_3	49.6	9.5	2.6	R-M	CU
LB_IIM_1	49.9	9.7	2.6	R-M	CU
LB_IIM_3	49.6	9.6	2.5	R-M	CU
LB_IIM_8	49.8	9.6	2.5	R-C/S	CU
LA_IIM_6	50.1	9.8	2.7	R-M12	CU
LA_IIM_9	50.1	9.8	2.6	R-M12	IMM
LA_IIM_10	50.0	9.3	2.6	R-M12	IMM
LB_IIM_4	49.9	9.8	2.7	R-M12	CU
LB_IIM_5	49.8	9.2	2.5	R-M12	CU
LB_IIM_9	49.7	9.8	2.7	R-M12	IMM
LA_IIM_4	49.7	9.9	2.6	PF-R1	IMM
LA_IIM_5	49.9	9.4	2.6	PF-R1	IMM
LA_IIM_7	49.8	9.8	2.7	PF-RF1-R3	IMM
LA_IIM_8	49.7	9.9	2.6	PF-RF1-R3	IMM
LB_IIM_2	49.9	9.9	2.5	PF-RF3-R6	IMM
LB_IIM_6	49.7	9.8	2.6	PF-RF3-R6	IMM
LB_IIM_7	49.7	9.8	2.6	PF-RF1-R3	IMM
LB_IIM_10	49.8	9.3	2.6	PF-RF3-R6	IMM

Tabella 3.17: Lista delle lastre composte dal MIX 2

### 3.2.3 Dischi

Per questo elaborato si è deciso di operare attraverso delle prove eseguite solo sui dischi del mix di riferimento. Dopo un anno dal getto tutti e 20 i dischi sono stati oggetto di prove di permeabilità previa fessurazione. Di questi, 8 sono stati immersi continuamente in acqua geotermica a partire da 6 mesi dal getto mentre gli altri hanno continuato a maturare in camera umida (50% di umidità relativa e 20°C).

Nella seguente tabella si riportano i dischi del mix di riferimento, indicando per ognuno di essi le dimensioni reali e il tipo d'esposizione.

Vengono utilizzate le seguenti abbreviazioni:

- CU: esposizione in Camera Umida (50% di umidità relativa e 20°C);
- IMM: IMMersione continua in acqua geotermica;

Provino	Dimensioni [cm]		Esposizione
	Diam.	Altezza	
1_A_1	10.0	6.2	CU
1_A_2	10.0	6.0	CU
1_A_3	10.0	5.9	CU
1_A_4	10.0	6.1	CU
1_B_1	10.0	6.0	IMM
1_B_2	10.0	6.0	IMM
1_B_3	10.0	5.8	IMM
1_B_4	10.0	6.1	IMM
2_C_1	10.0	6.2	IMM
2_C_2	10.0	6.0	IMM
2_C_3	10.0	5.9	IMM
2_C_4	10.0	6.0	IMM
1_D_1	10.0	5.7	CU
1_D_2	10.0	6.1	CU
1_D_3	10.0	6.0	CU
1_D_4	10.0	6.2	CU
2_E_1	10.0	6.1	CU
2_E_2	10.0	5.8	CU
2_E_3	10.0	5.9	CU
2_E_4	10.0	6.2	CU

Tabella 3.18: Lista dei dischi composti dal MIX o

### 3.2.4 DEWS

Nella Tabella 3.19, Tabella 3.20 e Tabella 3.21 si riportano i provini sui quali sono state condotte le prove DEWS, rispettivamente del MIX o, MIX1 e MIX 2, indicando per ognuno di essi lo spessore e la lunghezza tra i due intagli (f). Tali provini sono stati ricavati dagli estremi delle lastre sulle quali sono state condotte prove a rottura dopo circa 90 giorni di maturazione in camera umida.

Provino	Dimensioni [cm]	
	Spess.	f
2_5_A	2.5	7.3
2_5_B	2.6	7.2
1_6_A	2.6	6.5
1_6_B	2.7	6.9
2_7_A	2.7	6.6
2_7_B	2.7	7.2
1_8_A	2.5	7.3
1_8_B	2.5	7.2
1_1_A	2.4	6.7
1_1_B	2.5	6.8
2_2_A	2.6	6.7
2_2_B	2.6	7.1

Tabella 3.19: Lista provini del MIX o sottoposti a prove DEWS

Provino	Dimensioni [cm]	
	Spess.	f
LA_IA_1_DO	2.6	5.9
LA_IA_1_DP	2.4	6.0
LA_IA_2_DO	2.5	5.1
LA_IA_2_DP	2.5	6.0
LA_IA_3_DO	2.6	6.1
LA_IA_3_DP	2.6	6.2
LB_IA_1_DO	2.5	6.0
LB_IA_1_DP	2.3	6.0
LB_IA_2_DO	2.4	6.2
LB_IA_2_DP	2.5	6.1

Tabella 3.20: Lista provini del MIX 1 sottoposti a prove DEWS

Provino	Dimensioni [cm]	
	Spess.	f
LA_IIIM_2_DO	2.7	7.0
LA_IIIM_2_DP	2.7	6.5
LA_IIIM_3_DO	2.7	6.7
LA_IIIM_3_DP	2.6	7.1
LB_IIIM_1_DO	2.6	7.1
LB_IIIM_1_DP	2.7	6.6
LB_IIIM_3_DO	2.6	6.8
LB_IIIM_3_DP	2.5	6.5
LB_IIIM_8_DO	2.6	6.7
LB_IIIM_8_DP	2.5	6.8

Tabella 3.21: Lista provini del MIX 2 sottoposti a prove DEWS

### 3.2.5 Cubi

In Tabella 3.22, Tabella 3.23 e Tabella 3.24 vengono messi in evidenza i cubi utilizzati per la prova di compressione rispettivamente del MIX 0, MIX 1 e MIX 2, indicando per ognuno di essi le dimensioni reali. Tali provini sono stati ricavati dagli estremi dei travetti sui quali sono state condotte prove a rottura dopo circa 90 giorni di maturazione in camera umida.

Provino	Dimensioni [cm]		
	Lato 1	Lato 2	Lato 3
1_DB_CC_1_SX	10.1	9.9	10.0
1_DB_CC_1_DX	10.2	9.9	10.0
2_DB_CC_2_SX	10.0	9.7	10.1
2_DB_CC_2_DX	10.0	9.9	10.0
1_DB_CC_3_SX	9.7	10.1	10.0
1_DB_CC_3_DX	10.1	10.1	10.1
2_DB_CC_4_SX	10.0	9.7	10.2
2_DB_CC_4_DX	10.0	9.4	10.1

Tabella 3.22: Lista cubi del MIX 0

Provino	Dimensioni [cm]		
	Lato 1	Lato 2	Lato 3
IA_17_1	10.0	9.7	10.0
IA_17_2	10.0	9.9	10.0
IA_20_1	10.1	10.6	10.0
IA_20_2	10.0	10.5	10.1
IA_21_1	10.0	10.3	10.0
IA_21_2	10.0	10.4	10.0
IA_22_1	10.1	10.3	10.1
IA_22_2	10.1	10.4	10.0

Tabella 3.23: Lista cubi del MIX 1

Provino	Dimensioni [cm]		
	Lato 1	Lato 2	Lato 3
IIM_2_1_1	10.0	9.8	10.0
IIM_2_1_2	10.1	9.8	10.0
IIM_3_1_1	10.1	9.5	10.1
IIM_3_1_2	10.0	9.9	10.0
IIM_5_1_1	10.1	9.9	10.0
IIM_5_1_2	10.1	10.0	10.0
IIM_7_1_1	10.1	10.0	10.0
IIM_7_1_2	10.1	9.8	10.0

Tabella 3.24: Lista cubi del MIX 2

## 3.3 Prove per la caratterizzazione meccanica

In questo paragrafo vengono descritte le prove svolte per la caratterizzazione meccanica delle tre differenti miscele. Per prima cosa, viene presentata la pressa elettromeccanica utilizzata per esaminare la maggior parte dei provini della campagna sperimentale. Dopodiché, viene illustrata la preparazione e il funzionamento dei due tipi di prove effettuate con l'ausilio di questa macchina (prova a flessione su 4 punti e prova di trazione indiretta). Infine, si analizza la prova a compressione eseguita sui cubi.

### 3.3.1 Pressa elettromeccanica

Il dispositivo utilizzato per le prove di flessione su 4 punti e per le prove DEWS è stata la pressa elettromeccanica INSTRON 8562, raffigurata in Figura 3.13, situata nel Laboratorio Prove Materiali Strutture e Costruzioni del Politecnico di Milano.

Tale macchina è formata da una base fissa dalla quale partono due cilindri pieni sui quali può scorrere la traversa superiore che viene fissata a questi attraverso quattro bulloni che garantiscono una coppia di serraggio pari a 800 Nm. L'altezza della traversa superiore, previo allentamento dei bulloni, è regolabile grazie all'ausilio di due pistoni idraulici ad olio.

Un motore elettrico, invece, permette la rotazione di una vite alla quale è solidale la base mobile della pressa. Tale vite è in grado di gestire movimenti micrometrici e una corsa di 100 mm.

Inoltre, sono presenti due piatti rigidi ai quali è possibile collegare i pezzi necessari per l'esecuzione delle prove. Un piatto è collocato sulla base mobile mentre l'altro è attaccato a una cella di carico con capacità massima di 100 KN che è a sua volta sostenuta dalla traversa di sommità. La cella di carico altro non è che un trasduttore in grado di convertire una forza in un impulso elettrico proporzionale.



Figura 3.13: Pressa elettromeccanica INSTRON 8562 del Laboratorio Prove Materiali Strutture e Costruzioni del Politecnico di Milano.

Il suo funzionamento viene azionato attraverso l'apposito pannello digitale, vedi Figura 3.14, nel quale è possibile impostare il controllo della prova (sforzi o spostamenti) e la velocità d'esecuzione.



Figura 3.14: Quadro di controllo della pressa elettromeccanica INSTRON

Alla pressa vanno associati degli strumenti che permettono il rilevamento dei dati interessanti. Per le prove da noi effettuate, essendo necessaria la misura di spostamenti differenziali, sono

stati utilizzati dei trasduttori di spostamento lineare a contatto chiamati LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), con precisione micrometrica e corsa di 10 mm.

Per quanto riguarda l'utilizzo degli LVDT sui provini, come di norma, sono stati incollati dei sostegni che possono essere di quattro tipi, illustrati in Figura 3.15. Come si può vedere, i differenti sostegni sono uguali a coppie (forati o pieni) a meno di un'estremità che può essere piana o a coda di rondone. Quelli con estremità piana sono stati utilizzati quando la superficie su cui dovevano essere incollati era anch'essa piana (come per le prove DEWS), mentre gli altri sono stati utilizzati per essere incollati sugli spigoli dei provini (come per le prove a flessione su quattro punti). Gli elementi forati fungevano da alloggio per gli LVDT che venivano bloccati attraverso l'apposita vite differentemente quelli pieni servivano da contrasto per la punta dello strumento di misura.



Figura 3.15: Sostegni necessari per l'utilizzo degli LVDT

Per quel che interessa la misura della freccia, nelle prove a flessione su quattro punti, per il sostegno degli LVDT si è utilizzato un telaio (chiamato "gondola") dotato di appositi fori per l'inserimento degli strumenti e viti per il loro bloccaggio, mentre come contrasto si è scelto di incollare sulla sommità del provino una striscia rigida.



Figura 3.16: Gondola

Quando la lunghezza degli LVDT non era abbastanza tra la punta dei trasduttori e i contrasti sono state interposte delle prolunghe di metallo.

La pressa e gli strumenti di misura sono connessi ad una centralina, modello UPM 60, per l'acquisizione dei dati che a sua volta è collegata ad un computer nel quale avviene la registrazione dei dati, con estensione *.dat*, per mezzo di un software (Lab View).



Figura 3.17: Centralina e computer impiegati per l'acquisizione dei dati

### 3.3.2 Prova a flessione su quattro punti

Come prova di flessione, sui provini appositi della campagna sperimentale (travetti e lastre), è stata scelta quella su quattro punti. Tale scelta è stata preferita in quanto, tra le lame di carico, si viene a creare una zona a taglio nullo e momento costante che permette di studiare al meglio i calcestruzzi contenenti fibre. Infatti, per materiali fibrorinforzati, in tale area si può verificare una multi-fessurazione alla quale si può associare una redistribuzione di tensione con conseguente comportamento incrudente. Inoltre, è anche possibile tener conto di un'eventuale non uniformità del materiale come una distribuzione delle fibre non omogenea. Contrariamente con una prova a flessione su tre punti, dunque con una sola lama di carico, si verrebbe a creare un momento massimo in corrispondenza della sezione caricata. Ciò comporterebbe la formazione di un'unica fessura in corrispondenza del massimo momento perdendo l'aspetto incrudente del materiale e la sua eventuale disomogeneità.

Le prove a flessione eseguite per la caratterizzazione meccanica sono state condotte in controllo di spostamenti, impostando una velocità di spostamento della pressa e registrando il carico, fino a rottura del provino. Tali prove a collasso sono state o di tipo monotono o con successivi cicli di carico-scarico. Durante tali test, sono stati acquisiti gli abbassamenti in mezzzeria del provino (freccia) e l'apertura di fessura compresa tra le lame di carico (COD: *Crack Opening Displacement*). È da tenere presente che la lettura di COD in realtà, oltre

all'apertura di fessura, data dalla somma delle aperture delle fessure che si sono formate, comprende l'allungamento elastico. Inoltre, come si può vedere ad esempio in Figura 3.19, il COD misurato non è riferito esattamente all'intradosso della trave ma risulta più basso rispetto a questo di circa 10 mm per motivi che derivano dal posizionamento degli LVDT.

I provini avendo altezza inferiore ai 150 mm e comportamento incrudente, così come consigliato dalle linee guida CNR-DT-204, sono stati sottoposti alle prove senza essere intagliati.

Nel paragrafo precedente sono stati introdotti gli strumenti utilizzati per l'esecuzione delle prove; vediamo ora come questi sono stati posizionati e di conseguenza i passaggi svolti per condurre le prove.

### ***Posizionamento degli strumenti***

Per eseguire le prove a flessione su quattro punti ci si è serviti della pressa elettromeccanica INSTRON 8562 presentata al paragrafo 3.3.1. Per questo tipo di prova è stato necessario allestire la pressa con quattro lame, due di appoggio e due di carico.

Sul piatto della base mobile è stata bullonata una trave d'acciaio molto rigida sulla quale è possibile regolare la posizione delle lame d'appoggio. Queste ultime sono state distanziate a 450 mm l'una dall'altra e centrate rispetto al piatto di sommità. Su quest'ultimo invece è stato attaccato un sistema snodabile di lame distanti 150 mm. Tale congegno permette alle lame di caricare il provino in modo simmetrico durante la prova.

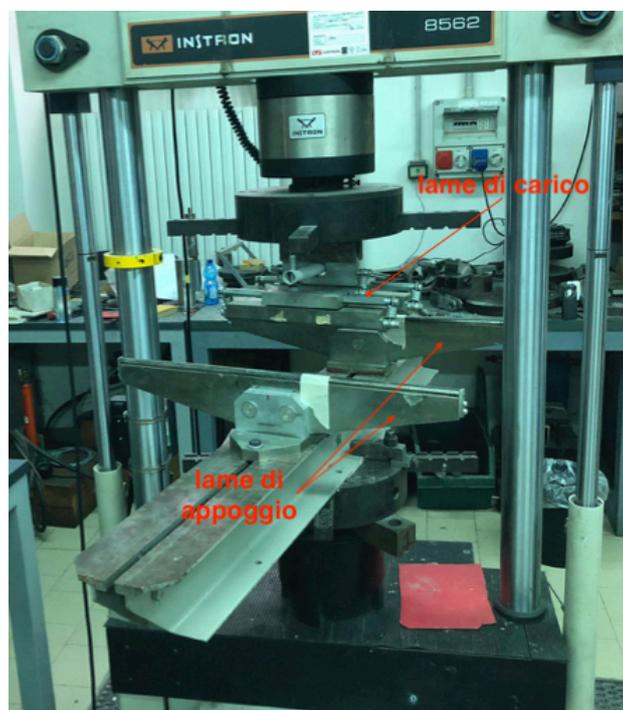


Figura 3.18: Set up della pressa elettromeccanica per lo svolgimento della prova a flessione su quattro punti

Per questa prova ci si è interessati alla lettura del COD e della freccia. Per far ciò si sono utilizzati quattro trasduttori di spostamento. Per mezzo dei sostegni incollati al provino sono stati collocati orizzontalmente due LVDT lungo il lato del provino a contatto con le lame d'appoggio per la misura del COD. Le due basette necessarie per l'utilizzo di ogni LVDT sono state attaccate in corrispondenza dei punti di carico, quindi ad una distanza di 150 mm l'una dall'altra. In questo modo, la misura è stata registrata su tutta la zona a momento costante. Contrariamente, gli altri due LVDT sono stati posizionati verticalmente in mezzeria del provino per la lettura della freccia grazie all'ausilio della gondola. Di conseguenza, la striscia d'acciaio che entra a contatto con gli estremi mobili degli LVDT è stata incollata a metà del lato superiore del provino.

Per tutti e quattro gli strumenti di misura sono state impiegate delle prolunghe per arrivare a contatto con i contrasti. In Figura 3.19 e Figura 3.20 sono rappresentati i set up utilizzati rispettivamente per i travetti e per le lastrine.

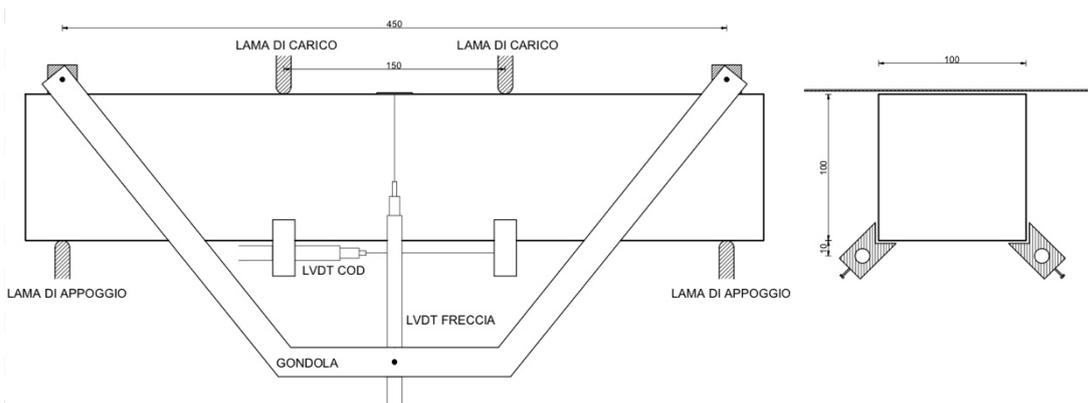


Figura 3.19: Posizionamento degli strumenti di misura per travetto sottoposti a prova di flessione su quattro punti

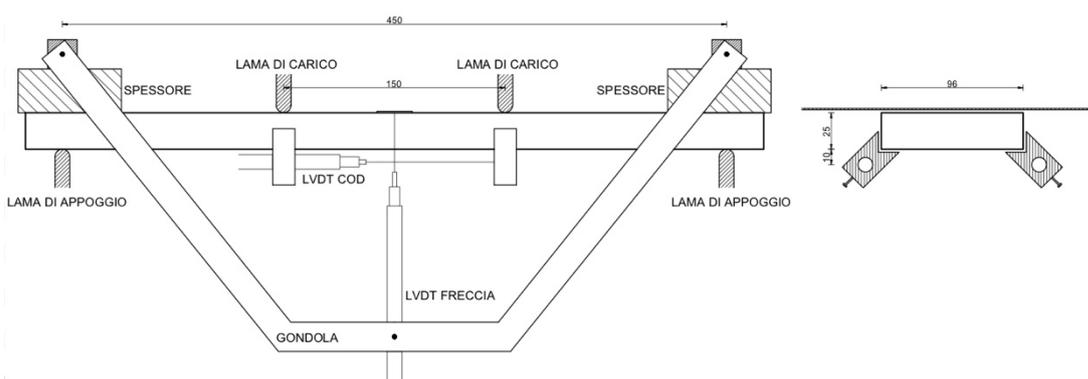


Figura 3.20: Posizionamento degli strumenti di misura per lastrina sottoposta a prova di flessione su quattro punti

Per facilitare il posizionamento degli strumenti, tutti i campioni da provare a flessione sono stati segnati con delle linee come in Figura 3.21.

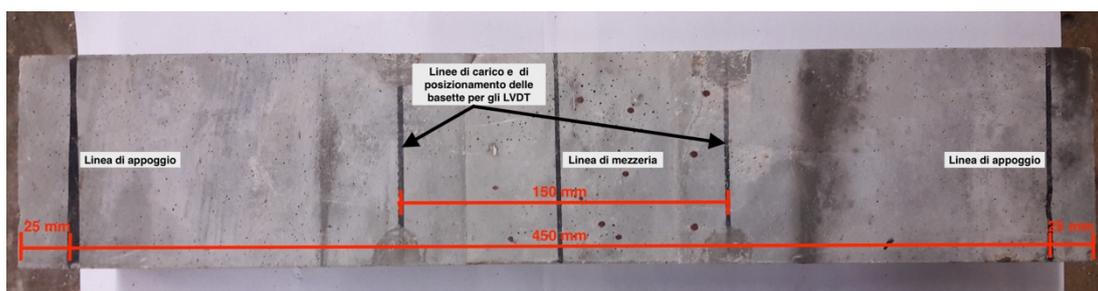


Figura 3.21: Linee di riferimento

Gli strumenti sono stati collocati tenendo conto del fatto che i provini erano da sottoporre a prova con il lato fondo cassero a contatto con le lame di appoggio. Tale scelta deriva dal fatto che la parte inferiore del provino potrebbe essere più ricca di fibre a causa della sedimentazione di queste nella parte inferiore del getto; perciò se il campione fosse stato messo al contrario si poteva assistere ad un comportamento poco duttile o con una resistenza meccanica più bassa.

### ***Esecuzione della prova***

Il provino, prima di essere posto sotto la pressa, è stato preparato seguendo i seguenti passaggi:

- Misura delle dimensioni del provino (lunghezza, larghezza e altezza; si vedano le tabelle nei paragrafi 3.2.1 e 3.2.2). Per ogni dimensione sono state prese sei letture attorno al provino e poi mediate;
- Tracciamento delle linee di riferimento, come indicato in Figura 3.21;
- Miscelazione della colla bicomponente;
- Incollaggio dei supporti e dei riscontri necessari per il funzionamento degli LVDT, ognuno in corrispondenza delle linee e dei lati del provino appropriati;



Figura 3.22: Lastrine pronte per essere sottoposte a prova di flessione su quattro punti

Atteso l'indurimento della colla, circa 10 minuti, il campione è stato appoggiato sulle lame d'appoggio della pressa, centrandolo con le linee laterali, e contemporaneamente posizionata la gondola. Dopodiché, per eseguire la prova abbiamo eseguito i successivi passaggi:

- Inserimento e bloccaggio degli LVDT. Quelli per la misura della freccia sono stati estesi il più possibile in quanto durante la prova vengono schiacciati. Al contrario, quelli per la lettura del COD sono stati compressi in quanto si allungano;
- Messa in contatto delle lame di carico col provino con l'applicazione di un carico iniziale di circa 0.05 KN;
- Impostazione della pressa attraverso il quadro di controllo;
- Creazione, per mezzo del software di acquisizione dei dati installato nel computer, del file di salvataggio;
- Avvio della registrazione dei dati e della pressa.

Le prove sono state monitorate controllando che gli LVDT non arrivassero a fine corsa.



Figura 3.23: Prova a flessione su quattro punti (su una lastrina)

Le prove a flessione sono state condotte in controllo di spostamento. Prima del raggiungimento del picco o in fase di carico (per le prove cicliche) la velocità di spostamento della base mobile è stata impostata pari a  $3 \mu\text{m/s}$  per i travetti e pari a  $15 \mu\text{m/s}$  per le lastrine. Tali velocità sono state cambiate dopo il superamento del picco o in fase di scarico (per le prove cicliche) e rispettivamente poste pari a  $5 \mu\text{m/s}$  e  $25 \mu\text{m/s}$ .

Le prove di solito sono state interrotte quando gli LVDT arrivavano a fine corsa. Spesso però con le lastrine si è preferito fermare la prova per spostare gli strumenti e farla ripartire subito dopo. Tale operazione è stata necessaria in quanto, essendo questi elementi molto deformabili, prima di arrivare a carichi sufficientemente bassi rispetto a quello di picco gli LVDT arrivavano a fine corsa.

Il file salvato in automatico dal software contiene i seguenti dati della prova per ogni step di misura (impostato pari a 0.2, cioè 5 letture al secondo):

- Numero dello step;
- Tempo progressivo della prova in secondi;
- Spostamento della pressa in millimetri;
- Carico sul provino in KN;
- Lettura dei quattro LVDT in millimetri.

Grazie a questi dati è stato possibile effettuare il tracciamento dei grafici Carico-COD e Carico-Freccia.

In Figura 3.24 e Figura 3.25 sono riportati degli esempi di grafici tracciati per prove monotone a rottura rispettivamente su travetti e su lastrine.

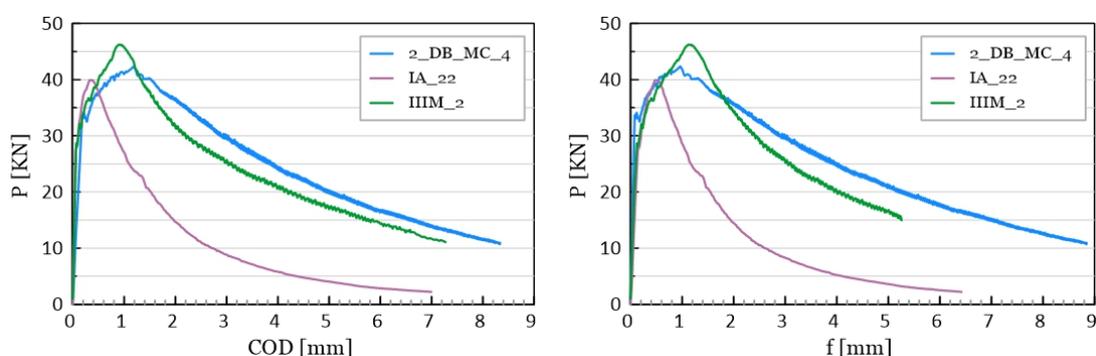


Figura 3.24: Curve P-COD (a sinistra) e P-Freccia (a destra) di travetti sottoposti a prove monotone di rottura con flessione su quattro punti

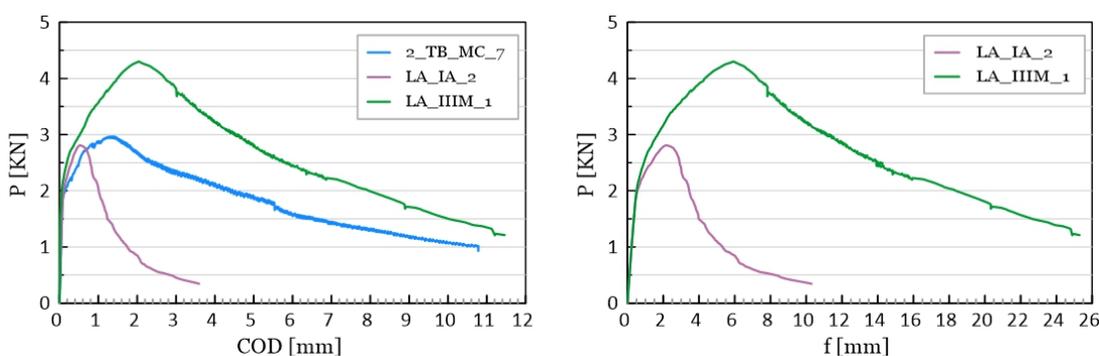


Figura 3.25: Curve P-COD (a sinistra) e P-Freccia (a destra) di lastrine sottoposte a prove monotone di rottura con flessione su quattro punti

Le prove di rottura con cicli di carico-scarico si sono svolte caricando e scaricando il provino ogni qualvolta era raggiunto un incremento di COD pari a 500  $\mu\text{m}$ . In Figura 3.26 e Figura 3.27 sono riportati degli esempi di grafici generati da questo tipo di prove rispettivamente per travetti e per lastrine.

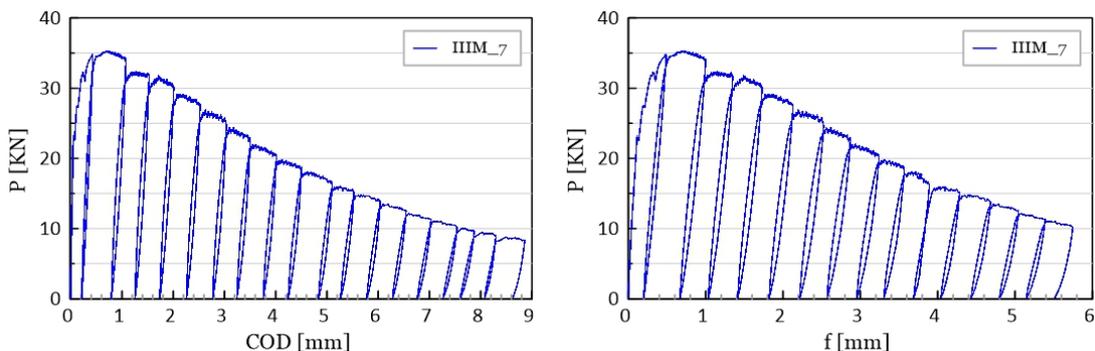


Figura 3.26: Curve P-COD (a sinistra) e P-Freccia (a destra) di un travetto sottoposto a prova di rottura con cicli di carico-scarico per mezzo di flessione su quattro punti

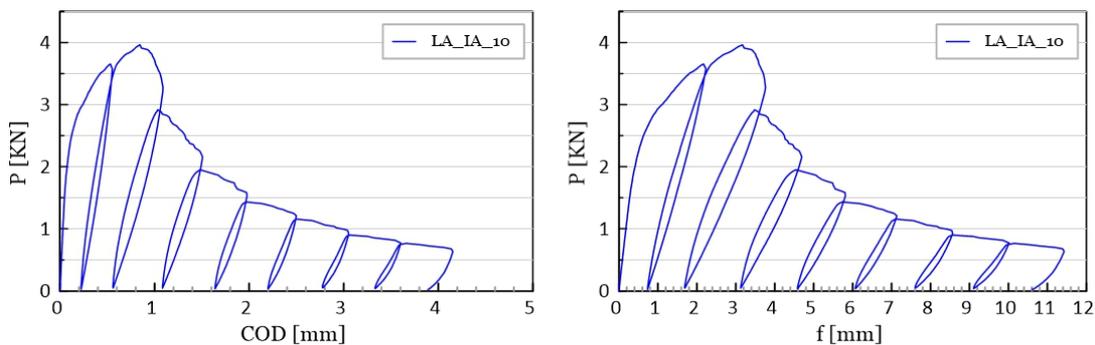


Figura 3.27: Curve P-COD (a sinistra) e P-Freccia (a destra) di una lastrina sottoposta a prova di rottura con cicli di carico-scarico per mezzo di flessione su quattro punti

### 3.3.3 Prova DEWS (Double Edge Wedge Splitting)

Come già detto precedentemente i campioni per la prova DEWS, detta anche prova di trazione indiretta, sono stati ricavati dagli estremi delle lastrine portate a rottura con la prova a flessione. Da ognuna di queste lastrine sono stati ricavati due provini e si è fatto in modo che uno avesse gli intagli passanti per un asse perpendicolare alla disposizione delle fibre (tipo A/O), mentre l'altro parallelo (tipo B/P), vedi Figura 3.28. Di conseguenza ci si aspetta una resistenza maggiore per il tipo A/O in quanto le fibre risultano parallele alla direzione dello sforzo di trazione.



Figura 3.28: Orientamento delle fibre nei provini per prove DEWS

Anche questa prova è stata condotta utilizzando la pressa elettromeccanica presentata precedentemente. Durante tale prova è stata misurata l'apertura di fessura sia da un lato sia

dall'altro dell'elemento testato. Come fatto per la prova a flessione, per prima cosa vediamo qui di seguito come sono stati posizionati gli strumenti e poi i passaggi svolti per condurre le prove.

## ***Posizionamento degli strumenti***

In questo caso, la pressa è stata allestita con due basamenti, uno collegato al piatto inferiore e l'altro al piatto superiore, sui quali c'erano delle scanalature in grado di accogliere dei cilindretti d'acciaio. I cilindretti sono stati posti all'interno degli intagli alle cui pareti si sono incollate delle piastrine rigide di metallo. Per la misura dell'apertura di fessura sono stati impiegati tre LVDT, uno sulla faccia dell'elemento corrispondente al pelo libero del getto, e gli altri due sulla faccia opposta. Con tale scelta è stato possibile misurare l'apertura di fessura in sommità e alla base del provino e cogliere l'eventuale rotazione del provino attorno all'asse di carico. Tutti gli LVDT sono stati sostenuti dai supporti incollati al provino. Gli elementi di supporto e quelli di contrasto sono stati incollati ad una distanza reciproca di 50 mm come rappresentato in Figura 3.29.

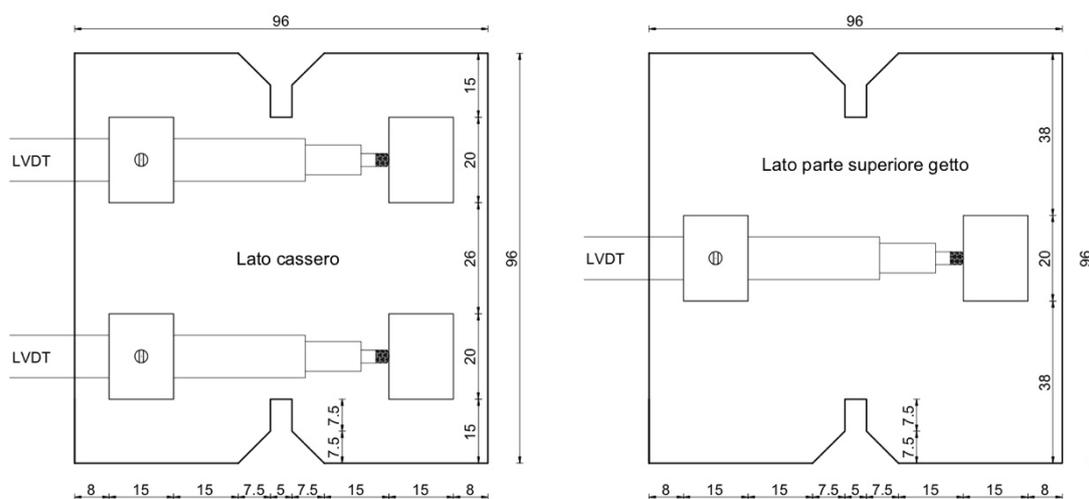


Figura 3.29: Dimensione campione sottoposto a prova DEWS e posizionamento degli strumenti di misura

Anche in questo caso sui provini sono stati segnati i punti dove incollare gli elementi per l'utilizzo degli strumenti di lettura.

## ***Esecuzione della prova***

I passaggi da svolgere per l'esecuzione della prova sono stati essenzialmente gli stessi visti per la prova a flessione (paragrafo 3.3.2). In questo caso sono stati misurati lo spessore del provino, come media di quattro misure prese in punti diversi, e la distanza tra gli intagli, come media tra le misure prese su una faccia e sull'altra (vedi tabelle nel paragrafo 3.2.4).

Al momento della collocazione del provino sulla macchina, negli intagli, dove sulle loro pareti erano state incollate delle piastrine rigide, sono stati posizionati dei cilindri d'acciaio (lubrificati con del grasso di grafite) che andavano ad interporsi con le basette attaccate alla pressa. Alzando lentamente la base della macchina si fermava il provino, con un carico intorno allo 0,05KN, nella posizione verticale che è possibile vedere in Figura 3.30.

Tutti gli LVDT al momento del loro posizionamento sono stati compressi in quanto durante la prova subivano un allungamento. Per tali prove non si è ritenuto necessario l'uso di prolunghie per il contatto dei trasduttori di spostamento.

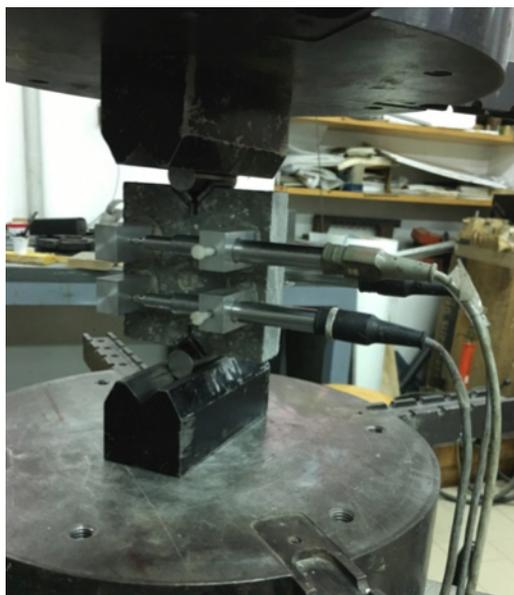


Figura 3.30: Prova di trazione indiretta (DEWS)

Anche questo tipo di prova è stato svolto in controllo di spostamento. Prima del raggiungimento del picco, la velocità di spostamento della base mobile è stata impostata a 0.5  $\mu\text{m/s}$ . Dopodiché, tale velocità è stata raddoppiata. Le prove sono state interrotte quando gli LVDT arrivavano a fine corsa o comunque il carico diveniva basso rispetto a quello di picco.

I dati registrati dal computer sono gli stessi visti per la prova a flessione con la differenza che in questo caso le letture degli LVDT erano tre. Da questi si sono ottenute le curve Carico-Apertura di fessura. In Figura 3.31 e Figura 3.32 sono proposti degli esempi di grafici di campioni sottoposti a prova di trazione indiretta rispettivamente con comportamento incrudente e degradante.

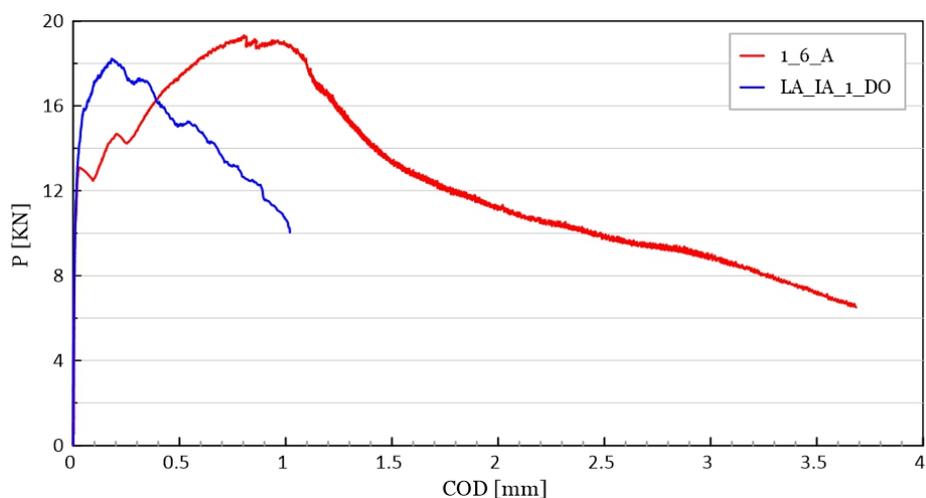


Figura 3.31: Curve P-COD risultanti da prove DEWS su campioni con comportamento incrudente

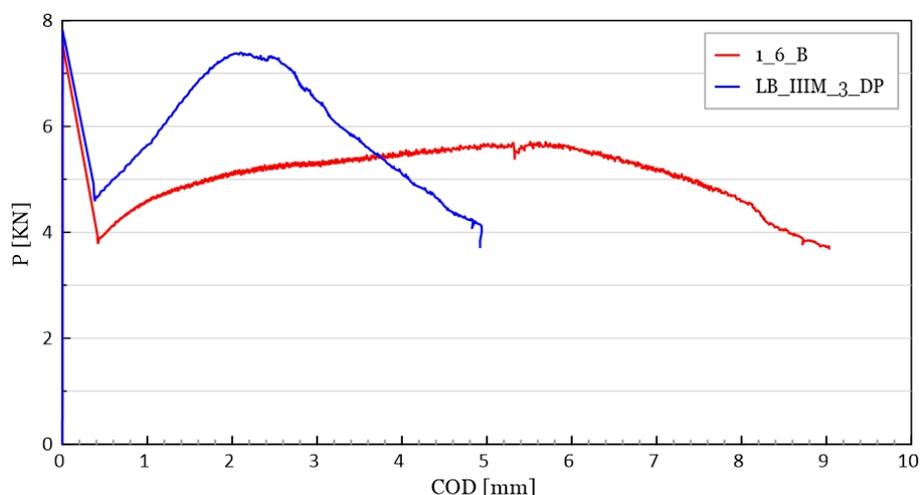


Figura 3.32: Curve P-COD risultanti da prove DEWS su campioni con comportamento incrudente

### 3.3.4 Prova di compressione

La prova per la determinazione della resistenza a compressione dei campioni di calcestruzzo è forse la più conosciuta tra le prove di caratterizzazione meccanica di un calcestruzzo. Essa consiste nel portare a rottura per schiacciamento un provino cubico o cilindrico. Nella presente campagna sperimentale, come già anticipato, i campioni di forma cubica sono stati tagliati dagli estremi dei travetti sui quali precedentemente erano state condotte prove distruttive a flessione su quattro punti. Tali cubetti hanno dimensione di circa 10 cm.

Suddetta prova è stata effettuata con la pressa idraulica Controls AUTOMAX 5, anch'essa situata nel Laboratorio Prove Materiali Strutture e Costruzioni del Politecnico di Milano. Il

funzionamento di tale macchina è basato su un meccanismo idraulico che garantisce una capacità di carico pari a 1500 KN.

A differenza delle prove viste precedentemente, la prova di compressione è stata realizzata in controllo di carico.



Figura 3.33: Pressa Controls AUTOMAX 5 del Laboratorio Prove Materiali Strutture e Costruzioni del Politecnico di Milano.

Prima di essere testato, ogni cubo è stato misurato (vedi tabelle nel paragrafo 3.2.5) e pesato (Tabella 3.25, Tabella 3.26 e Tabella 3.27 rispettivamente per MIX 0, MIX 1 e MIX 2).

Provino	Massa [Kg]
1_DB_CC_1_SX	2.413
1_DB_CC_1_DX	2.417
2_DB_CC_2_SX	2.396
2_DB_CC_2_DX	2.435
1_DB_CC_3_SX	2.416
1_DB_CC_3_DX	2.514
2_DB_CC_4_SX	2.435
2_DB_CC_4_DX	2.332

Tabella 3.25: Massa dei cubi del MIX 0

Provino	Massa [Kg]
IA_17_1	2.397
IA_17_2	2.430
IA_20_1	2.567
IA_20_2	2.565
IA_21_1	2.527
IA_21_2	2.513
IA_22_1	2.534
IA_22_2	2.537

Tabella 3.26: Massa dei cubi del MIX 1

Provino	Massa [Kg]
IIM_2_1_1	2.403
IIM_2_1_2	2.400
IIM_3_1_1	2.350
IIM_3_1_2	2.425
IIM_5_1_1	2.424
IIM_5_1_2	2.449
IIM_7_1_1	2.464
IIM_7_1_2	2.444

Tabella 3.27: Massa dei cubi del MIX 2

Successivamente, il provino è stato inserito nella pressa, centrato rispetto alle piastre di carico, evitando il contatto di tali piastre con la faccia sul quale era stato effettuato il taglio e con quella di sommità del getto. Tale scelta è derivata dal fatto che queste superfici potevano non essere perfettamente piane come invece accadeva per le altre facce, essendo queste a contatto con il cassero durante il getto. Posizionato il cubo, si è dato avvio alla prova impostando una velocità di carico pari a 10 KN/s. Infine, raggiunto il carico di rottura la prova si è arrestata da sola e si è passati all'annotazione di tale carico.

### 3.3.5 Prefessurazione e rifessurazione

Le fessurazioni necessarie per lo studio della capacità auto-riparante e del recupero meccanico delle diverse miscele di HPFRCC sono state condotte attraverso prove a flessione su quattro punti. Diversamente da quanto delineato nel paragrafo 3.3.2, in questo caso l'obiettivo non è stato quello di portare i provini a rottura ma quello di imporre una deformazione residua. Sia per la prefessurazione sia per le fessurazioni a seguire, la deformazione cercata ( $\varepsilon_r$ ) è stata pari a 1 ‰, calcolata per la zona centrale del provino a momento flettente costante.

Come già messo in evidenza, i trasduttori utilizzati per la lettura del COD risultavano posizionati ad una quota inferiore rispetto al lato teso del provino. Per tale motivo,

innanzitutto, è stato necessario il calcolo dell'allungamento che dovevano registrare gli LVDT alla fine della prova in modo tale da garantire la deformazione residua desiderata. Per tale computo si è assunta l'ipotesi di sezione che ruota restando piana; perciò la lettura residua degli LVDT orizzontali ( $COD_{LVDT,r}$ ) si è ottenuta con l'Equazione 3.1.

$$COD_{LVDT,r} = \frac{h + c - x}{h - x} COD_{int,r}$$

Equazione 3.1: COD residuo all'altezza degli LVDT

$$COD_{int,r} = \varepsilon_r l_0 = 0.15 \text{ mm}$$

Equazione 3.2: COD residuo all'intradosso del provino

Dove:

- $COD_{int,r}$ , apertura di fessura residuo nel lato inferiore del provino;
- $h$ , altezza del provino (100 mm per i travetti e 25 mm per le lastrine);
- $l_0 = 150 \text{ mm}$ , distanza tra le basette degli LVDT;
- $c = 10 \text{ mm}$ , distanza dell'asse del trasduttore dall'intradosso del provino;
- $x$ , asse neutro misurato dall'estradosso del provino, assunto pari ad  $h/2$  (50 mm per i travetti e 12.5 mm per le lastrine).

Sostituendo i valori indicati in Equazione 3.1, si è ricavato:

- Per i travetti:  $COD_{LVDT,r} = 0.18 \text{ mm}$ ;
- Per le lastrine:  $COD_{LVDT,r} = 0.27 \text{ mm}$ .

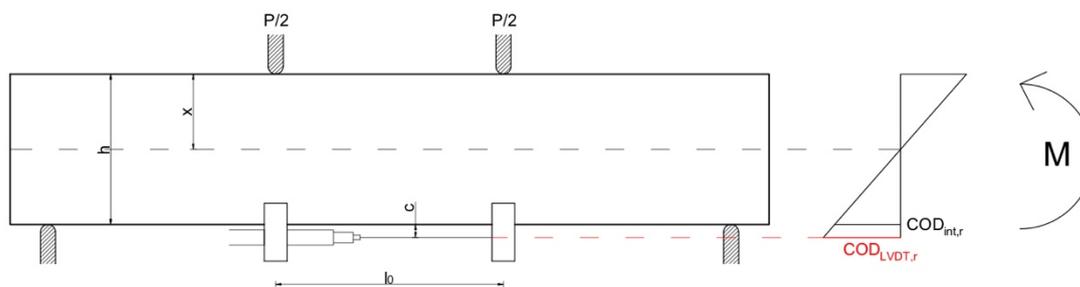


Figura 3.34: Termini utilizzati per il calcolo del  $COD_{LVDT,r}$

Per capire quando scaricare, il programma di acquisizione dati, dopo aver inserito un valore di cedevolezza all'inizio della prova, permetteva di leggere in ogni istante il valore di  $COD_{LVDT,r}$  atteso se si fosse scaricato in quel momento. Questo è stato possibile in quanto il programma implementava istantaneamente la seguente relazione:

$$COD_{LVDT,r \text{ teorico}} = COD_{LVDT,ist} - P_i \cdot C$$

Equazione 3.3: COD residuo atteso una volta scaricato il provino

Dove:

- $COD_{LVDT,ist}$ , media dei COD registrati dagli LVDT ad ogni istante;
- $P_i$ , carico sul campione associato al  $COD_{LVDT,ist}$ ;
- $C = \frac{1}{K}$ , cedevolezza calcolata come l'inverso della rigidezza di scarico secante (K). Tale rigidezza è stata determinata dai rami di scarico delle prove a rottura cicliche in corrispondenza del COD residuo da ottenere (1 ‰ per la prefessurazione, 2 ‰ per la prima rifessurazione e così via).

Di seguito si riportano due grafici Carico-COD rappresentanti le prove di prefessurazione e rifessurazione eseguite su un travetto e su una lastrina.

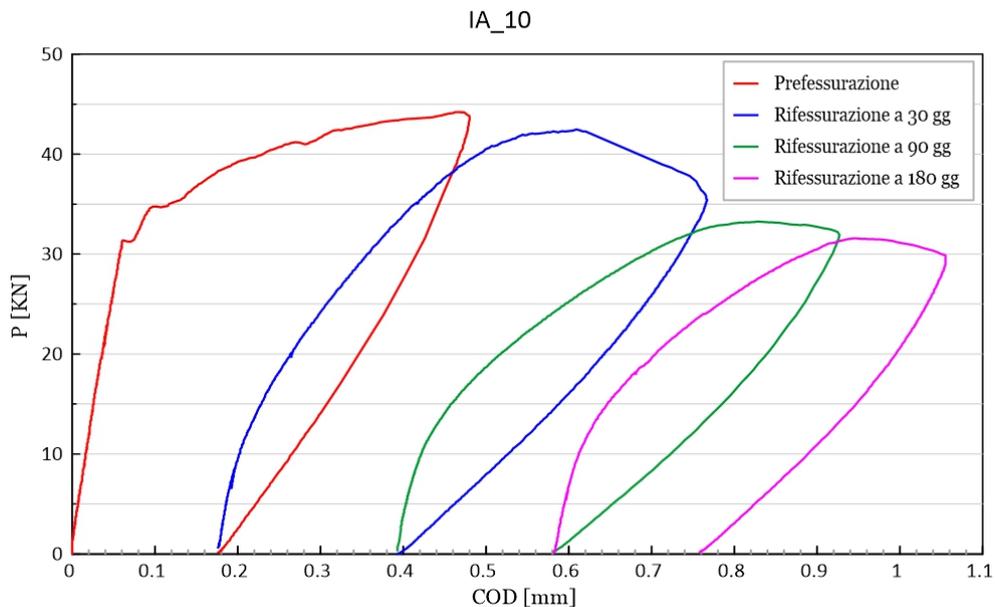


Figura 3.35: Curve di prefessurazione e rifessurazione di un travetto

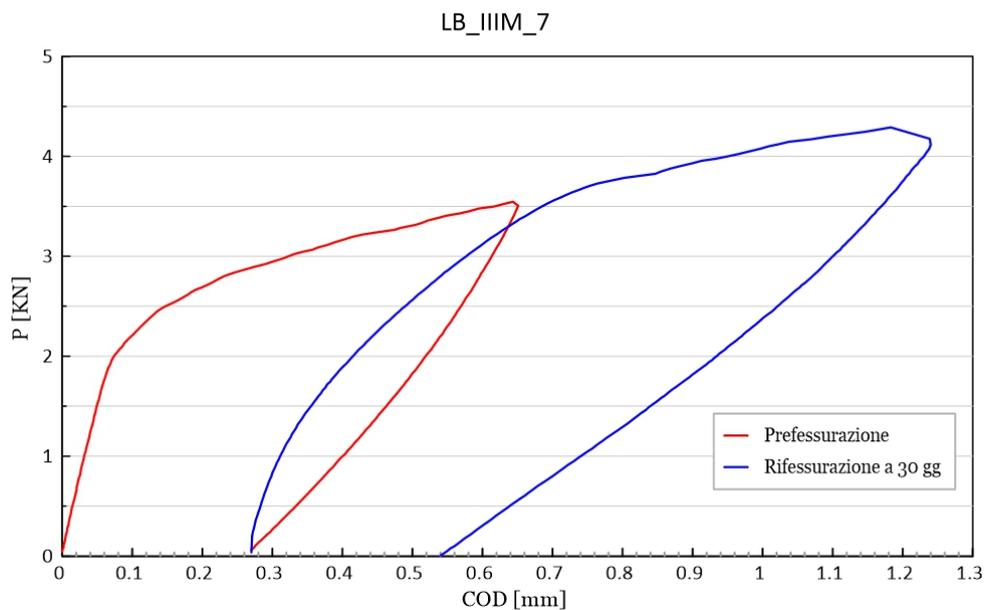


Figura 3.36: Curve di prefessurazione e rifessurazione di una lastrina



# CAPITOLO 4

## ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

In questo capitolo verranno mostrate le analisi effettuate sui risultati sperimentali, ottenuti dalle prove illustrate nel capitolo precedente, per la determinazione delle proprietà meccaniche e del recupero meccanico dei tre HPFRCC oggetto di studio.

In particolare, a partire dai risultati delle prove a flessione su quattro punti e delle prove DEWS è stato definito il legame costitutivo a trazione mentre dalle prove di compressione sui cubi si è determinata la resistenza caratteristica a compressione. Diversamente, dalle prove di prefessurazione e rifessurazione è stato esaminato il recupero meccanico definendo degli indici che hanno facilitato l'interpretazione dei dati.

### 4.1 Analisi prove a flessione su quattro punti

Come osservato al paragrafo 3.3.2, durante le prove viene registrato il carico agente sul provino. Dato che il carico dipende dalle caratteristiche geometriche del campione per non risentire di questa dipendenza si introduce uno sforzo nominale ( $\sigma_n$ ) determinato sulla base del principio di de Saint Venant e sull'ipotesi che la sezione ruota restando piana (formula di Navier).

$$\sigma_n = \frac{M}{I} y$$

Equazione 4.1: Formula di Navier

Dove:

- M, momento agente nella sezione;
- I, momento d'inerzia della sezione. Per la sezione rettangolare si ha

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

dove b e h rappresentano la base e l'altezza rispettivamente;

- y, distanza, rispetto al baricentro, del punto della sezione nel quale calcolare lo sforzo. Nel nostro caso si calcola lo sforzo della fibra più sollecitata, perciò

$$y = \frac{h}{2}$$

Per il calcolo del momento agente sulla sezione bisogna considerare lo schema statico dell'elemento sottoposto alla prova. Il modello consta di una trave semplicemente appoggiata, sulla quale agiscono due carichi concentrati ciascuno di intensità pari alla metà del carico applicato dalla pressa (P). Imponendo l'equilibrio statico si ottiene il diagramma dei momenti flettenti raffigurato in Figura 4.1. Il momento massimo, costante per tutto il tratto delimitato dalle lame di carico, è dato da:

$$M_{max} = \frac{P}{2} \frac{l}{3} = \frac{Pl}{6}$$

Equazione 4.2: Momento massimo agente su un provino sottoposto a prova di flessione su quattro punti

Questo è il momento flettente che è stato preso in considerazione.

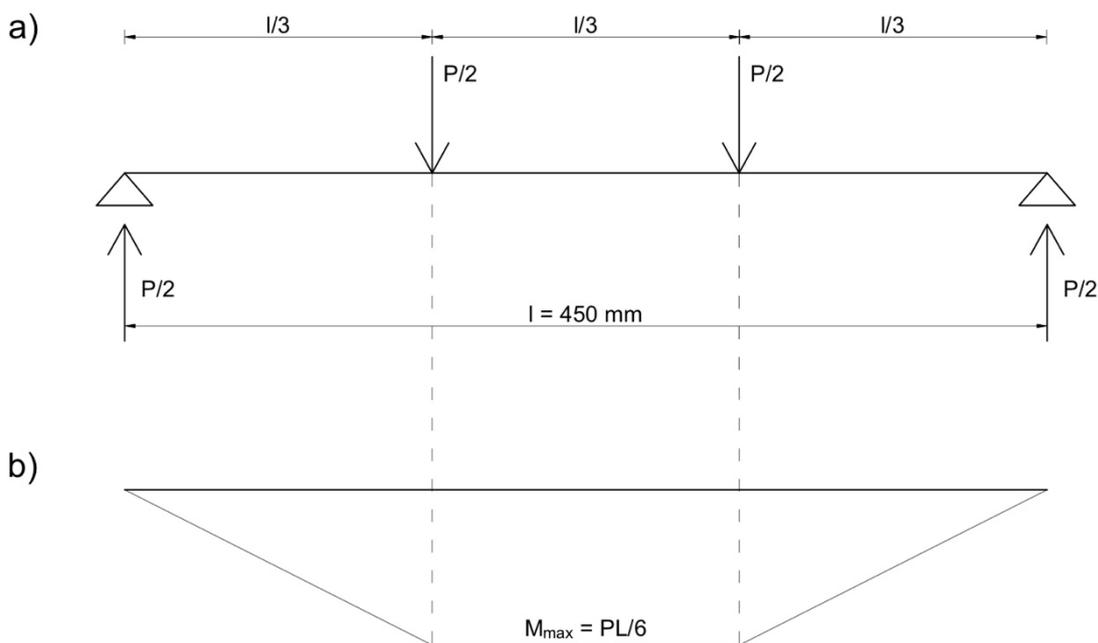


Figura 4.1: Prova a flessione su quattro punti a) Schema statico; b) Diagramma dei momenti flettenti agenti sul provino

Sostituendo nell'Equazione 4.1 i termini esplicitati, lo sforzo nominale assume la seguente forma:

$$\sigma_n = \frac{Pl}{bh^2}$$

Equazione 4.3: Sforzo nominale per provini soggetti a prova di flessione su quattro punti

È importante sottolineare come l'assunzione delle ipotesi sopra riportate conduce verso il calcolo di tensioni che non rappresentano quelle agenti realmente sul provino. Tuttavia, per le nostre analisi ci si è sempre riferiti a curve in funzione dello sforzo nominale in modo tale da avere risultati il più possibile indipendenti dalle dimensioni dei provini.

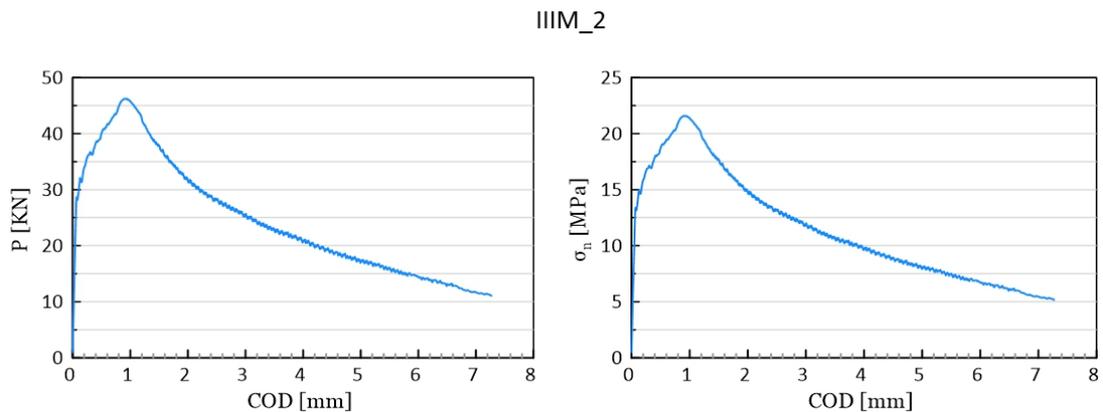


Figura 4.2: Curva di rottura monotona del travetto IIIM\_2 in funzione del carico (grafico a sinistra) e dello sforzo nominale (grafico a destra)

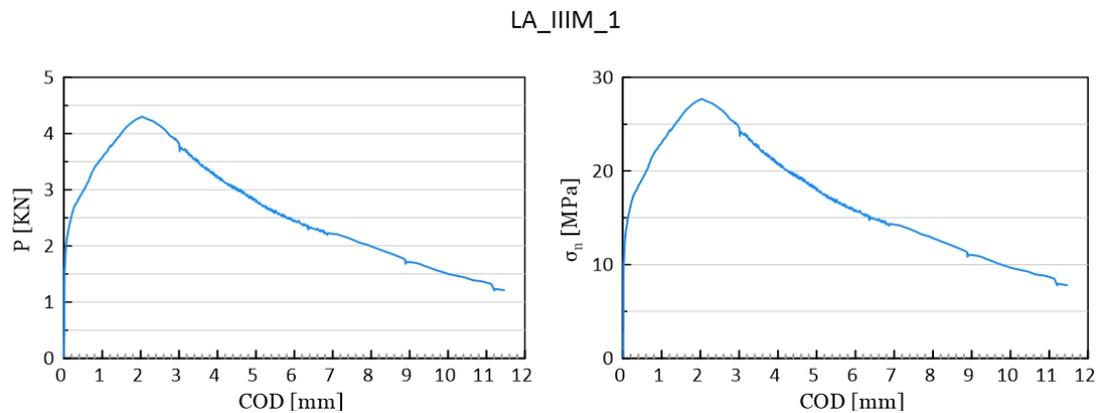


Figura 4.3 Curva di rottura monotona della lastrina IIIM\_2 in funzione del carico (grafico a sinistra) e dello sforzo nominale (grafico a destra)

### 4.1.1 Prove di rottura monotona

Le prove di rottura monotona permettono di caratterizzare il materiale fino a rottura. Infatti, sono state le prime prove ad essere state eseguite poiché si sono rilevate essenziali per capire come proseguire con l'esecuzione degli altri tipi di prove. In APPENDICE A sono

riportate singolarmente tutte le curve sforzo nominale-apertura di fessura dei provini sottoposti a tale prova.

Nelle seguenti figure (Figura 4.4 e Figura 4.5) si riportano i grafici delle curve di riferimento ( $\sigma_n$ -COD) di ciascuna miscela, sia per travetti sia per lastrine. Ognuna di esse è stata ricavata dalla media delle curve di rottura dei campioni provati dopo 90 giorni di maturazione (comprese quelle di carico-scarico) non considerando, però, quelle con valori o andamenti totalmente differenti dalle altre e quindi ritenute non significative.

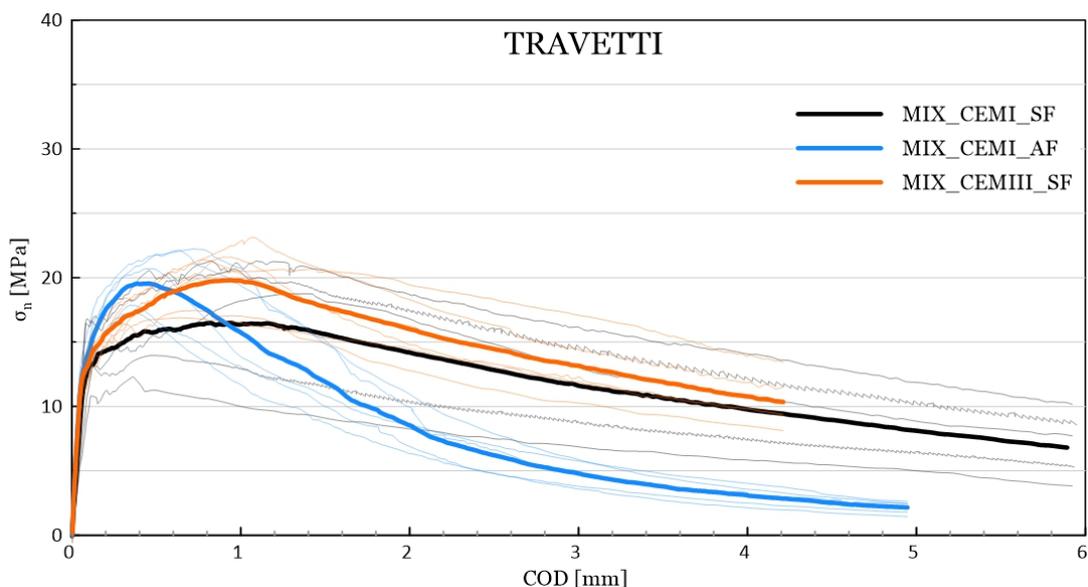


Figura 4.4: Curve di rottura monotona dei travetti sottoposti a prova di flessione su quattro punti. Le linee più spesse rappresentano le curve di riferimento

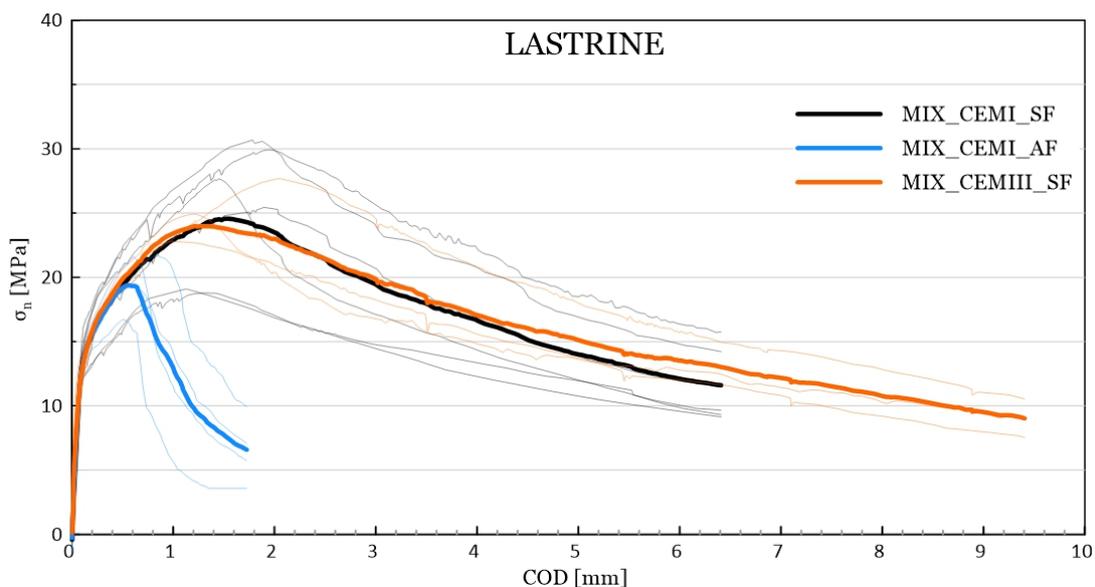


Figura 4.5: Curve di rottura monotona delle lastrine sottoposte a prova di flessione su quattro punti. Le linee più spesse rappresentano le curve di riferimento

Le curve di riferimento sono state considerate come curve di rottura rappresentative il materiale vergine e quindi utilizzate come riferimento per lo studio dei provini esposti ad ambienti diversi e/o sottoposti a fessurazione.

Come è possibile osservare in Figura 4.4 e Figura 4.5 tutte e tre le miscele mostrano un comportamento a flessione di tipo incrudente. Effettivamente, all'aumentare dell'apertura di fessura, le curve di rottura presentano un ramo a sforzo crescente fino al picco senza che si verificano brusche riduzioni di sforzi. Questo comportamento è dovuto alla presenza delle fibre all'interno delle matrici cementizie che conducono ad una multi-fessurazione anziché alla formazione di un'unica fessura. Dopo il picco per la miscela con fibre metalliche amorfe (MIX 1) si osserva una riduzione di sforzo più repentina rispetto a quelle con fibre metalliche.

Per quel che concerne le curve di riferimento in Tabella 4.1 vengono riportati i seguenti parametri fondamentali:

- $COD_{1^{\circ}fess}$ , apertura di fessura relativa alla prima fessurazione;
- $\sigma_{1^{\circ}fess}$ , sforzo nominale di prima fessurazione;
- $COD_p$ , apertura di fessura relativa al picco;
- $\sigma_p$ , sforzo nominale di picco.

Tipo provino	$COD_{1^{\circ}fess}$ [mm]	$\sigma_{1^{\circ}fess}$ [MPa]	$COD_p$ [mm]	$\sigma_p$ [MPa]
Lastrine MIX_CEMI_SF	0.082	12.03	1.532	24.56
Travetti MIX_CEMI_SF	0.088	12.67	0.936	16.49
Lastrine MIX_CEMI_AF	0.074	11.26	0.567	19.38
Travetti MIX_CEMI_AF	0.055	11.97	0.454	19.55
Lastrine MIX_CEMIII_SF	0.086	12.16	1.221	24.00
Travetti MIX_CEMIII_SF	0.062	12.30	0.942	19.80

Tabella 4.1: Parametri fondamentali curve di rottura monotona

Per concludere, vengono mostrati e commentati (in ordine dal MIX 0 al MIX 2) i grafici di rottura delle lastrine sottoposte alla prova di flessione ad un anno dal getto. Tali lastrine, come già esposto al paragrafo 3.2.2, sono 6 per ciascuna miscela, 3 maturate sempre in camera umida mentre le altre 3 immerse in acqua geotermica dopo i primi sei mesi. Le prime sono state plottate in marrone mentre le seconde in azzurro. La curva rossa, invece, rappresenta la curva di riferimento per le lastrine in esame.

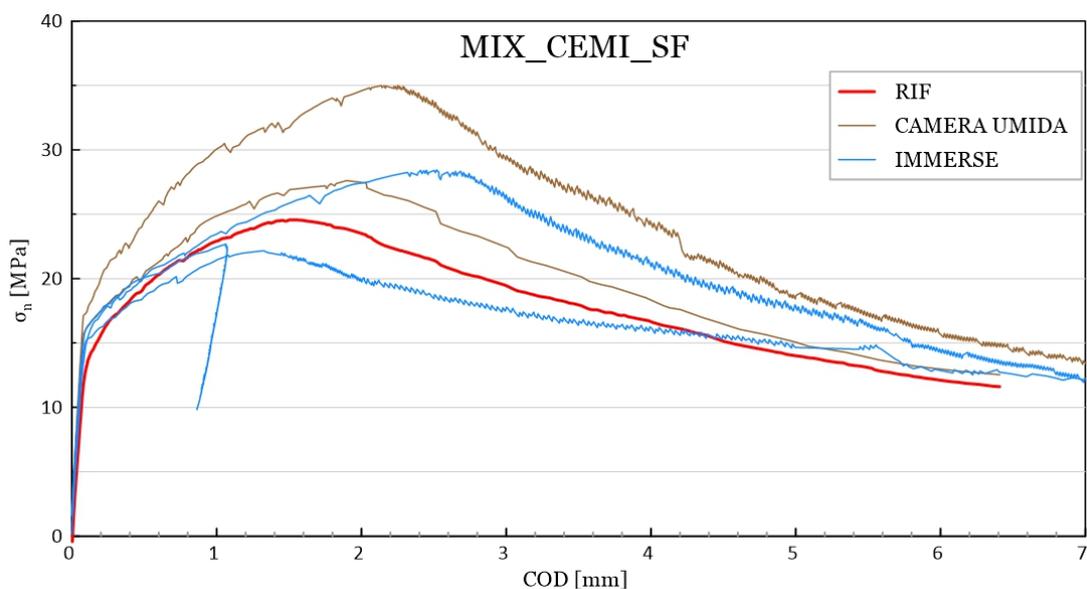


Figura 4.6: Curve di rottura monotona delle lastre del MIX\_CEMI\_SF sottoposte a prova di flessione su quattro punti ad un anno dal getto (in marrone maturate in camera umida, in azzurro immerse in acqua geotermica dopo sei mesi)

Si può osservare come per la miscela di riferimento la resistenza mostrata dalle lastre immerse in acqua geotermica sia comparabile con quella del materiale testato dopo 90 giorni dal getto (curva in rosso), perciò la continua idratazione sembrerebbe contrastare un eventuale degrado. Diversamente, per quanto riguarda le lastre esposte in camera umida si è rilevato un miglioramento.

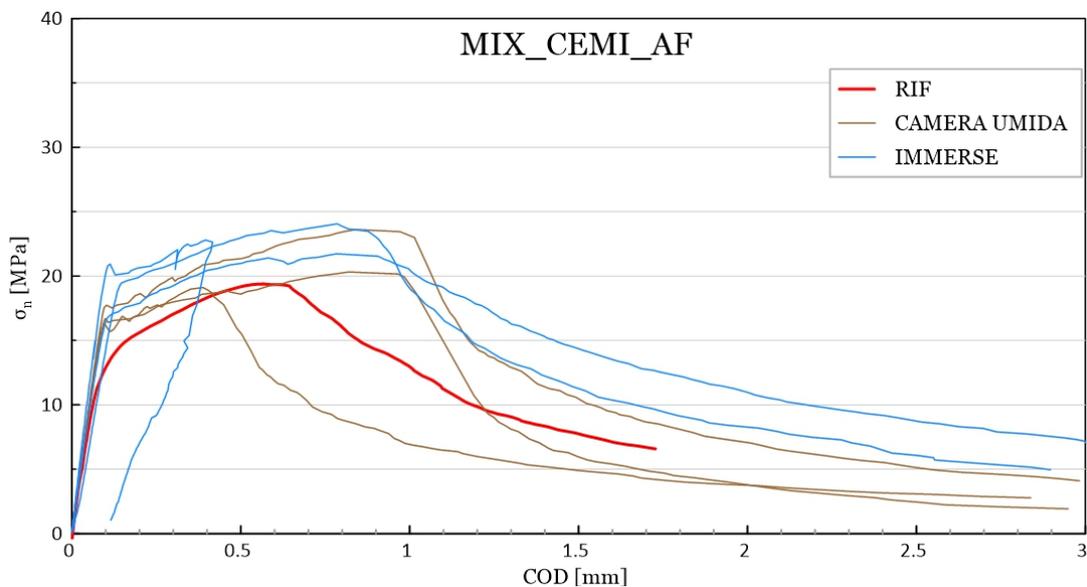


Figura 4.7: Curve di rottura monotona delle lastre del MIX\_CEMI\_AF sottoposte a prova di flessione su quattro punti ad un anno dal getto (in marrone maturate in camera umida, in azzurro immerse in acqua geotermica dopo sei mesi)

Contrariamente a quanto visto per la miscela di riferimento, per il mix con fibre metalliche amorfe non si sono verificati comportamenti differenti tra le lastre esposte in camera umida e quelle immerse in acqua geotermica. Inoltre, in entrambi i casi si è potuto apprezzare un miglioramento di resistenza rispetto al materiale testato 90 giorni dopo il getto (curva in rosso).

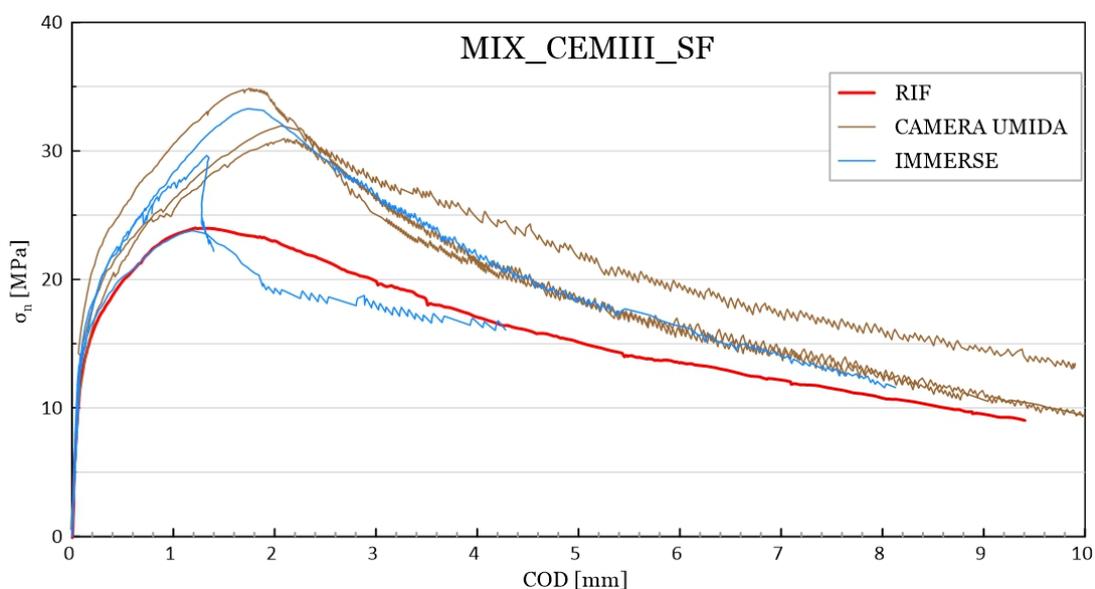


Figura 4.8: Curve di rottura monotona delle lastre del MIX\_CEMIII\_SF sottoposte a prova di flessione su quattro punti ad un anno dal getto (in marrone maturate in camera umida, in azzurro immerse in acqua geotermica dopo sei mesi)

In ultimo, nel caso del MIX\_CEMIII\_SF, si può affermare che l'ambiente d'esposizione non ha influenzato la resistenza degli elementi testati. Tuttavia, a differenza degli altri due mix, si è potuto apprezzare un netto miglioramento della resistenza meccanica a flessione rispetto alla curva di riferimento, rappresentante il materiale testato dopo 90 giorni di maturazione in camera umida (curva in rosso). Questo comportamento è dovuto alla latente idratazione della loppa d'alto forno, presente in maggiore quantità in questa miscela.

#### 4.1.2 Prove di rottura con cicli di carico-scarico

Successivamente alle prove di rottura monotona sono state eseguite le prove di rottura con cicli di carico-scarico. L'obiettivo di tali prove è stato quello di studiare la variazione delle rigidezze di carico e scarico all'aumentare dell'apertura di fessura imposta ai provini. Queste variazioni sono state analizzate attraverso degli indici introdotti di seguito. Inoltre, come già riferito al paragrafo 3.3.5, tali prove sono state utilizzate per ricavare le rigidezze di scarico necessarie per calibrare il percorso di carico e scarico nelle prove di pre- e rifessurazione finalizzate alla valutazione della capacità di autoriparazione.

Per quanto concerne la determinazione delle rigidzze di carico si è utilizzata la funzione “*pendenza*” del noto programma Excel che definisce una retta di regressione lineare dei punti inseriti e ne restituisce la pendenza. Tale inclinazione, per ogni ramo di carico, è stata calcolata a partire dallo sforzo di inizio carico fino al 25% del carico di picco. In Figura 4.9 viene mostrato un esempio grafico della procedura mentre in Tabella 4.2 vengono raccolti i corrispondenti valori significativi utilizzando la seguente nomenclatura:

- $COD_c$ , apertura di fessura al momento del carico;
- $\sigma_c$ , sforzo nominale relativo al punto di carico;
- $\sigma_{25\%}$ , 25% dello sforzo nominale di picco;
- $K_c$ , rigidzza di carico.

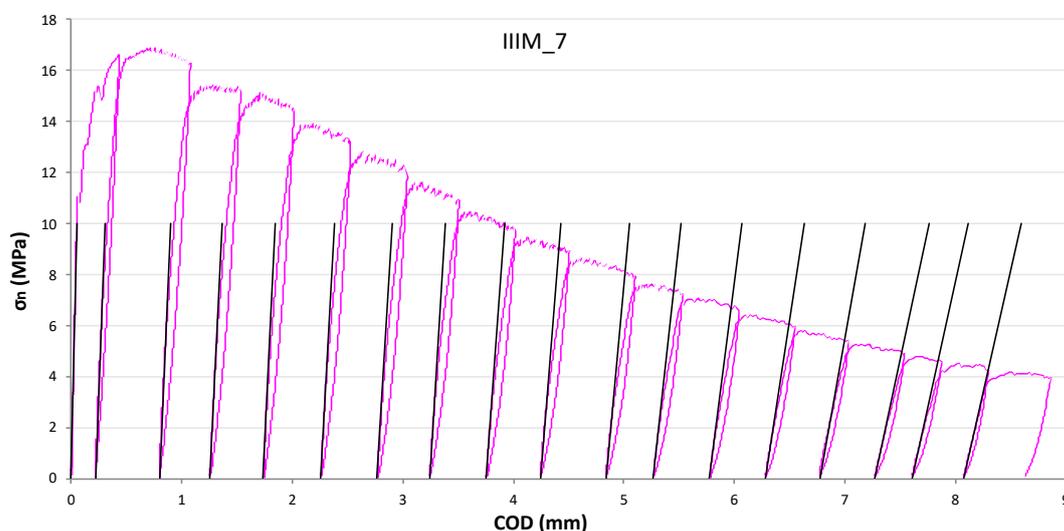


Figura 4.9: Rigidzze di carico

Step	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{25\%}$ [MPa]	K <sub>c</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.02	4.20	220.2
2	0.215	0.06	4.20	116.9
3	0.794	0.07	3.90	100.5
4	1.256	0.08	3.80	94.4
5	1.739	0.05	3.50	91.2
6	2.260	0.07	3.20	85.0
7	2.772	0.07	2.90	76.0
8	3.244	0.08	2.60	68.8
9	3.758	0.08	2.40	60.7
10	4.245	0.08	2.10	54.5
11	4.838	0.08	1.90	45.7
12	5.269	0.08	1.80	40.3
13	5.780	0.07	1.60	34.1
14	6.284	0.07	1.40	28.3
15	6.770	0.08	1.30	24.2
16	7.273	0.07	1.20	20.4
17	7.611	0.07	1.10	19.5
18	8.078	0.07	1.00	19.3

Tabella 4.2: Rigidezze di carico campione IIM\_7

Diversamente, come rigidezza di scarico si è considerata la pendenza della secante passante per i punti di inizio e fine scarico. In Figura 4.10 viene raffigurato un esempio mentre nella Tabella 4.3 sono riportati i seguenti valori significativi:

- COD<sub>s</sub>, apertura di fessura al momento dello scarico;
- $\sigma_s$ , sforzo nominale relativo al punto di scarico;
- COD<sub>b</sub>, apertura di fessura in corrispondenza del punto di fine scarico;
- $\sigma_b$ , sforzo nominale relativo al punto di fine scarico;
- K<sub>s</sub>, rigidezza di scarico.

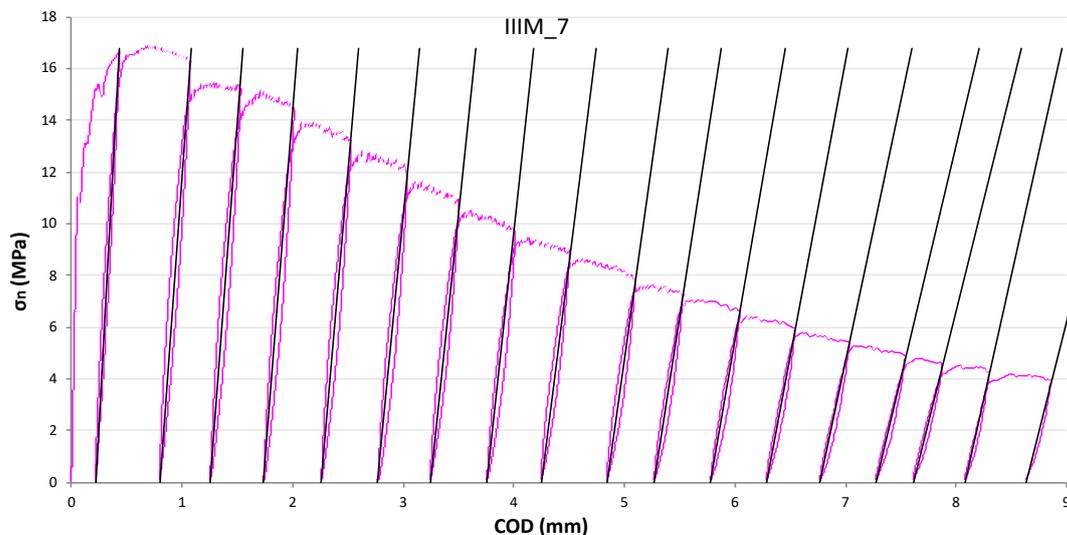


Figura 4.10: Rigidezze di scarico

Step	COD <sub>s</sub> [mm]	σ <sub>s</sub> [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	σ <sub>b</sub> [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.428	16.63	0.215	0.06	77.8
2	1.075	16.35	0.794	0.07	58.0
3	1.517	15.22	1.256	0.08	58.0
4	2.000	14.55	1.739	0.05	55.6
5	2.528	13.22	2.260	0.07	49.0
6	3.039	11.84	2.772	0.07	44.1
7	3.507	10.93	3.244	0.08	41.3
8	4.002	9.84	3.758	0.08	40.0
9	4.507	9.00	4.245	0.08	34.0
10	5.098	7.96	4.838	0.08	30.3
11	5.530	7.30	5.269	0.08	27.6
12	6.044	6.63	5.780	0.07	24.9
13	6.546	6.00	6.284	0.07	22.6
14	7.035	5.45	6.770	0.08	20.3
15	7.540	4.88	7.273	0.07	18.0
16	7.873	4.59	7.611	0.07	17.3
17	8.298	4.30	8.078	0.07	19.2
18	8.860	3.97	8.629	0.07	16.9

Tabella 4.3: Rigidezze di carico campione IIIM\_7

Successivamente, per ogni prova di rottura ciclica, è stata plottata la rigidezza di carico in funzione dell'apertura di fessura e, attraverso il comando "linea di tendenza" di Excel, è stata determinata un'equazione polinomiale che rappresentasse tale relazione.

Nella seguente figura si riporta l'equazione ricavata per la variazione della rigidezza del provino IIIM\_7, già considerato per gli esempi precedenti.

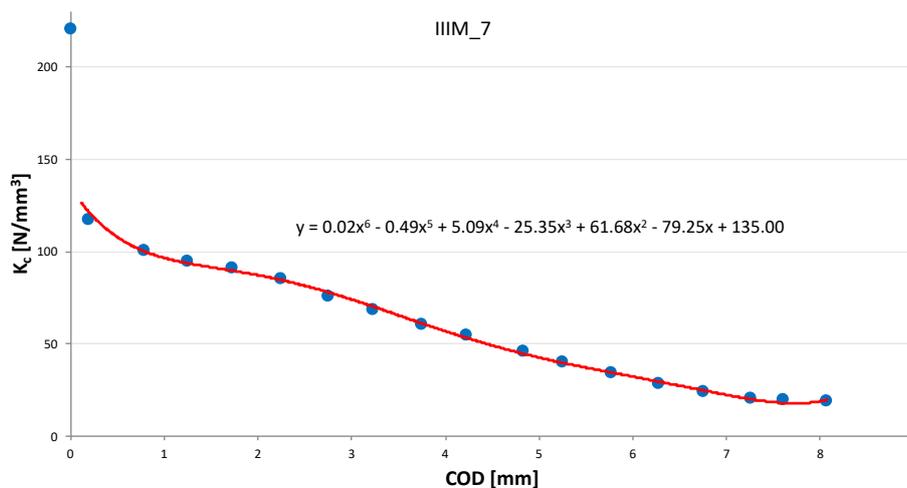


Figura 4.11: Equazione polinomiale di sesto grado che esprime la rigidezza di carico in funzione dell'apertura di fessura

In APPENDICE B sono raccolte tutte le curve delle prove di rottura effettuate con cicli di carico-scarico, le relative tabelle dei parametri fondamentali e le equazioni rappresentati la variazione della rigidezza in funzione dell'apertura di fessura.

Sulla base delle rigidezze ottenute secondo quanto descritto sopra si è valutata l'evoluzione della variabile di danno ( $D_i$ ), definita come:

$$D_i = 1 - \frac{K_{s,i}}{K_{c,0}}$$

Equazione 4.4: Variabile di danno

Dove:

- $K_{s,i}$ , rigidezza di scarico i-esimo;
- $K_{c,0}$ , rigidezza di primo carico.

Questo indice si avvicina all'unità man mano che il danno aumenta. All'interno della Tabella 4.4 e nella Figura 4.12 si riportano gli indici di danno delle prove di rottura cicliche svolte sui travetti mentre in Tabella 4.5 e Figura 4.13 quelle svolte sulle lastre.

Step	DB_MCCS_3	DB_MCCS_4	IA_20	IIM_7	IIM_14
1	0.622	0.553	0.714	0.647	0.736
2	0.753	0.597	0.828	0.737	0.787
3	0.785	0.620	0.880	0.737	0.796
4	0.799	0.641	0.917	0.748	0.804
5	0.780	0.631	0.940	0.777	0.807
6	0.776	0.651	0.957	0.800	0.808
7	0.778	0.694	0.969	0.812	0.819
8	0.784	0.714	0.975	0.818	0.824
9	0.796	0.718	0.981	0.845	0.849
10	0.810	0.759	0.983	0.862	0.862
11	0.831	0.776	0.986	0.874	0.871
12	0.845	0.792	-	0.887	0.882
13	0.853	0.794	-	0.897	0.894
14	0.872	0.853	-	0.908	0.906
15	0.885	0.865	-	0.918	0.914
16	-	-	-	0.922	0.924
17	-	-	-	0.913	0.933
18	-	-	-	0.923	-

Tabella 4.4: Indici di danno travetti

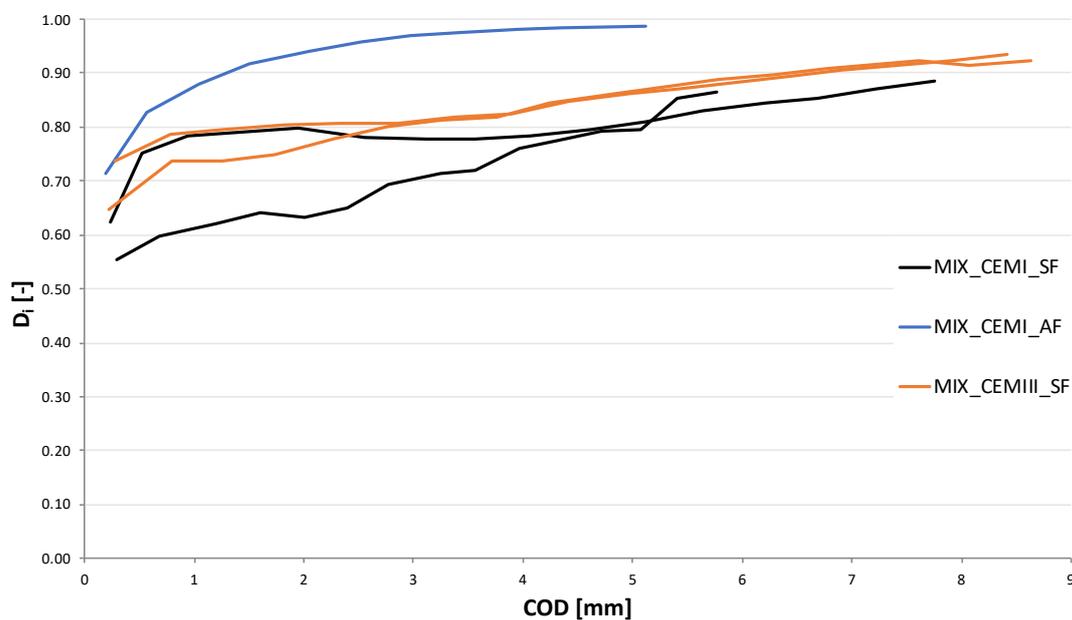


Figura 4.12: Curve di danno travetti

Step	DB_MCCS_3	DB_MCCS_4	IA_20	IIIM_7
1	0.547	0.591	0.654	0.460
2	0.695	0.707	0.820	0.637
3	0.781	0.749	0.849	0.694
4	0.807	0.778	0.863	0.734
5	0.807	0.786	0.884	0.730
6	0.812	0.781	0.897	0.734
7	0.810	0.774	0.920	0.760
8	0.808	0.766	0.921	0.770
9	0.811	0.756	-	0.780
10	0.802	0.750	-	0.786
11	0.804	0.743	-	0.792
12	0.803	0.743	-	0.798
13	0.809	-	-	0.794
14	0.811	-	-	0.800
15	0.816	-	-	0.806
16	0.818	-	-	0.809
17	0.827	-	-	0.831
18	0.833	-	-	0.847
19	0.838	-	-	0.848
20	0.845	-	-	0.864
21	0.848	-	-	0.849
22	0.854	-	-	-

Tabella 4.5: Indici di danno lastrine

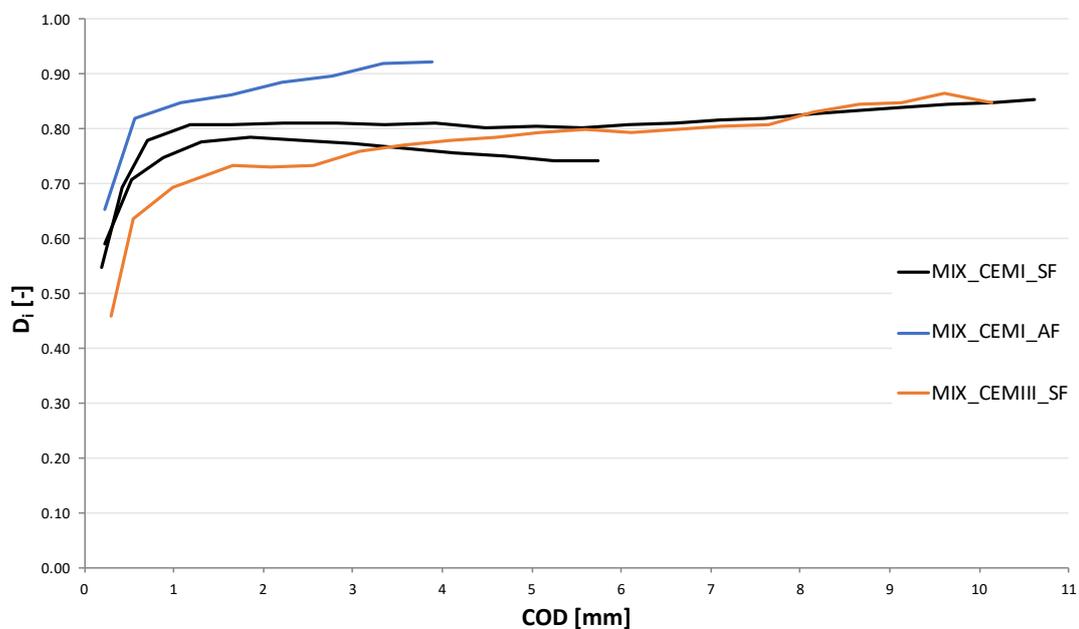


Figura 4.13: Curve di danno lastrine

Si può osservare come il danno subito dai compositi cementizi con fibre metalliche è pressoché lo stesso. Differentemente, il materiale con fibre amorfe presenta un danno superiore; questo è possibile riscontrarlo anche dalle curve con sforzo nominale - apertura di fessura (Figura 4.14) dove si può notare un rapido decadimento delle pendenze dei rami di carico e scarico. Inoltre, a parità di COD, sembrerebbe che le lastre subiscano un danno minore rispetto ai travetti. Tale caratteristica può essere giustificata dal fatto che le lastre risultano essere più deformabili e allo stesso tempo hanno una distribuzione delle fibre più uniforme.

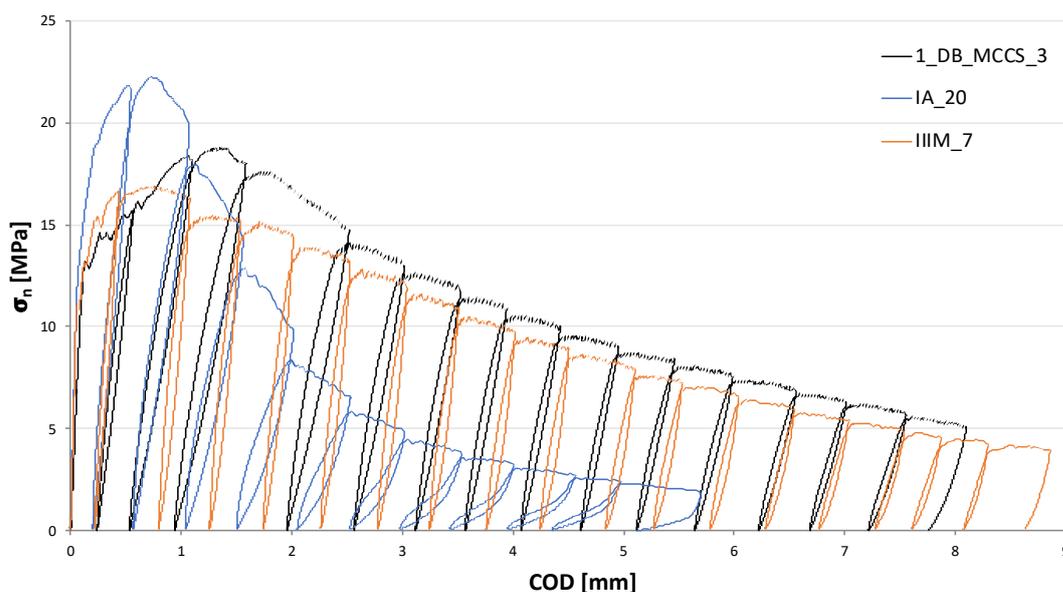


Figura 4.14: Confronto curve di rottura ciclica

In conclusione, si è ritenuto opportuno procedere con le analisi della riduzione della rigidità di carico passando da un ciclo all'altro. Per far questo si è definito il seguente indice:

$$1 - \frac{K_{c,i}}{K_{c,i-1}}$$

Dove:

- $K_{c,i}$ , rigidità di carico del ciclo  $i$ -esimo;
- $K_{c,i-1}$ , rigidità di carico del ciclo precedente al ciclo  $i$ -esimo.

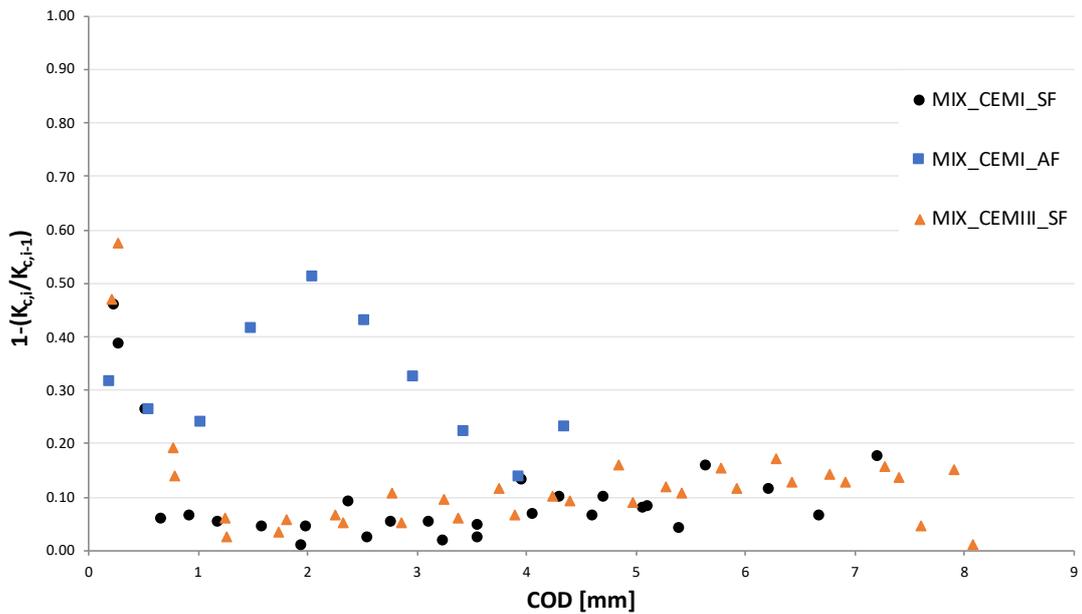


Figura 4.15: Variazione rigidezza di carico da un ciclo all'altro per i travetti

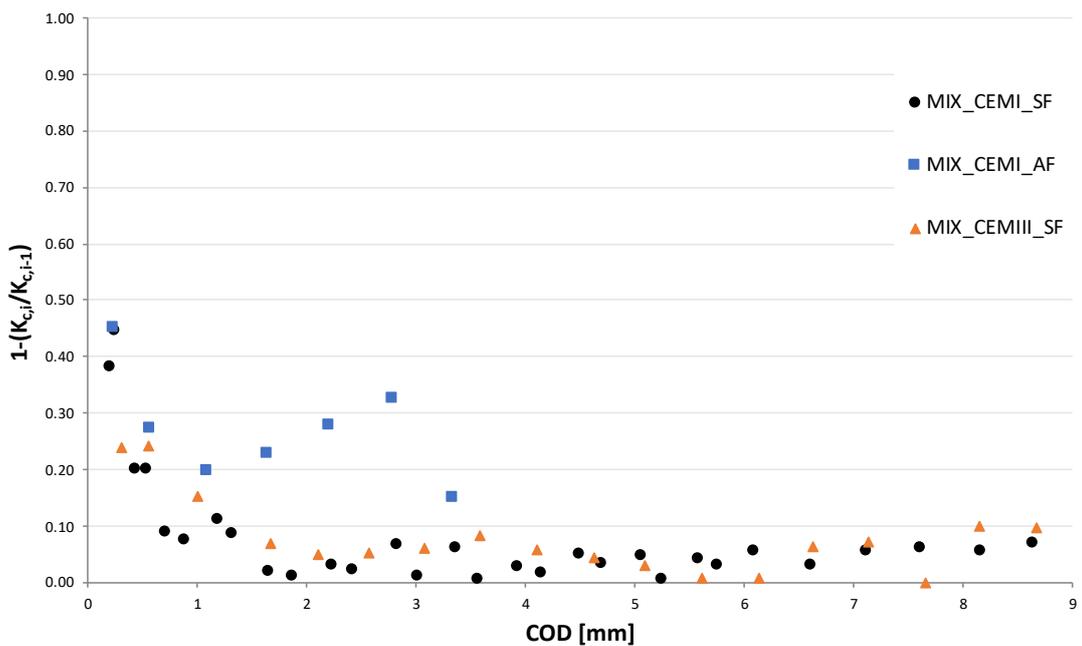


Figura 4.16: Variazione rigidezza di carico da un ciclo all'altro per le lastrine

Da questi ultimi grafici è possibile notare come per i mix con fibre metalliche, dopo una riduzione di rigidezza di carico marcata per un'apertura di fessura inferiore a circa 1 mm, si ha un assestamento della suddetta variazione e la riduzione di rigidezza di carico da un ciclo all'altro è pressoché costante. Ciò non accade, invece, per il mix con fibre amorfe dove, dopo il danneggiamento iniziale (che anche in questo caso tende a diminuire fino ad un COD residuo di circa 1 mm) si ha nuovamente un incremento dell'indice che presuppone un peggioramento

maggiore della rigidità di carico da uno step all'altro, fintantoché nel caso dei travetti si può osservare un decadimento maggiore di quello verificatosi col primo ciclo di carico. Concludendo, è possibile osservare come il composito cementizio con fibre metalliche amorfe manifesta un accumulo del danno più rapido, questo dovuto proprio al tipo di fibre che risulta essere meno efficace nel contrastare l'apertura di fessure che è la principale causa di degrado di rigidità.

## 4.2 Prove di compressione

Come già specificato nel capitolo precedente, per ogni miscela sono stati ricavati 8 cubetti utilizzati per la determinazione della loro resistenza a compressione. Quest'ultima è espressa attraverso la resistenza caratteristica a compressione, cubica ( $R_{ck}$ ) e/o cilindrica ( $f_{ck}$ ), che rappresenta quella resistenza al di sotto della quale si collocano solo il 5% di tutti i valori di resistenza appartenenti ai campioni studiati.

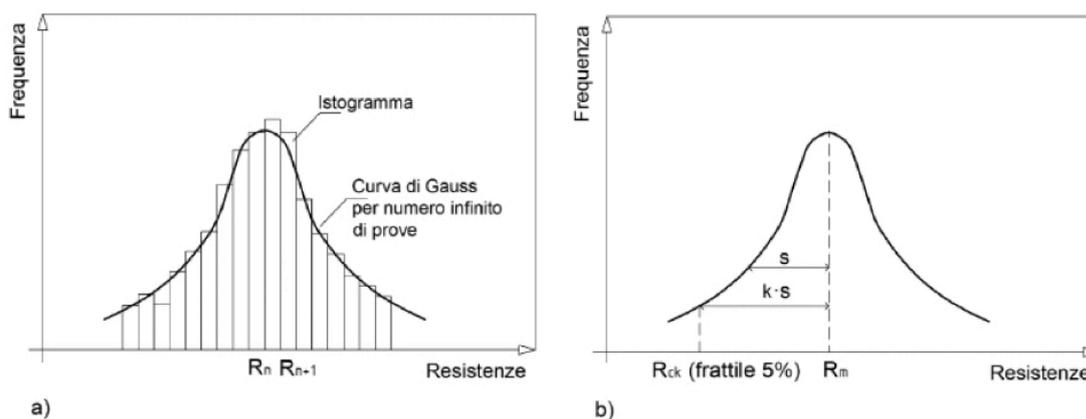


Figura 4.17: a) Resistenze in funzione della frequenza col quale si verificano; b) Definizione dell' $R_{ck}$  [30]

Per la determinazione di tali valori è necessario avere un numero consistente di provini. Tuttavia, per avere un'idea di queste resistenze si è seguito quanto disposto dalle "linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive" [31] anche se non previste per calcestruzzi ad alta resistenza. Esse forniscono un'equazione che permette di determinare la resistenza caratteristica cilindrica del materiale (Equazione 4.5).

$$f_{ck} = \min \{ f_{cm} - k ; f_{c,min} + 4 \}$$

Equazione 4.5: Calcolo della resistenza caratteristica cilindrica a compressione

Dove:

- $f_{cm}$ , media delle resistenze cilindriche dei campioni esaminati;
- $f_{c,min}$ , resistenza cilindrica minima dei campioni esaminati;

- $k$ , pari a:
  - 1,48  $s$  per un numero di provini ( $n$ )  $\geq$  a 15, in cui  $s$  rappresenta lo scarto quadratico medio;
  - 4 per  $10 \leq n \leq 14$ ;
  - 5 per  $7 \leq n \leq 9$ ;
  - 6 per  $4 \leq n \leq 6$ .

Nel nostro caso essendo  $n=8$  si è assunto  $k = 5$ .

Grazie alla relazione  $R_c = 1.25 f_c$ , fornita anch'essa dalle linee guida sopraccitate, è stato possibile determinare le resistenze cilindriche a partire dalle resistenze cubiche.

Prima di passare, però, al calcolo delle resistenze caratteristiche, si riportano le tabelle (Tabella 4.6, Tabella 4.7 e Tabella 4.8) con i valori di carico massimo raggiunti dai campioni durante le prove di compressione ( $F_{max}$ ). Inoltre, nelle stesse tabelle viene mostrato il valore di densità calcolato per ogni provino. Per completezza, si ripropongono le dimensioni e la massa dei campioni.

Per ciascuna miscela si è calcolata la densità media e il corrispondente errore statico standard (Err.St.) definito dalla seguente equazione.

$$Err.St. = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Equazione 4.6: Errore statistico standard

Dove:

- $\sigma$ , deviazione standard;
- $n$ , numero dei provini.

Provino	Dimensioni [cm]			Massa [Kg]	$F_{max}$ [KN]	Densità [Kg/m <sup>3</sup> ]
	Lato 1	Lato 2	Lato 3			
1_DB_CC_1_SX	10.1	9.9	10.0	2.413	1344	2413
1_DB_CC_1_DX	10.2	9.9	10.0	2.417	1388	2394
2_DB_CC_2_SX	10.0	9.7	10.1	2.396	1411	2470
2_DB_CC_2_DX	10.0	9.9	10.0	2.435	1363	2435
1_DB_CC_3_SX	9.7	10.1	10.0	2.416	1356	2466
1_DB_CC_3_DX	10.1	10.1	10.1	2.514	1331	2440
2_DB_CC_4_SX	10.0	9.7	10.2	2.435	1416	2461
2_DB_CC_4_DX	10.0	9.4	10.1	2.332	1202	2456

Tabella 4.6: Dati registrati durante le prove a compressione e calcolo della densità per il MIX\_CEMI\_SF

La densità media della miscela di riferimento risulta essere pari a 2442 Kg/m<sup>3</sup> e il corrispondente errore statistico standard uguale a 9.0 Kg/m<sup>3</sup>.

Provino	Dimensioni [cm]			Massa [Kg]	$F_{max}$ [KN]	Densità [Kg/m <sup>3</sup> ]
	Lato 1	Lato 2	Lato 3			
IA_17_1	10.0	9.7	10.0	2.397	1036	2471
IA_17_2	10.0	9.9	10.0	2.430	1096	2455
IA_20_1	10.1	10.6	10.0	2.567	1154	2397
IA_20_2	10.0	10.5	10.1	2.565	1146	2418
IA_21_1	10.0	10.3	10.0	2.527	1028	2453
IA_21_2	10.0	10.4	10.0	2.513	1085	2416
IA_22_1	10.1	10.3	10.1	2.534	1071	2411
IA_22_2	10.1	10.4	10.0	2.537	1168	2415

Tabella 4.7: Dati registrati durante le prove a compressione e calcolo della densità per il MIX\_CEMI\_AF

Invece, la densità media con fibre amorfe è pari 2430 Kg/m<sup>3</sup> e il corrispettivo errore statico standard uguale a 8.7 Kg/m<sup>3</sup>.

Provino	Dimensioni [cm]			Massa [Kg]	$F_{max}$ [KN]	Densità [Kg/m <sup>3</sup> ]
	Lato 1	Lato 2	Lato 3			
IIIM_2_1_1	10.0	9.8	10.0	2.403	1319	2452
IIIM_2_1_2	10.1	9.8	10.0	2.400	1397	2425
IIIM_3_1_1	10.1	9.5	10.1	2.350	1307	2424
IIIM_3_1_2	10.0	9.9	10.0	2.425	1260	2449
IIIM_5_1_1	10.1	9.9	10.0	2.424	1326	2424
IIIM_5_1_2	10.1	10.0	10.0	2.449	1400	2425
IIIM_7_1_1	10.1	10.0	10.0	2.464	1408	2439
IIIM_7_1_2	10.1	9.8	10.0	2.444	1373	2469

Tabella 4.8: Dati registrati durante le prove a compressione e calcolo della densità per il MIX\_CEMIII\_SF

Infine, per il MIX\_CEMIII\_SF la densità media ottenuta è 2438 Kg/m<sup>3</sup> e il corrispettivo errore statico standard uguale a 5.6 Kg/m<sup>3</sup>.

Nelle seguenti tabelle, invece, vengono riportati i valori di resistenza cubica calcolati come il rapporto tra il carico massimo agente sul provino ( $F_{max}$ ) e l'area delle superfici del cubo a contatto con i piatti di carico (Lato 1 x Lato 2). In aggiunta, vengono raccolti anche i valori di resistenza cilindrica calcolati con la suddetta relazione.

Provino	$F_{max}$ [KN]	$R_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
1_DB_CC_1_SX	1344	134	108
1_DB_CC_1_DX	1388	137	110
2_DB_CC_2_SX	1411	145	116
2_DB_CC_2_DX	1363	138	110
1_DB_CC_3_SX	1356	138	111
1_DB_CC_3_DX	1331	130	104
2_DB_CC_4_SX	1416	146	117
2_DB_CC_4_DX	1202	128	102

Tabella 4.9: Resistenza cubica e cilindrica dei provini del MIX\_CEMI\_SF

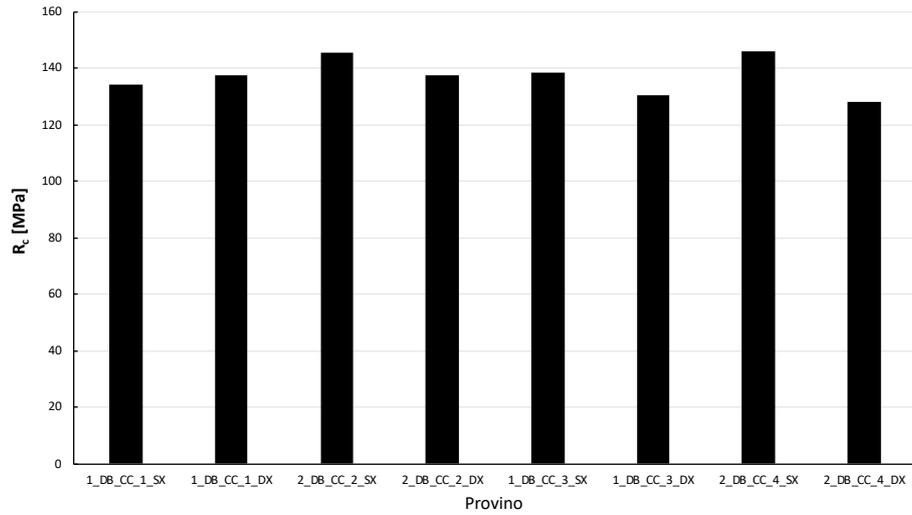


Figura 4.18: Istogramma raffigurante le resistenze cubiche dei campioni del MIX\_CEMI\_SF

Provino	F <sub>max</sub> [KN]	R <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c</sub> [MPa]
IA_17_1	1036	107	85
IA_17_2	1096	111	89
IA_20_1	1154	108	86
IA_20_2	1146	109	87
IA_21_1	1028	100	80
IA_21_2	1085	104	83
IA_22_1	1071	103	82
IA_22_2	1168	111	89

Tabella 4.10: Resistenza cubica e cilindrica dei provini del MIX\_CEMI\_AF

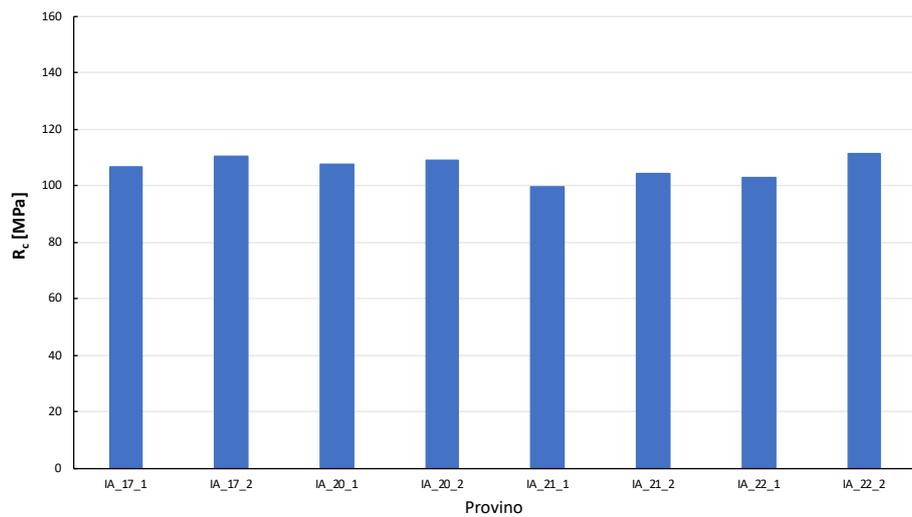


Figura 4.19: Istogramma raffigurante le resistenze cubiche dei campioni del MIX\_CEMI\_AF

Provino	$F_{max}$ [KN]	$R_c$ [MPa]	$f_c$ [MPa]
IIIM_2_1_1	1319	135	108
IIIM_2_1_2	1397	141	113
IIIM_3_1_1	1307	136	109
IIIM_3_1_2	1260	127	102
IIIM_5_1_1	1326	133	106
IIIM_5_1_2	1400	139	111
IIIM_7_1_1	1408	139	112
IIIM_7_1_2	1373	139	111

Tabella 4.11: Resistenza cubica e cilindrica dei provini del MIX\_CEMIII\_SF

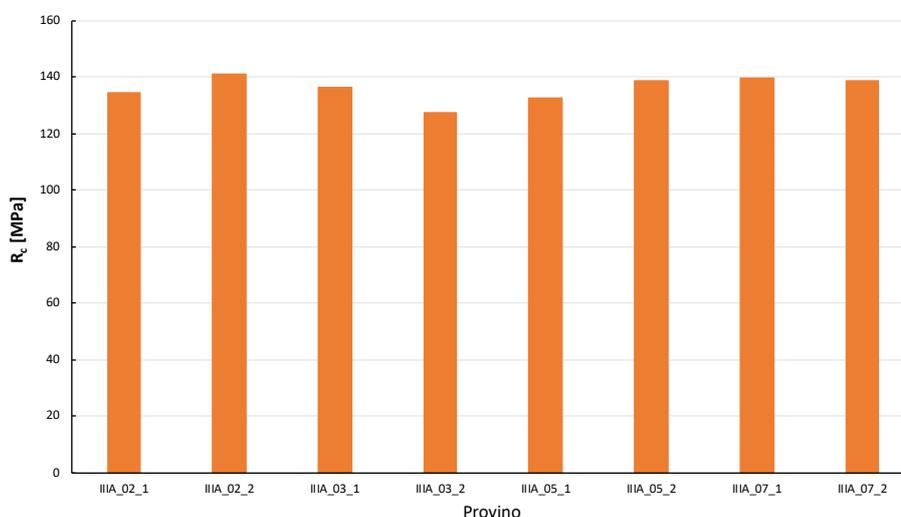


Figura 4.20: Istogramma raffigurante le resistenze cubiche dei campioni del MIX\_CEMIII\_SF

In Tabella 4.12, per ogni composito cementizio, vengono riportate le resistenze cubiche e cilindriche minime e quelle medie con i rispettivi errori statici standard.

Miscela	$R_{c,min}$ [MPa]	$R_{cm}$ [MPa]	Err.St. [MPa]	$f_{c,min}$ [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	Err.St. [MPa]
MIX_CEMI_SF	128	137	2.1	102	110	1.7
MIX_CEMI_AF	100	107	1.3	80	85	1.0
MIX_CEMIII_SF	127	136	1.5	102	109	1.2

Tabella 4.12: Parametri fondamentali delle prove di compressione

In quest'ultima tabella sono riassunti i passaggi che hanno condotto al calcolo delle resistenze caratteristiche a compressione.

Miscela	$f_{cm} - k$ [MPa]	$f_{c,min} + 4$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$R_{ck}$ [MPa]
MIX_CEMI_SF	105	106	105	131
MIX_CEMI_AF	80	84	80	100
MIX_CEMIII_SF	104	106	104	130

Tabella 4.13: Resistenze caratteristiche cilindriche e cubiche a compressione

### 4.3 Prove di trazione indiretta

Lo scopo di queste prove è stata la determinazione del comportamento a trazione del calcestruzzo; il metodo e gli strumenti di prova stati descritti al paragrafo 3.3.3. I campioni sono stati distinti in:

- fibre ortogonali, in cui le fibre sono disposte perpendicolarmente alla superficie di rottura;
- fibre parallele, in cui le fibre sono disposte parallelamente alla superficie di rottura.

La differenza delle due prove è ben visibile in tutti e tre i mix; i campioni con le fibre disposte ortogonalmente hanno mostrato un comportamento incrudente, in cui dopo la fessurazione il valore di sforzo cresce fino al valore di picco. I campioni con le fibre parallele hanno esibito un comportamento degradante, in cui il comportamento post-fessurativo è caratterizzato da un ramo discendente. Dalle analisi si mostra come i composti contenenti fibre metalliche hanno dimostrato una maggiore duttilità, raggiungendo il picco per valori di COD superiori; diversamente il mix con le fibre amorfe ha dimostrato una tenacità minore. Le curve delle prove eseguite con orientamento parallelo delle fibre hanno mostrato un comportamento simile per quelle metalliche, con un brusco calo di sforzo dettato dal numero inferiore di fibre, quindi la redistribuzione tensionale conseguente alla loro attivazione post-fessurazione non è sufficiente a generare comportamento incrudente. Al contrario le fibre amorfe, anche grazie alla loro geometria, hanno presentato un comportamento degradante più morbido.

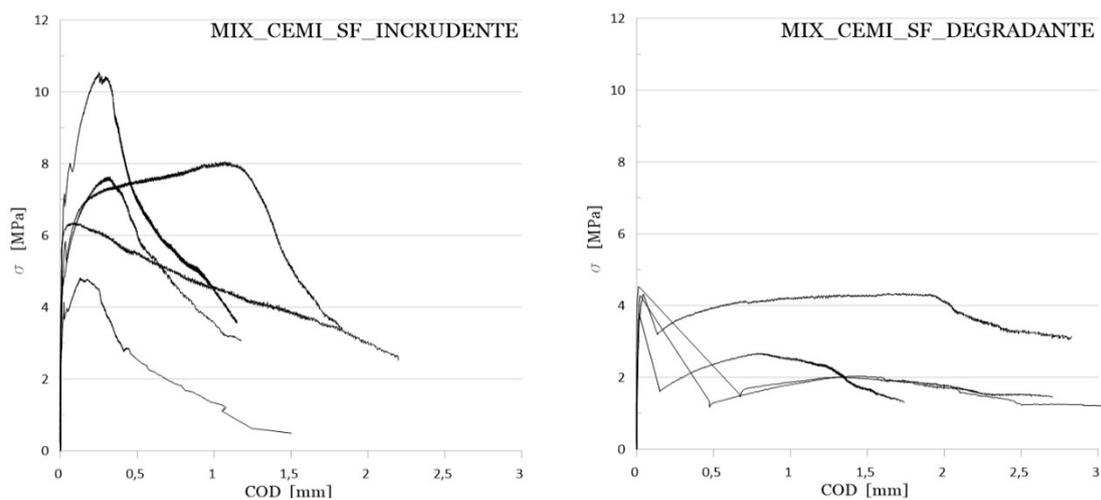


Figura 4.21: Prove DEWS eseguite sul MIX\_CEMI\_SF

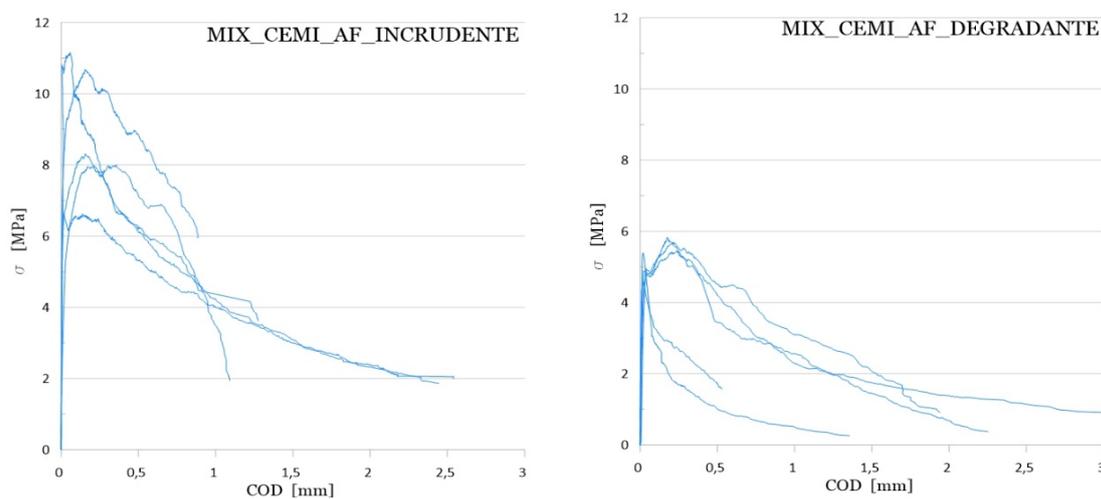


Figura 4.22: Prove DEWS eseguite sul MIX\_CEMI\_AF

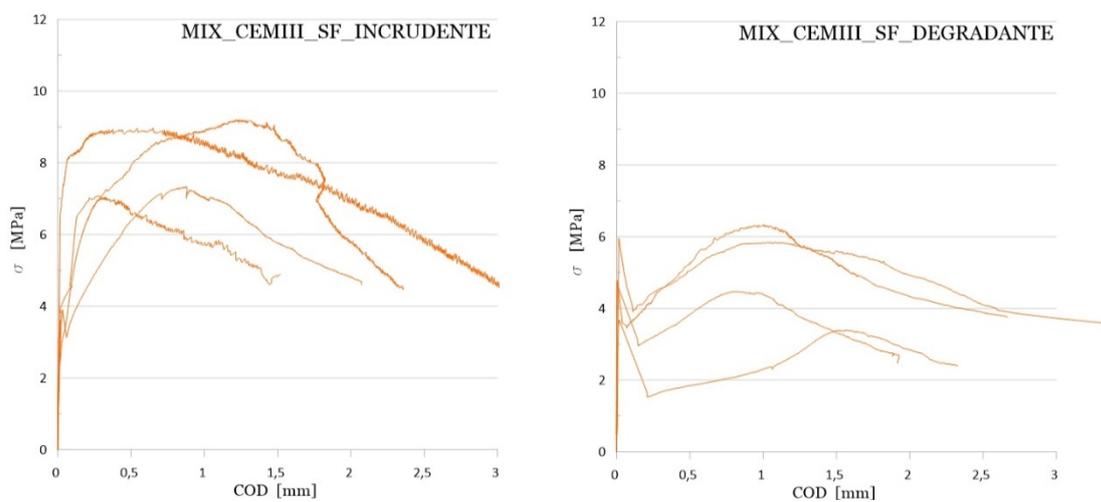


Figura 4.23: Prove DEWS eseguite su sul MIX\_CEMIII\_SF

## 4.4 Analisi inversa

L'analisi inversa è un metodo che vuole ricostruire la curva a flessione sforzo/apertura di fessura a partire da prove sperimentali che descrivono il comportamento a trazione del materiale. La risposta qualitativa è riportata in Figura 4.24, in cui si distinguono le seguenti fasi:

- un primo tratto elastico lineare fino al valore di sforzo di fessurazione;
- un secondo tratto plastico incrudente, in questa fase il materiale sviluppa una multifessurazione in cui al crescere delle deformazioni lo sforzo continua ad aumentare;
- il terzo ed ultimo tratto è caratterizzato da un ramo discendente, in cui si ha la localizzazione delle deformazioni ed una propagazione instabile della fessura.

Il tratto incrudente è tipico dei calcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni: le aggiunte di fibre ai composti ordinari conferiscono al materiale maggiore tenacità; ciò è permesso dalla loro elevata resistenza e dall'effetto cucente che permette di limitare l'apertura delle fessure, capacità del materiale di sostenere sforzi di trazione, anche dopo l'insorgenza delle fessure. Definito il legame costitutivo calibrato in funzione delle prove DEWS, si è cercato di replicare il risultato delle prove a flessione, verificando l'affidabilità del legame ipotizzato utilizzandolo come input per la costruzione di un diagramma momento curvatura.

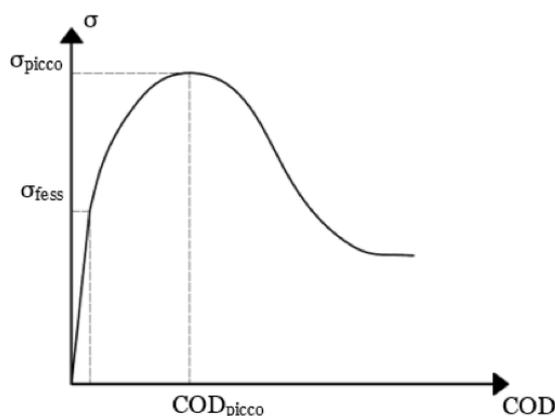


Figura 4.24: Curva sforzo/spostamento di un calcestruzzo con capacità incrudente

La definizione del legame costitutivo è un passaggio obbligato per lo svolgimento dell'analisi: in compressione si è ipotizzato un comportamento elastico-perfettamente plastico, con lo sforzo massimo imposto pari alla media dei valori ottenuti dalle prove di schiacciamento dei cubi. A trazione si è considerato un legame incrudente bilineare fino al valore di sforzo massimo, mentre il tratto discendente è stato caratterizzato attraverso una funzione esponenziale. Un esempio grafico del legame costitutivo a trazione è stato riportato in Figura 4.25.

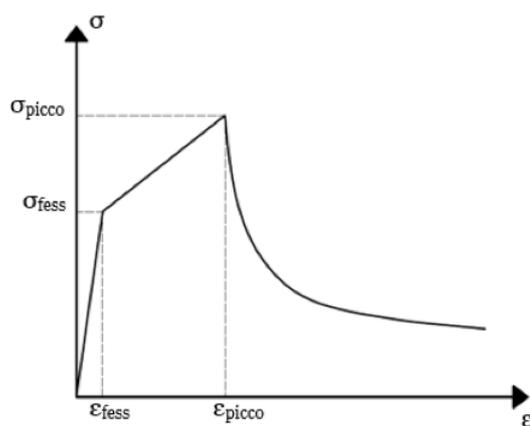


Figura 4.25: Legame costitutivo incrudente alla trazione

I parametri necessari, per la definizione del comportamento in trazione del calcestruzzo fibrorinforzato, sono cinque:

- modulo elastico  $E$ ;
- sforzo di fessurazione,  $\sigma_{fess}$ ;
- sforzo di picco,  $\sigma_{picco}$ ;
- deformazione al picco,  $\epsilon_{picco}$ ;
- deformazione al picco,  $\epsilon_{ult}$ .

Il modulo elastico è stato considerato direttamente dalle curve derivanti dalla flessione mentre i restanti valori sono stati valutati in funzione delle prove sperimentali DEWS.

Le prove DEWS eseguite su campioni con le fibre disposte ortogonali alla fessura sono state le uniche considerate per la calibrazione del legame costitutivo. Esse hanno mostrato un comportamento incrudente dopo la fessurazione, rappresentando al meglio lo stato di sforzo e deformazione del bordo inferiore, Figura 4.26.

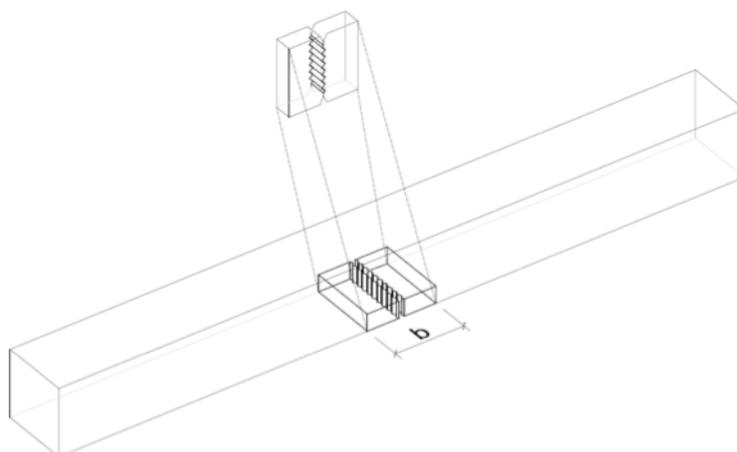


Figura 4.26: Posizionamento dalla DEWS

Nei seguenti grafici si riportano in nero le curve ottenute dalle prove DEWS con le fibre disposte ortogonalmente rispetto alla fessura, a cui sono state sovrapposte le curve modello in rosso.

La definizione del valore della larghezza di base  $b$ , definita lunghezza caratteristica, permette di passare dalla prova di laboratorio alla caratterizzazione dell'elemento reale. Infatti, dalle prove DEWS si è ottenuto un valore di spostamento figlio di una singola fessura, ma per poter passare al campo delle deformazioni è stato necessario dividere per la lunghezza caratteristica, imposta pari alla distanza media delle fessure (Tabella 4.14). Quest'ultime sono state calibrate in funzione dei risultati sperimentali ed utilizzate per la definizione del legame costitutivo a trazione.

MIX	n° fessure	Lunghezza caratteristica [mm]
CEMI_SF	7	21.5
CEMI_AF	5	30
CEMIII_SF	7	21.5

Tabella 4.14: Lunghezze caratteristiche

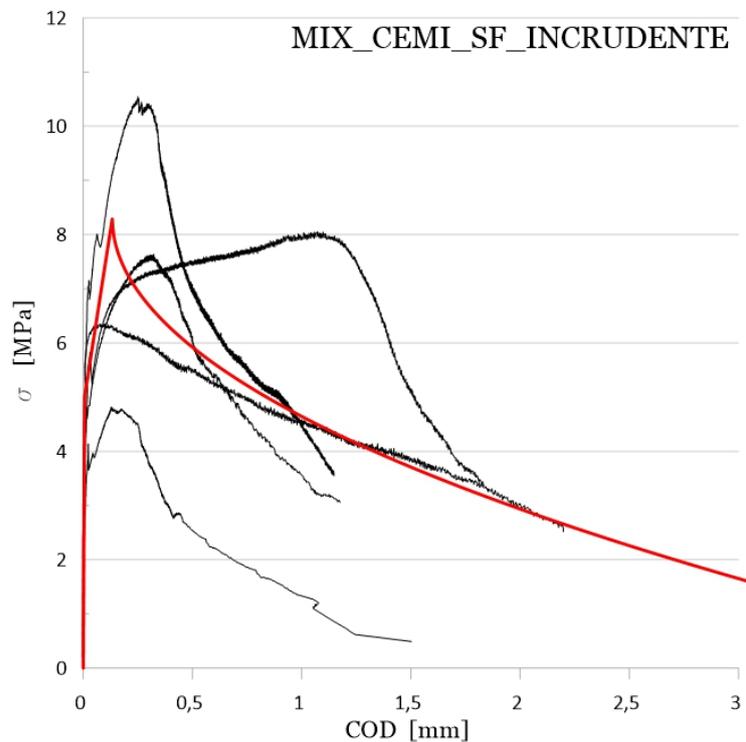


Figura 4.27: Curva modello e prove DEWS incrudenti sul MIX\_CEMI\_SF

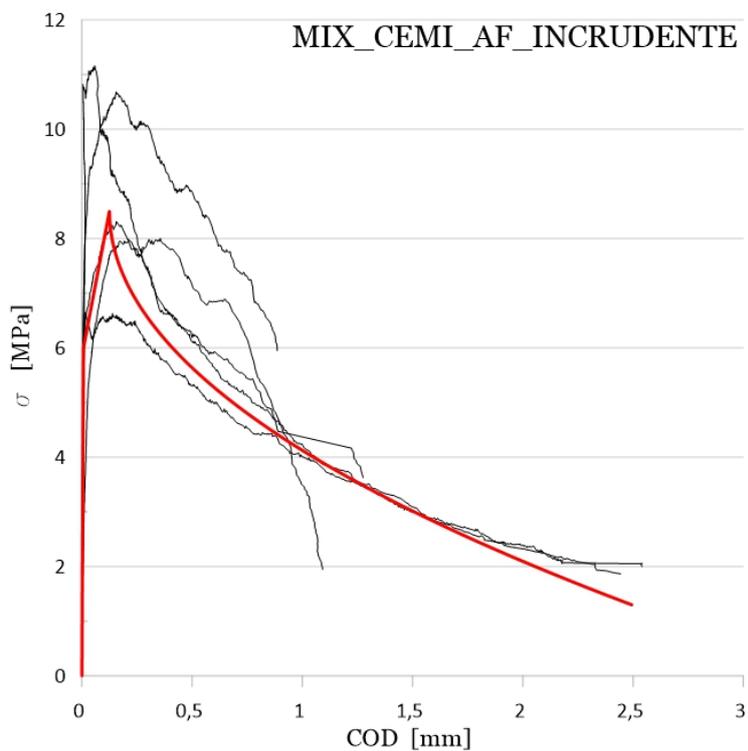


Figura 4.28: Curva modello e prove DEWS incrudenti sul MIX\_CEMI\_AF

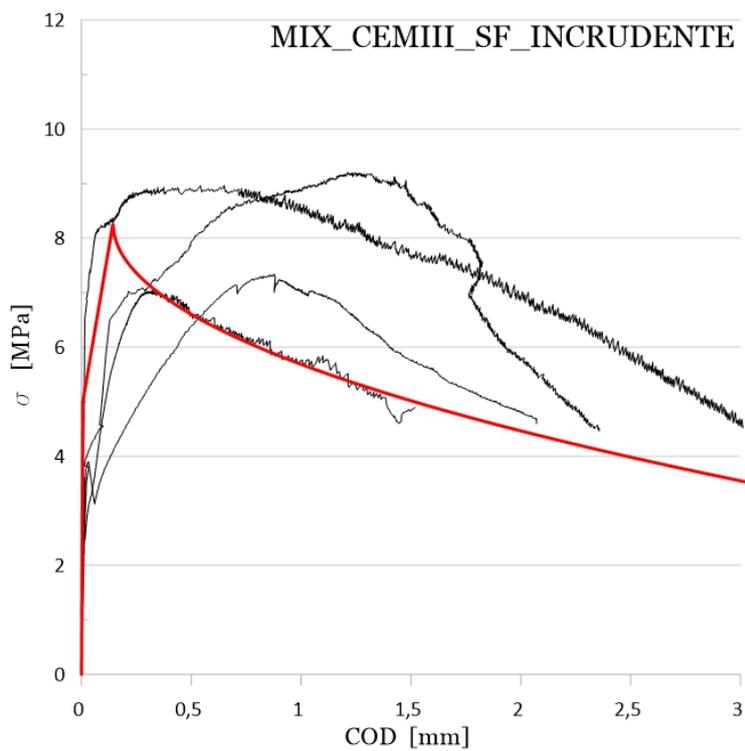


Figura 4.29: Curva modello e prove DEWS incrudenti sul MIX\_CEMIII\_SF

Dai grafici emerge come i campioni contenenti fibre metalliche (MIX 0, MIX 2) hanno manifestato un comportamento simile nonostante il diverso cemento, dimostrando una buona duttilità e valori di sforzo massimo simili. Al contrario, i campioni contenenti fibre amorfe (MIX 1) hanno mostrato un comportamento poco duttile, raggiungendo per deformazioni minori lo sforzo di picco.

Attraverso un codice MATLAB è stato possibile applicare il legame costitutivo ipotizzato e risalire al grafico momento/curvatura. Il tracciamento del grafico è stato effettuato per punti a partire dalla definizione dell'asse della curvatura, determinato come una successione di valori ad intervalli regolari. Nota la curvatura, è possibile determinare il valore di deformazione ( $\varepsilon$ ) attraverso la formula:

$$\varepsilon = \chi \cdot y$$

Equazione 4.7: Calcolo della deformazione

dove  $y$  rappresenta la distanza dall'asse neutro e  $\chi$  la curvatura della sezione.

Definito il legame costitutivo e calcolate le deformazioni sezionali, lo sforzo in ogni punto è noto. Tuttavia, i valori calcolati finora dipendono dalla posizione dell'asse neutro, il quale inizialmente è imposto nel baricentro, ma, nella fase di comportamento non lineare questo non è più vero. La posizione reale viene valutata nel codice implementando un ciclo di controllo, in cui ad ogni iterazione viene verificato l'equilibrio sezionale. La convergenza si ottiene quando le forze di compressione e trazione, definite come l'integrale delle distribuzioni di sforzo, risultano essere identiche. Il momento sezionale si calcola come:

$$M_{int} = C \cdot r$$

$$\text{con } C = T$$

Equazione 4.8: Calcolo del momento sezionale

in cui  $r$  è il braccio della coppia,  $C$  è la forza di compressione e  $T$  è la forza di trazione.

Il passaggio da carico a sforzo è stato valutato come indicato al paragrafo 4.1.

Nella seguente tabella si riportano i valori utili ai fini del confronto, si considera:

- $\sigma_{\text{picco, m}}$ , rappresenta il valore di sforzo medio corrispondente al picco per le prove sperimentali a flessione;
- $\text{COD}_{\text{picco, m}}$ , rappresenta il valore di COD corrispondente al picco per le prove sperimentali a flessione;
- $\sigma_{\text{picco, A.I.}}$  rappresenta il valore di sforzo corrispondente al picco per le analisi inverse;
- $\text{COD}_{\text{picco, A.I.}}$ , rappresenta il valore di COD corrispondente al picco per le analisi inverse.

MIX	Tipo provino	$\sigma_{\text{picco, m}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{picco, A.I.}}$ [MPa]	$\text{COD}_{\text{picco, m}}$ [mm]	$\text{COD}_{\text{picco, A.I.}}$ [mm]
CEMI_SF	Lastrina	24.6	18.9	1.532	1.190
	Travetto	16.5	17.4	0.966	0.745
CEMI_AF	Lastrina	19.4	19.21	0.566	0.567
	Travetto	19.5	19.3	0.454	0.425
CEMIII_SF	Lastrina	23.9	20.1	1.221	1.538
	Travetto	19.31	20.6	0.842	1.070

Tabella 4.15: Confronto dei risultati sperimentali ottenuti da prove a flessione e analisi inversa

Nei seguenti grafici sono mostrate le curve  $\sigma$ -COD ottenute dalle prove sperimentali e dall'analisi inversa, distinguendo le varie tipologie di composto e geometria del campione. In nero sono riportate le curve delle singole prove sperimentali, in verde la media di esse ed in rosso le analisi computazionali.

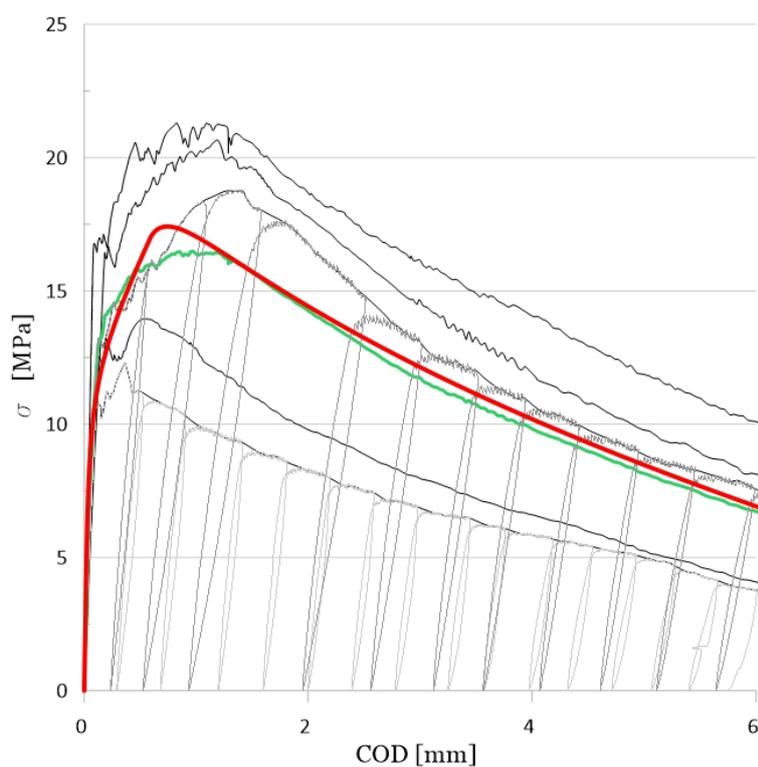


Figura 4.30: Grafici sforzo nominale/COD, travetti MIX\_CEMI\_SF

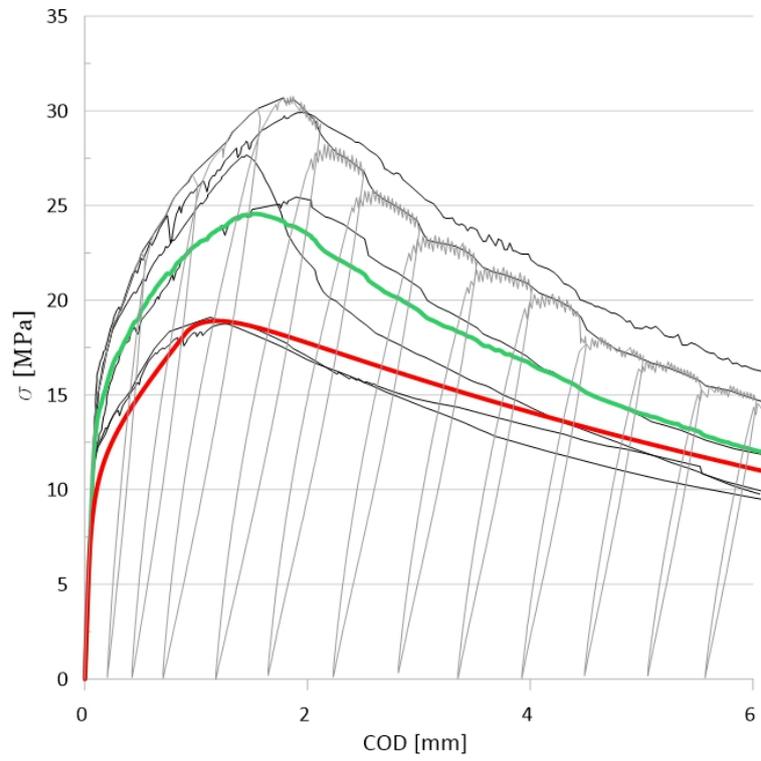


Figura 4.31: Grafici sforzo nominale/COD, lastrine MIX\_CEMI\_SF

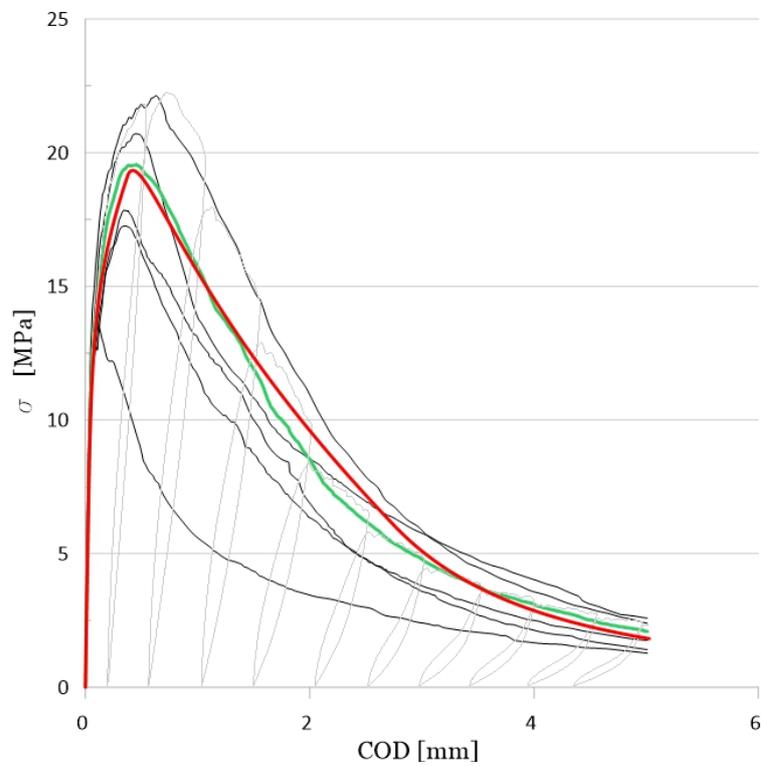


Figura 4.32: Grafici sforzo nominale/COD, travetti MIX\_CEMI\_AF

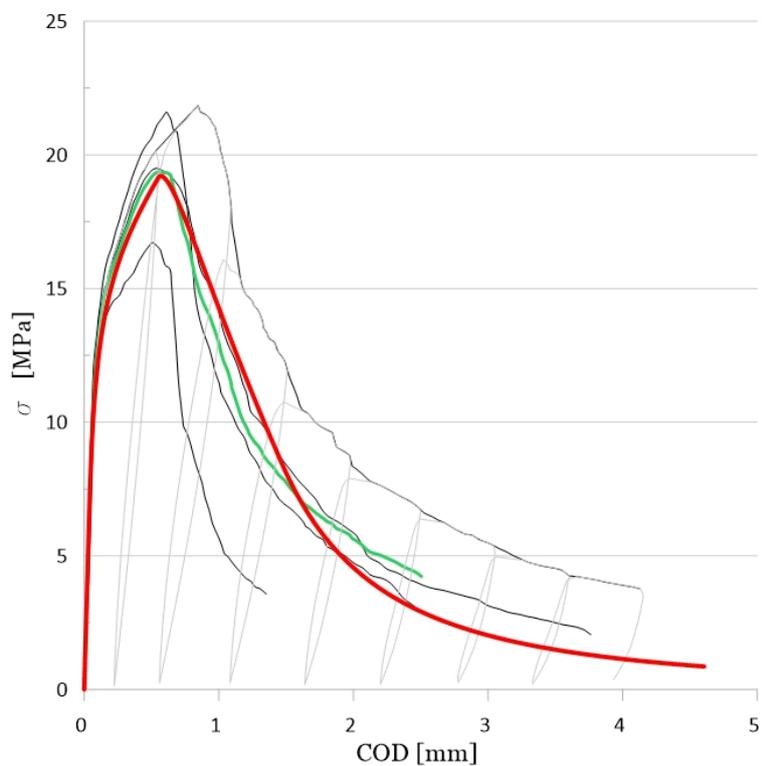


Figura 4.33: Grafici sforzo nominale/COD, lastre MIX\_CEMI\_AF

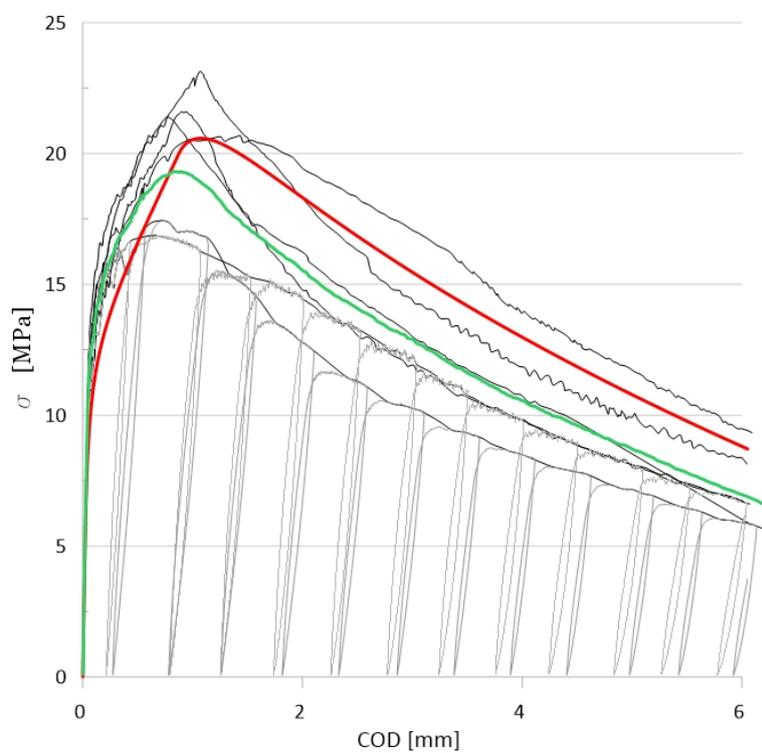


Figura 4.34: Grafici sforzo nominale/COD, travetti MIX\_CEMIII\_SF

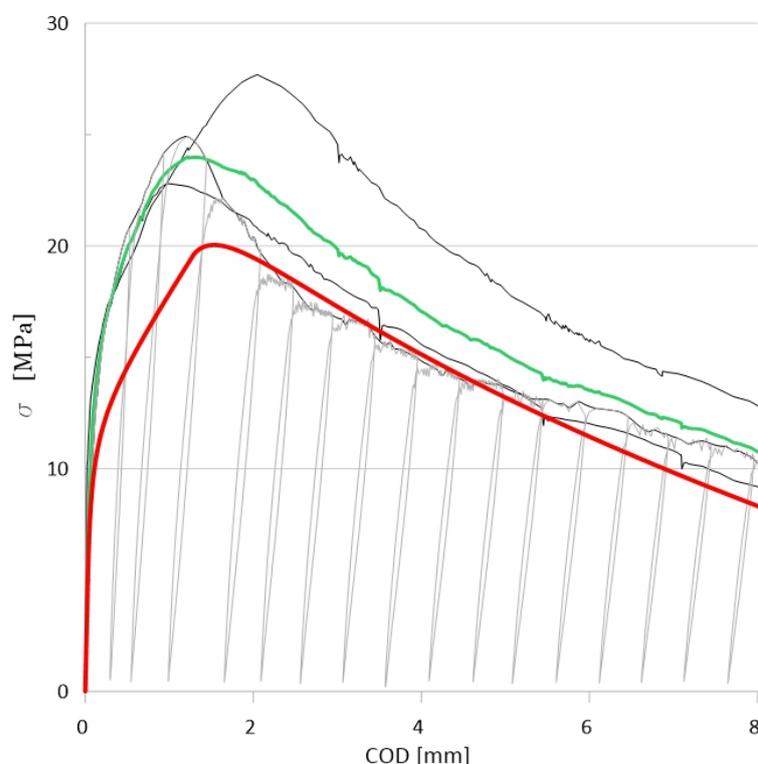


Figura 4.35: Grafici sforzo nominale/COD, lastrine MIX\_CEMIII\_SF

Dai grafici si evince come i campioni contenenti fibre metalliche hanno manifestato un comportamento simile; i risultati dell'analisi inversa dei travetti, riportati per il MIX di riferimento in Figura 4.30 e per il MIX\_CEMIII\_SF in Figura 4.34, bene approssimano la curva media. Al contrario, per le lastrine, in Figura 4.31 e Figura 4.35, l'analisi inversa ha generato valori inferiori alle prove di laboratorio. I risultati ottenuti sono coerenti con le indagini svolte da Ferrara et al. [29] nel 2011 e Di Prisco et al. nel 2013 [34], i quali hanno studiato gli effetti dell'orientamento delle fibre su travi basse e DEWS, dimostrando che le fibre orientate con la direzione di sforzo di trazione favorivano un tratto incrudente post-fessurazione. Inoltre, gli autori hanno comprovato come un l'allineamento delle fibre e la loro segregazione possano migliorare la resistenza flessionale in provini di piccolo spessore. Le lastrine sono state maggiormente influenzate da questo comportamento, non evidenziato dalle prove di trazione indiretta, dimostrando infatti una resistenza flessionale maggiore. Il confronto dei risultati del MIX con fibre amorfe, Figura 4.32 e Figura 4.33, ha portato ad una quasi perfetta sovrapposizione dei risultati. Si può quindi affermare che le analisi inverse hanno portato ad una previsione più che accettabile in tutti i casi, fatto salvo per il comportamento delle lastrine, giustificabile per quanto scritto in precedenza.

## 4.5 Caratterizzazione del recupero meccanico

Come già sottolineato, le prove di fessurazione sono state eseguite in modo da poter analizzare le capacità autoriparanti e di recupero meccanico dei composti cementizi fibrorinforzati oggetto di studio. Per tali analisi sono stati definiti i seguenti indici che hanno permesso di quantificare le proprietà di recupero e il miglioramento meccanico:

- Indice di recupero della resistenza (ISR\*; ISR: Index of Stress Recovery);
- Indice di recupero del danno (IDaRo; IDaR: Index of Damage Recovery);
- Rapporto delle rigidezze (StRo; StR: Stiffness Ratio);
- Indice di recupero della rigidezza (IStR: Index of Stiffness Recovery).

A causa di problemi tecnici, i file contenenti i dati delle curve di fessurazione del MIX\_CEMIII\_SF effettuate a 90 giorni sono andate perse. Perciò, per alcuni indici mancheranno i valori. Tuttavia, i COD residui raggiunti durante tali prove erano stati segnati “su carta” alla conclusione di ogni prova, e quindi è stato possibile risalire al COD residuo totale dei provini. Inoltre, i risultati ottenuti dall’analisi delle lastrine del MIX\_CEMI\_SF sono stati ritenuti non attendibili in quanto durante l’esecuzione delle prove di prefessurazione un problema ne ha compromesso i dati [3].

Prima di passare alla definizione di tali indici, verrà mostrato come sono stati uniti i dati sperimentali ottenuti dalle prove di prefessurazione e rifessurazione.

### 4.5.1 Prove di fessurazione

Per ogni campione, dalla prova di prefessurazione e dalle successive fessurazioni, condotte come indicato al Capitolo 3, sono stati acquisiti dei grafici sforzo nominale ( $\sigma_n$ ) – apertura di fessura (COD). Per il confronto di quest’ultimi, è stato doveroso traslare le curve di rifessurazione lungo l’asse delle ascisse (aperture di fessura) in modo tale da far coincidere l’ultimo punto del grafico della fessurazione precedente con il primo punto del grafico della fessurazione successiva. Per facilitare la comprensione di quanto appena esposto, di seguito si riporta un esempio. Consideriamo il provino IA\_4. Tale provino, dopo la prefessurazione ( $t=0$ ) è stato sottoposto ad ulteriori tre fessurazioni condotte a 1, 3 e 6 mesi dalla prima fessurazione. In Tabella 4.16 sono raccolti i valori di apertura di fessura residui considerando ogni fessurazione indipendente dalle altre ( $COD_{r,i}$ ) e i valori di COD residui reali ( $COD_r$ ), ossia quelli tengono conto delle aperture di fessure residue già indotte al provino con le fessurazioni precedenti. Di conseguenza, le traslazioni delle curve di rifessurazione per il campione considerato divengono quelle mostrate in Figura 4.36.

Tempo fessurazione [giorni]	COD <sub>r,i</sub> [mm]	COD <sub>r</sub> [mm]
0	0.188	0.188
30	0.192	0.380
90	0.160	0.540
180	0.169	0.709

Tabella 4.16: COD residui prefessurazione e rifessurazione del provino IA\_4

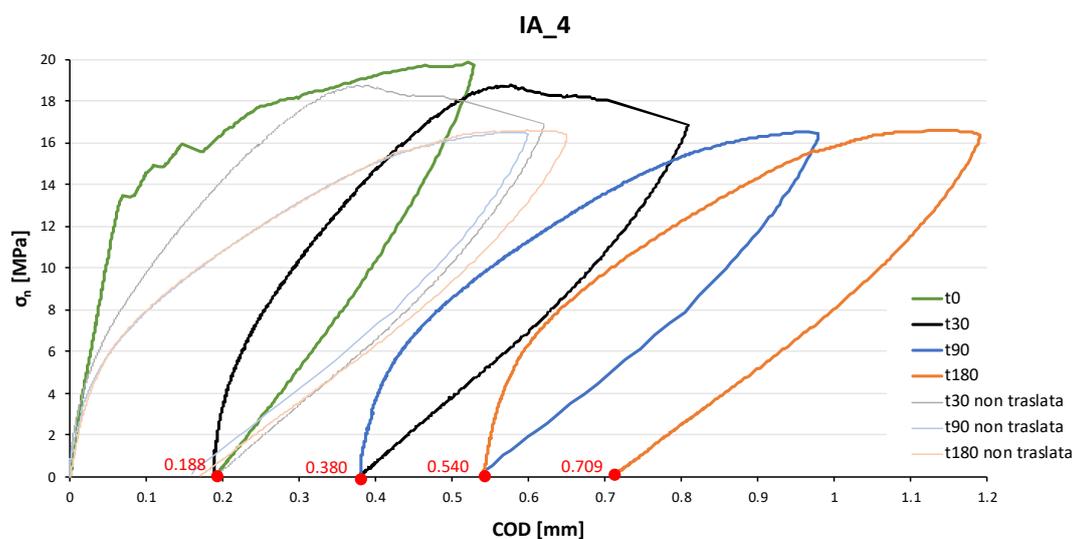


Figura 4.36: Traslazione delle curve di rifessurazione del provino IA\_4

I grafici ( $\sigma_n - \text{COD}$ ) ottenuti a seguito delle traslazioni sono stati utilizzati per la lettura dei parametri necessari alla valutazione degli indici di recupero meccanico.

Per rendere più chiara l'esposizione verranno fatti degli esempi, riferendosi sempre al provino considerato precedentemente (IA\_4).

In APPENDICE C, inoltre, sono riportati i grafici già traslati di tutti i provini analizzati per lo studio del recupero meccanico.

#### 4.5.2 Indice di recupero della resistenza 1 (ISR\*)

L'obiettivo di tale indice è quello di studiare il recupero della resistenza di ciascun HPFRCC oggetto di studio.

Per l'indice in questione (ISR\*) ci si è riferiti alla resistenza media del materiale vergine, ovvero alle curve di riferimento ottenute al paragrafo 4.1.1.

L'indice  $ISR^*$  è stato definito con la seguente relazione:

$$ISR^* [\%] = \frac{\sigma_s^i - \sigma_s^{*i}}{\sigma_s^{*i}}$$

Equazione 4.9: Definizione indice  $ISR^*$

Dove:

- $\sigma_s^i$ , sforzo nominale corrispondente al punto di scarico del ciclo di fessurazione al tempo i-esimo;
- $\sigma_s^{*i}$ , sforzo nominale sulla curva di riferimento corrispondente all'apertura di fessura di scarico del ciclo di fessurazione al tempo i-esimo ( $COD_{s,i}$ ).

Per tale indice si possono verificare i seguenti casi:

- $\sigma_s^i = \sigma_s^{*i} \rightarrow ISR^* = 0$ , nessun recupero di resistenza;
- $\sigma_s^i < \sigma_s^{*i} \rightarrow ISR^* < 0$ , perdita di resistenza;
- $\sigma_s^i > \sigma_s^{*i} \rightarrow ISR^* > 0$ , recupero di resistenza.

ESEMPIO:

A titolo esemplificativo, in Figura 4.37 vengono indicati i punti significativi per il calcolo dell'indice in oggetto con riferimento all'ultimo ciclo di fessurazione ( $i=180$ ) del provino IA\_4. Allo stesso tempo, in Tabella 4.17 è riassunto il calcolo dell' $ISR^*$  per tutti i tempi investigati.

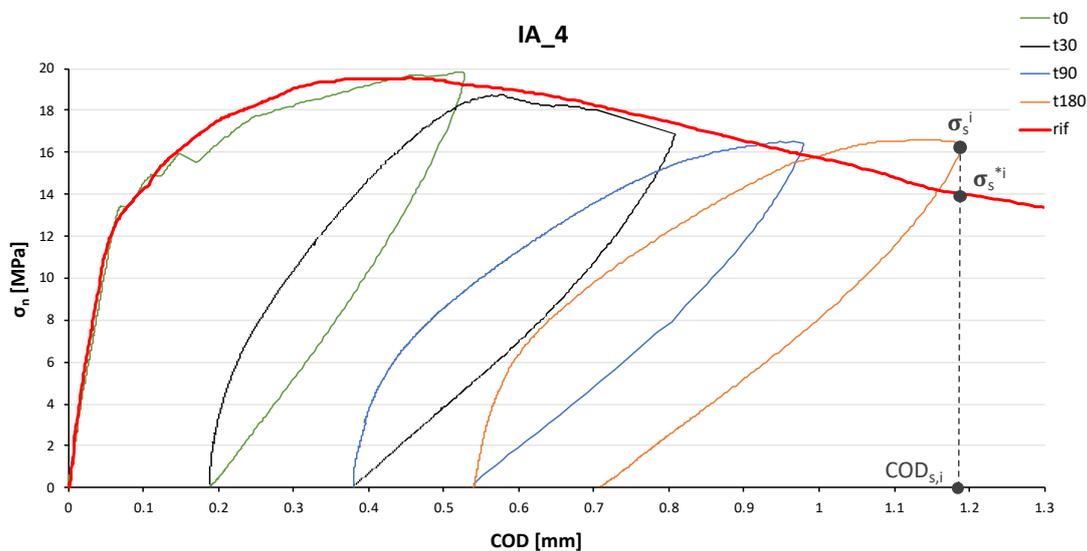


Figura 4.37: Rappresentazione grafica dei punti significativi per il calcolo dell'indice  $ISR^*$

Tempo [gg]	$\sigma_s^i$ [MPa]	COD <sub>s,i</sub> [mm]	$\sigma_s^{*i}$ [MPa]	ISR*
30	16.9	0.8075	17.4	-2.9%
90	16.4	0.978	15.9	3.4%
180	16.3	1.1895	14.0	16.1%

Tabella 4.17: Calcolo indici ISR\* per il campione IA\_4

Nella seguente figura, si riporta l'andamento di tale indice per i travetti con fibre amorfe in funzione del COD. Come si può osservare, per ciascun tempo d'osservazione, all'aumentare dell'apertura di fessura si ha una riduzione dell'indice.

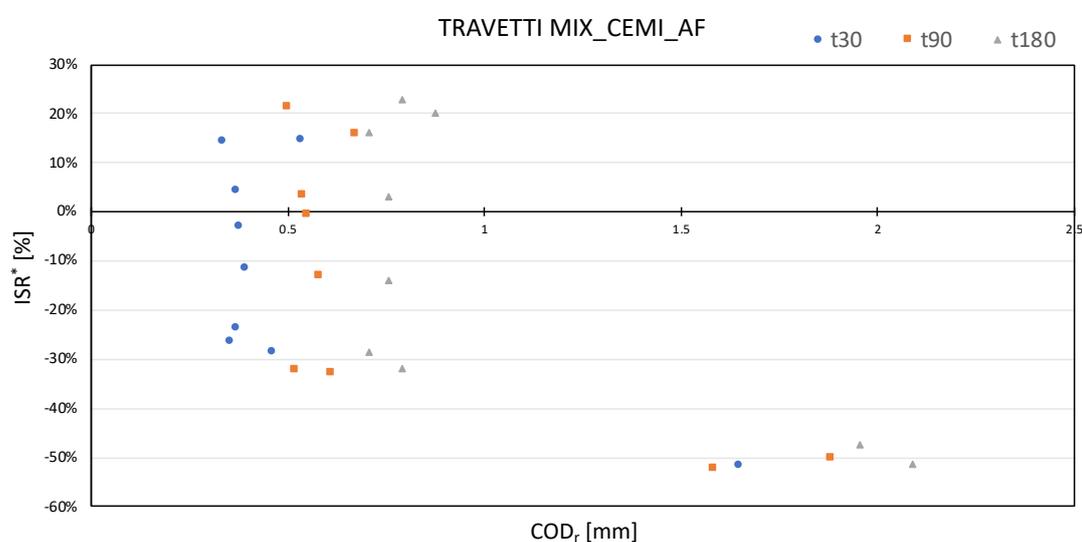


Figura 4.38: Indici ISR\* dei travetti del MIX\_CEMI\_AF

In APPENDICE D sono riportati i grafici e le tabelle con i valori di tale indice per ogni provino di ogni miscela.

In Tabella 4.18, invece, vengono riportati i valori dell'ISR\* medi e delle rispettive deviazioni standard calcolati differenziando tra lastrine (L), travetti immersi perennemente in acqua geotermica (T\_I) e travetti sottoposti a cicli di asciutto-bagnato (T\_A/B) e non considerando i valori troppo differenti. Tali considerazioni verranno mantenute anche per gli indici che verranno presentati successivamente.

Miscela	Tempo [gg]	ISR* <sub>T_I</sub> [%]	$\sigma_{T_I}$ [%]	ISR* <sub>A/B</sub> [%]	$\sigma_{T_{A/B}}$ [%]	ISR* <sub>L</sub> [%]	$\sigma_L$ [%]
MIX 0	30	-2.3%	18.2%	9.9%	31.0%	-	-
	90	5.7%	18.7%	18.2%	35.1%	-	-
	180	4.8%	18.1%	17.1%	40.7%	-	-
MIX 1	30	-6.6%	17.1%	-8.4%	20.9%	34.2%	45.6%
	90	-6.5%	20.8%	-4.0%	27.3%	75.2%	125.5%
	180	-1.6%	23.5%	-1.9%	27.7%	-	-
MIX 2	30	-6.3%	1.9%	-0.9%	5.5%	22.9%	28.0%
	90	-	-	-	-	-	-
	180	5.7%	13.3%	21.9%	14.3%	-	-

Tabella 4.18: Indici ISR\* medi

Nelle seguenti figure vengono plottati i valori in tabella.

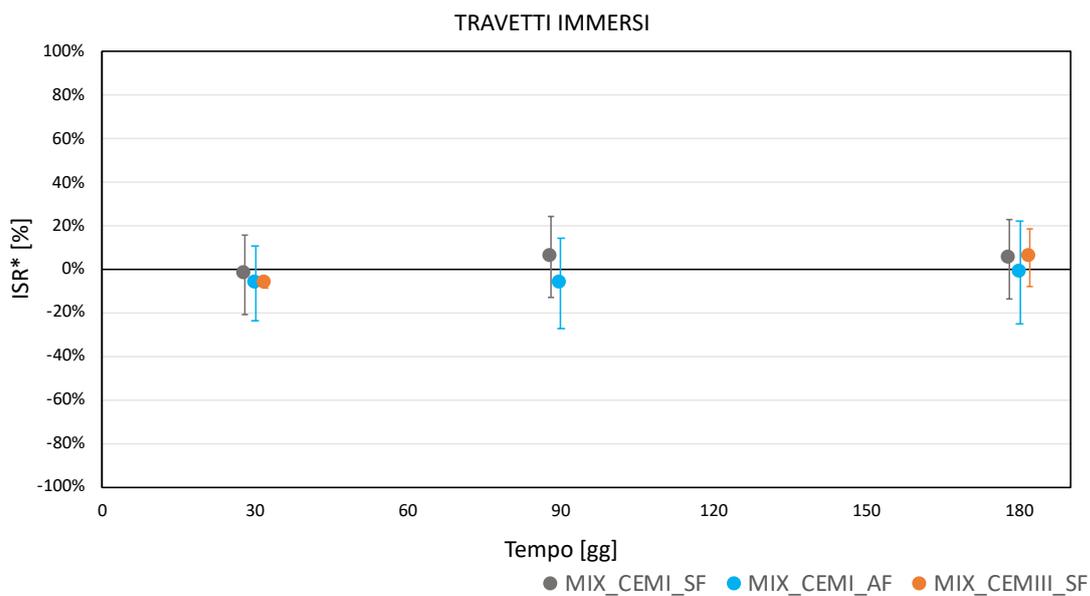


Figura 4.39: Indici ISR\* medi dei travetti immersi

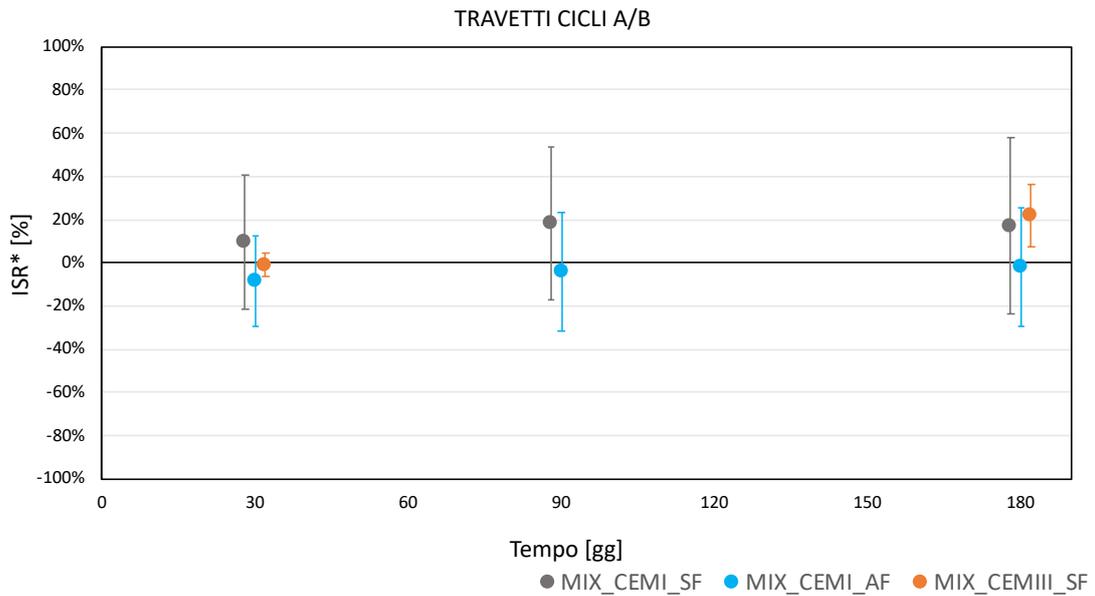


Figura 4.40: Indici ISR\* medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato

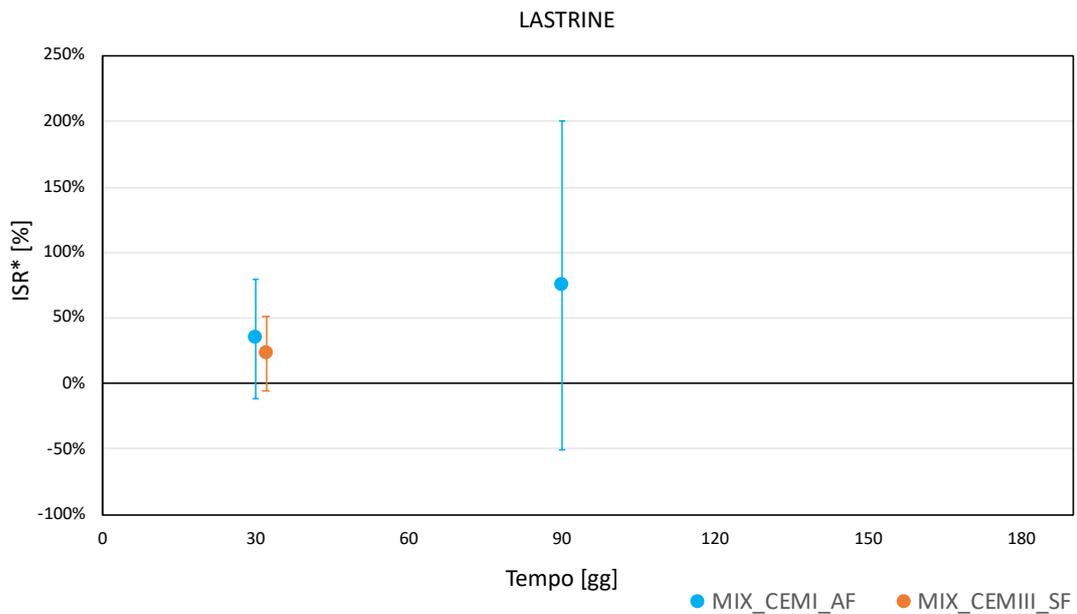


Figura 4.41: Indici ISR\* medi delle lastrine

Dai grafici soprastanti è possibile osservare come le lastrine abbiano avuto un recupero di resistenza maggiore, in relazione al comportamento medio dei materiali, fin dal primo mese. Per quanto riguarda i travetti, invece, si nota che la miscela con fibre amorfe non ha avuto un recupero di resistenza anche se a 6 mesi ha mostrato una perdita minore rispetto alle ispezioni precedenti. All'opposto, la miscela di riferimento ha manifestato un recupero di resistenza in entrambi i casi a 90 e 180 giorni mentre in corrispondenza della prima rifessurazione questo è avvenuto solo per i travetti soggetti a cicli di A/B. Allo stesso modo, per il MIX\_CEMIII\_SF

si vede, in entrambi i casi, un recupero a 6 mesi leggermente superiore a quello del MIX di riferimento. Infine, si nota come nei i provini soggetti a cicli si sono verificati recuperi di resistenza maggiori rispetto a quelli perennemente immersi.

### 4.5.3 Indice di recupero della resistenza 2 (ISR)

A differenza dell'indice precedente, in questo caso l'indice di recupero di resistenza viene definito rispetto alla curva di riferimento scalata in modo da far coincidere i punti di prima fessurazione.

Di conseguenza, l'indice ISR è stato definito come:

$$ISR [\%] = \left( \frac{\sigma_s^i}{\sigma_s^{*i}} \frac{\sigma_{1^{\circ}fess}^*}{\sigma_{1^{\circ}fess}} \right) - 1 = \frac{\sigma_s^i - \sigma_s^{*scal,i}}{\sigma_s^{*scal,i}}$$

Equazione 4.10: Definizione indice ISR

Dove:

- $\sigma_s^i$ , sforzo nominale corrispondente al punto di scarico del ciclo di fessurazione al tempo i-esimo;
- $\sigma_s^{*i}$ , sforzo nominale sulla curva di riferimento corrispondente all'apertura di fessura di scarico del ciclo di fessurazione al tempo i-esimo ( $COD_{s,i}$ );
- $\sigma_{1^{\circ}fess}$ , sforzo nominale del punto di prima fessurazione relativo alla prova di prefessurazione;
- $\sigma_{1^{\circ}fess}^*$ , sforzo nominale del punto di prima fessurazione della curva di riferimento.

Similmente a quanto visto per l'indice precedente, si possono riscontrare i seguenti casi:

- $\sigma_s^i = \sigma_s^{*scal,i} \rightarrow ISR^* = 0$ , nessun recupero di resistenza;
- $\sigma_s^i < \sigma_s^{*scal,i} \rightarrow ISR^* < 0$ , perdita di resistenza;
- $\sigma_s^i > \sigma_s^{*scal,i} \rightarrow ISR^* > 0$ , recupero di resistenza.

ESEMPIO (Tabella 4.19 e Figura 4.42):

Tempo [gg]	$\sigma_s^i$ [MPa]	$COD_{s,i}$ [mm]	$\sigma_s^{*i}$ [MPa]	$\sigma_s^{*scal,i}$ [MPa]	ISR
30	16.9	0.8075	17.4	19.6	-13.7%
90	16.4	0.978	15.9	17.9	-8.1%
180	16.3	1.1895	14.0	15.8	3.2%

Tabella 4.19: Calcolo indici ISR per il campione IA\_4

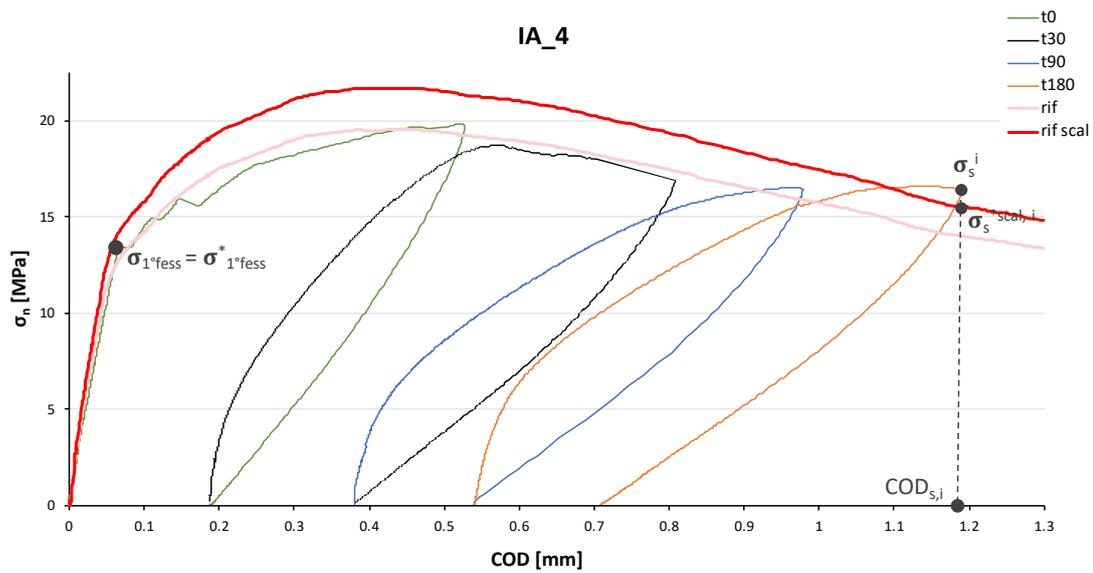


Figura 4.42: Rappresentazione grafica dei punti significativi per il calcolo dell'indice ISR

Nella figura seguente, come fatto precedentemente, si plottano i valori degli indici dei travetti del MIX\_CEMI\_AF in funzione del COD residuo. Anche in questo caso è possibile apprezzare una riduzione dell'indice all'aumentare dell'apertura di fessura.

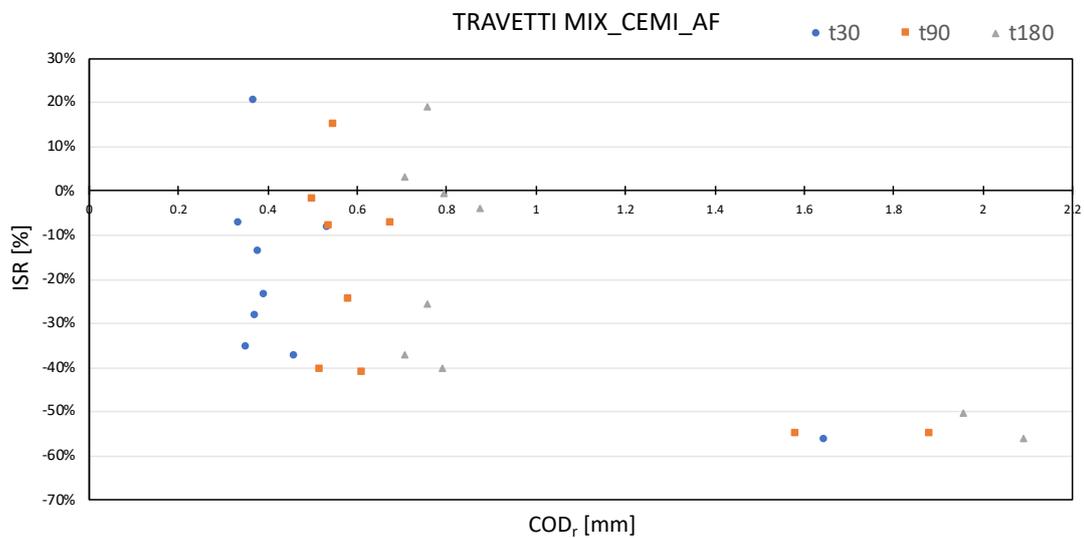


Figura 4.43: Indici ISR dei travetti del MIX\_CEMI\_AF

In APPENDICE D sono riportati i grafici e le tabelle con i valori di tale indice per ogni provino di ogni miscela.

Come prima, in Tabella 4.20 vengono raccolti i valori degli indici ISR medi e delle rispettive deviazioni standard.

Miscela	Tempo [gg]	ISR <sub>T_I</sub> [%]	$\sigma_{T_I}$ [%]	ISR <sub>A/B</sub> [%]	$\sigma_{T_{A/B}}$ [%]	ISR <sub>L</sub> [%]	$\sigma_L$ [%]
MIX 0	30	2.8%	17.4%	32.1%	22.7%	-	-
	90	11.2%	17.5%	42.6%	29.0%	-	-
	180	10.3%	17.3%	38.7%	22.6%	-	-
MIX 1	30	-20.2%	11.9%	-13.1%	25.7%	15.5%	49.1%
	90	-20.1%	15.8%	-9.3%	28.8%	50.0%	127.6%
	180	-15.8%	18.8%	-7.1%	30.2%	-	-
MIX 2	30	-9.5%	8.2%	-12.6%	6.0%	14.2%	22.2%
	90	-	-	-	-	-	-
	180	1.9%	13.5%	7.7%	14.9%	-	-

Tabella 4.20: Indici ISR medi

Nelle seguenti figure vengono plottati i valori in tabella.

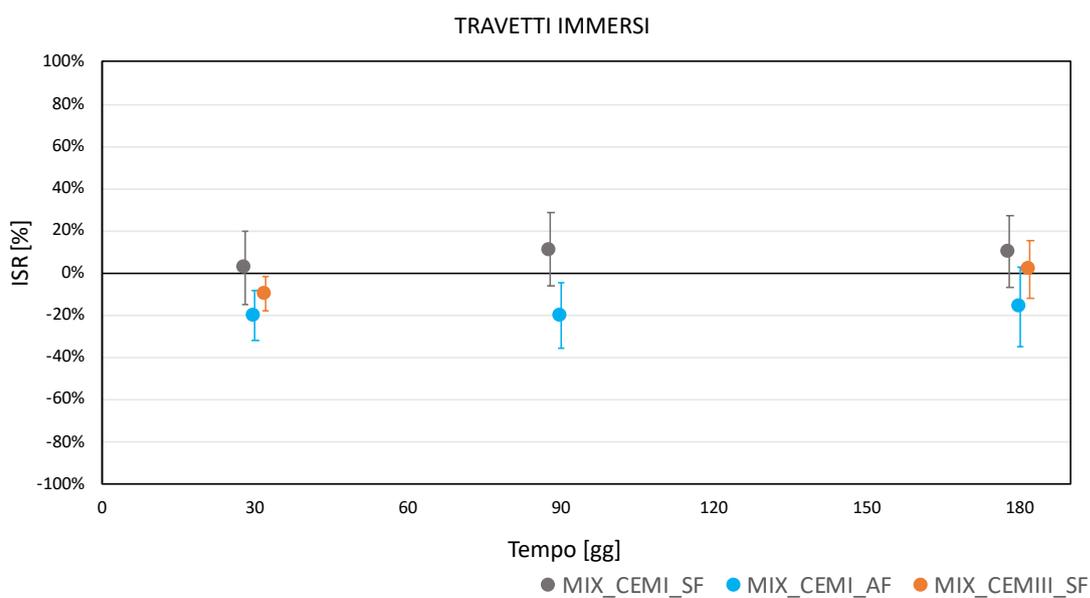


Figura 4.44: Indici ISR medi dei travetti immersi

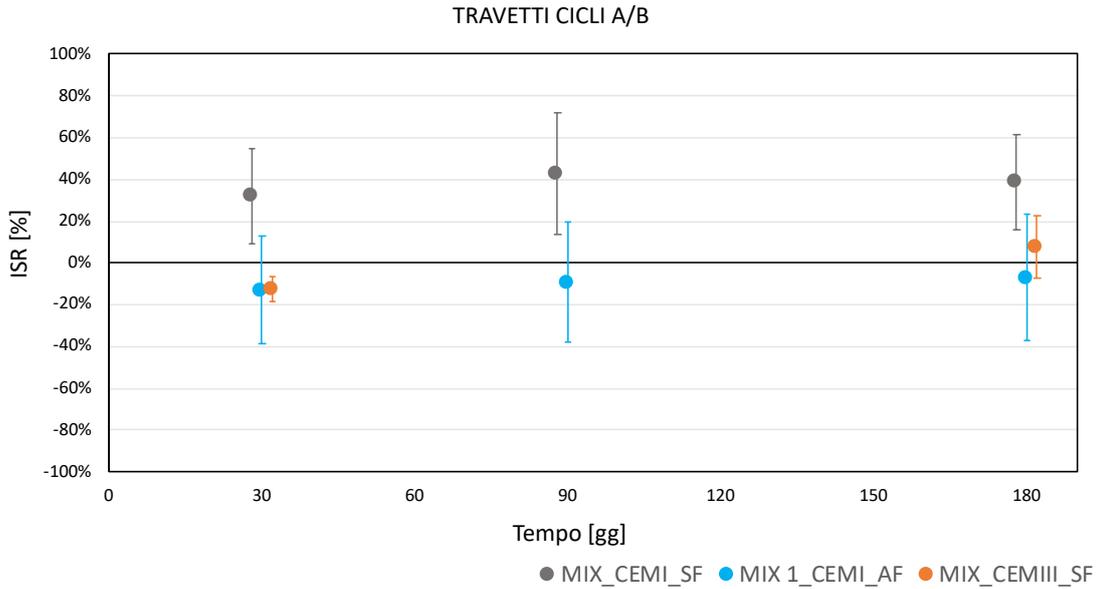


Figura 4.45: Indici ISR medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato

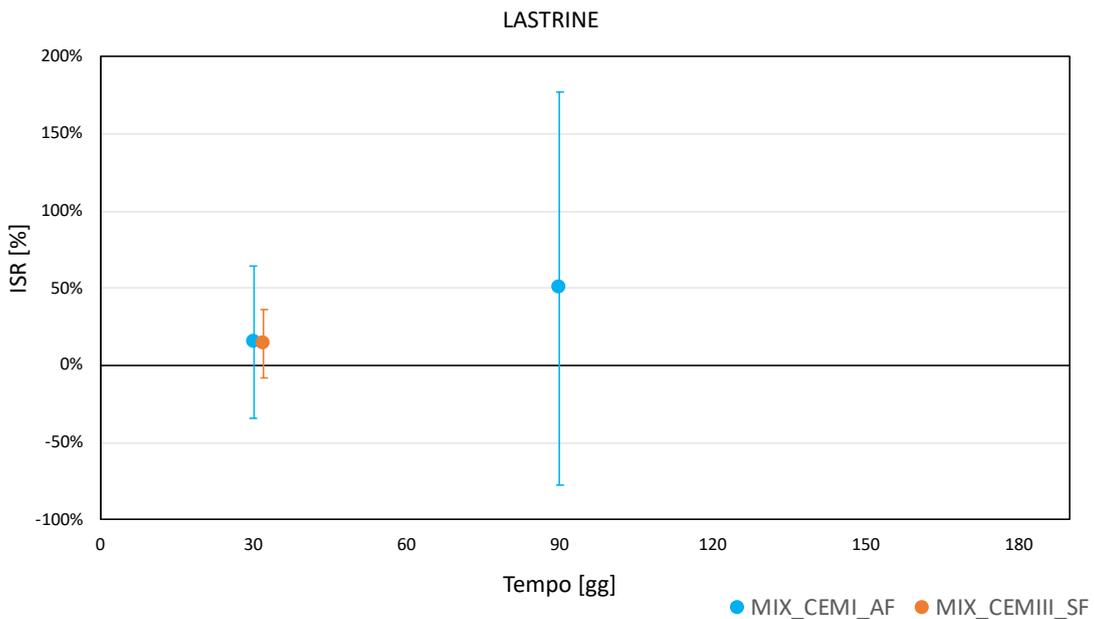


Figura 4.46: Indici ISR medi delle lastrine

Anche per questo indice, si osserva un recupero di resistenza delle lastrine. Differentemente da quanto emerso con l'indice ISR\*, i travetti composti dalla miscela di riferimento hanno presentato un recupero maggiore rispetto a quelli del MIX\_CEMIII\_SF. Più precisamente, i travetti del MIX\_CEMI\_SF hanno avuto valori maggiori rispetto all'indice precedente mentre quelli del MIX\_CEMIII\_SF hanno mostrato valori minori. Anche in questo caso i travetti formati con il MIX\_CEMI\_AF non presentano un recupero.

#### 4.5.4 Indice di recupero del danno 1 (IDaRo)

L'indice in oggetto ha lo scopo di esprimere il recupero del danno che si presenta nei materiali oggetto di studio. Esso è stato definito come il rapporto tra il recupero di rigidezza ottenuto alla rifessurazione (calcolato rispetto alla rigidezza di scarico della prefessurazione) e la perdita di rigidezza verificatasi a seguito della prefessurazione. Pertanto:

$$IDaRo [\%] = \frac{K_c^i - K_s^0}{K_c^0 - K_s^0}$$

Equazione 4.11: Definizione indice IDaRo

Dove:

- $K_c^i$ , rigidezza di carico corrispondente al ciclo di fessurazione al tempo i-esimo;
- $K_c^0$ , rigidezza di carico della curva di prefessurazione;
- $K_s^0$ , rigidezza di scarico della curva di prefessurazione.

Per tale indice si possono verificare i seguenti casi:

- $K_c^i < K_s^0 \rightarrow IDaRo < 0$ , incremento del danno;
- $K_c^i = K_s^0 \rightarrow IDaRo = 0$ , nessun recupero del danno;
- $K_c^i < K_c^0 \rightarrow 0 < IDaRo < 100\%$ , recupero parziale del danno;
- $K_c^i \geq K_c^0 \rightarrow IDaRo \geq 100\%$ , recupero totale del danno e miglioramento della rigidezza.

ESEMPIO (Tabella 4.21 e Figura 4.47):

Tempo [gg]	$K_c^i$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_c^0$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_s^0$ [N/mm <sup>3</sup> ]	IDaRo
30	177.9	207.4	57.9	80.3%
90	144.4	207.4	57.9	57.8%
180	198.1	207.4	57.9	93.8%

Tabella 4.21: Calcolo indici IDaRo per il campione IA\_4

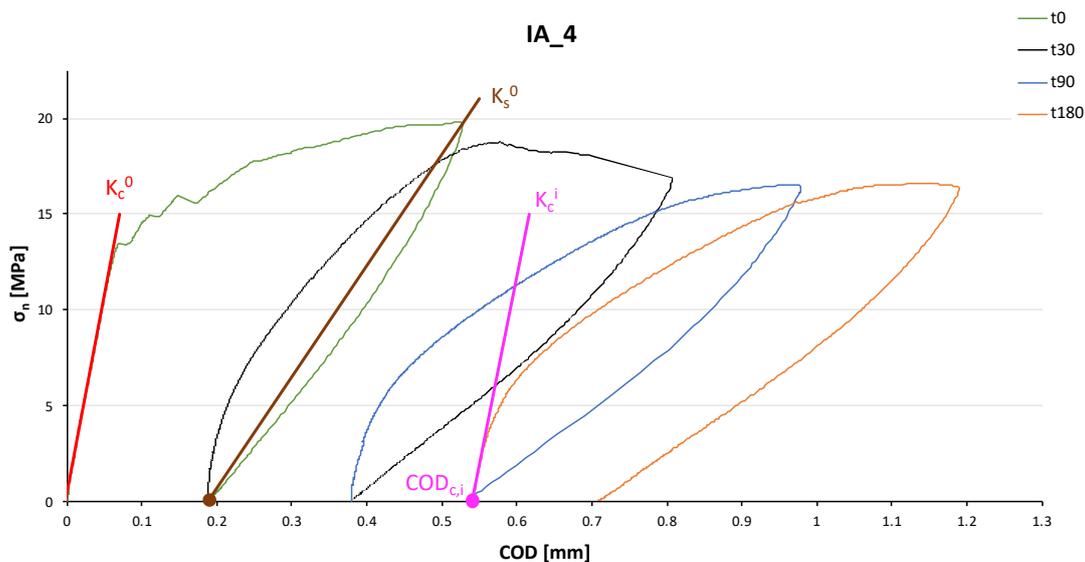


Figura 4.47: Rappresentazione grafica dei parametri significativi per il calcolo dell'indice IDaRo

In Figura 4.48 sono raccolti i valori dell'indice IDaRo per i travetti del MIX\_CEMI\_AF in funzione dell'apertura di fessura al momento di carico ( $COD_c$ ). Come riscontrato per gli indici precedenti, si ha una riduzione dell'indice all'aumentare del COD.

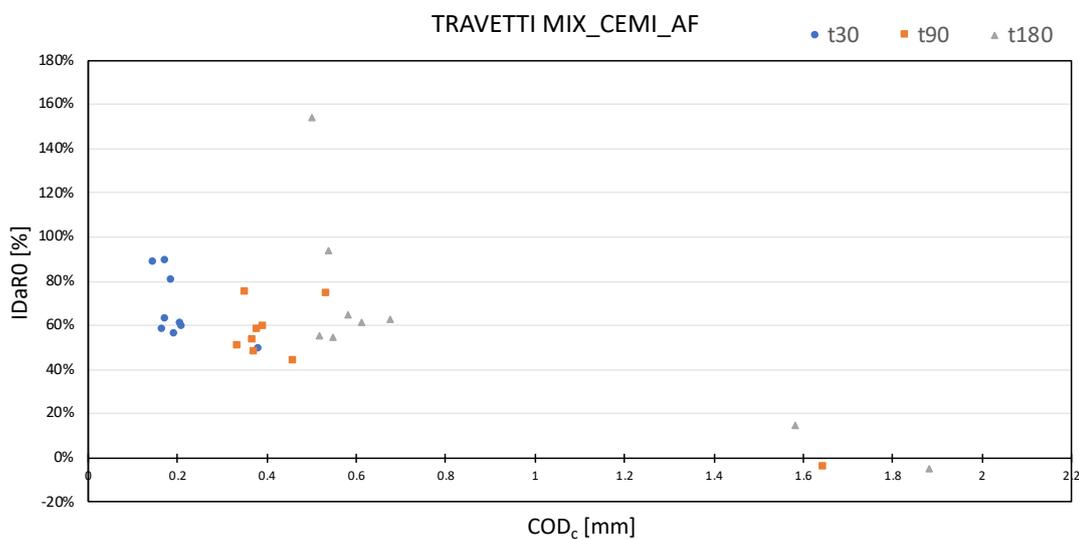


Figura 4.48: Indici IDaRo dei travetti del MIX\_CEMI\_AF

In APPENDICE D sono riportati i grafici e le tabelle con i valori di tale indice per ogni provino di ogni miscela.

In Tabella 4.22 sono riportati i valori degli indici IDaRo medi e delle rispettive deviazioni standard. A seguire, tali valori vengono rappresentati graficamente per facilitarne l'interpretazione.

Miscela	Tempo [gg]	IDaRo <sub>T_I</sub> [%]	$\sigma_{T_I}$ [%]	IDaRo <sub>A/B</sub> [%]	$\sigma_{T_{A/B}}$ [%]	IDaRo <sub>L</sub> [%]	$\sigma_L$ [%]
MIX 0	30	60.0%	19.2%	52.0%	27.3%	-	-
	90	47.1%	35.9%	34.9%	20.3%	-	-
	180	73.8%	37.5%	59.5%	24.7%	-	-
MIX 1	30	69.3%	18.6%	65.4%	13.0%	37.2%	23.3%
	90	66.6%	9.2%	38.2%	24.0%	53.0%	18.6%
	180	69.3%	16.8%	31.4%	31.7%	51.1%	16.4%
MIX 2	30	71.9%	10.1%	66.5%	8.9%	76.1%	20.0%
	90	-	-	-	-	-	-
	180	82.0%	19.0%	65.1%	10.2%	89.0%	15.0%

Tabella 4.22: Indici IDaRo medi

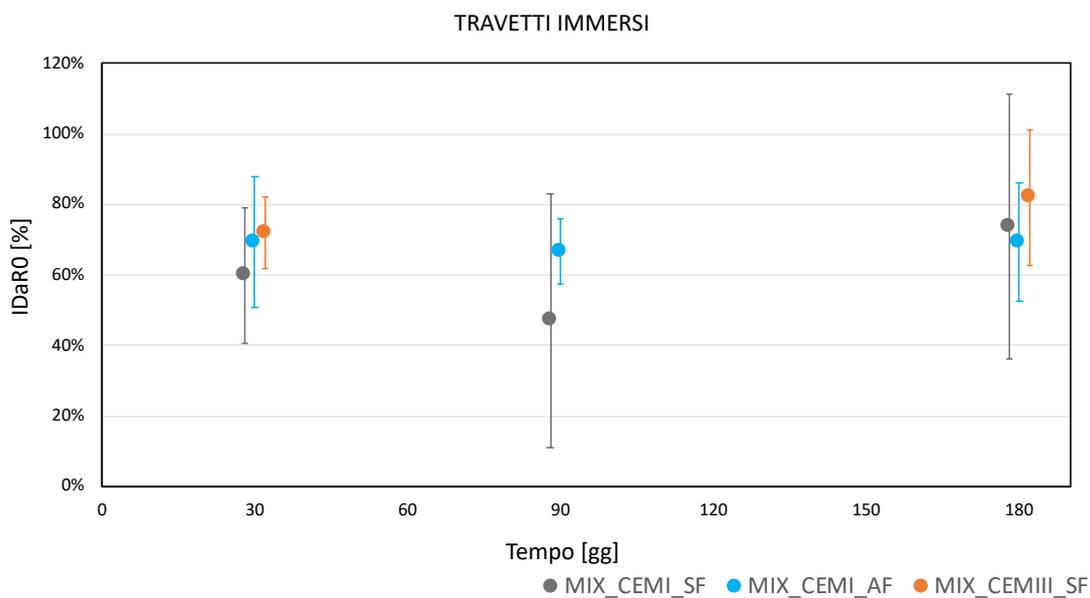


Figura 4.49: Indici IDaRo medi dei travetti immersi

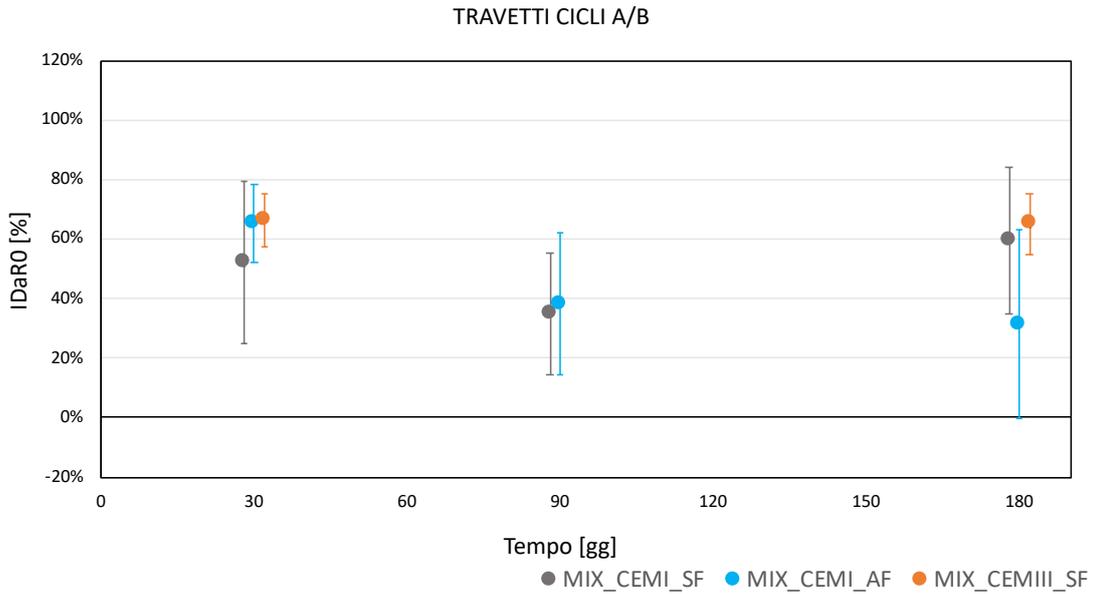


Figura 4.50: Indici IDaRo medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato

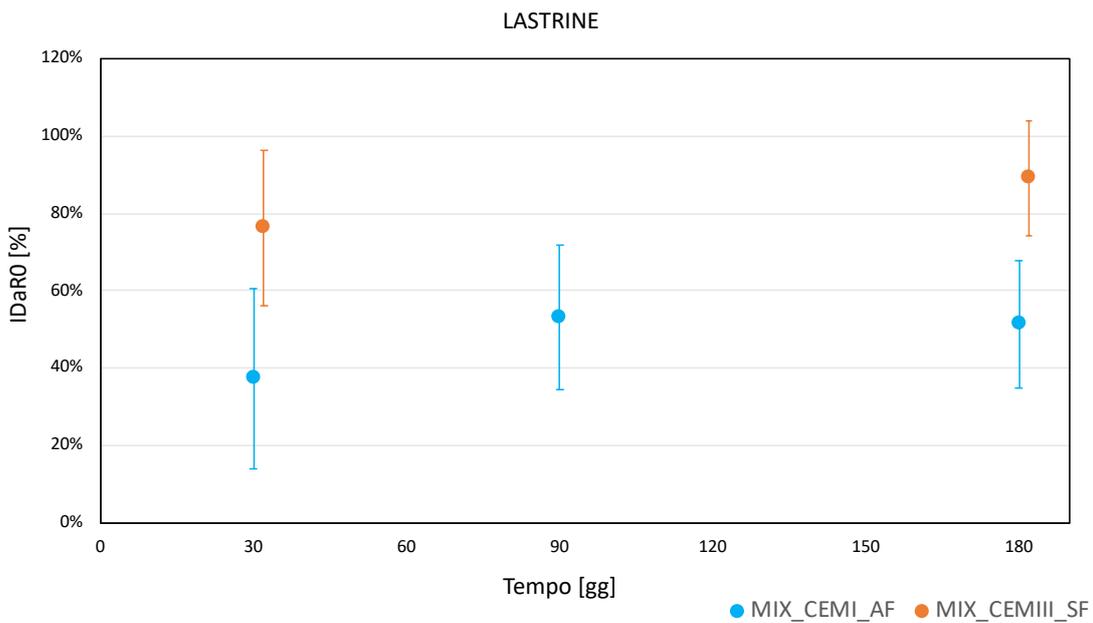


Figura 4.51: Indici IDaRo medi delle lastrine

Dai grafici sopra inseriti è possibile vedere come tutti e tre i materiali hanno presentato un recupero del danno. Nello specifico, le lastrine del MIX\_CEMIII\_SF hanno avuto un recupero maggiore rispetto a quelle del MIX con fibre amorfe. Per i travetti, invece, si è manifestato un recupero piuttosto confrontabile tra le tre miscele anche se il composto cementizio di riferimento ha avuto un recupero minore rispetto agli altri due MIX per i primi due periodi d'investigazione. È doveroso sottolineare come i valori più alti dell'indice IDaRo siano stati raggiunti dalla miscela costituita dal CEMIII. Infine, è interessante notare come i travetti

immersi abbiano presentato valori di recupero del danno maggiori contrariamente da quanto si è verificato per gli indici di recupero della resistenza.

### 4.5.5 Indice di recupero del danno 2 (IDaR)

A differenza dell'indice di danno definito nel paragrafo precedente, in questo caso si è scelto di valutare il recupero del danno rispetto al ciclo di fessurazione precedente. Di conseguenza, l'indice in questione è stato definito come:

$$IDaR [\%] = \frac{K_c^i - K_s^{i-1}}{K_c^{i-1} - K_s^{i-1}}$$

Equazione 4.12: Definizione indice IDaR

Dove:

- $K_c^i$ , rigidezza di carico corrispondente al ciclo di fessurazione al tempo i-esimo;
- $K_c^{i-1}$ , rigidezza di carico corrispondente al ciclo di fessurazione avvenuto precedentemente rispetto al tempo investigato (i-1);
- $K_s^{i-1}$ , rigidezza di scarico corrispondente al ciclo di fessurazione avvenuto precedentemente rispetto al tempo investigato (i-1).

Per tale indice si possono verificare i seguenti casi:

- $K_c^i = K_s^{i-1} \rightarrow IDaR = 0$ , nessun recupero del danno;
- $K_c^i < K_c^{i-1} \rightarrow 0 < IDaR < 100\%$ , recupero parziale del danno;
- $K_c^i \geq K_c^{i-1} \rightarrow IDaR \geq 100\%$ , recupero totale del danno e miglioramento della rigidezza.

Per tale indice è improbabile ottenere valori negativi in quanto vorrebbe dire che la rigidezza di scarico allo step di fessurazione precedente ( $K_s^{i-1}$ ) risulti maggiore della rigidezza di carico dello step di fessurazione successivo ( $K_c^i$ ).

ESEMPIO (Tabella 4.23 e Figura 4.52)

Tempo [gg]	$K_c^i$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_c^{i-1}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_s^{i-1}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	IDaR
30	177.9	207.4	57.9	80.3%
90	144.4	177.9	39.3	75.8%
180	198.1	144.4	37.2	150.2%

Tabella 4.23: Calcolo indici IDaR per il campione IA\_4

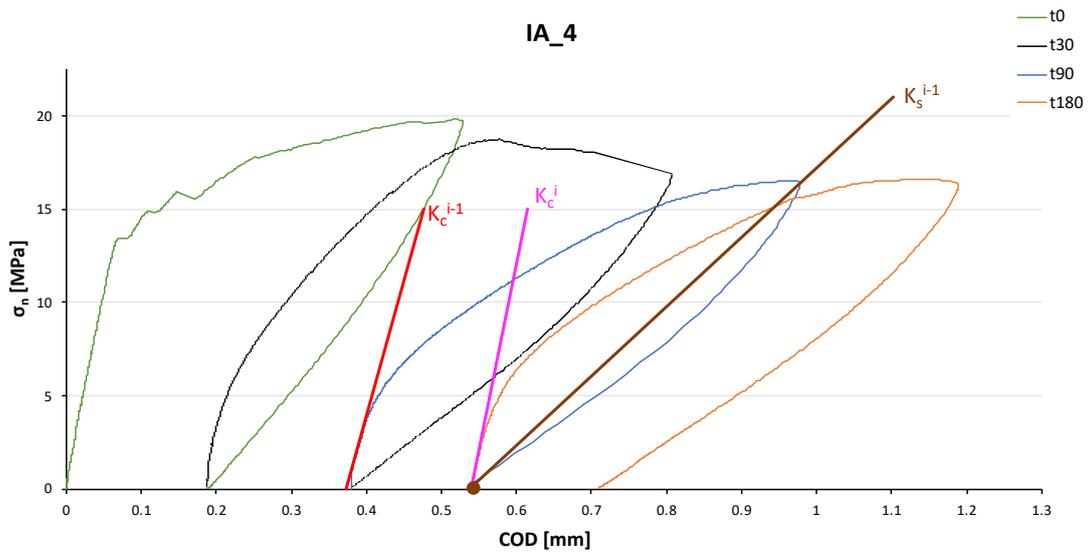


Figura 4.52: Rappresentazione grafica dei parametri significativi per il calcolo dell'indice IDaR

Come fatto precedentemente, nella figura seguente si riportano i valori degli indici IDaR dei travetti del MIX\_CEMI\_AF in funzione dl COD di carico.

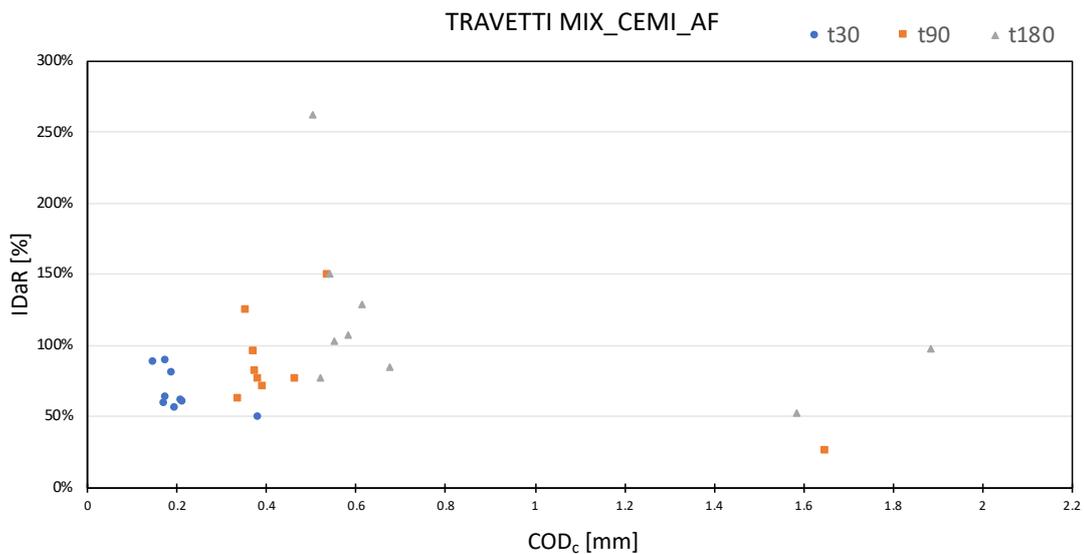


Figura 4.53: Indici IDaR dei travetti del MIX\_CEMI\_AF

In APPENDICE D sono riportati i grafici e le tabelle con i valori di tale indice per ogni provino di ogni miscela.

Successivamente, in Tabella 4.24 e in Figura 4.54, Figura 4.55 e Figura 4.56 sono riportati i valori degli indici IDaR medi e delle rispettive deviazioni standard.

Miscela	Tempo [gg]	IDaR <sub>T_I</sub> [%]	$\sigma_{T_I}$ [%]	IDaR <sub>A/B</sub> [%]	$\sigma_{T_{A/B}}$ [%]	IDaR <sub>L</sub> [%]	$\sigma_L$ [%]
MIX 0	30	60.0%	19.2%	52.0%	27.3%	-	-
	90	79.6%	29.8%	74.0%	13.7%	-	-
	180	128.9%	54.2%	152.4%	30.8%	-	-
MIX 1	30	69.3%	18.6%	65.4%	13.0%	37.2%	23.3%
	90	105.2%	38.2%	68.1%	26.9%	130.9%	42.6%
	180	104.9%	32.8%	95.2%	31.6%	117.8%	21.8%
MIX 2	30	71.9%	10.1%	66.5%	8.9%	76.1%	20.0%
	90	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.24: Indici IDaR medi

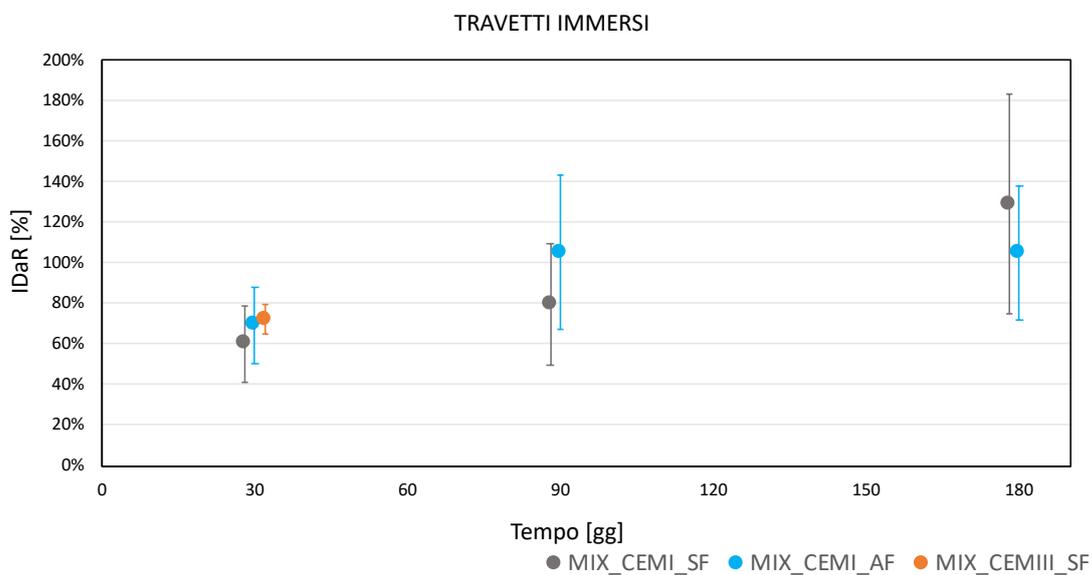


Figura 4.54: Indici IDaR medi dei travetti immersi

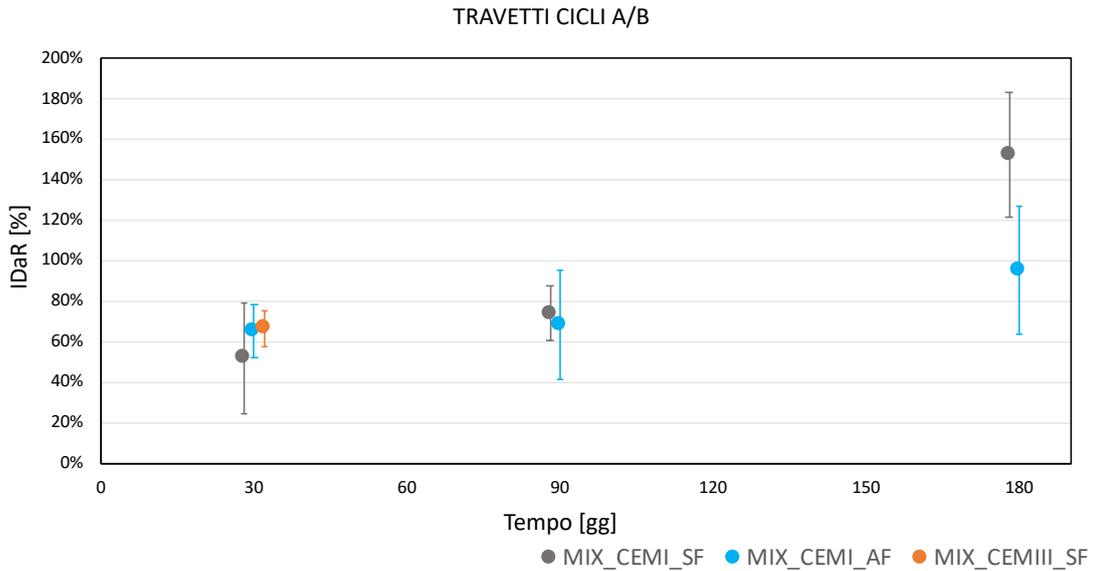


Figura 4.55: Indici IDaR medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato

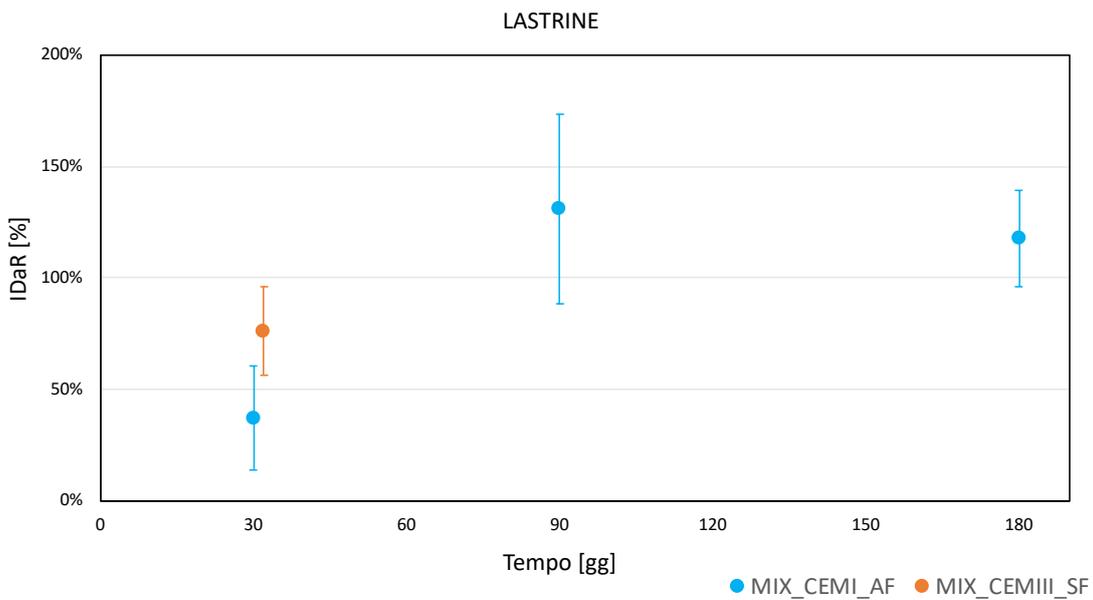


Figura 4.56: Indici IDaR medi delle lastrine

Nei grafici soprastanti, si evince facilmente come da uno step di tempo all'altro si sia verificato un recupero del danno, nonostante le rifessurazioni indotte ai campioni.

In particolare, dalla Figura 4.56 si vede come per le lastrine composte dalla miscela con fibre amorfe il recupero maggiore del danno rispetto allo step precedente si sia verificato nell'arco di tempo compreso tra il primo e il terzo mese. In Figura 4.54, sempre per il MIX\_CEMI\_AF, si evidenzia un recupero e un miglioramento della rigidità già dal terzo mese, mentre per il MIX di riferimento questo miglioramento si manifesta solo al sesto mese, seppur in maniera molto più rilevante rispetto a quello del MIX\_CEMI\_AF. Infine, per i travetti del

MIX\_CEMI\_SF soggetti a cicli di asciutto/bagnato si è ottenuto ancora un miglioramento esclusivamente al sesto mese. Tuttavia, in questo caso, quelli del MIX\_CEMI\_AF hanno mostrato un recupero quasi totale ma non un miglioramento.

### 4.5.6 Rapporto delle rigidezze 1 (StRo)

L'obiettivo di tale rapporto è quello di valutare l'andamento della rigidezza di carico nel tempo, prendendo come riferimento il valore di rigidezza di carico del materiale vergine. Questo rapporto è stato definito come:

$$StRo [\%] = \frac{K_c^i}{K_c^0} - 1$$

Equazione 4.13: Definizione indice StRo

Dove:

- $K_c^i$ , rigidezza di carico corrispondente al ciclo di fessurazione al tempo i-esimo;
- $K_c^0$ , rigidezza di carico della curva di prefessurazione.

Per il rapporto StRo si possono presentare le seguenti situazioni:

- $K_c^i = K_c^0 \rightarrow StRo = 0$ , recupero totale della rigidezza di carico;
- $K_c^i < K_c^0 \rightarrow -100\% < StRo < 0$ , riduzione della rigidezza di carico;
- $K_c^i > K_c^0 \rightarrow StRo > 0$ , recupero e incremento della rigidezza di carico.

Di conseguenza, più tale indice si allontana da 0 per  $K_c^i < K_c^0$  più la rigidezza allo step di fessurazione i-esimo è minore rispetto a quella iniziale. Accade il contrario quando  $K_c^i > K_c^0$ . Perciò, anche se l'indice StRo assume valori minori di zero, studiando la sua variazione nel tempo, è possibile percepire se il materiale presenta un recupero di rigidezza.

ESEMPIO:

Per capire più facilmente come sono state determinate le rigidezze presenti Equazione 4.13, si può far riferimento alla Figura 4.47. Qui di seguito si riporta solo la tabella dove sono raccolti i valori di rigidezza e del rapporto STRo calcolati per il provino considerato negli esempi precedenti (IA\_4).

Tempo [gg]	$K_c^i$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_c^0$ [N/mm <sup>3</sup> ]	StRo
30	177.9	207.4	-14.2%
90	144.4	207.4	-30.4%
180	198.1	207.4	-4.5%

Tabella 4.25: Calcolo indici StRo per il campione IA\_4

A seguire, come proposto per gli indici definiti prima, si riportano i valori di tale rapporto per tutti i travetti del MIX\_CEMI\_AF in funzione dell'apertura di fessura di carico. In APPENDICE D è possibile trovare tutti i grafici per ogni tipo di provino

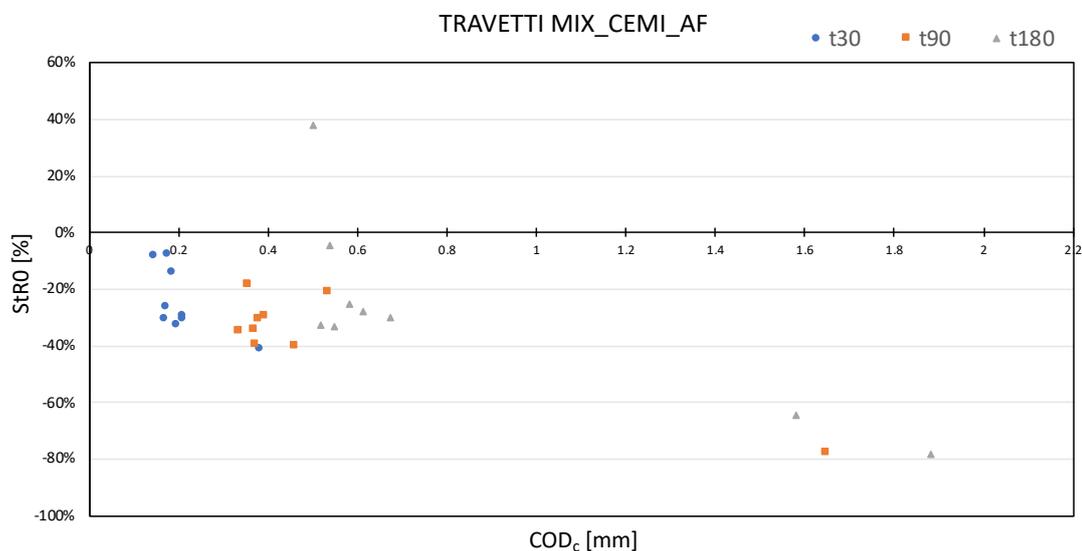


Figura 4.57: Indici StRo dei travetti del MIX\_CEMI\_AF

Infine, in Tabella 4.26 e nelle figure a seguire, sono riportati i valori dei rapporti StRo medi e delle rispettive deviazioni standard.

Miscela	Tempo [gg]	StRo <sub>T_I</sub> [%]	$\sigma_{T_I}$ [%]	StRo <sub>A/B</sub> [%]	$\sigma_{T_{A/B}}$ [%]	StRo <sub>L</sub> [%]	$\sigma_L$ [%]
MIX 0	30	-27.6%	14.2%	-33.1%	19.0%	-	-
	90	-36.9%	24.9%	-44.9%	14.4%	-	-
	180	-17.7%	26.2%	-27.9%	17.1%	-	-
MIX 1	30	-23.6%	15.3%	-25.5%	9.9%	-45.7%	17.5%
	90	-24.8%	6.0%	-45.5%	18.3%	-34.1%	14.6%
	180	-23.2%	12.9%	-33.2%	45.1%	-36.1%	14.1%
MIX 2	30	-19.5%	7.3%	-23.4%	6.0%	-15.9%	13.7%
	90	-	-	-	-	-	-
	180	-12.6%	13.2%	-24.4%	7.3%	-7.2%	10.0%

Tabella 4.26: Indici StRo medi

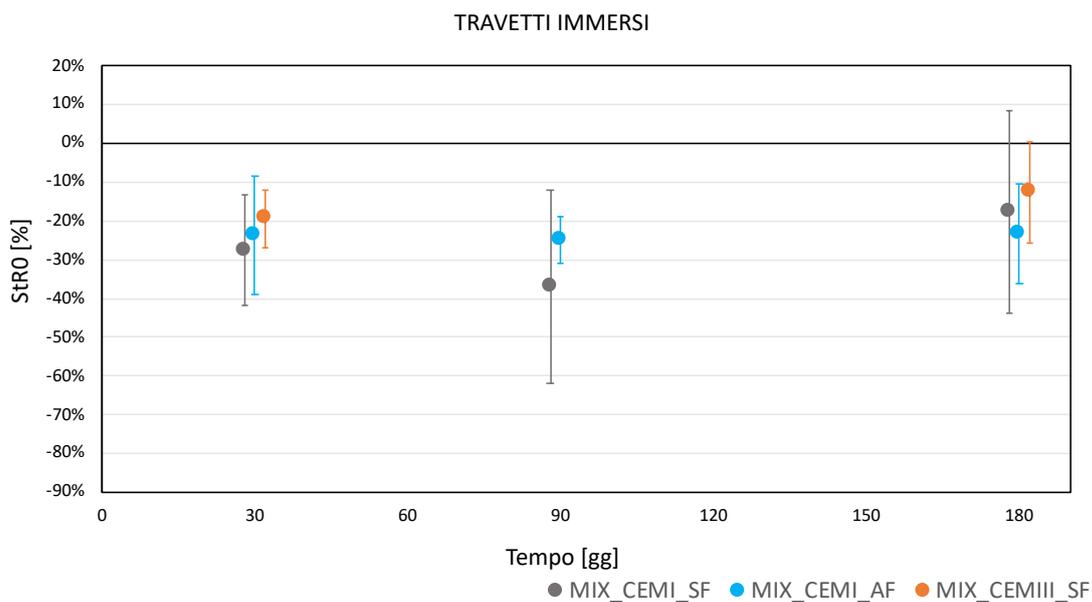


Figura 4.58: Indici StRO medi dei travetti immersi

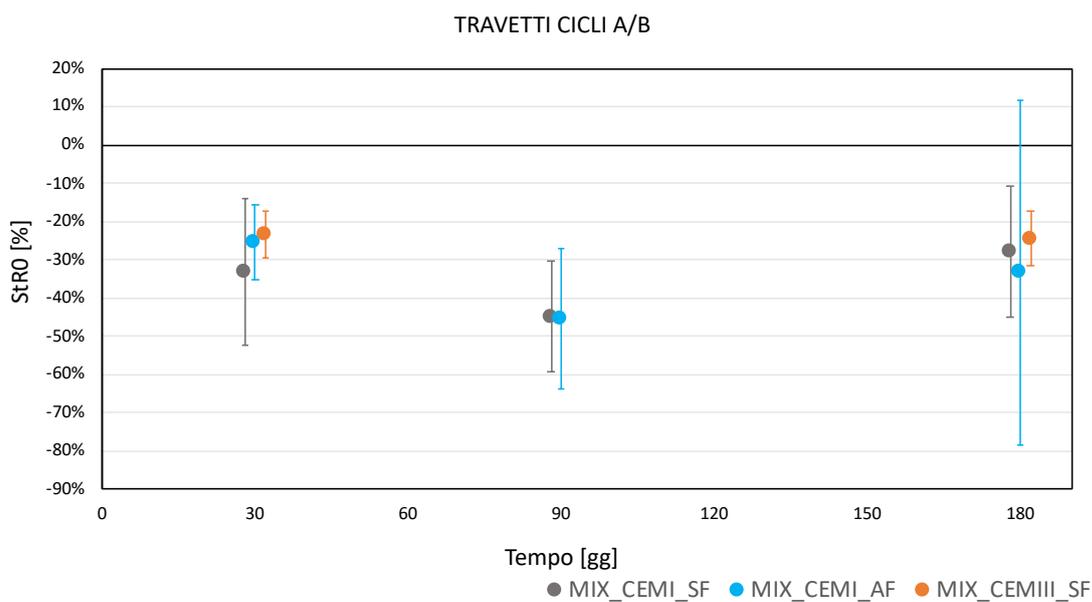


Figura 4.59: Indici StRO medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato

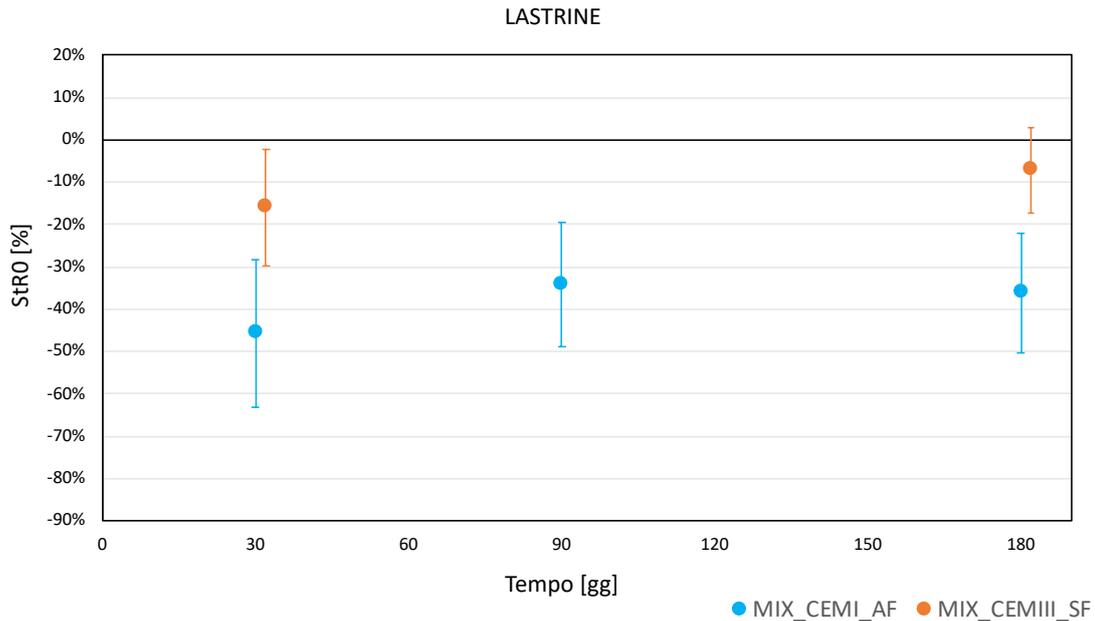


Figura 4.60: Indici StRo medi delle lastrine

Come si può vedere, l'andamento del rapporto tra i travetti immersi e quelli sottoposti a cicli è stato lo stesso, anche se i primi hanno mostrato valori più vicini allo 0 e, dopo una riduzione di rigidità fino a 90 giorni vi è stata una ripresa di questa per l'ultimo tempo investigato. Un discorso a parte va fatto per i travetti immersi del MIX\_CEMI\_AF dove il valore dell'indice è rimasto costante nel tempo. Per le lastrine con fibre amorfe, invece, si è verificata una ripresa di rigidità già dal terzo mese per poi rimanere pressoché costante. Infine, al sesto mese è apprezzabile un recupero di rigidità quasi totale delle lastrine del MIX\_CEMIII\_SF.

#### 4.5.7 Rapporto delle rigidità 2 (StR)

Il rapporto StR rispetto al quello precedente, ha lo scopo di studiare la variazione delle rigidità di carico da uno step all'altro di fessurazione. Perciò, invece che riportare la rigidità di carico del tempo  $i$ -esimo con quella del materiale vergine, si confronta con quella dello step precedente. Tale indice è stato definito come:

$$StR [\%] = \frac{K_c^i}{K_c^{i-1}} - 1$$

Tabella 4.27: Definizione indice StR

Dove:

- $K_c^i$ , rigidità di carico corrispondente al ciclo di fessurazione al tempo  $i$ -esimo;
- $K_c^{i-1}$ , rigidità di carico corrispondente al ciclo di fessurazione avvenuto prima del tempo investigato ( $i-1$ ).

Per il rapporto StRo si possono presentare le seguenti situazioni:

- $K_c^i = K_c^{i-1} \rightarrow StR = 0$ , recupero totale della rigidezza di carico rispetto a quella del ciclo di fessurazione precedente;
- $K_c^i < K_c^{i-1} \rightarrow -100\% < StR < 0$ , riduzione della rigidezza di carico rispetto a quella del ciclo di fessurazione precedente;
- $K_c^i > K_c^{i-1} \rightarrow StR > 0$ , recupero e incremento della rigidezza rispetto a quella del ciclo di fessurazione precedente.

ESEMPIO:

Per questo caso, la nomenclatura utilizzata è raffigurata in Figura 4.52. In Tabella 4.28, invece, si riporta il calcolo del rapporto StR per il campione IA\_4.

Tempo [gg]	$K_c^i$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_c^{i-1}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	StR
30	177.9	207.4	-14.2%
90	144.4	177.9	-18.9%
180	198.1	144.4	37.2%

Tabella 4.28: Calcolo indici StR per il campione IA\_4

In Figura 4.61 si raccolgono i valori dell'indice preso in esame in funzione dell'apertura di fessura di carico del MIX 1. Come già riscontrato negli indici precedenti, all'aumentare del COD si ha una riduzione dell'indice.

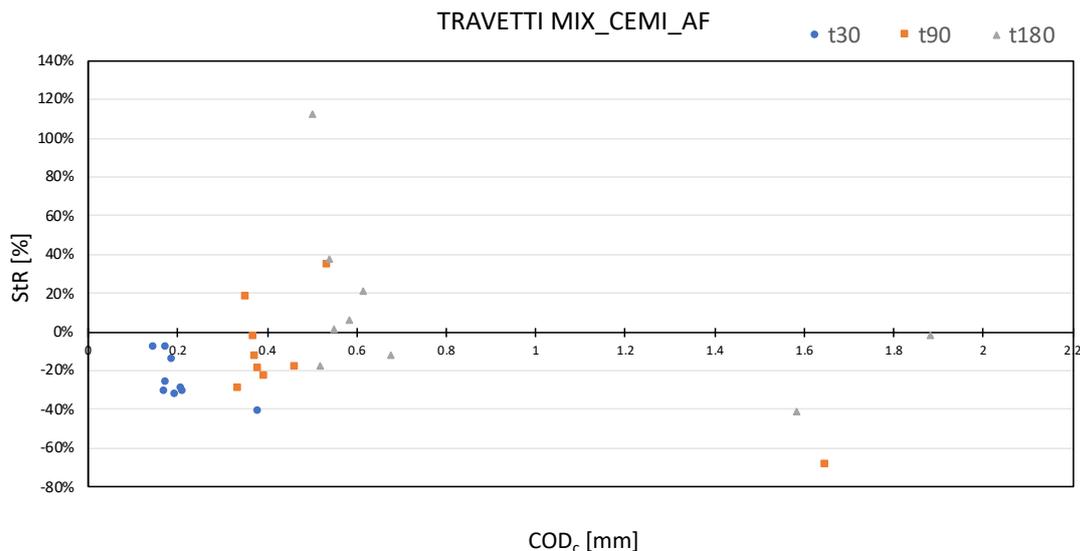


Figura 4.61: Indici StR dei travetti del MIX\_CEMI\_AF

In APPENDICE D sono riportati i restanti grafici di questo tipo e le tabelle nelle quali sono raccolti i valori di tale indice per ogni provino.

In Tabella 4.29 si riportano i valori medi dei rapporti StR e delle rispettive deviazioni standard. Tali valori vengono poi plottati in Figura 4.62, Figura 4.63 e Figura 4.64.

Miscela	Tempo [gg]	StR <sub>T_I</sub> [%]	$\sigma_{T_I}$ [%]	StR <sub>A/B</sub> [%]	$\sigma_{T_{A/B}}$ [%]	StR <sub>L</sub> [%]	$\sigma_L$ [%]
MIX 0	30	-27.6%	14.2%	-33.1%	19.0%	-	-
	90	-14.4%	20.8%	-17.1%	10.0%	-	-
	180	40.9%	60.5%	33.3%	20.1%	-	-
MIX 1	30	-23.6%	15.3%	-25.5%	9.9%	-45.7%	17.5%
	90	2.5%	28.3%	-26.4%	25.4%	16.8%	26.6%
	180	3.4%	24.6%	18.3%	57.1%	10.0%	13.4%
MIX 2	30	-19.5%	7.3%	-23.4%	6.0%	-15.9%	13.7%
	90	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.29: Indici StR medi

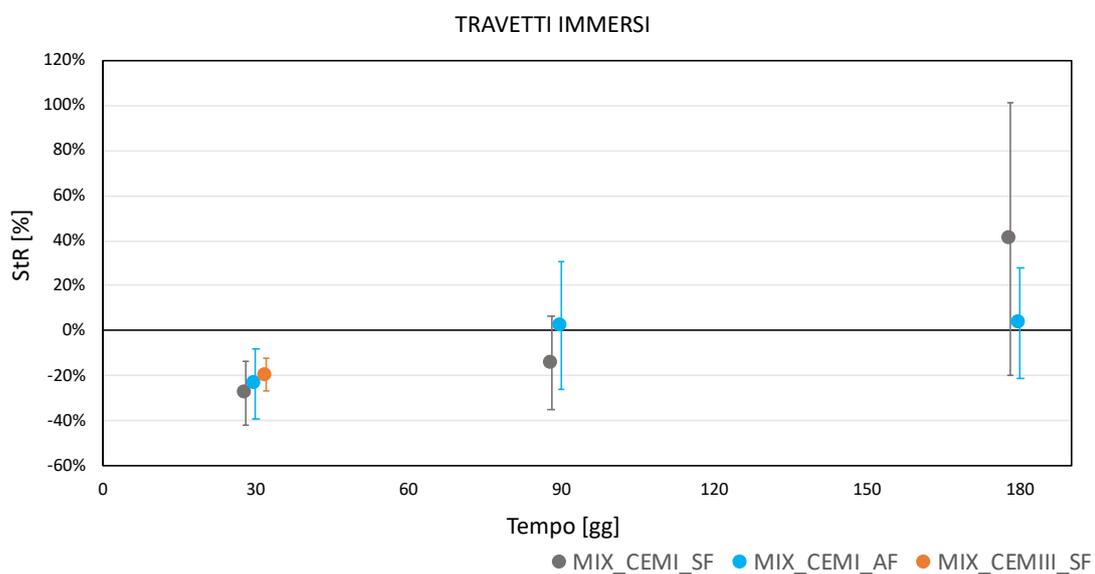


Figura 4.62: Indici StR medi dei travetti immersi

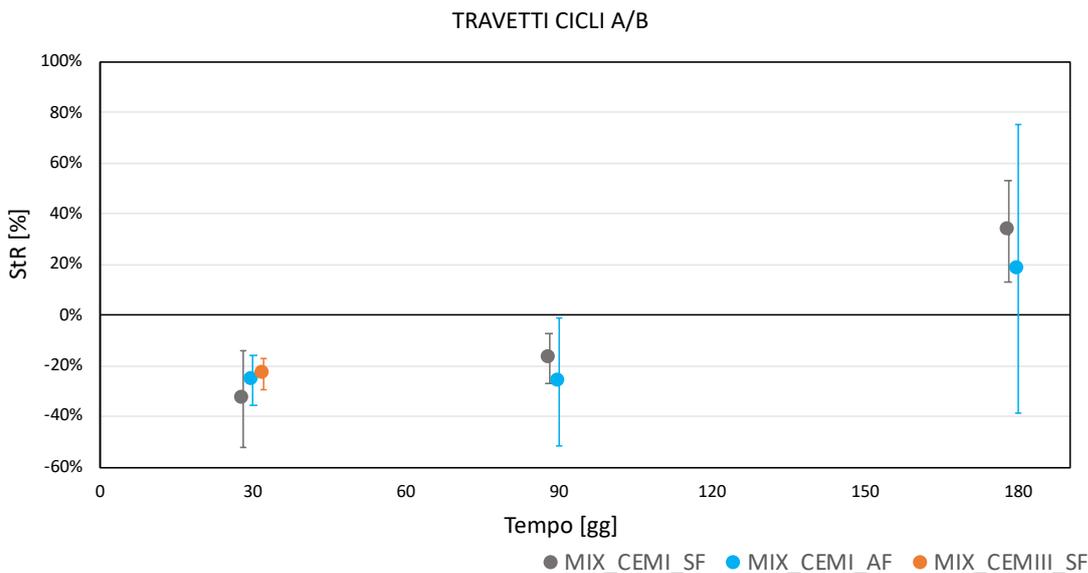


Figura 4.63: Indici StR medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato

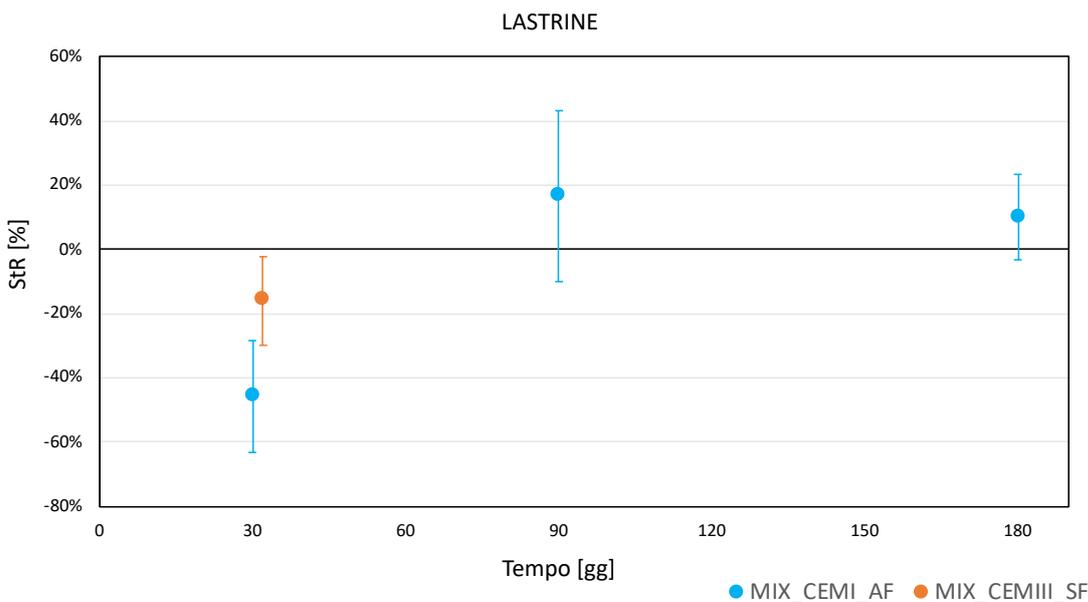


Figura 4.64: Indici StR medi delle lastrine

Come fatto poc'anzi, esaminiamo i risultati ottenuti. Rispetto all'indice StRo, con il rapporto StR è possibile notare con più facilità il fatto che per i travetti, dopo al primo mese, si sono verificate riduzioni di rigidezze minori rispetto agli step precedenti e, in particolare, si è ottenuto un miglioramento delle rigidezze di carico passando dal terzo al sesto mese. Diversamente, per le lastrine del MIX\_CEMI\_AF, si è constatato un recupero di rigidezza maggiore passando dal primo al terzo mese.

## 4.5.8 Indice di recupero della rigidezza (IStR)

L'obiettivo dell'indice che ci apprestiamo a presentare ha lo scopo di valutare il recupero di rigidezza che hanno avuto i provini, soggetti alle fessurazioni e sottoposti ad ambienti d'esposizione diversi, rispetto alle rigidezze dei campioni vergini sottoposti a cicli di carico scarico. Nel dettaglio, tale indice è stato valutato come:

$$IStR [\%] = \left( \frac{K_c^i}{K_s^{*i}} \frac{K_c^{*0}}{K_c^0} \right) - 1 = \frac{K_c^i}{K_s^{*i,n}} - 1$$

Equazione 4.14: Definizione indice IStR

Dove:

- $K_c^i$ , rigidezza di carico corrispondente al ciclo di fessurazione al tempo i-esimo;
- $K_c^0$ , rigidezza di carico della curva di prefessurazione;
- $K_s^{*i}$ , rigidezza di carico del provino vergine in corrispondenza dell'apertura di fessura di carico del ciclo di fessurazione al tempo i-esimo ( $COD_{c,i}$ );
- $K_c^{*0}$ , rigidezza di carico del provino vergine.

Il termine  $\frac{K_c^{*0}}{K_c^0}$  ha lo scopo di normalizzare la rigidezza di carico di riferimento a quella del provino prefessurato.

Per l'indice in questione si possono ottenere i seguenti valori:

- $K_c^i = K_s^{*i,n} \rightarrow IStR = 0$ , nessun recupero di rigidezza di carico;
- $K_c^i < K_s^{*i,n} \rightarrow IStR < 0$ , perdita di rigidezza di carico;
- $K_c^i > K_s^{*i,n} \rightarrow IStR > 0$ , recupero di rigidezza di carico.

Di seguito, si riporta un esempio illustrativo che riguarda il calcolo degli indici IStR, in riferimento al solito provino (IA\_4).

Tempo [gg]	$K_c^i$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_c^0$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$COD_{c,i}$ [mm]	$K_c^{*i}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_c^{*0}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	IStR
30	177.9	207.4	0.188	155.4	225.4	24.4%
90	144.4	207.4	0.380	132.6	225.4	18.4%
180	198.1	207.4	0.540	118.0	225.4	82.5%

Tabella 4.30: Calcolo indici IStR per il campione IA\_4

Per la determinazione della rigidezza di carico della fessurazione i-esima ( $K_c^i$ ) e di quella di prefessurazione ( $K_c^0$ ) si può far riferimento alla Figura 4.47. I valori di  $K_s^{*i}$ , invece, sono stati ricavati dall'equazione rappresentante la variazione di rigidezza in funzione del COD di carico, valutata come mostrato nel paragrafo 4.1.2.

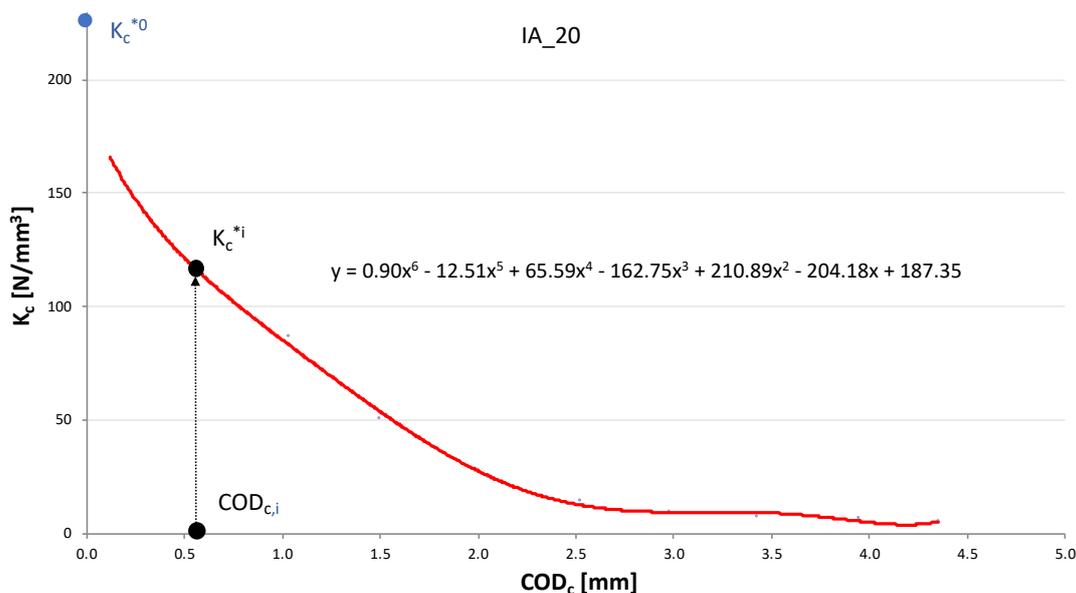


Figura 4.65: Valutazione delle rigidezze di carico del materiale vergine

Nella seguente figura sono riportati i valori dell'indice IStR dei travetti del MIX 1 in funzione dell'apertura di fessura di carico. A differenza di quanto visto per gli indici precedenti, in questo caso si nota come l'indice in questione, per fessurazioni dopo il primo mese, conserva un valore piuttosto costante al variare del COD di carico.

I restanti grafici sono stati riportati in APPENDICE D.

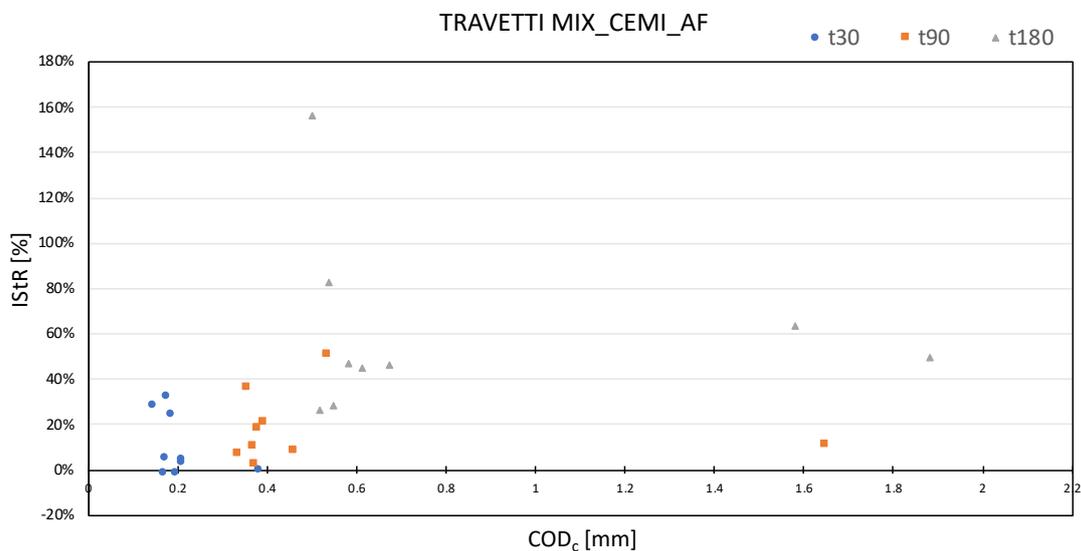


Figura 4.66: Indici IStR dei travetti del MIX\_CEMI\_AF

Infine, in Tabella 4.31 e nelle figure a seguire, vengono riportati i valori medi dell'indice considerato e le corrispondenti deviazioni standard.

Miscela	Tempo [gg]	IStR <sub>T_I</sub> [%]	$\sigma_{T_I}$ [%]	IStR <sub>A/B</sub> [%]	$\sigma_{T_{A/B}}$ [%]	IStR <sub>L</sub> [%]	$\sigma_L$ [%]
MIX 0	30	26.2%	23.5%	16.8%	31.4%	-	-
	90	20.8%	46.7%	4.6%	25.1%	-	-
	180	66.2%	52.7%	43.9%	28.9%	-	-
MIX 1	30	13.8%	17.0%	7.7%	11.6%	4.6%	30.3%
	90	31.5%	14.9%	7.7%	3.5%	54.6%	27.6%
	180	50.5%	23.3%	68.6%	50.7%	79.9%	27.8%
MIX 2	30	58.8%	14.5%	51.5%	11.2%	11.3%	17.5%
	90	-	-	-	-	-	-
	180	106.3%	28.7%	81.5%	11.5%	71.7%	17.9%

Tabella 4.31: Indici IStR medi

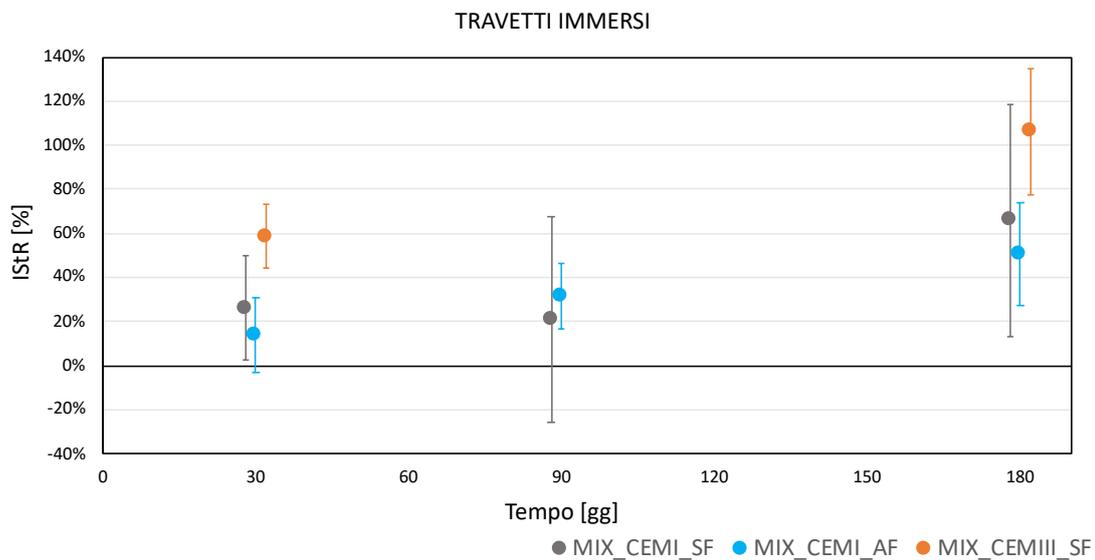


Figura 4.67: Indici IStR medi dei travetti immersi

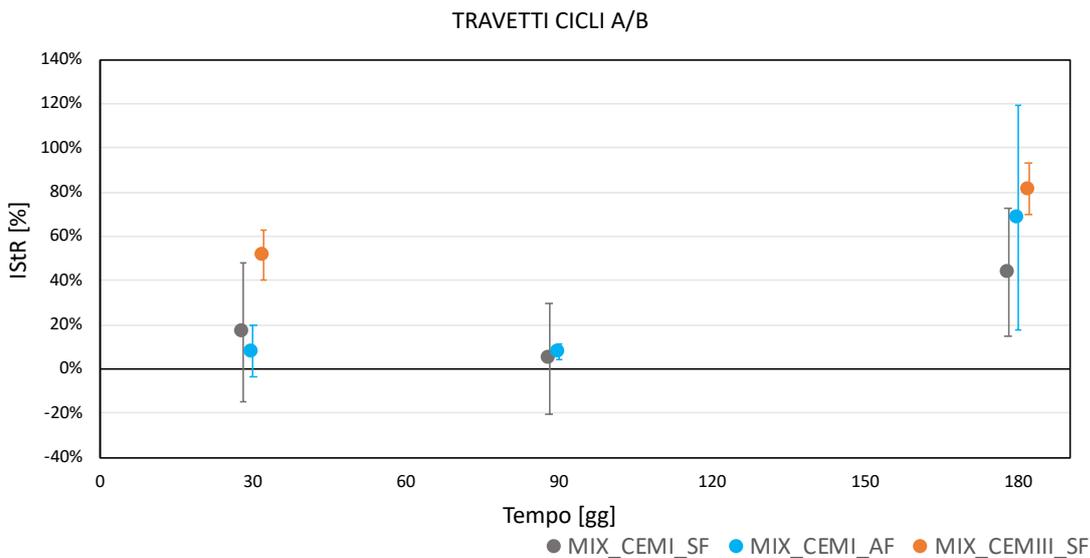


Figura 4.68: Indici ISTR medi dei travetti soggetti a cicli di asciutto bagnato

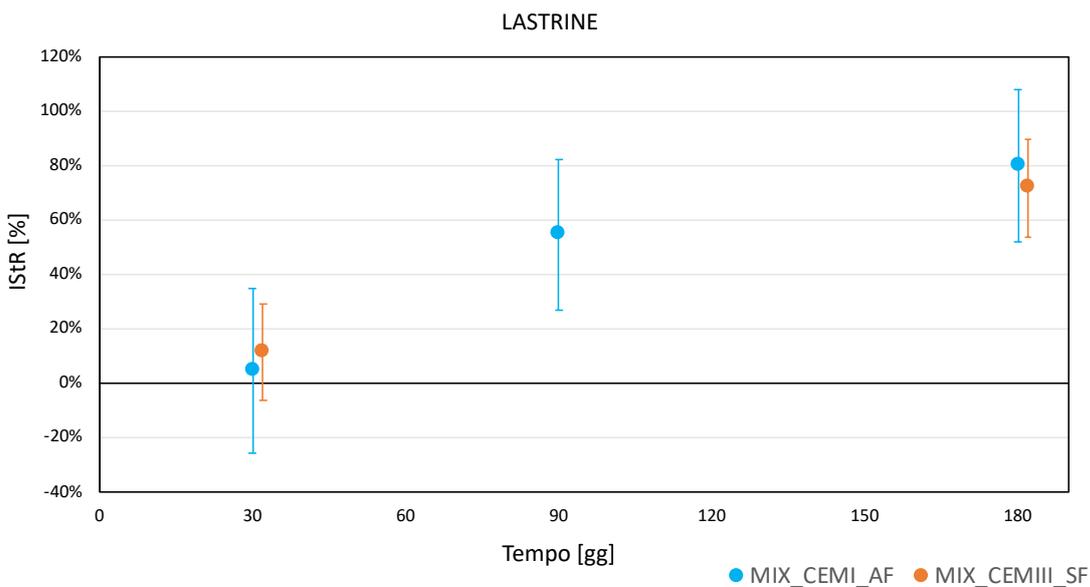


Figura 4.69: Indici ISTR medi delle lastrine

Dai grafici sopra esposti, si vede come in tutti i casi ci sia stato un recupero di rigidità e, in particolare, viene confermato quanto osservato con gli indici precedenti, ossia che il recupero maggiore si è ottenuto al sesto mese. Per quanto riguarda i travetti, la miscela che ha presentato un recupero maggiore è stata quella costituita dal CEMIII. Durante i primi due periodi d'indagine, si sono ottenuti valori dell'indice all'incirca costanti sia per la miscela di riferimento che per quella con fibre amorfe. Viceversa, per le lastrine costituite dalla miscela con fibre amorfe il recupero di rigidità è sempre incrementato da uno step all'altro.

### 4.5.9 Confronto tra gli indici di recupero meccanico e l'indice di richiusura

Nella parte finale di questo lavoro, si è ritenuto interessante mettere a confronto gli indici determinati ai paragrafi precedenti con l'indice di richiusura (ICH: Index of Crack Healing), calcolato a partire dalle indagini al microscopio. La procedura seguita per il calcolo dell'ICH è stata esposta in maniera esigua dagli altri due componenti del gruppo nel loro elaborato di tesi [3].

Tale indice è stato determinato per ogni fase di lavoro (30, 90 e 180 giorni dopo la prefessurazione). Infatti, dopo ogni fessurazione, ciascuna fessura veniva fotografata in tre punti differenti e, trascorso un certo arco temporale, ri-fotografata negli stessi punti, prima che il provino fosse fessurato nuovamente. Da queste foto si è ricavata l'area aperta di ogni punto di fessura. Note le aree di fessura aperte ad ogni step temporale, per ciascun punto di fessura e per ogni tempo di indagine, si è ricavato l'ICH [%] come:

$$ICH [\%] = \frac{A_i - A_f}{A_i}$$

Equazione 4.15: Definizione indice ICH

Dove:

- $A_i$ , Area aperta del punto di fessura subito dopo la fessurazione  $i$ -esima;
- $A_f$ , Area aperta del punto di fessura dopo il trattamento e prima della successiva rifessurazione.

Una volta ricavati gli indici di richiusura di ogni singolo punto sono stati calcolati gli indici finali come la media tra quelli di ogni punto. Infine, mediando i valori di ICH di ogni singolo provino, sia per le lastrine sia per i travetti (distinguendo tra quelli immersi e quelli sottoposti a cicli A/B), si sono calcolati gli indici di richiusura rappresentanti la miscela. In APPENDICE E vengono raccolti i valori di richiusa per ogni provino, mentre, nelle seguenti tabelle si riportano i valori caratterizzanti ciascun materiale.

Tempo [gg]	Travetti Immersi	Travetti A/B	Lastre
30	73%	73%	71%
90	45%	45%	51%
180	37%	37%	37%

Tabella 4.32: Indici ICH del MIX\_CEMI\_SF

Tempo [gg]	Travetti Immersi	Travetti A/B	Lastrine
30	65%	62%	71%
90	42%	40%	44%
180	31%	26%	34%

Tabella 4.33: Indici ICH del MIX\_CEMI\_AF

Tempo [gg]	Travetti Immersi	Travetti A/B	Lastrine
30	84%	89%	93%
90	61%	69%	64%
180	40%	42%	37%

Tabella 4.34: Indici ICH del MIX\_CEMIII\_SF

Dagli indici globali è possibile vedere come l'indice di richiusura diminuisce al passare del tempo. È importante, però, tener conto che l'indice è stato calcolato in relazione al tempo d'indagine precedente. Di conseguenza, la percentuale di richiusura calcolata al tempo i-esimo si riferisce ad un'area iniziale che è la somma dell'area riaperta con la nuova fessurazione e quella non richiusa nel tempo precedente.

Una volta definito il calcolo dell'indice di richiusura, si passa al confronto di quest'indice con gli indici di recupero. Per far questo, si è deciso di riportare dei grafici con in ascissa l'indice ICH e in ordinata l'indice da confrontare. Tali grafici sono stati tracciati per ogni miscela considerando tutti i provini, distinguendo tra travetti e lastrine. Di seguito si riporta qualche grafico esemplificativo (quelli dell'indice ISR, IDaRo e IStR dei travetti del MIX di riferimento). In APPENDICE E, invece, verranno raccolti tutti i grafici.

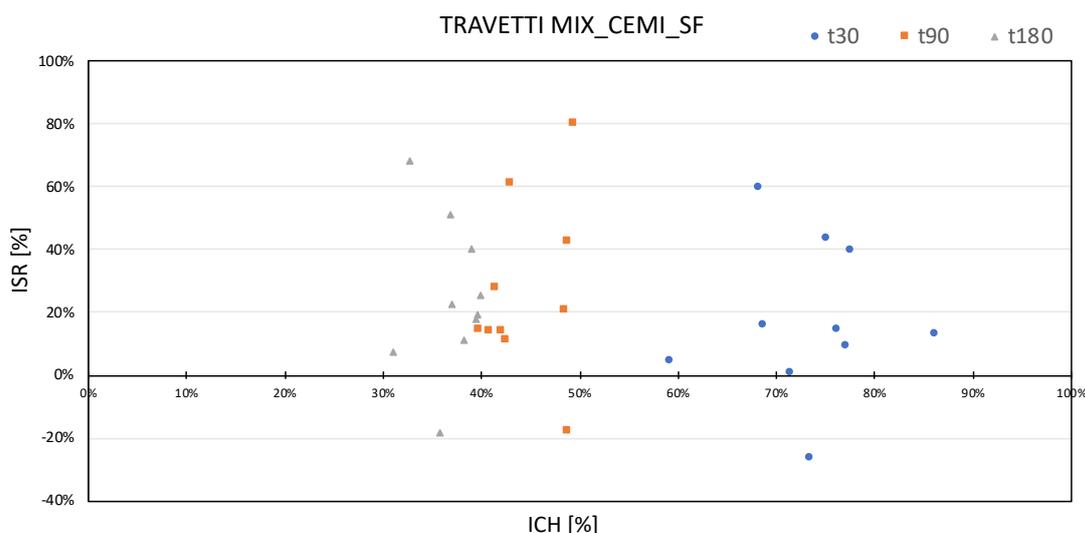


Figura 4.70: Confronto tra l'indice ISR e l'indice di richiusura per i travetti del MIX\_CEMI\_SF

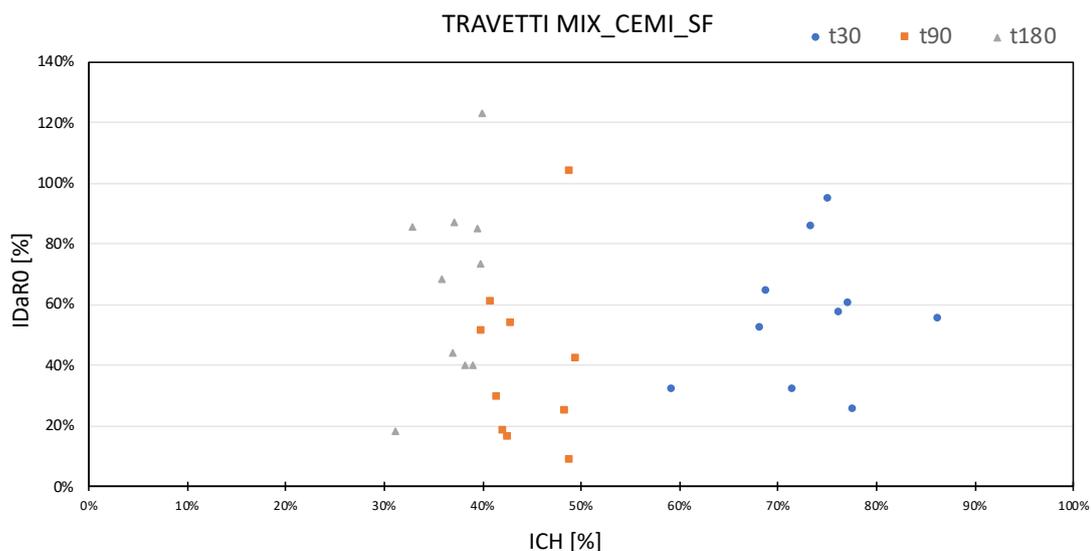


Figura 4.71: Confronto tra l'indice IDaRO e l'indice di richiusura per i travetti del MIX\_CEMI\_SF

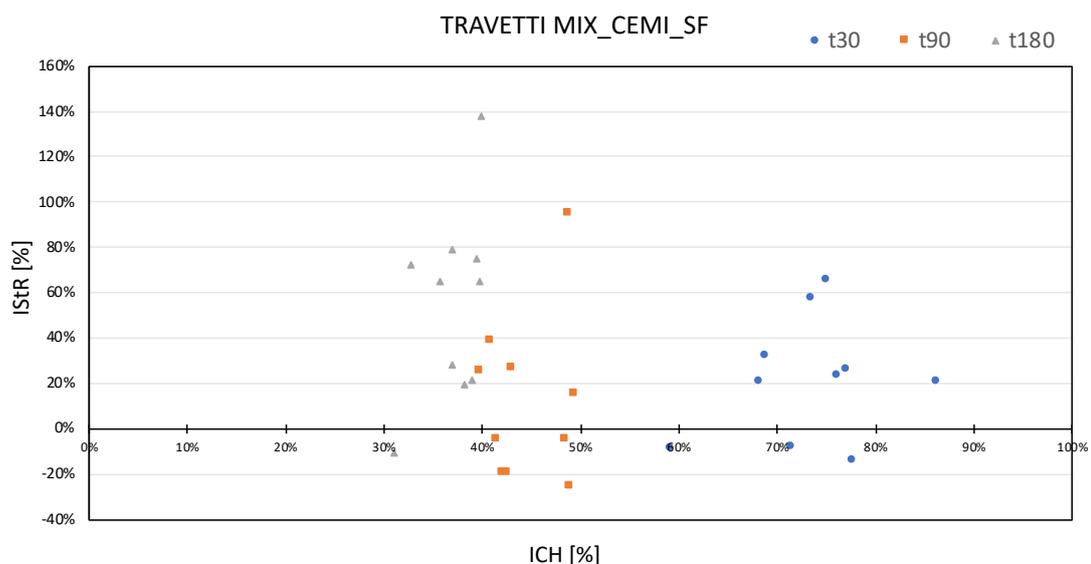


Figura 4.72: Confronto tra l'indice ISrR e l'indice di richiusura per i travetti del MIX\_CEMI\_SF

Dai confronti riportati sopra (Figura 4.70, Figura 4.71 e Figura 4.72), sembrerebbe che al diminuire della percentuale di richiusura l'indice ISR aumenta. In realtà, come già sottolineato precedentemente, l'indice ICH è un indice relativo, ossia è calcolato rispetto al tempo precedente e non rispetto al tempo iniziale. Di conseguenza, la percentuale di richiusura assoluta tende ad aumentare nel tempo, anche perché è da considerarsi il fatto che i provini sono stati rifessurati. In altre parole, il materiale che si forma per la richiusura della fessura aumenta nel tempo. Inoltre, il tempo che è trascorso da un'ispezione all'altra è aumentato, infatti, tra la prefessurazione ( $t_0$ ) e la prima ispezione ( $t_{30}$ ) è trascorso 1 mese, dalla seconda fessurazione ( $t_{30}$ ) alla seconda ispezione ( $t_{90}$ ) sono passati 2 mesi e tra la terza fessurazione

(t90) e l'ultima ispezione (t180) sono trascorsi 3 mesi. Di conseguenza, durante l'ultimo periodo indagato il materiale aggiuntivo dovuto al self-healing ha avuto maggior tempo per creare legami più forti sia con la pasta cementizia sia con le fibre presenti nelle miscele.

In conclusione, leggendo i grafici concentrandosi su ciascun periodo d'ispezione (t30 in blu, t90 in arancione e t180 in grigio) è possibile notare che i valori degli indici di recupero sono maggiori all'aumentare dell'indice di richiusura o al limite costanti quando la variazione dell'indice ICH è limitata.

---

# CAPITOLO 5

## CONCLUSIONI

Lo studio della capacità di auto-riparazione dei calcestruzzi fibrorinforzati è stato l'oggetto di questa tesi. Le analisi sono state svolte su differenti composti, aventi medesimo contenuto di acqua, loppa d'altoforno, sabbia, additivo fluidificante e cristallizzante PENETRON ADMIX®, differenziandosi per diverso tipo di cemento (CEMI o CEMIII) e diversa tipologia di fibre (metalliche o metalliche amorfe). Tre sono state le miscele considerate:

- MIX 0 rappresenta il mix di riferimento ed è costituito da CEM I, fibre metalliche ed altri costituenti comuni ai tre composti;
- MIX 1 costituito da CEM I, fibre metalliche amorfe ed altri costituenti comuni ai tre composti;
- MIX 2 costituito da CEM III, fibre metalliche ed altri costituenti comuni ai tre composti.

La caratterizzazione meccanica dei materiali è stata svolta attraverso prove a rottura di alcuni campioni. Le prestazioni meccaniche maggiori sono state registrate dalle miscele con l'aggiunta di fibre metalliche, le quali hanno conferito al campione anche una maggiore duttilità. Tra i due composti aventi le fibre metalliche, i campioni realizzati con CEMIII (MIX 2) hanno dimostrato prestazioni migliori in termini sia di resistenza e sia di duttilità.

Il composto realizzato con CEMI e fibre amorfe (MIX 1), nonostante una duttilità inferiore e resistenze minori, ha comunque mostrato un comportamento incrudente durante le prove di flessione e di trazione indiretta.

La caratterizzazione del calcestruzzo fibrorinforzato quando sottoposto a sforzi di trazione è stata effettuata attraverso prove a trazione indiretta (DEWS); i risultati hanno mostrato la

presenza di un tratto incrudente per tutti i composti, modificando sostanzialmente il comportamento degradante tipico di un calcestruzzo ordinario. A ciascun materiale è stato assegnato un differente legame costitutivo, calibrato attenendosi ai dati sperimentali ottenuti dalle prove DEWS, ed impiegato per l'implementazione dell'analisi inversa. Quest'ultima è stata utile come validazione delle prove sperimentali a flessione ed a trazione indiretta effettuate.

L'analisi inversa ha fornito dei risultati più che soddisfacenti, in particolare il MIX 1 ha mostrato una quasi perfetta sovrapposizione delle curve sia per le lastre sia per i travetti, di spessore 25mm e 100 mm rispettivamente. Le miscele con aggiunte di fibre metalliche hanno mostrato un comportamento simile tra loro; se per i travetti le analisi inverse hanno fornito risultati prossimi ai dati sperimentali, diverso è stato il comportamento per le lastre, per le quali le analisi inverse hanno condotto a resistenze inferiori. La tendenza alla sedimentazione delle fibre ha permesso alle lastre di avere una resistenza flessionale maggiore, non osservata dalle prove a trazione indiretta.

Al fine di comprendere le capacità di autoriparazione del materiale sono stati eseguiti quattro cicli di fessurazione, intervallati da periodi di riposo in immersione continua o cicli di asciutto/bagnato. Ad ogni ciclo di fessurazione sono state calcolate area e apertura delle fessure di ciascun campione e confrontate con le registrazioni effettuate a fine del periodo di riposo. Le analisi hanno portato risultati migliori per le fibre metalliche, coerente con lo stato multifessurativo creato, dimostrando una richiusura più rapida il mix costituito da CEMIII.[3]

Per lo studio del recupero meccanico sono stati definiti degli indici in modo tale da facilitare l'interpretazione dei risultati sperimentali. Gli indici sono stati ideati al fine di esaminare il recupero di resistenza, il recupero del danno e il recupero di rigidezza. Il recupero di resistenza è stato determinato rispetto ad una curva di riferimento rappresentante la rottura del materiale vergine. La stessa procedura è stata adottata per il calcolo di un indice relativo al recupero di rigidezza, il quale è stato determinato rispetto alla variazione di rigidezza del materiale vergine sottoposto a prova di rottura con cicli di carico-scarico. In merito agli altri indici di recupero di rigidezza e del danno, essi sono stati determinati sia rispetto al primo ciclo di fessurazione sia rispetto allo stadio di lavoro precedente, questo ritenuto opportuno in quanto ad ogni fase di lavoro i provini sono stati rifessurati. Dagli indici è stato osservato come globalmente il comportamento sia stato simile per tutte le miscele, anche se con risultati differenti. Tra i materiali con fibre metalliche, quello che ha mostrato indici di recupero di resistenza maggiori è stato quello di riferimento, manifestando recuperi fin dal primo mese, al contrario la miscela contenente le fibre amorfe ha mostrato un recupero di resistenza solo per le lastre. Diverso comportamento è stato registrato per il recupero di rigidezza e del danno, verificatosi per tutte e tre le miscele. Il composto che ha presentato i migliori recuperi di danno

e rigidezza è stato quello includente il CEMIII. In tutti i casi, i recuperi migliori si sono verificati al quarto ed ultimo ciclo di fessurazione (sei mesi dalla prima).

Nonostante il MIX 2 sia stata la miscela dal miglior comportamento globale, i progetti pilota per la sperimentazione in reali condizioni di esercizio sono stati avviati utilizzando la miscela di riferimento. La differenza di risposta, in termini di recupero della capacità meccanica e di richiusura delle fessure, non è stata tale da preferire il calcestruzzo (UHFRC) a base di CEMIII. Quest'ultimo è composto da una parte di loppa d'altoforno, soggetta ad una variabilità, di quantità e qualità, tale da non poter contare su una standardizzazione dei risultati.



---

## Bibliografia

- [1] I. Ernmenta and L. P. A. Nel, *Climate Change 2014 Synthesis Report*. .
- [2] L. Papa and S. Passoni, *Caratterizzazione meccanica e capacità di riparazione autogena di compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni (UHPFRC)*. 2019.
- [3] A. Cervini and N. Borgioni, *Capacità di riparazione autogena di compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni (UHPFRC)*. 2019.
- [4] Bertolini Luca, *Materiali da costruzione, vol.I. Strutture, proprietà e tecnologie di produzione*. 2010.
- [5] Bertolini Luca, *Materiali da costruzione, vol.II. Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro*. 2012.
- [6] H. Mihashi and T. Nishiwaki, “Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete State-of-the-Art Report,” no. August 2015, 2012.
- [7] E. Schlangen and K. Van Breugel, “SELFHEALING OF EARLY AGE CRACKS IN,” no. January, 2006.
- [8] K. Van Tittelboom and N. De Belie, *Self-Healing in Cementitious Materials—A Review*. 2013.
- [9] G. Yıldırım, Ö. K. Keskin, S. Keskin, M. Şahmaran, and M. Lachemi, “A review of intrinsic self-healing capability of engineered cementitious composites: Recovery of transport and mechanical properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 10–21, Dec. 2015.
- [10] E. Herbert and V. Li, “Self-healing of Engineered Cementitious Composites in the Natural Environment,” *RILEM Bookseries*, vol. 2, Jan. 2012.
- [11] Y. Yang, M. D. Lepech, E.-H. Yang, and V. C. Li, “Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 5, pp. 382–390, 2009.
- [12] T. Nishiwaki, H. Sasaki, and S. Kwon, “Experimental study on self-healing effect of FRCC with PVA fibers and additives,” *J. Ceram. Process. Res.*, vol. 16, pp. 89–94, Nov. 2015.
- [13] Y. Sakai, Y. Kitagawa, T. Fukuta, and M. Iiba, “Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire,” *Proc SPIE*, vol. 5057, Aug. 2003.

- [14] Y. Kuang and J. Ou, "Passive smart self-repairing concrete beams by using shape memory alloy wires and fibers containing adhesives," *J. Cent. South Univ. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 411–417, 2008.
- [15] H. M. Jonkers, "Self Healing Concrete: A Biological Approach BT - Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science," S. van der Zwaag, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007, pp. 195–204.
- [16] H. M. Jonkers, "Bacteria-based self-healing concrete," vol. 56, no. 1, pp. 1–12, 2011.
- [17] S. Morsali, "The application of bacteria as a main factor in self-healing concrete technology," no. August, 2019.
- [18] H. S. Wong and N. Buenfeld, "The potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete The potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete," no. January, 2010.
- [19] D. Snoeck and N. De Belie, "Autogenous Healing in Strain-Hardening Cementitious Materials With and Without Superabsorbent Polymers : An 8-Year Study," vol. 6, no. March, pp. 1–12, 2019.
- [20] R. Sahamitmongkol, "Effects of Different Mineral Additives and Cracking Ages on Self-Healing Performance of Mortar Annual Concrete Conference 6 Effects of Different Mineral Additives and Cracking Ages on Self-Healing Performance of Mortar REP-07," no. January 2010, 2017.
- [21] H. Huang and G. Ye, "Application of sodium silicate solution as self-healing agent in cementitious materials," no. 1993, 2011.
- [22] K. Van Tittelboom, K. Adesanya, P. Dubruel, P. Van Puyvelde, and N. De Belie, "Methyl methacrylate as a healing agent for self-healing cementitious materials," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 12, p. 125016, 2011.
- [23] C. Joseph, A. D. Jefferson, B. Isaacs, R. Lark, and D. Gardner, "Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials," no. 11, pp. 831–843, 2010.
- [24] V. C. Li and T. Matsumoto, "Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 20, no. 5, pp. 339–351, 1998.
- [25] D. Homma, H. Mihashi, and T. Nishiwaki, "Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 7, pp. 217–228, Jul. 2009.
- [26] V. C. Li, E. Herbert, S. Senot, E. Schlangen, V. C. Li, and E. Herbert, "Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure," vol. 10, pp. 207–218, 2012.
- [27] L. Ferrara, V. Krelani, and F. Moretti, "Autogenous healing on the recovery of mechanical performance of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites ( HPFRCCs ): Part 2 e Correlation between healing of mechanical

- performance and crack sealing,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 73, pp. 299–315, 2016.
- [28] L. Ferrara, V. Krelani, F. Moretti, M. Roig, and P. Serna, “Effects of autogenous healing on the recovery of mechanical performance of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites ( HPFRCCs ): Part 1,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 83, pp. 76–100, 2017.
- [29] L. Ferrara, N. Ozyurt, and M. Prisco, “High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites : the role of “ casting-flow induced ” fibre orientation,” pp. 109–128, 2011.
- [30] M. Venturi e V. Venturi “Manuale per la Direzione dei Lavori.”,2010
- [31] S. T. Centrale, “Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici,” 2008.
- [32] M. Di Prisco, M. Lamperti Tornaghi, and S. Lapolla, *Double-Edge Wedge Splitting Test: Preliminary Results*. 2010.
- [33] L. Ferrara and F. Lo Monte, “Characterization of the Tensile Behaviour of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete,” *V Work. New Boundaries Struct. Concr. Sept. 19 – 20, 2019 Milan, Italy*, 2019.
- [34] M. Di Prisco, L. Ferrara and M. G. L. Lamperti, “Double edge wedge splitting ( DEWS ): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites,” pp. 1893–1918, 2013.

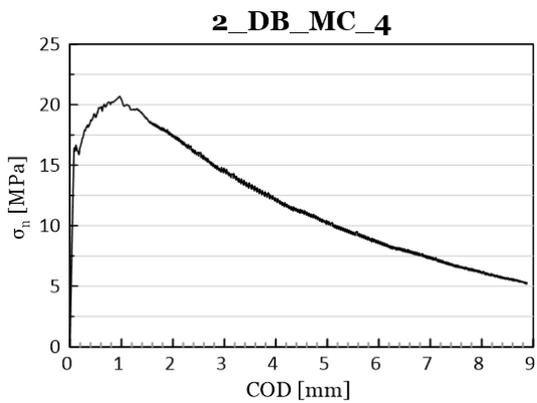
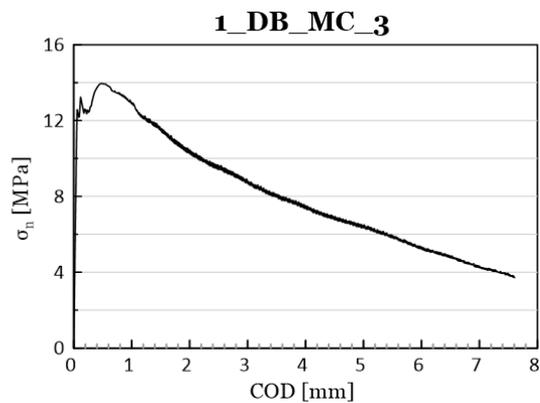
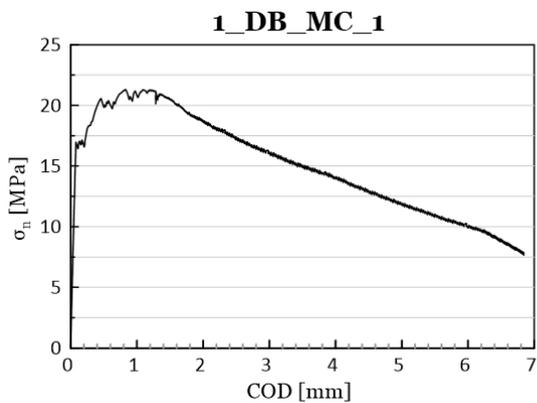


---

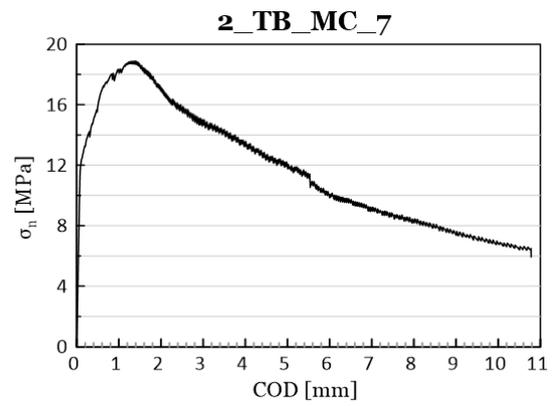
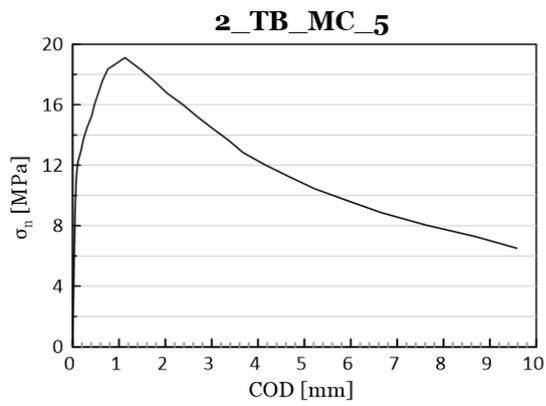
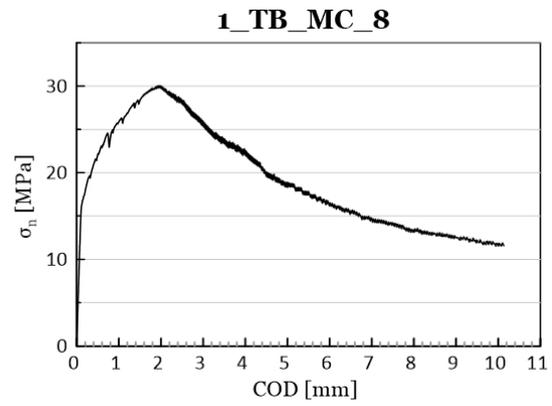
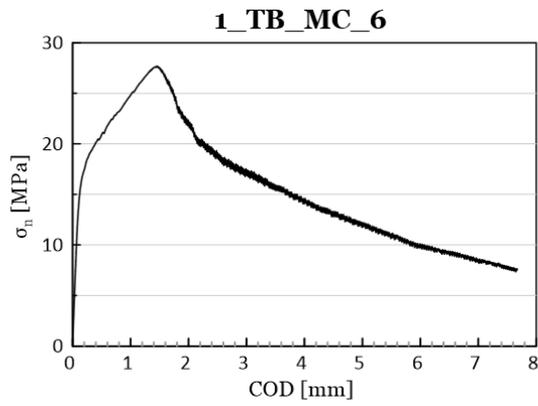
## **APPENDICE A**

### ***Prove di rottura monotona a flessione***

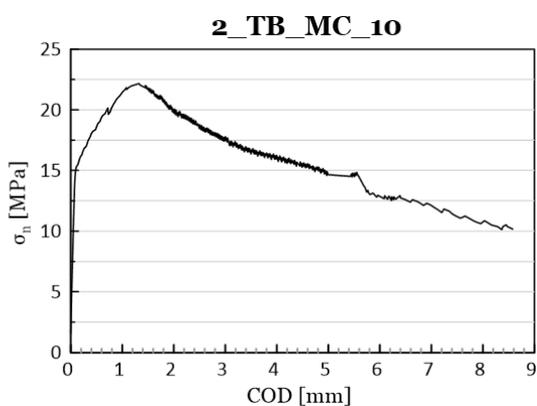
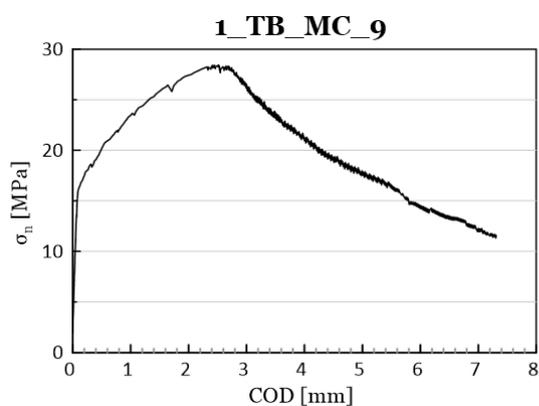
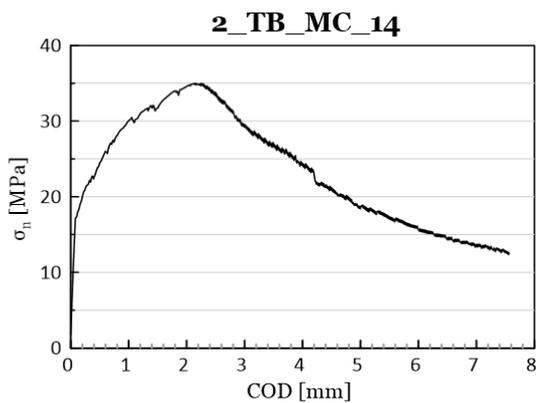
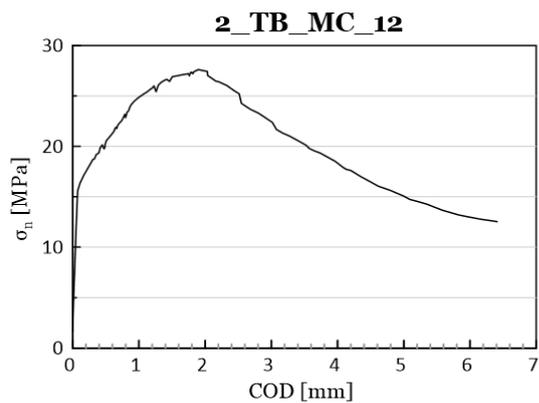
## MIX\_CEMI\_SF – Travetti



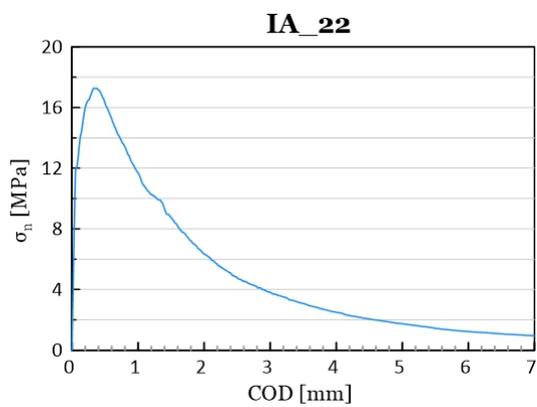
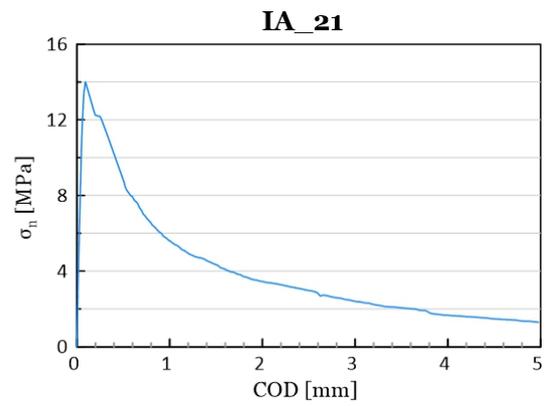
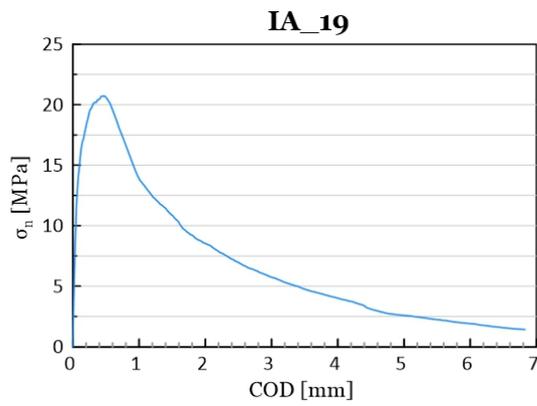
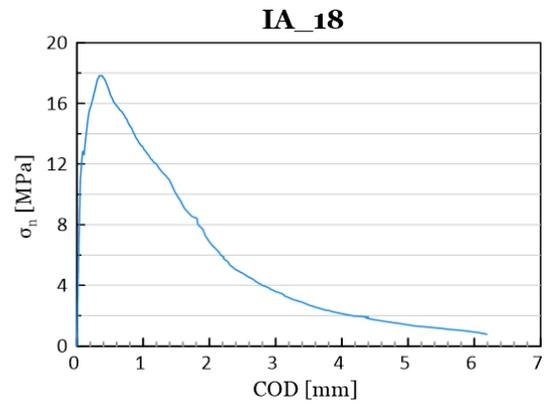
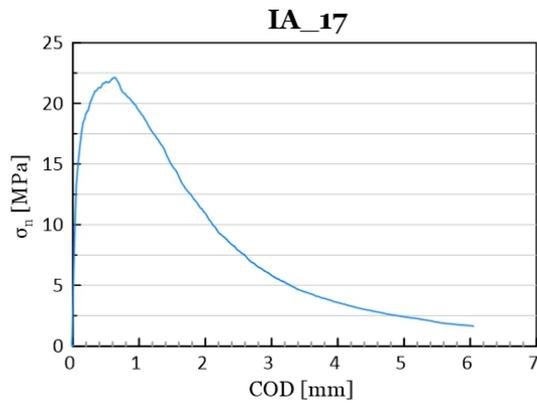
# MIX\_CEMI\_SF – Lastrine



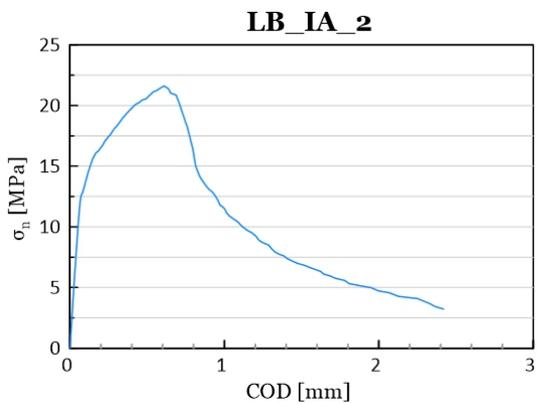
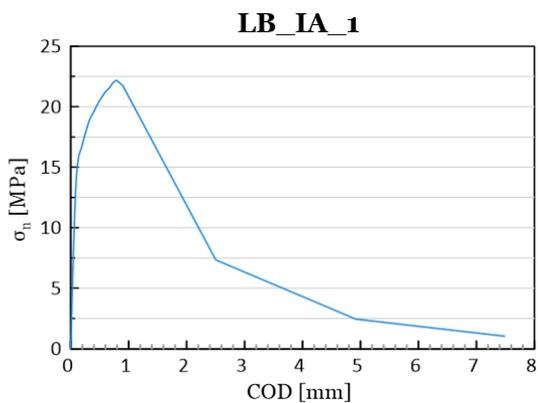
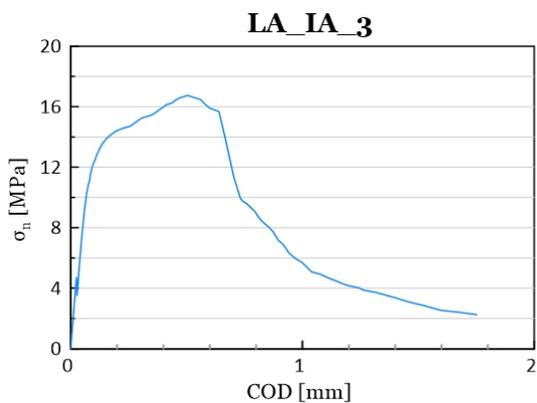
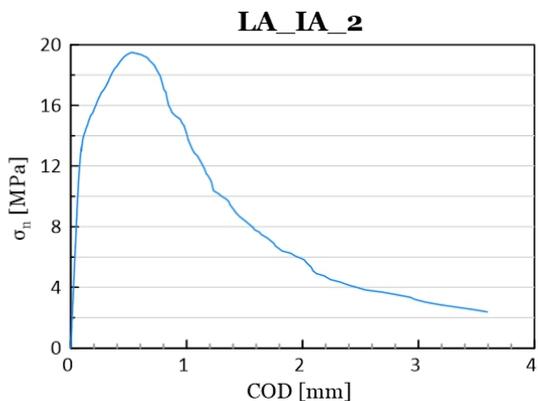
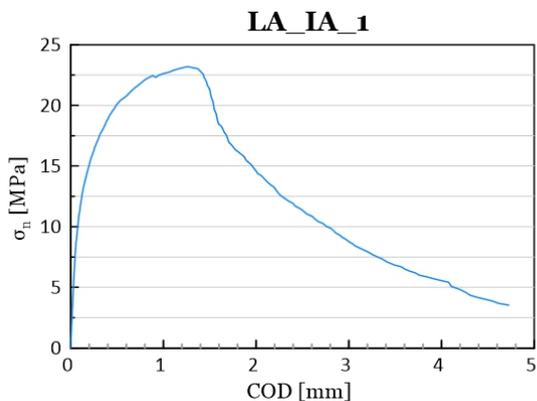
## MIX\_CEMI\_SF – Lastrine testate ad un anno dal getto



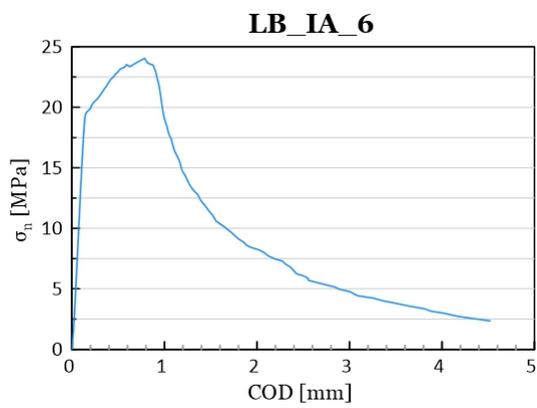
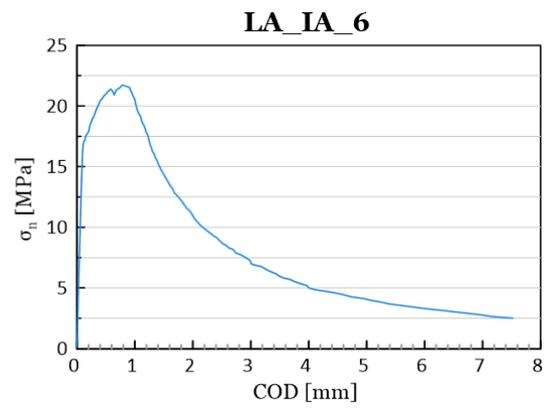
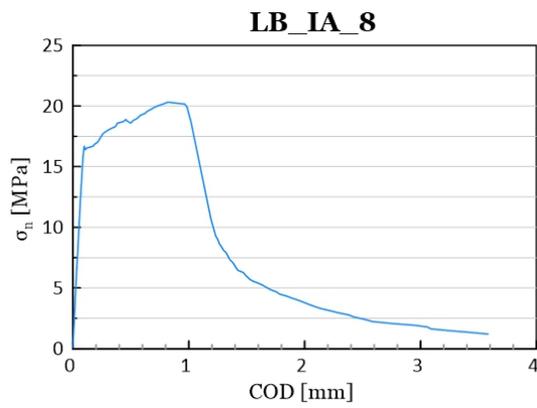
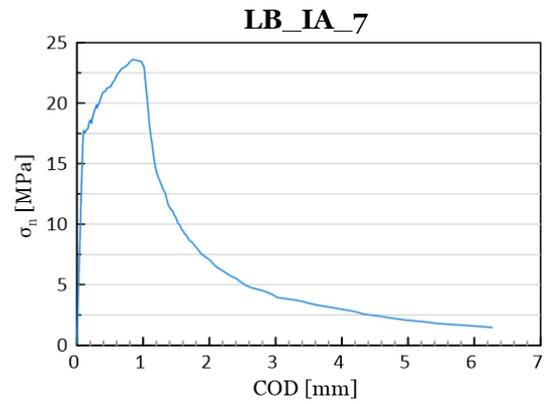
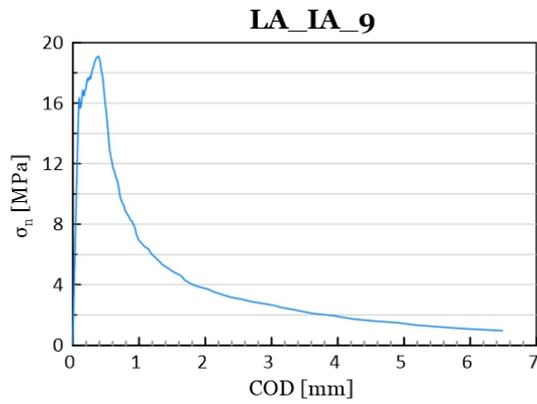
# MIX\_CEMI\_AF – Travetti



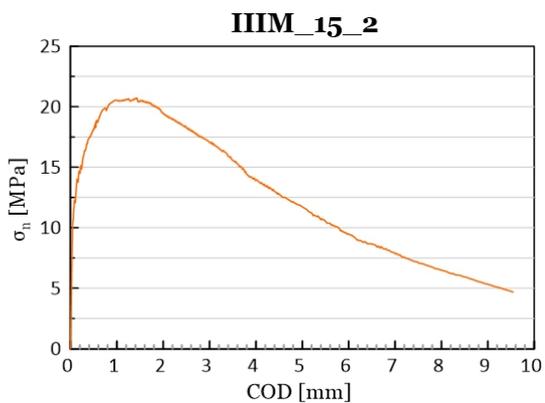
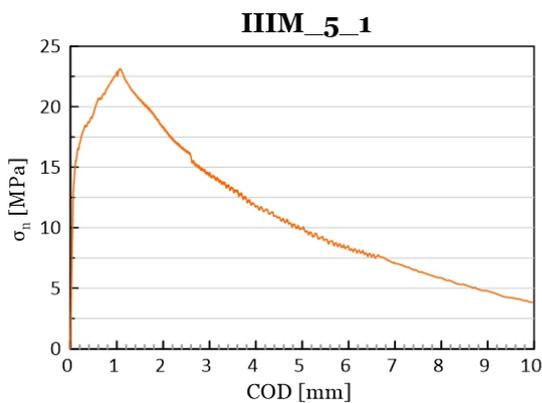
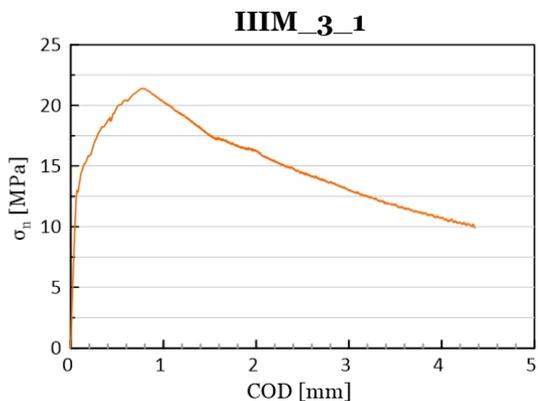
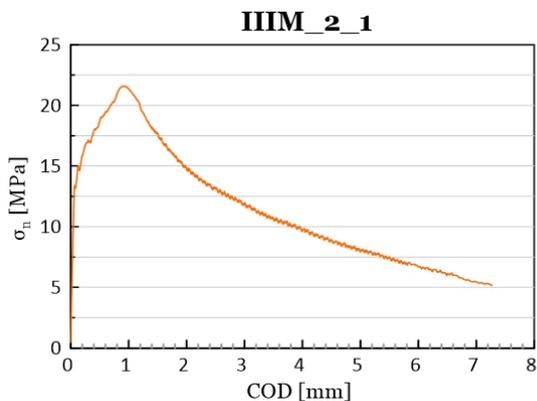
# MIX\_CEMI\_AF – Lastrine



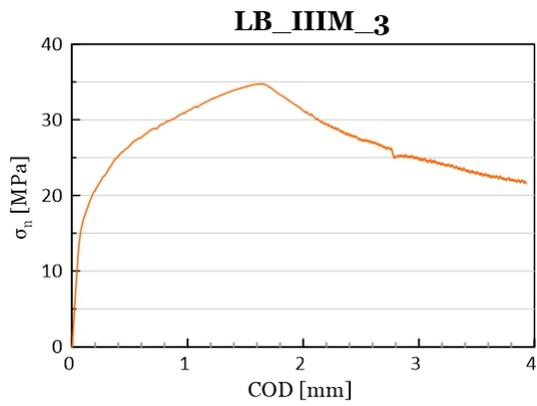
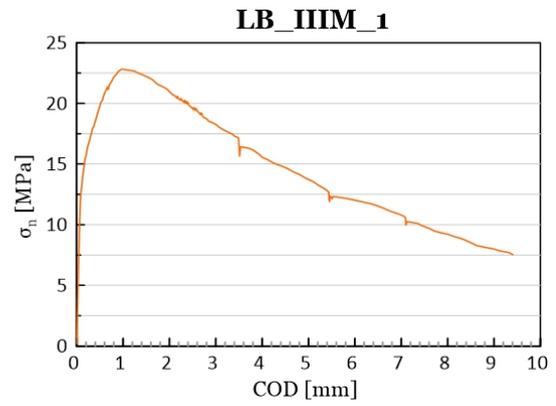
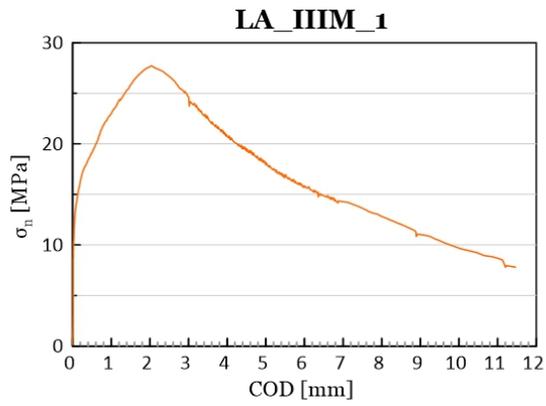
# MIX\_CEMI\_AF – Lastrine testate ad un anno dal getto



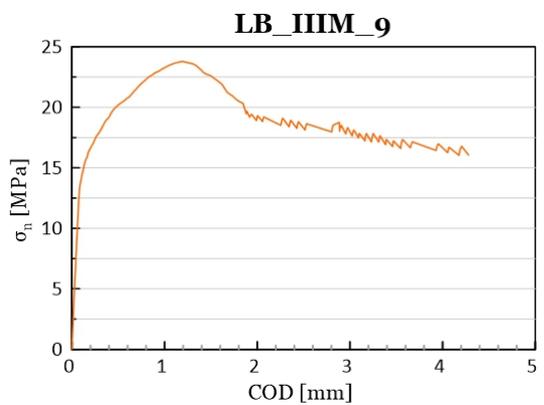
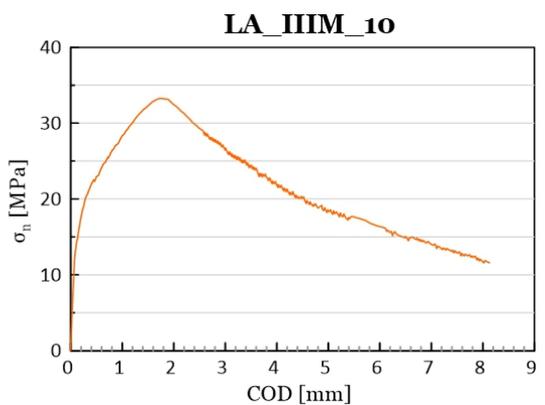
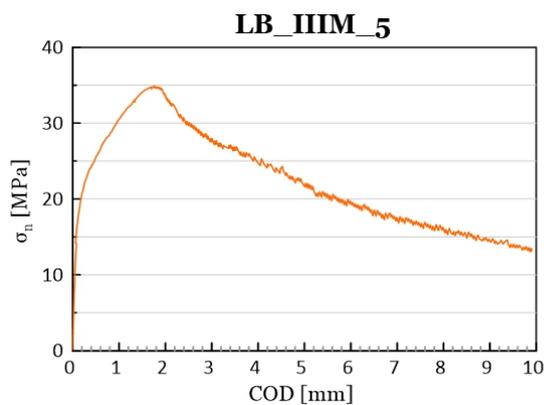
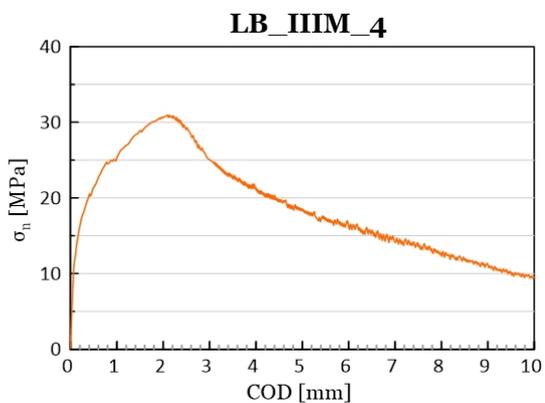
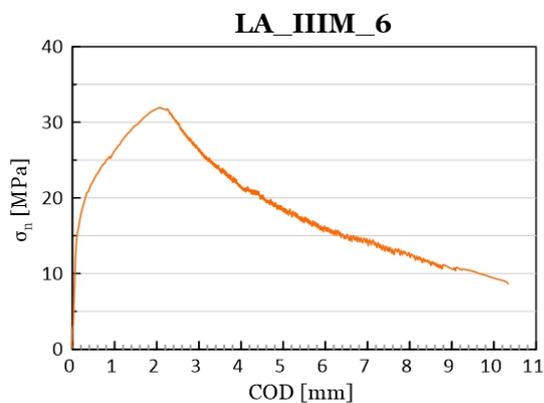
# MIX\_CEMIII\_SF – Travetti



# MIX\_CEMIII\_SF – Lastrine



## MIX\_CEMIII\_SF – Lastrine testate ad un anno dal getto

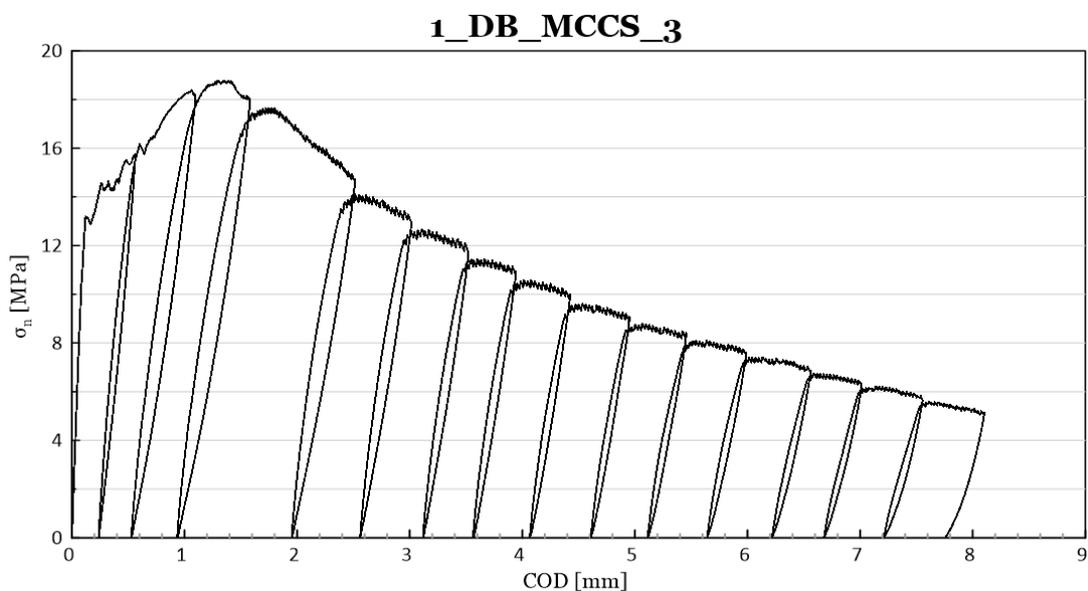


---

## **APPENDICE B**

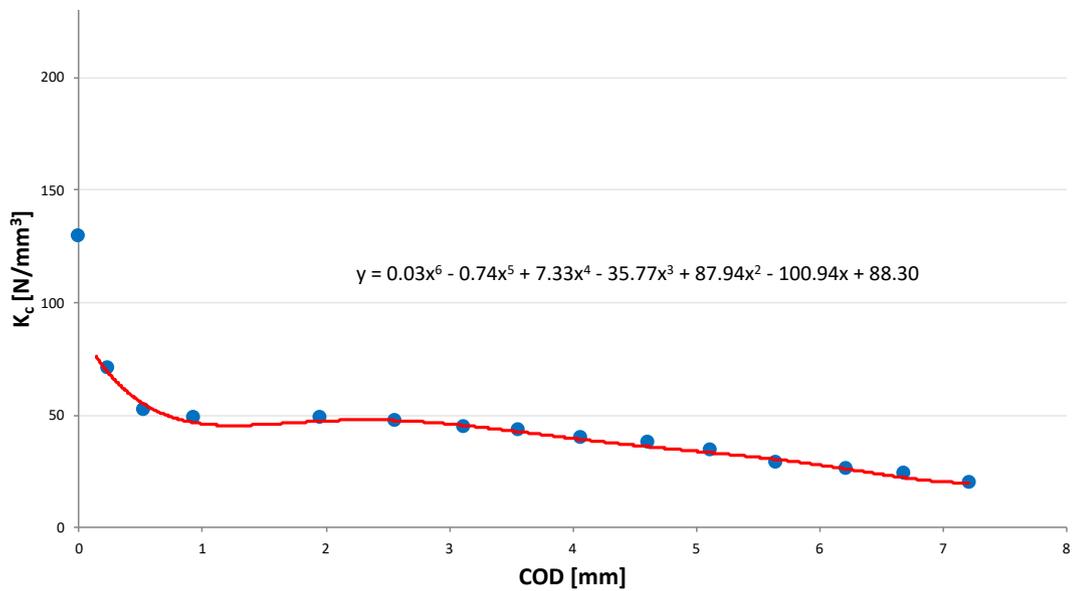
### **Prove di rottura con cicli di carico-scarico**

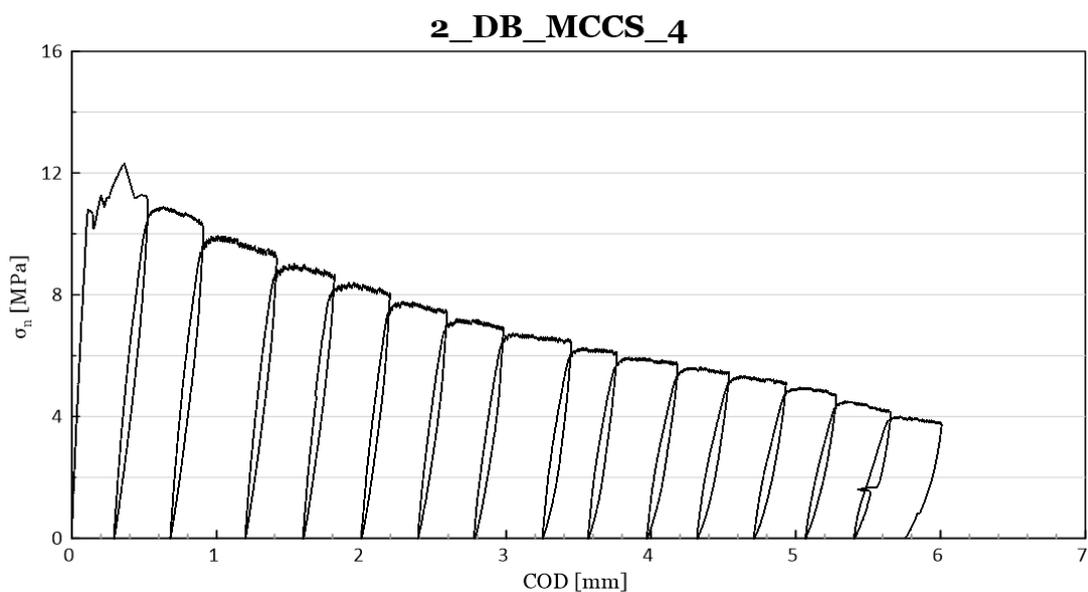
## MIX\_CEMI\_SF – Travetti



Step	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{25\%}$ [MPa]	$K_c$ [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.00	3.86	129.7
2	0.238	0.01	4.60	70.2
3	0.530	0.00	4.72	51.7
4	0.938	0.01	4.41	48.4
5	1.954	0.01	3.59	48.1
6	2.562	0.00	3.20	46.9
7	3.119	0.00	2.91	44.5
8	3.565	0.01	2.64	42.5
9	4.069	0.01	2.42	39.6
10	4.611	0.00	2.15	37.1
11	5.116	0.01	2.02	34.0
12	5.643	0.00	1.90	28.6
13	6.220	0.01	1.73	25.4
14	6.682	0.01	1.64	23.8
15	7.216	0.01	1.38	19.6

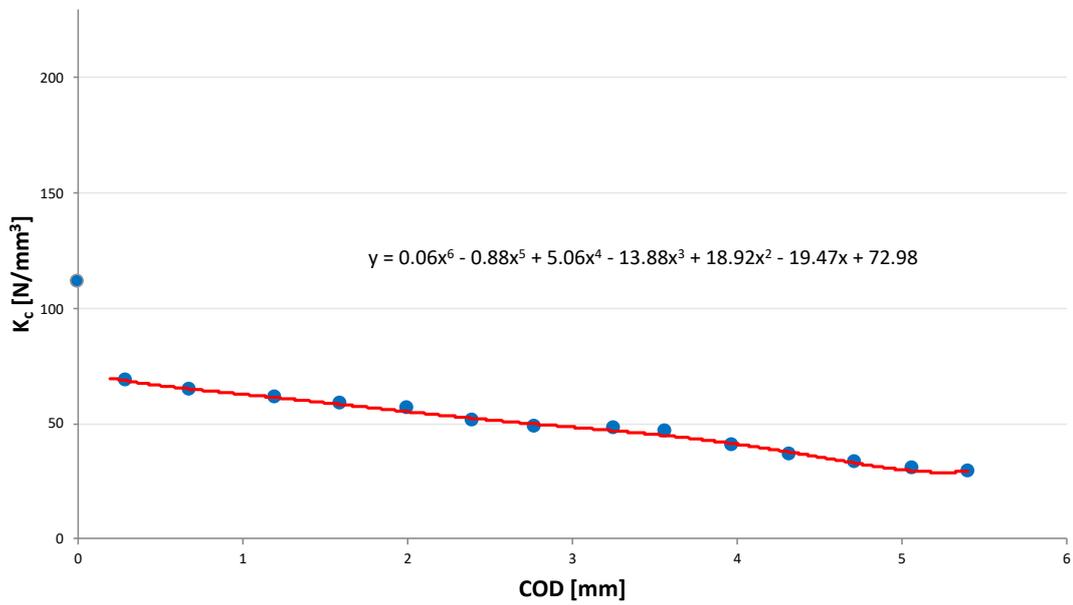
Step	COD <sub>s</sub> [mm]	σ <sub>s</sub> [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	σ <sub>b</sub> [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.559	15.74	0.238	0.01	48.9
2	1.096	18.16	0.530	0.00	32.1
3	1.584	18.02	0.938	0.01	27.9
4	2.517	14.71	1.954	0.01	26.1
5	3.017	12.96	2.562	0.00	28.5
6	3.523	11.70	3.119	0.00	29.0
7	3.940	10.81	3.565	0.01	28.8
8	4.425	10.00	4.069	0.01	28.0
9	4.952	9.01	4.611	0.00	26.4
10	5.456	8.41	5.116	0.01	24.7
11	5.989	7.60	5.643	0.00	22.0
12	6.561	6.85	6.220	0.01	20.1
13	7.015	6.34	6.682	0.01	19.0
14	7.556	5.66	7.216	0.01	16.6
15	8.104	5.13	7.759	0.01	14.8



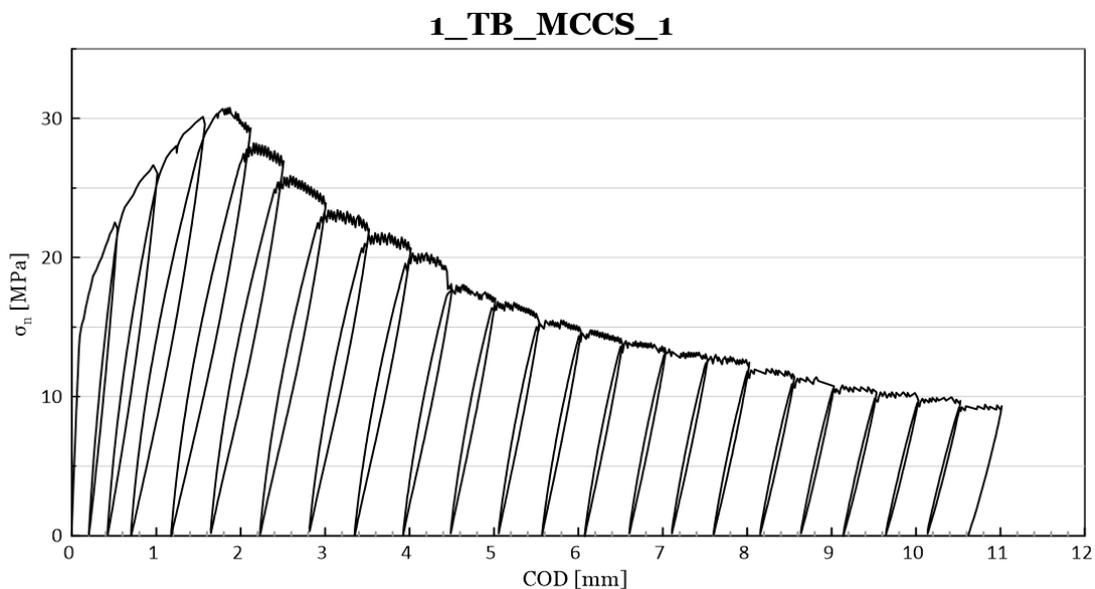


Step	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{25\%}$ [MPa]	$K_c$ [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.00	3.07	111.6
2	0.291	0.01	2.74	68.8
3	0.680	0.00	2.57	64.7
4	1.198	0.02	2.29	61.3
5	1.597	0.00	2.11	58.7
6	2.000	0.02	1.95	56.3
7	2.392	0.02	1.82	51.2
8	2.777	0.00	1.69	48.6
9	3.251	0.01	1.56	47.8
10	3.567	0.02	1.48	46.7
11	3.973	0.00	1.40	40.6
12	4.319	0.02	1.33	36.6
13	4.713	0.01	1.24	33.0
14	5.069	0.02	1.13	30.4
15	5.403	0.01	0.99	29.1

Step	COD <sub>s</sub> [mm]	σ <sub>s</sub> [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	σ <sub>b</sub> [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.516	11.22	0.291	0.01	49.9
2	0.907	10.22	0.680	0.00	45.0
3	1.415	9.20	1.198	0.02	42.5
4	1.809	8.50	1.597	0.00	40.1
5	2.196	8.04	2.000	0.02	41.2
6	2.585	7.49	2.392	0.02	38.9
7	2.980	6.93	2.777	0.00	34.1
8	3.451	6.38	3.251	0.01	31.9
9	3.762	6.11	3.567	0.02	31.4
10	4.184	5.68	3.973	0.00	26.9
11	4.538	5.45	4.319	0.02	25.0
12	4.933	5.11	4.713	0.01	23.3
13	5.275	4.72	5.069	0.02	23.0
14	5.657	4.14	5.403	0.01	16.4
15	6.007	3.73	5.760	0.01	15.0



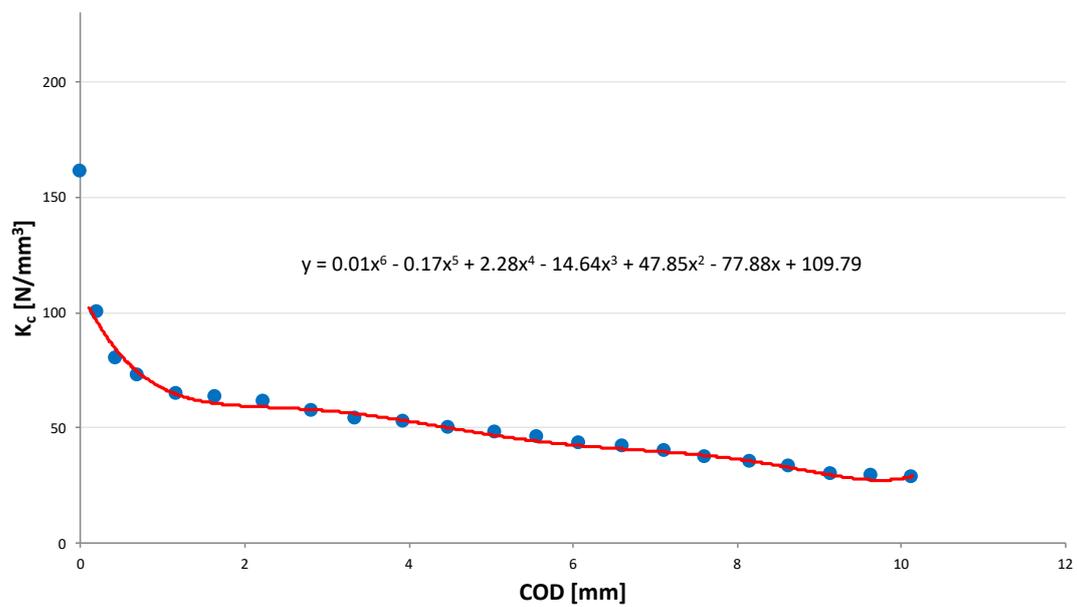
## MIX\_CEMI\_SF – Lastrine



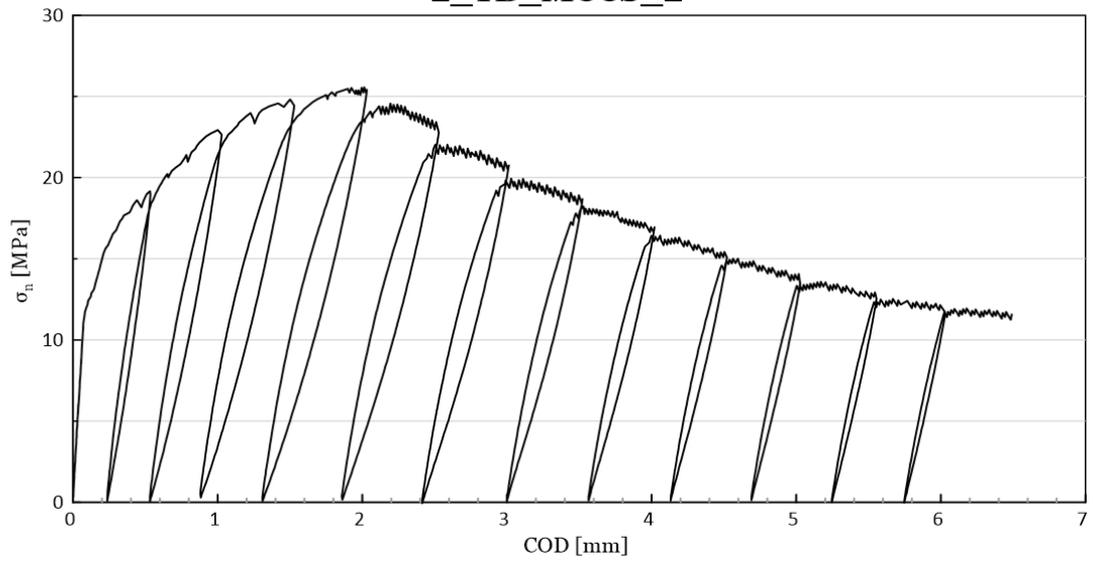
Step	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{25\%}$ [MPa]	$K_c$ [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.00	5.63	161.4
2	0.202	0.07	6.66	99.8
3	0.425	0.08	7.53	79.7
4	0.703	0.03	7.69	72.6
5	1.176	0.00	7.02	64.5
6	1.648	0.19	6.42	63.3
7	2.230	0.10	5.83	61.3
8	2.817	0.32	5.44	57.3
9	3.350	0.02	5.07	53.8
10	3.925	0.03	4.51	52.4
11	4.487	0.16	4.19	49.8
12	5.056	0.16	3.87	47.4
13	5.570	0.06	3.69	45.4
14	6.075	0.00	3.50	43.0
15	6.606	0.17	3.35	41.7

16	7.108	0.16	2.35	39.4
17	7.602	0.06	3.00	37.0
18	8.154	0.10	2.85	35.0
19	8.636	0.15	2.71	32.6
20	9.137	0.00	2.58	29.8
21	9.643	0.09	2.48	29.2
22	10.137	0.14	2.36	28.1

Step	COD <sub>s</sub> [mm]	$\sigma_s$ [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	$\sigma_b$ [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.509	22.53	0.202	0.07	73.1
2	0.964	26.65	0.425	0.08	49.3
3	1.553	30.12	0.703	0.03	35.4
4	2.118	29.31	1.176	0.00	31.1
5	2.508	26.93	1.648	0.19	31.1
6	3.003	23.61	2.230	0.10	30.4
7	3.510	21.52	2.817	0.32	30.6
8	4.016	20.67	3.350	0.02	31.0
9	4.501	17.59	3.925	0.03	30.5
10	5.015	17.07	4.487	0.16	32.0
11	5.536	15.33	5.056	0.16	31.6
12	6.030	14.68	5.570	0.06	31.8
13	6.522	13.76	6.075	0.00	30.8
14	7.034	13.22	6.606	0.17	30.5
15	7.529	12.64	7.108	0.16	29.6
16	8.025	12.45	7.602	0.06	29.3
17	8.559	11.40	8.154	0.10	27.9
18	9.028	10.74	8.636	0.15	27.0
19	9.532	10.31	9.137	0.00	26.1
20	10.028	9.73	9.643	0.09	25.0
21	10.526	9.70	10.137	0.14	24.6
22	11.015	9.32	10.621	0.06	23.5

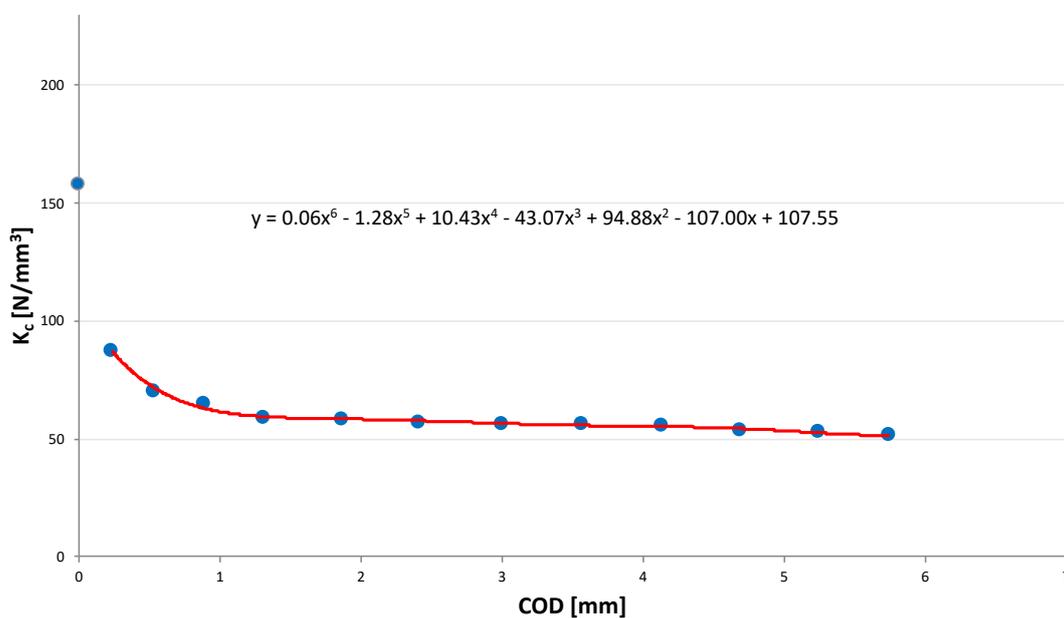


## 2\_TB\_MCCS\_2

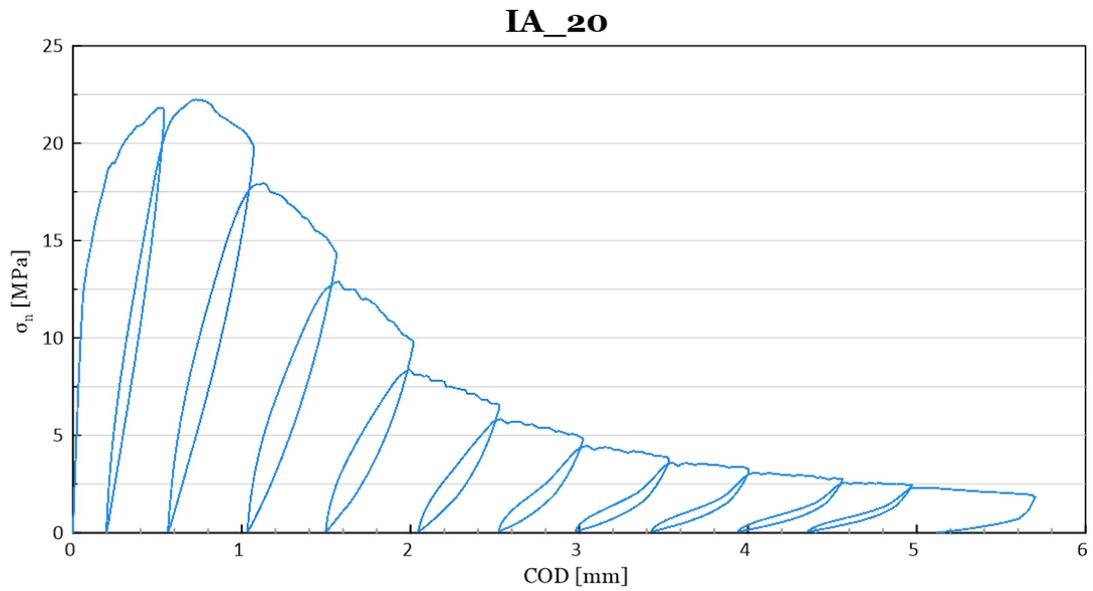


Step	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{25\%}$ [MPa]	$K_c$ [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.00	4.79	158.1
2	0.237	0.09	5.73	87.6
3	0.532	0.05	6.21	70.0
4	0.883	0.28	6.39	64.7
5	1.310	0.09	6.14	59.1
6	1.862	0.15	5.49	58.6
7	2.414	0.00	4.98	57.3
8	3.003	0.17	4.52	56.6
9	3.564	0.10	4.08	56.3
10	4.132	0.10	3.71	55.4
11	4.690	0.12	3.39	53.5
12	5.246	0.00	3.11	53.2
13	5.746	0.00	2.99	51.6

Step	COD <sub>s</sub> [mm]	σ <sub>s</sub> [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	σ <sub>b</sub> [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.532	19.17	0.237	0.09	64.7
2	0.985	21.00	0.532	0.05	46.3
3	1.501	24.82	0.883	0.28	39.7
4	2.031	25.42	1.310	0.09	35.1
5	2.529	22.76	1.862	0.15	33.9
6	3.013	20.75	2.414	0.00	34.6
7	3.522	18.68	3.003	0.17	35.7
8	4.020	16.94	3.564	0.10	36.9
9	4.521	15.09	4.132	0.10	38.5
10	5.027	13.45	4.690	0.12	39.5
11	5.555	12.55	5.246	0.00	40.6
12	6.024	11.29	5.746	0.00	40.6

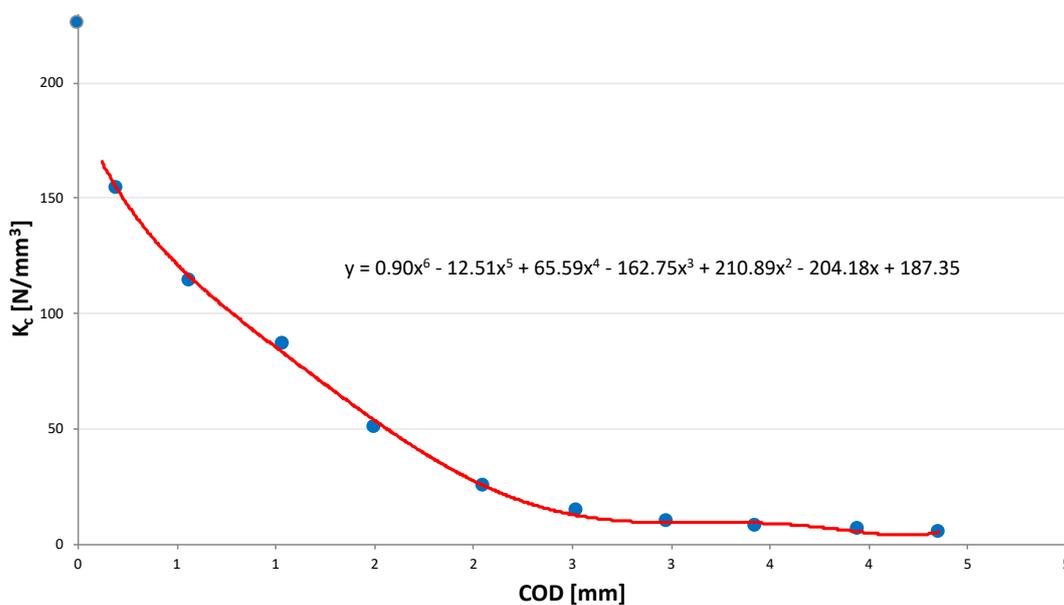


# MIX\_CEMI\_AF – Travetti

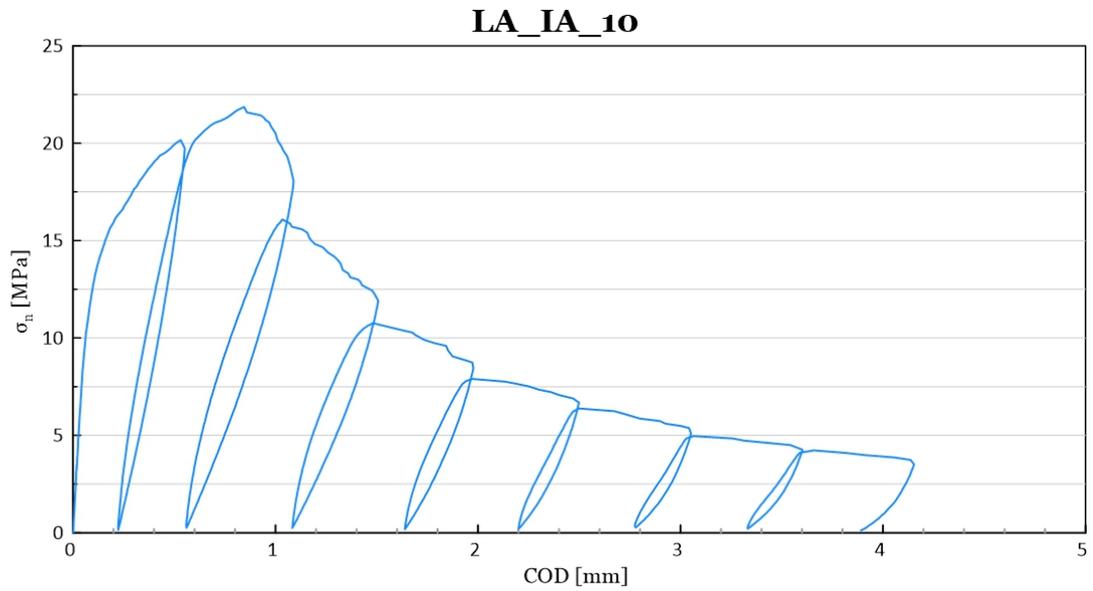


Step	COD <sub>c</sub> [mm]	σ <sub>c</sub> [MPa]	σ <sub>25%</sub> [MPa]	K <sub>c</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.00	5.45	225.4
2	0.199	0.05	5.55	154.5
3	0.565	0.06	4.49	113.9
4	1.036	0.05	3.22	86.7
5	1.500	0.05	2.03	50.9
6	2.049	0.06	1.43	24.9
7	2.524	0.06	1.10	14.2
8	2.979	0.05	0.89	9.6
9	3.429	0.05	0.76	7.5
10	3.945	0.05	0.64	6.5
11	4.354	0.05	0.58	5.0

Step	COD <sub>s</sub> [mm]	σ <sub>s</sub> [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	σ <sub>b</sub> [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.535	21.76	0.199	0.05	64.5
2	1.073	19.81	0.565	0.06	38.9
3	1.563	14.35	1.036	0.05	27.1
4	2.019	9.82	1.500	0.05	18.8
5	2.529	6.53	2.049	0.06	13.5
6	3.019	4.84	2.524	0.06	9.7
7	3.522	3.87	2.979	0.05	7.0
8	4.003	3.26	3.429	0.05	5.6
9	4.563	2.75	3.945	0.05	4.4
10	4.972	2.46	4.354	0.05	3.9
11	5.701	1.83	5.121	0.01	3.1

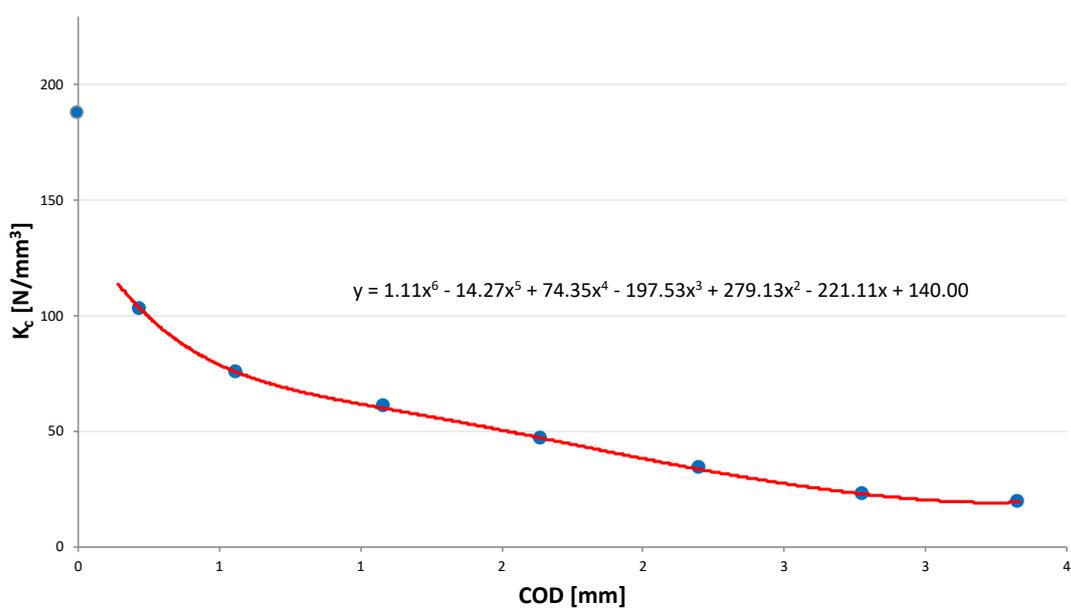


# MIX\_CEMI\_AF – Lastrine

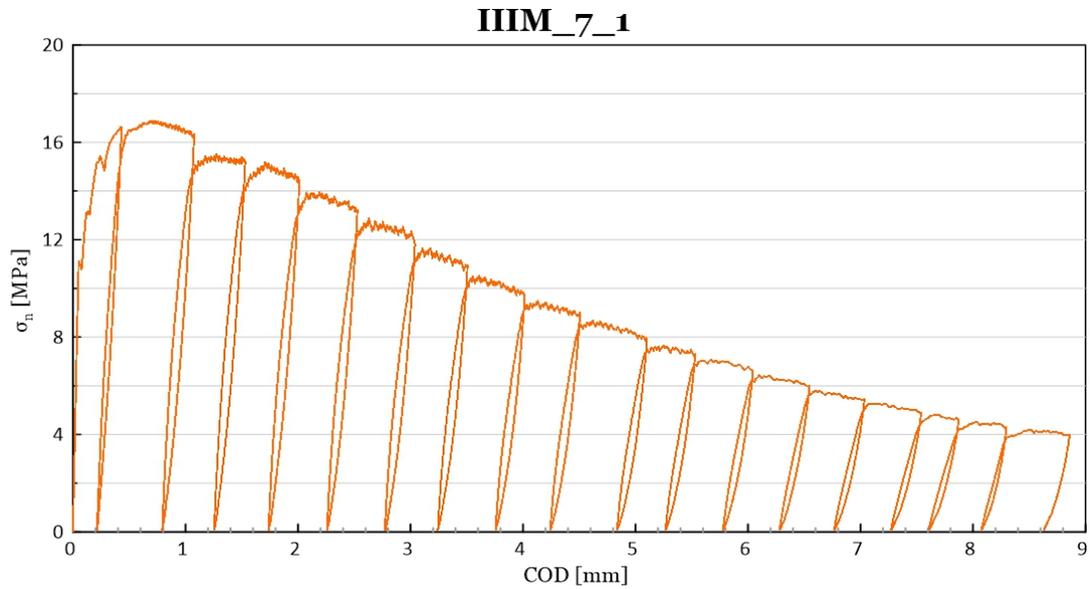


Step	COD <sub>c</sub> [mm]	σ <sub>c</sub> [MPa]	σ <sub>25%</sub> [MPa]	K <sub>c</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.00	5.04	187.3
2	0.223	0.14	5.47	103.0
3	0.560	0.25	3.93	75.1
4	1.083	0.24	2.72	60.3
5	1.639	0.18	1.98	46.6
6	2.200	0.19	1.60	33.6
7	2.778	0.26	1.24	22.7
8	3.332	0.20	1.06	19.3

Step	COD <sub>s</sub> [mm]	σ <sub>s</sub> [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	σ <sub>b</sub> [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.532	20.16	0.223	0.14	64.8
2	1.089	18.07	0.560	0.25	33.7
3	1.500	12.04	1.083	0.24	28.3
4	1.972	8.74	1.639	0.18	25.7
5	2.499	6.68	2.200	0.19	21.7
6	3.042	5.37	2.778	0.26	19.3
7	3.603	4.26	3.332	0.20	15.0
8	4.137	3.73	3.891	0.12	14.7

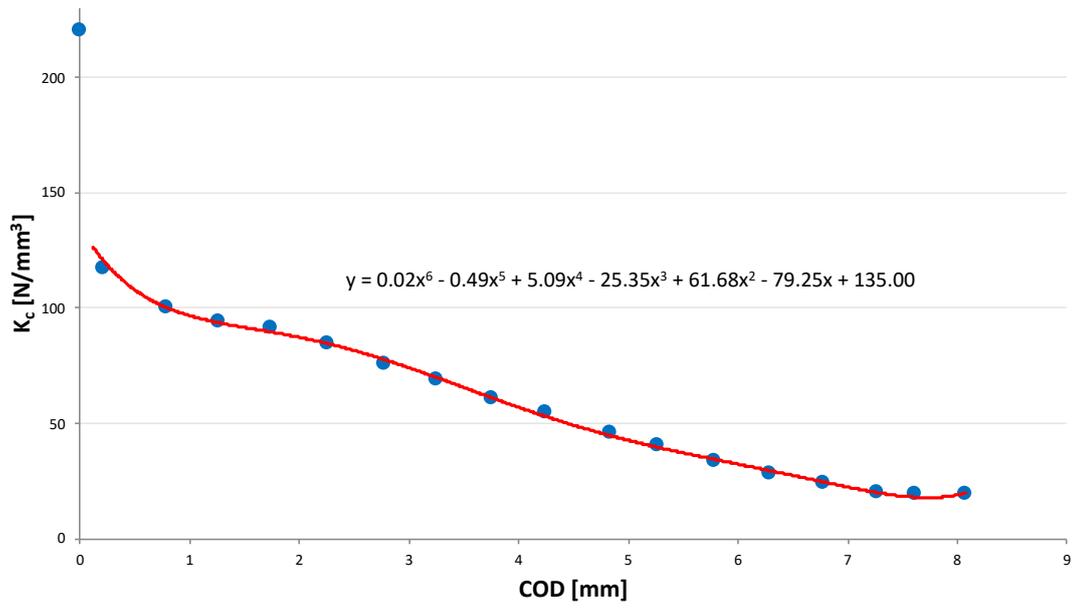


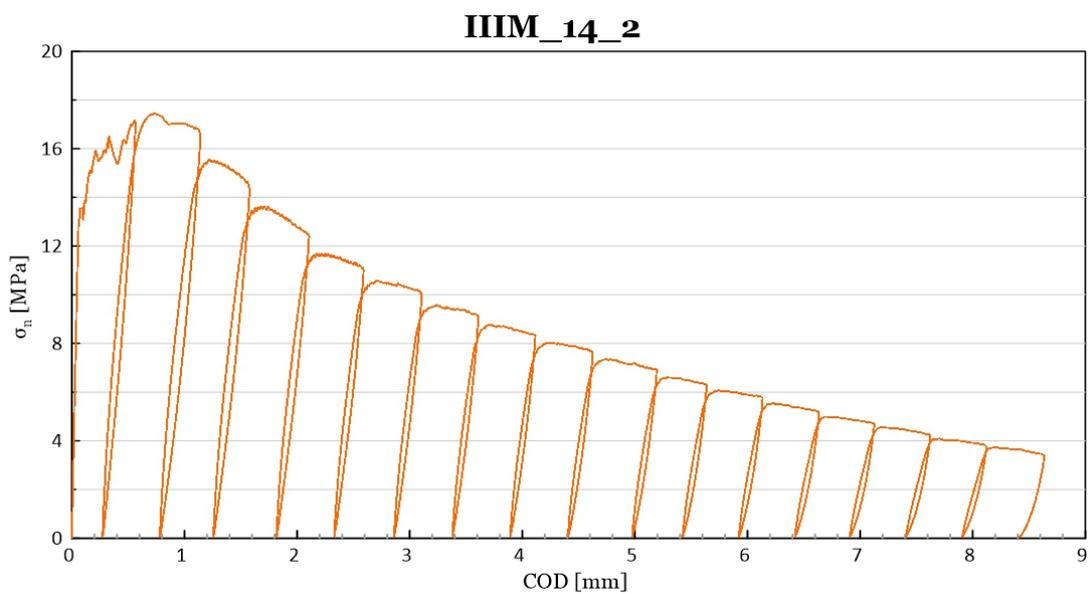
# MIX\_CEMIII\_SF – Travetti



Step	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{25\%}$ [MPa]	K <sub>c</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.02	4.24	220.2
2	0.215	0.06	4.18	116.9
3	0.794	0.07	3.93	100.5
4	1.256	0.08	3.81	94.4
5	1.739	0.05	3.52	91.2
6	2.260	0.07	3.16	85.0
7	2.772	0.07	2.88	76.0
8	3.244	0.08	2.60	68.8
9	3.758	0.08	2.43	60.7
10	4.245	0.08	2.11	54.5
11	4.838	0.08	1.92	45.7
12	5.269	0.08	1.79	40.3
13	5.780	0.07	1.56	34.1
14	6.284	0.07	1.41	28.3
15	6.770	0.08	1.30	24.2
16	7.273	0.07	1.22	20.4
17	7.611	0.07	1.14	19.5
18	8.078	0.07	1.05	19.3

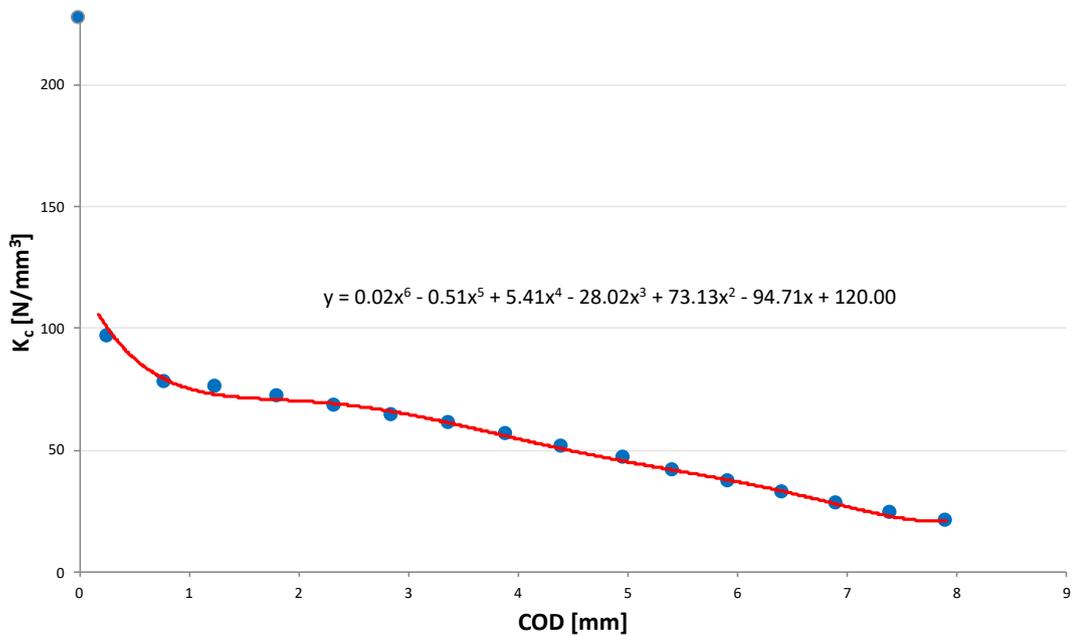
Step	COD <sub>s</sub> [mm]	$\sigma_s$ [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	$\sigma_b$ [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.428	16.63	0.215	0.06	77.8
2	1.075	16.35	0.794	0.07	58.0
3	1.517	15.22	1.256	0.08	58.0
4	2.000	14.55	1.739	0.05	55.6
5	2.528	13.22	2.260	0.07	49.0
6	3.039	11.84	2.772	0.07	44.1
7	3.507	10.93	3.244	0.08	41.3
8	4.002	9.84	3.758	0.08	40.0
9	4.507	9.00	4.245	0.08	34.0
10	5.098	7.96	4.838	0.08	30.3
11	5.530	7.30	5.269	0.08	27.6
12	6.044	6.63	5.780	0.07	24.9
13	6.546	6.00	6.284	0.07	22.6
14	7.035	5.45	6.770	0.08	20.3
15	7.540	4.88	7.273	0.07	18.0
16	7.873	4.59	7.611	0.07	17.3
17	8.298	4.30	8.078	0.07	19.2
18	8.860	3.97	8.629	0.07	16.9





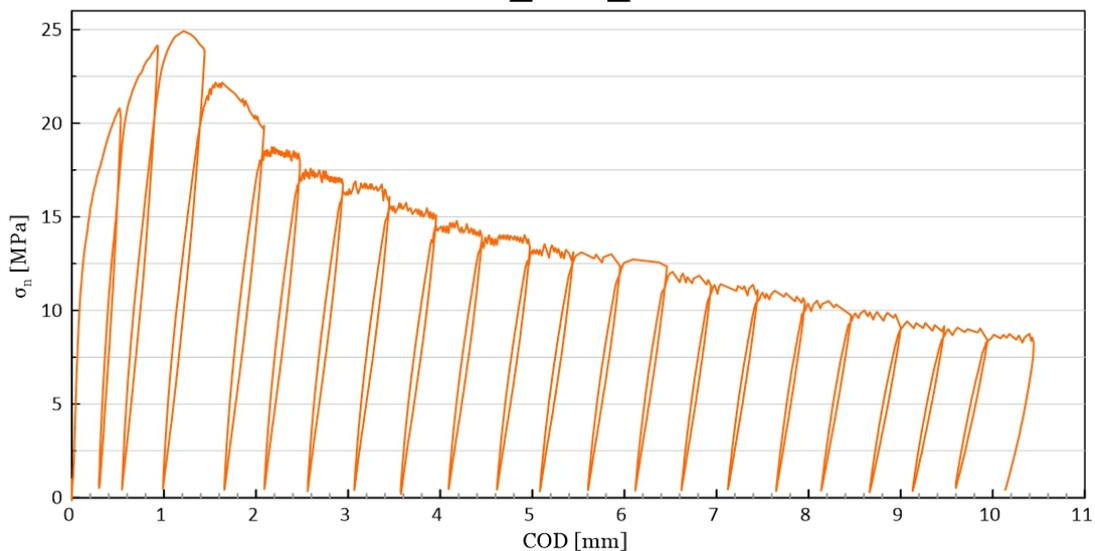
Step	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{25\%}$ [MPa]	$K_c$ [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.00	4.28	226.9
2	0.274	0.07	4.36	96.4
3	0.782	0.06	3.88	77.9
4	1.258	0.07	3.41	75.9
5	1.817	0.06	2.92	71.6
6	2.330	0.07	2.63	67.9
7	2.863	0.07	2.39	64.4
8	3.380	0.07	2.19	60.5
9	3.894	0.07	2.00	56.6
10	4.406	0.07	1.83	51.3
11	4.978	0.07	1.65	46.7
12	5.425	0.07	1.51	41.6
13	5.923	0.06	1.38	36.8
14	6.424	0.07	1.25	32.1
15	6.911	0.07	1.14	28.0
16	7.410	0.07	1.01	24.2
17	7.909	0.07	0.93	20.5

Step	COD <sub>s</sub> [mm]	σ <sub>s</sub> [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	σ <sub>b</sub> [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.560	17.15	0.274	0.07	59.8
2	1.128	16.78	0.782	0.06	48.3
3	1.569	14.49	1.258	0.07	46.4
4	2.096	12.48	1.817	0.06	44.5
5	2.582	11.07	2.330	0.07	43.7
6	3.093	10.12	2.863	0.07	43.6
7	3.601	9.15	3.380	0.07	41.1
8	4.102	8.36	3.894	0.07	39.8
9	4.627	7.64	4.406	0.07	34.3
10	5.196	6.91	4.978	0.07	31.4
11	5.638	6.27	5.425	0.07	29.2
12	6.136	5.74	5.923	0.06	26.7
13	6.637	5.18	6.424	0.07	24.0
14	7.126	4.69	6.911	0.07	21.4
15	7.624	4.23	7.410	0.07	19.4
16	8.123	3.75	7.909	0.07	17.2
17	8.639	3.38	8.419	0.04	15.2



## MIX\_CEMIII\_SF – Lastrine

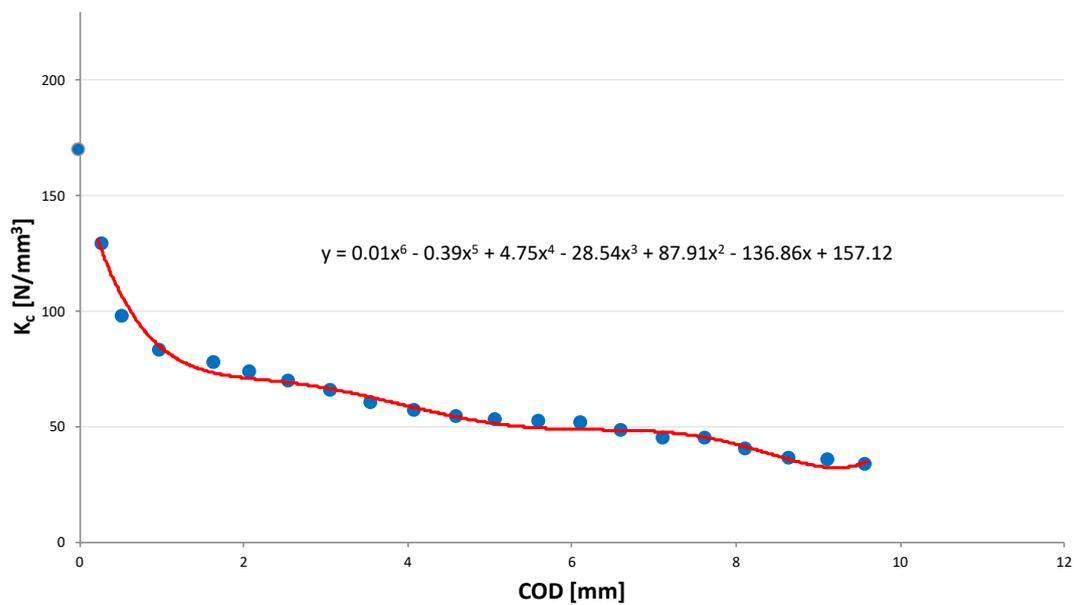
**LB\_IIM\_8**



Step	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{25\%}$ [MPa]	$K_c$ [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.000	0.00	5.20	169.2
2	0.297	0.51	6.04	128.6
3	0.544	0.42	6.23	97.6
4	0.990	0.46	5.54	82.6
5	1.656	0.41	4.68	76.9
6	2.091	0.45	4.40	73.2
7	2.560	0.34	4.23	69.3
8	3.066	0.40	3.94	65.1
9	3.574	0.19	3.70	59.7
10	4.091	0.45	3.51	56.2
11	4.616	0.42	3.39	53.8
12	5.082	0.33	3.28	52.2
13	5.605	0.40	3.18	51.7
14	6.118	0.36	2.99	51.4
15	6.619	0.39	2.86	48.0

16	7.124	0.44	2.76	44.5
17	7.648	0.35	2.63	44.5
18	8.136	0.37	2.50	40.0
19	8.661	0.27	2.35	36.1
20	9.130	0.36	2.27	34.9
21	9.599	0.51	2.19	33.3

Step	COD <sub>s</sub> [mm]	$\sigma_s$ [MPa]	COD <sub>b</sub> [mm]	$\sigma_b$ [MPa]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
1	0.519	20.80	0.297	0.51	91.4
2	0.930	24.16	0.544	0.42	61.5
3	1.442	23.85	0.990	0.46	51.7
4	2.088	19.87	1.656	0.41	45.0
5	2.475	18.02	2.091	0.45	45.8
6	2.931	17.02	2.560	0.34	45.0
7	3.451	16.06	3.066	0.40	40.7
8	3.957	15.09	3.574	0.19	38.9
9	4.453	13.94	4.091	0.45	37.3
10	4.974	13.36	4.616	0.42	36.1
11	5.446	13.12	5.082	0.33	35.1
12	5.955	12.35	5.605	0.40	34.2
13	6.462	12.34	6.118	0.36	34.8
14	6.941	11.30	6.619	0.39	33.9
15	7.448	11.09	7.124	0.44	32.8
16	7.960	10.45	7.648	0.35	32.4
17	8.463	9.73	8.136	0.37	28.6
18	9.000	9.07	8.661	0.27	26.0
19	9.473	9.16	9.130	0.36	25.7
20	9.943	8.40	9.599	0.51	22.9
21	10.444	8.31	10.135	0.41	25.6

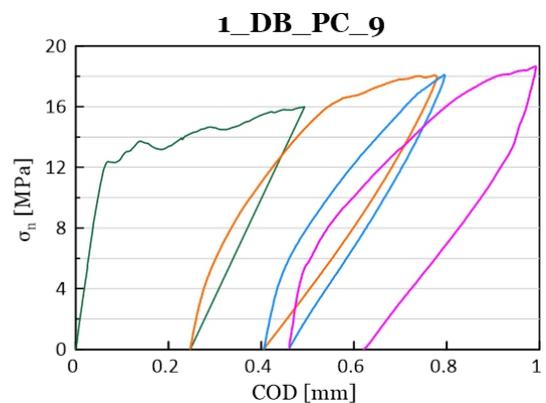
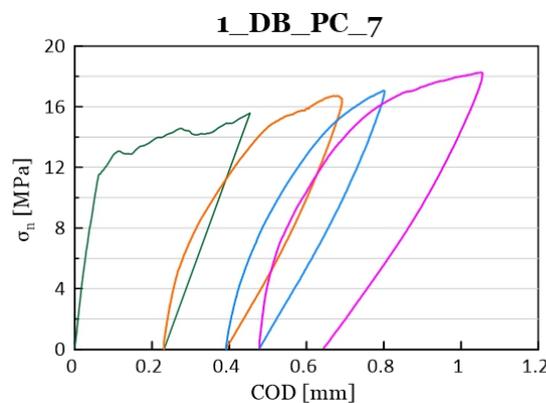
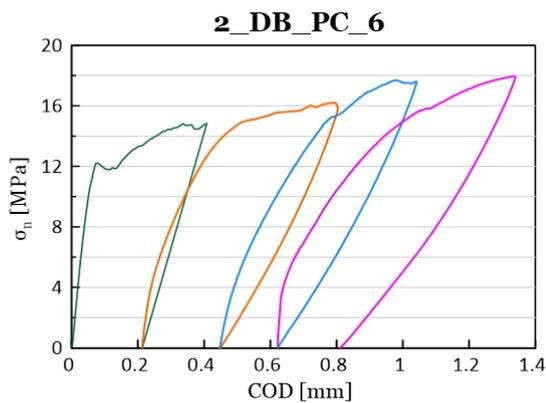
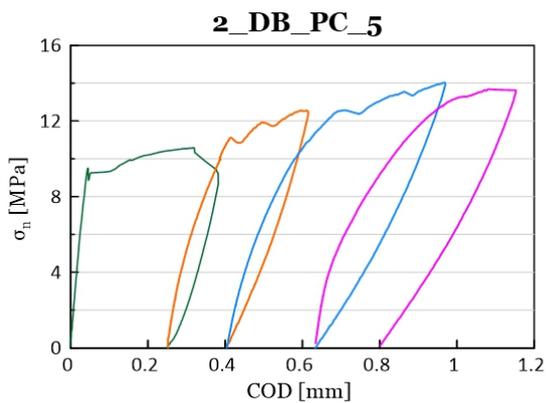
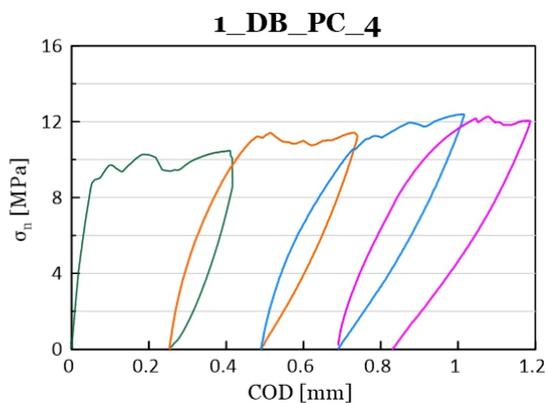
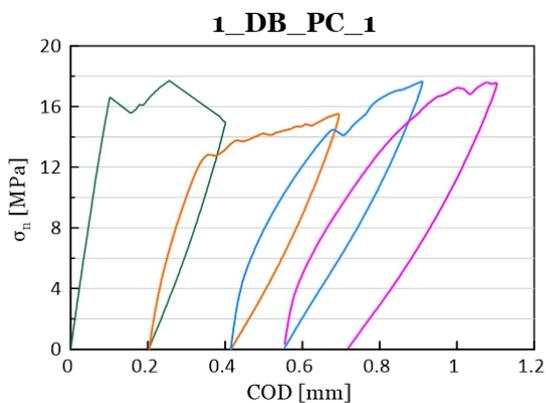


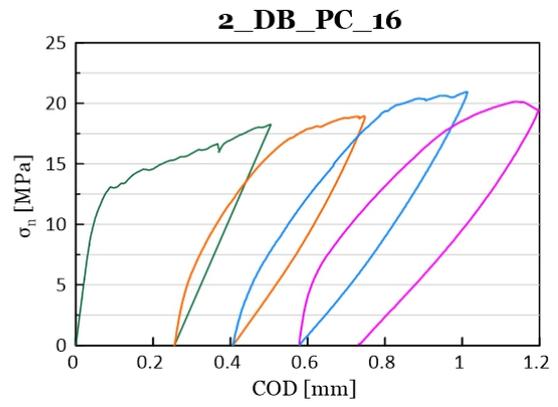
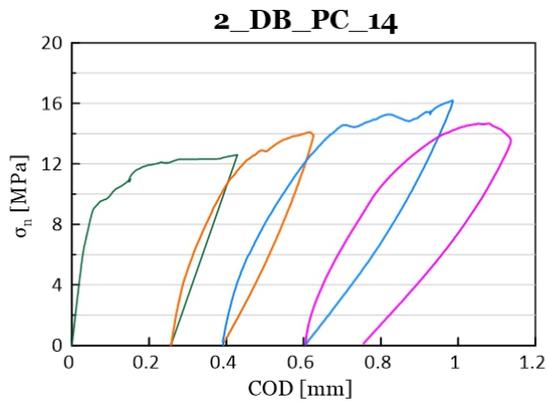
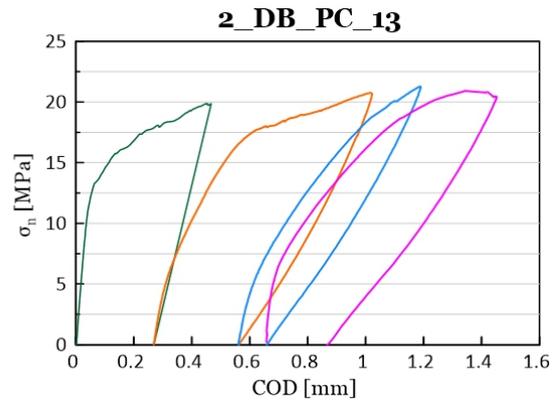
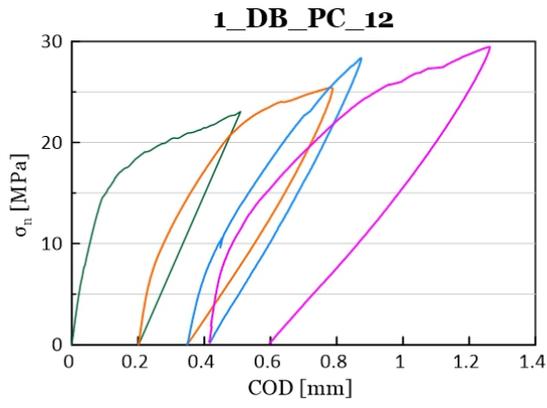
---

## **APPENDICE C**

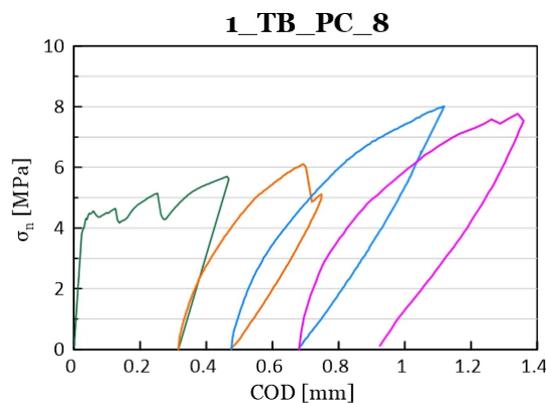
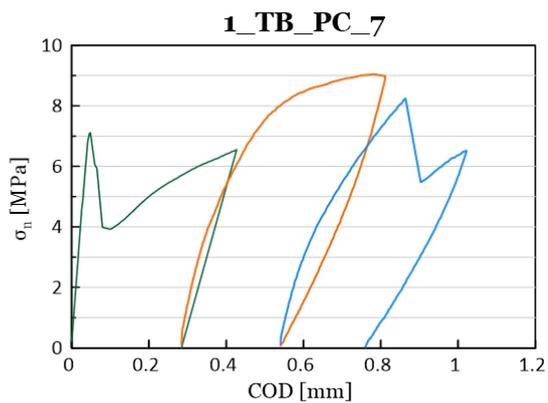
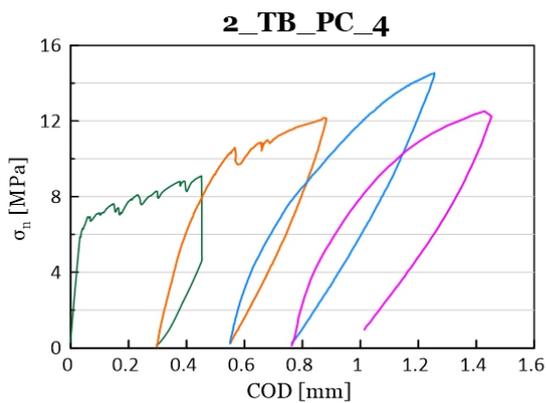
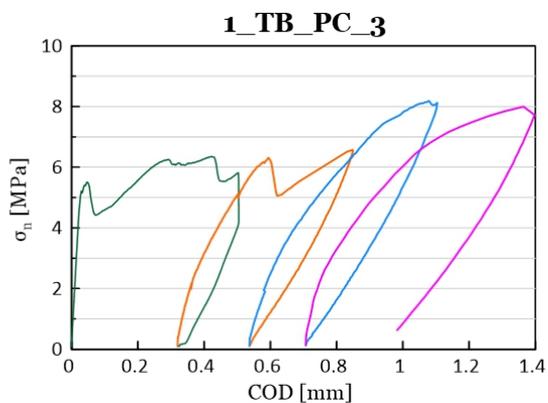
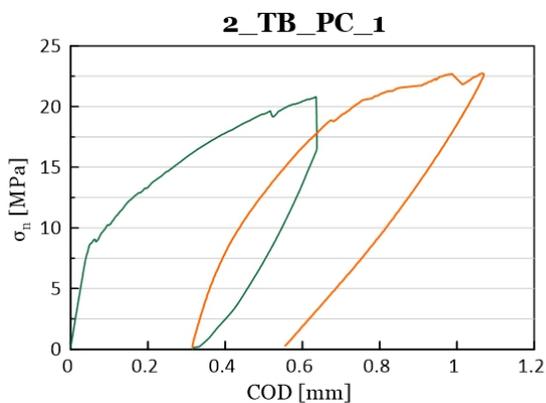
### **Prove di fessurazione**

# MIX\_CEMI\_SF – Travetti

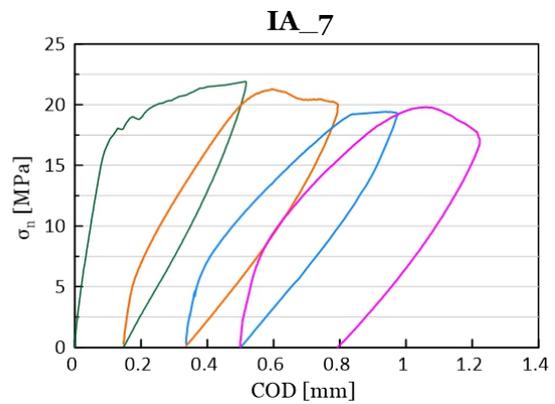
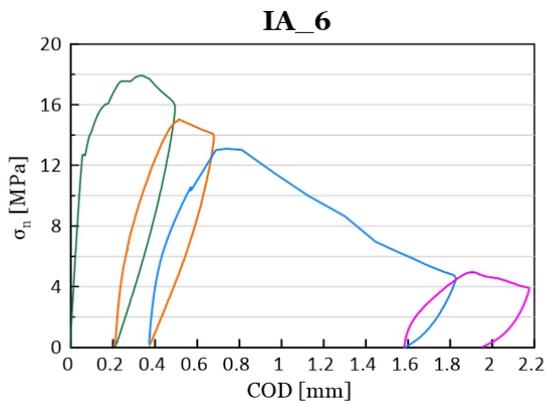
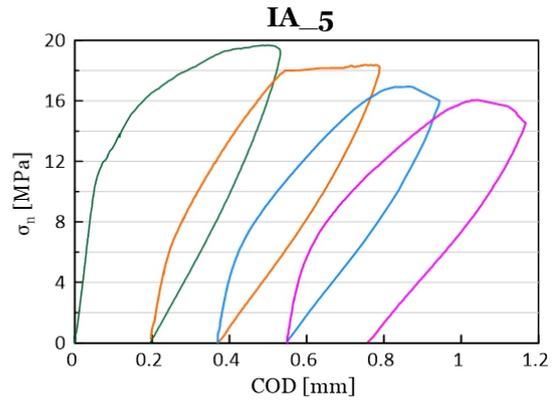
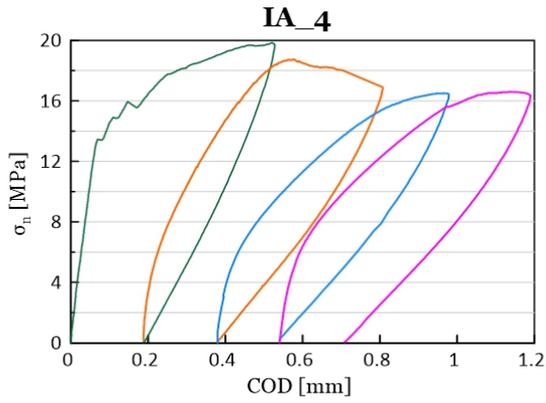
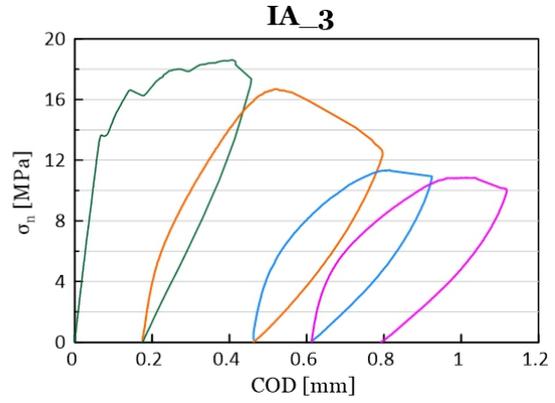
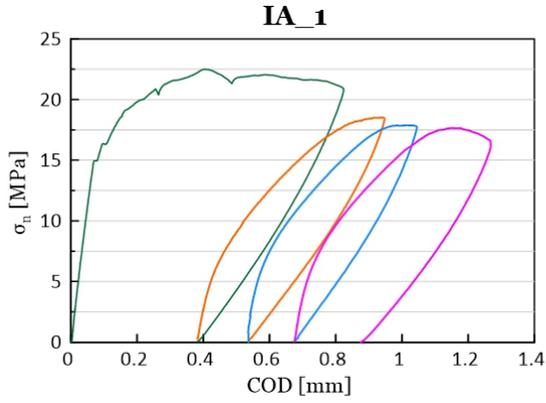


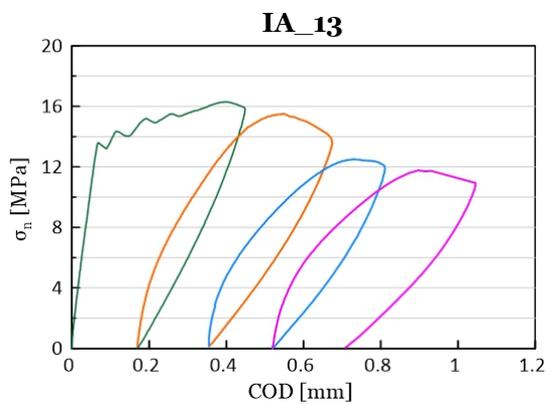
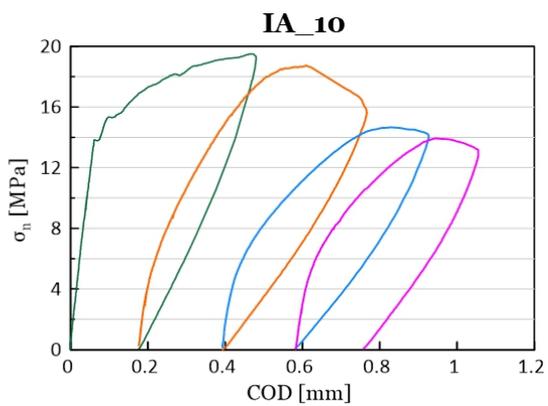
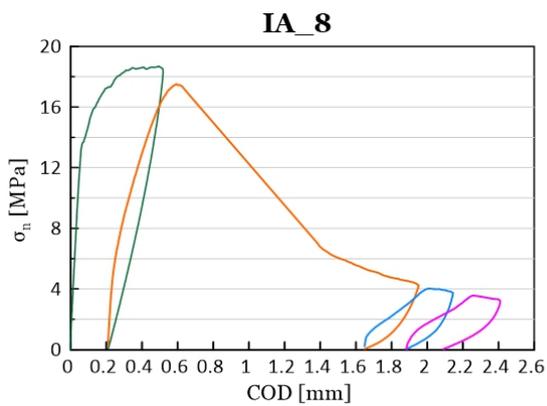


## MIX\_CEMI\_SF – Lastrine

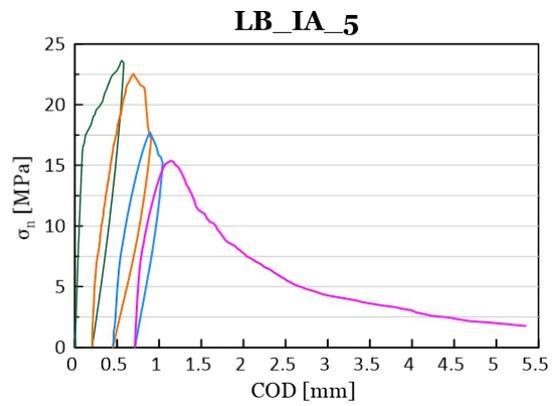
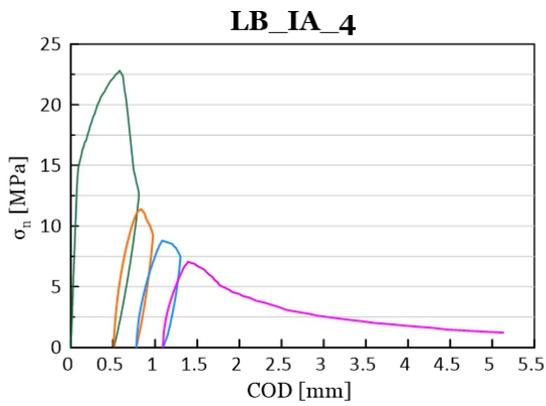
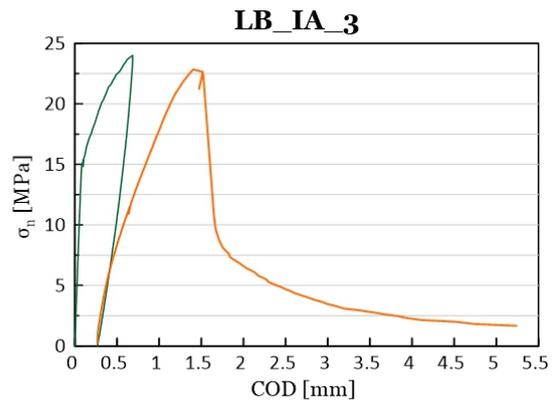
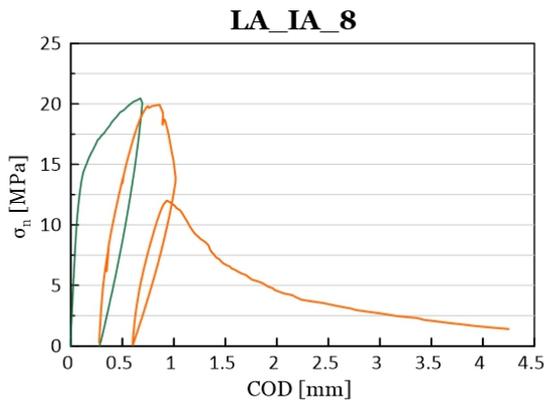
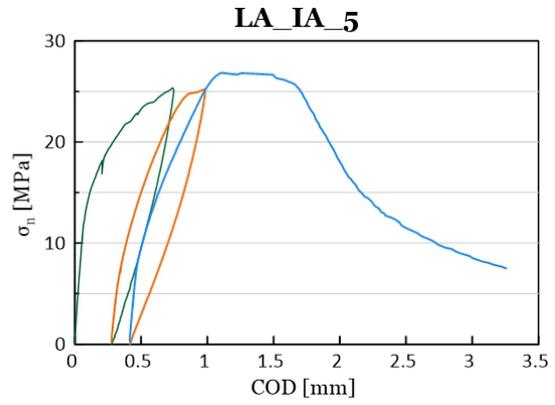
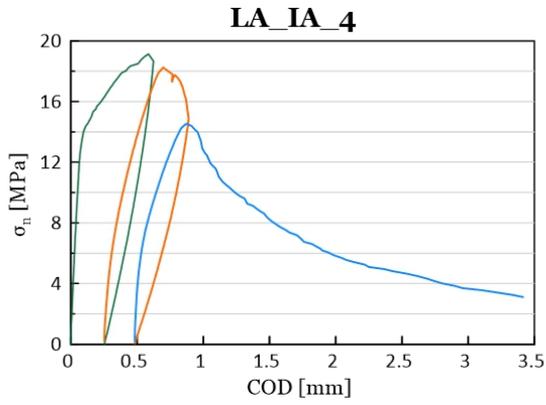


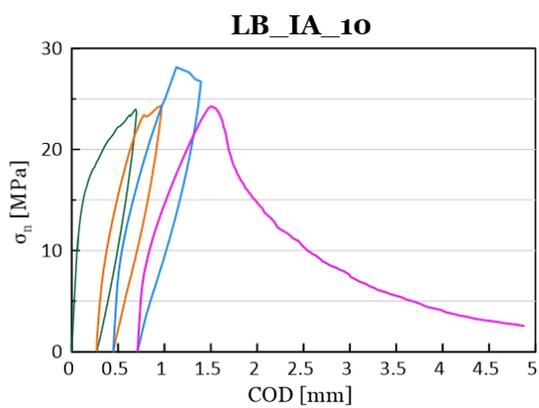
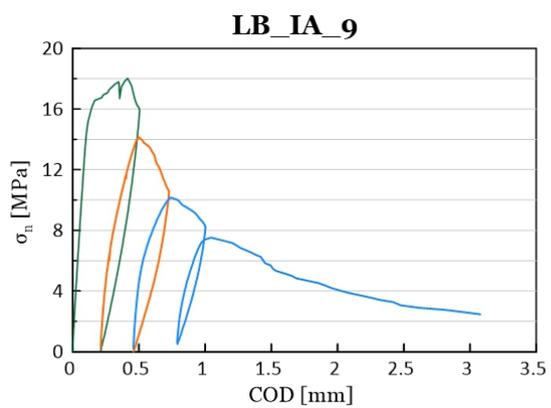
# MIX\_CEMI\_AF – Travetti



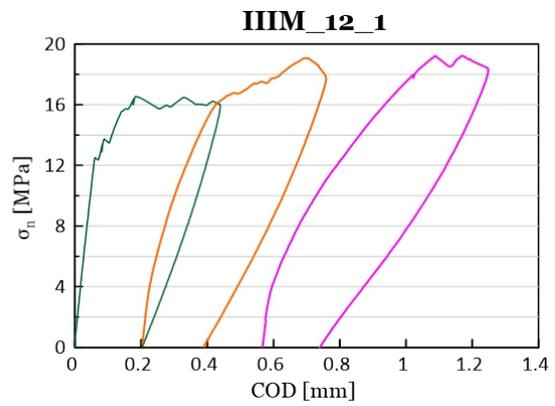
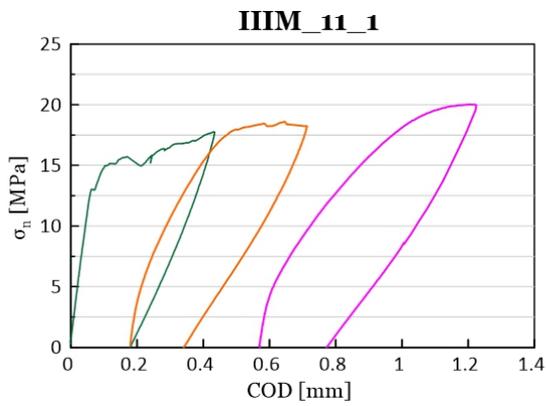
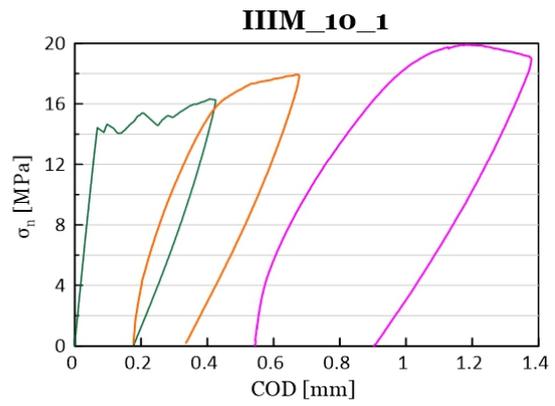
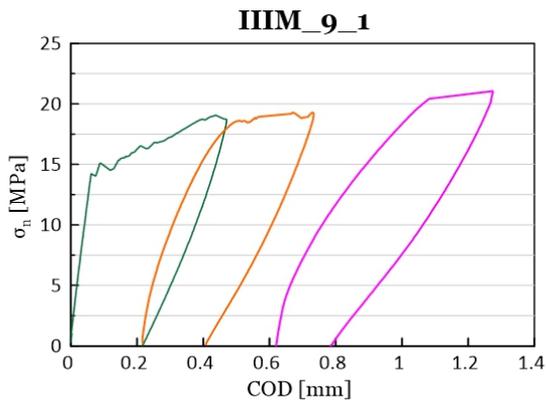
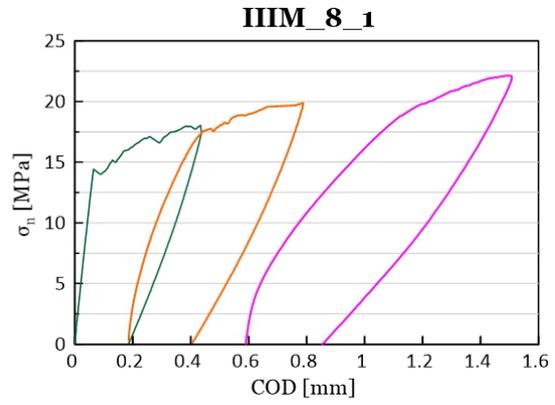
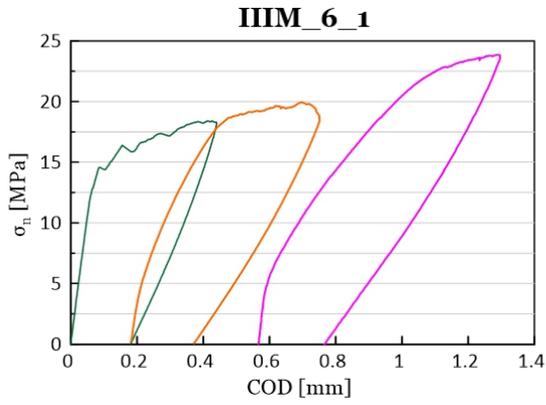


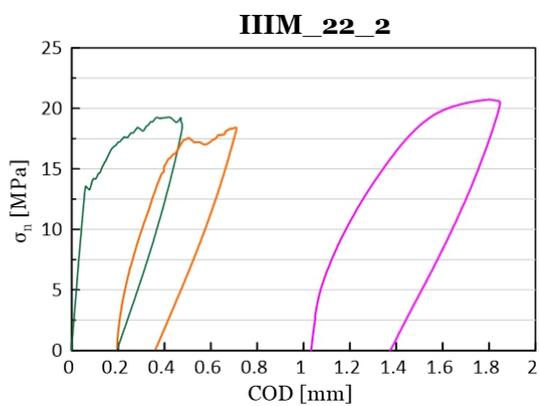
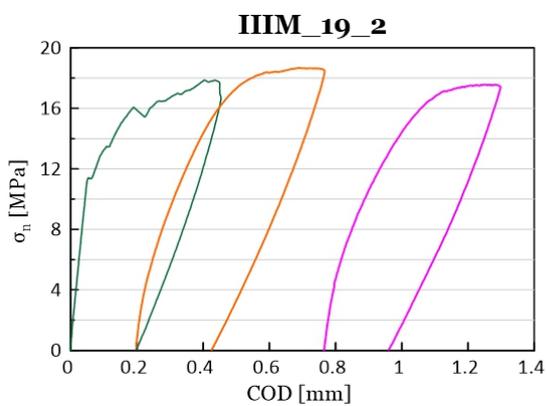
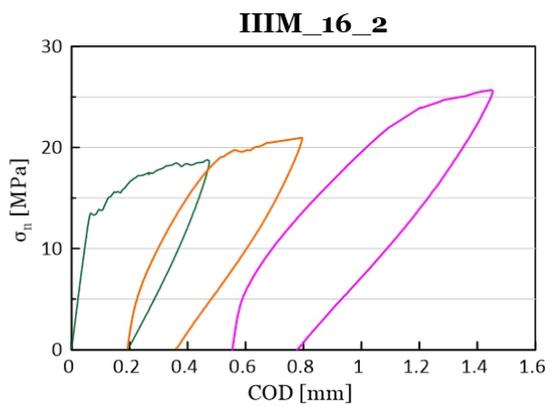
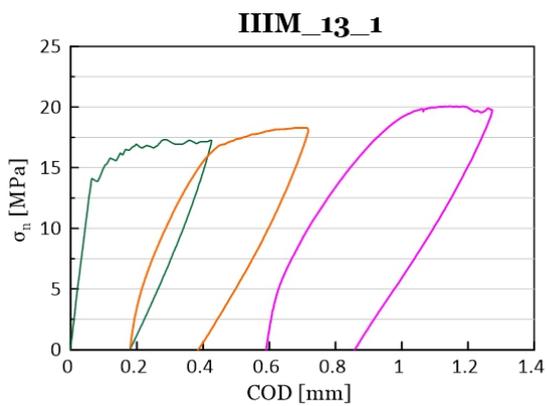
# MIX\_CEMI\_AF – Lastrine



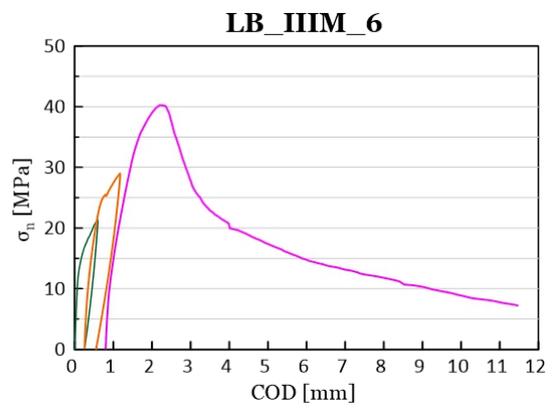
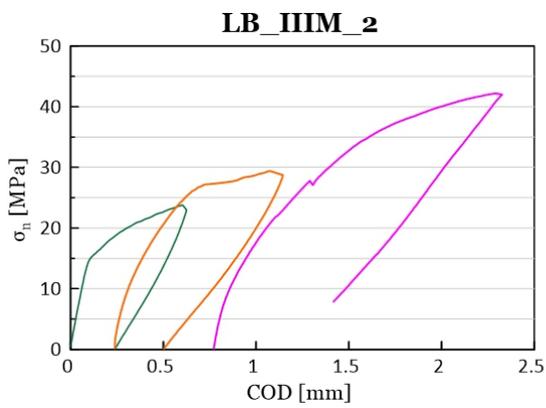
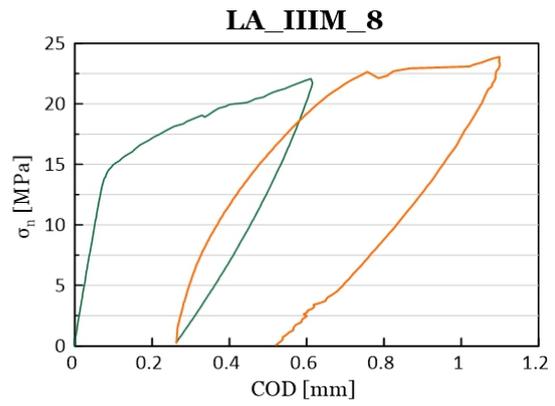
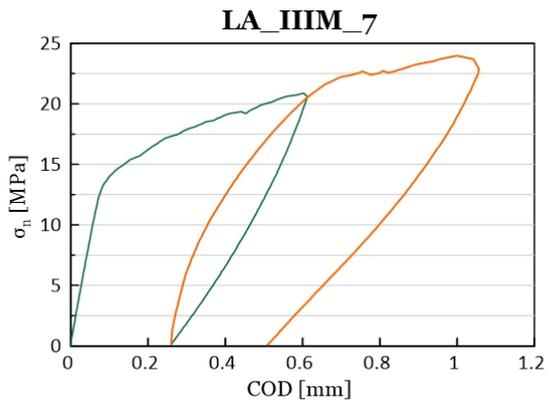
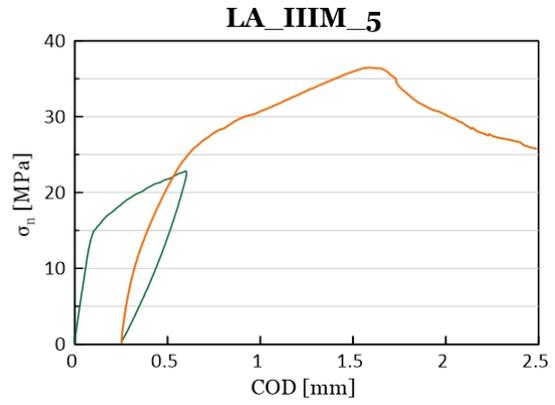
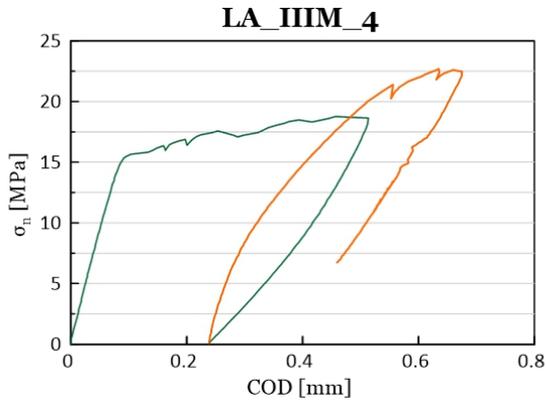


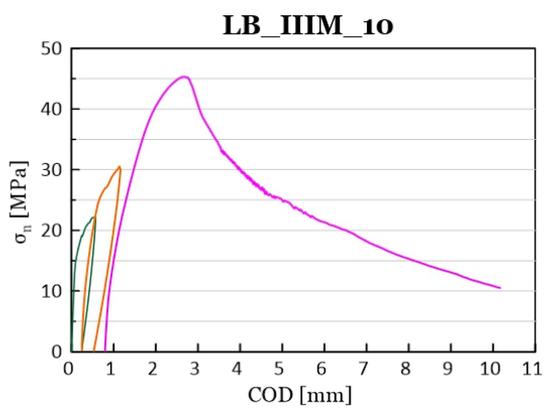
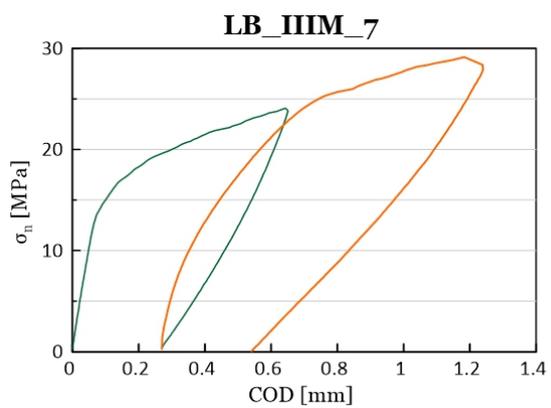
# MIX\_CEMIII\_SF – Travetti





# MIX\_CEMIII\_SF – Lastrine





---

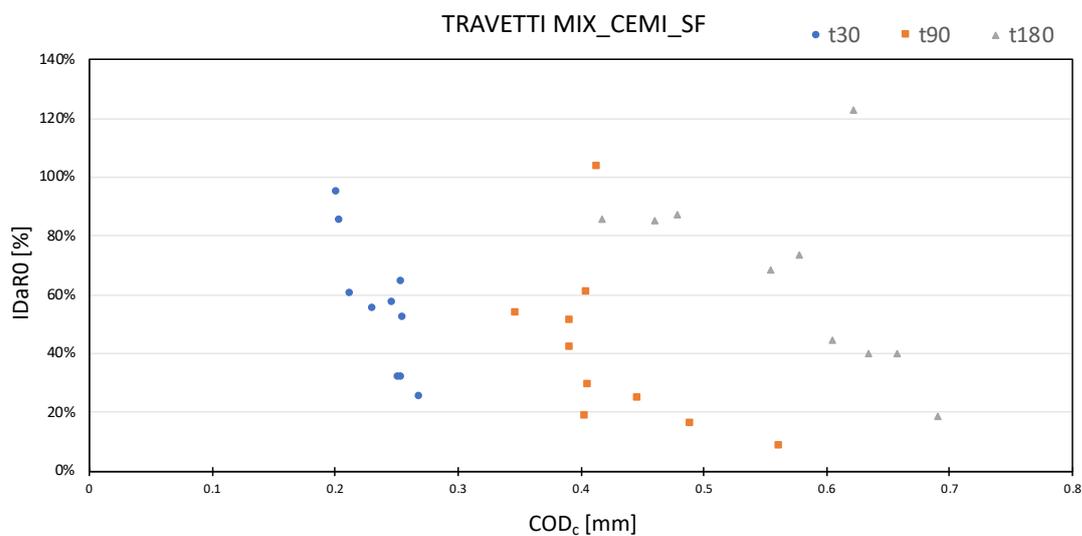
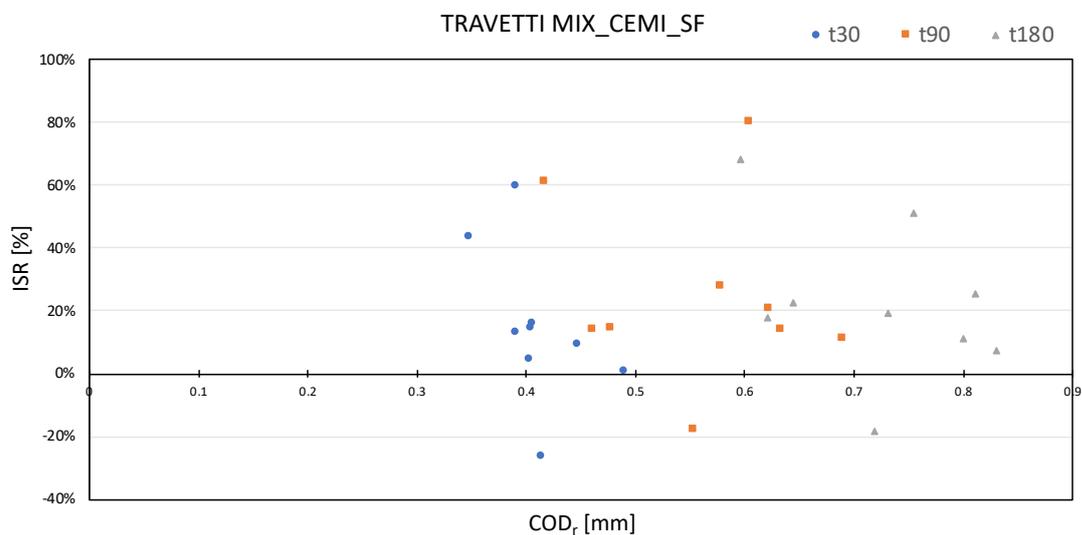
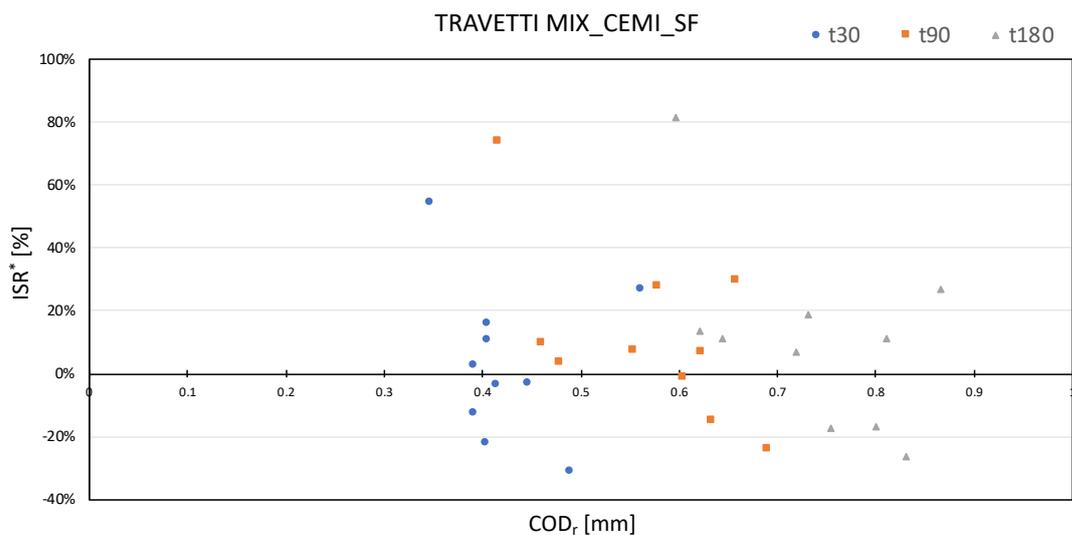
## **APPENDICE D**

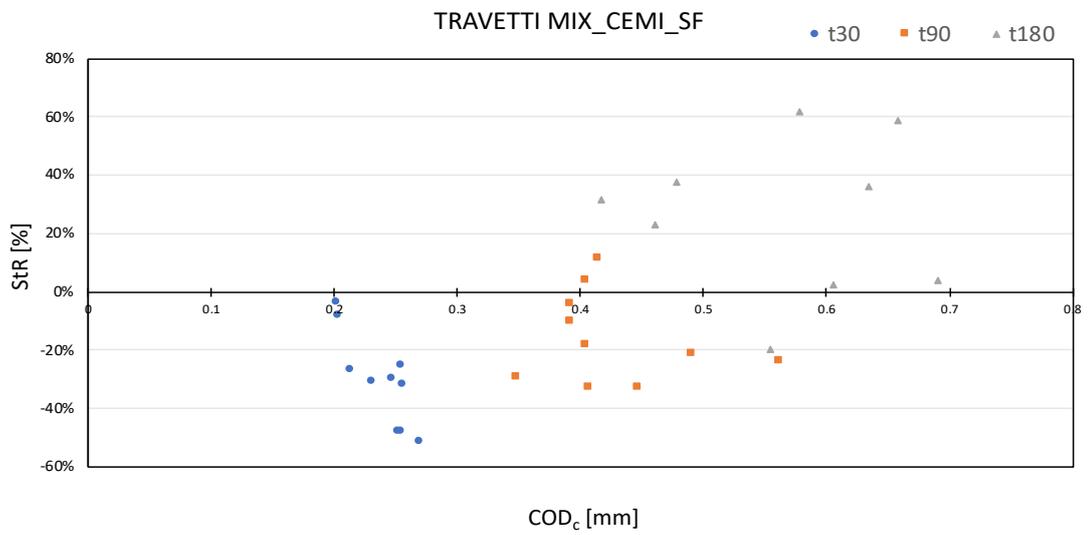
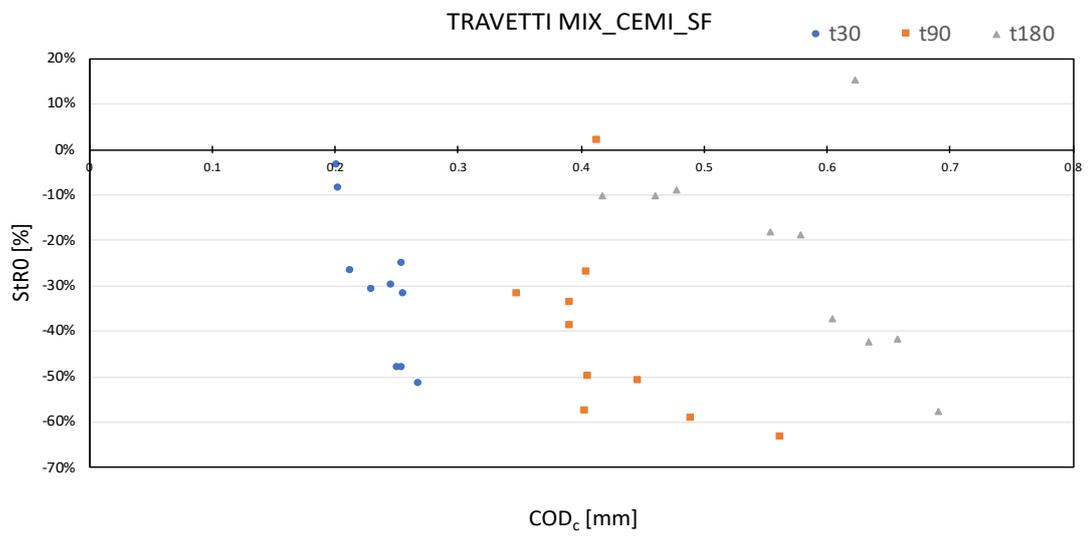
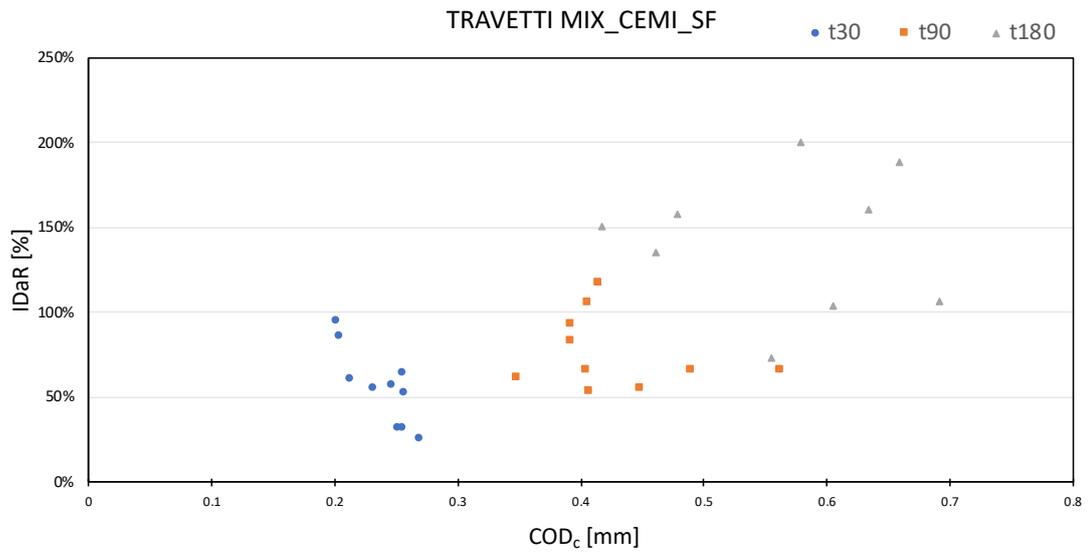
### **Indici**

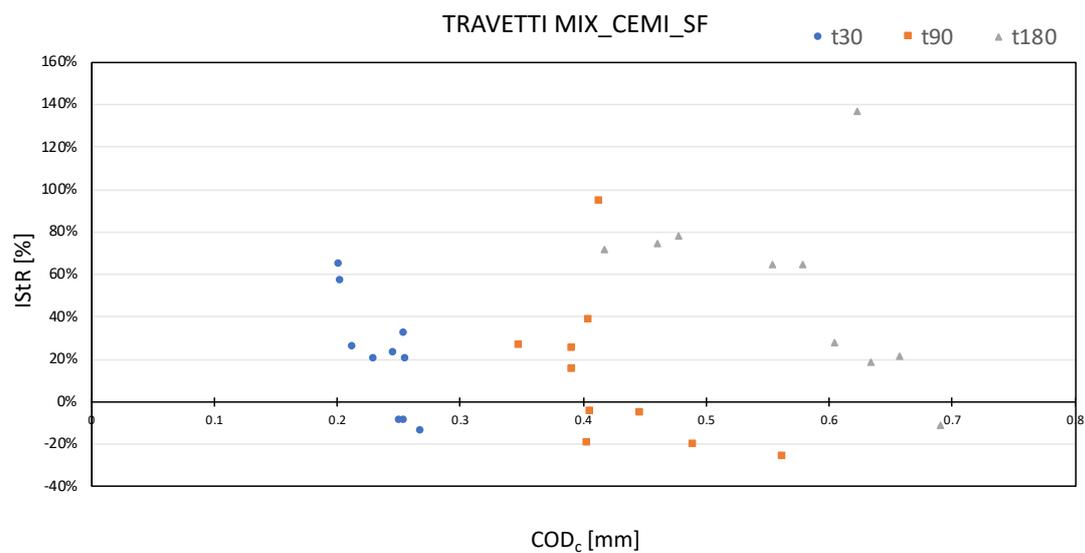
**MIX\_CEMI\_SF – Travetti**

Provino	Tempo [gg]	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_s$ [MPa]	COD <sub>s</sub> [mm]	K <sub>c</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
DB_PC_1	0	0.000	14.97	0.401	176.5	75.8
	30	0.204	15.51	0.694	161.9	55.4
	90	0.415	17.64	0.908	180.4	49.6
	180	0.555	17.51	1.104	144.9	45.3
DB_PC_4	0	0.000	10.47	0.407	231.5	68.1
	30	0.255	11.21	0.740	120.2	44.8
	90	0.490	12.37	1.016	94.7	37.9
	180	0.691	12.03	1.187	98.5	33.8
DB_PC_5	0	0.000	9.19	0.382	240.1	70.7
	30	0.252	12.46	0.616	124.6	58.5
	90	0.404	14.02	0.970	102.2	41.8
	180	0.634	13.62	1.152	138.9	38.5
DB_PC_6	0	0.000	14.84	0.408	235.5	76.1
	30	0.213	15.90	0.803	172.6	44.7
	90	0.448	17.57	1.042	115.8	41.8
	180	0.623	17.93	1.340	272.2	33.9
DB_PC_7	0	0.000	15.58	0.454	226.0	69.8
	30	0.231	16.51	0.692	156.5	54.8
	90	0.392	17.02	0.802	149.9	52.4
	180	0.479	18.21	1.056	206.2	44.0
DB_PC_9	0	0.000	15.99	0.494	212.9	64.8
	30	0.247	18.02	0.777	149.7	48.4
	90	0.405	18.04	0.792	155.4	54.2
	180	0.461	18.64	0.993	191.4	50.2
DB_PC_12	0	0.000	23.05	0.510	237.5	74.8
	30	0.202	25.34	0.788	229.3	57.5
	90	0.348	28.34	0.874	162.7	61.6
	180	0.417	29.42	1.263	214.1	44.0
DB_PC_13	0	0.000	19.82	0.464	319.0	99.0
	30	0.269	20.67	1.023	154.7	44.9
	90	0.563	21.26	1.190	117.8	40.0
	180	0.658	20.21	1.450	186.9	34.6
DB_PC_14	0	0.000	12.60	0.429	220.8	73.0
	30	0.256	13.92	0.625	150.5	59.3
	90	0.392	16.20	0.985	135.2	42.5
	180	0.605	13.59	1.137	138.7	35.3
DB_PC_16	0	0.000	18.26	0.505	249.7	73.1
	30	0.255	18.86	0.749	187.1	55.0
	90	0.407	20.95	1.013	125.3	48.2
	180	0.579	19.49	1.198	202.9	41.6

Provino	Tempo [gg]	ISR* [%]	ISR [%]	IDaRo [%]	IDaR [%]	StRo [%]	StR [%]	IStR [%]
DB_PC_1	30	-3.7	-26.4	85.5	85.5	-8.3	-8.3	57.2
	90	7.6	-17.9	103.8	117.3	2.2	11.4	94.8
	180	6.8	-18.4	68.6	72.8	-17.9	-19.7	65.0
DB_PC_4	30	-31.2	0.7	31.9	31.9	-48.1	-48.1	-8.4
	90	-24.1	11.0	16.2	66.1	-59.1	-21.2	-19.6
	180	-26.6	7.4	18.6	106.7	-57.5	4.0	-11.0
DB_PC_5	30	-22.1	4.4	31.8	31.8	-48.1	-48.1	-8.5
	90	-15.0	14.0	18.6	66.0	-57.4	-18.0	-19.2
	180	-16.9	11.4	40.3	160.8	-42.1	36.0	19.3
DB_PC_6	30	-3.0	9.1	60.6	60.6	-26.7	-26.7	26.3
	90	7.1	20.5	24.9	55.6	-50.8	-32.9	-4.9
	180	11.4	25.3	123.0	311.4	15.6	135.1	137.4
DB_PC_7	30	2.6	13.3	55.5	55.5	-30.7	-30.7	20.6
	90	3.8	14.7	51.3	93.5	-33.7	-4.2	25.3
	180	11.0	22.6	87.3	157.7	-8.8	37.5	78.5
DB_PC_9	30	10.6	14.6	57.3	57.3	-29.7	-29.7	23.5
	90	10.0	14.1	61.1	105.6	-27.0	3.8	38.6
	180	13.7	17.9	85.4	135.6	-10.1	23.2	74.7
DB_PC_12	30	54.5	43.4	95.0	95.0	-3.4	-3.4	65.3
	90	73.9	61.3	54.0	61.2	-31.5	-29.1	26.7
	180	81.6	68.5	85.6	150.9	-9.9	31.6	72.1
DB_PC_13	30	26.8	39.7	25.3	25.3	-51.5	-51.5	-13.8
	90	29.6	42.8	8.5	66.4	-63.1	-23.9	-25.6
	180	27.1	40.0	39.9	188.8	-41.4	58.7	21.5
DB_PC_14	30	-12.4	59.7	52.5	52.5	-31.8	-31.8	20.4
	90	-1.2	80.1	42.1	83.2	-38.8	-10.2	15.6
	180	-17.1	51.1	44.4	103.8	-37.2	2.6	28.4
DB_PC_16	30	15.7	16.0	64.6	64.6	-25.1	-25.1	32.2
	90	27.7	28.1	29.6	53.3	-49.8	-33.0	-4.6
	180	18.9	19.2	73.5	200.5	-18.7	61.9	64.7





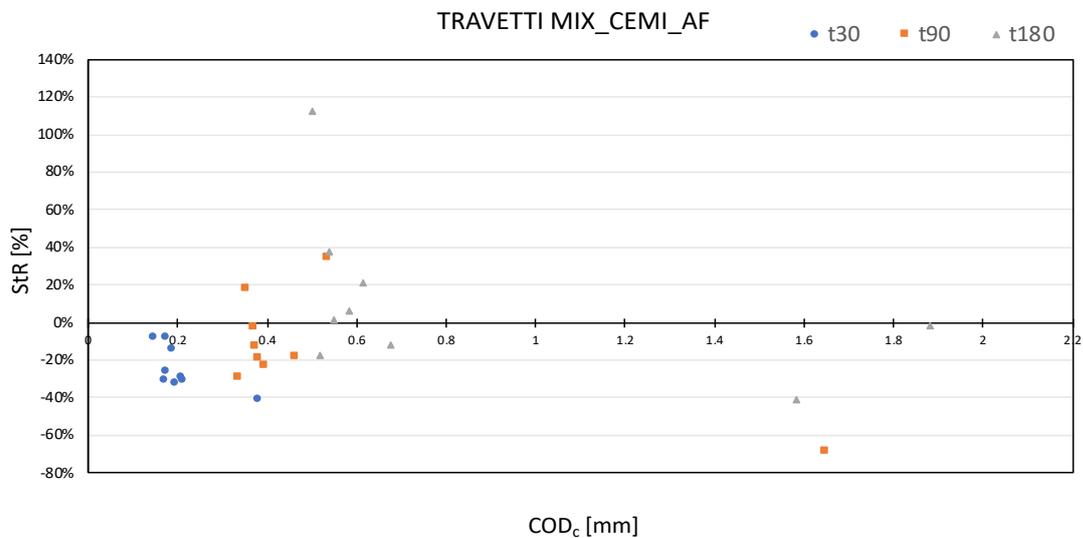
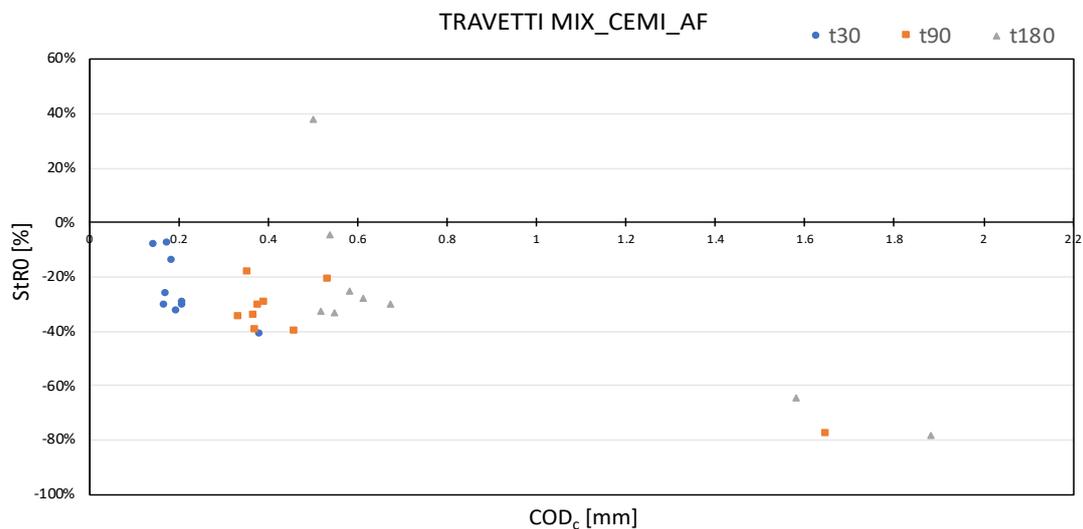
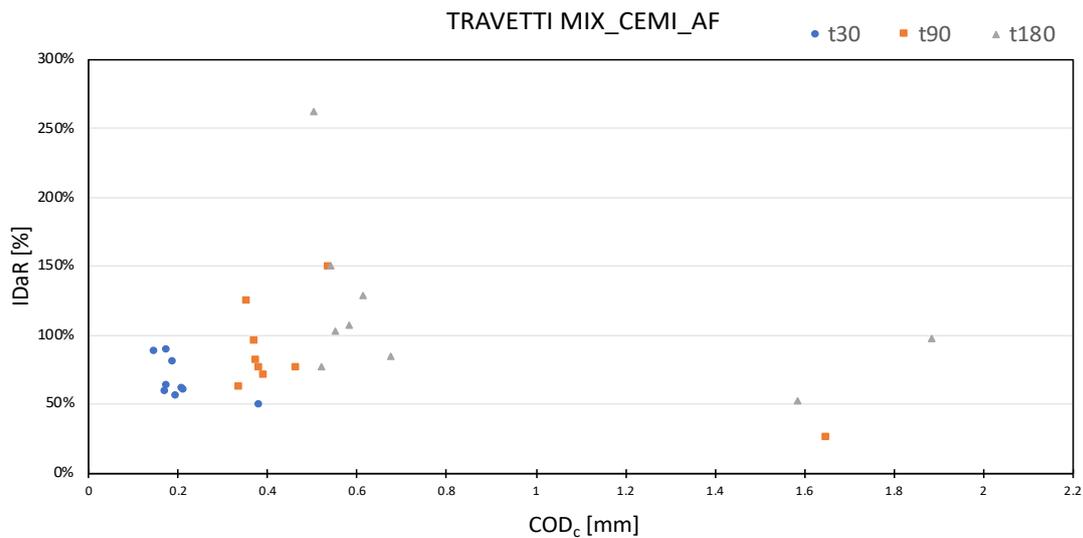


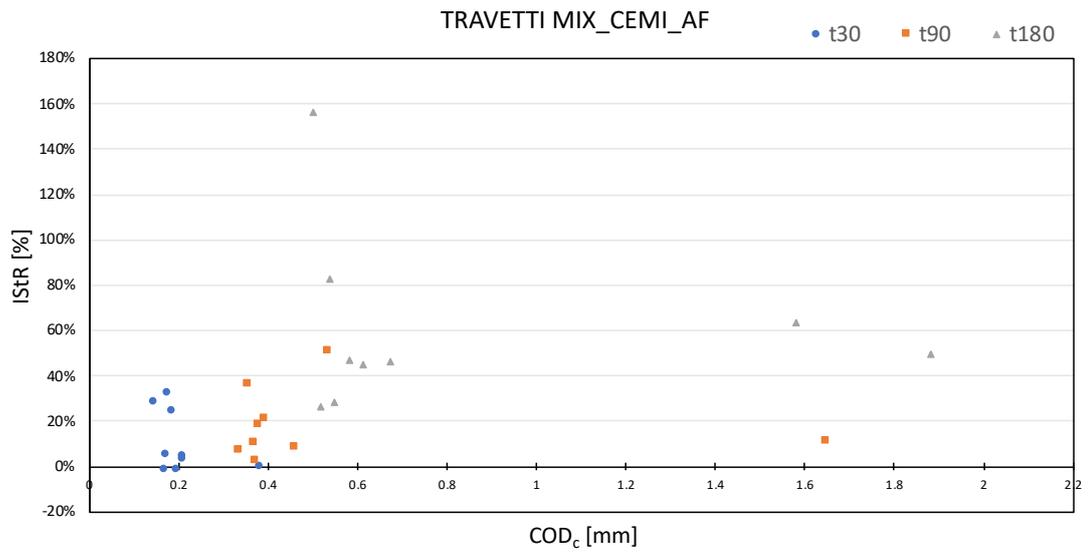
## MIX\_CEMI\_AF – Travetti

Provino	Tempo [gg]	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_s$ [MPa]	COD <sub>s</sub> [mm]	K <sub>c</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
IA_1	0	0.000	20.71	0.824	253.8	46.8
	30	0.383	18.44	0.948	149.0	44.6
	90	0.537	17.71	1.046	200.6	47.6
	180	0.676	16.20	1.268	177.1	41.2
IA_3	0	0.000	17.36	0.457	217.8	61.3
	30	0.175	12.52	0.797	159.9	37.4
	90	0.463	10.94	0.924	130.1	34.9
	180	0.614	9.96	1.118	157.3	30.6
IA_4	0	0.000	19.73	0.528	207.4	57.9
	30	0.188	16.90	0.808	177.9	39.3
	90	0.380	16.45	0.978	144.4	37.2
	180	0.540	16.26	1.190	198.1	33.7
IA_5	0	0.000	19.20	0.532	215.6	56.9
	30	0.196	18.25	0.790	145.3	43.4
	90	0.370	16.02	0.944	141.0	40.4
	180	0.550	14.54	1.167	143.4	35.4
IA_6	0	0.000	15.94	0.495	230.4	56.0
	30	0.211	14.03	0.677	159.9	45.7
	90	0.373	4.52	1.829	139.1	18.4
	180	1.583	3.90	2.175	81.5	17.6
IA_7	0	0.000	21.86	0.518	201.0	58.8
	30	0.147	20.01	0.795	184.2	43.3
	90	0.337	19.29	0.974	130.8	40.5
	180	0.501	16.97	1.223	277.4	39.5
IA_8	0	0.000	18.38	0.519	233.8	59.2
	30	0.210	4.25	1.952	164.8	13.8
	90	1.649	3.73	2.146	51.7	14.0
	180	1.884	3.17	2.411	50.8	9.8
IA_10	0	0.000	19.33	0.480	232.7	63.4
	30	0.176	15.64	0.767	214.3	41.8
	90	0.393	14.20	0.925	164.1	41.1
	180	0.582	13.18	1.055	173.6	44.2
IA_13	0	0.000	15.83	0.449	216.4	56.6
	30	0.170	13.61	0.674	149.7	42.3
	90	0.355	11.78	0.810	176.4	40.6
	180	0.520	10.94	1.046	145.4	32.3

Provino	Tempo [gg]	ISR* [%]	ISR [%]	IDaRo [%]	IDaR [%]	StRo [%]	StR [%]	IStR [%]
IA_1	30	14.5	-8.2	49.4	49.4	-41.3	-41.3	0.0
	90	15.7	-7.2	74.3	149.4	-21.0	34.6	50.6
	180	20.0	-3.8	62.9	84.7	-30.2	-11.7	46.3
IA_3	30	-28.5	-37.3	63.0	63.0	-26.6	-26.6	5.2
	90	-32.9	-41.2	44.0	75.7	-40.3	-18.6	8.0
	180	-31.8	-40.2	61.3	128.5	-27.8	20.9	45.1
IA_4	30	-2.9	-13.7	80.3	80.3	-14.2	-14.2	24.4
	90	3.4	-8.1	57.8	75.8	-30.4	-18.9	18.4
	180	16.1	3.2	93.8	150.2	-4.5	37.2	82.5
IA_5	30	4.3	20.5	55.7	55.7	-32.6	-32.6	-1.6
	90	-0.5	15.0	53.0	95.9	-34.6	-2.9	10.4
	180	3.1	19.2	54.5	102.4	-33.5	1.7	28.0
IA_6	30	-23.8	-28.1	59.6	59.6	-30.6	-30.6	2.8
	90	-52.4	-55.1	47.6	81.8	-39.6	-13.0	2.1
	180	-47.3	-50.3	14.6	52.3	-64.6	-41.4	63.7
IA_7	30	14.3	-7.5	88.2	88.2	-8.3	-8.3	28.0
	90	21.3	-1.8	50.6	62.1	-34.9	-29.0	7.0
	180	23.0	-0.4	153.7	262.3	38.0	112.0	156.5
IA_8	30	-51.7	-56.4	60.5	60.5	-29.5	-29.5	4.2
	90	-50.3	-55.1	-4.3	25.1	-77.9	-68.6	10.9
	180	-51.2	-56.0	-4.8	97.4	-78.3	-1.9	49.6
IA_10	30	-11.6	-23.6	89.1	89.1	-7.9	-7.9	32.1
	90	-12.9	-24.7	59.5	70.9	-29.5	-23.4	21.1
	180	-13.9	-25.5	65.1	107.7	-25.4	5.8	46.7
IA_13	30	-26.4	-35.3	58.3	58.3	-30.8	-30.8	-1.3
	90	-32.3	-40.4	75.0	124.9	-18.5	17.9	36.0
	180	-28.5	-37.1	55.5	77.1	-32.8	-17.6	26.5



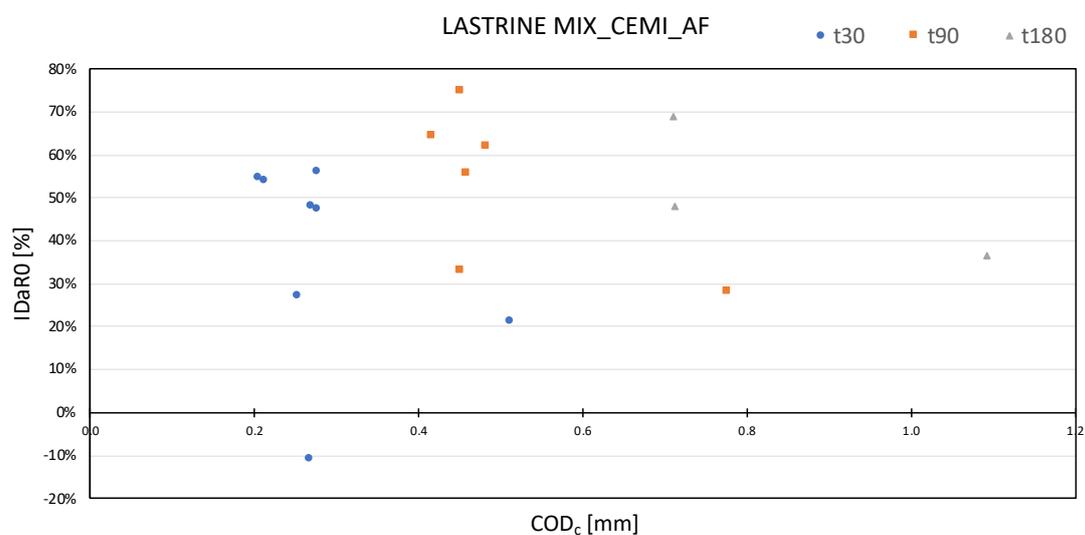
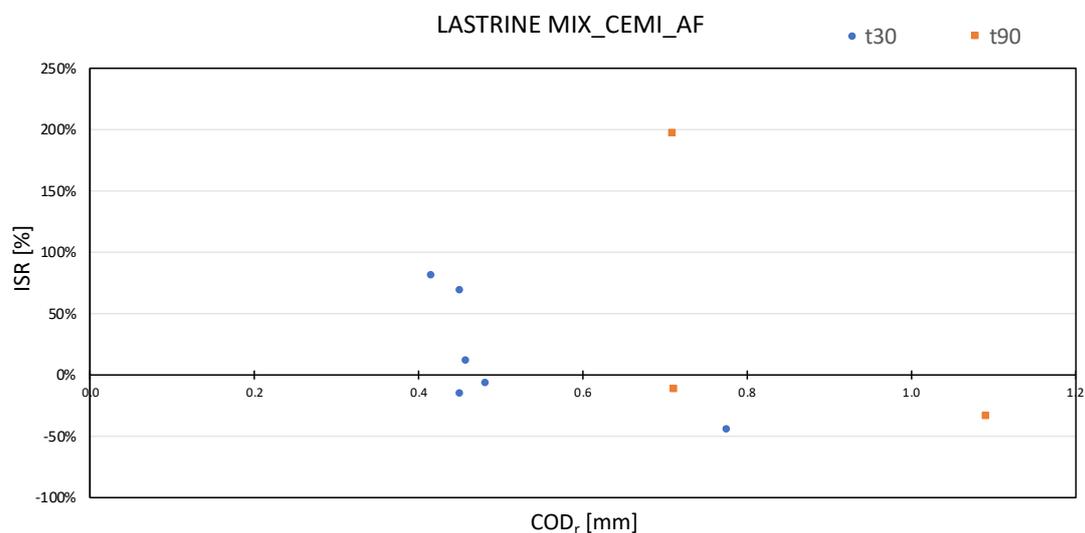
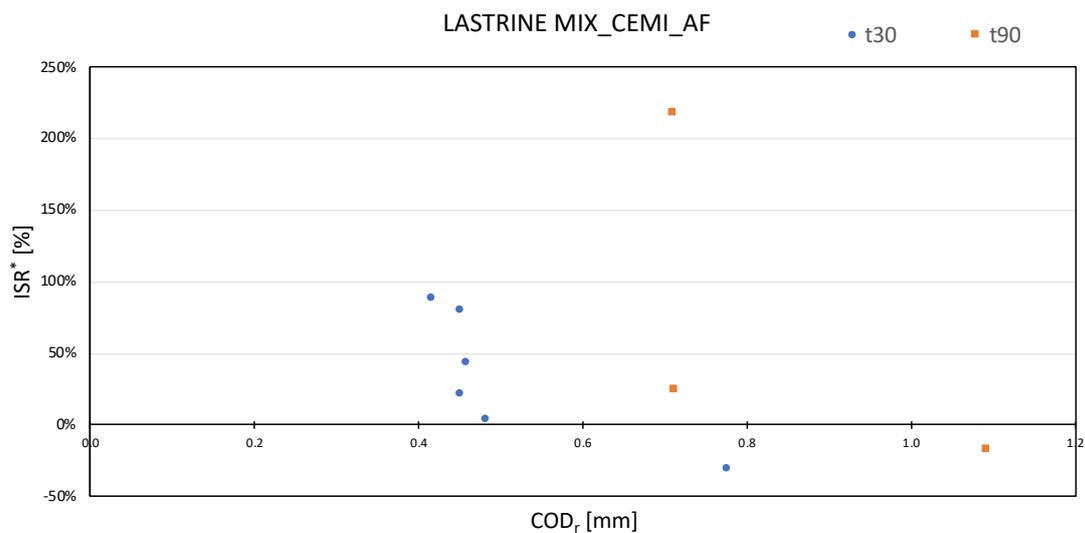


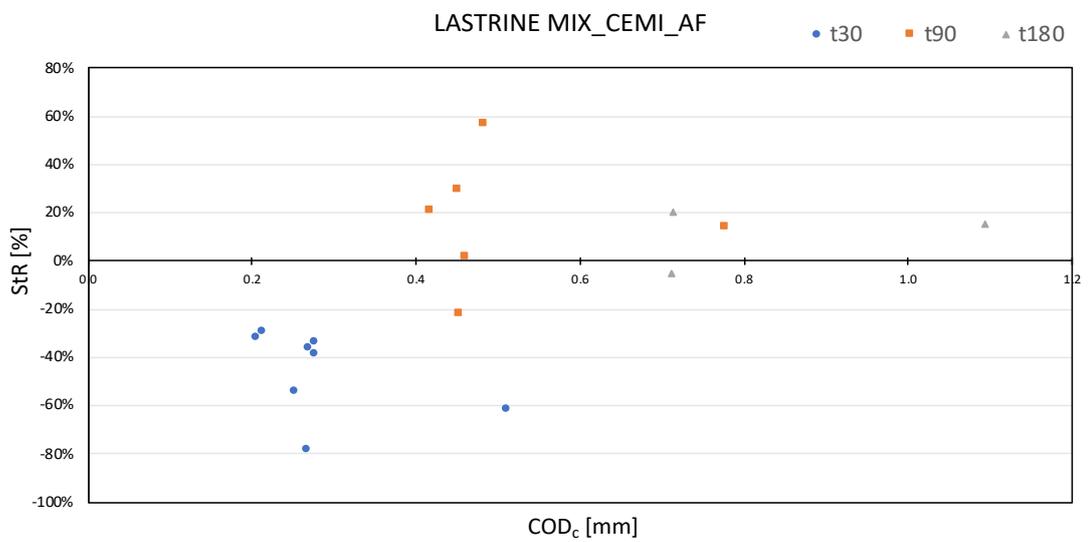
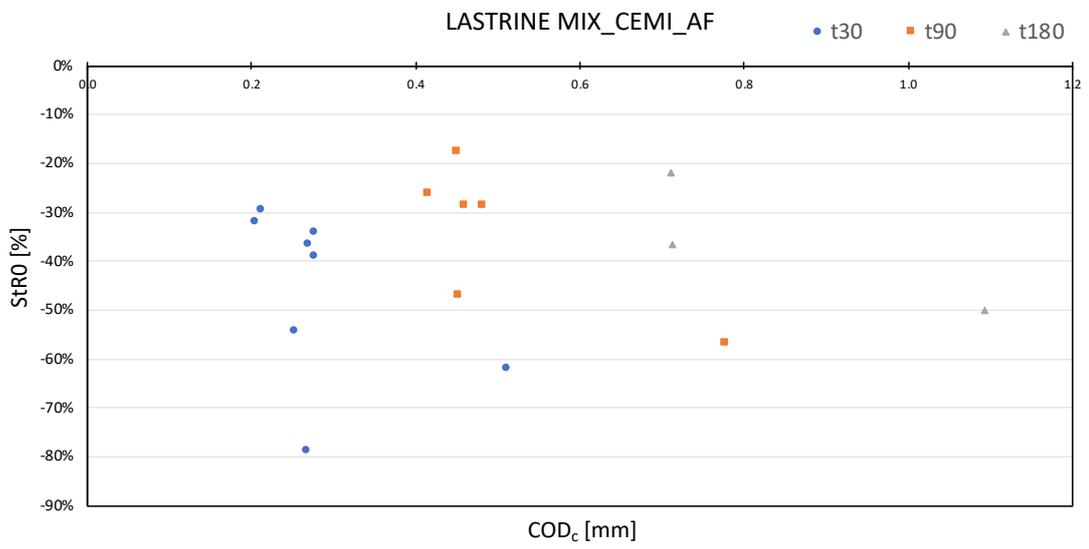
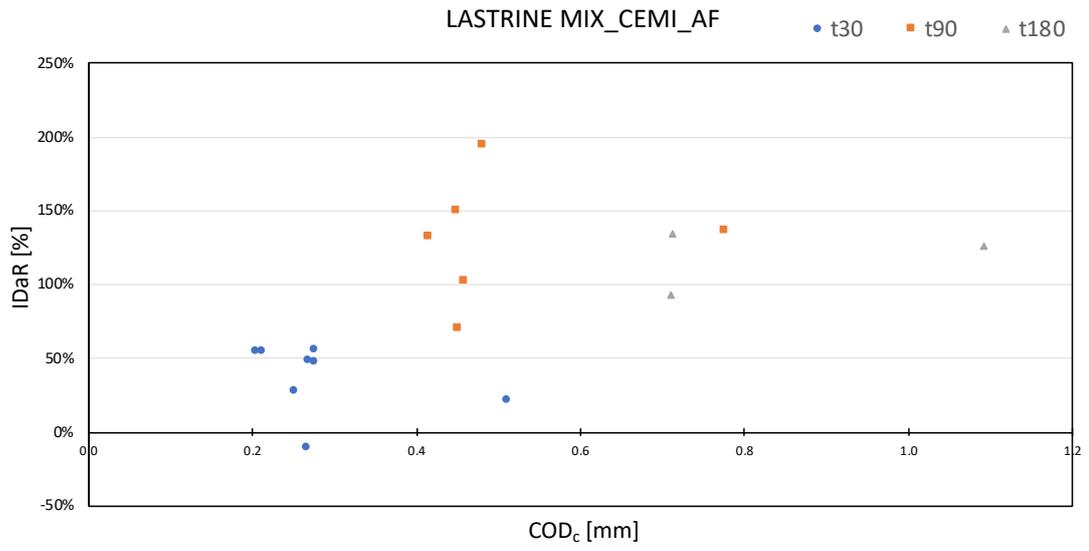


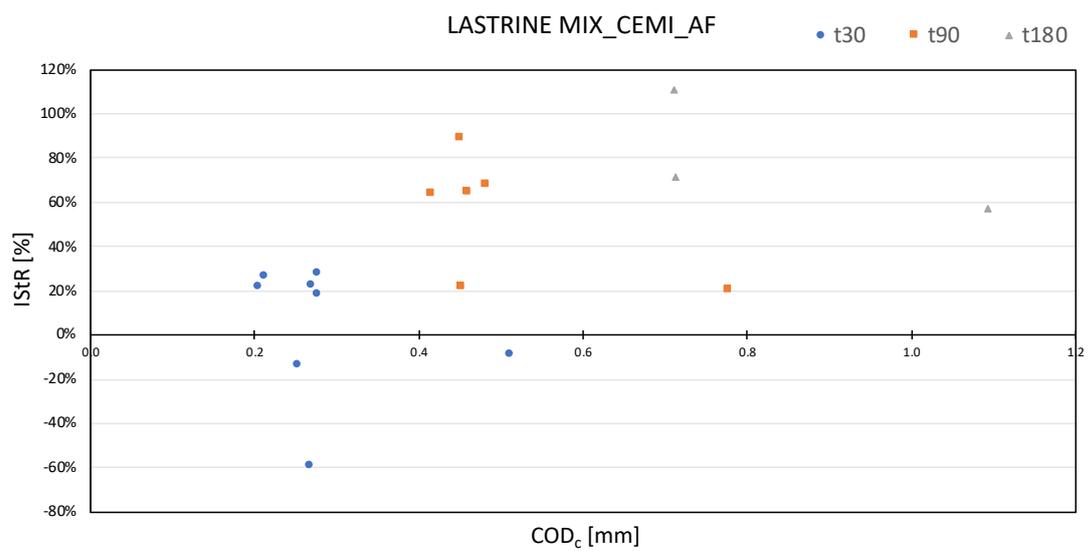
**MIX\_CEMI\_AF – Lastrine**

Provino	Tempo [gg]	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_s$ [MPa]	COD <sub>s</sub> [mm]	K <sub>c</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
LA_IA_4	0	0.000	18.66	0.624	198.0	50.2
	30	0.253	14.88	0.889	90.4	36.5
	90	0.483	-	-	141.6	-
	180	-	-	-	-	-
LA_IA_5	0	0.000	24.67	0.744	203.8	52.9
	30	0.277	24.81	0.983	124.3	43.8
	90	0.416	-	-	150.3	-
	180	-	-	-	-	-
LA_IA_8	0	0.000	20.08	0.694	210.3	48.0
	30	0.276	-	-	138.9	-
	90	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-
LB_IA_3	0	0.000	23.52	0.686	194.7	56.3
	30	0.268	-	-	41.5	-
	90	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-
LB_IA_4	0	0.000	12.50	0.808	197.4	42.1
	30	0.511	9.23	0.975	75.1	46.3
	90	0.777	7.45	1.301	85.6	35.6
	180	1.093	-	-	98.6	-
LB_IA_5	0	0.000	23.44	0.580	209.0	62.2
	30	0.205	17.20	0.904	142.5	38.1
	90	0.452	15.23	1.042	110.8	46.3
	180	0.713	-	-	132.9	-
LB_IA_9	0	0.000	15.91	0.505	152.3	54.2
	30	0.212	10.57	0.727	107.2	39.5
	90	0.459	-	-	108.8	-
	180	-	-	-	-	-
LB_IA_10	0	0.000	23.63	0.698	184.3	55.1
	30	0.270	24.33	0.967	117.2	47.0
	90	0.451	26.72	1.394	152.0	38.9
	180	0.711	-	-	144.1	-

Provino	Tempo [gg]	ISR* [%]	ISR [%]	IDaRo [%]	IDaR [%]	StRo [%]	StR [%]	IStR [%]
LA_IA_4	30	3.4	-7.0	27.2	27.2	-54.3	-54.3	-13.7
	90	-	-	61.8	195.0	-28.5	56.7	67.9
	180	-	-	-	-	-	-	-
LA_IA_5	30	88.0	80.2	47.3	47.3	-39.0	-39.0	18.6
	90	-	-	64.5	132.2	-26.3	20.9	64.1
	180	-	-	-	-	-	-	-
LA_IA_8	30	-	-	56.0	56.0	-34.0	-34.0	28.2
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-	-	-
LB_IA_3	30	-	-	-10.7	-10.7	-78.7	-78.7	-59.0
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-	-	-
LB_IA_4	30	-30.6	-45.0	21.2	21.2	-62.0	-62.0	-8.8
	90	-17.2	-34.3	28.0	136.6	-56.6	14.0	20.6
	180	-	-	36.4	126.1	-50.0	15.2	57.1
LB_IA_5	30	21.1	-15.0	54.7	54.7	-31.8	-31.8	21.8
	90	24.8	-12.4	33.1	69.6	-47.0	-22.3	21.5
	180	-	-	48.2	134.3	-36.4	20.0	71.6
LB_IA_9	30	42.9	11.2	54.0	54.0	-29.6	-29.6	26.9
	90	-	-	55.7	102.4	-28.6	1.5	64.7
	180	-	-	-	-	-	-	-
LB_IA_10	30	80.3	68.2	48.1	48.1	-36.4	-36.4	22.6
	90	218.1	196.8	75.0	149.6	-17.5	29.7	88.9
	180	-	-	68.9	93.0	-21.8	-5.2	110.9



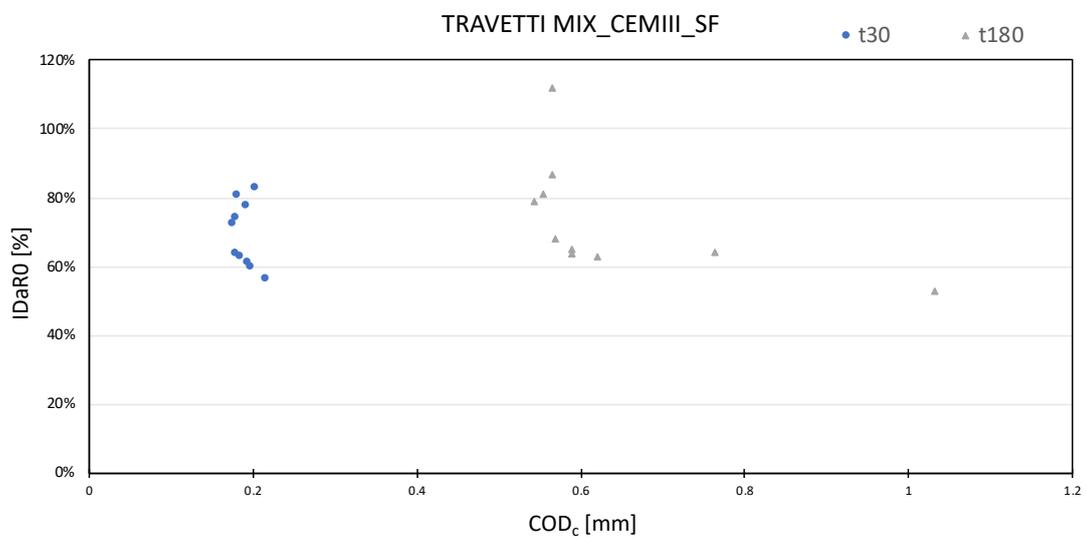
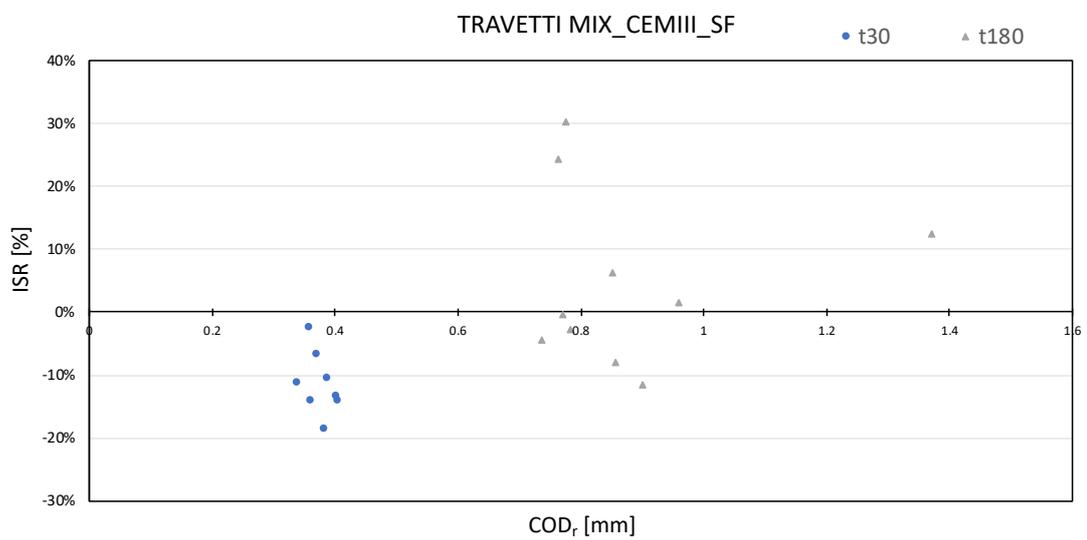
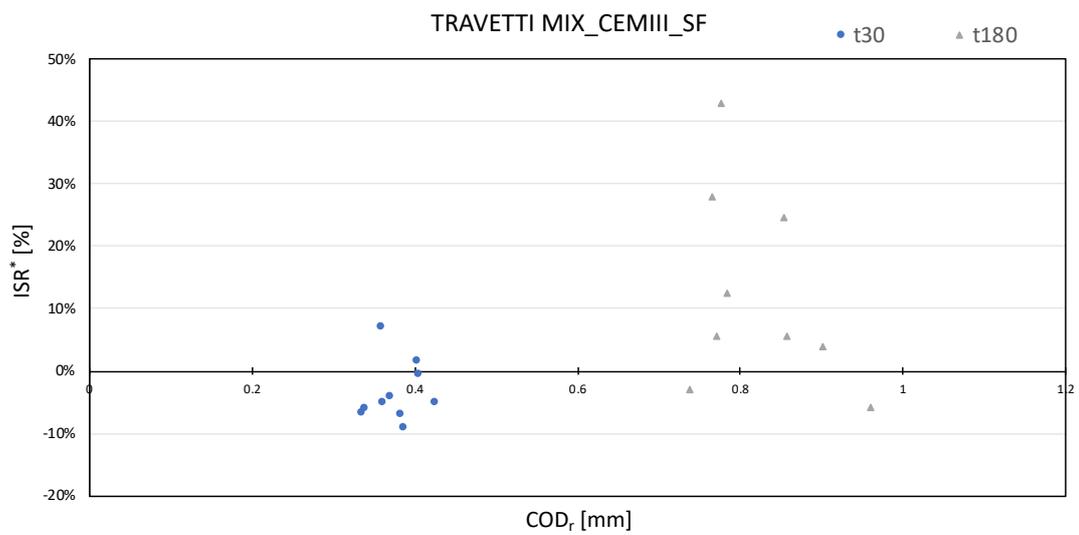


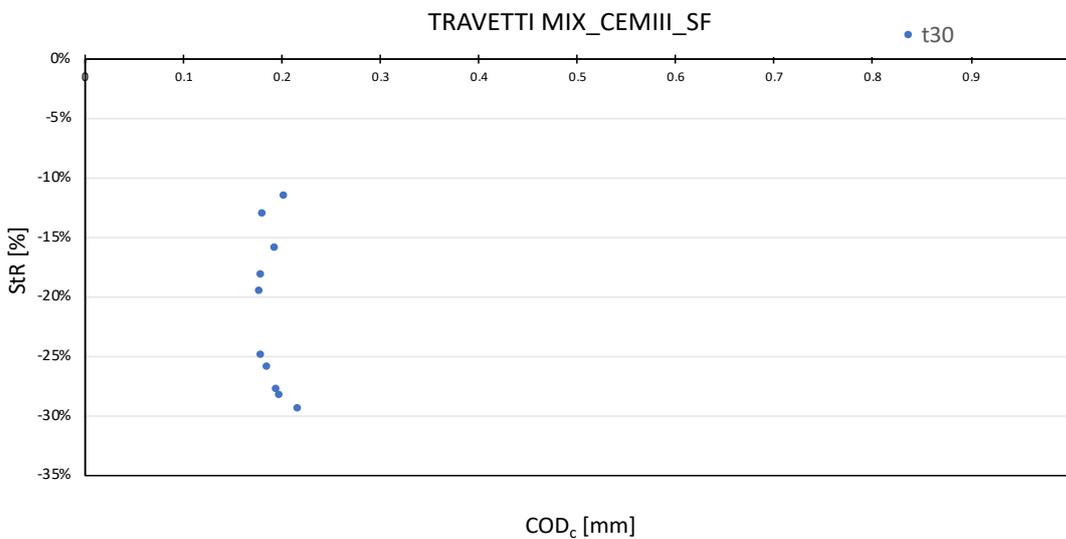
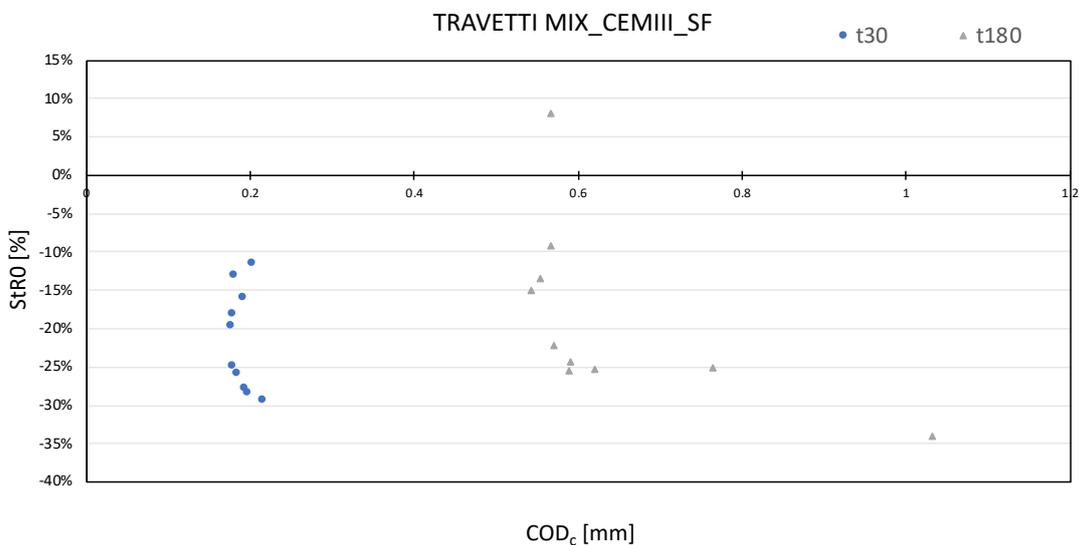
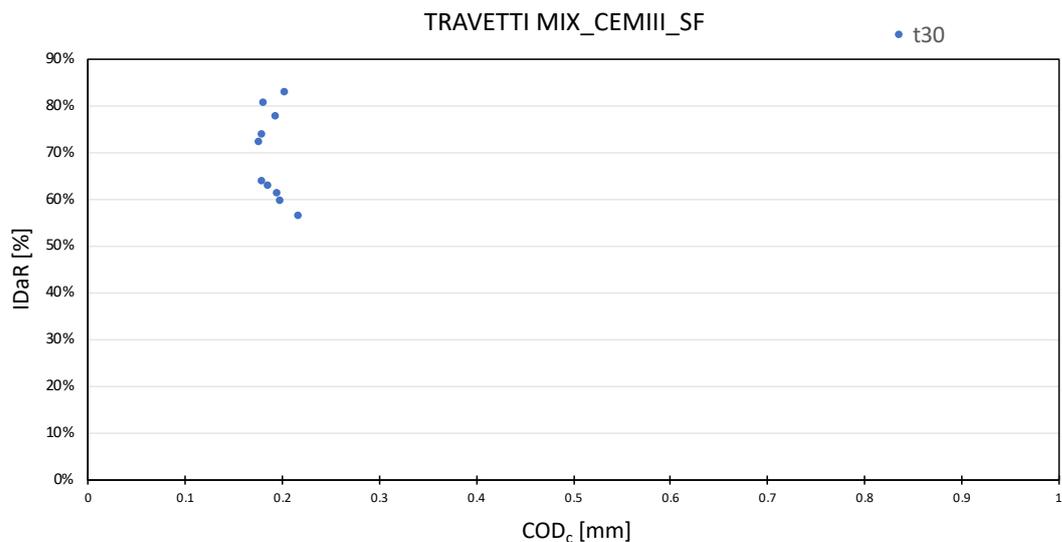


## MIX\_CEMIII\_SF – Travetti

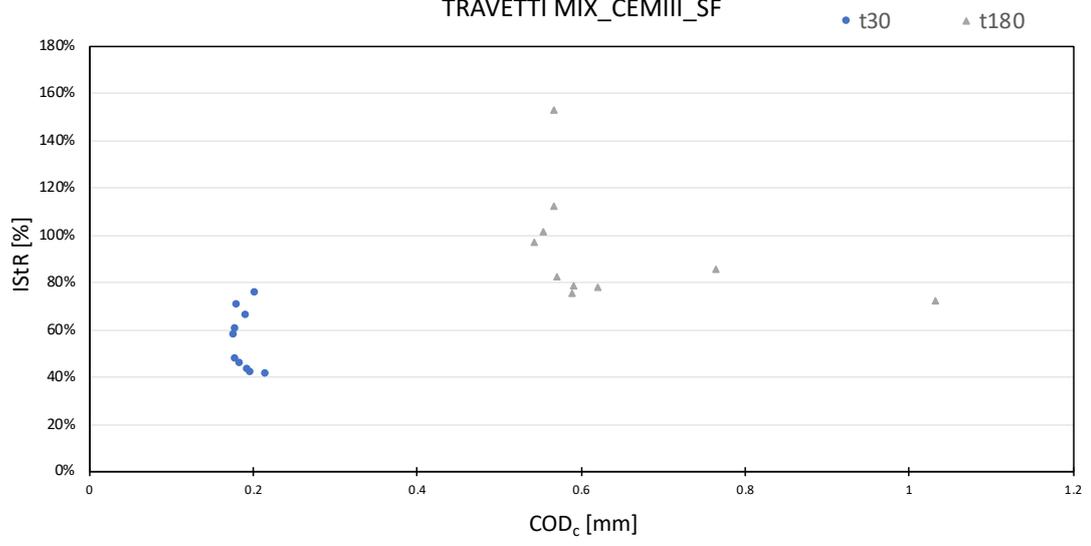
Provino	Tempo [gg]	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_s$ [MPa]	COD <sub>s</sub> [mm]	K <sub>c</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
IIM_6	0	0.000	18.27	0.441	214.8	70.2
	30	0.181	18.67	0.751	186.7	49.1
	90	0.372	-	-	-	-
	180	0.567	23.66	1.297	232.3	44.5
IIM_8	0	0.000	17.64	0.436	233.5	70.4
	30	0.186	19.90	0.786	173.2	51.9
	90	0.405	-	-	-	-
	180	0.590	22.05	1.508	174.1	33.7
IIM_9	0	0.000	18.74	0.469	228.8	74.1
	30	0.217	19.28	0.731	161.6	59.1
	90	0.407	-	-	-	-
	180	0.621	21.02	1.275	171.3	42.9
IIM_10	0	0.000	15.88	0.423	219.0	64.4
	30	0.177	17.88	0.678	176.1	51.7
	90	0.336	-	-	-	-
	180	0.544	18.90	1.379	186.1	39.7
IIM_11	0	0.000	17.72	0.435	222.5	69.4
	30	0.180	18.22	0.714	167.2	48.8
	90	0.341	-	-	-	-
	180	0.571	19.97	1.225	173.4	44.0
IIM_12	0	0.000	15.99	0.439	212.5	67.7
	30	0.204	17.71	0.759	188.0	47.7
	90	0.389	-	-	-	-
	180	0.567	18.25	1.248	193.2	35.8
IIM_13	0	0.000	17.25	0.425	231.3	70.0
	30	0.180	18.06	0.718	189.4	54.1
	90	0.385	-	-	-	-
	180	0.591	19.75	1.273	175.3	47.5
IIM_16	0	0.000	18.47	0.475	226.3	65.5
	30	0.193	20.96	0.794	190.3	48.0
	90	0.360	-	-	-	-
	180	0.554	25.60	1.452	195.8	37.9
IIM_19	0	0.000	16.87	0.452	224.7	66.3
	30	0.198	18.49	0.767	161.0	54.0
	90	0.426	-	-	-	-
	180	0.765	17.41	1.299	168.2	51.4
IIM_22	0	0.000	18.76	0.475	237.4	66.8
	30	0.195	18.39	0.711	171.4	52.3
	90	0.362	-	-	-	-
	180	1.032	20.48	1.848	157.0	43.1

Provino	Tempo [gg]	ISR* [%]	ISR [%]	IDaRo [%]	IDaR [%]	StRo [%]	StR [%]	IStR [%]
IIIM_6	30	-4.3	-6.8	80.6	80.6	-13.1	-13.1	70.7
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	27.9	24.5	112.1	-	8.1	-	153.0
IIIM_8	30	1.5	-13.4	63.0	63.0	-25.8	-25.8	46.0
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	24.6	6.3	63.6	-	-25.4	-	75.9
IIIM_9	30	-0.6	-14.1	56.6	56.6	-29.4	-29.4	41.5
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	12.4	-2.8	62.8	-	-25.1	-	78.3
IIIM_10	30	-6.9	-20.6	72.3	72.3	-19.6	-19.6	57.6
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	3.8	-11.4	78.8	-	-15.0	-	97.3
IIIM_11	30	-6.1	-11.4	63.9	63.9	-24.9	-24.9	47.4
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	5.7	-0.3	67.9	-	-22.1	-	82.6
IIIM_12	30	-9.2	-10.7	83.0	83.0	-11.5	-11.5	75.9
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-2.9	-4.5	86.7	-	-9.1	-	112.8
IIIM_13	30	-6.9	-18.8	74.0	74.0	-18.1	-18.1	60.7
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	5.6	-7.9	65.3	-	-24.2	-	78.8
IIIM_16	30	6.9	-2.5	77.6	77.6	-15.9	-15.9	66.3
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	43.0	30.4	81.1	-	-13.5	-	101.6
IIIM_19	30	-5.2	2.2	59.8	59.8	-28.3	-28.3	42.1
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-5.9	1.4	64.3	-	-25.1	-	85.7
IIIM_22	30	-5.2	-14.1	61.3	61.3	-27.8	-27.8	43.0
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	24.1	12.5	52.9	-	-33.9	-	72.7





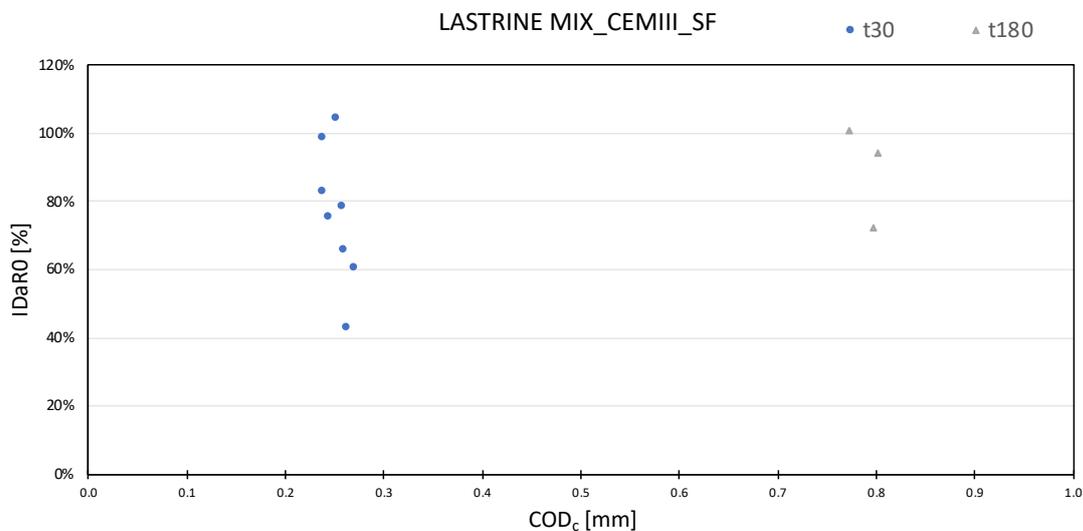
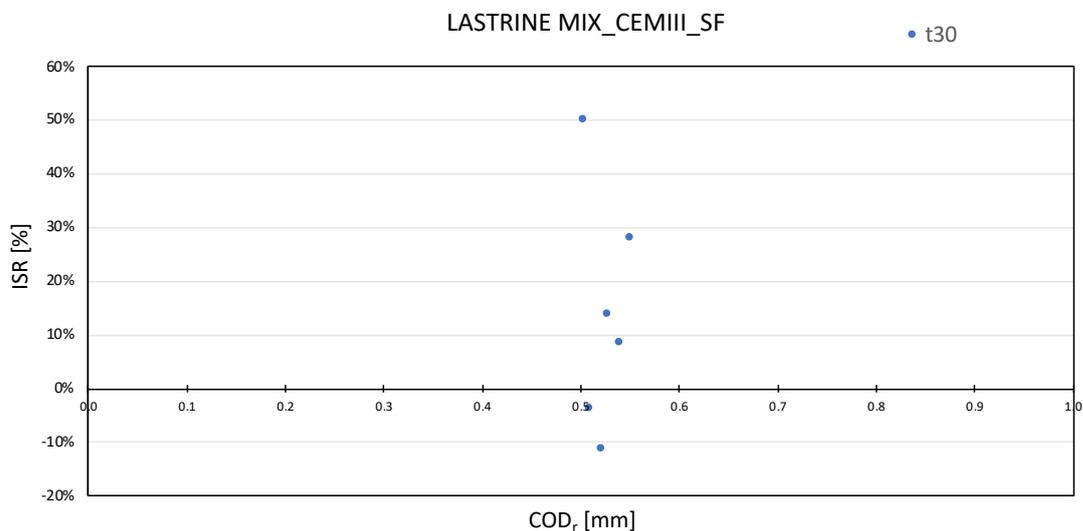
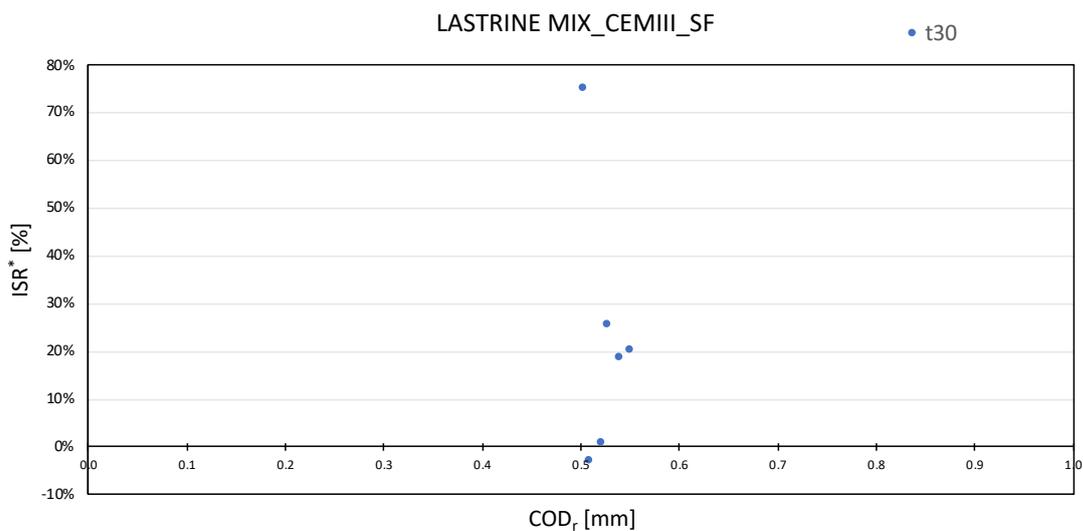
TRAVETTI MIX\_CEMIII\_SF



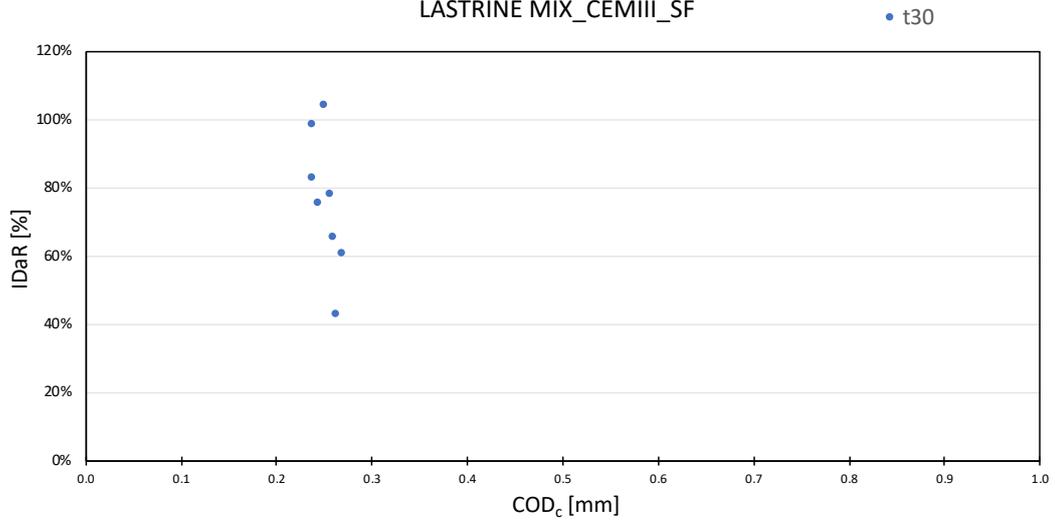
**MIX\_CEMIII\_SF – Lastrine**

Provino	Tempo [gg]	COD <sub>c</sub> [mm]	$\sigma_s$ [MPa]	COD <sub>s</sub> [mm]	K <sub>c</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]	K <sub>s</sub> [N/mm <sup>3</sup> ]
LA_IIM_4	0	0.000	18.64	0.514	187.5	67.4
	30	0.239	-	-	167.1	-
	90	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-
LA_IIM_5	0	0.000	22.85	0.600	167.8	64.8
	30	0.252	-	-	172.3	-
	90	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-
LA_IIM_7	0	0.000	20.61	0.612	176.9	58.2
	30	0.260	22.88	1.057	136.2	41.7
	90	0.510	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-
LA_IIM_8	0	0.000	21.73	0.615	189.3	60.8
	30	0.263	23.88	1.099	115.9	41.2
	90	0.521	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-
LB_IIM_2	0	0.000	23.03	0.624	162.5	59.6
	30	0.239	28.73	1.144	160.9	44.6
	90	0.503	-	-	-	-
	180	0.773	-	-	163.3	-
LB_IIM_6	0	0.000	21.37	0.593	155.5	62.6
	30	0.258	28.69	1.177	135.5	45.7
	90	0.551	-	-	-	-
	180	0.801	-	-	150.1	-
LB_IIM_7	0	0.000	24.09	0.644	207.9	63.4
	30	0.270	28.37	1.239	150.9	40.6
	90	0.541	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-
LB_IIM_10	0	0.000	22.13	0.571	197.6	66.6
	30	0.244	30.03	1.163	165.4	47.0
	90	0.527	-	-	-	-
	180	0.797	-	-	161.1	-

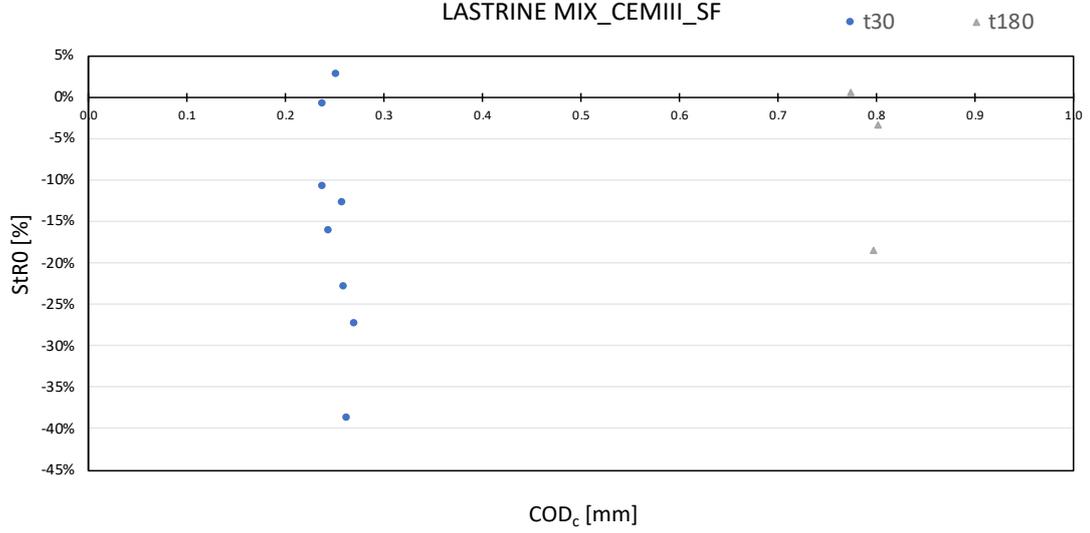
Provino	Tempo [gg]	ISR* [%]	ISR [%]	IDaRo [%]	IDaR [%]	StRo [%]	StR [%]	IStR [%]
LA_IIM_4	30	-	-	83.0	83.0	-10.9	-10.9	16.8
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-	-	-
LA_IIM_5	30	-	-	104.4	104.4	2.7	2.7	36.0
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-	-	-
LA_IIM_7	30	-3.0	-3.6	65.8	65.8	-23.0	-23.0	2.7
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-	-	-
LA_IIM_8	30	0.8	-11.3	42.9	42.9	-38.8	-38.8	-18.2
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-	-	-
LB_IIM_2	30	75.2	50.0	98.5	98.5	-1.0	-1.0	29.8
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	100.8	-	0.5	-	84.3
LB_IIM_6	30	20.1	27.9	78.5	78.5	-12.9	-12.9	15.9
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	94.2	-	-3.5	-	79.4
LB_IIM_7	30	18.7	8.4	60.6	60.6	-27.4	-27.4	-2.5
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	-	-	-	-	-
LB_IIM_10	30	25.7	13.8	75.4	75.4	-16.3	-16.3	10.2
	90	-	-	-	-	-	-	-
	180	-	-	72.1	-	-18.5	-	51.2



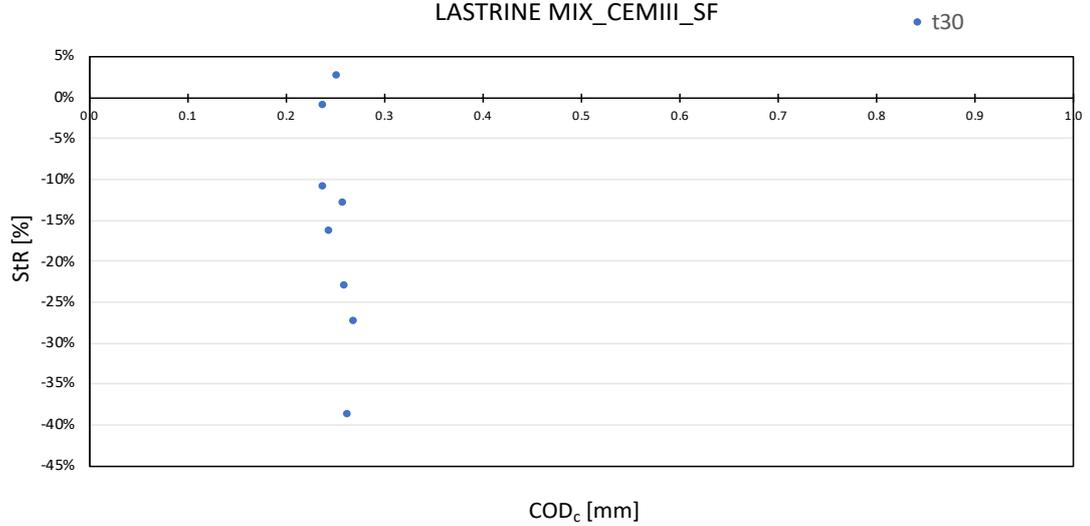
LASTRINE MIX\_CEMIII\_SF

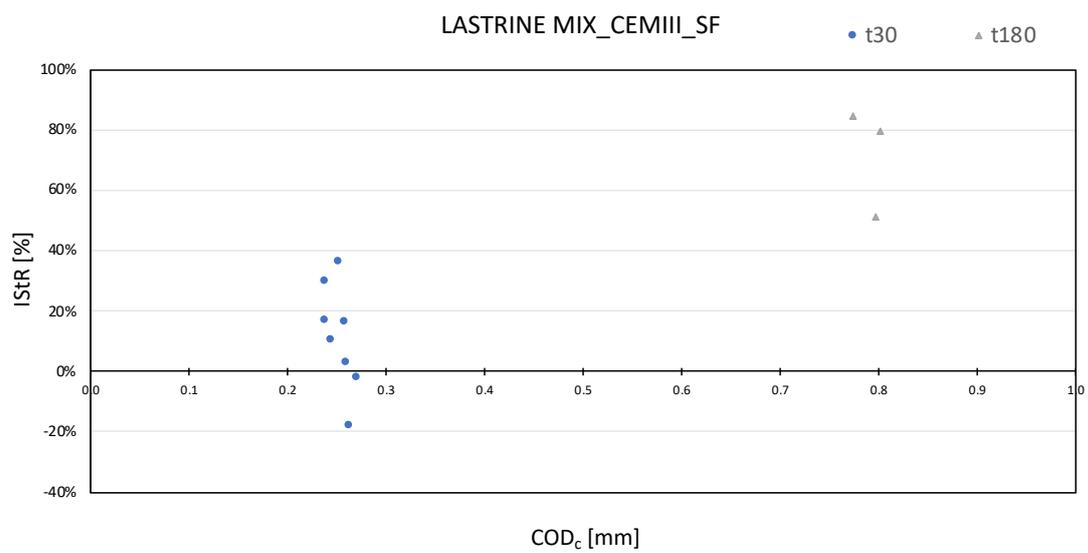


LASTRINE MIX\_CEMIII\_SF



LASTRINE MIX\_CEMIII\_SF





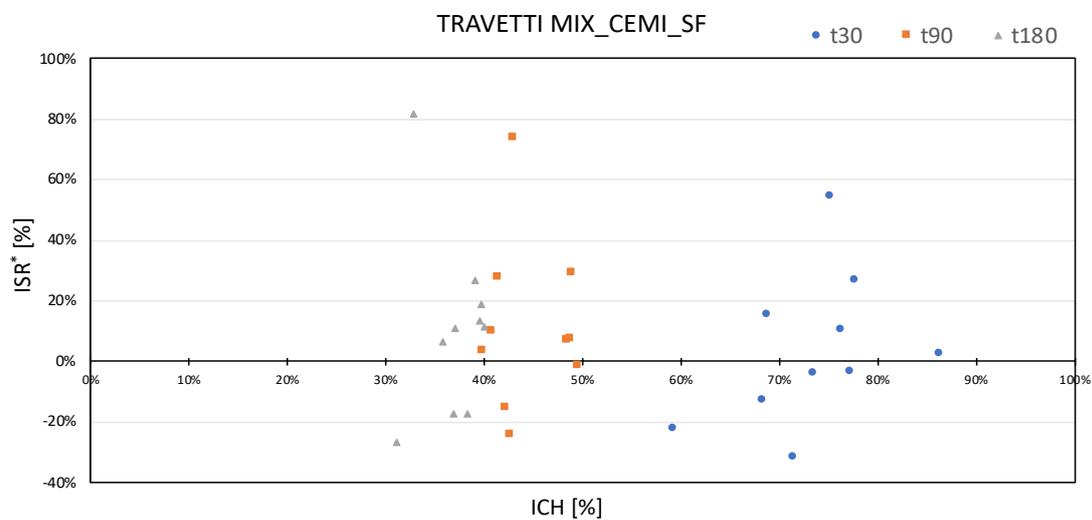
---

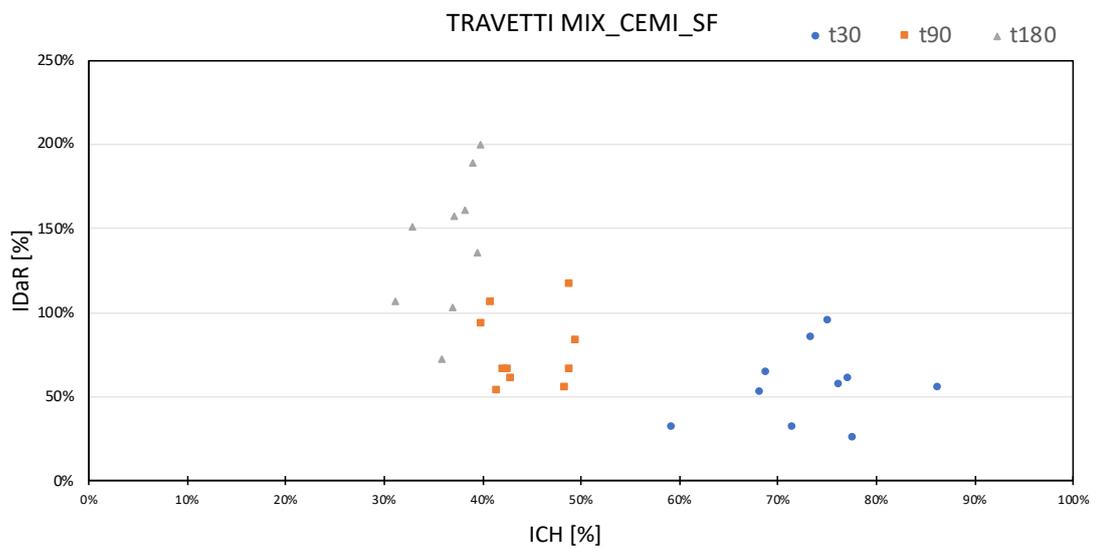
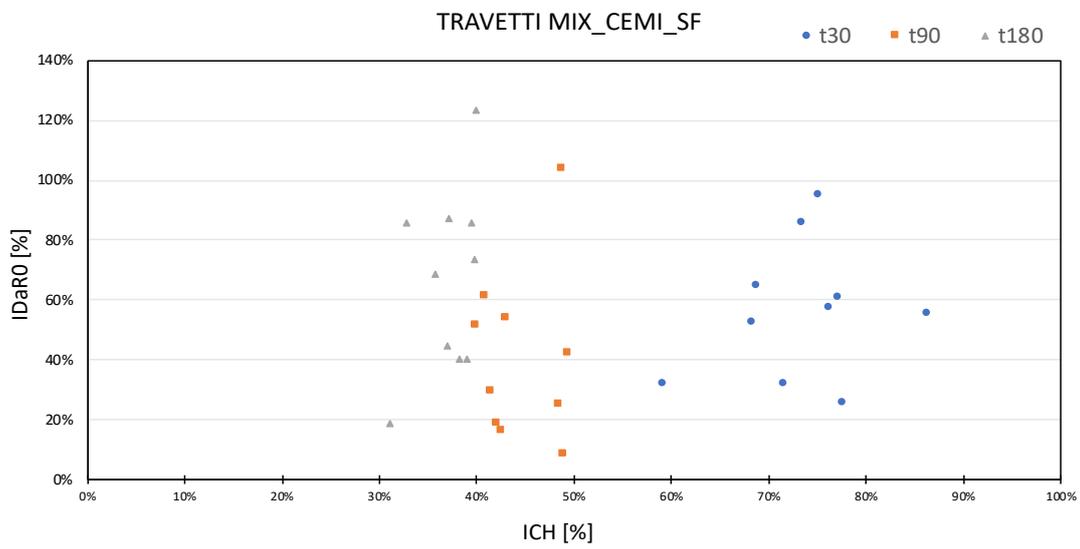
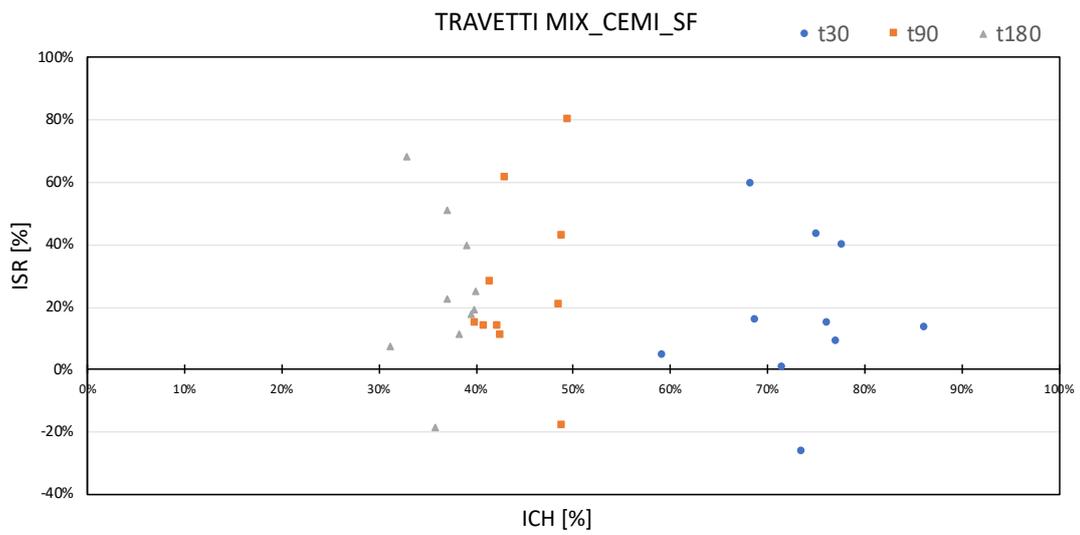
## **APPENDICE E**

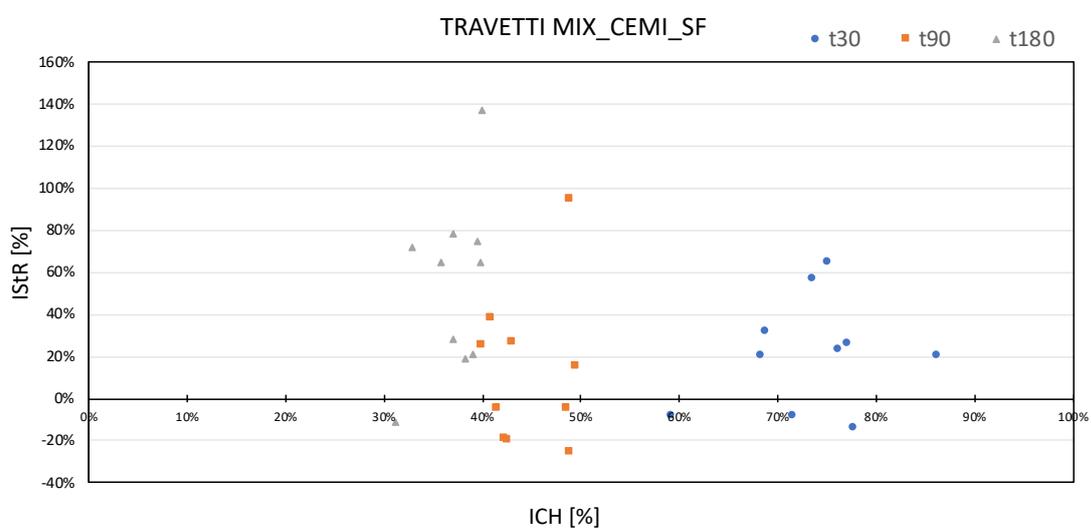
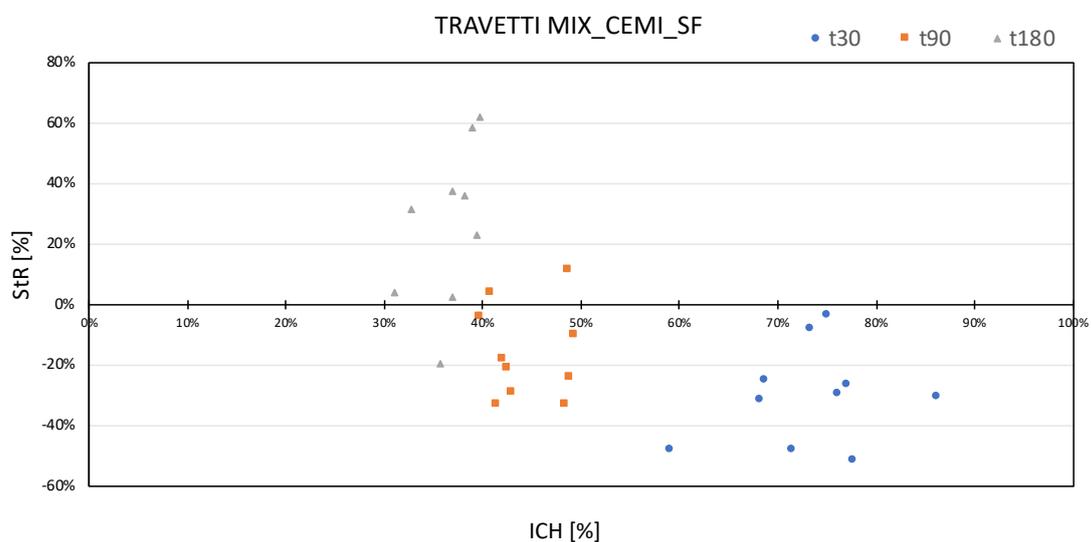
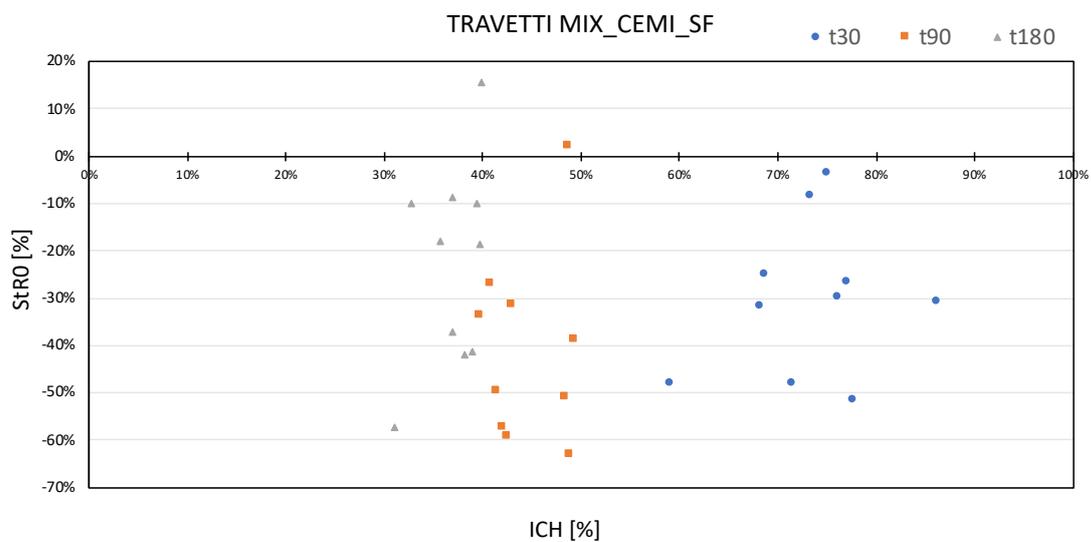
### **Confronto Indici di recupero-Indice di richiusura**

## MIX\_CEMI\_SF – Travetti

Provino	ICH <sub>30</sub> [%]	ICH <sub>90</sub> [%]	ICH <sub>180</sub> [%]
DB_PC_1	73.5	48.8	35.8
DB_PC_4	71.5	42.6	31.1
DB_PC_5	59.2	42.2	38.2
DB_PC_6	77.1	48.5	40.0
DB_PC_7	86.3	39.9	37.1
DB_PC_9	76.2	40.8	39.5
DB_PC_12	75.1	43.0	32.8
DB_PC_13	77.7	48.9	39.0
DB_PC_14	68.3	49.5	36.9
DB_PC_16	68.8	41.4	39.7

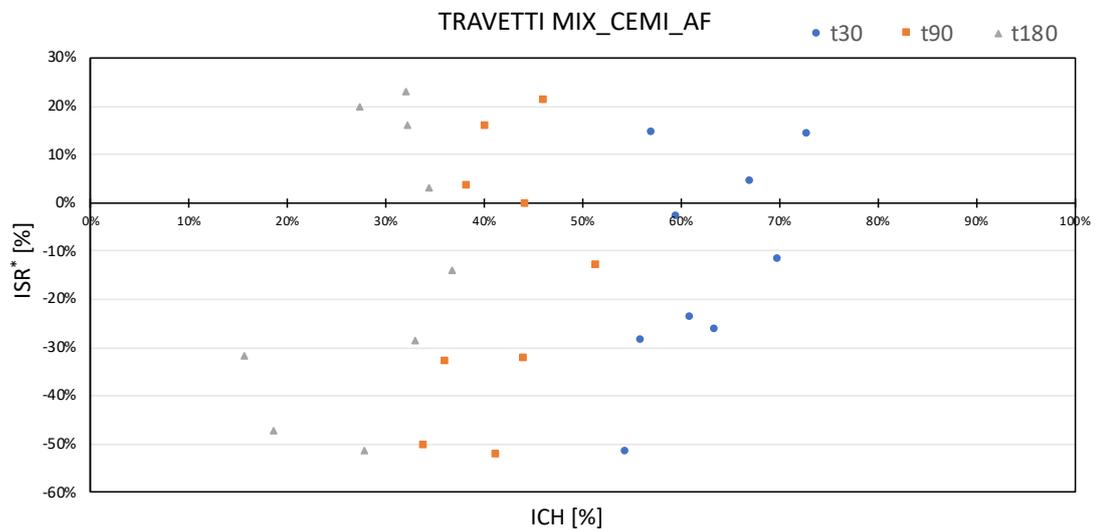


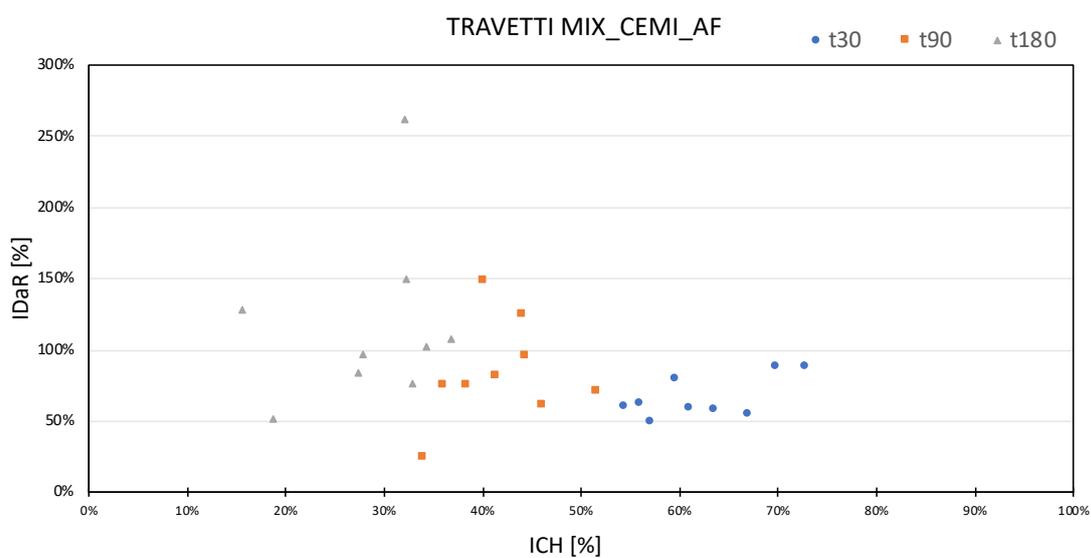
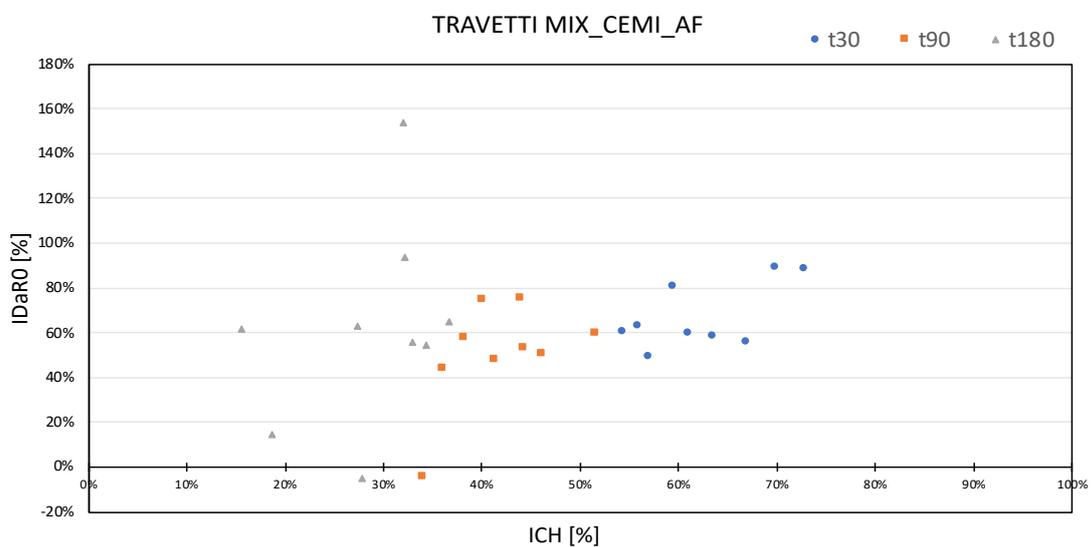
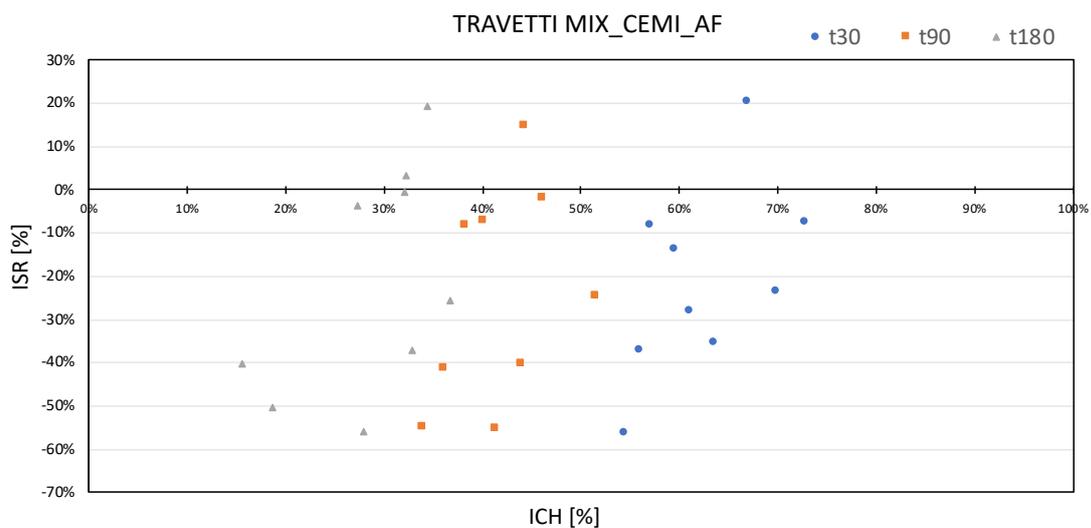


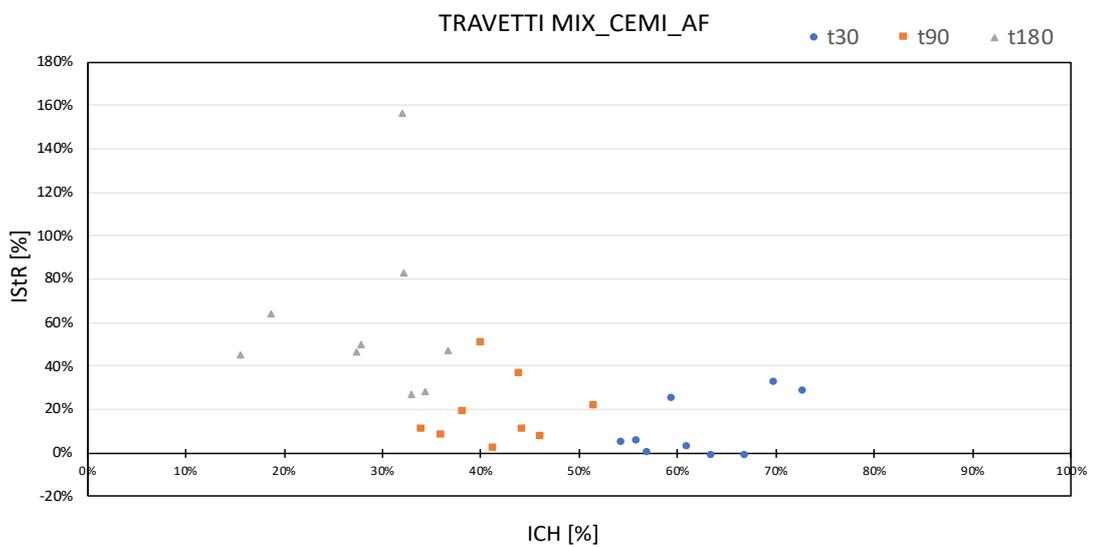
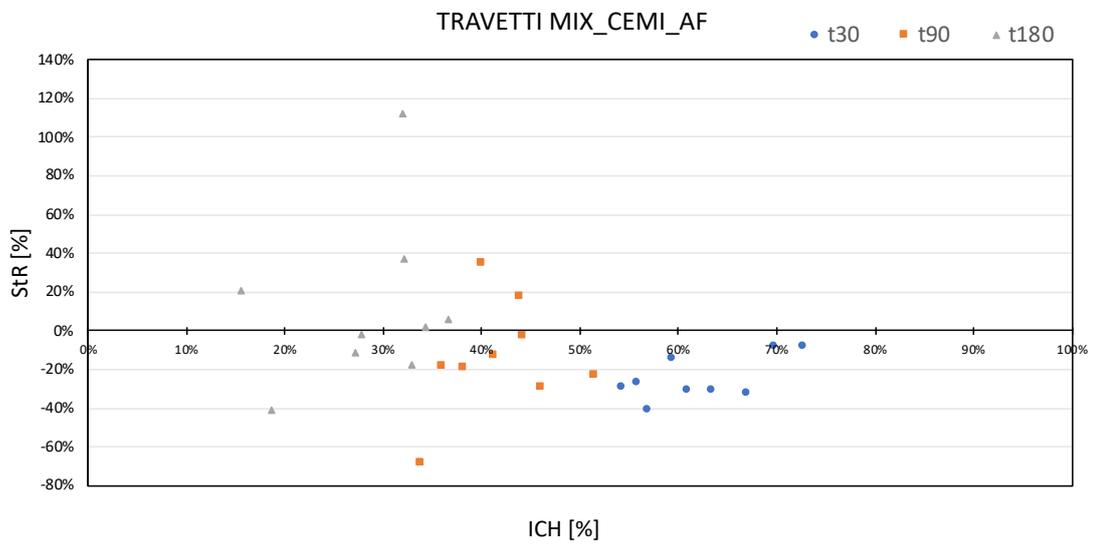
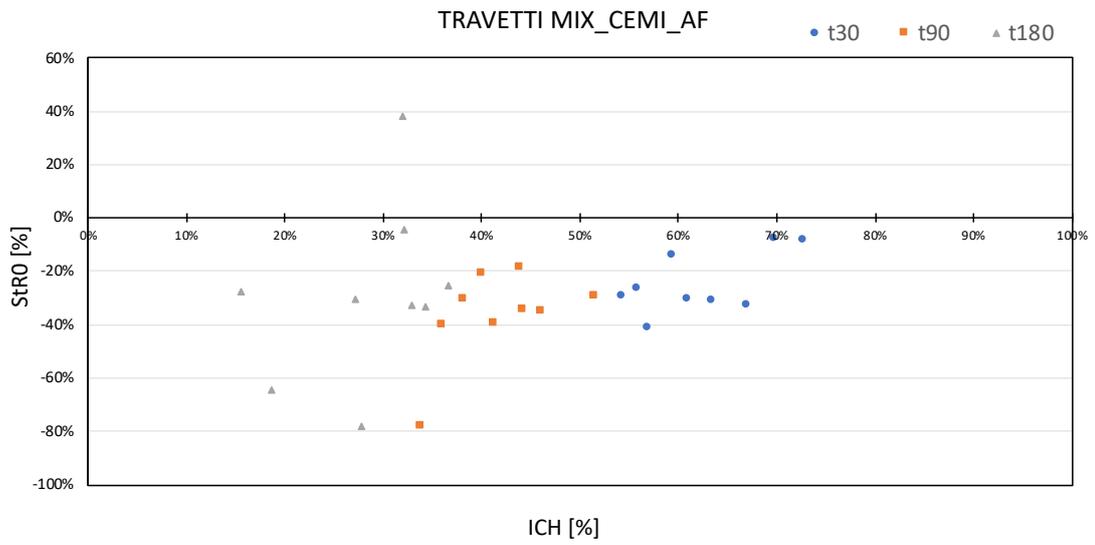


# MIX\_CEMI\_AF – Travetti

Provino	ICH <sub>30</sub> [%]	ICH <sub>90</sub> [%]	ICH <sub>180</sub> [%]
IA_1	57.0	40.1	27.3
IA_3	56.0	36.0	15.5
IA_4	59.5	38.3	32.2
IA_5	67.0	44.3	34.3
IA_6	61.0	41.3	18.6
IA_7	72.8	46.1	32.1
IA_8	54.3	34.0	27.8
IA_9	73.8	38.4	27.5
IA_10	69.9	51.5	36.7
IA_13	63.5	44.0	32.9

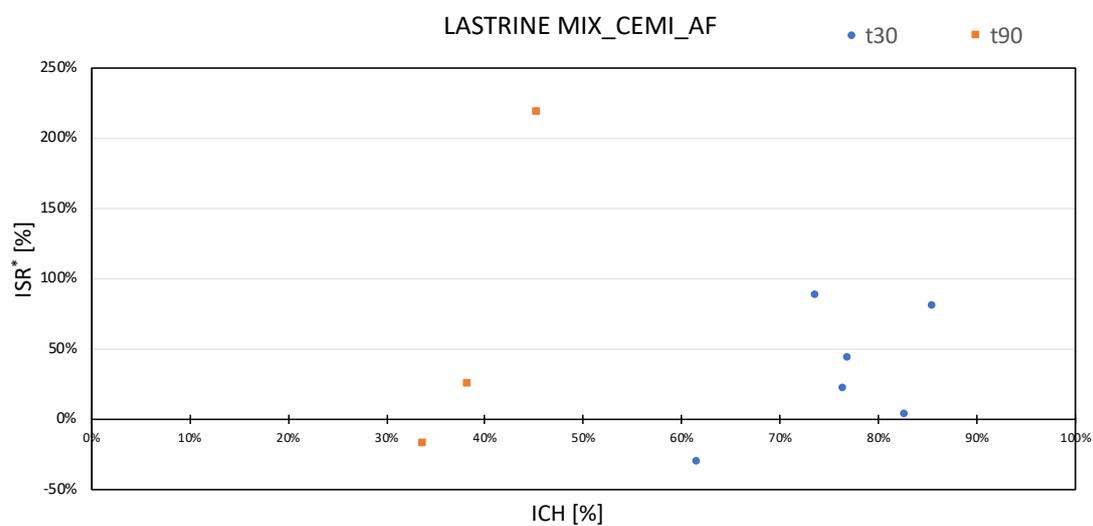


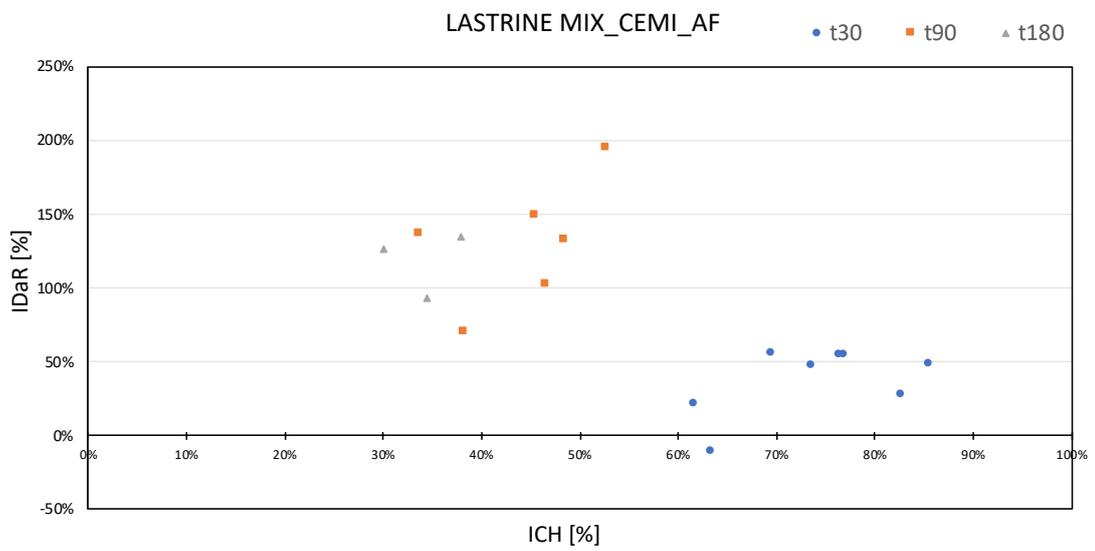
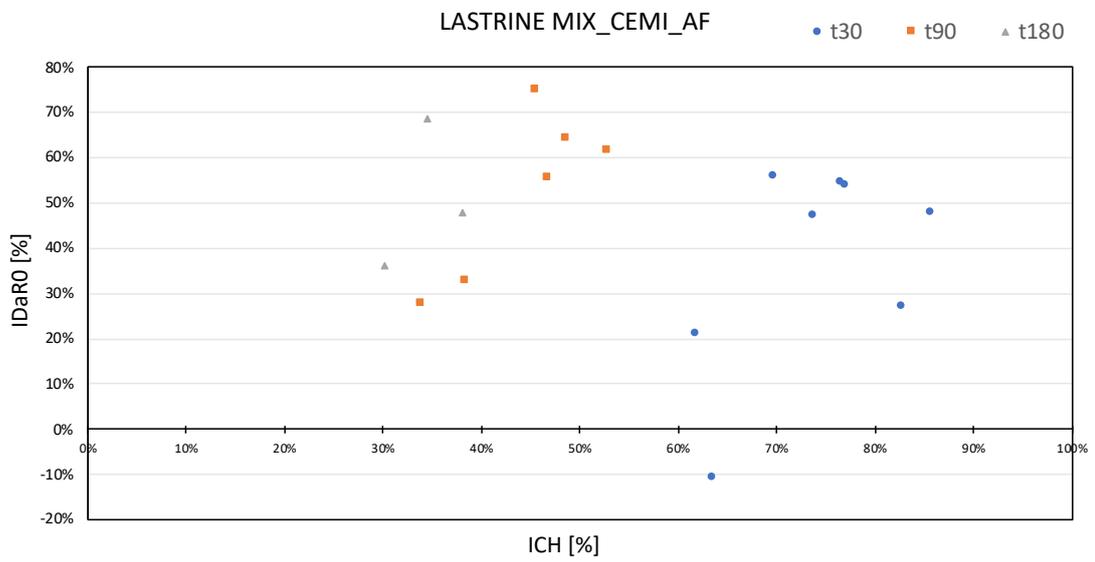
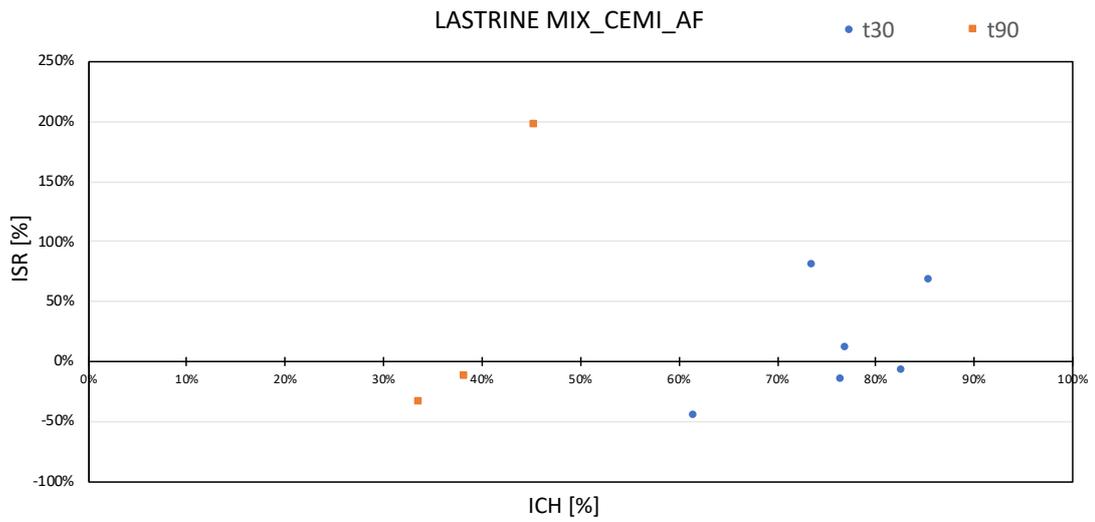


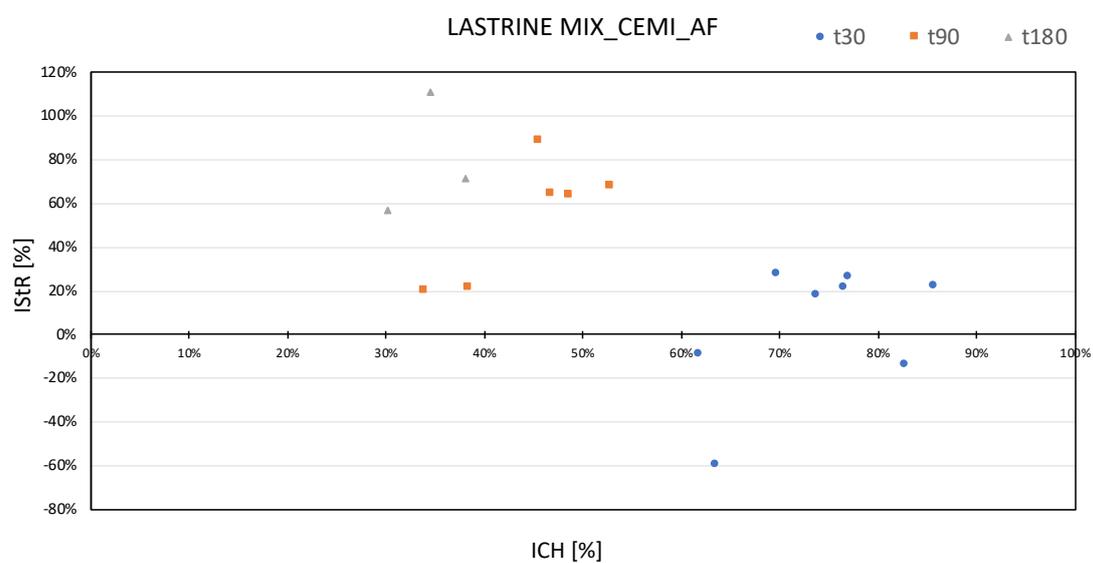
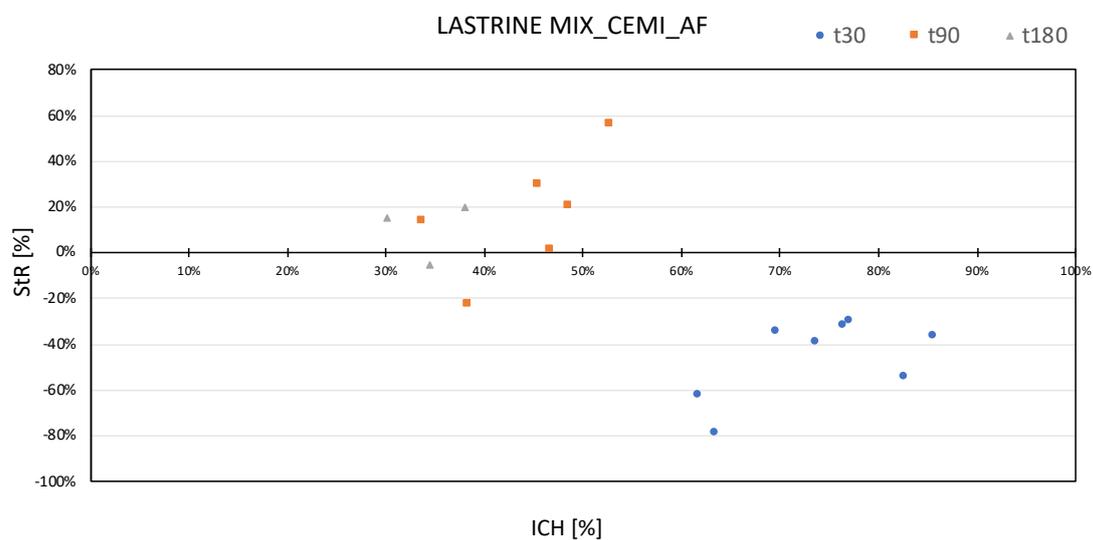
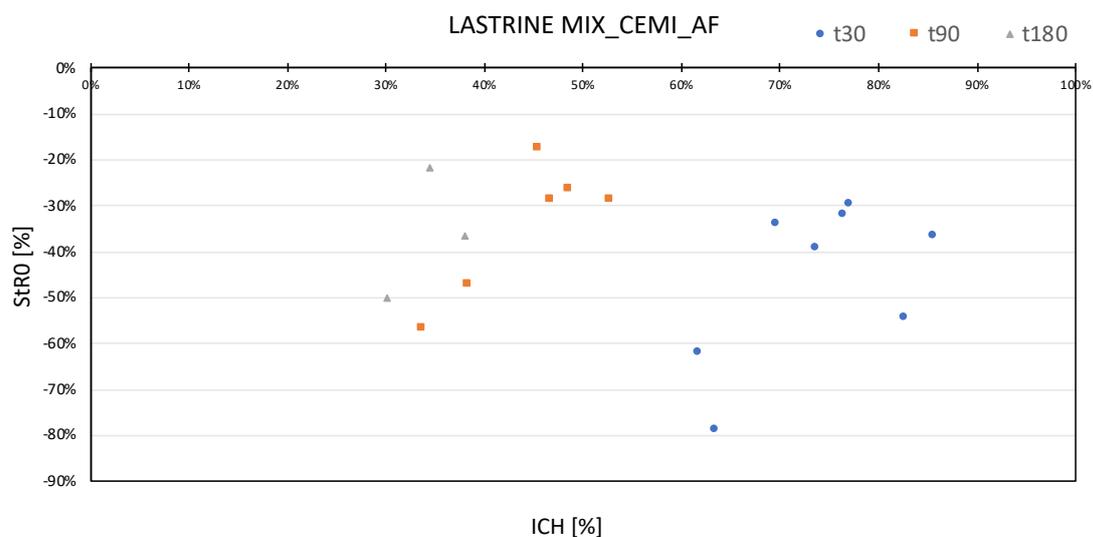


## MIX\_CEMI\_AF – Lastrine

Provino	ICH <sub>30</sub> [%]	ICH <sub>90</sub> [%]	ICH <sub>180</sub> [%]
LA_IA_4	82.7	52.8	-
LA_IA_5	73.6	48.6	-
LA_IA_8	69.6	-	-
LB_IA_3	63.4	-	-
LB_IA_4	61.7	33.8	30.1
LB_IA_5	76.5	38.3	38.0
LB_IA_9	77.0	46.6	-
LB_IA_10	85.6	45.5	34.5

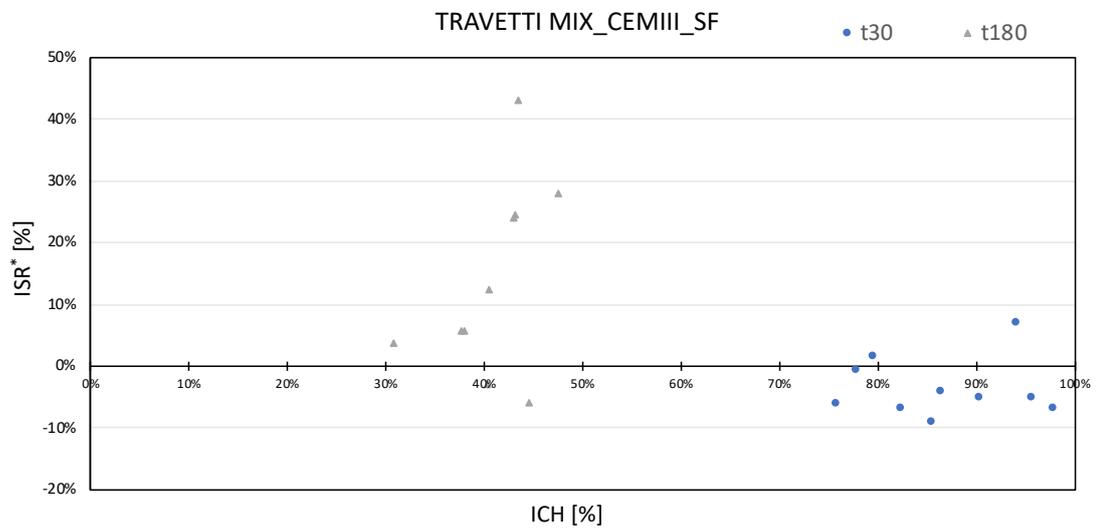


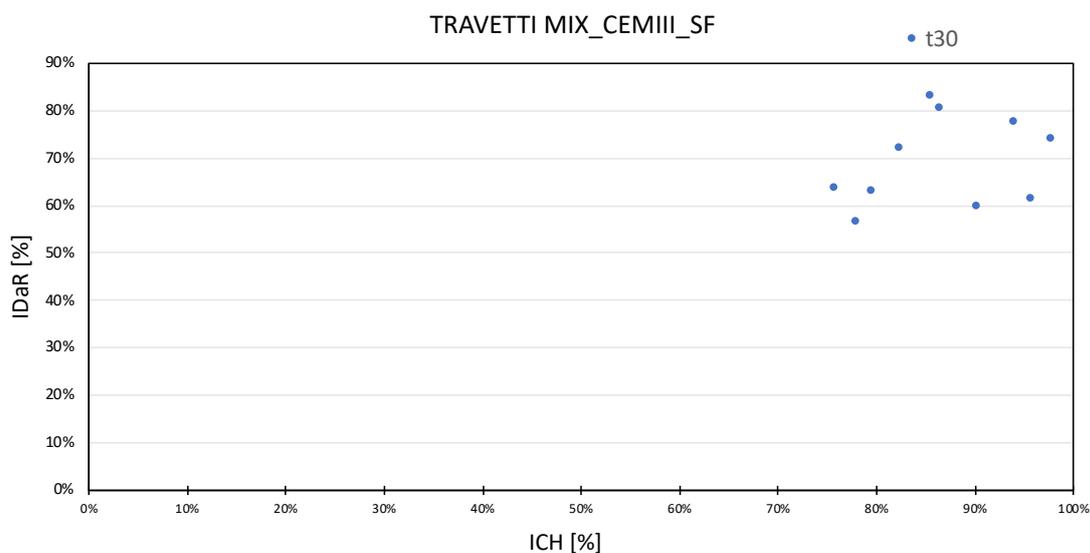
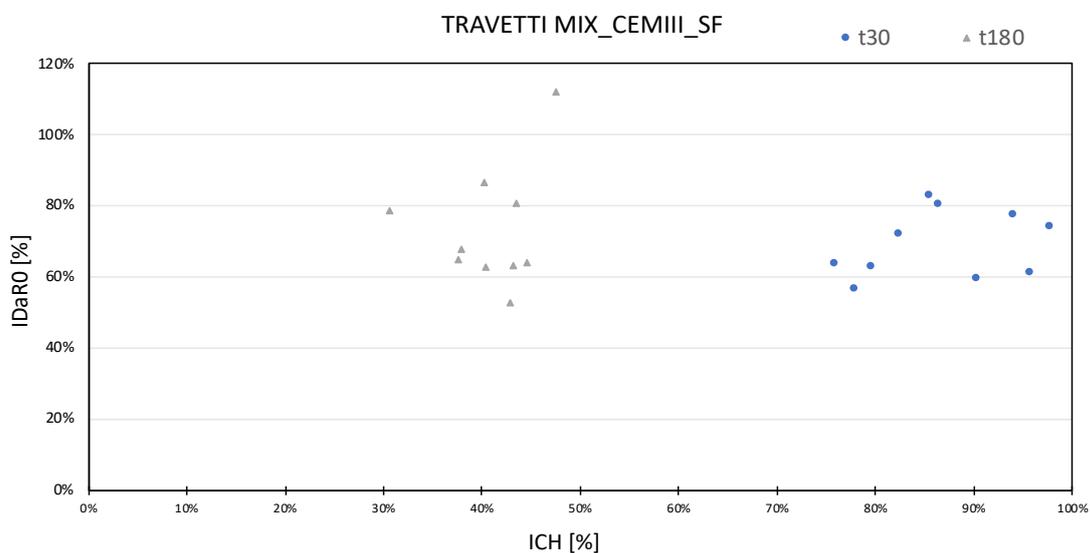
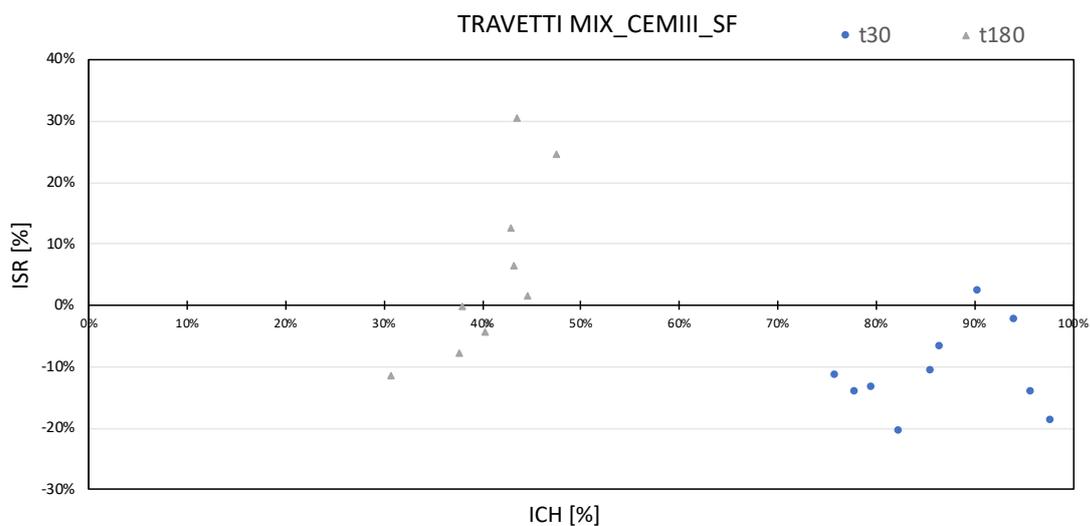


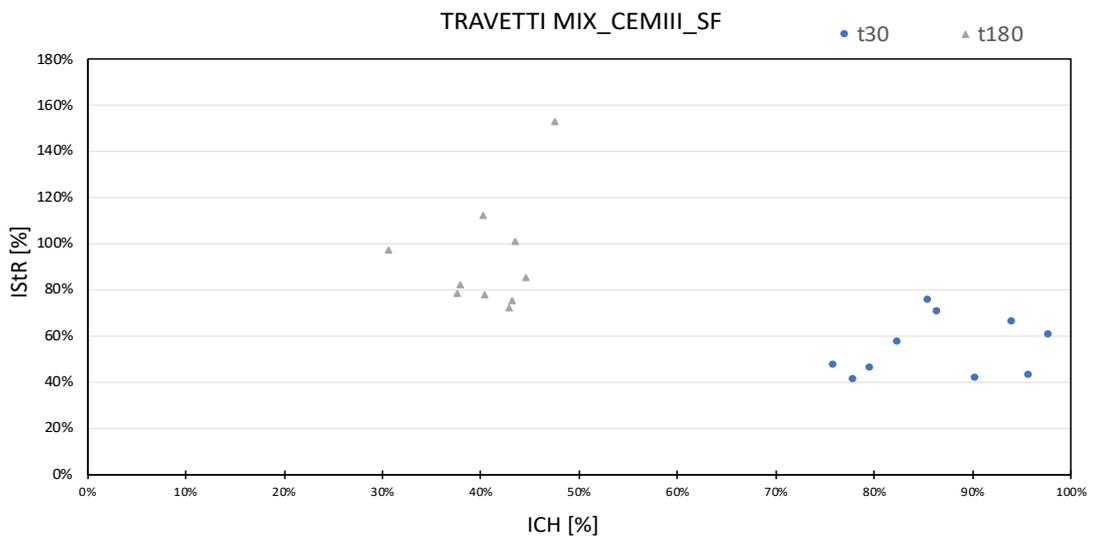
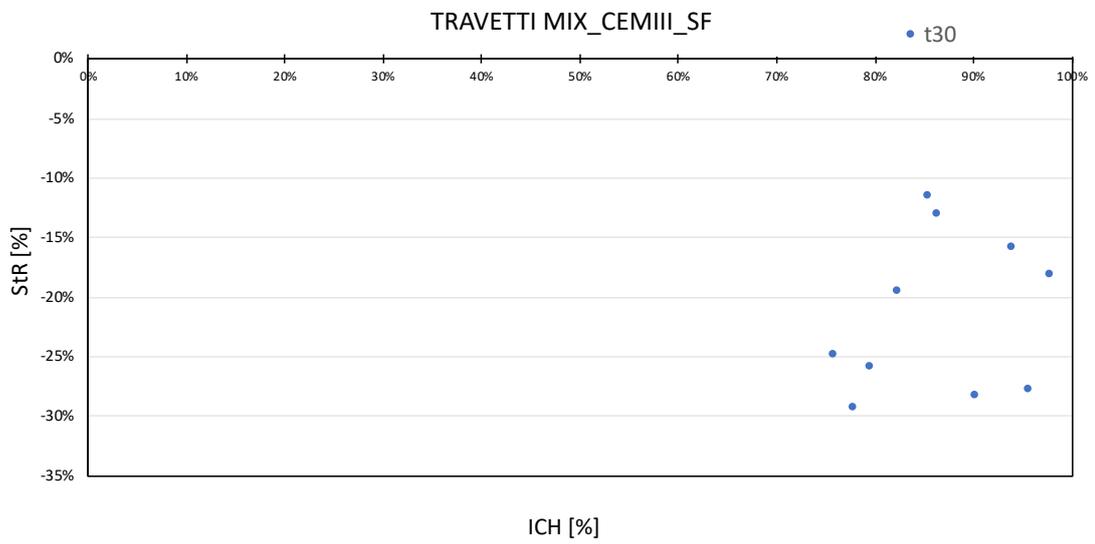
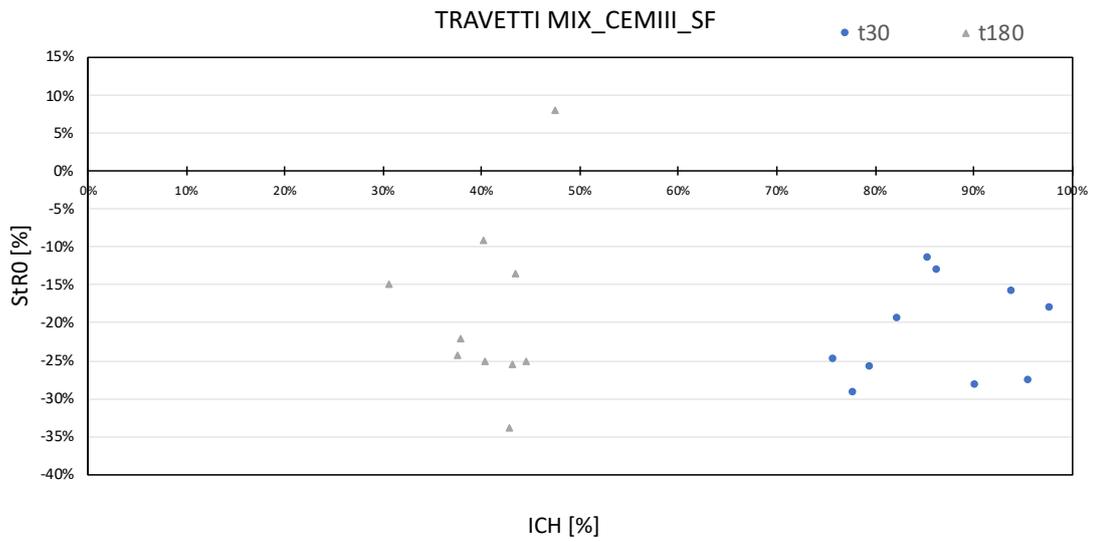


## MIX\_CEMIII\_SF – Travetti

Provino	ICH <sub>30</sub> [%]	ICH <sub>90</sub> [%]	ICH <sub>180</sub> [%]
IIM_6	86.4	65.0	47.5
IIM_8	79.6	68.4	43.1
IIM_9	77.9	63.2	40.5
IIM_10	82.4	49.8	30.7
IIM_11	75.8	57.7	37.9
IIM_12	85.5	67.7	40.3
IIM_13	97.8	75.7	37.7
IIM_16	94.1	68.8	43.5
IIM_19	90.3	64.6	44.6
IIM_22	95.7	71.4	42.9







## MIX\_CEMIII\_SF – Lastrine

Provino	ICH <sub>30</sub> [%]	ICH <sub>90</sub> [%]	ICH <sub>180</sub> [%]
LA_IIM_4	90.5	-	-
LA_IIM_5	91.4	-	-
LA_IIM_7	90.4	56.4	-
LA_IIM_8	90.1	67.4	-
LB_IIM_2	93.4	63.9	39.5
LB_IIM_6	99.1	61.8	33.8
LB_IIM_7	97.4	65.1	-
LB_IIM_10	94.5	67.5	37.1

