

**POLITECNICO DI MILANO**



Scuola di Ingegneria Edile – Architettura

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

**Efficacia degli additivi cristallizzanti sulle capacità di  
autoriparazione di calcestruzzi giovani**

Relatore: Prof. Liberato Ferrara

Co-relatore: Prof. Pedro Serna Ros

Tesi di Laurea Magistrale di:

Francesco Pirritano

Matr. 787087

Anno Accademico 2013-2014



## Abstract

La sostenibilità, nell'ambito dell'ingegneria civile e strutturale, è un concetto che sta acquistando una sempre maggiore rilevanza a causa della costante richiesta di strutture capaci di garantire, nel tempo, specifici livelli di prestazione riducendo al tempo stesso i costi relativi al mantenimento di suddette caratteristiche prestazionali. Da ciò nasce la necessità di realizzare opere capaci di svolgere, nel tempo, la funzione per le quali sono state progettate e, quindi, caratterizzate da una vita utile più estesa e con ridotte capacità manutentive. Questa consapevolezza ha portato all'applicazione del concetto di materiali autoriparanti nel campo edilizio e, in particolare, per le strutture in calcestruzzo. È ben noto che la principale causa di degrado degli elementi in calcestruzzo e delle rispettive armature in acciaio è la formazione di fessure, di ampiezza variabile, che consente la penetrazione di agenti dannosi all'interno della matrice cementizia. L'obiettivo di questa ricerca è stato quello di studiare come l'utilizzo di un additivo cristallizzante consenta di migliorare la capacità, intrinseca del calcestruzzo, di sigillare le fessure. Per fare ciò, è stato predisposto un piano sperimentale che ha previsto la generazione di un danno controllato, la valutazione dell'ampiezza di fessura prodotta e la misurazione della permeabilità nei provini danneggiati. Dopo aver sottoposto i campioni a diverse condizioni di cura, si è proceduto nuovamente all'analisi e alla valutazione dei parametri esaminati in fase iniziale, permettendo di trarre le giuste conclusioni.

L'aggiunta dell'additivo cristallino ha permesso di ottenere una capacità di autoguarigione del calcestruzzo danneggiato più che soddisfacente. Infatti tale prodotto ha avuto una notevole influenza sulla variazione di permeabilità nella maggior parte degli ambienti di cura studiati, in particolare in quelli caratterizzati dalla presenza continua di acqua che ha consentito di raggiungere la completa risigillatura delle fessure. Nonostante la presenza dell'additivo garantisca una maggiore efficacia nei processi di autoguarigione e fornisca un grado di affidabilità più elevato, è stato osservato che anche il calcestruzzo ordinario, quando permanentemente a contatto con acqua, è in grado di sviluppare una buona capacità di recupero della permeabilità del materiale e una totale richiusura delle fessure.

Nel caso di strutture immerse e maggiormente soggette al degrado in caso di fessurazione, l'utilizzo degli additivi cristallini può risultare vantaggioso in quanto consente l'aumento della durabilità di tali opere e la diminuzione delle manutenzioni ritenute necessarie, portando ad una riduzione dei costi totali che vanno a compensare il maggior costo iniziale.

## Abstract

Sustainability in civil and structural engineering is a concept that is becoming increasingly important because of the constant demand for structures that can guarantee, over time, more and more demanding performance levels while reducing the costs due to maintenance. The need hence arises to build up structures able to perform, over time, the function for which they were designed and, therefore, characterized by a longer and useful lifetime with reduced maintenance. This awareness has led to the application of the concept of self-healing materials in the construction field and, in particular for concrete structures. It is well known that the main cause of degradation of the concrete elements and the respective steel reinforcement is the formation of cracks, of variable width, which allows the penetration of harmful agents within the cement matrix. The objective of this research was to investigate how the use of a crystalline admixture can improve the inherent ability of the concrete to seal cracks. To do so, an experimental plan has been designed that provides for the controlled generation of damage, evaluation of the generated cracks and the measurement of permeability in damaged specimens. After the samples were subjected to different curing conditions, we proceeded again to the analysis and evaluation of the parameters examined in the initial phase, allowing to derive the right conclusions.

The addition of the crystalline admixture has resulted in a self-healing capacity damaged concrete more than satisfactory. Indeed, this product has had a significant influence on the variation of permeability in most of the investigated curing conditions, in particular those characterized by the continued presence of water, allowing to get the complete sealing of cracks. Despite the presence of the admixture provides a greater effectiveness in the healing processes and provides a higher degree of reliability, it has been observed that even the ordinary concrete may be characterized, when permanently in contact with water, by a high recovery of the permeability of the material and a complete healing of cracks.

For submerged structures, which may be more susceptible to degradation in case of cracking, the use of crystalline admixture can be advantageous because it allows an increase of the durability of these structures and a reduction of the necessary maintenance, with a consequent reduction of the total costs that go to make up for the higher initial cost.

---

## Sommario

<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>Capitolo 1 – INTRODUZIONE.....</b>	<b>19</b>
1.1. Introduzione.....	19
1.2. Obiettivi .....	20
1.3. Struttura del documento .....	21
<b>Capitolo 2 – STATO DELL’ARTE.....</b>	<b>23</b>
2.1. Introduzione.....	23
2.2. Self-Healing and Self-Repairing materials .....	25
2.3. Self-Healing autogeno.....	27
2.3.1. Utilizzo di aggiunte reattive .....	35
2.3.2. Engineered Cementitious Concrete .....	39
2.4. Self-Healing Ingegnerizzato .....	44
2.4.1. Additivi cristallini e aggiunte espansive .....	45
2.4.1.1. Additivi cristallini .....	46
2.4.1.2. Aggiunte espansive.....	52
2.4.2. Polimeri super assorbenti (SAP) .....	64
2.4.3. Prodotti incapsulati .....	67
2.4.4. Approccio biologico.....	71
2.4.5. Tubi fragili e prodotti sigillanti .....	75
2.4.6. Altri approcci .....	79
2.5. Studi precedenti.....	80
<b>Capitolo 3 – METODOLOGIA E PROGRAMMA SPERIMENTALE .....</b>	<b>83</b>
3.1. Obiettivi dello studio.....	83
3.2. Considerazioni sulla metodologia di riferimento .....	85
3.3. Programma sperimentale .....	88
3.4. Materiali.....	91
3.4.1. Cemento .....	91
3.4.2. Acqua.....	92
3.4.3. Aggregati .....	92
3.4.4. Additivo fluidificante .....	94
3.4.5. Fibre in acciaio.....	95

3.4.6.	Resina sigillante .....	95
3.4.7.	Additivo cristallino .....	95
3.5.	Metodologia .....	96
3.5.1.	Dosaggio, miscelazione del calcestruzzo e fabbricazione dei campioni.....	97
3.5.1.1.	Parametri iniziali .....	97
3.5.1.2.	Fabbricazione dei campioni .....	101
3.5.2.	Generazione del danno .....	104
3.5.3.	Prova di permeabilità .....	105
3.5.4.	Ambienti di cura .....	108
3.6.	Valutazione della fessura .....	112
3.6.1.	Procedura di misurazione dell'ampiezza della fessura.....	113
3.7.	Prove aggiuntive.....	116
<b>Capitolo 4 – ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI .....</b>		<b>119</b>
4.1.	Relazione tra flusso e ampiezza media della fessura .....	119
4.2.	Healing Rate .....	120
4.3.	Andamento generale del flusso .....	121
4.4.	Riduzione del flusso.....	124
4.4.1.	Immersione in acqua con temperatura di 15°C.....	125
4.4.1.1.	Calcestruzzo con rapporto acqua/cemento di 0,45 .....	125
4.4.1.2.	Calcestruzzo con rapporto acqua/cemento di 0,60 .....	127
4.4.2.	Immersione in acqua con temperatura di 30°C.....	129
4.4.3.	Cicli bagnato/asciutto.....	130
4.4.4.	Confronto calcestruzzo di controllo e con additivo cristallino .....	132
4.5.	Variazione dell'ampiezza media della fessura .....	137
4.5.1.	Immersione in acqua con temperatura di 15°C.....	138
4.5.1.1.	Calcestruzzo con rapporto acqua/cemento di 0,45 .....	138
4.5.1.2.	Calcestruzzo con rapporto acqua/cemento di 0,60 .....	139
4.5.2.	Immersione in acqua con temperatura di 30°C.....	139
4.5.3.	Cicli bagnato/asciutto.....	140
4.5.4.	Calcestruzzo di controllo e con additivo cristallino .....	141
4.6.	Considerazioni generali sulla relazione tra flusso e fessura .....	147
4.6.1.	Immersione in acqua con temperatura di 15°C.....	150
4.6.2.	Immersione in acqua con temperatura di 30°C.....	153

---

4.6.3. Cicli bagnato/asciutto.....	154
4.7. Studio della fessura e formazione dei cristalli .....	155
4.7.1. Valutazione visiva sulla risigillatura della fessura .....	155
4.7.2. Analisi della durezza dei prodotti.....	161
4.7.3. Analisi della natura dei prodotti.....	162
4.8. Confronto con studi precedenti.....	163
4.8.1. Riduzione del flusso.....	164
4.8.2. Variazione dell'ampiezza media della fessura .....	167
<b>Capitolo 5 – CONCLUSIONI .....</b>	<b>171</b>
5.1. Conclusioni.....	171
5.2. Future linee di studio .....	173
<b>Bibliografia.....</b>	<b>175</b>
<b>Appendice A – PROVE STANDARD .....</b>	<b>179</b>
A.1. Prova di abbassamento al cono di Abrams.....	179
A.2. Resistenza alla compressione dei campioni .....	182
<b>Appendice B – TABELLA DEI DATI COMPLETI .....</b>	<b>185</b>
B.1. Tabella dati.....	185
<b>Appendice C – GRAFICI COMPLETI .....</b>	<b>188</b>
C.1. Andamento generale del flusso per ogni rapporto a/c e ambiente di cura .....	188
C.2. Relazione tra flusso d'acqua e ampiezza media della fessura, in condizioni iniziali	192
C.3. Relazione tra flusso d'acqua e ampiezza media della fessura, in condizioni finali .	194
C.4. Healing Rate sul flusso per ogni rapporto a/c e ambiente di cura .....	198
C.5. Healing Rate sull'ampiezza per ogni rapporto a/c e ambiente di cura .....	202
C.6. Relazione tra gli Healing Rate rispettivamente del flusso d'acqua e dell'ampiezza media della fessura .....	206
C.7. Punti anomali .....	209

## Indice delle figure

### Capitolo 2

FIGURA 2-1: RAPPRESENTAZIONE DI PRESTAZIONI E COSTI, INCLUDENDO COSTI DIRETTI DI RIPARAZIONE, IN FUNZIONE DEL TEMPO PER STRUTTURE/INFRASTRUTTURE REALIZZATE CON MATERIALI NORMALI (A) E DI ALTA QUALITÀ (B). [4] .....	24
FIGURA 2-2: DEFINIZIONE DI SELF-HEALING E SELF-REPAIRING DEL CALCESTRUZZO. MIHASHI, NISHIWAKI. [5]	25
FIGURA 2-3: CAUSE DIFFERENTI CHE POSSONO PORTARE AL SELF-HEALING AUTOGENO.....	27
FIGURA 2-4: REAZIONE CHIMICA CHE PORTA ALLA FORMAZIONE DI CARBONATO DI CALCIO IN UNA FESSURA DI CALCESTRUZZO SOTTOPOSTA AD UN FLUSSO D'ACQUA [7].....	28
FIGURA 2-5: HEALING RATE O RIDUZIONE DEL FLUSSO $Q_S(t)$ PER DIFFERENTI AMPIEZZE DI FESSURA $w$ E GRADIENTE DI PRESSIONE $p$ . [7].....	30
FIGURA 2-6: A SINISTRA, RIDUZIONE DEL FLUSSO NORMALIZZATO DOVUTO ALLA SANAZIONE DEL CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA CON DIFFERENTI AMPIEZZE DI FESSURA. A DESTRA, RIDUZIONE DEL FLUSSO NORMALIZZATO A DIVERSE TEMPERATURE CON UNA DETERMINATA AMPIEZZA DI FESSURA. [12].....	32
FIGURA 2-7: COMPORTAMENTO MECCANICO DEI 3 PROVINI CONSERVATI IN ARIA DURANTE 3 SETTIMANE DOPO LA FESSURAZIONE. [13] .....	33
FIGURA 2-8 CONFRONTO TRA IL COMPORTAMENTO MECCANICO DEI PROVINI IN DIFFERENTI CONDIZIONI DI CURA, ARIA E ACQUA, E DURATA RISPETTIVAMENTE 1, 3, 6 SETTIMANE. [13] .....	34
FIGURA 2-9: CONFRONTO DEL COMPORTAMENTO, SUCCESSIVO ALLA RICARICA, DEI PROVINI "GUARITI" PER DIFFERENTI TEMPI DI CURA, COMPARANDOLI A QUELLI CHE NON HANNO MOSTRATO EFFETTI DI SANAZIONE. [13] .....	35
FIGURA 2-10: INDICE DI AUTO-CHIUSURA DELLE FESSURE, PER OGNI CATEGORIA DI MISCELA, IN RELAZIONE AL TEMPO DI CURA E ALL'APERTURA INIZIALE DI FESSURA. (A) INTERVALLO TRA 0-125 $\mu\text{m}$ , (B) INTERVALLO TRA 125-250 $\mu\text{m}$ . [11] .....	37
FIGURA 2-11: CURVA TENSIONE-DEFORMAZIONE-APERTURA DI FESSURA DI UN ECC.....	39
FIGURA 2-12: MIX DESIGN DELLE TRE TIPOLOGIE DI FRCC STUDIATE. [15].....	40
FIGURA 2-13: DIPENDENZA DELLO SPESSORE MEDIO DEI PRODOTTI DI CRISTALLIZZAZIONE CON IL TEMPO DI CURA. [15] .....	41
FIGURA 2-14: CONFRONTO DELLA RESISTENZA A TRAZIONE PRIMA E DOPO 28 GIORNI DI CURA TRA LE DIVERSE TIPOLOGIE DI CAMPIONI. [15].....	41
FIGURA 2-15: VARIAZIONE DELLA FREQUENZA DI RISONANZA IN FUNZIONE DEL NUMERO DI CICLI. ESTRATTO DEI SOLI CAMPIONI A STRETTO CONTATTO CON ACQUA. [16].....	42
FIGURA 2-16: A SINISTRA, RECUPERO DELLA RIGIDEZZA E, A DESTRA, AMPIEZZA MEDIA DELLE FESSURE DEI CAMPIONI SOGGETTI A PREFESSURAZIONE A 3 GIORNI E A 6 MESI. [16] .....	43
FIGURA 2-17: COMPLESSA RETE TRIDIMENSIONALE DI CRISTALLI (A), FORMAZIONE E CRESCITA DEI CRISTALLI (B). [18] .....	47
FIGURA 2-18: PERDITA DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE E RECUPERO DOVUTO ALL'AUTO GUARIGIONE DELLE MICRO FESSURE. [19] .....	47
FIGURA 2-19: CURVA CARICO-SPOSTAMENTO OTTENUTA NELLA PROVA A FLESSIONE PRIMA E DOPO LA CURA (A), PROCEDURA PER VALUTARE LA CHIUSURA DELLE FESSURE (B). [20] .....	48

FIGURA 2-20: INDICE DI AUTO GUARIGIONE DELLE FESSURE PER CALCESTRUZZI SENZA (A) E CON (B) ADDITIVO CRISTALLINO, IN FUNZIONE DELL'APERTURA DI FESSURA E DELLA DURATA DELL'ESPOSIZIONE. [20].....	49
FIGURA 2-21: INDICI DI RECUPERO DELLA RESISTENZA IN FUNZIONE DELLA DURATA DI ESPOSIZIONE E DELL'APERTURA DI FESSURE. [20].....	50
FIGURA 2-22: INDICE DI RECUPERO DEL DANNO IN FUNZIONE DELLA DURATA DI ESPOSIZIONE E DELL'APERTURA DI FESSURE. [20].....	50
FIGURA 2-23: INDICE DI RECUPERO DI RESISTENZA (A) E INDICE DI RECUPERO DEL DANNO (B) IN FUNZIONE DEL TEMPO DI IMMERSIONE IN ACQUA E ESPOSIZIONE ALL'ARIA. [21].....	51
FIGURA 2-24: DIMENSIONE DEI CAMPIONI CUBICI (A); FESSURAZIONE MEDIANTE SPLITTING (B); MISURAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE (C). [23] .....	53
FIGURA 2-25: EVOLUZIONE DELL'INDICE DI SELF-HEALING IN FUNZIONE DEL TEMPO DI CURA PER FESSURE DI DIFFERENTI AMPIEZZE E CAMPIONI PREFESSURATI A TRE GIORNI. [23] .....	54
FIGURA 2-26: EVOLUZIONE DELL'INDICE DI SELF-HEALING IN FUNZIONE DEL TEMPO DI CURA PER FESSURE DI DIFFERENTI AMPIEZZE E CAMPIONI PREFESSURATI A VENTOTTO GIORNI. [23].....	55
FIGURA 2-27: PRODOTTI DI SIGILLATURA PRESENTI SULLE SUPERFICI DELLE FESSURE DI DIFFERENTI MISCELE: OPC, CALCESTRUZZO CON CEMENTO PORTLAND ORDINARIO; FA, CALCESTRUZZO CON CENERI VOLANTI; EA, CALCESTRUZZO CON AGENTI ESPANSIVI; SF, CALCESTRUZZO CON FUMO DI SILICE; CA, CALCESTRUZZO CON ADDITIVO CRISTALLINO; LP, CALCESTRUZZO CON CALCE. [23] .....	57
FIGURA 2-28: PREFESSURAZIONE DEI CAMPIONI (A), FISSAGGIO STAFFA IN PVC (B). [25] .....	58
FIGURA 2-29: ANALISI DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE. [25].....	59
FIGURA 2-30: CONFRONTO DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE TRA I CAMPIONI SOTTOPOSTI A CURA E QUELLI DI RIFERIMENTO, IN TERMINI DI RIGIDEZZA (A), RESISTENZA (B) E DEFORMAZIONE (C) E CON RIFERIMENTO AI DIFFERENTI AMBIENTI DI CURA. [26] .....	62
FIGURA 2-31: CONFRONTO DELLA CHIUSURA DI FESSURE DOPO UN MESE DI CURA IN IMMERSIONE, TRA CALCESTRUZZO COMUNE (A), CALCESTRUZZO CONTENENTI AGENTI ESPANSIVI (B), CALCESTRUZZO CON AGENTI ESPANSIVI PROGETTATO APPOSITAMENTE PER IL SELF-HEALING. [27] .....	63
FIGURA 2-32: FENOMENO DEL SELF-HEALING RELATIVO A DIFFERENTI AMPIEZZE DI FESSURA. [27] .....	64
FIGURA 2-33: POLVERE DI SAP SECCA (A SINISTRA), GEL FORMATOSI A SEGUITO DELL'ESPANSIONE DEL SAP (A DESTRA). [28].....	64
FIGURA 2-34: MECCANISMO DI CHIUSURA ATTUATO DAI POLIMERI SUPER ASSORBENTI. [28] .....	65
FIGURA 2-35: SIGILLATURA COMPLETA DI UNA FESSURA CON AMPIEZZA 138 $\mu$ M DI CAMPIONI CONTENENTI L'1% DI SAP E SOTTOPOSTI A CICLI DI ASCIUTTO/BAGNATO. [30].....	66
FIGURA 2-36: PRODOTTI INCAPSULATI. RILASCIO DELL'AGENTE SANANTE, CONFINATO IN CAPSULE SFERICHE O CILINDRICHE, ALL'INTERNO DELLA FESSURA. REAZIONE DELL'AGENTE DOVUTA: AL CONTATTO CON L'UMIDITÀ, CON L'ARIA O ALL'AUMENTO DELLA TEMPERATURA (A, B); AL CONTATTO CON LA MATRICE CEMENTIZIA (C, D); ALLA PRESENZA DI UN SECONDO COMPONENTE ALL'INTERNO DELLA MATRICE CEMENTIZIA (E, F); ALLA PRESENZA DI UN SECONDO COMPONENTE POSTO IN CAPSULE SEPARATE (G, H). [31].....	68
FIGURA 2-37: SCHEMATIZZAZIONE DELLA PROVA PER INDURRE LA FESSURAZIONE DA TAGLIO SULLE PIASTRE IN CALCESTRUZZO, MEDIANTE L'APPLICAZIONE DI UN CARICO DAL BASSO. [32].....	69

FIGURA 2-38: COMPORTAMENTO MECCANICO DELLE DIVERSE TIPOLOGIE DI CAMPIONI DOPO IL PERIODO DI CURA (A), CONFRONTO DEL RECUPERO DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE DELLE DIVERSE SERIE DI CAMPIONI (B). [33] .....	70
FIGURA 2-39: A SINISTRA, PARTICELLE DI ARGILLA ESPANSA AL CUI INTERNO SONO PRESENTI SPORE BATTERICHE DEL GENERE BACILLUS E UN COMPONENTE ORGANICO, LATTATO DI CALCIO; A DESTRA, PARTICELLE DI ARGILLA ESPANSA, CONTENENTI L'AGENTE SANANTE, INCORPORATE ALL'INTERNO DELLA MATRICE CEMENTIZIA. [36] .....	72
FIGURA 2-40: EVOLUZIONE DELLA FESSURA, PRIMA E DOPO IL PERIODO DI CURA, DEI CAMPIONI STUDIATI. [36] .....	73
FIGURA 2-41: TIPOLOGIE DI CAPSULE IN VETRO UTILIZZATE NEL PIANO SPERIMENTALE. [37] .....	74
FIGURA 2-42: RECUPERO DELLA RESISTENZA DEI CAMPIONI FESSURATI (A), PERMEABILITÀ ALL'ACQUA DEI CILINDRI FESSURATI DOPO ESSERE STATI RIPARATI DAI DIVERSI AGENTI SANANTI (B). [37] .....	75
FIGURA 2-43: FUORIUSCITA DEL MATERIALE SIGILLANTE MONOCOMPONENTE (A) E DEL SIGILLANTE BICOMPONENTE (B), ENTRAMBI COLLEGATI A SERBATOI ESTERNI ALLA STRUTTURA. [31] .....	76
FIGURA 2-44: SEZIONE TIPO DEI CAMPIONI PRISMATICI CON CAVI D'ACCIAIO, TUBI DI DIAMETRO 8,8 MM CONTENENTI LA SOLUZIONE MMA/COBALTO E TUBO CON IDROPEROSSIDO DI CUMENE DI DIAMETRO 6,2 MM. [40] .....	76
FIGURA 2-45: SCHEMA DELLA PROVA A FLESSIONE SU TRE PUNTI DEI CAMPIONI PRISMATICI CON ARMATURA IN ACCIAIO E TUBI CONTENENTI L'ADESIVO CIANOACRILATO. [41] .....	77
FIGURA 2-46: GRAFICI CARICO-APERTURA DI FESSURA (A) E CARICO-SPOSTAMENTO (B). CONFRONTO TRA I CAMPIONI DI CONTROLLO (CURVA "A"), PORTATI A ROTTURA, E I CAMPIONI CONTENENTI L'ADESIVO, SOTTOPOSTI A DUE CICLI DI CARICO (CURVA "B" PER IL PRIMO CARICO E "C" PER IL SECONDO). [41] .....	78
FIGURA 2-47: SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA SMART CONCRETE DI NISHIWAKI ET AL. [42] .....	79
FIGURA 2-48: SEZIONE DI UN OSSO ESTERNAMENTE COMPATTO E INTERNAMENTE SPUGNOSO (A), SEZIONE DI UN CAMPIONE CILINDRICO IN CALCESTRUZZO POROSO. [43], [44] .....	80
FIGURA 2-49: CAMPIONI CILINDRICI PREFESSURATI MEDIANTE PROVA A TRAZIONE INDIRETTA, O BRASILIANA (A), PRISMATICHE SOTTOPOSTE ALLA PROVA A FLESSIONE SU TRE PUNTI (B). [45] .....	81

### Capitolo 3

FIGURA 3-1: SCHEMA DELLA METODOLOGIA SPERIMENTALE UTILIZZATA. [46] .....	85
FIGURA 3-2: PIANO SPERIMENTALE .....	90
FIGURA 3-3: CEMENTO CEM II/A-L 42,5 R. LA CONFEZIONE (IN ALTO), ASPETTO DEL MATERIALE (IN BASSO). 91	
FIGURA 3-4: FOTO DELL'ASPETTO DEL PIETRISCO 7/12 (IN ALTO A SINISTRA), 4/7 (IN ALTO A DESTRA) E DELLA SABBIA (IN BASSO). .....	93
FIGURA 3-5: CURVE GRANULOMETRICHE DEGLI INERTI .....	94
FIGURA 3-6: FIBRE IN ACCIAIO, DIAMETRO 0,55 MM E LUNGHEZZA 35 MM. ASPETTO DELLE FIBRE NELLE CONDIZIONI DI FORNITURA. ....	95
FIGURA 3-7: ASPETTO DELL'ADDITIVO CRISTALLINO AL MOMENTO DELLA FABBRICAZIONE DEL CALCESTRUZZO. . 96	
FIGURA 3-8: SCHEMA LOGICO DEL PROGRAMMA SPERIMENTALE ADOTTATO. ....	97

FIGURA 3-9: CURVA GRANULOMETRICA DELL'IMPASTO AM1, CALCESTRUZZO DI CONTROLLO E RAPPORTO A/C DI 0,45. ....	98
FIGURA 3-10: CURVA GRANULOMETRICA DELL'IMPASTO AM4S1, CALCESTRUZZO CON ADDITIVO CRISTALLINO (4%) E RAPPORTO A/C DI 0,45.....	99
FIGURA 3-11: CURVA GRANULOMETRICA DELL'IMPASTO AM2, CALCESTRUZZO DI CONTROLLO E RAPPORTO A/C DI 0,60.....	99
FIGURA 3-12: CURVA GRANULOMETRICA DELL'IMPASTO AM4S2, CALCESTRUZZO CON ADDITIVO CRISTALLINO (4%) E RAPPORTO A/C DI 0,60.....	100
FIGURA 3-13: MISCELAZIONE DEI COMPONENTI, FASI PRINCIPALI: CALCOLO DEL PESO DEI SINGOLI MATERIALI (A), MISCELAZIONE INERTI CON METÀ ACQUA (B), AGGIUNTA CEMENTO, FILLER ED EVENTUALE ADDITIVO CRISTALLINO (C), AGGIUNTA ADDITIVO FLUIDIFICANTE (D), AGGIUNTA FIBRE (E). ....	102
FIGURA 3-14: PREPARAZIONE DELLE FORME INUMIDENDONE LE SUPERFICI CON DISARMANTE (A), CALCESTRUZZO COMPATTATO (B), LISCIATURA DELLE SUPERFICI E RIPOSO DEI CAMPIONI PER 24 ORE (C), DISARMO DEI CAMPIONI E SISTEMAZIONE IN CAMERA UMIDA (D).....	103
FIGURA 3-15. SEGA CIRCOLARE PER CALCESTRUZZI UTILIZZATA PER ASPORTARE LE FACCE ESTERNE DEI CAMPIONI E, SUCCESSIVAMENTE, DIVIDERLI A METÀ. ....	104
FIGURA 3-16: GENERAZIONE DEL DANNO MEDIANTE PROVA A TRAZIONE INDIRETTA (A), DISPOSIZIONE DEL CAMPIONE TRA I PIATTI DELLA PRESSA (B).....	104
FIGURA 3-17: PASTA SIGILLANTE POSTA SULLE SUPERFICI LATERALI (A), E SUPERIORI (B) DEI CAMPIONI. ....	105
FIGURA 3-18: PROVA DI PERMEABILITÀ UTILIZZATA .....	107
FIGURA 3-19: PERMEABILIMETRO UTILIZZATO PER ESEGUIRE LA PROVA (A), BAROMETRO (B), ANELLO IN GOMMA USATO PER IMPERMEABILIZZARE LA CONNESSIONE TRA IL CAMPIONE E LA MACCHINA (C), PARTE DEL MACCHINARIO UTILIZZATA PER EFFETTUARE LA PROVA (D), CONDIZIONE DEL CAMPIONE AL MOMENTO DELLA PROVA (E), FLUSSO D'ACQUA USCENTE DALLA FESSURA (F). ....	108
FIGURA 3-20: IMMERSIONE IN ACQUA A TEMPERATURA DI 15°C: IMMERSIONE DEI CAMPIONI CON E SENZA ADDITIVO IN VASCHE DISTINTE (A), MISURAZIONE DELLA TEMPERATURA DELL'ACQUA (B), FORMAZIONE DI CARBONATO DI CALCIO VISIBILE NEI PRIMI GIORNI CURA, IMPASTO CON IL 4% DI ADDITIVO CRISTALLINO E RAPPORTO A/C DI 0,45 (C). ....	109
FIGURA 3-21: CARTINE INDICATRICI DI PH UTILIZZATE (A), RISCONTRO DEL COLORE OTTENUTO CON QUELLO DI RIFERIMENTO (B). ....	110
FIGURA 3-22: IMMERSIONE IN ACQUA A TEMPERATURA 30°C: PREPARAZIONE DEL SISTEMA DI RISCALDAMENTO PER ENTRAMBE LE VASCHE (A), SISTEMA IN FUNZIONAMENTO CON CAMPIONI CILINDRICI IN IMMERSIONE (B), APPARECCHIO PER IL RISCALDAMENTO DELL'ACQUA (C). ....	111
FIGURA 3-23: CICLI BAGNATO/ASCIUTTO: IMMERSIONE IN ACQUA DEI CAMPIONI (A), ESPOSIZIONE ALL'ARIA DI LABORATORIO (B). ....	111
FIGURA 3-24: ESEMPIO FOTO DI RIFERIMENTO PER LA DETERMINAZIONE DELLA RELAZIONE TRA PIXEL E MILLIMETRI. ....	112
FIGURA 3-25: CONFRONTO STATO DELLA FESSURA PRIMA (IN ALTO) E DOPO (IN BASSO) LA PROVA DI PERMEABILITÀ A 42 GIORNI. CAMPIONE IN ESAME 4A DELL'IMPASTO DI CONTROLLO AM1 CON RAPPORTO A/C DI 0,45, FESSURA INFERIORE. ....	113

FIGURA 3-26: RETICOLI RIPORTATI SULLE SUPERFICI DEI CAMPIONI UTILIZZATI PER LA MISURAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE IN CORRISPONDENZA DEI PUNTI NUMERATI. LE MISURE SONO RIPORTATE IN MILLIMETRI. ....	114
FIGURA 3-27: UTILIZZO DEL MICROSCOPIO OTTICO PER SCATTARE FOTO AD ALTA RISOLUZIONE DELLA FESSURA (A), VISUALIZZAZIONE FESSURA E ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI MEDIANTE SOFTWARE (B). ....	115
FIGURA 3-28: CONFRONTO STATO DELLA FESSURA PRIMA (IN ALTO) E DOPO (IN BASSO) IL PERIODO DI CURA. CAMPIONE IN ESAME 1A DELL'IMPASTO CON ADDITIVO CRISTALLINO AM4S5 E CON RAPPORTO A/C DI 0,45, FESSURA SUPERIORE. ....	115
FIGURA 3-29: PROVA DI DUREZZA: BAROMETRO (A), UTILIZZO DEL COMPRESSORE AD ARIA SULLA SUPERFICIE DELLA FESSURA (B).....	116

#### Capitolo 4

FIGURA 4-1: RELAZIONE TRA IL FLUSSO D'ACQUA E L'AMPIEZZA DELLA FESSURA, IN CONDIZIONI INIZIALI. ....	120
FIGURA 4-2: CONFRONTO TRA FLUSSO DI ACQUA INIZIALE E FINALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTI IN IMMERSIONE A 15°C.....	122
FIGURA 4-3: CONFRONTO TRA FLUSSO DI ACQUA INIZIALE E FINALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,60 E POSTI IN IMMERSIONE A 15°C.....	122
FIGURA 4-4: CONFRONTO TRA FLUSSO DI ACQUA INIZIALE E FINALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTI IN IMMERSIONE A 30°C.....	123
FIGURA 4-5: CONFRONTO TRA FLUSSO DI ACQUA INIZIALE E FINALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E SOTTOPOSTI A CICLI BAGNATO/ASCIUTTO. ....	124
FIGURA 4-6: CONFRONTO VARIAZIONE FLUSSO DI ACQUA CON AMPIEZZA INIZIALE DELLA FESSURA. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTI IN IMMERSIONE A 15°C. ....	126
FIGURA 4-7: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTI IN IMMERSIONE A 15°C. ....	126
FIGURA 4-8: CONFRONTO VARIAZIONE FLUSSO DI ACQUA CON AMPIEZZA INIZIALE DELLA FESSURA. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,60 E POSTI IN IMMERSIONE A 15°C. ....	128
FIGURA 4-9: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,60 E POSTI IN IMMERSIONE A 15°C. ....	128
FIGURA 4-10: CONFRONTO VARIAZIONE FLUSSO DI ACQUA CON AMPIEZZA INIZIALE DELLA FESSURA. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTI IN IMMERSIONE A 30°C. ....	129
FIGURA 4-11: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTI IN IMMERSIONE A 30°C. ....	130
FIGURA 4-12: CONFRONTO VARIAZIONE FLUSSO DI ACQUA CON AMPIEZZA INIZIALE DELLA FESSURA. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E SOTTOPOSTI A CICLI BAGNATO/ASCIUTTO.....	131
FIGURA 4-13: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E SOTTOPOSTI A CICLI BAGNATO/ASCIUTTO. ....	131
FIGURA 4-14: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. SOVRAPPOSIZIONE DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI DI CONTROLLO E CON RAPPORTO A/C PARI RISPETTIVAMENTE A 0,45 E 0,60. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE A 15°C. ....	132

---

FIGURA 4-15: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. SOVRAPPOSIZIONE DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI CON ADDITIVO CRISTALLINO E CON RAPPORTO A/C PARI RISPETTIVAMENTE A 0,45 E 0,60. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE A 15°C.....	133
FIGURA 4-16: RAPPRESENTAZIONE HEALING RATE MEDIO PER LE TIPOLOGIE DI MISCELE AVENTI UN DIFFERENTE RAPPORTO A/C. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE A TEMPERATURA 15°C. ....	134
FIGURA 4-17: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. SOVRAPPOSIZIONE DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI DI CONTROLLO SOTTOPOSTI A DIFFERENTI AMBIENTI DI CURA. ....	135
FIGURA 4-18: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. SOVRAPPOSIZIONE DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI CON ADDITIVO SOTTOPOSTI A DIFFERENTI AMBIENTI DI CURA. ....	135
FIGURA 4-19: RAPPRESENTAZIONE HEALING RATE MEDIO DEL FLUSSO PER CIASCUN AMBIENTE DI CURA E TIPOLOGIA DI CALCESTRUZZO. ....	136
FIGURA 4-20: HEALING RATE IN RELAZIONE ALL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA INIZIALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTI IN IMMERSIONE A 15°C. ....	138
FIGURA 4-21: HEALING RATE IN RELAZIONE ALL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA INIZIALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,60 E POSTI IN IMMERSIONE A 15°C. ....	139
FIGURA 4-22: HEALING RATE IN RELAZIONE ALL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA INIZIALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTI IN IMMERSIONE A 30°C. ....	140
FIGURA 4-23: HEALING RATE IN RELAZIONE ALL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA INIZIALE. CAMPIONI CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E SOTTOPOSTI A CICLI BAGNATO/ASCIUTTO. ....	141
FIGURA 4-24: HEALING RATE IN RELAZIONE ALL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA INIZIALE. SOVRAPPOSIZIONE DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI DI CONTROLLO E CON RAPPORTO A/C PARI RISPETTIVAMENTE A 0,45 E 0,60. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE IN ACQUA A 15°C. ....	142
FIGURA 4-25: HEALING RATE IN RELAZIONE ALL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA INIZIALE. SOVRAPPOSIZIONE DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI CON ADDITIVO CRISTALLINO E CON RAPPORTO A/C PARI RISPETTIVAMENTE A 0,45 E 0,60. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE IN ACQUA A 15°C.....	142
FIGURA 4-26: RAPPRESENTAZIONE HEALING RATE MEDIO PER LE TIPOLOGIE DI MISCELE AVENTI UN DIFFERENTE RAPPORTO A/C. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE A TEMPERATURA 15°C. ....	143
FIGURA 4-27: HEALING RATE IN RELAZIONE ALL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA INIZIALE. SOVRAPPOSIZIONE DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI DI CONTROLLO SOTTOPOSTI A DIFFERENTI AMBIENTI DI CURA. ....	144
FIGURA 4-28: HEALING RATE IN RELAZIONE ALL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA INIZIALE. SOVRAPPOSIZIONE DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI CON ADDITIVO CRISTALLINO SOTTOPOSTI A DIFFERENTI AMBIENTI DI CURA. ....	145
FIGURA 4-29: RAPPRESENTAZIONE HEALING RATE MEDIO SULL'AMPIEZZA PER CIASCUN AMBIENTE DI CURA E TIPOLOGIA DI CALCESTRUZZO. ....	146
FIGURA 4-30: RELAZIONE TRA FLUSSO DI ACQUA E AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA DOPO 42 GIORNI DI CURA, CONSIDERANDO ENTRAMBE LE TIPOLOGIE DI CALCESTRUZZO. ....	148
FIGURA 4-31: CONFRONTO TRA GLI HEALING RATE DEL FLUSSO E DELL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA, CONSIDERANDO TUTTI I DATI OTTENUTI DALLO STUDIO.....	149
FIGURA 4-32: CONFRONTO TRA GLI HEALING RATE DEL FLUSSO E DELL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA. CALCESTRUZZO CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTO IN IMMERSIONE A 15°C. ....	150

FIGURA 4-33: STATO DELLA FESSURA SUPERIORE E INFERIORE DOPO IL PERIODO DI CURA. CAMPIONE IN ESAME 3A DELL'IMPASTO DI CONTROLLO AM1 E CON RAPPORTO A/C DI 0,45. IN ALLEGATO UNA TABELLA CON I RISPETTIVI VALORI INIZIALI E FINALI. ....	151
FIGURA 4-34: CONFRONTO TRA GLI HEALING RATE DEL FLUSSO E DELL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA. CALCESTRUZZO CON RAPPORTO A/C PARI A 0,60 E POSTO IN IMMERSIONE A 15°C.....	152
FIGURA 4-35: STATO DELLA FESSURA SUPERIORE E INFERIORE DOPO IL PERIODO DI CURA. CAMPIONE IN ESAME 6B DELL'IMPASTO DI CONTROLLO AM2 E CON RAPPORTO A/C DI 0,60. IN ALLEGATO UNA TABELLA CON I RISPETTIVI VALORI INIZIALI E FINALI. ....	152
FIGURA 4-36: CONFRONTO TRA GLI HEALING RATE DEL FLUSSO E DELL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA. CALCESTRUZZO CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E POSTO IN IMMERSIONE A 30°C.....	153
FIGURA 4-37: CONFRONTO TRA GLI HEALING RATE DEL FLUSSO E DELL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA. CALCESTRUZZO CON RAPPORTO A/C PARI A 0,45 E SOTTOPOSTO A CICLI BAGNATO/ASCIUTTO. ....	154
FIGURA 4-38: CAMPIONE 1B, IMPASTO CON ADDITIVO AM4S1 E RAPPORTO A/C DI 0,45, SUPERFICIE INFERIORE. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE IN ACQUA A TEMPERATURA 15°C. EVOLUZIONE DELLA FESSURA PRIMA E DOPO LA CURA. ....	155
FIGURA 4-39: CAMPIONE 3A, IMPASTO DI CONTROLLO AM2 E RAPPORTO A/C DI 0,60, SUPERFICIE SUPERIORE. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE IN ACQUA A TEMPERATURA 15°C. EVOLUZIONE DELLA FESSURA PRIMA E DOPO LA CURA. ....	156
FIGURA 4-40: CAMPIONE 2B, IMPASTO CON ADDITIVO CRISTALLINO AM4S2A E RAPPORTO A/C DI 0,60, SUPERFICIE INFERIORE. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE IN ACQUA A TEMPERATURA 15°C. STATO DELLA FESSURA AL TERMINE DEL PERIODO DI CURA. ....	156
FIGURA 4-41: CAMPIONE 6A, IMPASTO CON ADDITIVO AM4S5 E RAPPORTO A/C DI 0,45, SUPERFICIE INFERIORE. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE IN ACQUA A TEMPERATURA 30°C. EVOLUZIONE DELLA FESSURA PRIMA E DOPO LA CURA. ....	157
FIGURA 4-42: CAMPIONE 3B, IMPASTO CON ADDITIVO AM4S5 E RAPPORTO A/C DI 0,45, SUPERFICIE SUPERIORE. AMBIENTE DI CURA: IMMERSIONE IN ACQUA A TEMPERATURA 30°C. EVOLUZIONE DELLA FESSURA PRIMA E DOPO LA CURA. ....	158
FIGURA 4-43: CAMPIONE 6A, IMPASTO CON ADDITIVO AM4S6 E RAPPORTO A/C DI 0,45, SUPERFICIE SUPERIORE. AMBIENTE DI CURA: CICLI BAGNATO/ASCIUTTO. EVOLUZIONE DELLA FESSURA PRIMA E DOPO LA CURA. ....	158
FIGURA 4-44: INFLUENZA DEGLI AMBIENTI DI CURA E DEL DIFFERENTE RAPPORTO A/C SUGLI EFFETTI RELATIVI ALLA CHIUSURA DELLE FESSURE.....	160
FIGURA 4-45: STATO INIZIALE (A) E FINALE (B) DELLA FESSURA. CAMPIONE IN ESAME 4A DELL'IMPASTO DI CONTROLLO AM3 E CON RAPPORTO A/C DI 0,45, FESSURA SUPERIORE. ....	161
FIGURA 4-46: STATO INIZIALE (A) E FINALE (B) DELLA FESSURA. CAMPIONE IN ESAME 6A DELL'IMPASTO CON ADDITIVO CRISTALLINO AM4S5 E CON RAPPORTO A/C DI 0,45, FESSURA SUPERIORE. ....	161
FIGURA 4-47: CRISTALLI INSOLUBILI ALL'INTERNO DEL VETRINO (A), EFFERVESCENZA DOVUTA ALLO SVILUPPO DI ANIDRIDE CARBONICA (B). ....	162
FIGURA 4-48: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. CONFRONTO DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI DI CONTROLLO SOTTOPOSTI A DIFFERENTI AMBIENTI DI CURA. ....	164
FIGURA 4-49: HEALING RATE IN RELAZIONE CON IL FLUSSO DI ACQUA INIZIALE. CONFRONTO DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI CONTENENTI ADDITIVO CRISTALLINO E SOTTOPOSTI A DIFFERENTI AMBIENTI DI CURA.....	165

---

FIGURA 4-50: RAPPRESENTAZIONE HEALING RATE MEDIO RELATIVO AL FLUSSO DI ACQUA, PER OGNI AMBIENTE DI CURA E TIPOLOGIA DI CALCESTRUZZO.....	166
FIGURA 4-51: HEALING RATE SULL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA. CONFRONTO DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI DI CONTROLLO SOTTOPOSTI A DIFFERENTI AMBIENTI DI CURA. ....	168
FIGURA 4-52: HEALING RATE SULL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA. CONFRONTO DEI DATI RELATIVI AI SOLI CAMPIONI CONTENENTI ADDITIVO CRISTALLINO E SOTTOPOSTI A DIFFERENTI AMBIENTI DI CURA.....	169
FIGURA 4-53: RAPPRESENTAZIONE HEALING RATE MEDIO RELATIVO ALL'AMPIEZZA MEDIA DELLA FESSURA, PER OGNI AMBIENTE DI CURA E TIPOLOGIA DI CALCESTRUZZO. ....	170

### *Appendici*

FIGURA A-1: PROVA DI ABBASSAMENTO AL CONO: INSERIMENTO DEL CONGLOMERATO NELLO STAMPO (A), COSTIPAZIONE DEL CALCESTRUZZO MEDIANTE LA BARRA DI ACCIAIO (B), SOLLEVAMENTO DEL CONO IN UN TEMPO COMPRESO TRA 5 S E 10 S (C), MISURAZIONE DELLA DISTANZA TRA IL PUNTO PIÙ ALTO DEL CALCESTRUZZO E LA BARRA (D). ....	180
FIGURA A-2: CLASSI DI ABBASSAMENTO AL CONO (SLUMP). UNI EN 206-1:2006.....	180
FIGURA A-3: ABBASSAMENTO AL CONO, SLUMP TEST. ....	181
FIGURA A-4: CAPPATURA DELLA SUPERFICIE SUPERIORE DEL CAMPIONE UTILIZZANDO UNA MISCELA DI ZOLFO. ....	182
FIGURA A-5: POSIZIONAMENTO DEL CAMPIONE TRA I PIATTI DELLA PRESSA, IN POSIZIONE CENTRALE (A), ROTTURA DEL CAMPIONE AL RAGGIUNGIMENTO DEL CARICO MASSIMO (B). ....	183
FIGURA A-6: TIPI DI ROTTURE RITENUTE SODDISFACENTI DALLA NORMA UNI EN 12390-3. ....	184
FIGURA A-7: RESISTENZA A COMPRESSIONE A 28 GIORNI DEGLI IMPASTI STUDIATI. I CAMPIONI DI CONTROLLO SONO RAPPRESENTATI IN ROSSO, MENTRE IN BLU QUELLI CON ADDITIVO CRISTALLINO CON UN CONTENUTO DEL 4% IN PESO DI CEMENTO. ....	184

## **Indice delle tabelle**

### *Capitolo 3*

TABELLA 3-1: GRANULOMETRIA DEGLI INERTI .....	93
TABELLA 3-2: CARATTERISTICHE DEGLI INERTI .....	94
TABELLA 3-3: DOSAGGIO CALCESTRUZZO RAPPORTO A/C DI 0,45 (A SINISTRA), DI 0,6 (A DESTRA).....	101

### *Appendici*

TABELLA A-1: ABBASSAMENTO AL CONO RELATIVO AD OGNI IMPASTO REALIZZATO. ....	181
---	-----





## Capitolo 1 - INTRODUZIONE

### 1.1. Introduzione

Negli ultimi decenni, l'emergere dei danni causati all'ambiente all'ecosistema e l'eccessivo ed irrazionale utilizzo delle risorse ha portato alla diffusione del concetto di sviluppo sostenibile, che sta progressivamente acquistando una notevole importanza. Ciò ha comportato il nascere di una coscienza collettiva finalizzata alla valorizzazione delle risorse naturali, una sensibilità nei confronti dei problemi ambientali e una maggiore consapevolezza della compromissione della qualità della vita presente e futura. Con il tempo, questo nuovo concetto di sviluppo ha portato ad un cambiamento delle fasi di produzione, gestione e organizzazione all'interno delle diverse tipologie di aziende che lavorano nel settore industriale o manifatturiero, influenzando di conseguenza anche il campo edilizio.

La sostenibilità, nell'ambito dell'ingegneria civile e strutturale, sta acquisendo una sempre maggiore rilevanza dovuta, non solo allo sviluppo tecnologico e al rapido cambiamento dei bisogni della società, ma anche ad un progressivo aumento della popolazione che ha causato un incremento della domanda d'infrastrutture capaci di garantire un elevato livello di prestazione in servizio. E' per questo motivo che i soggetti che operano in questo campo hanno avuto la necessità di ricercare nuovi materiali e tecnologie in grado di soddisfare la domanda e di rispondere interamente al concetto di sostenibilità. L'utilizzo delle nuove tecnologie, applicate all'ingegneria strutturale, potrebbe portare alla realizzazione di opere con caratteristiche migliori, in termini di resistenza e durabilità, e con un costo inferiore del ciclo di vita.

Quando si parla di strutture in calcestruzzo il parametro principale da soddisfare è quello della durabilità. La definizione data da Adam M. Neville, è che la struttura in calcestruzzo deve continuare a svolgere le funzioni per la quale è stata realizzata, ovvero, mantenere le sue caratteristiche di resistenza e funzionalità durante tutto il periodo richiesto o atteso [1]. A questa definizione è opportuno aggiungere che, nel suddetto periodo, è necessario ridurre al minimo la manutenzione ordinaria ed eliminare quella straordinaria. La durabilità è governata dalla permeabilità di un calcestruzzo ovvero dalla facilità con cui i fluidi, sia liquidi che gassosi, possono entrare, e muoversi liberamente, nella matrice [2]. Infatti, è noto che una eccessiva permeabilità del materiale è sinonimo di scarsa durabilità. La graduale diminuzione della durabilità di una struttura in calcestruzzo armato è causata, principalmente, dal problema della fessurazione degli elementi che la costituiscono, provocando una aumento di permeabilità e favorendo, di conseguenza, la penetrazione di acqua, umidità o altri agenti aggressivi che rischiano di compromettere lo stato delle armature in acciaio presenti al suo interno.

Le cause di degrado a cui sono soggetti gli elementi strutturali possono essere molteplici, per lo più in presenza di fessurazione eccessiva, la quale comporta una riduzione della capacità del calcestruzzo di proteggere le armature. Ciò può provocare la corrosione delle armature

stesse, presenti all'interno degli elementi, che comporta una riduzione della sezione dell'acciaio con conseguente perdita della capacità portante ed, inoltre, un iniziale aumento di volume con conseguente espansione, formazione di fessure da splitting ed espulsione dei copri-ferri. E' opportuno citare il deterioramento dovuto a cicli di gelo/disgelo nei quali la formazione di ghiaccio, all'interno del materiale poroso, provoca un danno legato al conseguente aumento di volume che induce delle pressioni all'interno della matrice. Inoltre, la presenza di acqua favorisce l'ingresso di sostanze aggressive solide, liquide e gassose che alimentano la probabilità di attacchi chimici.

E' a causa di molteplici fenomeni, alcuni sopra citati, che molte strutture ed infrastrutture, realizzate nella seconda metà del secolo scorso, stanno rapidamente raggiungendo livelli di degrado elevati, riducendo la propria funzionalità a causa del deterioramento dei materiali. Molto spesso i costi dovuti alla manutenzione e alla riparazione, rivolte al ripristino delle caratteristiche iniziali di suddette opere, risultano insostenibili, non solo in termini economici, ma soprattutto da un punto di vista ambientale e sociale. Inoltre, non sempre è possibile individuare il danno, e di conseguenza saperne l'entità, a causa della difficile accessibilità alle parti danneggiate.

Questa realtà ha gradualmente fatto emergere il concetto di strutture in grado di auto ripararsi senza la necessità di un intervento umano, avvicinandosi sempre più al concetto di *self-healing*, o in altre parole auto guarigione, del calcestruzzo. Proprio il termine "guarigione" mostra un'analogia molto forte con la medicina, nella quale il *self-healing* può avvenire sia a livello delle singole molecole, ad esempio la riparazione del DNA, sia a livello macroscopico con la chiusura e guarigione, in tempi brevi, di lesioni o ferite. E' proprio questa l'idea che si vuole riproporre, ovvero quella di sperimentare metodologie di mix-design in grado di trasformare il calcestruzzo in un materiale capace di riparare danni di piccole entità, recuperando così le proprietà e caratteristiche compromesse da tale danno. Questo evidenzia la volontà di ricercare e sviluppare, sempre più, materiali basati sul modello di prevenzione del danno, piuttosto che su un concetto di gestione.

E' così che il *self-healing* potrebbe avere effetti significativi sull'aumento della durabilità di una struttura riducendo i costi economici, sociali e ambientali. Inoltre potrebbe essere un'importante tecnologia rivolta alla realizzazione di strutture sostenibili.

## 1.2. Obiettivi

Questo studio ha l'obiettivo di verificare come l'aggiunta di specifici additivi cristallini possa migliorare la capacità di autoguarigione di elementi in calcestruzzo fibrorinforzato. In particolare è stato utilizzato un alto dosaggio, pari al 4% in peso di cemento, con lo scopo di osservare l'effettiva influenza di tale prodotto rispetto al calcestruzzo ordinario.

Il programma sperimentale, basato sulla metodologia sviluppata dall'università ospitante, ha previsto la realizzazione di quattro diverse miscele, caratterizzate dalla presenza o meno dell'additivo cristallino e dall'utilizzo di due rapporti a/c pari a 0,45 e 0,60. Ciò ha permesso la fabbricazione di campioni cilindrici, prefessurati all'età di due giorni mediante la prova a trazione indiretta, e sottoposti a tre differenti ambienti di cura per una durata di 42 giorni. L'utilizzo di specifiche condizioni di cura ha permesso di valutare sotto quali vincoli e con quale efficacia si verifica il fenomeno del *self-healing*. Analizzando i risultati e i problemi riscontrati negli studi precedenti, è stato possibile apportare delle modifiche ad alcune fasi principali e all'ordine di esecuzione delle lavorazioni necessarie ad effettuare lo studio, migliorando così la metodologia utilizzata.

I parametri principali utilizzati per esaminare il grado di guarigione dei campioni fessurati sono la variazione di permeabilità e l'analisi dell'apertura media della fessura. Per la prima tipologia di parametri è stata eseguita la prova di permeabilità con una pressione quasi costante (1,9÷2,1 bar) e con tempo stabilito pari a cinque minuti. Ciò ha permesso di valutare la variazione del flusso di acqua passante attraverso la fessura e comprendere il livello di recupero di permeabilità del materiale, a seguito del periodo di cura. Mentre per quanto riguarda la seconda, con l'ausilio di un microscopio sono state scattate foto delle fessure presenti sulle superfici dei campioni con lo scopo di osservare i cambiamenti che hanno subito durante il periodo di cura.

Attraverso un'analisi dei risultati ottenuti, è stato possibile valutare l'influenza dell'additivo cristallino e delle condizioni di cura sulla capacità di autoguarigione del calcestruzzo. Queste osservazioni hanno consentito di trarre le conclusioni riguardanti lo studio in oggetto.

### 1.3. Struttura del documento

Il presente elaborato è strutturato in cinque sezioni. La prima comprende l'introduzione alla ricerca, gli obiettivi ai quali si vuole giungere e la struttura del documento.

Nel secondo capitolo viene riportato lo stato dell'arte riguardante l'applicazione del concetto di *self-healing* per le strutture in calcestruzzo. In particolare viene fornita una spiegazione esaustiva di ciò che si intende con il termine *self-healing* ed, inoltre, vengono illustrati gli approcci proposti e studiati in precedenti ricerche.

Nel terzo capitolo vengono descritti il programma sperimentale e la metodologia adottata nel presente studio. In particolare nel capitolo viene riportata la descrizione dei materiali utilizzati e delle fasi principali relative alla realizzazione dei campioni necessari allo svolgimento dello studio. Infine, vengono esposti la metodologia utilizzata per la valutazione delle fessure e le prove aggiuntive effettuate con l'obiettivo di osservare la natura e la resistenza dei cristalli.

Il capitolo quarto riporta tutti i risultati ritenuti rilevanti mediante i quali è stato possibile trarre le conclusioni finali. Viene illustrato l'andamento generale del flusso di acqua durante il periodo di cura. Inoltre, è stata data particolare importanza agli indici di guarigione relativi al

---

flusso d'acqua e all'ampiezza media della fessura, capaci di quantificare il grado di *self-healing* raggiunto. Viene esposto uno studio relativo all'aspetto delle fessure al termine del periodo di cura e alla formazione dei cristalli visibili sulle superfici delle fessure sigillate. Infine, viene effettuato un confronto dei risultati con quelli ottenuti in studi precedenti.

Il capitolo cinque riporta le conclusioni finali tratte dall'analisi e osservazione dei risultati ottenuti nella ricerca. Inoltre vengono esposte le future linee di studio in funzione di quanto osservato in questo studio, con l'obiettivo di raggiungere una maggiore caratterizzazione del fenomeno del *self-healing*.

---

## Capitolo 2 - STATO DELL’ARTE

### 2.1. Introduzione

Come precedentemente detto, il graduale degrado e la possibilità di realizzare strutture sostenibili in calcestruzzo armato, motiva sempre più la necessità di indagare sulle proprietà di materiali auto riparanti e sugli effettivi vantaggi conseguenti al loro utilizzo. Alcuni benefici che si possono trarre da questi materiali includono la riduzione del tasso di deterioramento, una maggiore durabilità, una minor frequenza di riparazione e un abbattimento dei costi durante tutto il ciclo di vita di una infrastruttura in calcestruzzo armato. Inoltre, questi vantaggi potrebbero portare ad una maggiore sostenibilità ambientale, dal momento che un minor numero di riparazioni implica un minor tasso di utilizzo delle risorse materiali, una riduzione dei consumi energetici e delle emissioni inquinanti durante il processo di produzione e trasporto. Ciò acquista una maggiore rilevanza quando si parla di infrastrutture civili nelle quali viene richiesto sempre più un alto livello di prestazione d’uso, una elevata durabilità ed il minimo impatto ecologico possibile; perciò la durabilità e la longevità dei materiali utilizzati risulta di primaria importanza.

Citando K. Van Breugel, “migliorando la longevità delle infrastrutture esistenti verrà ridotto indubbiamente l’impatto dell’uomo sulla stabilità della biosfera” [3]. Difatti, l’aumento della durata di vita di una infrastruttura potrebbe ridurre la domanda di nuove infrastrutture con una conseguente riduzione nell’utilizzo di materie prime.

Il progressivo degrado di una struttura continua fino al momento nel quale risulta necessario un primo intervento di riparazione, mentre i successivi sono richiesti ad intervalli di tempo sempre più ridotti. Questo tipo di manutenzione incide in modo notevole sul costo totale di una struttura; sarebbe più ragionevole avere dei costi maggiori di costruzione, utilizzando materiali migliori in termini di prestazioni e durabilità, al fine di mantenere una buona qualità dell’infrastruttura nel corso della vita utile, annullando o riducendo l’intervento umano legato a riparazioni più o meno importanti. Diversi studi hanno focalizzato l’attenzione sull’influenza della manutenzione ordinaria e straordinaria e sui costi totali di una struttura, riportando un quadro piuttosto esaustivo per comprendere la situazione attuale. K. Van Breugel [3] sostiene che la società spende enormi quantità di denaro a causa della bassa qualità e durabilità delle strutture. Ad esempio, in Europa, è stato stimato che il 50% del budget annuale relativo alle costruzioni viene utilizzato per il ripristino e la riparazione delle strutture esistenti. La situazione negli Stati Uniti non è molto diversa, in quanto il costo medio per la manutenzione e riparazione di un ponte può ammontare fino a circa 5.2 miliardi di dollari. Inoltre l’aggiunta di costi dovuti all’incremento del traffico e all’impatto economico, sociale e ambientale che quest’ultimo comporta, potrebbero richiedere una spesa dieci volte maggiore.

Sempre van Breugel, propone un grafico riguardante le prestazioni e il costo di una struttura durante la sua vita utile. In figura 2.1, viene riportata una versione semplificata da E. Schlangen e S. Sangadji [4].

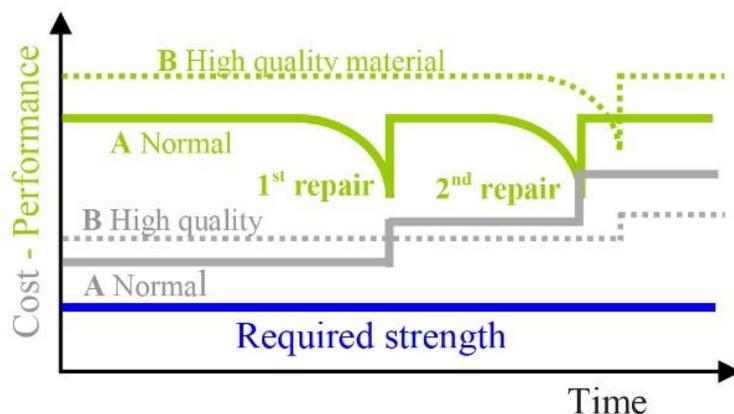


Figura 2-1: Rappresentazione di prestazioni e costi, includendo costi diretti di riparazione, in funzione del tempo per strutture/infrastrutture realizzate con materiali normali (A) e di alta qualità (B). [4]

E' per questa serie di ragioni che si è iniziato a pensare ai *self-healing materials* (materiali autoriparanti), i quali hanno la capacità intrinseca di riparare e ripristinare il livello originale di prestazioni di una struttura, a seguito del verificarsi di una piccola fessura o di un qualsiasi processo di degradazione fisica o chimica, con un conseguente aumento della vita utile. L'utilizzo dei suddetti materiali per la realizzazione di una struttura, quindi, potrebbe risultare un caso ideale nel quale vi sia una completa assenza di costi di manutenzione e di riparazione, portando ad un aumento sensibile del costo iniziale, beneficiando, però, di una migliore gestione durante tutta la vita utile.

Negli ultimi anni, questo argomento ha suscitato un notevole interesse nei ricercatori, i quali stanno indagando su possibili metodologie che permetteranno di comprendere meglio il comportamento e le capacità di questi materiali, al fine di poter usufruire concretamente dei vantaggi che essi possono apportare nei processi di realizzazione dell'ingegneria civile ed edile.

## 2.2. Self-Healing and Self-Repairing materials

I materiali auto riparanti sono una classe di materiali cosiddetti “intelligenti”, i quali hanno la capacità intrinseca di riparare danni provocati da un utilizzo, prolungato nel tempo, a fronte sia di sollecitazioni meccaniche sia di azioni di tipo ambientale. A livello microscopico, l’apertura delle fessure e altri tipi di danno hanno mostrato una notevole influenza sulle proprietà termiche, elettriche e acustiche dei materiali, portando con il tempo ad una diminuzione dei valori rispetto a quelli minimi richiesti. Abituamente, le fessure vengono riparate a mano, ma spesso risulta difficile individuarle a causa della poca o assente accessibilità al sito nel quale è avvenuto il danno. Basti pensare a strutture sotterranee, impianti di smaltimento dei rifiuti tossici o pareti di serbatoi per lo stoccaggio di materiali radioattivo o tossico.

Con il termine *self-healing*, nel calcestruzzo, ci si riferisce ai meccanismi di ri-chiusura delle fessure, la maggior parte dei quali richiedono la presenza di acqua o di un’elevata umidità. Molti studi, negli ultimi anni, hanno posto l’attenzione sul possibile recupero delle proprietà meccaniche e sulla diminuzione della permeabilità, mediante la sigillatura delle fessure così da impedire l’ingresso di acqua. Il concetto di *self-healing materials* non è completamente nuovo. Infatti, già nel 1836, la French Academy of Science aveva riportato studi relativi al *self-healing* nelle strutture di contenimento dell’acqua e canali sotterranei; oltre a questi, anche altri studi effettuati nella prima metà del XX secolo hanno posto l’attenzione sui problemi relativi alle perdite nelle strutture di contenimento dei liquidi.

Data la complessità del fenomeno del *self-healing*, nel corso degli anni, si è cercato di trovare alcune definizioni che lo descrivessero in maniera esaustiva, in funzione dei vari processi osservati o semplicemente dagli obiettivi che si vuole raggiungere, come il recupero di una certa proprietà. Mihashi e Nishiwaki [5], riportano un quadro abbastanza chiaro in merito (Figura 2.2), dividendo tutte le metodologie studiate in due grandi categorie.



Figura 2-2: Definizione di Self-Healing e Self-Repairing del calcestruzzo. Mihashi, Nishiwaki. [5]

Nell’ambito denominato “*engineered self-healing*”, rientrano tutti gli approcci che si concentrano sulla capacità che possiede il materiale di risigillare le fessure e su opportune tecnologie ingegneristiche volte a stimolarle; mentre definiscono “*self-repairing*”, quegli

approcci rivolti a raggiungere la completa riparazione della fessura, integrando nell'impasto appositi additivi finalizzati a tale scopo. Quest'ultima, viene suddivisa a sua volta in autoriparazione passiva e attiva: la prima, si riferisce all'utilizzo di opportuni elementi posti in quelle parti maggiormente soggette alla formazione di fessure, come ad esempio le zone dove vi sia la presenza di una tensione di trazione; la seconda, riguarda quei sistemi di monitoraggio, mediante l'ausilio di sensori, che controllano costantemente l'ampiezza della fessura e attivano dispositivi finalizzati alla riparazione, solo al superamento di un certo valore critico prefissato.

Una definizione nella quale si riscontra una forte analogia con l'idea di *self-healing* acquisita durante lo studio effettuato nel presente elaborato, è quella riportata dal RILEM TC-221 - SHC [6], nel quale si preferisce proporre una definizione chiara ma non troppo dettagliata legata ai processi generali di auto guarigione. Viene così definito il *self-healing* come qualsiasi processo, proprio del materiale, che comporta un recupero delle proprietà in seguito ad un'azione precedente che ha compromesso le prestazioni del materiale. E' stato suddiviso in due gruppi principali:

- Autogeno: quando il processo di auto guarigione avviene utilizzando opportuni componenti, e relative quantità, normalmente già presenti nella composizione della miscela e i quali non sono appositamente progettati per svolgere la funzione di *self-healing*. Si citano ad esempio le ceneri volanti, loppe d'altoforno, fumo di silice e altri materiali pozzolanici.
- Autonomo: quando il processo di auto guarigione viene attivato grazie all'aggiunta di specifici additivi o elementi funzionali, posti all'interno del getto, che possiedono la sola funzione di innescare tale processo.

Inoltre è opportuno evidenziare che il RILEM TC-221 - SHC ha ritenuto necessario distinguere il concetto di *self-healing* da quello di *self-closing*. Infatti quest'ultimo è un fenomeno che prevede la semplice ri-chiusura delle fessure con un conseguente recupero della sola permeabilità del materiale danneggiato.

Negli ultimi anni, molti autori hanno focalizzato l'attenzione sui diversi benefici che questi processi di *self-healing* possono apportare. Infatti gli studi proposti si pongono come obiettivo quello di comprendere come il ripristino della continuità del materiale possa influire su un possibile recupero di resistenza meccanica e/o sulla riduzione della permeabilità del materiale. Nei paragrafi successivi verranno riportati le principali ricerche effettuate su questo argomento, così da poter fornire al lettore un quadro dettagliato sui risultati conseguiti fino ad ora.

### 2.3. Self-Healing autogeno

E’ ben noto da diverso tempo che il calcestruzzo possiede un’innata capacità di sanare piccole fessure, riducendo gradualmente nel tempo, o a volte bloccando completamente, il flusso d’acqua che le attraversa. Ci si riferisce, in questo caso, al *self-healing* di tipo autogeno, già descritto precedentemente, nel quale si evidenzia come un normale calcestruzzo sia in grado di ripararsi senza alcun aiuto esterno. Nel corso degli anni, diversi studi si sono concentrati nel determinare quali fossero le possibili cause che condizionano e rendono possibile questo fenomeno. Edvardsen [7], e in seguito Ramm e Biscopig [8], hanno affermato che le suddette possono essere di natura fisica, chimica e meccanica come è possibile osservare in figura 2.3.

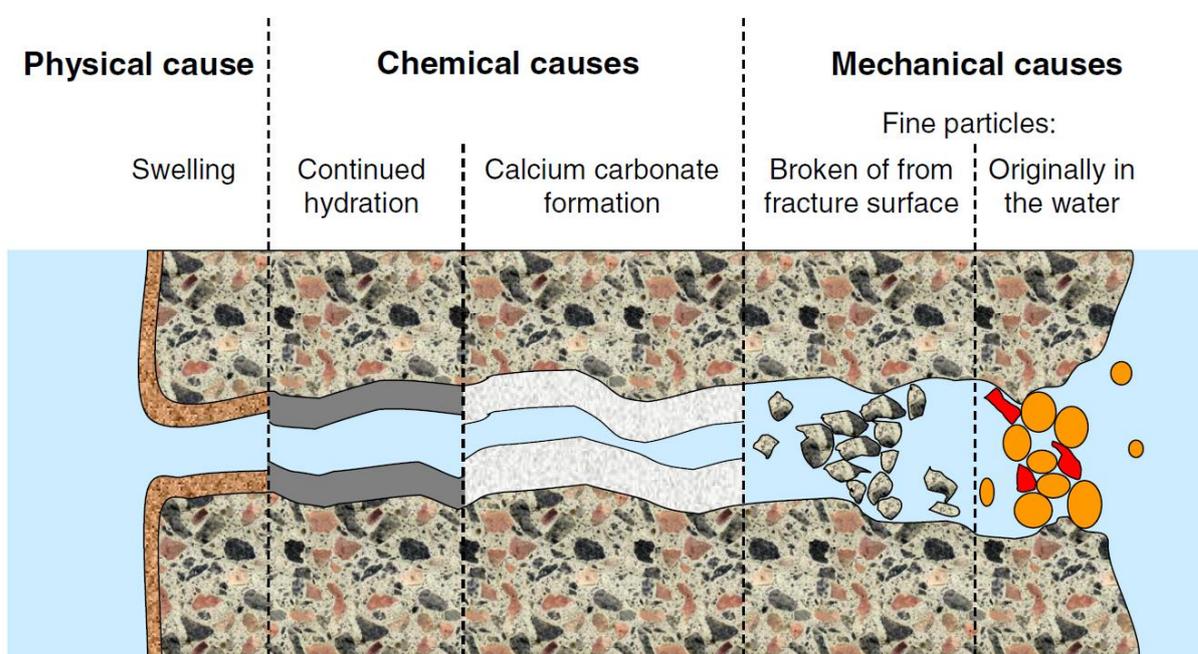


Figura 2-3: Cause differenti che possono portare al self-healing autogeno

La causa fisica è dovuta al rigonfiamento della matrice cementizia, in condizioni di saturazione, che avviene in corrispondenza delle superfici della fessura comportando una riduzione della sua ampiezza. Questo fenomeno può portare alla chiusura di fessure di piccole entità o stimolare il verificarsi di altri meccanismi di guarigione. E’ opportuno notare però che nel momento in cui tutta l’acqua evapora, le dimensioni della fessura ritornano allo stato originale; in aggiunta è stimato che l’effetto del rigonfiamento causa una riduzione del flusso di acqua inferiore al 10%, motivo per il quale viene ritenuta una causa marginale.

In seguito, vi sono due processi chimici: il primo riguarda l’idratazione continuata ritardata del cemento che non ha avuto la possibilità di reagire per mancanza di acqua. Perciò al momento del formarsi di una fessura, le particelle non ancora idratate, entrando a contatto con l’acqua o con l’umidità esterna, reagiscono portando così alla formazione di nuovo idrosilicato di

calcio favorendo la sigillatura della fessura. L'idratazione continuata però non può essere responsabile di una completa chiusura di una fessura, a meno che non si prenda in considerazione una dimensione di circa 0,1 mm, assumendo un'azione simultanea di rigonfiamento e idratazione della matrice; all'aumentare dell'ampiezza, la probabilità di una possibile guarigione diminuisce. Il secondo processo, schematizzato nella figura 2.4, si riferisce alla formazione di carbonato di calcio a seguito di una reazione tra ioni di calcio, presenti nella matrice del calcestruzzo, e anioni carbonato che si trovano nell'acqua. Infine vengono riportate due cause di natura meccanica che possono contribuire al fenomeno dell'auto guarigione, ma ritenute di minor importanza a causa della loro modesta influenza. Queste riguardano la presenza di particelle fini, contenute nel fluido che attraversa la fessura, e di frammenti generatisi al momento della formazione delle due nuove superfici, i quali possono essere trasportati all'interno della fessura stessa e, depositandosi, ostruire il passaggio di fluidi.

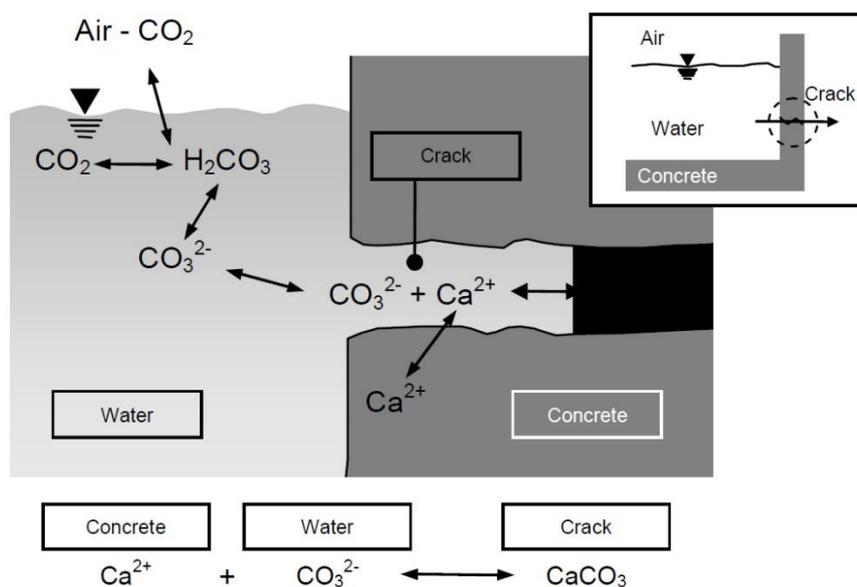


Figura 2-4: Reazione chimica che porta alla formazione di carbonato di calcio in una fessura di calcestruzzo sottoposta ad un flusso d'acqua [7]

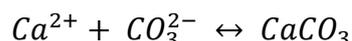
In seguito, anche quelle riportate da Ter Heide [9] riscontrano una forte analogia con quanto descritto in precedenza. Egli però fornisce una spiegazione più dettagliata e accurata del processo relativo alla formazione di carbonato di calcio e sostiene che le ultime due cause, di natura meccanica, possono essere considerate come un unico meccanismo. Per la formazione di carbonato di calcio è necessaria la presenza sia dell'idrossido di calcio, prodotto dalla reazione di idratazione del cemento, sia dell'anidride carbonica, entrambi disciolti in acqua; il primo può dissolversi in acqua all'interno della fessura e precipitare sulla superficie, rilasciando cationi di calcio  $Ca^{2+}$ , secondo la seguente reazione chimica:



Inoltre, la presenza di anidride carbonica in acqua porta alla formazione di anioni carbonato  $\text{CO}_3^{2-}$  secondo quanto segue:



Così, la formazione di un ambiente nel quale sono presenti cationi  $\text{Ca}^{2+}$  e anioni  $\text{CO}_3^{2-}$ , entrambi disciolti in acqua, risulta una condizione necessaria che favorisce la formazione di carbonato di calcio, come riportato di seguito, il quale, precipitando lungo le superfici della fessura, ne promuove la chiusura:



Molti studi hanno posto l'attenzione sul determinare quale tra questi meccanismi influisca maggiormente sulla chiusura di una fessura. Edvardsen [7], [10], come molti altri ricercatori, sostiene che la formazione di carbonato di calcio sia la causa più probabile ed efficace sostenuta dal fatto che, in seguito alla reazione chimica, è facilmente osservabile la presenza di cristalli insolubili, depositatisi sulle superfici esterne della fessura, che appaiono come eruzioni bianche. Tuttavia la probabilità che si verifichi un meccanismo rispetto ad un altro dipende principalmente dall'età del calcestruzzo al momento della fessurazione. Infatti, anche Neville [2], afferma che nei calcestruzzi molto giovani il *self-healing* è dovuto principalmente all'idratazione delle molteplici particelle, non ancora idratatesi, ovvero al cosiddetto fenomeno dell'idratazione continuata. In quelli più datati, invece, la precipitazione di carbonato di calcio è la causa più riscontrabile.

Sempre Ter Heide [9] sostiene che vi sono delle condizioni necessarie da soddisfare per rendere maggiormente efficace, o massimizzare, il fenomeno del *self-healing*. Tali condizioni sono:

#### 1 Presenza di acqua

La presenza di acqua è fondamentale per tutti i meccanismi sopra citati, infatti è noto come l'entità di tale fenomeno diminuisca al decrescere dell'umidità relativa, in particolare al di sotto di un valore di umidità del 95%. Anche Edvardsen [7] afferma che, senza la presenza di acqua, il fenomeno di auto guarigione non si verifica in quanto l'acqua è un componente necessario affinché avvenga la reazione chimica.

#### 2 Ampiezza della fessura

L'auto guarigione si verifica solo in presenza di fessure di piccole entità. E' stato constatato che, con il passare del tempo, è possibile chiudere fessure anche di dimensioni maggiori, ma che, oltrepassato un certo limite, il fenomeno non continua a riproporsi. Attualmente, tale limite non è ancora stato determinato in quanto molti studi utilizzano tecniche e metodologie sperimentali differenti tra di loro, lasciando così il tema ancora irrisolto. Dai diversi autori sono state analizzate fessure con ampiezze che variano dai 10  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$ , dimostrando che solo quelle con ampiezze minori possono beneficiare della completa richiusura.

### 3 Pressione dell'acqua

Quando il fluido attraversa la fessura con una velocità troppo elevata, il fenomeno non può verificarsi poiché non vi è tempo sufficiente per la formazione dei cristalli.

### 4 Il liquido non può portare ad una reazione di filtrazione o dissoluzione

Un liquido con queste proprietà può influire sui prodotti di cura formati all'interno della fessura.

### 5 Stabilità della fessura

La fessura deve essere stabile. In caso contrario se risultasse in condizione dinamica implicherebbe una variazione di ampiezza, e ciò porterebbe ad un danneggiamento dei prodotti creati a seguito della reazione chimica.

Edvardsen [7], [10] afferma che la formazione di carbonato di calcio in una fessura, affiancata alla conseguente crescita di cristalli insolubili, dipende dalla temperatura, dal pH dell'acqua, dalla pressione parziale dell'anidride carbonica e dalla concentrazione di ioni di calcio. Infatti, un aumento di temperatura e di pH dell'acqua e una diminuzione della pressione parziale di CO<sub>2</sub> nella soluzione acquosa, potrebbe favorire la precipitazione di carbonato di calcio. L'autore ha effettuato diversi studi relativi ad una serie di prove di permeabilità su provini in calcestruzzo, con la finalità di studiare ed analizzare gli effetti del *self-healing* in fessure di varie ampiezze e soggette a differenti pressioni dell'acqua. Da ciò, e dai risultati ottenuti, sostiene che la formazione di carbonato di calcio è caratterizzata da due fasi, come è possibile osservare in figura 2.5:

Selbstheilungsrate  $q_S(t)$  [ $l/h^2 \cdot m$ ]

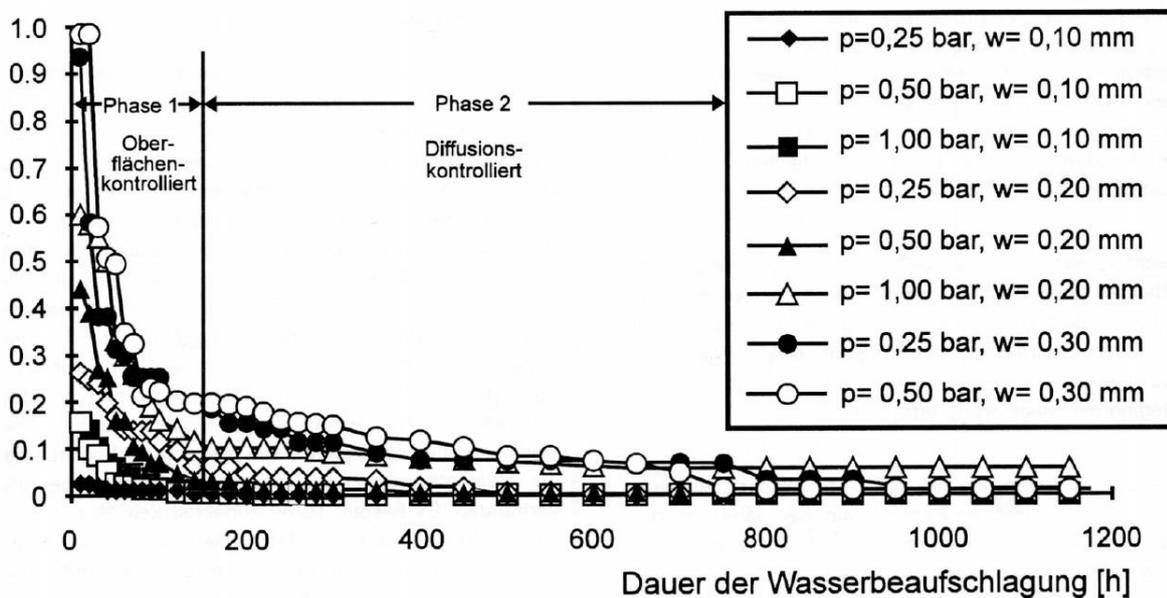


Figura 2-5: Healing rate o riduzione del flusso  $q_S(t)$  per differenti ampiezze di fessura  $w$  e gradiente di pressione  $p$ . [7]

la prima, detta fase iniziale, caratterizzata da una forte riduzione del flusso d'acqua in un tempo corrispondente a circa 7 giorni e dominata dalla quantità di ioni di calcio presenti sulla superficie della fessura; nella seconda, invece, il flusso decresce meno rapidamente ed è

caratterizzato da un comportamento asintotico, assumendo valori piccoli e quasi costanti. Questa fase finale dipende dalla diffusione di ioni di calcio all’interno della matrice del calcestruzzo. Secondo i risultati ottenuti, l’autore conclude che il fenomeno del *self-healing* risulta più efficace nei primi 3-5 giorni dall’esposizione in acqua ed inoltre la precipitazione di carbonato di calcio dipende principalmente dalla dimensione della fessura e dalla pressione dell’acqua, e non dalla composizione del calcestruzzo e durezza dell’acqua. Anche Neville [2] afferma che all’aumentare della pressione dell’acqua si riduce progressivamente la capacità auto sanante. Inoltre egli sostiene che, nei calcestruzzi giovani nei quali è presente una maggiore quantità di particelle non idratate, le fessure di ampiezza pari a circa 0,1 mm sono in grado di richiudersi dopo solo pochi giorni, al contrario di quelle di maggiori dimensioni che richiedono generalmente più tempo.

Molti ricercatori hanno concentrato l’attenzione sul trovare metodologie e tecniche differenti, mediante l’aggiunta di prodotti specifici o la ricerca di un mix design idoneo, avendo come obiettivo quello di promuovere e potenziare il processo di auto riparazione autogena. Tale finalità può essere quindi ottenuta attraverso:

- L’uso di calcestruzzi con basso rapporto acqua/cemento, con l’obiettivo di aumentare la presenza di particelle di cemento che non riescono ad idratare per mancanza di acqua, favorendo così le reazioni di idratazione ritardata che caratterizzano i processi di *self-healing*. A tal scopo, questo rapporto deve scendere fino a valori che si aggirano intorno a 0,4, al contrario di quelli utilizzati nei calcestruzzi ordinari che sono pari a circa 0,6-0,65. Tuttavia Van Tittelboom *et al.* [11] affermano che aumentare l’uso di cemento per migliorare i processi di riparazione autogena non sarebbe vantaggioso, in quanto porterebbe ad un incremento del costo del calcestruzzo.
- L’aggiunta di materiali reattivi come ceneri volanti, fumo di silice e scorie d’altoforno con l’obiettivo di riempire le fessure con la formazione di silicati idrati di calcio (C-S-H) formati a seguito della reazione con l’idrossido di calcio.
- Il controllo dell’ampiezza delle fessure mediante armatura o fibre, generalmente in acciaio o polimeriche, che conferiscono al materiale un comportamento duttile. La presenza delle fibre permette l’apertura di fessure di piccola entità, promuovendo così la formazione di prodotti di guarigione autogeni.

Negli ultimi 50 anni, in seguito alla richiesta e bisogno sempre più frequente di materiali con elevate prestazioni, è nata la necessità di sperimentare ed utilizzare calcestruzzi con un basso rapporto acqua/cemento, al fine di garantire una maggiore resistenza in termini meccanici. Oltre a questa proprietà, la riduzione della quantità di acqua nell’impasto e/o l’aumento del dosaggio di cemento, comporta una diminuzione della cosiddetta porosità capillare della matrice cementizia e consente quindi di ottenere un materiale più compatto. Tutto ciò si traduce in una maggiore durabilità del prodotto finale e, di conseguenza, in una minore permeabilità agli agenti aggressivi. Questa particolare tecnica di mix design, però, apporta un beneficio anche in termini di auto guarigione del calcestruzzo, poiché, come descritto in precedenza, si tende a sfruttare il processo di idratazione ritardata, promossa dalla presenza di un’alta percentuale di particelle non idratatesi. Alcuni autori, oltre ad utilizzare calcestruzzi

con un rapporto acqua/cemento ridotto rispetto ai calcestruzzi normalmente utilizzati, adottano tecniche molto simili a quelle utilizzate per la stagionatura accelerata, con l'obiettivo di migliorare gli effetti della sanazione autogena. Molto spesso, le prove accelerate, eseguite con particolari condizioni, servono a controllare la qualità del prodotto ed ottenere, in poche ore o al massimo un giorno, una previsione dei valori di resistenza attesi a 28 giorni. Le varie modalità e condizioni di esecuzione vengono prescritte nelle normative di ciascun paese, anche se attualmente in Italia sta diventando sempre più frequente l'uso della normativa Americana ASTM C 684. Questa norma fa riferimento a diversi metodi utilizzabili come, ad esempio, l'immersione di provini cilindrici in acqua calda a circa 35°C o bollente. L'aumento di temperatura, infatti, permette di accelerare il processo di idratazione ed incrementare la resistenza alle brevi stagionature; a seconda del trattamento si può arrivare ad ottenere, solo dopo un giorno, circa il 60% delle resistenze a 28 giorni di un calcestruzzo stagionato in ambiente umido a temperatura normale. A temperature elevate, riferendosi ad un intervallo compreso tra i 50 e 80°C, la resistenza del calcestruzzo diminuisce ad età più avanzata: questa riduzione viene spiegata con il fatto che i prodotti di idratazione tendono ad incapsulare i prodotti non ancora idratati formando dei gusci attorno alle singole particelle di cemento, impedendo così un'ulteriore idratazione.

Noto perciò che l'aumento di temperatura influisce sulla velocità di idratazione del cemento, Reinhardt e Jooss [12] nel 2003 hanno studiato come la variazione di temperatura e l'ampiezza della fessura possano condizionare la permeabilità del materiale e la sua capacità auto sanante. Utilizzando un calcestruzzo ad alta prestazione, con un rapporto acqua/cemento pari a 0,37, gli autori hanno analizzato fessure con tre diverse ampiezze pari a 0,05 mm, 0,1 mm e 0,15 mm, sottoponendo i campioni cilindrici ad un gradiente di pressione pari a 1 MPa/m e a tre livelli di temperatura: 20, 50 e 80°C.

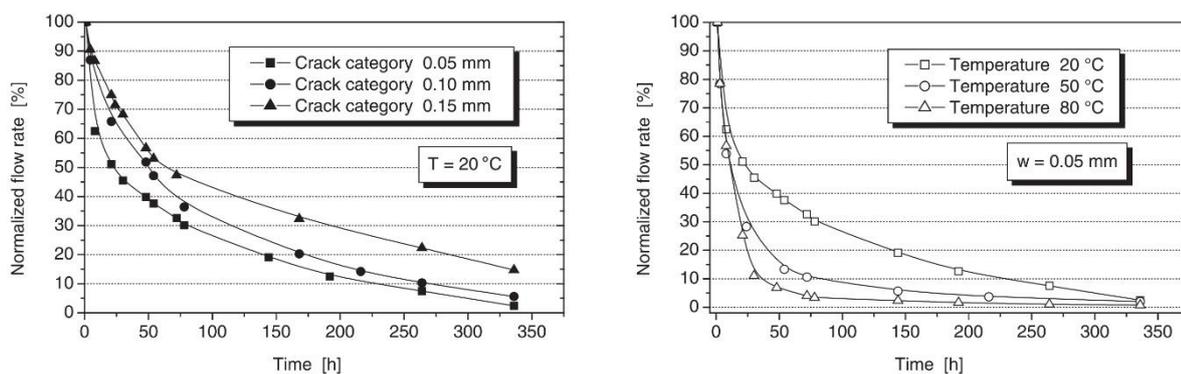


Figura 2-6: A sinistra, riduzione del flusso normalizzato dovuto alla sanazione del calcestruzzo ad alta resistenza con differenti ampiezze di fessura. A destra, riduzione del flusso normalizzato a diverse temperature con una determinata ampiezza di fessura. [12]

I risultati che sono stati ottenuti, riportati in figura 2.6, mostrano come la riduzione del flusso dipenda dalla temperatura e dalle dimensioni della fessura. Si può inoltre concludere che le

fessure con ampiezza minore tendono a “guarire” più rapidamente delle altre e che l’aumento della temperatura favorisce il processo.

Granger *et al.* [13] hanno effettuato uno studio per comprendere l’effetto della sanazione autogena sul recupero di resistenza meccanica di un calcestruzzo ad alta resistenza, con un rapporto acqua/cemento particolarmente basso, ossia pari a 0,2. L’utilizzo di questo rapporto comporta la presenza di una buona percentuale di particelle di cemento non idratate che si aggira intorno al 50-60%. Il danno sui provini prismatici viene generato mediante una prova a flessione su tre punti, arrivando alla fase post-picco della curva di resistenza e scaricando successivamente al fine di ottenere un’ampiezza di fessura tra 5  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ . Dopo il processo di fessurazione, i provini vengono conservati in acqua o aria in un periodo che va da 1 a 10 settimane, e in seguito provati nuovamente fino alla totale rottura così da poter descrivere il comportamento meccanico al termine della cura. È stata effettuata inoltre una misurazione della frequenza di risonanza flessionale per studiare l’evoluzione del processo, partendo dalla fase di fessurazione fino alla guarigione del materiale.

I risultati ottenuti dalle prove meccaniche sono stati rappresentati attraverso grafici nei quali è stato riportato il carico applicato in funzione dell’apertura di fessura. La figura 2.7 mostra il tipico comportamento meccanico di tre campioni conservati in aria per una durata di tre settimane.

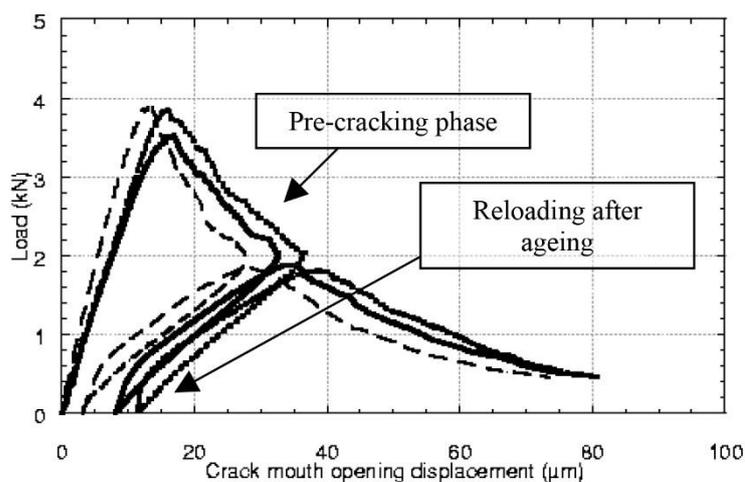


Figura 2-7: Comportamento meccanico dei 3 provini conservati in aria durante 3 settimane dopo la fessurazione. [13]

In figura 2.8, invece, è riportato il comportamento meccanico di provini sottoposti alle due diverse condizioni di cura, aria e acqua, per una durata di 1, 3, 6 settimane. Risulta evidente come i campioni conservati in acqua hanno ottenuto un grado di guarigione maggiore, presentando un notevole recupero di rigidità, rispetto a quelli esposti all’aria nei quali non è stato registrato nessun guadagno. Gli autori sostengono che questo recupero dipende principalmente dal tempo di conservazione in acqua. Infatti, in figura 2.9 viene mostrato un grafico nel quale è visibile un incremento del recupero di rigidità in funzione del tempo di cura in acqua. I campioni “curati” in acqua per un periodo di 10 settimane hanno ottenuto un

recupero totale della rigidità, presentando valori analoghi a quelli iniziali, e una completa richiusura delle fessure.

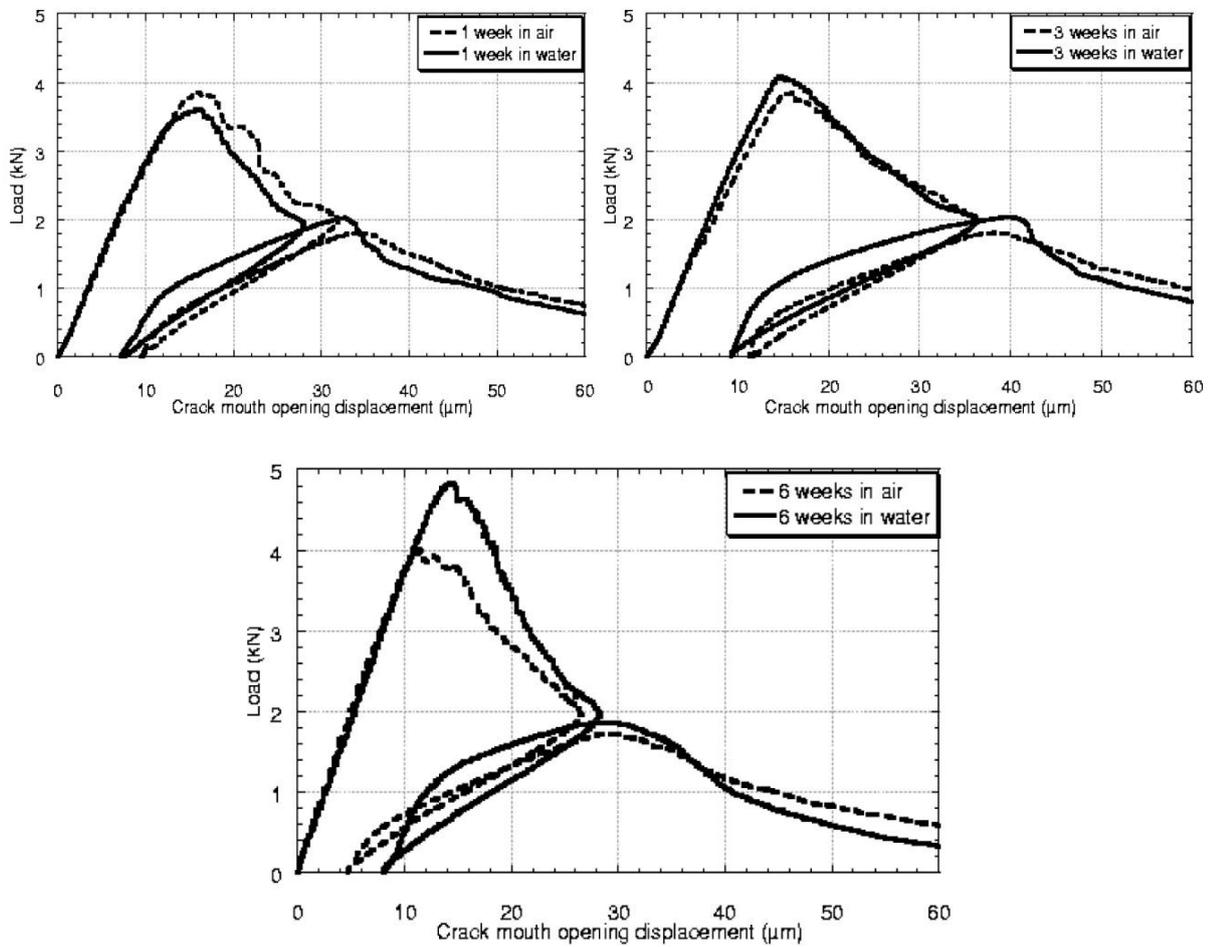


Figura 2-8 Confronto tra il comportamento meccanico dei provini in differenti condizioni di cura, aria e acqua, e durata rispettivamente 1, 3, 6 settimane. [13]

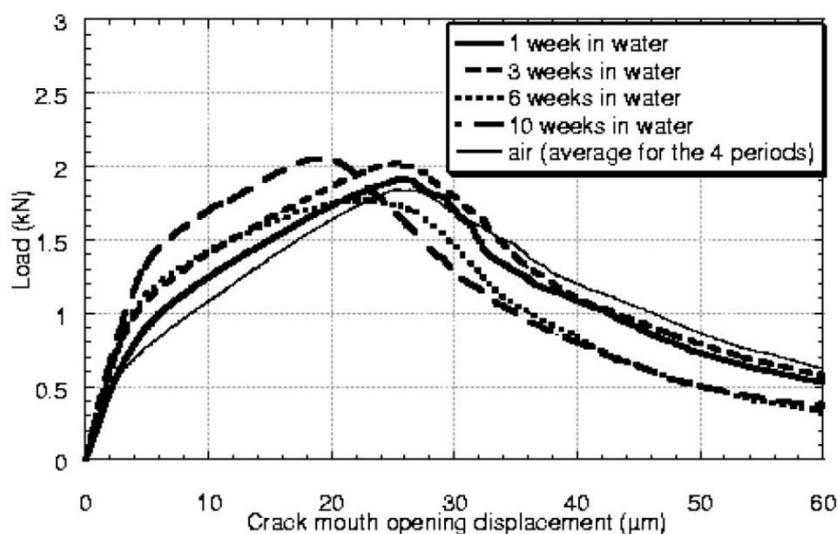


Figura 2-9: Confronto del comportamento, successivo alla ricarica, dei provini "guariti" per differenti tempi di cura, comparandoli a quelli che non hanno mostrato effetti di sanazione. [13]

Granger *et al.* [13] hanno affermato che il *self-healing* sulla superficie della fessura è dovuto principalmente all'idratazione delle particelle di cemento non idratatesi e che la rigidità dei nuovi cristalli formati risulta essere analoga a quella della matrice cementizia originale. Dai risultati ottenuti, si può altresì concludere che sono importanti la conservazione e il tempo di cura in acqua poiché è stato osservato che i provini tendono a recuperare la loro rigidità iniziale in funzione del tempo di conservazione, ma non si notano progressi relativi alla resistenza a flessione dovuta al *self-healing*.

Nei paragrafi seguenti vengono riportati gli approcci e le tecniche utilizzate per favorire il processo di *self-healing* autogeno.

### 2.3.1. Utilizzo di aggiunte reattive

L'uso di materiali reattivi come ceneri volanti (fly ash – FA), loppe (blast furnace slags – BFS) e fumi di silice (silica fume – SF) ha la funzione di favorire la capacità di riparazione autogena nel calcestruzzo, mediante l'idratazione tardiva delle particelle di cui sono composti. Infatti, l'idea è proprio quella di sfruttare la lenta idratazione, ovvero l'attività pozzolanica, di questi prodotti al fine di aumentare la probabilità che, al momento della formazione di una fessura, vi siano particelle che, in presenza di acqua, siano in grado di reagire e formare cristalli di idrosilicato o carbonato di calcio, capaci di sanare l'apertura.

Van Tittelboom *et al.* [11] sostengono che l'aggiunta di scorie d'altoforno e ceneri volanti nella matrice cementizia possa favorire il processo di idratazione tardiva delle particelle di cemento. Al tempo stesso questi materiali, reagendo durante il processo di idratazione, consumano idrossido di calcio e riducono così la probabilità che si formi carbonato di calcio. Il loro studio si basa su un programma sperimentale nel quale vengono analizzate diverse miscele di

calcestruzzo, con un rapporto acqua/cemento costante pari a 0,4, e suddivise in cinque categorie in funzione della loro composizione:

- Miscela di controllo;
- Miscela contenenti il 50% e 85% di scorie d'altoforno (in peso rispetto al cemento), denominate rispettivamente 50 BFS e 85 BFS;
- Miscela contenenti il 30% e 50% di ceneri volanti (in peso rispetto al cemento), denominate rispettivamente 30 FA e 50 FA.

Inoltre è stata prevista un'ulteriore miscela di controllo, caratterizzata da un diverso rapporto acqua/cemento pari a 0,5, con l'obiettivo di verificare come la quantità di particelle di cemento o di acqua, presenti nell'impasto, possa influire sulla capacità auto sanante del materiale. Per ogni miscela, sono stati realizzati campioni prismatici, di dimensioni 10x40x160 mm, per esaminare visivamente il processo di guarigione delle fessure e determinarne il recupero delle proprietà meccaniche. Dopo 28 giorni di conservazione in camera umida ad una temperatura di 20°C e umidità relativa maggiore del 95%, i campioni sono stati fessurati mediante una prova a flessione su tre punti e l'ampiezza delle fessure valutata attraverso l'uso di strumenti ottici. In seguito, i provini sono stati immersi completamente in acqua per una durata di sei settimane, eseguendo test intermedi durante il periodo di cura a 1, 4, 7, 14 e 21 giorni per monitorare la progressiva guarigione delle fessure.

A seconda della composizione delle miscele, varia la quantità di particelle non idratate e, di conseguenza, la produzione di calore causata dalla reazione esotermica di idratazione del cemento. Infatti, dopo alcune ore di cura, i campioni di controllo hanno mostrato una maggiore produzione di calore, dovuta alla presenza di particelle di cemento non idratate che reagiscono più rapidamente a contatto con l'acqua; mentre per quelli contenenti scorie d'altoforno o ceneri volanti il calore prodotto è stato inferiore. Quando si confrontano invece i provini di controllo con differente rapporto acqua/cemento, risulta evidente come un basso valore di tale rapporto equivale ad una maggiore produzione di calore per la presenza di una più alta percentuale di particelle non idratate, aumentando così la capacità di auto guarigione delle fessure.

Per quanto riguarda la formazione dei cristalli successiva al periodo di cura, è stato possibile osservare solo quelli presenti sulle superfici dei campioni. Per la maggior parte di essi, caratterizzati da ampiezze di fessura con valori inferiori a 100  $\mu\text{m}$ , è stato riscontrato che la guarigione completa è avvenuta solo dopo un giorno di cura, mentre per quelle di dimensioni maggiori ma sempre con valori inferiori a 200  $\mu\text{m}$ , la chiusura è stata più graduale durante il periodo di cura di 42 giorni. Le misurazioni effettuate però hanno confermato quanto detto da altri autori, ossia che all'aumentare delle dimensioni delle fessure diminuisce la probabilità che esse si possano richiudere: infatti, fessure comprese tra i 200-250  $\mu\text{m}$  non sono state capaci di sigillarsi completamente durante tutto il periodo di immersione in acqua.

Per confrontare la capacità auto sanante di ogni miscela, è stato definito un indice di auto richiusura delle fessure  $\beta(t)$  in funzione dei giorni di cura, il quale ammette valori compresi tra

0 e 1 in funzione del livello di guarigione ottenuto. L’indice è stato calcolato con la seguente relazione:

$$\beta(t) = 1 - \frac{A(t)}{A_i}$$

dove:

- $A(t)$  è l’area sottesa dalla polilinea che rappresenta l’apertura di fessura al tempo  $t$  di cura [ $\mu\text{m}^2$ ];
- $A_i$  è l’area sottesa dalla polilinea che rappresenta l’apertura di fessura iniziale [ $\mu\text{m}^2$ ].

Nel grafico, riportato in figura 2.10, sono stati suddivisi i campioni in due gruppi principali in funzione dell’ampiezza di fessura: a sinistra, troviamo quelle comprese tra 0 e 125  $\mu\text{m}$ , mentre a destra quelle tra 125 e 250  $\mu\text{m}$ . Dai grafici riportati risulta evidente come il calcestruzzo di controllo raggiunga un indice di auto chiusura quasi sempre maggiore rispetto alle altre tipologie. Si evince, da questi risultati, che l’utilizzo di questa tipologia di materiali reattivi comprometta in realtà la formazione di carbonato di calcio, rendendo meno efficace il meccanismo di *self-healing*. Ciò può essere causato dalla natura delle reazioni pozzolaniche proprie di queste aggiunte, le quali si attivano solo a seguito di una significativa idratazione del cemento poiché la presenza di idrossido di calcio è necessaria per la loro attivazione. Infatti, dato che la precipitazione di carbonato di calcio è la causa più probabile per la richiusura delle fessure, non è conveniente sostituire parte del cemento con altri materiali reattivi, i quali consumano idrossido di calcio durante la loro reazione di idratazione, riducendo così la formazione dei cristalli.

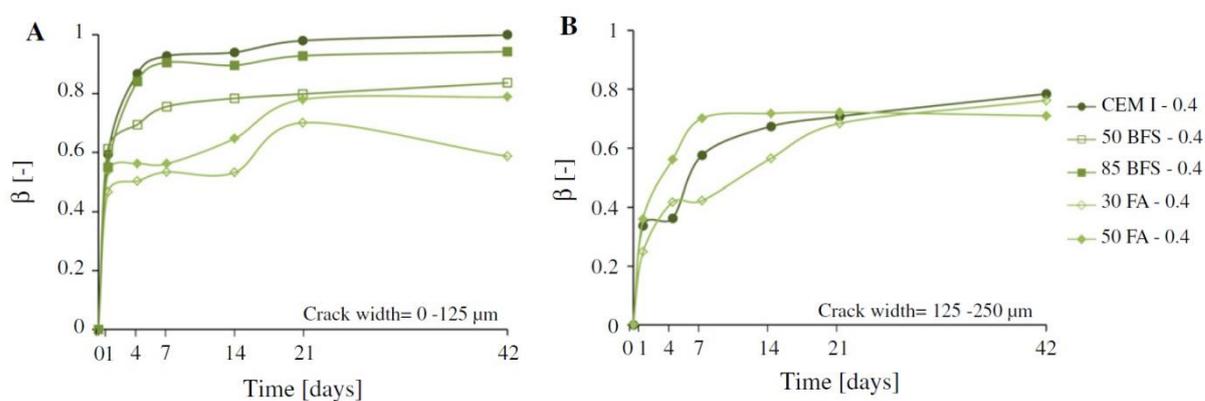


Figura 2-10: Indice di auto-chiusura delle fessure, per ogni categoria di miscela, in relazione al tempo di cura e all’apertura iniziale di fessura. (A) intervallo tra 0-125  $\mu\text{m}$ , (B) intervallo tra 125-250  $\mu\text{m}$ . [11]

Inoltre nella figura 2.10 A, è possibile notare come nella prima settimana di cura la formazione dei cristalli risulta più veloce, trovandosi in accordo con quanto affermato da Edvardsen [7], [10], la quale sostiene che il meccanismo di *self-healing* risulta più efficace nei primi 3-5 giorni di immersione in acqua. A destra, invece, risulta evidente come, nell’intervallo tra 125-250

$\mu\text{m}$ , i valori di  $\beta$  risultano inferiori rispetto al grafico a sinistra, confermando quanto affermato in altri studi riguardo la difficoltà di chiudere fessure di ampiezza maggiore.

Per valutare il recupero di resistenza, dopo 71 giorni di cura i provini prismatici sono stati sottoposti nuovamente alla prova di flessione su tre punti. Non è stata riscontrata nessuna differenza significativa tra le diverse miscele studiate. Il recupero però è presente con valori intorno al 20%, dovuto principalmente alla idratazione continuata del cemento piuttosto che alla precipitazione di carbonato di calcio. Inoltre è stato osservato che la resistenza del materiale formatosi all'interno delle fessure sia molto inferiore rispetto a quella iniziale del composto cementizio.

Utilizzando un calcestruzzo auto-compattante con un altissimo contenuto di ceneri volanti (High Volume Fly Ash Self Consolidated Concrete – HVFA-SCC), Sahmaran *et al.* [14] hanno studiato il recupero di resistenza meccanica dovuto alla richiusura delle fessure. Sono state confezionate tre diverse miscele in cui è stato mantenuto costante il rapporto acqua/cemento, pari a 0,35, e la massa totale di legante (cemento portland + ceneri volanti): la prima di controllo e le ultime due contenenti rispettivamente il 35% e il 55% di ceneri volanti. I campioni cilindrici, realizzati per verificare la resistenza ed il suo eventuale recupero, sono stati immersi in acqua satura di calce ad una temperatura di circa 23°C per i successivi 28 giorni. Al termine di questo periodo di stagionatura, i provini di ogni miscela sono stati suddivisi in due categorie: alcuni, sono stati sottoposti alla prova di compressione per valutare l'influenza delle aggiunte sulla resistenza, mentre i rimanenti sono stati precaricati fino a valori di danno corrispondenti al 70% e al 90% del carico massimo a compressione a 28 giorni e, una volta fessurati, sono stati riposti in immersione per una durata di 30 giorni.

I risultati hanno mostrato che l'utilizzo di un'alta quantità di ceneri volanti provoca una diminuzione della resistenza a compressione, soprattutto in età giovane, ma generalmente migliora le caratteristiche di permeabilità del materiale. Tali risultati confermano quanto affermato in studi precedenti, poiché l'uso di queste aggiunte permette di ottenere un impasto più denso, con minore resistenza in calcestruzzi giovani, minore porosità e microfessurazione di minore entità nelle zone di transizione fra pasta cementizia e aggregati. Tuttavia, un aumento del contenuto di ceneri volanti, dal 35% al 55%, non ha mostrato alcun miglioramento o effetto significativo sulla permeabilità. L'effetto della "guarigione" delle fessure è evidente dal confronto tra la perdita di resistenza al momento della prefessurazione e quella successiva al periodo di cura. Tale perdita è stata valutata come rapporto tra il valore della resistenza, a 28 giorni, dei provini caricati fino al 70% o al 90% con quelli di controllo non danneggiati. È stato osservato che i provini, caricati fino al 90% della resistenza a compressione, sono passati da una perdita del 27% ad una del 7% rispetto al valore dei campioni vergini a 28 giorni. Al contrario per il calcestruzzo ordinario, la perdita di resistenza iniziale, al momento della prefessurazione, era del 19% arrivando ad un valore del 13% dopo un mese di cura. Il recupero della resistenza a compressione e della permeabilità dei campioni HVFA-SCC è dovuto al progressivo riempimento delle fessure con il nuovo gel C-S-H, risultato della reazione pozzolanica.

### 2.3.2. Engineered Cementitious Concrete

I composti cementizi ingegnerizzati, chiamati ECC (Engineered Cementitious Concrete), sono una particolare classe di composti cementizi rinforzati con un medio contenuto di fibre corte (circa il 2% nella frazione di volume dell'impasto), generalmente in acciaio o polimeriche, e caratterizzati da una capacità di deformazione a trazione che va dal 3% al 7%, rispetto allo 0,1-0,2% del cemento Portland ordinario. Il loro comportamento è molto simile a quello del metallo duttile, ovvero sono capaci di portare carichi costanti o gradualmente crescenti dopo la prima fessurazione mentre sono sottoposti ad ulteriori deformazioni (strain hardening), e anche per questo motivo vengono chiamati calcestruzzi piegabili (bendable concretes). Le fibre utilizzate sono pensate per lavorare con la matrice cementizia al fine di limitare la rottura fragile localizzata, garantendo una distribuzione più uniforme delle microfessure. Infatti la presenza delle fibre permette l'apertura di molteplici fessure di dimensioni ridotte (intorno a 60  $\mu\text{m}$ ), invece che poche di ampiezza elevata. La proprietà di limitare l'ampiezza delle fessure favorisce il fenomeno del *self-healing* poiché, in presenza di acqua, le particelle di cemento non ancora idratatesi reagiscono, sigillando completamente le fessure di piccola ampiezza, come affermato dagli studi precedentemente riportati. In figura 2.11 viene riportato un grafico con la curva tensione-deformazione-apertura di fessura tipica di un ECC.

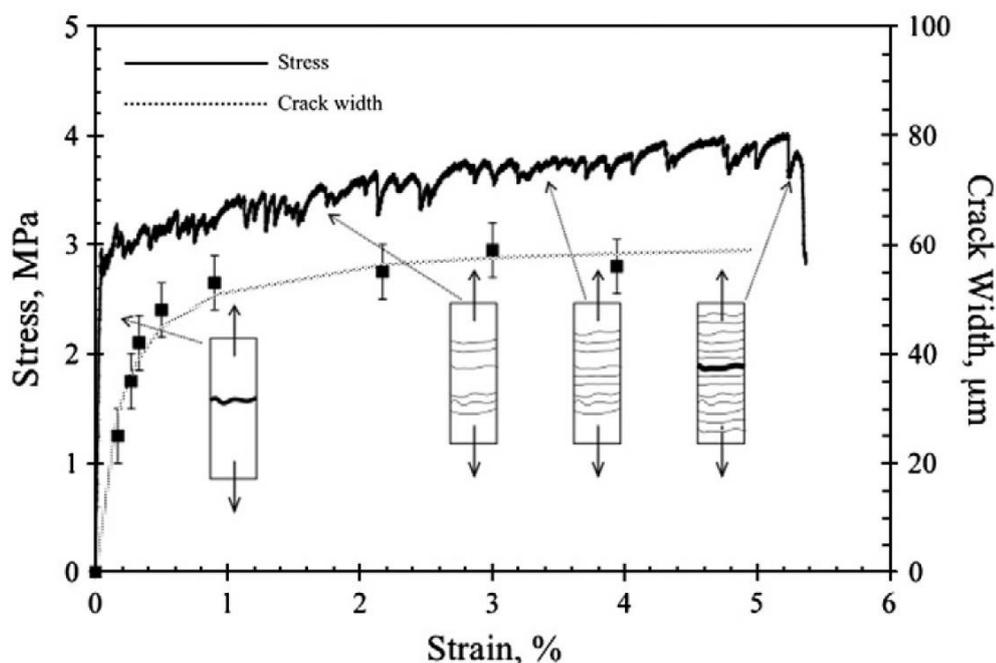


Figura 2-11: Curva tensione-deformazione-apertura di fessura di un ECC

Homma *et al.* [15] hanno studiato l'influenza di diverse tipologie di fibre sulle proprietà meccaniche e sulla morfologia delle fessure. Sono state utilizzate tre diverse miscele di calcestruzzo fibrorinforzato caratterizzate da tre differenti tipi di fibre: micro fibre di polietilene (micro polyethylene fibre - PE) (diametro = 12  $\mu\text{m}$ , lunghezza = 6 mm), fibre di acciaio (steel cord - SC) (diametro = 400  $\mu\text{m}$ , lunghezza = 32 mm) e un composito rinforzato con fibre miste (PE e SC), progettato per essere ad alte prestazioni.

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	187×10 <sup>4</sup>
FRCC(PE)				0.09	1.5	-	221×10 <sup>8</sup>
HFRCC				0.09	0.75	0.75	111×10 <sup>8</sup>

Figura 2-12: Mix design delle tre tipologie di FRCC studiate. [15]

In figura 2.12 vengono riportati i diversi dosaggi impiegati per la realizzazione dei calcestruzzi oggetto di studio. E' stata utilizzata una percentuale volumetrica pari a 1,5% per le fibre in polietilene, mentre una percentuale dello 0,75% per quelle in acciaio. Per il terzo tipo di calcestruzzo, rinforzato con entrambe le fibre, la percentuale è stata dello 0,75% per entrambe. Alle tre miscele è stato aggiunto il 15% di fumo di silice e utilizzato un rapporto acqua/cemento e inerti/cemento di 0,45, come mostrato nella figura soprastante.

I campioni prismatici sono stati prefessurati mediante prova a trazione uniassiale, e dopo aver effettuato la prova di permeabilità, sono stati immersi in acqua ad una temperatura di 20°C per 28 giorni. Sono state effettuate delle prove intermedie per controllare la graduale riduzione di permeabilità e dell'ampiezza delle fessure e, terminato il periodo di cura, i campioni sono stati sottoposti nuovamente alla prova di trazione uniassiale.

I risultati hanno mostrato che il processo di cristallizzazione risulta essere più rapido, in particolare nei primi 3 giorni di cura, nei campioni contenenti le fibre di polietilene e quindi quelli con la presenza di entrambe, permettendo la sigillatura completa di fessure di piccole entità. Al contrario nei restanti campioni con fibre di acciaio, il processo è caratterizzato da una evoluzione più lenta e da un'ampiezza delle fessure risultata invariata a causa della presenza di alcuni prodotti dovuti all'ossidazione delle fibre stesse. Nella figura 2.13, è evidente come i provini con le fibre di PE presentano un comportamento più efficace con la formazione di cristalli più robusti rispetto a quelli presenti sui campioni contenenti fibre SC.

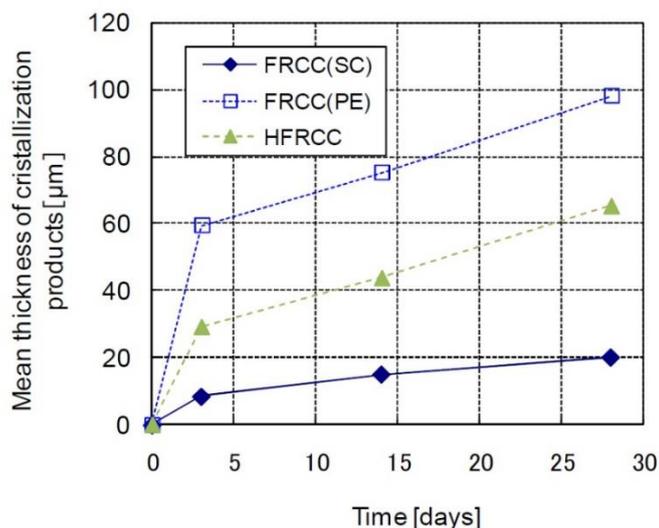


Figura 2-13: Dipendenza dello spessore medio dei prodotti di cristallizzazione con il tempo di cura. [15]

E' stata studiata, inoltre, la variazione di permeabilità in funzione del tempo di cura e della dimensione iniziale delle fessure. E' risultato che nei campioni con la presenza di fibre di polietilene, con fessure piccole pari a circa  $100 \mu\text{m}$ , si ha una riduzione consistente della permeabilità nei primi giorni di cura, poiché come detto precedentemente la formazione dei cristalli risulta essere più veloce nella fase iniziale. I campioni con fibre di acciaio hanno bisogno di un maggior tempo di cura affinché avvenga una diminuzione particolarmente evidente.

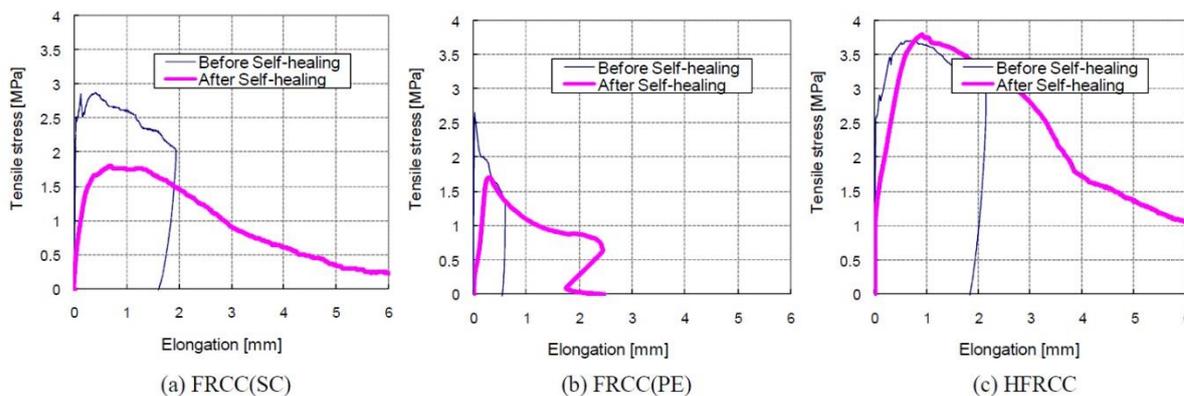


Figura 2-14: Confronto della resistenza a trazione prima e dopo 28 giorni di cura tra le diverse tipologie di campioni. [15]

La figura 2.14 riporta i risultati della prova di trazione uniassiale, effettuata nuovamente dopo 28 giorni, mostrando come i campioni con fibre polietileniche presentano un comportamento di tipo quasi fragile, dovuto principalmente alla lunghezza delle fibre stesse, circa di mezzo centimetro. Nel caso del calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio, il comportamento risulta essere meno fragile rispetto a quelli con fibre di polietilene, ed è caratterizzato da una resistenza inferiore ed una minore duttilità rispetto ai campioni in calcestruzzo ad alte prestazioni. Questi ultimi hanno mostrato una maggiore resistenza e duttilità, risultando

complessivamente migliori, grazie alla sinergia delle due tipologie di fibre, di diverse lunghezze, in grado di esercitare un effetto di cucitura su fessure di differenti ampiezze.

Yang *et al.* [16] invece nel 2011 hanno investigato come l'esposizione a diverse condizioni ambientali possa influire sul *self-healing*, in termini di recupero della resistenza meccanica, utilizzando un calcestruzzo rinforzato con fibre in poli-vinil-alcool (PVA), con una percentuale volumetrica del 2%, e contenente ceneri volanti (FA). All'età di tre giorni, i campioni prismatici sono stati prefessurati mediante una prova a trazione diretta con differenti livelli di deformazione, rispettivamente pari a 0,3%, 0,5%, 1%, 2% e 3%, ed esposti successivamente a cinque diversi ambienti di cura:

- Cicli di 48 ore in cui i provini sono stati immersi in acqua per un giorno e, in quello seguente, lasciati asciugare ad una temperatura di circa 20°C e umidità relativa 50%;
- Cicli di 48 ore in cui i campioni sono stati immersi in acqua per 24 ore, e dopo essere stati posti ad asciugare in un ambiente con una temperatura di 55°C, per le successive 22 ore, sono stati raffreddati per due ore con aria a temperatura di 20°C. L'elevata temperatura permette di accelerare la reazione delle particelle non ancora idratate e delle ceneri volanti, migliorando il legame tra le fibre e la matrice cementizia;
- Cicli di 48 ore in cui i campioni sono stati conservati, per il primo giorno, in camera umida con il 90% di umidità relativa e una temperatura di 20°C e in seguito posti in un ambiente con 20°C e 50% U.R.;
- Immersione in acqua a 20°C per il tempo ritenuto necessario;
- Esposizione diretta all'aria in ambiente con 20°C e 50% U.R., per il tempo ritenuto necessario.

Al termine del periodo di cura, è stato utilizzato la frequenza di risonanza per misurare il grado di guarigione delle fessure, prendendo un valore di 800 Hz come frequenza di riferimento comprovata nei campioni di controllo, non fessurati. Nella figura 2.15 sono stati riportati i grafici inerenti agli ambienti di cura che hanno mostrato un recupero significativo della frequenza.

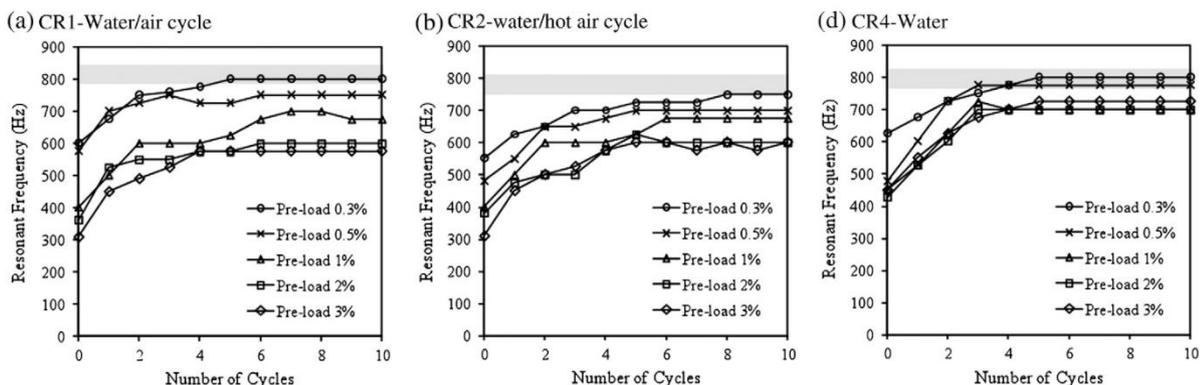


Figura 2-15: Variazione della frequenza di risonanza in funzione del numero di cicli. Estratto dei soli campioni a stretto contatto con acqua. [16]

E’ possibile osservare, dai grafici riportati, che i campioni conservati a stretto contatto con acqua raggiungono valori di frequenza che vanno dal 62% al 96% di quelli considerati vergini, ovvero non fessurati. Inoltre è evidente come la sanazione autogena si manifesti soprattutto dopo i primi 4-5 cicli, ma superati i dieci cicli, la curva si stabilizza assestandosi su un valore costante. Come già dimostrato negli studi citati in precedenza, la presenza di acqua è sempre uno dei fattori fondamentali poiché essa favorisce la idratazione continuata delle particelle di cemento non idratate.

Inoltre, un altro obiettivo di questa ricerca è stato quello di confrontare le caratteristiche di *self-healing* di campioni con differenti età di prefessurazione, rispettivamente a tre giorni e a sei mesi, e sottoposti al medesimo ambiente di cura. Risulta ben evidente come, nella figura sottostante 2.16, i provini danneggiati in età matura abbiamo mostrato un maggior recupero della rigidezza. Gli autori sostengono che questo comportamento derivi dalla tipologia di fessura generatesi al momento della prefessurazione. Infatti, generalmente, in età giovane il calcestruzzo tende a sviluppare un minor numero di fessure di dimensioni mediamente maggiore, rendendo più difficoltosa la loro sigillatura (figura 2.16).

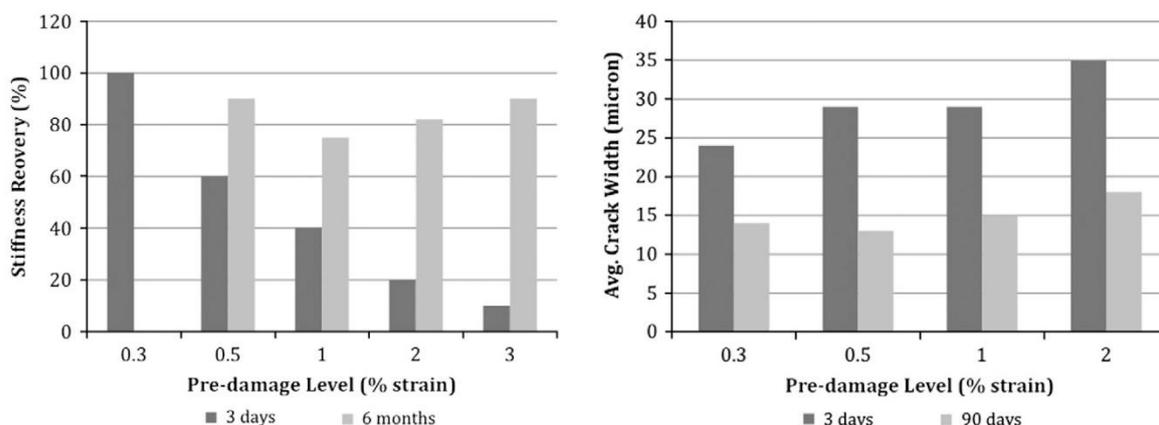


Figura 2-16: A sinistra, recupero della rigidezza e, a destra, ampiezza media delle fessure dei campioni soggetti a prefessurazione a 3 giorni e a 6 mesi. [16]

Il calcestruzzo maturo, invece, reagisce con un comportamento differente allo sforzo imposto dalla prova di trazione uniassiale, sviluppando un maggior numero di fessure ma mantenendo la dimensione media intorno a 15  $\mu\text{m}$ . Le fessure di maggior ampiezza dei campioni danneggiati in età giovane mostrano come il legame, tra le fibre in PVA e la matrice cementizia, sia ancora debole determinandone la rigidezza e il livello di apertura delle fessure.

Successivamente, Herbert e Li [17] hanno eseguito uno studio analogo utilizzando un calcestruzzo caratterizzato da un alto rapporto acqua/cemento, pari a 0,85, rinforzato con fibre PVA (con percentuale pari al 2% in volume) e contenente ceneri volanti. I campioni, all’età di sette giorni, sono stati prefessurati mediante prova a trazione uniassiale con due differenti livelli di deformazione, rispettivamente 0,5% e 1%, e in seguito esposti alle condizioni ambientali per un periodo di un anno (Settembre 2011 - Settembre 2012). Lo studio è stato eseguito in Michigan dove i provini sono stati sottoposti a differenti precipitazioni

ambientali proprie del sito, come piogge intense e nevicate, e ad un intervallo di temperatura compreso tra i  $-11,7^{\circ}\text{C}$  a  $+32,8^{\circ}\text{C}$ . Come parametri per misurare il recupero successivo al periodo di cura, sono stati utilizzati la frequenza di risonanza e la medesima prova uniassiale usata per la fase di prefessurazione.

Gli autori, in questo studio, hanno voluto perseguire due differenti obiettivi: quello di verificare il recupero di rigidità dopo un periodo di cura rispettivamente di 3, 6, 9 e 12 mesi, per comprendere i fattori che possano influenzare il fenomeno del *self-healing*, come ad esempio il tempo di cura o le condizioni climatiche, e, come secondo, quello di esaminare se si manifesta un evidente recupero di rigidità sottoponendo i campioni a diversi cicli di carico. Infatti, ogni tre mesi, i provini vengono ricaricati mediante la prova a trazione uniassiale al fine di osservare il recupero di rigidità al termine di ogni periodo di cura (tre mesi), e se i processi di sanazione sono in grado di verificarsi nuovamente.

Per quanto riguarda il primo obiettivo, si è potuto notare che i campioni esposti alle condizioni ambientali per diversi periodi hanno recuperato circa il 95-105% della frequenza di risonanza, rispetto a quella originale. Le misurazioni svolte nei diversi periodi di cura, hanno mostrato un andamento variabile della frequenza, compresa in un determinato intervallo di valori (95-105%), dovuto al verificarsi di grandi piogge intense che hanno compromesso la formazione dei prodotti di sanazione. Inoltre, dopo solo tre mesi di cura, i provini hanno mostrato un recupero di rigidità di circa il 62% rispetto al valore iniziale, arrivando ad ottenere un totale recupero dopo un periodo di sei mesi.

Nelle misurazione effettuate su campioni soggetti ai cicli di carico è risultato che, dopo il terzo ciclo, le specie caricate con un livello di deformazione di 0,5% e 1% hanno recuperato rispettivamente l'88% e 84% della frequenza di risonanza. Parlando di rigidità, è stato osservato che i campioni hanno raggiunto valori di recupero ben superiori rispetto a quelli di controllo non sottoposti al periodo di cura, non giungendo tuttavia al completo ripristino. Dai risultati ottenuti, gli autori [17] sostengono che la temperatura e la quantità di precipitazioni sono fattori che influenzano il fenomeno del *self-healing*, che sotto normali condizioni ambientali, risulta promettente. Inoltre, ha mostrato un ottimo comportamento nella condizione in cui i campioni sono stati sottoposti a cicli di carico eseguiti ad intervalli regolari e una buona capacità di formare, nel tempo e a seguito di un danno, nuovi prodotti di sanazione.

## 2.4. Self-Healing Ingegnerizzato

Come citato in precedenza, il termine di *self-healing* ingegnerizzato suole riferirsi a quel processo di riparazione che viene attivato grazie all'utilizzo di specifici additivi o componenti, collocati nella miscela, appositamente progettati con lo scopo di innescare tale fenomeno. L'idea principale è quella di porre nell'impasto degli elementi, siano dispersi o concentrati, che contengano agenti capaci di reagire con i componenti della matrice di calcestruzzo in

determinate condizioni o, semplicemente, elementi agenti in grado di sanare una fessura reagendo sotto determinate condizioni. Questi composti, quindi, si troveranno in uno stato dormiente fino al momento in cui, a seguito di un danno con conseguente formazione di fessure, vengono liberati in modo da riparare e sigillare le fessure generate, proteggendo la struttura dall’ingresso di agenti esterni dannosi e migliorando così la sua durabilità. Però, affinché vengano considerati prodotti sananti, devono possedere una sufficiente longevità per assicurare la loro attivazione al momento della fessurazione ed inoltre devono risultare compatibili con i componenti della matrice cementizia.

Nell’ambito del *self-healing* fanno parte anche i cosiddetti materiali intelligenti, definiti da Mihashi e Nishiwaki [5] come quei materiali caratterizzati dalle seguenti funzioni:

- Funzione di rilevamento: per localizzare e individuare la presenza di particolari modifiche, come ad esempio la formazione di fessure;
- Funzione di elaborazione: per giudicare quali azioni dovrebbero essere adottate e/o quando dovrebbero essere attuate;
- Funzione di attuazione: per eseguire gli interventi di riparazione pianificati in precedenza.

Con queste proprietà, un materiale intelligente può utilizzare gli stimoli percepiti dal mutevole ambiente esterno per elaborare informazioni relative alle condizioni del materiale stesso. Tali funzioni possono essere incorporate all’interno dei materiali cementizi, non necessariamente sotto forma del processo di guarigione naturale, come riportato in precedenza, ma anche mediante l’installazione di dispositivi progettati appositamente per la riparazione delle fessure. Questi dispositivi prevedono meccanismi di rilevamento, vasi tubolari collegati alla rete informatica e resine sintetiche che induriscono senza la presenza di acqua.

Negli ultimi anni, molti autori hanno investigato su innumerevoli tecniche di *self-healing* ingegnerizzato con l’obiettivo di migliorarne sempre più l’efficacia. Queste possono comprendere la semplice aggiunta di additivi nell’impasto capaci di reagire al momento della fessurazione, e di cristallizzare a contatto con l’acqua, oppure l’uso di prodotti sananti incapsulati posti all’interno della matrice o di batteri che, in presenza di fessure, sono in grado di reagire, formando cristalli di carbonato di calcio.

#### 2.4.1. Additivi cristallini e aggiunte espansive

Gli additivi cristallini e le aggiunte espansive sono materiali che vengono aggiunti direttamente nella fase di miscelazione e non hanno bisogno di essere protetti da sistemi tipo incapsulamento. Sono prodotti che sono in grado di reagire, non completamente, all’interno della matrice cementizia durante la fase di maturazione e mantengono una capacità latente di reagire a contatto con acqua o umidità.

#### 2.4.1.1. *Additivi cristallini*

Gli additivi cristallini sono formati principalmente di silice reattiva, cemento e vari catalizzatori cristallini e si presentano sotto forma di polveri molto fini, generalmente aggiunte a secco durante la fase di miscelazione. Sono prodotti caratterizzati da una natura fortemente idrofila e, in presenza di acqua, reagiscono con l'idrossido di calcio formando cristalli non solubili capaci di riempire i pori, interrompendo la connessione tra di essi e riducendo così la porosità della matrice cementizia. Ciò permette di ridurre la permeabilità del calcestruzzo al fine di assicurare una maggiore protezione dei composti in presenza di acqua e sostanze aggressive. In condizioni asciutte essi si trovano in uno stato dormiente, tuttavia sono in grado di reagire ogniqualvolta vengono esposti nuovamente all'acqua o umidità atmosferica. I fattori ambientali, come temperatura, densità del calcestruzzo e umidità interna ed esterna, hanno una forte influenza sul processo di sigillatura. In commercio gli additivi si presentano sotto forma di malte da applicare, in caso di riparazioni superficiali di elementi fessurati, oppure vengono aggiunti a secco durante la fase di miscelazione.

Suresh Chandra Pattanaik [18] ha proposto di applicare questi prodotti cristallini ad elementi danneggiati dalla presenza di fessure con l'obiettivo di ripararli e conferire all'elemento stesso una completa impermeabilità. L'autore sostiene che il processo di cristallizzazione dovuto alla presenza di questi materiali è composto da tre fasi principali:

1. Le microfibre di cristalli aghiformi, creati dalle reazioni di cristallizzazione e dispersi in un ambiente umido, iniziano a creare legami tra di loro formando una complessa rete tridimensionale di rinforzo, come mostrato in figura 2.17a, durante la fase di maturazione;
2. L'impermeabilità propria del calcestruzzo, gioca un ruolo importante poiché deriva da una semplice reazione con i sottoprodotti chimici naturali del processo di idratazione del cemento, come l'idrossido di calcio, vari ossidi minerali e particelle di cemento non idratate. Il risultato di questa reazione chimica è la formazione di miliardi di cristalli aghiformi insolubili che riempiono i pori capillari, i vuoti e le micro fessure del calcestruzzo (figura 2.17b);
3. Quando la superficie fessurata entra a contatto con acqua si verifica la diffusione dei prodotti chimici organici, favorendo la formazione di cristalli a maggiore profondità.

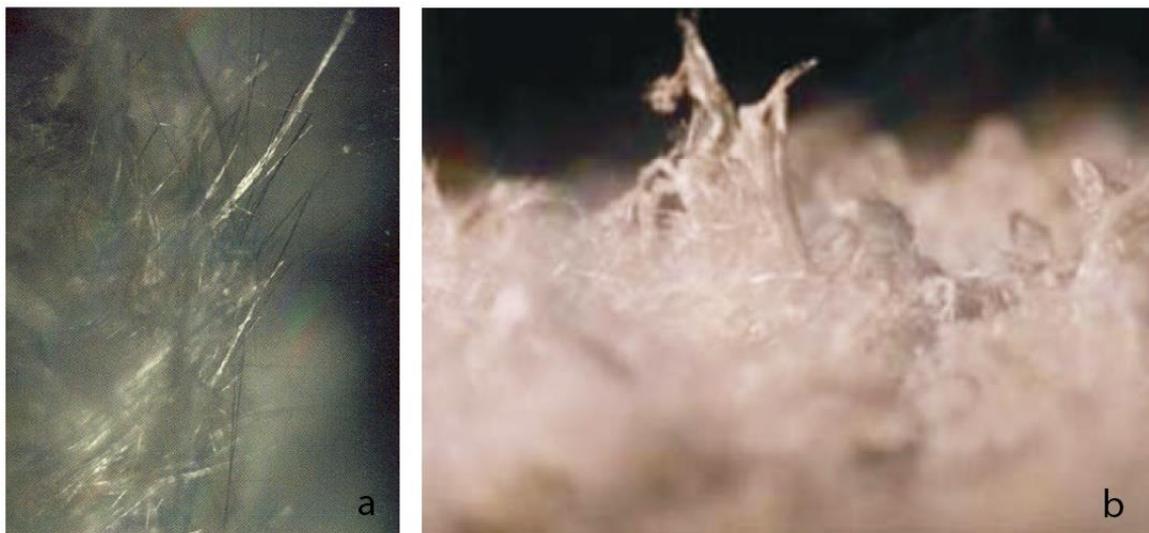


Figura 2-17: Complessa rete tridimensionale di cristalli (a), formazione e crescita dei cristalli (b). [18]

Lo studio svolto da Takagi *et al.* [19] ha avuto l’obiettivo di valutare come l’utilizzo di additivi cristallini influisse sul recupero della resistenza a compressione di calcestruzzi ad alta resistenza. Mantenendo un rapporto a/c pari a 0,50, sono stati fabbricati sia provini di controllo sia contenenti additivo cristallino (con percentuale di 2,5% in rapporto al peso di cemento), utilizzando due differenti tipologie di cemento a base di scorie d’altoforno, normale e modificato. Sono state così analizzate e confrontate quattro serie di campioni, due di controllo e due con additivo.

All’età di 28 giorni, i provini sono stati fessurati mediante prova a compressione e, raggiunto il 90% della resistenza massima, il carico è stato mantenuto costante per due minuti per permettere la formazione di un numero maggiore di micro fessure. In seguito, i campioni di ciascuna serie sono stati immersi in acqua per due diversi tempi di cura, 28 e 56 giorni, e al termine di tale durata sono stati nuovamente sottoposti alla medesima prova per valutarne il recupero di resistenza.

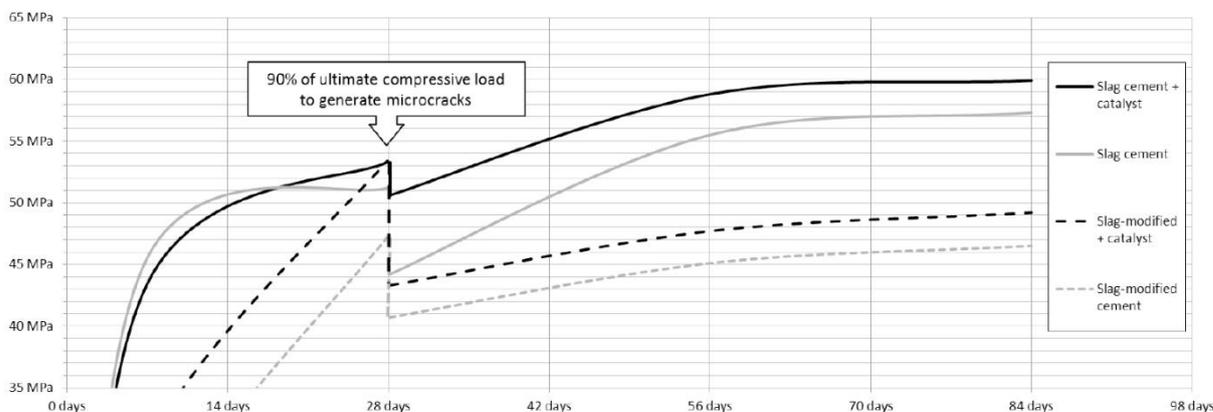


Figura 2-18: Perdita della resistenza a compressione e recupero dovuto all’auto guarigione delle micro fessure. [19]

In figura 2.18, risulta chiaro come tutti i campioni contenenti l'additivo hanno raggiunto livelli di resistenza abbastanza evidenti. Inoltre è possibile osservare come i provini realizzati con cemento con scorie modificate, dopo 56 giorni di cura, abbiano recuperato circa l'11-25,6%, mentre quelli composti da cemento con scorie d'altoforno e contenenti additivi cristallini abbiano raggiunto valori di resistenza pari al 112%, risultando maggiori di quelli iniziali. Questo recupero considerevole è attribuito alla presenza, nei calcestruzzi pozzolanici, di un gran numero di particelle non idratate che consente di attivare i processi di guarigione, favoriti dalla presenza del catalizzatore. In aggiunta, i processi relativi al *self-healing* hanno permesso una migliore sigillatura delle fessure mediante la formazione di nuovo gel C-S-H.

Ferrara e Krelani [20] hanno sviluppato una metodologia per verificare e quantificare la capacità di auto guarigione, in presenza o in assenza di additivi cristallini, e i suoi effetti sul recupero delle proprietà meccaniche del calcestruzzo, in termini di rigidità, carico massimo e apertura efficace della fessura.

La metodologia predisposta ha previsto la fabbricazione di campioni prismatici, di dimensioni 50x100x500 mm, contenenti e non additivo cristallino. Dopo 72 ore di cura in condizioni costantemente umide, i provini sono stati conservati in camera umida per 35 giorni, con una temperatura di 20°C e 95% U.R. Durante questo periodo, lo sviluppo della resistenza è stato continuamente monitorato, non rilevando differenze significative tra i provini di controllo e quelle contenenti additivo. Al termine del periodo di cura iniziale, i campioni sono stati suddivisi in due gruppi: il primo è stato sottoposto a fessurazione, con due differenti livelli di apertura rispettivamente di 0,13 e 0,27 mm, mediante prova a flessione controllata su tre punti, mentre quelli appartenenti al secondo sono stati lasciati integri. In seguito, per le quattro settimane successive, i provini sono stati sottoposti a cicli accelerati con l'obiettivo di simulare l'esposizione alle condizioni autunnali dell'Italia settentrionale. Dopo un periodo di cura rispettivamente di una, due e quattro settimane, i campioni appartenenti ad entrambi i gruppi sono stati sottoposti nuovamente alla prova di flessione su tre punti, al fine di ottenere dei risultati in termini di curve carico-spostamento da confrontare con quelle ottenute al momento della fessurazione iniziale.

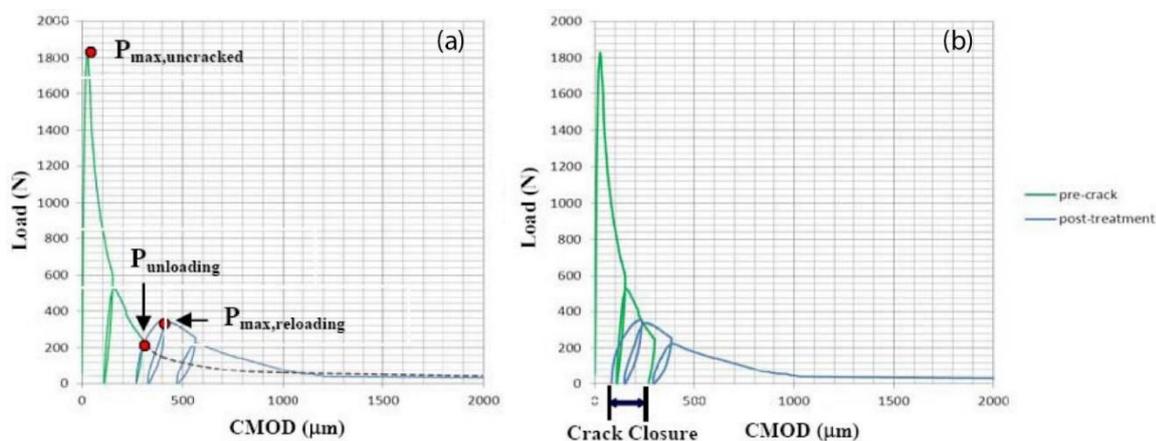


Figura 2-19: Curva carico-spostamento ottenuta nella prova a flessione prima e dopo la cura (a), procedura per valutare la chiusura delle fessure (b). [20]

Viene riportato, in figura 2.19a, un esempio di curva carico-spostamento riguardante i campioni analizzati nelle prove di flessione, prima e dopo il periodo di cura. E’ possibile osservare un recupero evidente della resistenza dovuto alla presenza dell’additivo, in funzione della durata dell’esposizione, delle condizioni igrometriche e dell’ampiezza della fessura. Gli autori sostengono che tale recupero è avvenuto grazie ai processi legati al fenomeno del *self-healing*, i quali hanno portato ad una chiusura parziale delle fessure. In figura 2.19b, invece, è stata riportata la procedura proposta per valutare e quantificare la chiusura delle fessure. La seconda curva, ottenuta dalla prova di flessione eseguita dopo il periodo di cura, è stata traslata lungo l’asse orizzontale fino ad ottenere l’intersezione tra il punto di picco e la curva della prima prova. La quantità di tale spostamento è stata assunta per valutare la chiusura e il rapporto con l’ampiezza iniziale è stato utilizzato come indice dell’auto guarigione della fessura (ICSH).

Nella figura sottostante 2.20 vengono riportati i risultati in funzione dell’ICSH, i quali mostrano che il calcestruzzo ordinario, dopo un periodo di maturazione convenzionale, è in grado di raggiungere un livello significativo di auto guarigione delle fessure dovuto alla continua idratazione delle particelle di cemento. Questa capacità risulta essere casuale, non dipendendo dalla durata dell’esposizione e dall’elevata umidità relativa. L’utilizzo di additivi cristallini invece aumenta la capacità auto sanante, la quale sembra dipendere dal tempo di esposizione e, in particolare, risulta essere piuttosto efficace con fessure di maggiore entità.

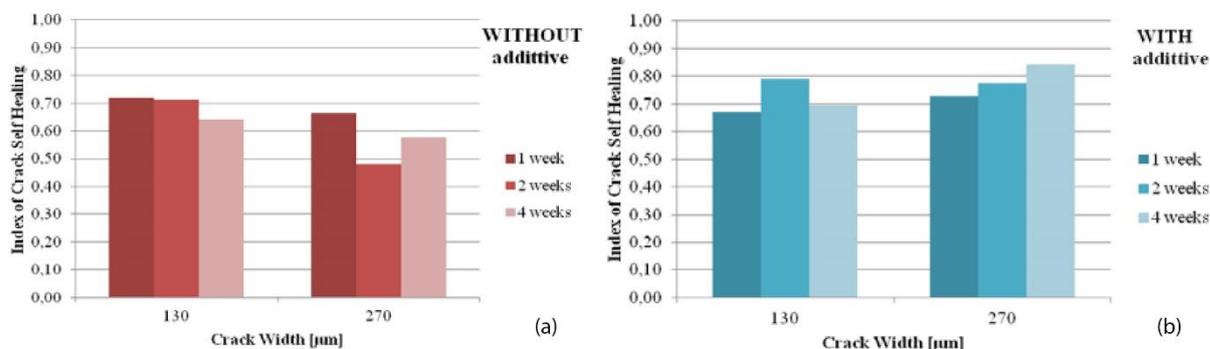


Figura 2-20: Indice di auto guarigione delle fessure per calcestruzzi senza (a) e con (b) additivo cristallino, in funzione dell’apertura di fessura e della durata dell’esposizione. [20]

Per valutare il recupero di resistenza sono stati definiti due indici riferiti al materiale vergine, non sottoposto a prefessurazione, o alla resistenza residua post-fessurazione. In figura 2.21 sono stati riportati gli indici di recupero in funzione della durata dell’esposizione e dell’apertura di fessura. E’ interessante notare come la presenza dell’additivo cristallino, agendo come catalizzatore delle reazioni di *self-healing*, migliora la capacità di recupero della resistenza. Inoltre è stato osservato che le fessure di dimensioni maggiori hanno beneficiato di un recupero più elevato, probabilmente dovuto alla presenza di una superficie più estesa esposta alle condizioni ambientali. Al contrario, questo comportamento non si è verificato per i campioni di controllo, non contenenti l’additivo.

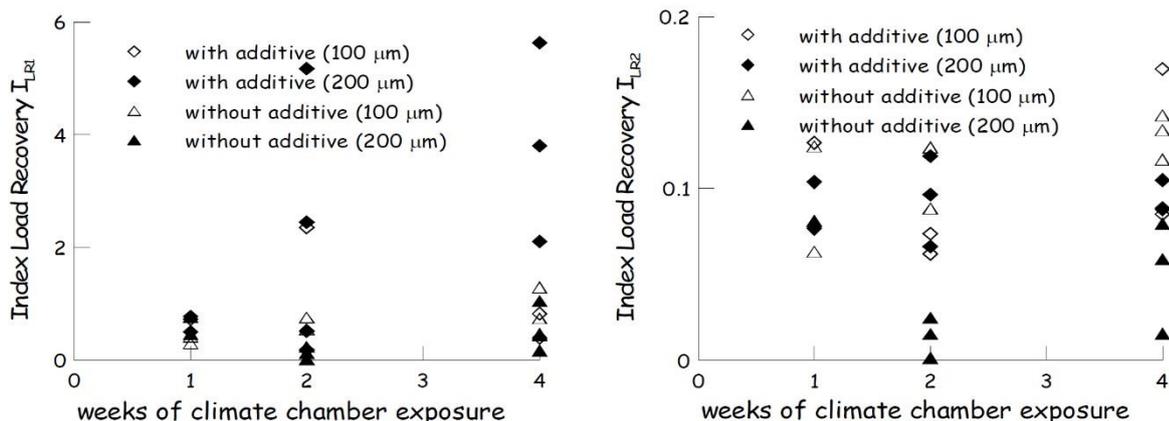


Figura 2-21: Indici di recupero della resistenza in funzione della durata di esposizione e dell'apertura di fessure. [20]

Inoltre è stato proposto un nuovo indice per valutare il recupero della rigidità, in quanto risulta essere direttamente relazionata con il danno. L'indice relativo al recupero del danno viene riportato in figura 2.22, nella quale è possibile notare come nelle prime due settimane i campioni di controllo dimostrano di avere prestazioni migliori. Mentre nelle ultime due il comportamento delle specie contenenti additivo diventa significativamente migliore, soprattutto per fessure di piccole dimensioni, dovuto al fatto che i prodotti della cristallizzazione risultano essere di natura più soffice rispetto a quelli dell'idratazione del cemento.

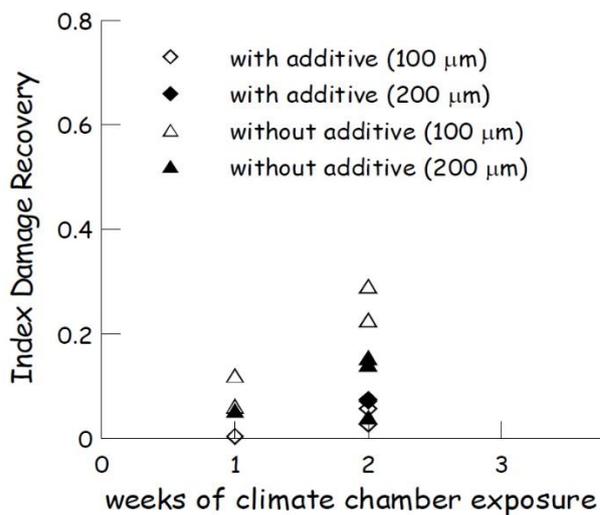


Figura 2-22: Indice di recupero del danno in funzione della durata di esposizione e dell'apertura di fessure. [20]

In conclusione, Ferrara e Krelani sostengono che l'aggiunta di additivi cristallini non solo migliora la capacità di auto guarigione del calcestruzzo, recuperando anche più dell'80% dell'apertura di fessura, ma la rende più affidabile e sistematica.

Nel 2014, Ferrara *et al.* [21] hanno proposto uno studio analogo nel quale i campioni prismatici, di controllo e contenenti l'1% di additivo cristallino in peso di cemento, sono stati sottoposti ai seguenti ambienti di cura:

- Immersione in acqua con temperatura costante di 20°C per una durata di un anno;
- Esposizione all'aria durante un periodo di un anno registrando una variazione di temperatura, con valori tra -5°C e +35°C, e una umidità relativa media;
- Esposizione, per quattro settimane, a cicli accelerati di temperatura simulando le condizioni invernali/estive dell'Italia settentrionale.

Entrambe le specie sono state conservate in camera umida (20°C e 95% U.R.) per un periodo compreso tra 35 e 42 giorni, monitorando costantemente lo sviluppo della resistenza. Al termine del periodo di stagionatura, i campioni sono stati prefessurati mediante prova a flessione controllata su tre punti, con due differenti livelli di apertura rispettivamente di 100 e 200  $\mu\text{m}$ , e successivamente sottoposti agli ambienti di cura previsti. Concluso il periodo stabilito, la prova di flessione è stata eseguita nuovamente portando i provini a completa rottura.

La metodologia proposta in questo studio mira a valutare e quantificare la capacità di auto guarigione e i suoi effetti sul recupero delle proprietà meccaniche, attraverso l'analisi e il confronto dei risultati emersi dalle prove descritte in precedenza. A tale scopo sono stati definiti due indici con i quali è stato possibile valutare il recupero di resistenza e rigidità, la quale risulta essere relazionata con il danno, nei campioni analizzati. Da un'analisi incrociata dei risultati ottenuti, in parte riportati in figura 2.23, risulta che i campioni contenenti l'additivo e posti direttamente a contatto con acqua hanno dimostrato, fin dal principio, una capacità di recupero di resistenza più elevata, mostrando un aumento moderato con il tempo di immersione e un andamento analogo al resto dei provini. Mentre le specie con additivo, esposte all'aria, hanno ottenuto un recupero minore rispetto a quelle poste in immersione, ma significativamente maggiore rispetto a quelle di controllo. Questo comportamento è dovuto principalmente alla natura propria delle aggiunte cristalline, le quali sono capaci di assorbire l'umidità dell'aria promuovendo i processi di auto guarigione.

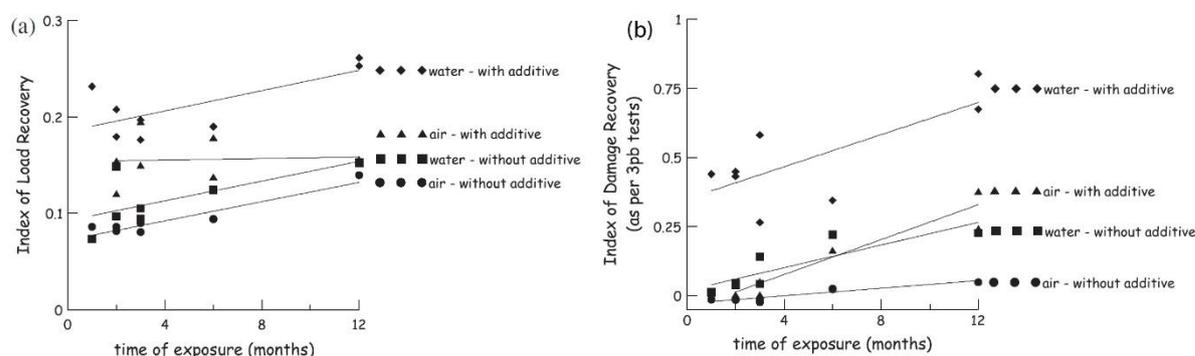


Figura 2-23: Indice di recupero di resistenza (a) e indice di recupero del danno (b) in funzione del tempo di immersione in acqua e esposizione all'aria. [21]

Invece, dai risultati ottenuti dai campioni sottoposti a cicli accelerati di temperatura si evince una bassa capacità di recupero di resistenza, sia per climi invernali che estivi. Tuttavia non risulta possibile trarre alcuna conclusione definitiva a causa dell'elevata dispersione dei risultati.

Per quantificare gli effetti del *self-healing* sono stati definiti due indici: il primo è relativo al livello di auto guarigione delle fessure, mentre l'altro è funzione della legge di evoluzione del danno, proposta in tale studio. Confrontando questi ultimi con i risultati emersi relativi alla resistenza e rigidità dei campioni, è stato possibile osservare come sia necessaria una notevole guarigione delle fessure, con valori superiori al 70-80%, per ottenere un sensibile recupero di rigidità, superiore al 20%.

Inoltre, sono state effettuate analisi mediante l'uso di strumenti ottici per comprendere meglio la natura dei prodotti formati sulle superfici dei provini, al termine del periodo di cura. Dopo tre mesi di immersione in acqua, sono stati prelevati dei cristalli, formati sulle superfici delle fessure, di due campioni di calcestruzzo, rispettivamente con e senza additivo cristallino, e con una dimensione di fessura pari a 200  $\mu\text{m}$ . È stato dedotto che la crescita dei prodotti fibrosi non può essere attribuita alle reazioni di carbonatazione, ma a reazioni di idratazione dovute alla presenza degli additivi cristallini, promosse inoltre dalle condizioni di cura in immersione.

Ferrara *et al.* concludono sostenendo che un calcestruzzo possiede una buona capacità di auto guarigione autogena e che la presenza degli additivi permette di accelerare il processo di guarigione, con conseguente sigillatura delle fessure e recupero delle proprietà meccaniche.

#### 2.4.1.2. Aggiunte espansive

Gli additivi espansivi vengono utilizzati essenzialmente con lo scopo di minimizzare la fessurazione dovuta al ritiro da essiccamento. Rossetti *et al.* [22] affermano che tali additivi, a base di ossido di calcio o di solfoalluminati di calcio, a seguito dell'idratazione producono un'espansione che, essendo impedita dall'armatura, fa nascere delle tensioni di compressione nel calcestruzzo. Si genera perciò uno stato di precompressione chimica indotta dall'additivo espansivo. In seguito al raffreddamento, nella struttura si avranno tensioni di trazione ridotte o annullate e la corrispondente riduzione o annullamento delle fessure.

Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [23] nel 2011 hanno studiato diverse miscele di calcestruzzo contenenti cinque differenti tipi di additivi, confrontando la capacità che essi possiedono nel risigillare fessure di ampiezza stabilita.

Oltre al cemento ordinario (OPC – Ordinary Portland Cement) utilizzato per realizzare i campioni di controllo, sono state realizzate cinque ulteriori miscele a seconda della tipologia di additivo aggiunto all'impasto, ovvero il 30% di ceneri volanti (FA), il 10% di agenti espansivi (EA), il 10% di fumo di silice (SF), l'1% di additivi cristallini (CA) e il 10% di filler calcareo (LP). Mantenendo il rapporto acqua/cemento costante pari a 0,4, sono stati fabbricati campioni

cubici di dimensioni 5x5x5 cm rinforzati con due barre di acciaio ad aderenza migliorata di diametro 10 mm (figura 2.24a). I provini sono stati fessurati mediante prova di splitting (figura 2.24b) a diverse età di maturazione, rispettivamente 3 e 28 giorni, e successivamente immersi in acqua, in differenti vasche a seconda della tipologia di miscela. Le fessure sono state fotografate prima e dopo l’immersione con lo scopo di determinare la loro ampiezza. Inoltre durante il periodo di cura sono state scattate foto per verificare l’evoluzione della guarigione.

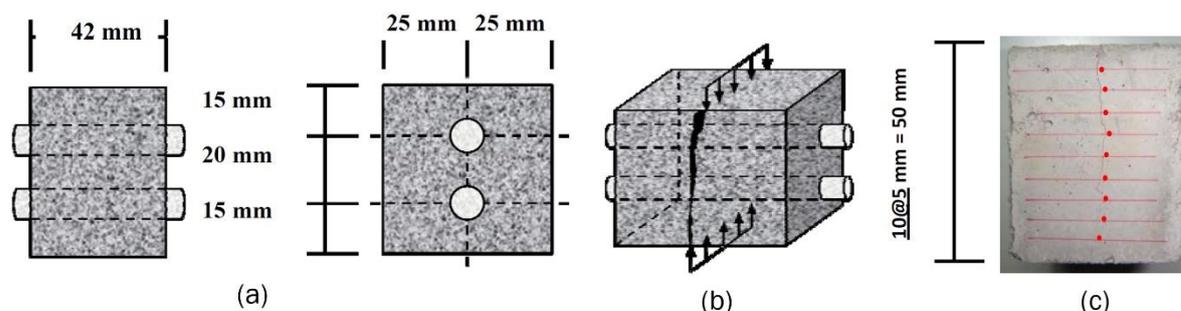


Figura 2-24: Dimensione dei campioni cubici (a); Fessurazione mediante splitting (b); Misurazione dell’ampiezza delle fessure (c). [23]

Per valutare la capacità di auto guarigione è stato introdotto un parametro  $\beta(t)$  in funzione dei giorni di cura, calcolato come segue:

$$\beta(t) = 1 - \frac{A(t)}{A_i}$$

dove:

$A_i$  è l’area compresa tra la bisettrice del quadrante, o retta  $y=x$ , e la polilinea che rappresenta l’apertura di fessura rimanente;

$A(t)$  è l’area compresa tra la bisettrice del quadrante e la polilinea al tempo  $t$ .

In figura 2.25 sono stati riportati i grafici che mostrano l’evoluzione del parametro  $\beta(t)$  per campioni prefessurati a tre giorni. I risultati evidenziano come fessure di ampiezza compresa tra 0,00 e 0,05 mm siano state completamente risanate durante i primi 12 giorni di cura, con riferimento a tutte le miscele (figura 2.25a). Inoltre è importante osservare che la malta contenente l’1% di additivo cristallino ha avuto la capacità di risigillare completamente le fessure in soli 7 giorni, mentre nei primi 3 aveva raggiunto un livello di guarigione pari all’80%. Le altre, invece, hanno richiesto tempi di guarigione più lunghi, ovvero oltre i 7 giorni. Per fessure di maggiore entità, comprese in un intervallo tra 0,05 e 0,3 mm (figura 2.25b-c), il tempo necessario per la chiusura completa delle fessure è stato più lungo. E’ risultato che le malte con additivo cristallino sono state caratterizzate da una riduzione del tasso di auto guarigione, mentre quelle contenenti agenti espansivi e fumo di silice hanno mostrato complessivamente un comportamento migliore, raggiungendo la riparazione completa in 19 giorni, considerando un’ampiezza di fessura compresa tra 0,1 e 0,2 mm.

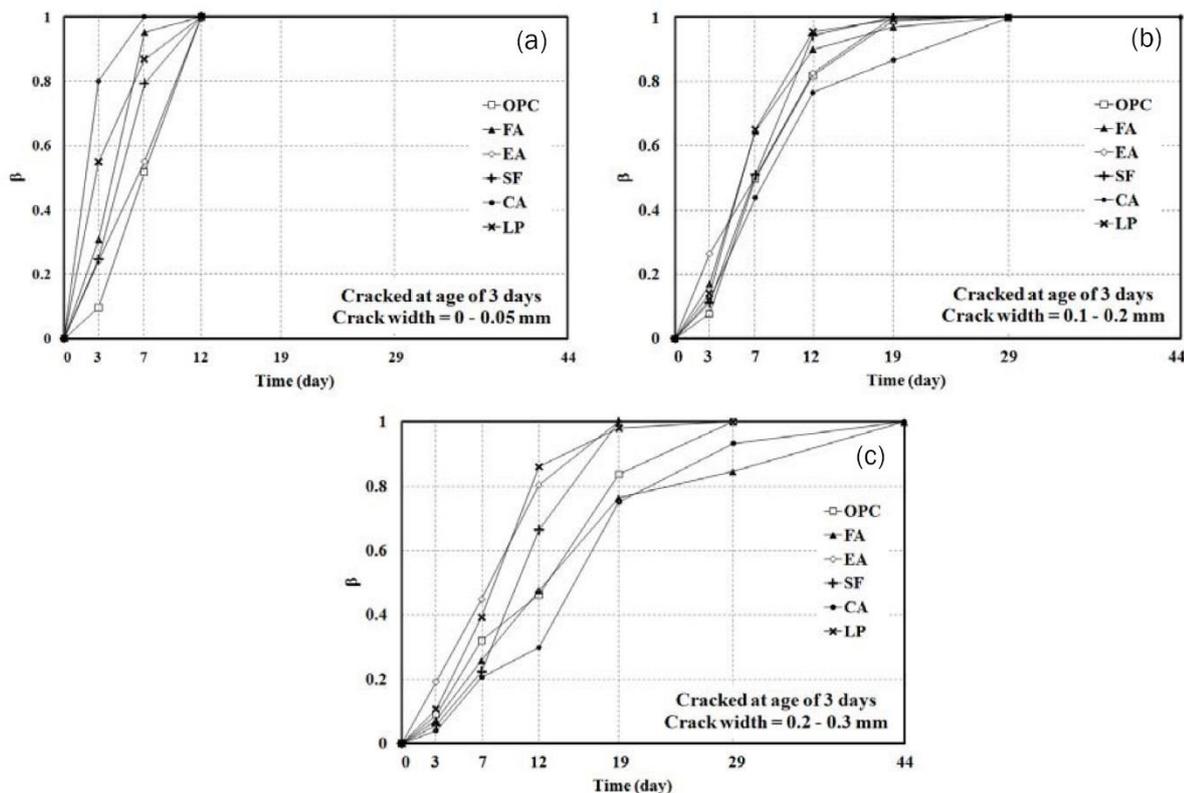


Figura 2-25: Evoluzione dell'indice di self-healing in funzione del tempo di cura per fessure di differenti ampiezze e campioni prefessurati a tre giorni. [23]

Per quanto riguarda i provini prefessurati a 28 giorni, è stato osservato che per fessure di piccola entità (figura 2.26a) l'andamento dell'auto guarigione risulta simile a quello dei campioni prefessurati a tre giorni, evidenziando nuovamente l'efficacia e la rapidità dell'additivo cristallino. Per fessure di ampiezza maggiore, fino a 0,2 mm (figura 2.26b), la miscela contenente fumo di silice ha dimostrato una capacità migliore di guarigione rispetto a tutte le altre, chiudendo completamente le fessure in soli 19 giorni. Invece, per fessure comprese tra 0,2 e 0,3 mm (figura 2.26c), non è stato riscontrato alcuna sanazione completa durante tutto il periodo di cura e tutte le tipologie di malte, superati i 19 giorni, hanno evidenziato un andamento quasi costante, tranne quella contenente fumo di silice che ha continuato, seppur di poco, il processo di riparazione.

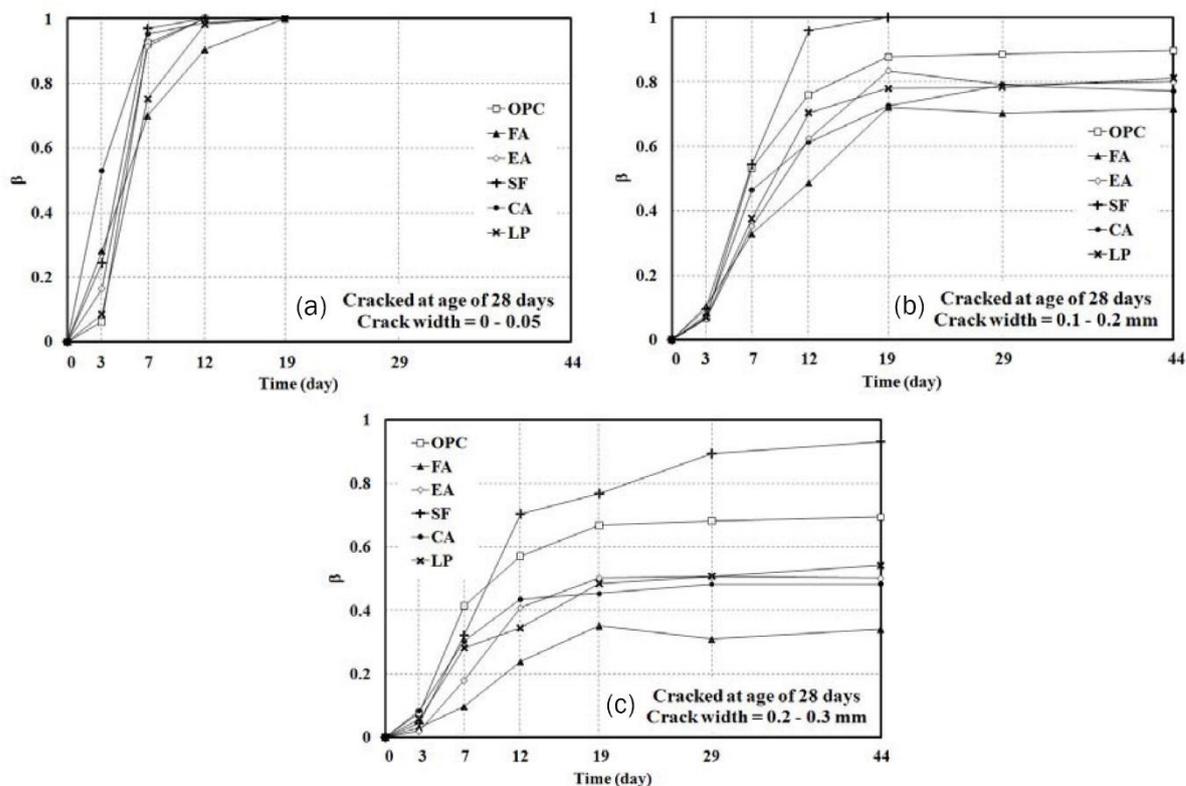
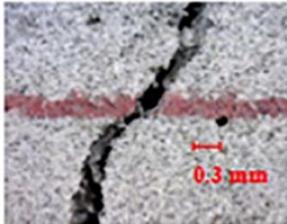
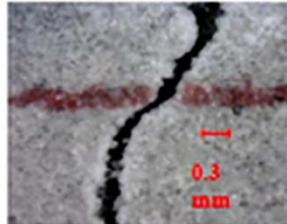
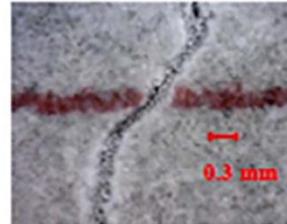
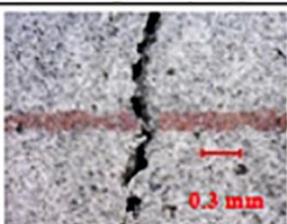
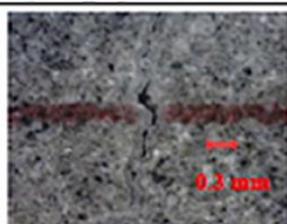
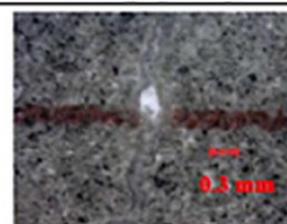
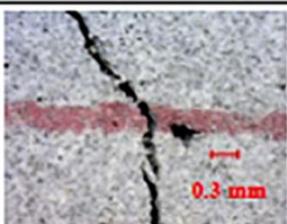
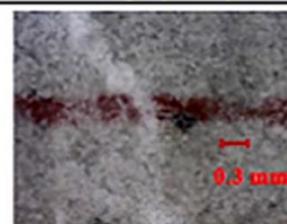
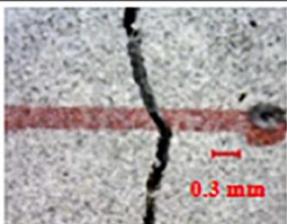
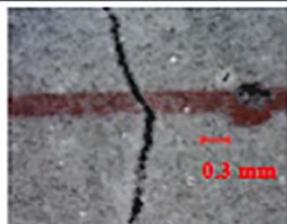
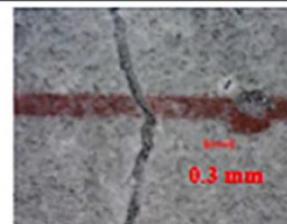
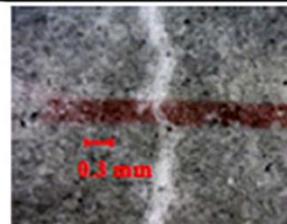
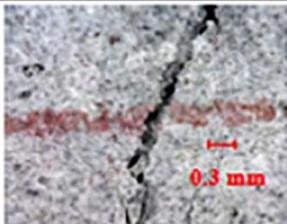
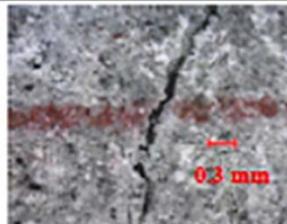
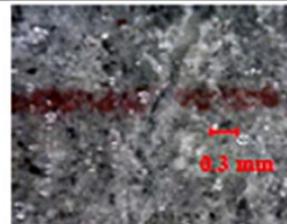


Figura 2-26: Evoluzione dell'indice di self-healing in funzione del tempo di cura per fessure di differenti ampiezze e campioni prefessurati a ventotto giorni. [23]

In figura 2.27 sono state riportate le fessure prima e dopo il trattamento di cura, per i campioni fessurati rispettivamente all'età di 3 e 28 giorni. I prodotti formati sulle superfici delle fessure sono stati analizzati con il microscopio e risultano essere di natura cristallina, in particolare carbonato di calcio, in tutte le tipologie di malte nonostante presentino forme differenti; in particolare, quelle contenenti additivo cristallino formano cristalli di piccole dimensioni. Gli autori sostengono che questo potrebbe essere il motivo per il quale l'additivo cristallino riesca a sigillare più rapidamente le fessure di piccola dimensione, poiché la precipitazione di tali cristalli richiede meno tempo.

### Cracked at the age of 3 days

OPC			
Photo at	Initial (0.0564 mm)	7 days (0.0515 mm)	12 days (0 mm)
FA			
Photo at	Initial (0.0784 mm)	12 days (0.0156 mm)	19 days (0 mm)
EA			
Photo at	Initial (0.075 mm)	7 days (0.0285 mm)	12 days (0 mm)
SF			
Photo at	Initial (0.0936 mm)	7 days (0.0529 mm)	29 days (0 mm)
CA			
Photo at	Initial (0.0649 mm)	3 days (0.0176 mm)	7 days (0 mm)
LP			
Photo at	Initial (0.0832 mm)	7 days (0.0704 mm)	12 days (0 mm)

Cracked at the age of 28 days

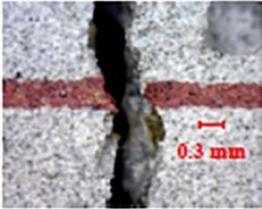
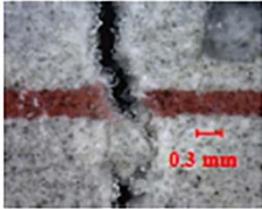
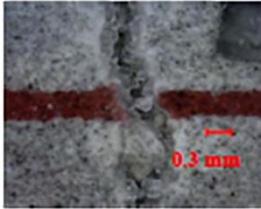
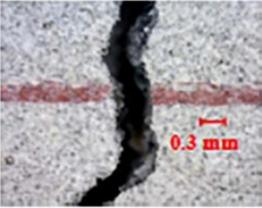
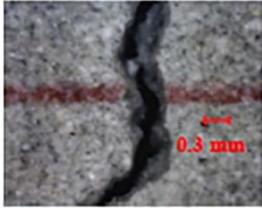
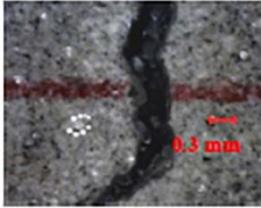
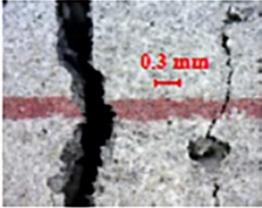
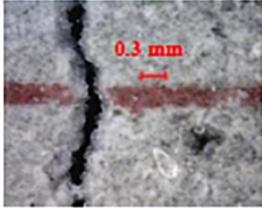
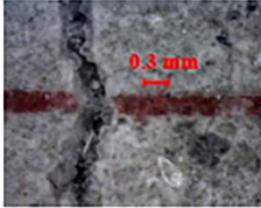
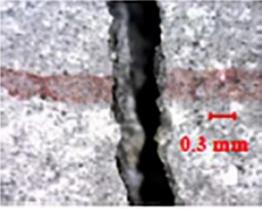
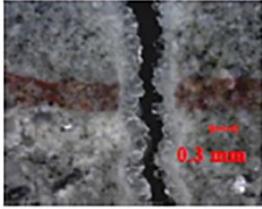
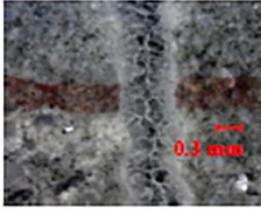
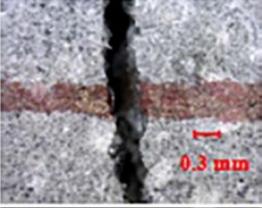
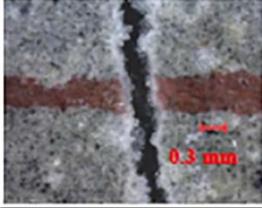
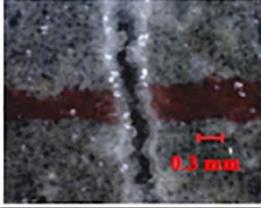
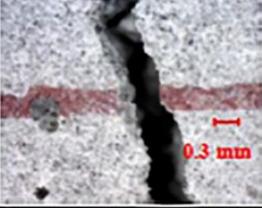
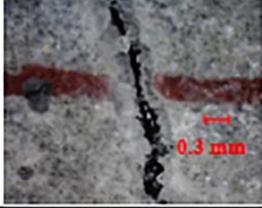
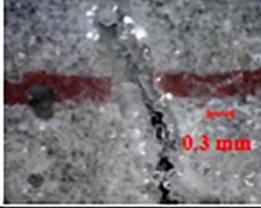
OPC			
Photo at	Initial (0.3032 mm)	12 days (0.1583 mm)	44 days (0.0912 mm)
FA			
Photo at	Initial (0.2548 mm)	19 days (0.1637 mm)	44 days (0.1663 mm)
EA			
Photo at	Initial (0.2763 mm)	12 days (0.1905 mm)	44 days (0.1797 mm)
SF			
Photo at	Initial (0.3916 mm)	12 days (0.1207 mm)	19 days (0 mm)
CA			
Photo at	Initial (0.2898 mm)	7 days (0.1558 mm)	44 days (0.1188 mm)
LP			
Photo at	Initial (0.2943 mm)	19 days (0.1494 mm)	44 days (0.1152 mm)

Figura 2-27: Prodotti di sigillatura presenti sulle superfici delle fessure di differenti miscele: OPC, calcestruzzo con cemento Portland ordinario; FA, calcestruzzo con ceneri volanti; EA, calcestruzzo con agenti espansivi; SF, calcestruzzo con fumo di silice; CA, calcestruzzo con additivo cristallino; LP, calcestruzzo con calce. [23]

Sisomphon, Copuroglu e Koenders [24], [25] hanno confrontato la capacità di auto guarigione di miscele di calcestruzzo Portland CEM I 42.5 N, contenenti additivi cristallini e espansivi. Gli additivi cristallini sono materiali cementizi sintetici che contengono silice reattiva e alcuni catalizzatori cristallini e, data la loro natura idrofila, si attivano anche solo in presenza di una elevata umidità. Gli additivi espansivi, invece, sono prodotti a base di solfoalluminato di calcio, generalmente utilizzato per la compensazione da ritiro.

Sono state preparate quattro differenti miscele di calcestruzzo:

- Controllo;
- CA1.5, contenente l'1,5% di additivo cristallino in peso di cemento;
- CSA10, contenente il 10% di additivo espansivo in peso di cemento;
- CA1.5/CSA10, contenente l'1,5% di additivo cristallino e il 10% di additivo espansivo.

Sono stati fabbricati dischi di malta caratterizzati da un diametro di 75 mm e un'altezza di 20 mm, utilizzando un rapporto acqua/cemento pari a 0,25. Per controllare l'ampiezza delle fessure, è stata posta una maglia in filo galvanizzato a metà dell'altezza dei provini. Dopo 24 ore i campioni sono stati liberati dalle forme, posti in camera umida per i tre giorni successivi, e infine esposti all'aria per un periodo di 25 giorni. La prefessurazione dei campioni è stata indotta mediante prova di splitting, avendo come obiettivo quello di ottenere fessure di ampiezza compresa tra i 100 e 400  $\mu\text{m}$  (figura 2.28a) e successivamente fissati a una staffa in PVC di diametro 75 mm per creare un confinamento o vincolo strutturale (figura 2.28b).

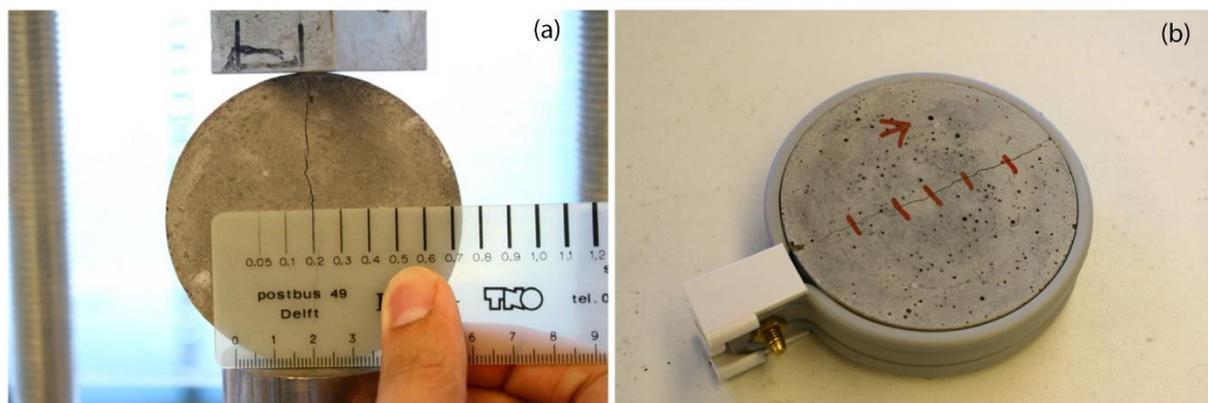


Figura 2-28: Prefessurazione dei campioni (a), fissaggio staffa in PVC (b). [25]

In prossimità delle fessure, sono stati riportati cinque segni a distanza di 10 mm, in corrispondenza dei quali è stata misurata la dimensione superficiale mediante uno stereomicroscopio. I provini sono stati immersi in acqua, rinnovata ogni settimana, per una durata di 28 giorni, all'interno dei quali sono state effettuate prove intermedie a 4, 7, 14 e 28 giorni. E' stata condotta, inoltre, una prova di filtrazione con lo scopo di verificare e quantificare il flusso d'acqua attraverso la fessura, per una durata di 10 minuti. E' stato predisposto un recipiente, inizialmente vuoto, sopra il campione e, una volta sigillati i bordi a contatto con la staffa in PVC, è stato riempito con una quantità d'acqua ben determinata.

Per valutare e quantificare il grado di auto guarigione nei campioni analizzati, è stato utilizzato un parametro direttamente connesso all’apertura di fessura prima e dopo l’immersione in acqua. Dai risultati ottenuti, è stato possibile osservare che tutte le miscele possiedono una buona capacità di riparazione delle fessure; analizzando i risultati riportati in figura 2.25, si evince che la chiusura è avvenuta secondo l’ordine  $\text{Control} < \text{CA1.5} \approx \text{CSA10} < \text{CA1.5/CSA10}$ . Le specie contenenti additivo cristallino o espansivo (figura 2.29b-c) sono state in grado, in meno di 28 giorni, di sigillare completamente le fessure di piccole dimensioni, mentre i campioni di controllo sono stati gli unici a non essere riusciti a chiudere totalmente le fessure (fino al 90%). La miscela contenente entrambi gli additivi (CA e CSA), invece, ha mostrato un’ottima capacità di *self-healing*, migliore rispetto a tutte le altre, arrivando a sigillare fessure comprese tra i 200 e i 400  $\mu\text{m}$  in meno di 28 giorni.

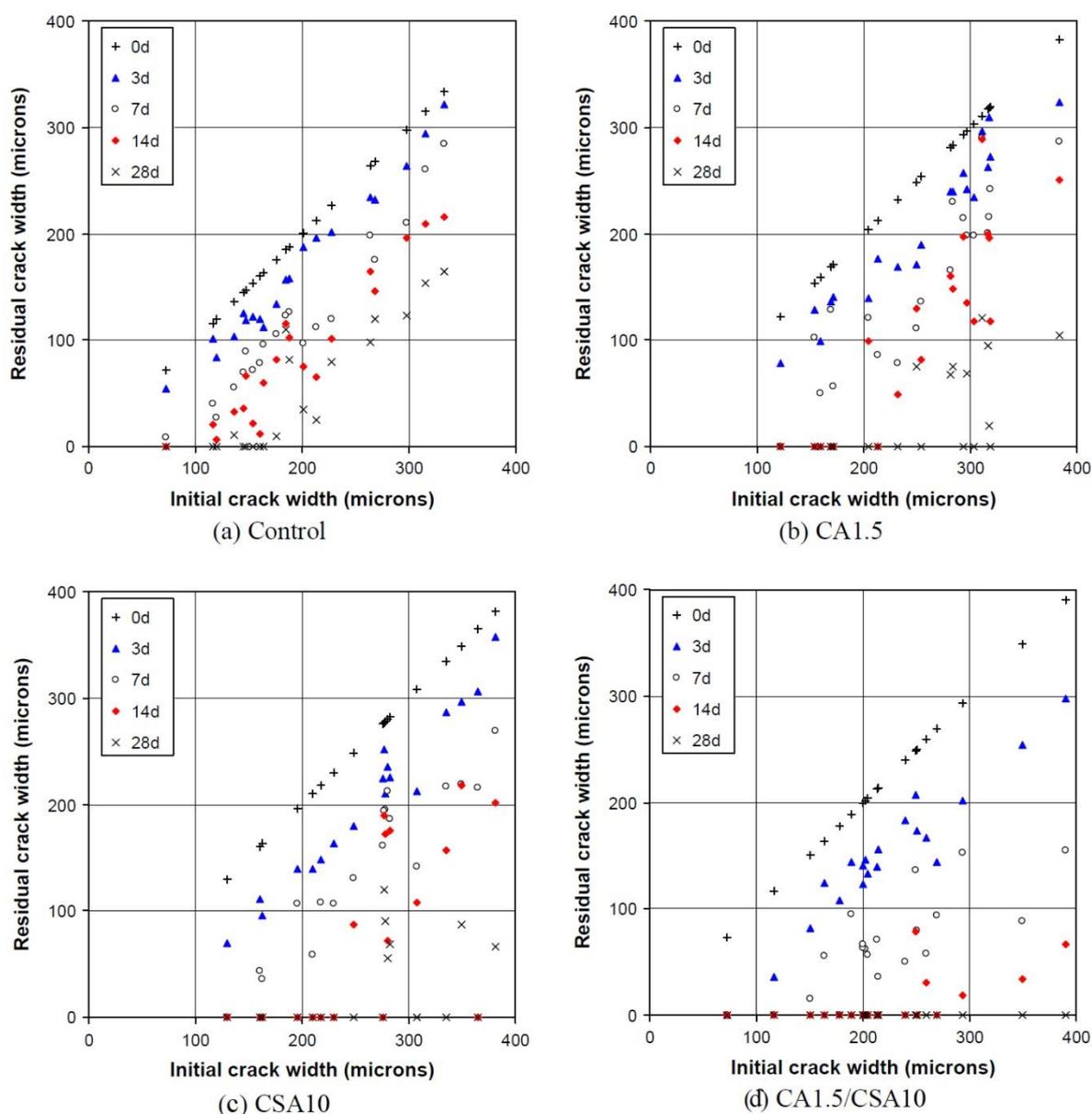


Figura 2-29: Analisi dell’ampiezza delle fessure. [25]

Per quanto riguarda la prova di filtrazione, è stato misurato il flusso di acqua attraverso le fessure subito dopo la fase di prefessurazione e in seguito a intervalli stabiliti. È stato osservato che nei campioni di controllo, il flusso ha subito una leggera diminuzione nel primo periodo, mentre nelle miscele contenenti additivi cristallini o espansivi questa riduzione è risultata più rapida nei primi cinque giorni. Durante il periodo di cura, è stata prevista la sostituzione dell'acqua ogni 7 giorni, causando una degradazione dei prodotti formati a seguito della reazione di auto guarigione, con un conseguente aumento del passaggio dell'acqua durante la prova. Gli autori sostengono però che la sostituzione dell'acqua è necessaria per garantire una maggiore disponibilità di anidride carbonica, essenziale per la precipitazione di carbonato di calcio, portando alla formazione di cristalli più densi.

È stato inoltre osservato che la presenza del confinamento dei campioni, realizzato mediante la staffa in PVC, ha apportato beneficio al processo di guarigione, in particolare per le miscele contenenti additivo espansivo in quanto vengono ridotte al minimo le micro fessure sulla zona di transizione tra matrice cementizia e aggregati. L'idea infatti è stata quella di riproporre il reale funzionamento in opera del calcestruzzo indurito, soggetto costantemente a carichi e vincoli strutturali.

Successivamente nel 2013 Sisomphon, Copuroglu e Koenders [26] hanno esaminato il comportamento e il recupero delle proprietà meccaniche di calcestruzzi fibro rinforzati, sottoposti a differenti ambienti di cura, per quanto concerne la resistenza, la rigidità e la deformazione. La metodologia ha previsto l'aggiunta dei medesimi additivi, e relative percentuali, utilizzati nello studio precedentemente descritto. Le quattro miscele sono state realizzate con calcestruzzo Portland CEM I 42.5 N, con rapporto a/c pari a 0,25, e rinforzate con fibre di poli-vinil-alcool (PVA), con una percentuale volumetrica del 2%. Sono stati fabbricati campioni prismatici di dimensioni 120x30x10 mm i quali, dopo 24 ore, sono stati posti in camera umida per i tre giorni successivi, e infine esposti all'aria per un periodo di 25 giorni. Parte dei campioni è stata sottoposta a prefessurazione mediante prova a flessione controllata su quattro punti, ottenendo fessure di ampiezza compresa tra i 10 e i 50  $\mu\text{m}$  e una freccia fissata a 1,2 mm. La restante parte, ovvero tre campioni per ciascuna miscela, è stata portata a rottura mediante la medesima prova, al fine di valutare le proprietà meccaniche iniziali, per poterle successivamente confrontare con quelle ottenute dopo il periodo di cura. A seguito della formazione delle fessure, i campioni sono stati sottoposti per una durata di 28 giorni ai seguenti ambienti di cura:

- Condizione di cura EC1, nel quale i campioni sono stati immersi in acqua senza che questa venga sostituita o aggiunta per tutto il periodo di cura;
- Condizione di cura EC2, nel quale i campioni sono stati immersi in acqua, sostituita ogni 12 ore;
- Condizione di cura EC3, nel quale i campioni sono stati sottoposti a cicli di asciutto/bagnato di 24 ore, prevedendo la sostituzione dell'acqua dopo ogni ciclo. I cicli sono strutturati in una prima parte in cui i provini vengono immersi in acqua per

---

una durata di 12 ore e, una seconda nella quale vengono asciugati per il restante tempo;

- Condizione di cura EC4, nel quale i campioni sono stati esposti ad aria per tutto il tempo di cura. E’ stato utilizzato questo ambiente al fine di ottenere una condizione di riferimento, in quanto gli autori sostengono che il processo di auto guarigione venga ridotto al minimo.

Dopo il periodo di cura, i provini sono stati nuovamente caricati e portati a rottura mediante la prova a flessione, con l’obiettivo di esaminare le proprietà meccaniche e confrontarle con quelle ottenute nei campioni di riferimento.

Dai risultati ottenuti dalle prove, è stato osservato come, al termine della fase di prefessurazione, la presenza degli additivi cristallini (CA) e espansivi (CSA) comporti una riduzione della resistenza a flessione, rigidità flessionale e capacità di deformazione dei campioni. Infatti è stato osservato che le miscele contenenti aggiunte hanno mostrato una capacità di deformazione di circa 2,2-2,3 mm, contro i 3 mm ottenuti nei campioni di controllo. Gli autori affermano che i benefici derivanti dall’aggiunta di tali prodotti possono essere osservati solo dopo il periodo di cura.

Nonostante la presenza degli additivi nella miscela mostri alcuni effetti negativi relativi alle prestazioni iniziali, è possibile individuare maggiori benefici dai risultati ottenuti dopo il periodo di cura. Infatti confrontando la rigidità, la resistenza e la deformazione dei campioni sottoposti al periodo di cura con quelli di riferimento si evincono risultati alquanto interessanti. Dalla figura 2.30a si evince che in tutte le condizioni di cura, le quattro miscele hanno mostrato un recupero di rigidità flessionale minore rispetto a quelle di riferimento; in particolare in condizione EC4 i valori di recupero sono stati complessivamente i più bassi. Questo comportamento è dovuto principalmente all’assenza di umidità che non ha permesso un’ulteriore idratazione della matrice cementizia. Dai risultati riportati nelle figure sottostanti, si deduce che il fenomeno del *self-healing* sia in grado di apportare un maggior beneficio in termini di resistenza, piuttosto che di rigidità, specialmente per quanto riguarda la condizione di cura EC3, corrispondente ai cicli asciutto/bagnato.

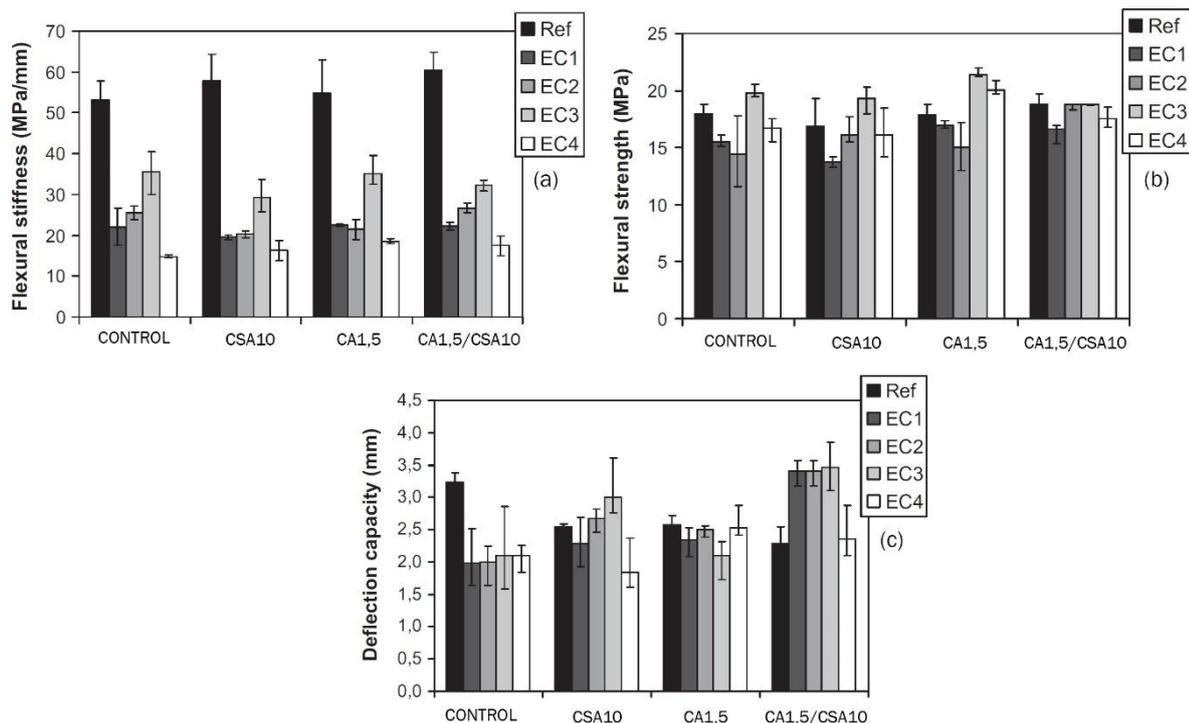


Figura 2-30: Confronto delle proprietà meccaniche tra i campioni sottoposti a cura e quelli di riferimento, in termini di rigidità (a), resistenza (b) e deformazione (c) e con riferimento ai differenti ambienti di cura. [26]

Per quanto riguarda il comportamento deformativo, in figura 2.30c si osserva che le miscele contenenti additivi cristallini e espansivi (CSA10 e CA1,5/CSA10) hanno ottenuto un considerevole miglioramento della capacità di deformazione. Inoltre i campioni contenenti entrambe le aggiunte e posti a contatto con acqua durante il periodo di cura stabilito, hanno giovato di valori di recupero pari a circa il 150% rispetto ai campioni di controllo. Con riferimento agli ambienti di cura, in generale è stato osservato che i cicli asciutto/bagnato hanno apportato un maggior recupero delle proprietà meccaniche. Gli autori sostengono che durante la fase di asciugatura aumenta la concentrazione di ioni all'interno della fessura, dovuta all'evaporazione dell'acqua in eccesso. Questo porterebbe alla formazione di ulteriori cristalli di carbonato di calcio, utili per la sigillatura delle fessure, favorendo così il fenomeno dell'auto guarigione. Mediante l'utilizzo di un stereomicroscopio è stato possibile analizzare e valutare la precipitazione dei cristalli sulle superfici dei campioni, in corrispondenza delle fessure. E' stato chiaramente osservato che tutti i campioni soggetti ai cicli asciutto/bagnato hanno presentato un'eccessiva formazione di carbonato di calcio.

In conclusione, Sisomphon, Copuroglu e Koenders sostengono che la tipologia di cura ha una forte influenza sugli effetti del *self-healing* e, in funzione dei risultati ottenuti in questo studio, deducono che il recupero delle proprietà meccaniche, con riferimento alle condizioni di esposizione, è avvenuto secondo l'ordine  $EC4 < EC1 < EC2 < EC3$ , mentre con riferimento alle miscele utilizzate è risultato che  $Control < CA1,5 < CSA10 < CA1,5/CSA10$ .

Ahn e Kishi [27] nel 2010 hanno esaminato i diversi effetti dei prodotti espansivi e cristallini abbinati a differenti agenti chimici con l’obiettivo di migliorare l’efficacia dei processi legati all’auto guarigione. Sono stati utilizzati additivi espansivi, composti da haüyne, anidride e calce libera, e due “geomateriali” (A e B) formati principalmente da  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e da montmorillonite, feldspato e quarzo. Inoltre sono stati usati diversi carbonati come agenti chimici, in particolare  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , per garantire l’effetto della cristallizzazione cementizia.

E’ stata prevista la fabbricazione di cilindri di 10 cm di diametro e 20 cm di altezza e, dopo un mese di maturazione, sono stati sottoposti a prefessurazione controllata al fine di ottenere fessure di ampiezza compresa tra 0,1 e 0,3 mm, corrispondenti alla massima tolleranza per gli stati limite d’esercizio, e successivamente immersi in acqua per un altro mese. Dai risultati ottenuti è stato possibile osservare che la sola aggiunta di additivi espansivi non è determinante per la guarigione delle fessure poiché, nonostante si verifichi l’espansione, questa non risulta sufficiente a sigillarle (figura 2.31a-b).

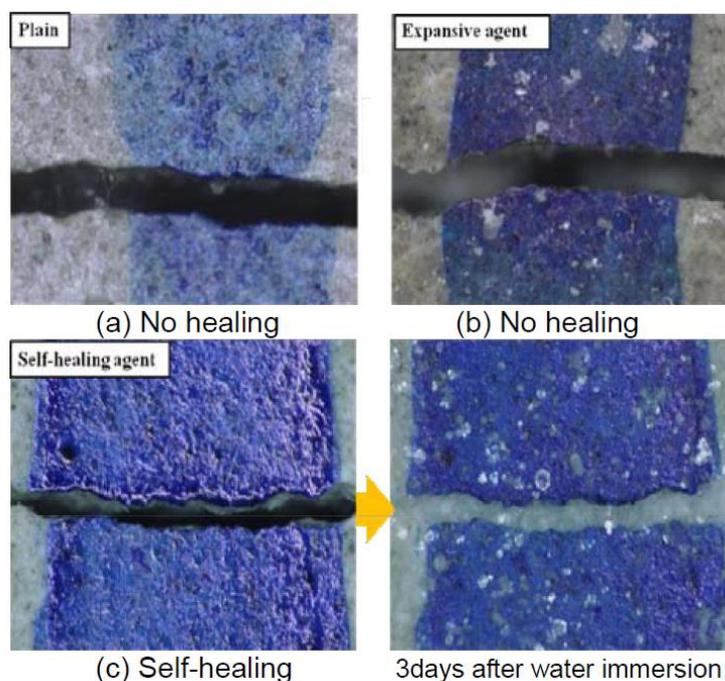


Figura 2-31: Confronto della chiusura di fessure dopo un mese di cura in immersione, tra calcestruzzo comune (a), calcestruzzo contenenti agenti espansivi (b), calcestruzzo con agenti espansivi progettato appositamente per il self-healing. [27]

Tuttavia l’aggiunta del resto dei componenti, descritti in precedenza, assicura una maggiore stabilità del sistema aumentando la velocità di reazione. Infatti questo ha permesso la chiusura di alcune fessure di 0,15 mm in 3 giorni e di 0,22 mm in 7 giorni, giungendo in un mese di cura alla completa sigillatura (figura 2.31c e figura 2.32).

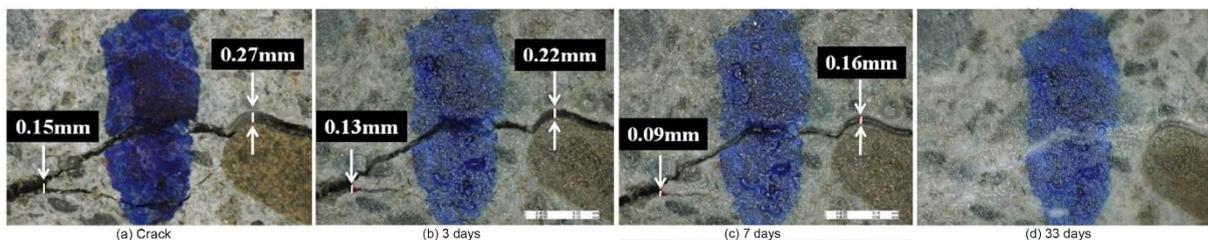


Figura 2-32: Fenomeno del self-healing relativo a differenti ampiezze di fessura. [27]

#### 2.4.2. Polimeri super assorbenti (SAP)

I polimeri super assorbenti, generalmente chiamati SAP (Super Absorbent Polymers) o idrogel, sono materiali utilizzati da diversi ricercatori con lo scopo di fornire una quantità aggiuntiva di acqua nella matrice cementizia. Sono considerati dei polimeri reticolati, aggiunti in fase di miscelazione, in grado di assorbire una grande quantità di liquido e, gonfiandosi, di formare un gel morbido e insolubile (figura 2.33).

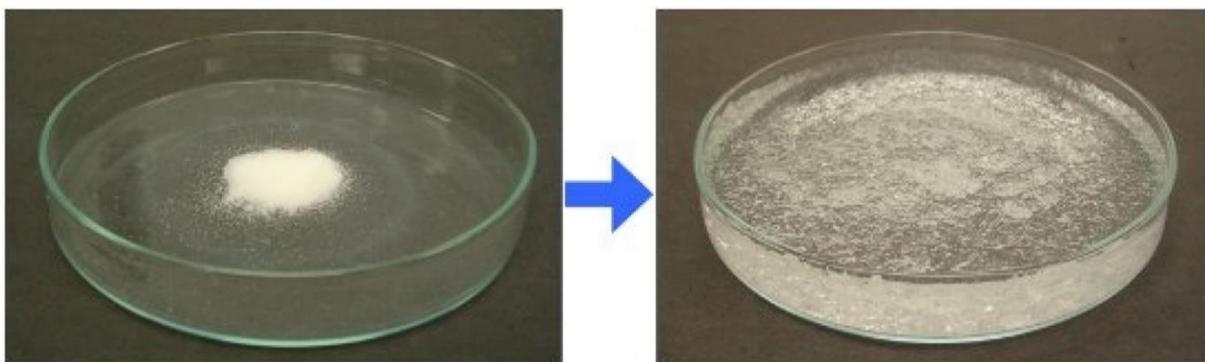


Figura 2-33: Polvere di SAP secca (a sinistra), gel formatosi a seguito dell'espansione del SAP (a destra). [28]

In fase di presa, quanto tuttavia il calcestruzzo risulta ancora fresco, si verifica un'espansione ridotta dei SAP in quanto la loro capacità di rigonfiamento è fortemente dipendente dalla alcalinità e dalla concentrazione ionica della soluzione. Durante l'idratazione del cemento, i SAP rilasciano l'acqua assorbita e, riducendo il loro volume, rilasciano dei macro pori all'interno della matrice cementizia. Quando si verifica la formazione di fessure, l'acqua e l'umidità presente nell'aria penetrano all'interno e vengono assorbite dai SAP che si espandono nuovamente. Nel caso in cui la concentrazione ionica del fluido penetrato è bassa, il rigonfiamento sarà maggiore di quello raggiunto al momento della formazione dei pori, giungendo nella parte interna della fessura e bloccando l'ingresso di agenti dannosi o corpi estranei. Tale comportamento viene mostrato in figura 2.34.

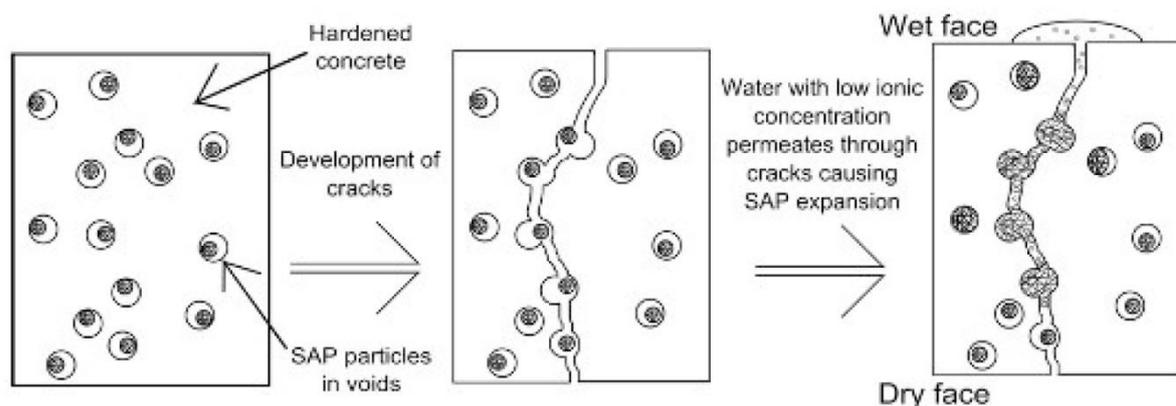


Figura 2-34: Meccanismo di chiusura attuato dai polimeri super assorbenti. [28]

Inoltre, in presenza di periodi secchi, l'acqua assorbita viene rilasciata nuovamente favorendo così la sanazione autogena.

Kim e Schlangen [29] hanno studiato come la presenza dei SAP nella matrice cementizia, presente in differenti percentuali, possa influire sulla capacità di *self-healing* di calcestruzzi rinforzati con fibre in poli-vinil-alcool. Hanno confrontato tre diverse miscele di ECC contenenti lo 0,05% di fibre in PVA: una miscela di controllo (G1) e ulteriori due con aggiunta di SAP, rispettivamente con una percentuale dello 0,5% (G2) e 1% (G3) in peso di cemento. I campioni prismatici sono stati fessurati a due diverse età di maturazione, rispettivamente 7 e 28 giorni, mediante prova a flessione su quattro punti fino alla formazione di fessure di ampiezza di circa 2 mm. In seguito i provini sono stati sottoposti a tre diversi ambienti di cura per una durata complessiva di 28 giorni: esposizione all'aria con una temperatura di 20°C e 50% di umidità relativa, cicli di asciutto/bagnato (immersione in acqua per un'ora e posti ad asciugare per tre giorni) e immersione in acqua a 20°C. Trascorso il periodo di cura, le specie sono state sottoposte nuovamente alla prova di flessione su quattro punti, portandoli a completa rottura.

I risultati ottenuti hanno mostrato un recupero di resistenza per le specie contenenti i SAP rispetto a quelle di controllo. E' stato osservato però che l'incremento è avvenuto solo per i campioni sottoposti ad ambienti di cura che prevedono il contatto diretto con l'acqua, confermando l'importanza della presenza di acqua per ottenere una sanazione efficace.

Snoeck *et al.* [30] hanno investigato la capacità auto sanante di due differenti tipologie di SAP, al fine di promuovere l'auto sanazione di un calcestruzzo fibro rinforzato. Lo studio ha previsto l'utilizzo di un calcestruzzo ordinario CEM I 52.5 N rinforzato con fibre in poli-vinil-alcool e contenenti due tipi di SAP in differenti percentuali, rispettivamente l'1%, 2% e 4%: il primo (SAP A) è un copolimero di acrilamide e sodio acrilato, mentre il secondo (SAP B) è un poliacrilato reticolato con sali di potassio. La seconda tipologia è caratterizzata da una dimensione delle particelle che risulta essere circa cinque volte più grande rispetto a quelle della prima. Sono stati fabbricati due diverse tipologie di campioni: prismatici contenenti il 2% di fibre in PVA (rispetto al peso di cemento) utilizzati per confrontare il comportamento

meccanico, ed eventuale recupero delle proprietà, tra i provini sottoposti al periodo di cura e quelli di controllo; cilindrici contenenti l'1% di fibre in PVA (rispetto al peso di cemento) con i quali è stata esaminata, mediante strumenti ottici e prova di permeabilità, la capacità di richiusura delle fessure.

La prima tipologia, all'età di 28 giorni, è stata sottoposta a prefessurazione mediante la prova a flessione su quattro punti, ottenendo fessure con ampiezza di circa 100-150  $\mu\text{m}$ . In seguito, i campioni sono stati conservati in tre diversi ambienti di cura per ulteriori 28 giorni: cicli di asciutto/bagnato per una durata di 2 giorni (1 giorno in acqua e il restante esposto all'aria) con il 60% U.R. e esposizione all'aria con umidità relativa rispettivamente del 60% e oltre il 90%. Trascorso il periodo di cura, sono stati sottoposti nuovamente alla medesima prova di flessione. I campioni cilindrici, invece, sono stati prefessurati all'età di 7 giorni mediante prova splitting con apertura di fessura controllata, fino ad ottenere una dimensione finale di circa 150-200  $\mu\text{m}$ . Le specie sono state sottoposte alla prova di permeabilità, all'età di 28 giorni, la quale è stata eseguita nuovamente per i successivi 30 giorni con l'obiettivo di conseguire una maggiore affidabilità dei risultati.

I risultati ottenuti dai campioni prismatici, relativi ai tre ambienti di cura, hanno mostrato come la presenza di SAP, in particolare di tipo B, all'interno della matrice cementizia ha determinato la richiusura completa di fessure con ampiezza compresa tra i 50 e 150  $\mu\text{m}$ , dimostrando una maggiore capacità di guarigione rispetto ai campioni di controllo nei quali la sigillatura è avvenuta solo parzialmente (figura 2.35). Questo comportamento è dovuto al fatto che le particelle di SAP sono in grado di assorbire umidità dall'esterno promuovendo il fenomeno di auto guarigione. Invece fessure di maggiore entità non hanno mostrato alcun effetto di guarigione.

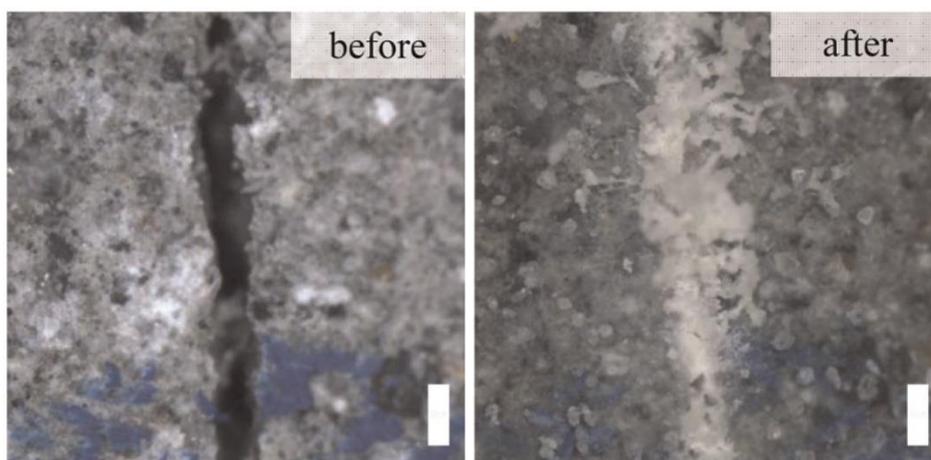


Figura 2-35: Sigillatura completa di una fessura con ampiezza 138  $\mu\text{m}$  di campioni contenenti l'1% di SAP e sottoposti a cicli di asciutto/bagnato. [30]

Per quanto riguarda il recupero delle proprietà meccaniche, in termini di resistenza di prima fessurazione, i campioni contenenti SAP di tipo B hanno mostrato un comportamento migliore rispetto a quelli di tipo A poiché quest’ultimi, a causa della dimensione minore delle particelle di cui sono composti, non sono in grado di ristabilire la continuità fra le due superfici di una fessura comportando una minore capacità di recupero della resistenza. E’ stato osservato inoltre che una maggiore percentuale di SAP, ad esempio il 4%, ha comportato una diminuzione del recupero delle proprietà dovuto alla formazione di un numero eccessivo di macro pori all’interno della matrice.

Per quanto concerne il recupero di permeabilità, i campioni contenenti SAP di tipo A hanno mostrato una scarsa capacità di guarigione dovuto alla dimensione delle particelle che risultano inefficaci per garantire una totale richiusura delle fessure. Anche in questo caso, è stato osservato una riduzione maggiore di permeabilità, nel tempo, per i campioni contenenti SAP di tipo B.

In conclusione, gli autori sostengono che l’utilizzo di polimeri super assorbenti all’interno della matrice cementizia è in grado di promuovere in modo efficace il fenomeno del *self-healing*, specialmente in presenza di umidità o acqua ed, inoltre, la dimensione delle particelle di cui sono composti risulta rilevante ai fini dell’auto guarigione. Infatti il comportamento migliore, in termini sia di recupero delle proprietà meccaniche sia della permeabilità, è stato osservato nei campioni contenenti l’1% di SAP di tipo B, rispetto a quelli di controllo.

#### 2.4.3. Prodotti incapsulati

Uno degli approcci studiati per la realizzazione di calcestruzzi in grado di avviare i processi di auto guarigione, è quello basato sull’utilizzo di agenti sananti posti all’interno di capsule, di forma sferica o cilindrica, e dispersi nella matrice cementizia. Quando le capsule vengono rotte, ad esempio in seguito ad un danno o ad una fessurazione, il meccanismo di *self-healing* viene attivato attraverso il rilascio e la successiva reazione dell’agente all’interno della fessura o della parte danneggiata.

Mentre alcuni agenti reagiscono a contatto con l’aria, con l’umidità o all’aumentare della temperatura (figura 2.36 A-B) o mediante il contatto con la matrice cementizia (figura 2.36 C-D), altri hanno la necessità di entrare a contatto con un altro componente disperso nella matrice (figura 2.36 E-F) o all’interno di altre capsule (figura 2.36 G-H).

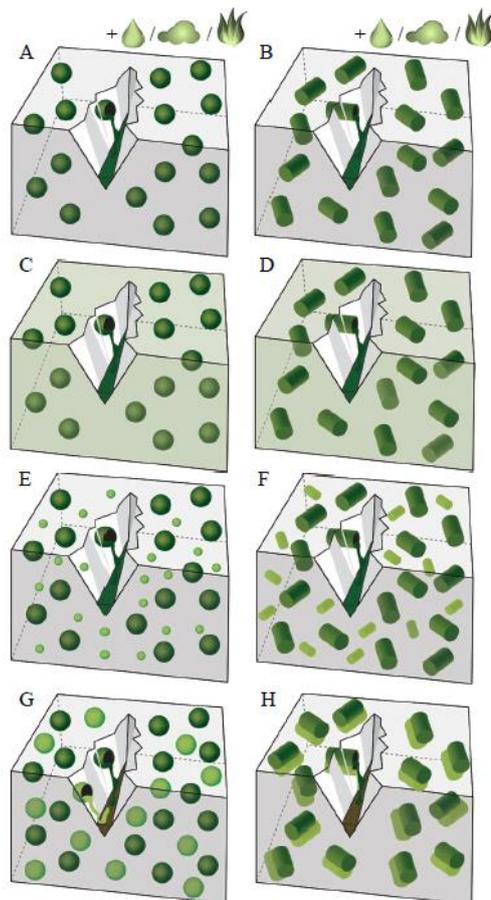


Figura 2-36: Prodotti incapsulati. Rilascio dell'agente sanante, confinato in capsule sferiche o cilindriche, all'interno della fessura. Reazione dell'agente dovuta: al contatto con l'umidità, con l'aria o all'aumento della temperatura (A, B); al contatto con la matrice cementizia (C, D); alla presenza di un secondo componente all'interno della matrice cementizia (E, F); alla presenza di un secondo componente posto in capsule separate (G, H). [31]

Dry [32] ha studiato il grado di applicabilità e longevità di calcestruzzi contenenti capsule cilindriche, confrontando i risultati ottenuti con quelli relativi al calcestruzzo ordinario. In particolare, le capsule contengono un forte adesivo ad alto modulo elastico capace di reagire, indurendosi, a contatto con l'aria. Lo studio ha previsto la fabbricazione di quattro diverse tipologie di piastre in calcestruzzo, a seconda del tipo di adesivo presente all'interno delle capsule:

- Tipologia 1, di controllo, non contenente alcun tipo di adesivo riparante;
- Tipologia 2, al cui interno sono presenti capsule contenenti cianoacrilato e, sulle superfici dei campioni, composti organici volatili (VOC – Volatile Organic Compounds);
- Tipologia 3, contenenti capsule con un adesivo riparante, disposte casualmente in un'area larga circa 60 cm in corrispondenza della mezzera dell'elemento e capsule con VOC posizionate trasversalmente al di sotto del lembo superiore del campione;
- Tipologia 4, al cui interno sono presenti capsule con un adesivo riparante, disposte solamente sulla superficie dell'elemento.

Le piastre in calcestruzzo sono state sottoposte a fessurazione per taglio, secondo lo schema illustrato in figura 2.37. Il carico è stato applicato dal basso verso l'alto, mediante l'utilizzo di un martinetto idraulico posto in mezzeria, con lo scopo di flettere la piastra ponendo in tensione il lembo superiore. La pressione indotta dal martinetto idraulico viene convertita in un carico applicato nella mezzeria della piastra. Una volta raggiunto un valore di 3,5 kN, il carico è stato fermato per circa quattro minuti, in seguito lasciato proseguire fino alla formazione delle prime fessure in mezzeria e successivamente fermato per ulteriori quattro minuti prima del termine della prova.

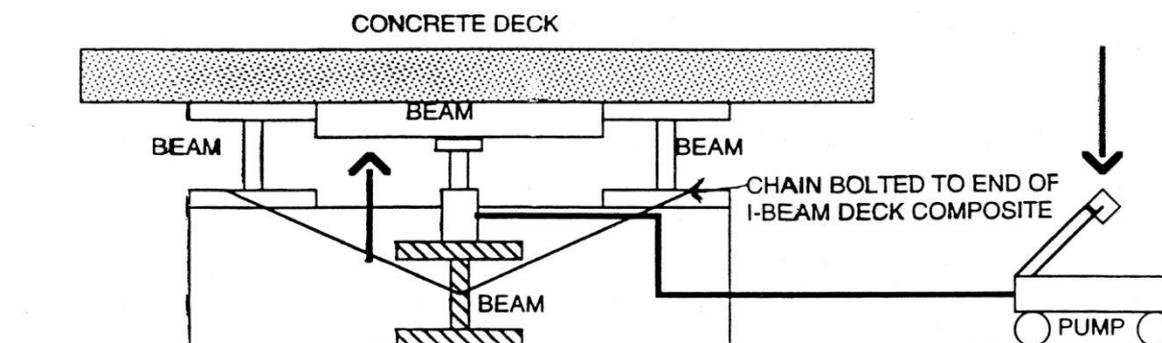


Figura 2-37: Schematizzazione della prova per indurre la fessurazione da taglio sulle piastre in calcestruzzo, mediante l'applicazione di un carico dal basso. [32]

A seguito della prova, su ciascuno dei campioni è stata osservata la fuoriuscita dell'adesivo ed è stata misurata la distanza tra le capsule danneggiate. Trascorsi alcuni mesi, le piastre sono state sottoposte nuovamente alla medesima prova fino a giungere alla loro completa rottura, con lo scopo di verificare il livello di guarigione delle fessure.

Dai risultati della seconda prova si evince che i campioni di controllo e quelli contenenti il cianoacrilato (tipologia 1 e 2) hanno mostrato valori di resistenza inferiori rispetto a quelli iniziali, mentre quelli contenenti l'adesivo riparante (tipologia 3 e 4) hanno dimostrato di possedere un buon comportamento, recuperando circa il 20% della resistenza. A causa della fuoriuscita di ulteriore adesivo dalle capsule, non rottesi al momento della prima prova, le lastre sono state poste a riposo per una durata di tre settimane per permettere all'adesivo di indurirsi, e successivamente sono state sottoposte ad una terza prova di carico. In questo caso è stato possibile osservare che i campioni contenenti il cianoacrilato hanno ottenuto un recupero della resistenza abbastanza modesto, dovuto probabilmente alla rottura di un maggior numero di capsule. Inoltre i provini appartenenti alla tipologia 4, con adesivo riparante posto solo sulla superficie superiore, hanno raggiunto un valore di recupero pari al 13% e in quelli di controllo, invece, è stato osservato una riduzione della resistenza, pari al 33%, in entrambe le prove.

In conclusione, con i risultati conseguiti è stato possibile dimostrare come l'utilizzo di adesivo ad alta resistenza, posto all'interno di capsule, conferisca un buon recupero della resistenza in seguito al danneggiamento di un elemento strutturale. La formazione delle fessure, infatti, porta alla rottura delle capsule disposte all'interno dell'elemento, le quali rilasciando l'adesivo

contenuto in esse permette di sigillare le fessure grazie all'indurimento di tale prodotto a contatto con l'aria. Inoltre è stato osservato che l'adesivo ha mantenuto le sue capacità riparanti, anche dopo un anno di vita.

Huang e Ye [33] hanno utilizzato capsule sferiche, di diametro 5 mm, contenenti una soluzione di silicato di sodio in grado di reagire con la matrice cementizia. Per la fabbricazione dei campioni è stato utilizzato un calcestruzzo rinforzato con fibre di poli-vinil-alcool (2%) e contenente scorie d'alto forno (1,4%). La metodologia utilizzata ha previsto la realizzazione di diverse serie di provini prismatici, di dimensioni 160x40x40 mm: quella di controllo caratterizzata dalla presenza di capsule vuote all'interno della matrice, una con capsule contenenti solo acqua ed infine due contenenti capsule con differente concentrazione di soluzione sanante (10 e 20 g/100g). Dopo un primo periodo di cura di 14 giorni in un ambiente con una temperatura costante di 20°C, sono stati prefessurati mediante la prova di flessione su tre punti fino alla formazione di fessure di ampiezza pari a 1,0 mm e, in seguito, posti nel medesimo ambiente di cura per una durata di 28 giorni. Al termine di tale periodo, i campioni sono stati sottoposti nuovamente alla stessa prova di flessione con lo scopo di determinare e confrontare i valori di resistenza a flessione, rigidità e capacità di deformazione.

I prodotti formati a seguito del periodo di cura sono stati esaminati mediante un microscopio ESEM (Environmental Scanning Electron Microscopy) ed è stato osservato che il calcio presente nella matrice cementizia ha reagito con la soluzione di silicato di sodio, interna alle capsule, portando alla formazione di gel C-S-H all'interno delle fessure. Per quanto riguarda il comportamento meccanico, sono stati posti a confronto i campioni contenenti capsule vuote con quelli di controllo al fine di valutare l'influenza della presenza delle capsule, all'interno della matrice. Infatti, i risultati mostrano una riduzione del 27% della resistenza a flessione, mentre la capacità di deformazione subisce una diminuzione di circa il 40%.

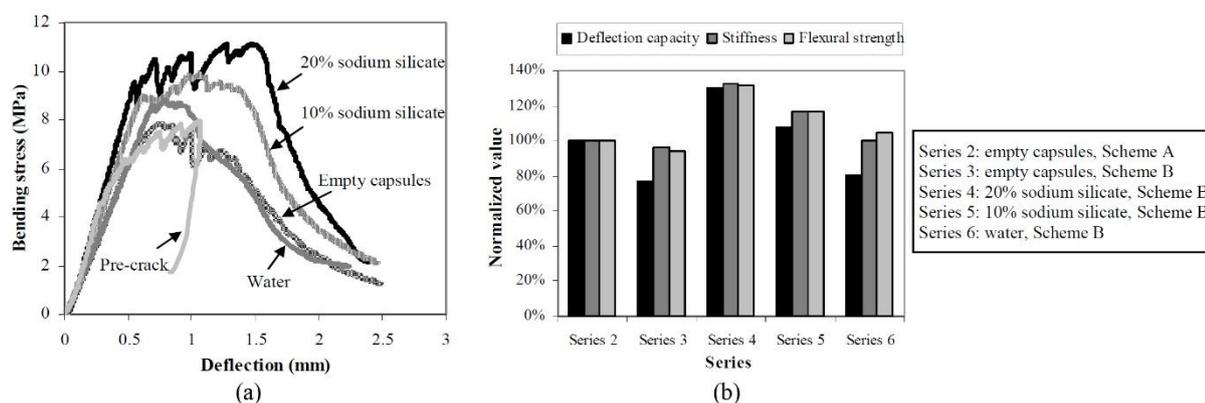


Figura 2-38: Comportamento meccanico delle diverse tipologie di campioni dopo il periodo di cura (a), confronto del recupero delle proprietà meccaniche delle diverse serie di campioni (b). [33]

In figura 2.38 sono stati riportati i grafici relativi al comportamento meccanico delle diverse tipologie di campioni analizzati. Dalla figura 2.38a è possibile constatare che la resistenza a flessione dei campioni contenenti la soluzione è risultata superiore ed in particolare una maggiore concentrazione della soluzione di silicato ha portato ad un recupero di resistenza

più elevato. La figura 2.38b, invece, mostra come i provini contenenti il 20% della soluzione di silicato di sodio (Series 4) abbiano raggiunto, grazie al *self-healing*, un valore di resistenza pari al 130% rispetto a quelli di riferimento (Series 2). Inoltre è opportuno osservare come la differenza di concentrazione della soluzione (Series 4 e 5) abbia comportato una differenza nelle proprietà meccaniche, in termini di resistenza a flessione e rigidità. Gli autori sostengono che tale differenza dipende dalla quantità e dalla coesione dei prodotti dell’autoriparazione. Infatti quando la concentrazione di silicato di sodio è nulla, come nei campioni contenenti capsule con solo acqua, la quantità dei prodotti è molto limitata. In conclusione, Huang e Ye affermano che sono necessari altri studi per determinare una concentrazione ottimale con lo scopo di garantire livelli soddisfacenti di auto guarigione del calcestruzzo.

#### 2.4.4. Approccio biologico

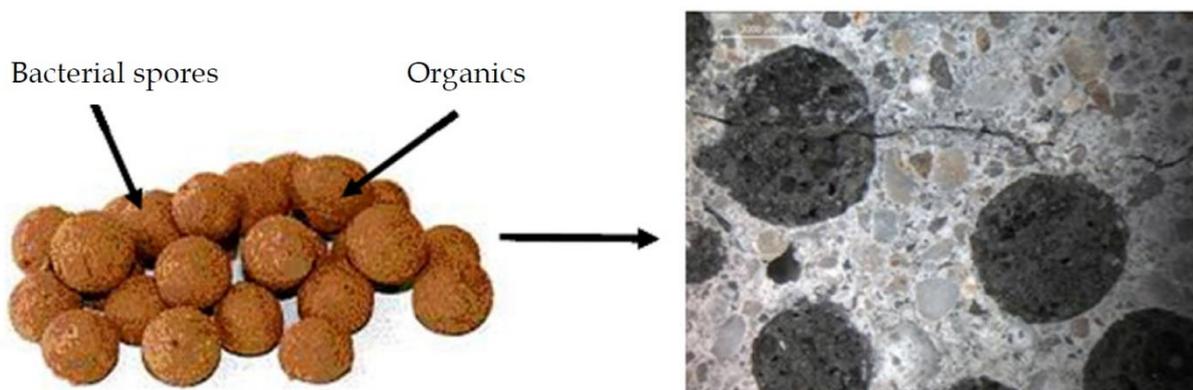
Un altro metodo per promuovere i meccanismi di *self-healing* mediante la precipitazione di carbonato di calcio è quello di stimolare i tali processi attraverso l’utilizzo di alcuni additivi per il calcestruzzo a base di spore batteriche in grado di produrre minerali.

Van Tittelboom *et al.* [34] nel 2010 hanno utilizzato una tipologia di batteri, i *Bacillus sphaericus*, incorporati all’interno di un gel di silice, il quale svolge la funzione di proteggere i batteri dall’ambiente fortemente alcalino del calcestruzzo. Lo studio ha previsto la fabbricazione di tre diverse tipologie di campioni prismatici che si differenziano per forma e per periodi di maturazione, suddivisi nelle tre seguenti categorie: una prima caratterizzata da campioni di controllo in calcestruzzo normale, una seconda nel quale i provini sono stati ricoperti da una resina bicomponente epossidica ed un’ultima contenente i batteri citati in precedenza immobilizzati all’interno di gel di silice.

La prefessurazione dei campioni cilindrici è stata effettuata mediante prova di splitting e, in seguito, sono stati posti in un ambiente con temperatura 20°C e umidità relativa al di sopra del 90% per una durata di un anno per garantirne la completa idratazione. Per valutare il livello di guarigione delle fessure è stata esaminata la variazione di permeabilità, effettuando prove a stagionature intermedie. Le misurazioni hanno mostrato una riduzione del flusso durante i primi giorni, trascorsi i quali l’andamento del flusso nel tempo è risultato quasi costante. Con diversi metodi di misura, è stata rilevata la completa chiusura delle fessure dovuta alla formazione di cristalli di carbonato di calcio, in particolare nei campioni protetti da resina o contenenti gel di silice. Ciò ha dimostrato la necessità di proteggere i batteri, permettendo di avviare le reazioni legate al fenomeno dell’auto guarigione. Gli autori concludono sostenendo che l’utilizzo di questa tecnica di riparazione è altamente consigliata poiché la precipitazione minerale, indotta a seguito di attività microbica, risulta del tutto naturale e non comporta alcun tipo di inquinamento. Tuttavia, affermano che sono necessari ulteriori studi per verificare la durata di questa tecnica.

Jonkers *et al.* [35] nel 2010 hanno studiato gli effetti dell'auto guarigione, aggiungendo alla matrice cementizia, specifici batteri appartenenti al genere *Bacillus*. E' stato osservato che, a contatto con acqua, i suddetti batteri e ulteriori composti organici aggiunti alla miscela, hanno prodotto una elevata quantità di cristalli di carbonato di calcio. Tuttavia è stato riscontrato che la durata di vita e la capacità di auto guarigione dei batteri risultava essere limitata ad un periodo di circa due mesi.

A risoluzione di questo problema inerente all'attività limitata dei batteri, Jonkers ha studiato un nuovo approccio [36], basato sull'uso di un composto biochimico di spore batteriche e un componente organico (lattato di calcio) entrambi immobilizzati all'interno di particelle porose di argilla espansa (figura 2.39). In questo modo, durante il periodo di maturazione del calcestruzzo, i batteri risulteranno protetti e saranno in grado di attivare il processo di riparazione nel momento in cui fosse necessario. Infatti Jonkers ha affermato che l'utilizzo di questa tecnica potrebbe estendere la vita delle spore batteriche fino a 50 anni.



*Figura 2-39: A sinistra, particelle di argilla espansa al cui interno sono presenti spore batteriche del genere *Bacillus* e un componente organico, lattato di calcio; a destra, particelle di argilla espansa, contenenti l'agente sanante, incorporate all'interno della matrice cementizia. [36]*

Lo studio ha previsto la fabbricazione di campioni cilindrici, di diametro 10 cm e altezza 1,5 cm, di due differenti tipologie: la prima, di controllo contenente solo particelle di argilla espansa, mentre la seconda contenente le particelle di argilla espansa al cui interno sono presenti batteri e componenti organici. Dopo due mesi di cura in immersione in acqua, i dischi sono stati sottoposti a prefessurazione e successivamente posti in acqua per 24 ore.

I risultati ottenuti mostrano che la presenza delle particelle produce un riduzione della resistenza a compressione di circa il 50%, ottenendo però una consistente capacità di riparazione. A seguito del periodo di cura, le fessure sono state esaminate mediante microscopio (figura 2.40) ed è stato osservato che i campioni contenenti particelle di argilla espansa con presenza di batteri hanno raggiunto una richiusura completa.



Figura 2-40: Evoluzione della fessura, prima e dopo il periodo di cura, dei campioni studiati. [36]

Jonkers conclude affermando che, proteggere i batteri all’interno di particelle di argilla espansa, ha allungato la loro vita e la capacità auto sanante da due a più di sei mesi.

Wang *et al.* [37], basandosi su studi precedenti [38], [39] hanno deciso di utilizzare nella propria ricerca i *Bacillus sphaericus*, caratterizzati da un’alta attività di ureasi, una lunga sopravvivenza e una produzione di carbonato di calcio semplice e controllabile. Gli autori affermano che le cellule batteriche hanno difficoltà a sopravvivere durante il processo di idratazione del calcestruzzo, pertanto hanno ritenuto necessario immobilizzarli con gel di silice o con un composto a base di poliuretano, all’interno di capsule cilindriche. Il poliuretano per reagire, formando una schiuma in grado di proteggere i batteri, ha bisogno della reazione tra due componenti: un prepolimero di poliuretano (PU A) e un acceleratore (PU B).

Sono state utilizzate capsule in vetro di diametro interno pari a 3 mm e una lunghezza di 40 mm, al cui interno è presente l’agente sanante, e incollate a coppie o a gruppi di tre in funzione del contenuto posto all’interno, ovvero solo gel di silice o i due composti necessari per la reazione del poliuretano. Sono state predisposte diverse composizioni, sempre con la presenza del mezzo necessario per la scomposizione dell’urea che serve a mantenere in vita i batteri. Inoltre sono stati fabbricati campioni di controllo, contenenti batteri morti o solo i materiali per l’immobilizzazione dei batteri, per confrontare la loro capacità di riparazione con quelli contenenti batteri vivi (figura 2.41).

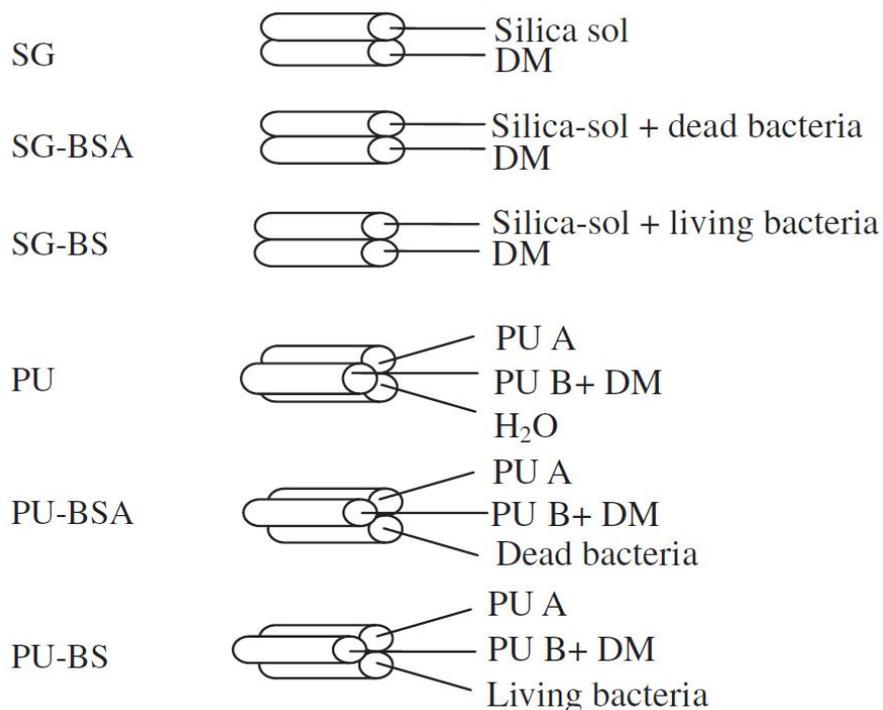


Figura 2-41: Tipologie di capsule in vetro utilizzate nel piano sperimentale. [37]

Il grado di guarigione è stato valutato misurando il recupero della resistenza e la riduzione della permeabilità all'acqua. Sono stati fabbricati due differenti tipi di campioni, mantenendo un rapporto a/c di 0,5: prismatici (40x40x160 mm) per studiare il recupero delle proprietà meccaniche e cilindrici (diametro 80 mm e altezza 22 mm) per misurare la permeabilità. Trascorse due settimane dalla fabbricazione, i provini sono stati sottoposti a prefessurazione mediante la prova a flessione su tre punti per i prismi e la prova di splitting per i cilindrici, creando fessure di ampiezza rispettivamente pari a 0,5 mm e circa 0,4 mm.

Dopo aver effettuato la prova, i campioni prismatici sono stati posti in una camera con temperatura e umidità costanti per una settimana e in seguito sottoposti nuovamente alla prova di flessione a tre punti. In figura 2-42a è possibile osservare come i campioni di controllo non abbiano mostrato alcun recupero di resistenza, mentre quelli con i batteri immobilizzati nel gel di silice hanno recuperato circa il 5% dovuto alla precipitazione di carbonato di calcio, all'interno delle fessure. Le specie contenenti i batteri immobilizzati nel poliuretano, invece, hanno raggiunto un livello di recupero soddisfacente, arrivando fino a valori di circa l'80%. In realtà non è stata riscontrata una differenza sostanziale tra i campioni contenenti i batteri vivi e quelli con i batteri morti. Gli autori sostengono che il recupero della resistenza sia dovuto principalmente alla presenza del poliuretano piuttosto che alla formazione di carbonato di calcio, poiché la quantità di cristalli precipitati all'interno della schiuma poliuretanicca era abbastanza limitata.

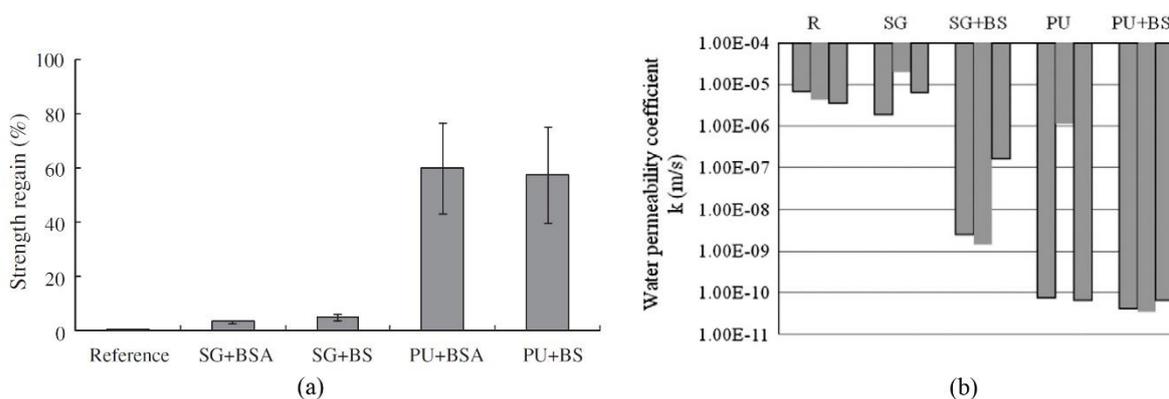


Figura 2-42: Recupero della resistenza dei campioni fessurati (a), permeabilità all'acqua dei cilindri fessurati dopo essere stati riparati dai diversi agenti sananti (b). [37]

Per riguarda i campioni cilindrici, durante la prova di permeabilità è stata osservata una fuoriuscita dei liquidi dalle capsule danneggiate al momento della fessurazione, perciò le specie sono state conservate in una camera a temperatura e umidità costanti per il periodo necessario alla formazione della schiuma poliuretanic. In seguito sono stati immersi in acqua per una durata totale di quattro giorni, trascorsi i quali è stata effettuata nuovamente la prova di permeabilità a pressione atmosferica. La prova è stata ripetuta durante i 30 giorni successivi alla prefessurazione, con lo scopo di osservare la variazione del coefficiente di permeabilità  $k$ . In figura 2.42b sono stati riportati i valori finali di tale coefficiente per ogni tipologia di campione studiata. Dai risultati si evince che in tutti i campioni contenenti i batteri è stata riscontrata una forte riduzione della permeabilità dovuta alla precipitazione di carbonato di calcio, nel caso del gel di silice, mentre negli altri per la presenza del poliuretano, materiale utilizzato prevalentemente come impermeabilizzante.

I risultati ottenuti in questo studio evidenziano come l'utilizzo di capsule contenenti composti necessari alla formazione di schiuma poliuretanic, contribuisca a raggiungere ottimi livelli di auto sanazione, in termini di recupero della resistenza e permeabilità all'acqua.

#### 2.4.5. Tubi fragili e prodotti sigillanti

Per innescare i processi legati al *self-healing* nel calcestruzzo, sono stati studiati altri approcci che prevedono l'utilizzo di una rete di tubi al cui interno è presente un materiale sigillante, in grado di chiudere le fessure al momento della loro formazione. Questa rete, inoltre, può essere collegata a serbatoi, esterni alla struttura, capaci di fornire continuamente i prodotti sigillanti. Il sistema può essere caratterizzato da singoli tubi, nel caso di un sigillante monocomponente (figura 2.43a), o molteplici quando si tratta di sigillante bicomponente (figura 2.43b).

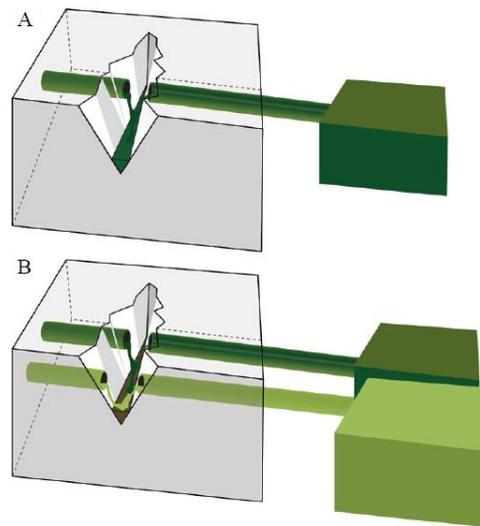


Figura 2-43: Fuoriuscita del materiale sigillante monocomponente (a) e del sigillante bicomponente (b), entrambi collegati a serbatoi esterni alla struttura. [31]

Nel 1996 Dry e McMillan [40] hanno utilizzato un adesivo tricomponente, il cui composto principale è il metilmetacrilato (MMA). Questo adesivo è composto da 100 parti di MMA, 4 parti di idroperossido di cumene e 2 parti di cobalto neodecanoato. Gli ultimi due composti sono i promotori necessari per avviare la reazione di polimerizzazione del MMA. Tuttavia il problema principale nell'utilizzare questi composti è che se mescolati insieme, senza la presenza del MMA, producono una reazione esplosiva. Come risoluzione al problema, i tre composti sono stati suddivisi in due gruppi: uno formato dal cobalto e MMA, e l'altro dal solo idroperossido di cumene. In figura 2.44 è stata riportata la sezione tipo dei campioni in calcestruzzo, nella quale è visibile la presenza dei tubi di vetro riempiti con la soluzione di MMA/cobalto, aventi diametro pari a 8,8 mm, e quello contenente l'idroperossido di cumene con diametro di circa 6,2 mm.

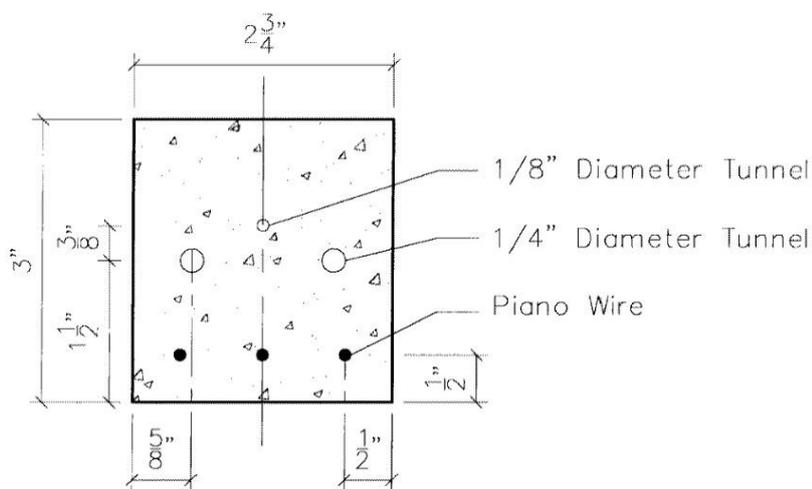


Figura 2-44: Sezione tipo dei campioni prismatici con cavi d'acciaio, tubi di diametro 8,8 mm contenenti la soluzione MMA/cobalto e tubo con idroperossido di cumene di diametro 6,2 mm. [40]

I campioni sono stati sottoposti alla prova di flessione su tre punti, aumentando il carico fino ad ottenere un abbassamento di 0,5 mm, e successivamente lasciati a riposo per 24 ore per permettere all’adesivo di indurirsi. Il giorno seguente è stata rieseguita la prova a flessione.

I risultati hanno mostrato che per i campioni con l’adesivo si raggiunge una resistenza a flessione pari al 130% rispetto al valore iniziale, mentre per quelli controllo si sono ottenuti valori inferiori nell’ordine del 65%. Gli autori concludono che la presenza dell’adesivo MMA ha permesso un notevole recupero di resistenza e una maggiore duttilità del materiale, restaurando così le proprietà meccaniche dell’elemento danneggiato.

Joseph *et al.* [41], basandosi sullo schema illustrato in figura 2.43a, hanno esaminato gli effetti della resistenza a flessione di campioni di calcestruzzo contenenti tubi di vetro riempiti con prodotti sigillanti. Come agente sanante, è stato utilizzato il cianoacrilato, un adesivo fluido in grado di indurire in tempi brevi quando entra a contatto con umidità e aria. E’ stata prevista la fabbricazione di provini prismatici al cui interno è stata posta un’armatura in acciaio, nel lembo inferiore, e tubi di vetro riempiti con il prodotto sigillante sopra descritto. Anche per i provini di controllo è stato previsto l’utilizzo di tubi di vetro al cui interno è stato iniettato semplice inchiostro, con lo scopo di poter visualizzare meglio la rottura del tubo al momento della fessurazione. Per valutare le condizioni dell’adesivo e la sua affidabilità nel tempo, sono state realizzate due diverse specie per effettuare il test dopo 28 e 70 giorni di cura. Trascorso il periodo di cura, i campioni sono stati sottoposti alla prova di flessione controllata su tre punti, fino alla formazione di fessure in corrispondenza dell’intaglio effettuato in mezzeria (figura 2.45). Dopo aver verificato la rottura dei tubi fragili, i prismi sono stati lasciati a riposo per 24 ore per garantire l’indurimento totale dell’adesivo e successivamente rieseguire la prova a flessione fino alla completa rottura. Grazie all’utilizzo di sensori di spostamento, è stato possibile elaborare i grafici carico-apertura di fessura (CMOD Crack Mouth Opening Displacement) durante l’esecuzione della prova.

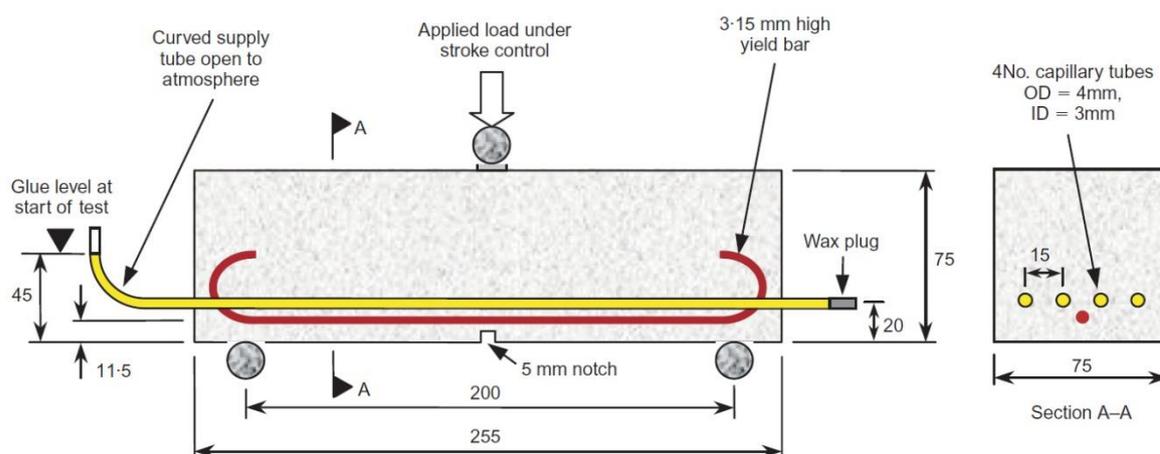


Figura 2-45: Schema della prova a flessione su tre punti dei campioni prismatici con armatura in acciaio e tubi contenenti l’adesivo cianoacrilato. [41]

I risultati ottenuti dalle prove sono riportati in figura 2.46. E' possibile osservare nel grafico a sinistra come fino alla prima fessurazione il comportamento delle due specie sia molto simile, dopodiché è visibile un cambio apprezzabile. Questo cambiamento è dovuto al fatto che il cianoacrilato contenuto nei campioni ha subito una rapida reazione di indurimento dovuta alla presenza di umidità e all'ambiente alcalino della matrice cementizia, comportando un aumento notevole della resistenza.

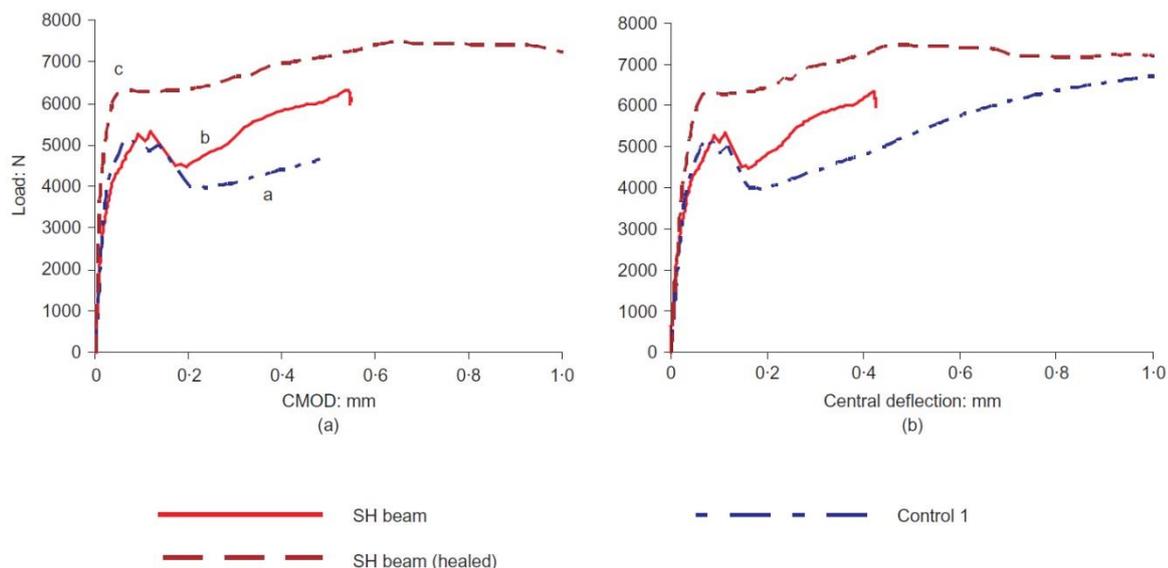


Figura 2-46: Grafici carico-apertura di fessura (a) e carico-spostamento (b). Confronto tra i campioni di controllo (curva "a"), portati a rottura, e i campioni contenenti l'adesivo, sottoposti a due cicli di carico (curva "b" per il primo carico e "c" per il secondo). [41]

Sempre dalla figura 2.46a, è possibile notare come la presenza dell'adesivo ha apportato una maggiore resistenza, circa del 20%, rispetto ai campioni di riferimento. Ciò è dovuto al fatto che il cianoacrilato, non solo ha richiuso la fessura formatasi, ma ha reso il materiale più duttile. In figura 2.46b, invece, è visibile come lo spostamento finale delle due tipologie di campioni venga raggiunto con un carico simile. Per quanto riguarda la differente età di cura, non sono state rilevate differenze sostanziali tra le due serie di campioni.

Dalle ricerche presentate si evince che la presenza di adesivi, all'interno di un elemento danneggiato, permette un buon recupero delle proprietà meccaniche. Tuttavia, all'interno di questo approccio, restano ancora irrisolti i problemi legati alla quantità di adesivo necessaria alla completa chiusura delle fessure. Inoltre non è stato effettuato nessuno studio di fattibilità relativo a tale sistema e quindi una possibile applicazione nel campo edilizio risulta ancora a livello teorico.

#### 2.4.6. Altri approcci

Tutti gli studi descritti finora hanno dimostrato come, mediante l’utilizzo di tecniche e metodologie appropriate, sia possibile realizzare elementi in calcestruzzo in grado di “guarire” autonomamente, estendendo così la propria vita utile. Nonostante i risultati ottenuti siano abbastanza rilevanti, è opportuno sottolineare che molti di questi approcci sono ancora in fase iniziale e richiedono un’attenta valutazione sulla fattibilità economica e sulla loro reale applicabilità. Vengono ora riportati ulteriori approcci che non rientrano nelle categorie sopra descritte.

Nishiwaki *et al.* [42] hanno studiato una nuova tipologia di calcestruzzo intelligente caratterizzato dalla presenza di dispositivi in grado di rilevare un danno e di avviare il processo di riparazione. L’idea è quella di permettere la riparazione del danno senza l’intervento diretto da parte dell’uomo, ma utilizzando sistemi di controllo remoto posti all’interno dell’elemento strutturale.

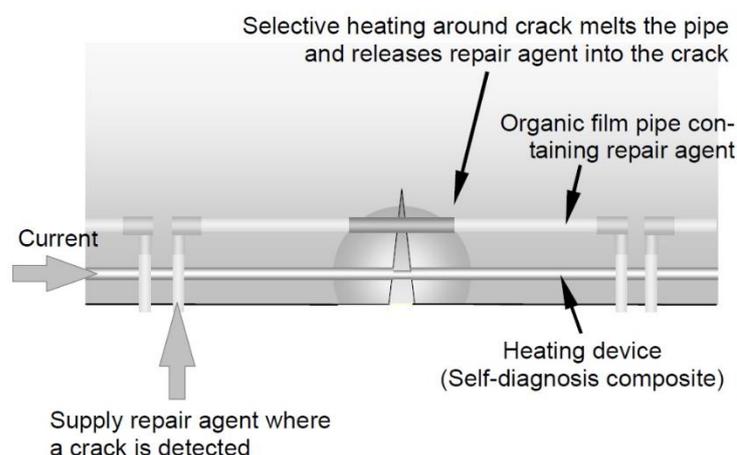


Figura 2-47: Schema di funzionamento del sistema smart concrete di Nishiwaki *et al.* [42]

In figura 2.47, è visibile lo schema di funzionamento del sistema che si basa sulla presenza di un dispositivo in grado di aumentare la temperatura ed effettuare l’autodiagnosi del danno e una tubatura organica contenente l’agente sanante. Gli autori affermano che sarà necessario effettuare altri studi inerenti a tale sistema, poiché dai risultati ottenuti è stato osservato un funzionamento ancora non del tutto soddisfacente. Inoltre le prove di permeabilità all’acqua hanno dimostrato che il fenomeno del *self-healing* ha permesso una importante riduzione del flusso d’acqua all’interno della fessura.

Sangadji e Schlangen [43], [44] hanno proposto uno studio interessante nel quale l’idea principale è quella di imitare i sistemi vascolari naturali presenti, ad esempio, nelle parti spugnose delle ossa (figura 2.48a). Per concretizzare questa idea, sono stati fabbricati campioni cilindrici contenenti all’interno un reticolo poroso, prefabbricato e posto negli stampi prima del getto, nel quale è stato iniettato un agente in grado di riparare una fessura al momento della sua formazione (figura 2.48b).

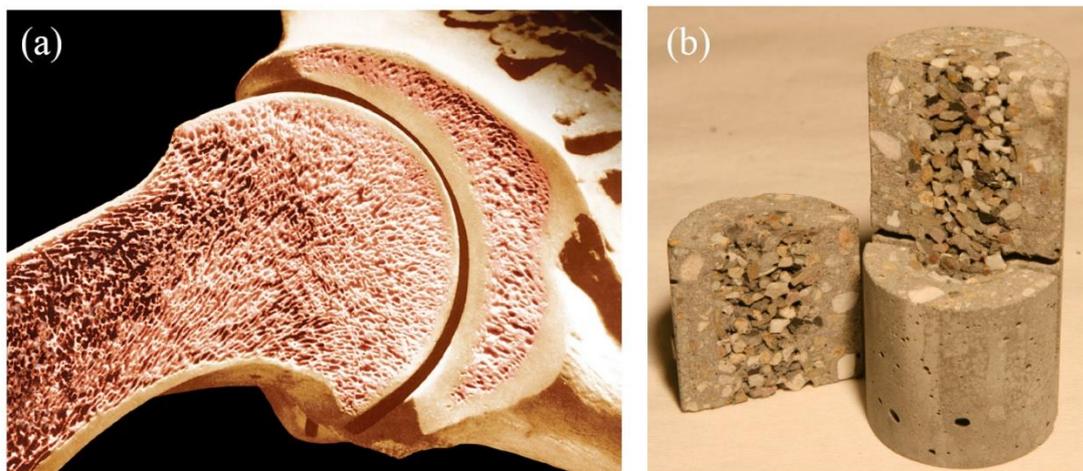


Figura 2-48: Sezione di un osso esternamente compatto e internamente spugnoso (a), sezione di un campione cilindrico in calcestruzzo poroso. [43], [44]

E' stato osservato dai risultati ottenuti dalle prove che il metodo analizzato funziona correttamente e che i campioni hanno mostrato un buon recupero della resistenza a flessione, raggiungendo il 133% del valore iniziale.

## 2.5. Studi precedenti

Il lavoro di tesi svolto da M. Roig Flores [45] nel 2013 ha avuto come obiettivo quello di studiare l'effetto di diversi dosaggi e tipologie di additivo cristallino sulla capacità di autoguarigione di un calcestruzzo fibrorinforzato, valutata in termini di permeabilità e resistenza meccanica. Il programma sperimentale da lei adottato ha previsto la fabbricazione di un calcestruzzo con rapporto a/c pari a 0,45, rinforzato con fibre di acciaio disperse nella matrice cementizia e con l'aggiunta di due tipi di additivo cristallino (AC tipo A, AC tipo B). Sono state considerate quattro diverse miscele di calcestruzzo, caratterizzate da una diversa percentuale in peso di cemento dell'additivo cristallino:

- 0% AC, campioni di controllo;
- 2% AC tipo A;
- 4% AC tipo A;
- 2% AC tipo B.

I campioni fabbricati sono di due tipologie, cilindrici e prismatici, utilizzati rispettivamente per lo studio della permeabilità e della resistenza a flessione. Nel primo caso, il danno è stato prodotto a due differenti età di maturazione, a 2 giorni e a 2 mesi, mediante la prova a trazione indiretta (figura 2.49a), mentre nel secondo caso è stata utilizzata la prova a flessione semplice o su tre punti (figura 2.49b) prefessurando i campioni alle età di 6 giorni e 1 mese. In entrambe le prove è stata eseguita una fessurazione controllata grazie all'utilizzo del calcestruzzo

fibrorinforzato in grado di aumentare la duttilità e permettere una rottura non completamente fragile. Sono state considerate, perciò, tre differenti ampiezze, rispettivamente pari a 0,2 mm, 0,4 mm e 0,6 mm, così da osservare il grado di guarigione nelle diverse tipologie di fessura.

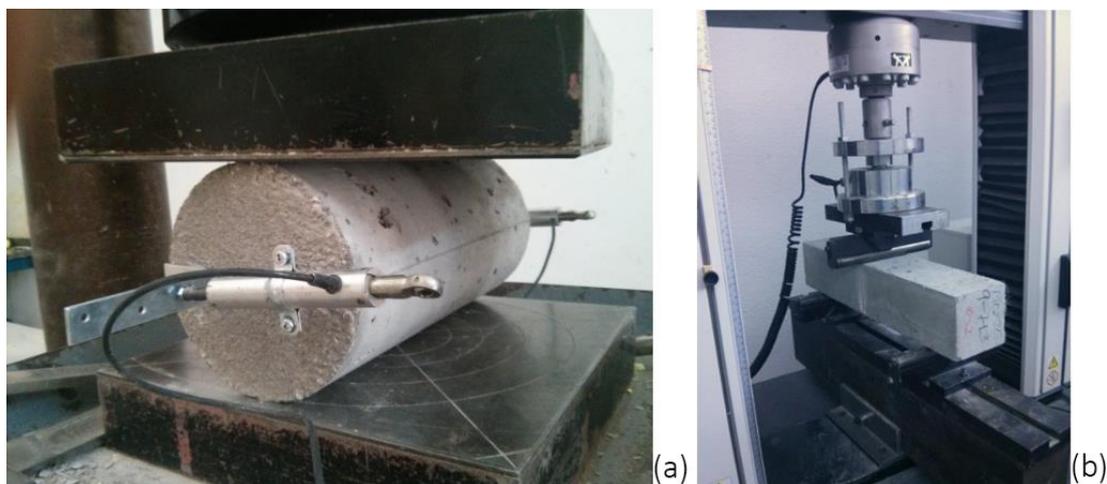


Figura 2-49: Campioni cilindrici prefessurati mediante prova a trazione indiretta, o brasiliana (a), prismatiche sottoposte alla prova a flessione su tre punti(b). [45]

Eseguita la prefessurazione, i campioni prismatici, con e senza l'additivo cristallino, sono stati immersi in acqua in due vasche distinte per una durata di 56 giorni. Mentre per quelli cilindrici è stata eseguita la prova di permeabilità con lo scopo di calcolare il volume di acqua passante attraverso la fessura e poterlo confrontare con il valore ottenuto al termine della cura. È stata considerata una pressione del flusso di acqua pari a  $1\div 2$  bar e un tempo di esecuzione della prova pari a 5 minuti. Al termine della stessa, i campioni sono stati sottoposti, per una durata di 56 giorni, ad un ambiente di cura caratterizzato dalla presenza di 2 cm di acqua su una delle due facce del cilindro, conservandoli in una camera umida a temperatura di  $20^{\circ}\text{C}$  e in condizioni di saturazione per tutto il periodo di cura.

Per la valutazione del recupero delle proprietà, le rispettive prove sono state eseguite nuovamente al termine dei 56 giorni di cura. A ciò, è stata affiancata l'analisi dell'ampiezza delle fessure, effettuata attraverso l'uso di strumenti ottici, così da poter osservare l'evoluzione dell'aspetto delle fessure durante il periodo di cura e l'eventuale riduzione di ampiezza. Dai risultati ottenuti dalla prova di permeabilità è stata osservata una capacità limitata di riduzione del flusso di acqua per quei campioni contenenti l'additivo cristallino. Infatti i provini di controllo hanno presentato un comportamento sensibilmente migliore garantendo una completa ri-chiusura delle fessure con un parziale e, a volte, totale annullamento del flusso passante attraverso la fessura. La differenza tra le due tipologie di calcestruzzo, invece, è stato maggiormente evidente per fessure di piccola ampiezza dove la presenza dell'additivo cristallino, in particolare con un dosaggio del 4% del tipo A, ha permesso di raggiungere una maggiore riduzione del flusso rispetto ai campioni di controllo. Inoltre non

è stata osservata nessuna differenza rilevante tra l'additivo di tipo A e quello di tipo B. In particolare, è stato osservato che risulta necessario aumentare il contenuto di tale prodotto fino ad un 4% in peso di cemento per ottenere un comportamento maggiormente apprezzabile rispetto ai campioni di controllo.

Per quanto riguarda il recupero di resistenza a flessione, le due tipologie di calcestruzzo non hanno presentato nessuna differenza sostanziale mostrando un comportamento del tutto analogo.

Effettuando un confronto tra le diverse età di prefessurazione, è stato osservato che le fessure prodotte in età giovane hanno presentato risultati analoghi in tutte le miscele analizzate. In età più avanzata, invece, i campioni con additivo cristallino con un dosaggio pari al 4% in peso di cemento hanno dimostrato di avere un comportamento migliore. L'autore ha affermato che questa differenza potrebbe essere dovuta al fatto che nei primi 28 giorni di vita del calcestruzzo è ancora in atto il processo di idratazione. Al contrario, in età avanzata questa reazione non presenta più nessuna influenza sulla capacità di autoguarigione del calcestruzzo, la quale è promossa, in questo caso, dalla sola presenza degli additivi cristallini all'interno della matrice cementizia.

In funzione dei risultati ottenuti, M. Roig Flores ha concluso affermando che l'utilizzo degli additivi cristallini, in particolare con una percentuale del 4% in peso di cemento, può risultare vantaggioso nel caso di fessure di ampiezza ridotta, realizzate sia in età giovane che avanzata. Ha affermato, inoltre, che sono necessari studi più approfonditi per comprendere l'effettiva efficacia di questi prodotti sulla capacità di autoguarigione del calcestruzzo.

## Capitolo 3 - METODOLOGIA E PROGRAMMA SPERIMENTALE

### 3.1. Obiettivi dello studio

Nel capitolo 1 è stato spiegato quali sono i benefici che il *self-healing* può apportare alle strutture in calcestruzzo e come l'utilizzo di specifici prodotti possa promuovere le capacità di autoguarigione, legate ad un parziale o totale recupero delle proprietà fisico-meccaniche del materiale consentendo, di conseguenza, un aumento di durabilità. Questa ricerca si propone come principale obiettivo quello di valutare quale sia l'influenza degli additivi cristallini, già presenti sul mercato come riduttori di permeabilità, sui processi legati al fenomeno del *self-healing* e come l'aggiunta di tali prodotti possa promuovere la formazione dei prodotti di autoriparazione all'interno di fessure formatesi durante l'esercizio della struttura.

Tra tutti i possibili approcci descritti nel capitolo 2, la scelta di utilizzare i soli additivi cristallini è stata effettuata poiché, a parità di risultati, sono caratterizzati da una facilità di impiego e da costi relativamente contenuti. Con lo scopo di verificarne l'effettiva influenza e osservare apprezzabili differenze con i campioni di controllo, è stato deciso di utilizzare una concentrazione pari al 4% del volume di cemento.

Il principale scopo per un calcestruzzo autoriparante è quello di garantire un livello di durabilità alto, dove quest'ultimo risulta essere un parametro governato dalla permeabilità del calcestruzzo. Con questo presupposto, lo scopo della ricerca è stato quello di studiare la variazione di permeabilità per effetto dell'additivo cristallino potendo così valutare gli effetti dell'autoguarigione.

Precedenti studi hanno confermato che la presenza di acqua risulta essere la condizione necessaria affinché la reazione di autoriparazione avvenga. Coscienti di ciò, è stato deciso di studiare tre differenti ambienti di cura con l'obiettivo di analizzare quali sono le condizioni al contorno che maggiormente influiscono sull'autoguarigione del calcestruzzo. Sono stati considerati, quindi, ambienti caratterizzati dalla presenza continua o parziale di acqua con volume prestabilito e temperatura variabile.

I tre ambienti di cura analizzati sono:

- Immersione in acqua con temperatura di 15°C;
- Immersione in acqua con temperatura di 30°C;
- Cicli asciutto/bagnato, caratterizzati dall'immersione in acqua con temperatura di circa 15°C e successiva esposizione all'aria con temperatura di circa 17°C e 40% di U.R.

La definizione di queste condizioni permette di identificare quali sono le tipologie di strutture che possano beneficiare degli effetti legati al fenomeno dell'autoguarigione, promossi dagli additivi cristallini. Infatti ogni ambiente studiato simula una precisa condizione alla quale le strutture si trovano normalmente esposte. Nel caso dell'immersione in acqua a temperatura

15°C risulta immediato pensare a strutture di fondazione o infrastrutture legate alla ritenzione delle acque, come ad esempio le dighe o semplici serbatoi. Anche l'ambiente caratterizzato dall'alternanza tra immersione ed esposizione all'aria potrebbe rientrare in queste categorie in quanto simula condizioni alle quali sono sottoposte strutture come ad esempio piloni di ponti o dighe dove il livello dell'acqua è costantemente variabile e, quindi, una parte della struttura potrebbe trovarsi in condizioni bagnate o asciutte ad intervalli irregolari. L'ambiente più particolare risulta essere quello corrispondente all'immersione in acqua a temperatura di 30°C poiché anch'esso potrebbe imitare condizioni alle quali sono soggette le tipologie di strutture esposte in precedenza, ma con la presenza di climi molto caldi. La scelta di questo tipo di condizione è stata effettuata poiché è ben noto che un aumento di temperatura comporti un incremento della velocità di reazione. Con questo presupposto, è stato ritenuto interessante comprendere quali fossero gli effetti dell'autoguarigione e il contributo dato dagli additivi cristallini.

Analizzando i programmi sperimentali adottati in studi precedenti e aventi il medesimo obiettivo, si è cercato di capire se ci fosse la necessità di apportare migliorie alle fasi principali e alle relative procedure con l'obiettivo di perfezionare l'intero processo che porterà al raggiungimento dei risultati.

### 3.2. Considerazioni sulla metodologia di riferimento

In questo paragrafo viene riportata la metodologia sviluppata nel Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università Politecnica di Valencia ed utilizzata da S. Moscato [46] nella sua tesi di laurea. Si è partiti dal lavoro svolto da quest'ultimo, analizzando i risultati ottenuti e le procedure di esecuzione delle prove e, con l'obiettivo di migliorare il metodo e ottenere risultati più attendibili sono state apportate alcune modifiche relative alle prove eseguite e all'ordine di esecuzione delle stesse. Di seguito viene riportato uno schema delle fasi principali della metodologia sperimentale utilizzata:

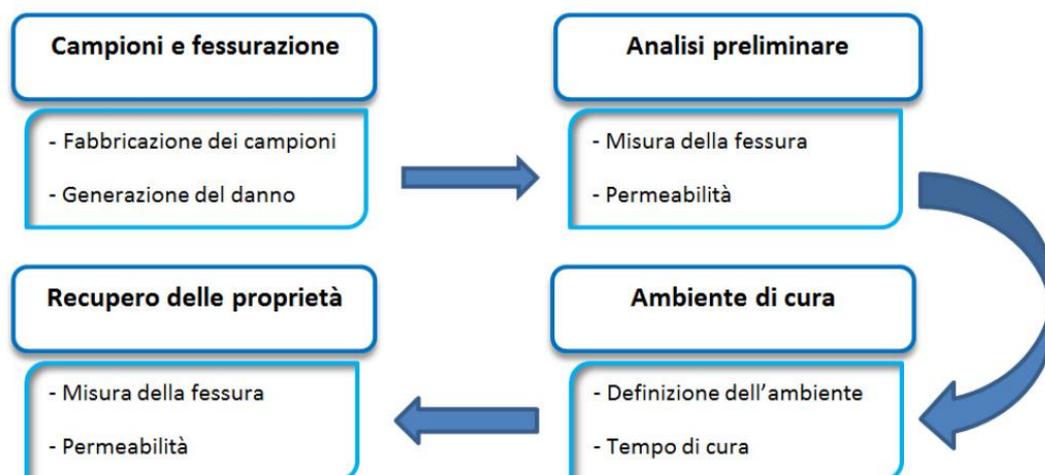


Figura 3-1: Schema della metodologia sperimentale utilizzata. [46]

L'obiettivo è stato quello di valutare gli effetti del *self-healing* relativo alla chiusura delle fessure e come questo fenomeno possa influire sul recupero della permeabilità di campioni in calcestruzzo fibrorinforzato fessurati in precedenza. È stata eseguita una valutazione del danno, e del successivo recupero, mediante l'utilizzo di strumenti ottici e la misurazione della permeabilità, quest'ultima intesa come il passaggio di un flusso di acqua all'interno della fessura.

Il programma sperimentale ha previsto la fabbricazione di campioni cilindrici caratterizzati da un rapporto acqua/cemento pari a 0,45 e con aggiunta di fibre in acciaio per controllare la fragilità del materiale. Sono state utilizzate due diverse miscele di calcestruzzo, nelle quali è stata variata la percentuale di additivo cristallino in peso di cemento:

- Campioni di controllo, senza additivo cristallino;
- Campioni contenenti il 4% di additivo cristallino.

Per ogni tipologia di ambiente e di miscela, sono stati selezionati 3 cilindri che verranno successivamente sottoposti alla prova di compressione a 28 giorni, determinando così la classe di resistenza del calcestruzzo utilizzato. I restanti, invece, sono stati divisi a metà mediante l'utilizzo di una sega circolare per calcestruzzi, e in seguito prefessurati all'età di 2 giorni con il metodo della prova di trazione indiretta, o brasiliana, utilizzando una pressa idraulica.

L'obiettivo è stato quello di eseguire una fessurazione controllata, aumentando il carico a bassa velocità fino al raggiungimento di fessure con ampiezza massima compresa tra 0,1÷0,3 mm, effettuando la misurazione mediante la sovrapposizione di un micrometro. Prima di effettuare la prova di permeabilità, è stata utilizzata una pasta sigillante, posta sulle superfici laterali e in parte su quelle superiori dei campioni, ovvero lì dove è avvenuta la formazione di una serie di fessure causate dall'azione dei piatti della pressa. L'applicazione della pasta è stata necessaria per assicurare che, durante la prova di permeabilità, il flusso d'acqua attraversi le sole superfici di base e non quelle laterali.

La prova di permeabilità consiste nel sottoporre i cilindri ad un flusso d'acqua con pressione variabile tra 1,9 e 2,1 bar per una durata di 5 minuti, al termine dei quali è stata raccolta e pesata l'acqua passante attraverso la fessura. In seguito i campioni sono stati posti nei rispettivi ambienti di cura per una durata di 42 giorni. Sono stati studiati quattro diversi ambienti di cura:

- Immersione in acqua;
- Camera umida in condizioni di saturazione, a temperatura di 20°C e 95-100% di U.R.;
- Esposizione all'aria;
- Condizione in cui la fessura si trova costantemente bagnata, con la presenza di uno strato di 2 cm di acqua sopra una delle due facce.

Oltre allo studio della permeabilità, è stata effettuata un'analisi qualitativa della fessura mediante l'utilizzo di foto scattate con un microscopio ottico. Ciò ha permesso di comporre panorami ad alta risoluzione con l'obiettivo di osservare lo stato delle fessure prima e dopo il periodo di cura.

Al termine del periodo di cura, è stata eseguita una pulitura della fessura utilizzando un compressore ad aria con pressione posta a 2 bar. In seguito sono state scattate nuovamente le foto con il microscopio ed eseguita la prova di permeabilità con l'obiettivo di confrontare i risultati ottenuti con quelli iniziali.

Per la valutazione delle fessure, e la sua evoluzione dopo il periodo di cura, sono state sperimentate diverse metodologie di misurazione calcolando l'apertura massima, media e l'area della fessura. Con l'ausilio di software grafici, è stato possibile misurare la dimensione della fessura in punti prestabiliti ed equidistanti tra di loro e mettere in relazione la misura in pixel registrata dal programma con la misura reale in millimetri della fessura.

Prima analisi della metodologia utilizzata durante il periodo di studio, è stata valutata la possibilità di apportare delle migliorie ad alcune fasi principali e all'ordine di esecuzione delle lavorazioni. In primo luogo, l'utilizzo di un compressore ad aria per la pulitura delle fessure, successiva al periodo di cura, è stato ritenuto compromettente poiché il getto di aria con pressione 2 bar potrebbe danneggiare i prodotti formati sulla superficie della fessura. È stato deciso quindi di eliminare questa fase dal programma sperimentale. Inoltre è stata apportata una modifica nell'ordine delle operazioni, scegliendo di effettuare prima la prova di permeabilità e successivamente scattare le foto al microscopio. Questo cambio ha permesso

di osservare il reale stato di guarigione della fessura, in quanto i cristalli rimasti sulla fessura sono quelli capaci di sopportare un flusso d'acqua ad una pressione di 2 bar, e di conseguenza quelli che conferiscono al materiale un ottimo grado di impermeabilità.

Infine con l'obiettivo di rendere più semplice e oggettiva l'analisi sono stati posti alcuni accorgimenti per quanto riguarda la metodologia di misurazione delle fessure attraverso l'utilizzo dei panorami.

### 3.3. Programma sperimentale

Il programma sperimentale prevede l'utilizzo di due calcestruzzi fibrorinforzati, caratterizzato da un rapporto acqua/cemento pari a 0,45 e 0,60, per la fabbricazione di campioni cilindrici aventi diametro 150 mm e altezza 300 mm, in seguito divisi a metà ottenendo un'altezza di circa 140 mm. Per ogni tipologia di ambiente e di miscela sono stati preparati due serie di campioni:

- AM, calcestruzzo fibrorinforzato di controllo contenente una percentuale di additivo cristallino pari allo 0% in volume di cemento;
- AM4S, calcestruzzo fibrorinforzato contenente una percentuale di additivo cristallino pari al 4% in volume di cemento.

Al termine della miscelazione, l'impasto è stato gettato in casseforme cilindriche e lasciato maturare all'aria non trattata di laboratorio per una durata di 24 ore. In seguito i provini sono stati liberati dalle forme e posti all'interno di una camera con umidità relativa pari al 100%. Le quantità dei singoli materiali sono state calcolate con l'obiettivo di realizzare dieci cilindri per ogni impasto.

Il terzo giorno, si effettua una suddivisione in due gruppi: il primo composto da sette cilindri, i quali vengono selezionati per essere sottoposti alle lavorazioni necessarie allo studio; i tre restanti, appartenenti al secondo gruppo, verranno utilizzati per determinare la classe di resistenza del calcestruzzo eseguendo la prova a compressione a 28 giorni. I sette cilindri scelti per lo studio verranno divisi a metà con l'ausilio di una sega circolare per calcestruzzi e, in seguito verranno prefessurati con il metodo a trazione indiretta. La prova è stata effettuata utilizzando una pressa idraulica e, data la natura duttile del calcestruzzo fibrorinforzato, è stato possibile aumentare il carico gradualmente fino a raggiungere fessure di ampiezza compresa tra 0,1÷0,4 mm. Al termine della prova, è stato necessario applicare una pasta sigillante, di natura epossidica, sulle superfici laterali e superiori dei campioni, la quale ha bisogno di circa 24 ore per completare la reazione di indurimento.

Trascorso il periodo di attesa, è stato possibile valutare il danno prodotto, in termini di apertura di fessura, attraverso l'analisi di foto scattate con un microscopio ottico. Successivamente i cilindri sono stati sottoposti alla prova di permeabilità e, pesata la quantità di acqua passata attraverso la fessura, sono stati posti nei rispettivi ambienti di cura per una durata complessiva di quarantadue giorni. Al termine del periodo di cura, è stata eseguita nuovamente sia la prova di permeabilità sia l'analisi con strumenti ottici, confrontando i valori ottenuti con quelli iniziali.

Inizialmente, per ogni tipologia di ambiente e di miscela sono stati analizzati 14 campioni. Una volta analizzati i risultati ottenuti, si è ritenuto opportuno realizzare ulteriori provini cilindrici con rapporto acqua/cemento pari a 0,45 e 0,60 con l'obiettivo di aumentare l'attendibilità dei risultati. Qui di seguito viene riportato il numero dei cilindri analizzati in funzione degli ambiente di cura e del rapporto acqua/cemento:

- Immersione in acqua con una temperatura di 15°C:
  - 44 cilindri aventi un rapporto acqua/cemento pari a 0,45, di cui 22 di controllo e 22 con additivo;
  - 44 cilindri aventi un rapporto acqua/cemento pari a 0,60, di cui 22 di controllo e 22 con additivo;
- Immersione in acqua con una temperatura di 30°C:
  - 28 cilindri aventi un rapporto acqua/cemento pari a 0,45, di cui 14 di controllo e 14 con additivo;
- Cicli asciutto/bagnato, caratterizzati dall'immersione in acqua con temperatura di 15°C per una durata di 3 giorni e mezzo e successiva esposizione all'aria non trattata di laboratorio per ulteriori 3 giorni e mezzo:
  - 28 cilindri aventi un rapporto acqua/cemento pari a 0,45, di cui 14 di controllo e 14 con additivo.

Ai fini dello studio della capacità di autoriparazione del calcestruzzo utilizzato, sono stati analizzati in totale 144 campioni cilindrici, dei quali 72 di controllo e 72 con additivo, mentre 39 sono stati utilizzati per determinare la resistenza a compressione a 28 giorni (dimensioni dei cilindri prescritte dalla norma UNI EN 12390).

Per quanto riguarda la valutazione del danno in termini di apertura di fessura, sono state scattate foto in corrispondenza della fessura, le quali hanno permesso di comporre una serie di panorami ad alta risoluzione. In questo modo, con l'ausilio di software grafici, è stato possibile analizzare e osservare le fessure e il loro cambiamento dopo il periodo di cura. In particolare sono stati composti 1008 panorami da 4032 foto scattate con il microscopio.

Sono state eseguite, inoltre, prove aggiuntive per verificare qualitativamente la natura dei prodotti formati al termine del periodo di cura e la loro consistenza o durezza.

Per una migliore comprensione del piano sperimentale descritto finora, viene riportato di seguito uno schema.

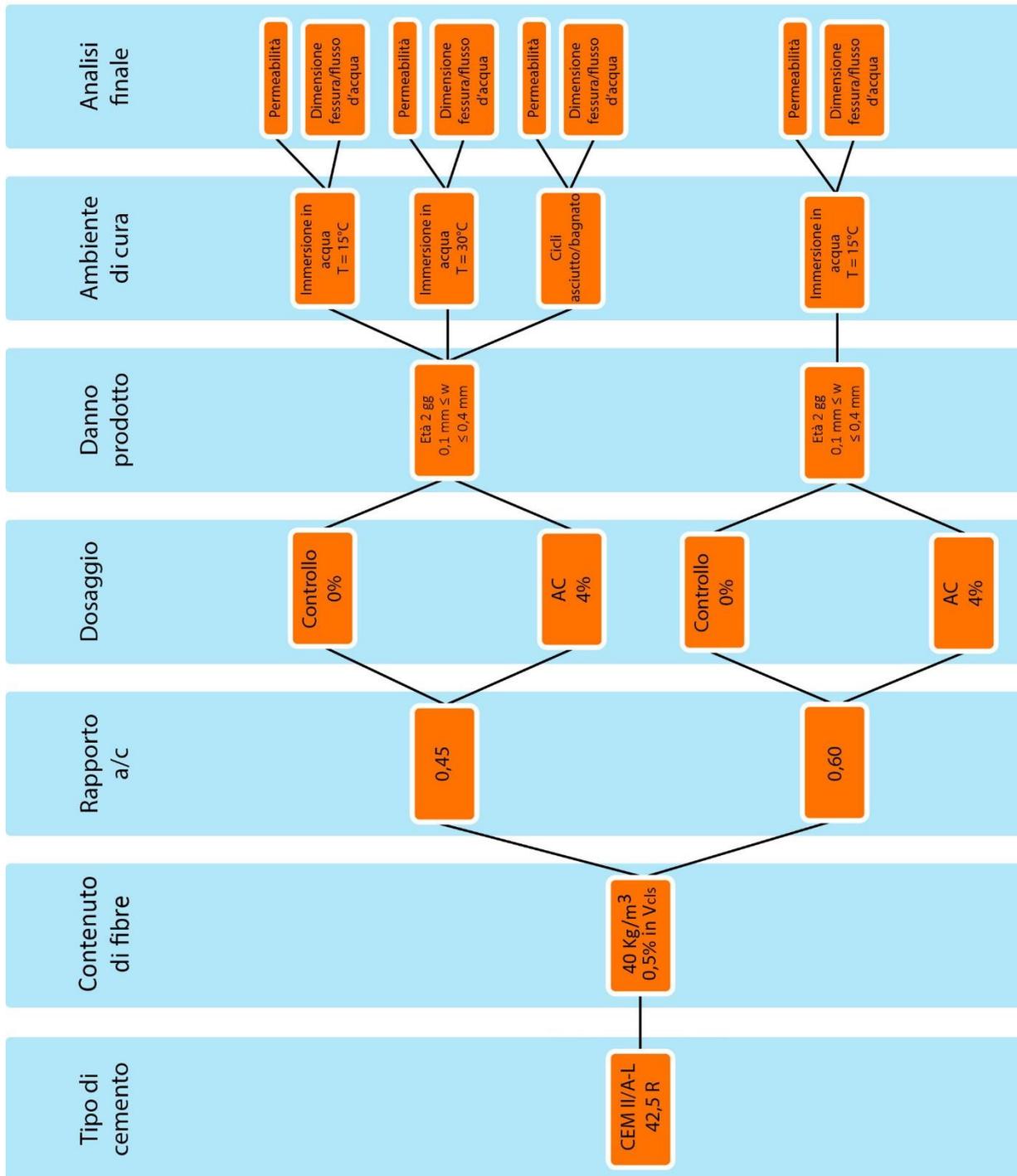


Figura 3-2: Piano sperimentale

## 3.4. Materiali

### 3.4.1. Cemento

Il cemento utilizzato per la fabbricazione dei campioni cilindrici è un CEM II/A-L 42,5 R. Dalla definizione fornita dalla norma UNI EN 197-1, intitolata *“Cemento – Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni”*, con il termine CEM II si intendono cementi Portland di miscela in quanto il costituente presente in maggior percentuale è rappresentato dal clinker di cemento Portland (80-94%) in combinazione con una o più aggiunte minerali. Invece, la dicitura A-L indica che queste aggiunte sono principalmente a base di calcare e sono presenti con una percentuale compresa tra il 6 ÷ 20%.

In figura 3.3 sono illustrate la confezione del cemento e l'aspetto che presenta al momento della fabbricazione del calcestruzzo.



Figura 3-3: Cemento CEM II/A-L 42,5 R. La confezione (in alto), aspetto del materiale (in basso).

La classe di resistenza 42,5 R indica la soglia minima di resistenza meccanica a compressione, in MPa, misurata a ventotto giorni su campioni prismatici 40x40x160 mm, fabbricati con una malta standard caratterizzata da un rapporto acqua/cemento pari a 0,50 e inerte/cemento pari a 3. Mentre la presenza del simbolo R (rapido indurimento) indica il comportamento meccanico del cemento alle brevi stagionature, infatti a solo due giorni di maturazione è capace di resistere a una tensione di compressione maggiore di 20 MPa. La scelta di questa

tipologia di cemento è stata determinata proprio dal fatto che risulta necessaria un'apprezzabile resistenza nei primi giorni di stagionatura, in quanto i campioni analizzati in questo studio sono stati sottoposti a prefessurazione all'età di due giorni.

Considerando gli ambienti di cura, caratterizzati dalla completa o parziale immersione in acqua per un periodo pari a sei settimane, è stato deciso di fabbricare i campioni con un calcestruzzo con classe di esposizione XC2 (Bagnato, raramente asciutto) con riferimento alla norma UNI EN 206-1. In funzione della classe di esposizione scelta sono stati presi i valori minimi prescritti dalla normativa UNI EN 206-1:

- Rapporto massimo acqua/cemento pari a 0,60;
- Classe di resistenza minima C25/30;
- Contenuto minimo di cemento 280 kg/m<sup>3</sup>.

#### 3.4.1. Acqua

L'acqua utilizzata per la miscelazione non possiede proprietà particolari, in quanto è quella proveniente dall'acquedotto cittadino e, quindi, potabile. La normativa italiana UNI EN 1008 non prescrive particolari prove di idoneità per questo tipo di acqua, usata per la produzione del calcestruzzo.

Per la determinazione dell'acqua da fornire alla miscela sono state utilizzate le normali tecniche per il mix design del calcestruzzo. Prima di ogni impasto è stata calcolata l'umidità relativa posseduta dagli aggregati, conoscendo la capacità di assorbimento. Inoltre conoscendo il rapporto acqua/cemento di ogni impasto è stata dedotta la quantità di acqua e, in seguito determinata la giusta quantità da aggiungere per sopperire alla perdita dovuta all'assorbimento degli aggregati. Con questa procedura è stato possibile considerare il valore di acqua effettiva da aggiungere all'impasto per ottenere il calcestruzzo voluto.

#### 3.4.2. Aggregati

Gli aggregati utilizzati per la miscelazione del calcestruzzo sono di tre tipologie:

- Pietrisco proveniente da frantumazione di rocce, dimensione 4/7 ( $d_{\min}/D_{\max}$ );
- Pietrisco proveniente da frantumazione di rocce, dimensione 7/12 ( $d_{\min}/D_{\max}$ );
- Sabbia.

In figura 3.4 viene mostrato l'aspetto degli aggregati utilizzati per la fabbricazione del calcestruzzo:



Figura 3-4: Foto dell'aspetto del pietrisco 7/12 (in alto a sinistra), 4/7 (in alto a destra) e della sabbia (in basso).

Di seguito vengono riportate le tabelle relative alla granulometria e le caratteristiche degli aggregati appena descritti:

Dimensione setaccio	Aggregati		
	4/7	7/12	Sabbia
[mm]	[%]	[%]	[%]
<b>64</b>	100	100	100
<b>32</b>	100	100	100
<b>16</b>	100	100	100
<b>8</b>	100	27,1	100
<b>4</b>	30	0	95,6
<b>2</b>	4,9	0	80
<b>1</b>	0	0	64,8
<b>0,5</b>	0	0	52,5
<b>0,25</b>	0	0	34,6
<b>0,125</b>	0	0	12,2
<b>0,063</b>	0	0	3,1

Tabella 3-1: Granulometria degli inerti

Inerte	Assorbimento medio	Densità
[-]	[%]	[Kg/m <sup>3</sup> ]
4/7	1,7	2600
7/12	1,7	2600
Sabbia	1	2650

Tabella 3-2: Caratteristiche degli inerti

Inoltre vengono mostrate le curve granulometriche, rappresentate in funzione della percentuale di passante, in peso del materiale, e della dimensione dei setacci.

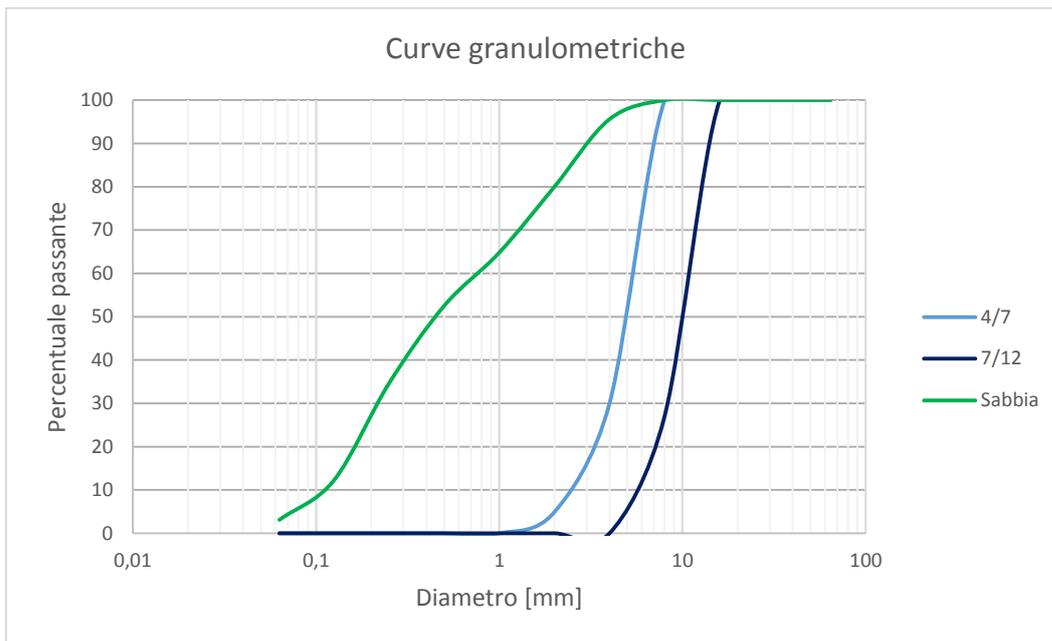


Figura 3-5: Curve granulometriche degli inerti

Per compensare la mancanza di grano fine e, quindi, per regolare la distribuzione dei valori della curva granulometrica è stato aggiunto filler fino ( $d < 0,063$  mm, densità pari a  $2600$  kg/m<sup>3</sup>) con un contenuto pari a  $50$  kg/m<sup>3</sup>. Nel caso delle miscele contenenti additivo cristallino, la quantità di filler è stata corretta ponendo un contenuto di  $36$  kg/m<sup>3</sup>.

### 3.4.3. Additivo fluidificante

Per la miscelazione del calcestruzzo è stato posto come obiettivo quello di ottenere un calcestruzzo con classe di consistenza S3-S4 e abbassamento al cono (slump) tra 100 e 210 mm. È stato utilizzato un additivo fluidificante Sika ViscoCrete 5720 per calcestruzzi ad alte prestazioni, in quantità variabile a seconda delle necessità poiché è stato osservato che il rendimento e i tempi di reazione di tale prodotto sono influenzati dalle condizioni ambientali esterne. Infatti è stata ipotizzata una quantità di base, in percentuale di peso di cemento, e in seguito osservando il cambiamento della consistenza durante la fase di miscelazione si è deciso se aggiungerne. I valori finali variano dallo 0,6% all'1,4%.

#### 3.4.4. Fibre in acciaio

L'aggiunta di fibre nella miscela, con una quantità di 40 kg per volume di calcestruzzo, è stata ritenuta necessaria per controllare l'apertura delle fessure durante la fase di prefessurazione.

Sono state usate fibre in acciaio Dramix RC 65/35 BN della Bekaert, aventi un diametro di 0,55 mm e lunghezza di 35 mm, caratterizzate da una resistenza a trazione di 1345 MPa. Tali fibre sono prodotte mediante un procedimento di trafilatura e piegatura a freddo e presentano le estremità uncinatae per avere una maggiore capacità di ancoraggio. Inoltre le singole fibre vengono incollate tra di loro formando dei fasci che permettono una miscelazione più rapida e semplice, garantendo una distribuzione perfettamente omogenea all'interno dell'impasto. La presenza della colla non ha nessuna influenza sulla consistenza del calcestruzzo poiché si scioglie durante la miscelazione.

Le fibre vengono aggiunte all'impasto durante la miscelazione nelle stesse condizioni in cui vengono fornite dal produttore, come è mostrato nella figura 3.6.



Figura 3-6: Fibre in acciaio, diametro 0,55 mm e lunghezza 35 mm. Aspetto delle fibre nelle condizioni di fornitura.

#### 3.4.5. Resina sigillante

Per sigillare le fessure formatesi sulle superfici dei campioni poste a contatto con i piatti della pressa, è stato utilizzato un sigillante bicomponente a base di resina epossidica, Sikadur-31. La necessità di utilizzare tale prodotto è stata quella di permettere, durante la prova di permeabilità, che il flusso d'acqua attraversasse le sole superfici di base dove è presente la fessura ed evitare fuoriuscite laterali. Inoltre il sigillante ha bisogno di un periodo di 24 ore per terminare la reazione di indurimento, ragione per la quale la prova di permeabilità è stata eseguita al quarto giorno dalla fabbricazione dei campioni. Un altro parametro importante da rispettare è l'intervallo di temperatura, tra i 10°C e 30°C, al di fuori del quale il prodotto non conserva più le proprie caratteristiche di resistenza.

#### 3.4.6. Additivo cristallino

Sono numerosi i prodotti, presenti in commercio, utilizzati come riduttori di permeabilità da aggiungere all'impasto al momento della miscelazione. Viene affermato che molti di questi, inoltre, sono in grado di potenziare gli effetti del *self-healing* propri del calcestruzzo.

L'additivo utilizzato in questo studio è formato da cemento, silice reattiva e altri componenti chimici che, in presenza di acqua, formano prodotti insolubili capaci di riempire i pori e la struttura capillare della matrice cementizia. Inoltre possono essere utilizzati per promuovere la chiusura di fessure di piccole entità createsi a seguito del processo di indurimento.

Come descritto in precedenza, il dosaggio dell'additivo impiegato in questo studio è pari al 4% in peso di cemento. Riportiamo nella figura di seguito l'aspetto dell'additivo cristallino al momento della fabbricazione del calcestruzzo.



*Figura 3-7: Aspetto dell'additivo cristallino al momento della fabbricazione del calcestruzzo.*

E' consigliato l'utilizzo di questa tipologia di additivi per le strutture destinate alla ritenzione di acqua, come piscine, dighe, serbatoi, etc., ma anche per tutte quelle strutture che sono soggette costantemente al contatto con acqua, come strutture di fondazione, muri controterra, elementi strutturali interrati, etc.

### 3.5. Metodologia

In questo paragrafo vengono descritte le fasi del programma sperimentale illustrato in precedenza.

L'obiettivo di questo studio è stato quello di valutare gli effetti dell'additivo cristallino sul fenomeno dell'autoguarigione e, di conseguenza, sulla durabilità del calcestruzzo. Con riferimento alle procedure illustrate nelle normative europee, sono stati fabbricati solo campioni cilindrici, con e senza additivo, variando il rapporto acqua/cemento posto pari a 0,45 e 0,60, al fine di poter effettuare un confronto e comprendere quale sia l'influenza dell'additivo cristallino nelle diverse miscele.

Al termine della fase di miscelazione e poco prima del getto del calcestruzzo all'interno delle forme cilindriche, è stata effettuata la prova di consistenza attraverso la misurazione dello

slump, o abbassamento al cono di Abrams, per ciascun impasto realizzato. Vista la ridotta quantità di acqua, nel caso di un rapporto a/c di 0,45, e la presenza delle fibre di acciaio è stato posto come obiettivo quello di ottenere un calcestruzzo fluido, caratterizzato da una classe di consistenza S3-S4 e un abbassamento compreso nell'intervallo tra 100÷210 mm. Per determinare la resistenza a compressione sono stati utilizzati tre cilindri per ogni impasto, lasciati in una camera con temperatura costante e in condizioni di saturazione per una durata di 28 giorni. Trascorso il periodo di maturazione, sono stati sottoposti alla prova di compressione per determinare il valore di resistenza del calcestruzzo utilizzato.

I provini cilindrici sono stati sottoposti ad una serie di lavorazioni finalizzate al corretto svolgimento delle prove necessarie all'ottenimento dei risultati utili allo studio. Riportiamo in seguito uno schema delle fasi principali che costituiscono il programma sperimentale adottato:

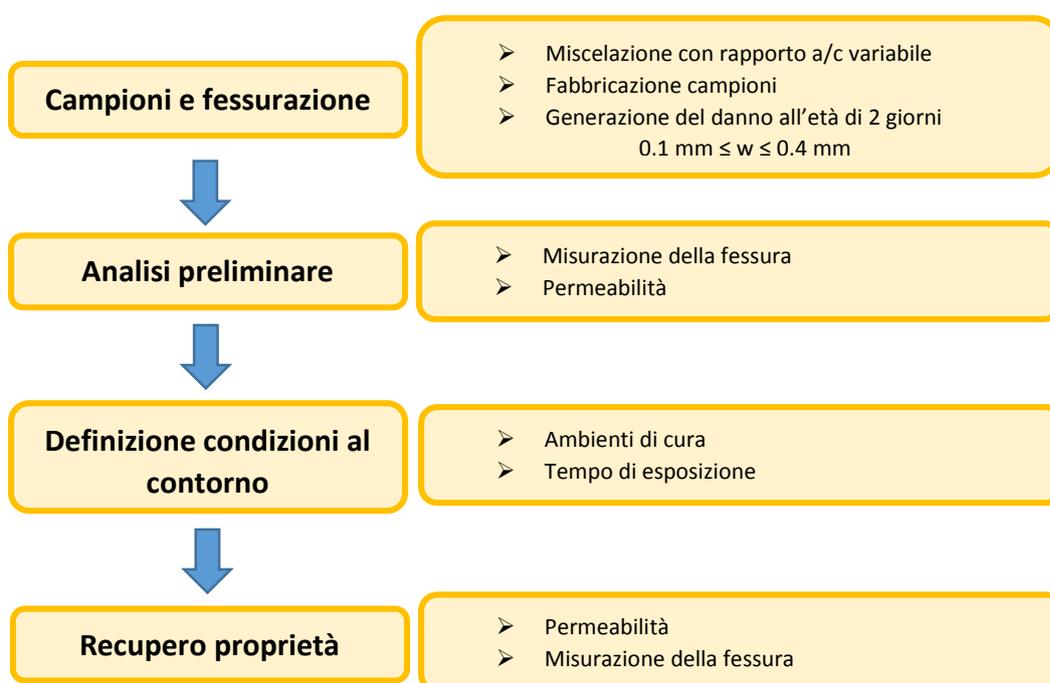


Figura 3-8: Schema logico del programma sperimentale adottato.

### 3.5.1. Dosaggio, miscelazione del calcestruzzo e fabbricazione dei campioni

In questa sezione vengono riportate le modalità per la determinazione del mix-design utilizzato per la fabbricazione dei campioni cilindrici. Sono state progettate quattro diverse tipologie di impasti, in funzione della presenza o meno dell'additivo cristallino e della variazione del rapporto acqua/cemento.

#### 3.5.1.1. Parametri iniziali

Per la fabbricazione dei campioni sono stati utilizzati due diversi rapporti acqua/cemento, pari a 0,45 e 0,60, considerando il valore dell'acqua effettiva come illustrato nel paragrafo 3.4.2.

Questa variazione è stata effettuata con l'obiettivo di confrontare la capacità di autoguarigione delle diverse miscele e comprendere in quali condizioni l'additivo cristallino possa offrire un miglior contributo. La scelta di utilizzare un rapporto acqua/cemento di 0,45 è stata motivata dal fatto che nella matrice cementizia sono presenti un maggior numero di particelle non idratate, promuovendo così la formazione di cristalli insolubili. Per questo motivo, è stato possibile effettuare un valido confronto con la miscela caratterizzata da un rapporto di 0,60.

La curva di Bolomey teorica è quella corrispondente ai parametri  $a = 17$  e  $D_{\max} = 12$  per ottenere una curva di granulometria fina e più lavorabile. Per stimare il coefficiente di regolazione della curva, si calcola il quadrato della differenza tra i valori della curva teorica e quelli della miscela totale e, dopo averli sommati, si divide il risultato ottenuto per il numero dei setacci con percentuale di passante non nullo. Nelle quattro miscele i risultati sono lievemente differenti poiché variano alcuni valori. Riportiamo di seguito le curve granulometriche di quattro impasti caratterizzati da un rapporto acqua/cemento pari a 0,45 e 0,60:

- AM1, calcestruzzo di controllo con rapporto a/c pari a 0,45 e contenente una percentuale di additivo cristallino pari allo 0% (figura 3.9);
- AM4S1, calcestruzzo con rapporto a/c pari a 0,45 e contenente una percentuale di additivo cristallino pari allo 4% (figura 3.10);
- AM2, calcestruzzo di controllo con rapporto a/c pari a 0,60 e contenente una percentuale di additivo cristallino pari allo 0% (figura 3.11);
- AM4S2, calcestruzzo con rapporto a/c pari a 0,60 e contenente una percentuale di additivo cristallino pari allo 4% (figura 3.12).

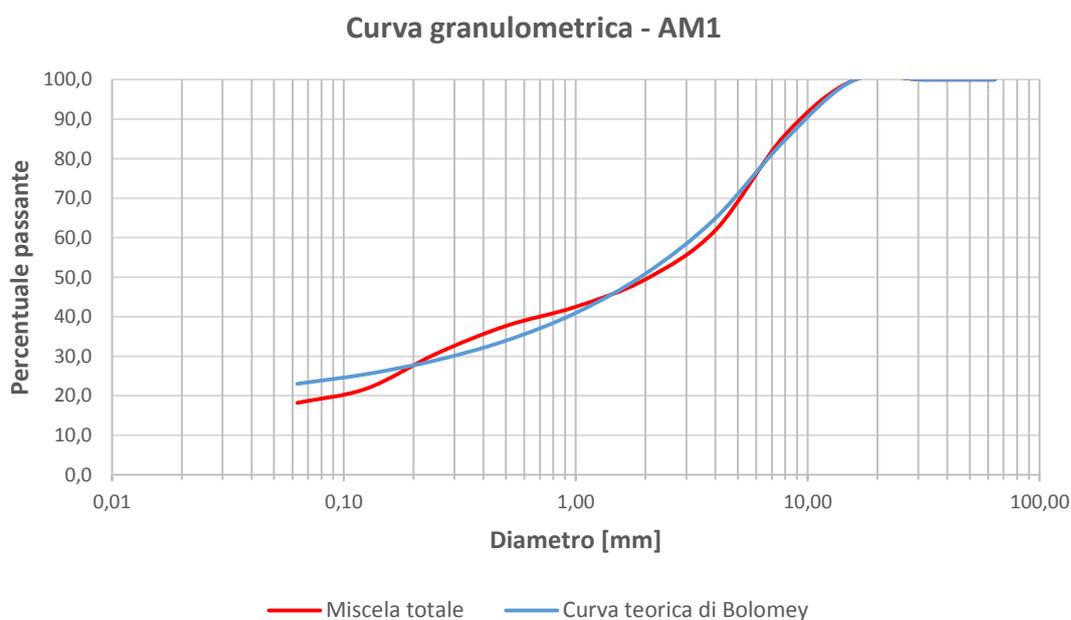


Figura 3-9: Curva granulometrica dell'impasto AM1, calcestruzzo di controllo e rapporto a/c di 0,45.

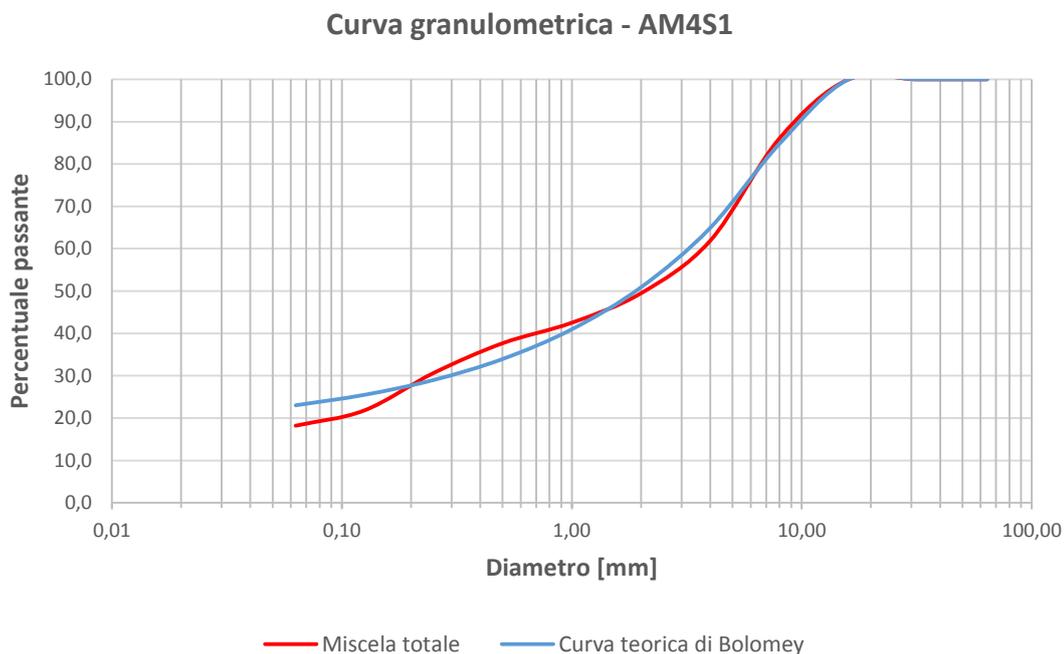


Figura 3-10: Curva granulometrica dell'impasto AM4S1, calcestruzzo con additivo cristallino (4%) e rapporto a/c di 0,45.

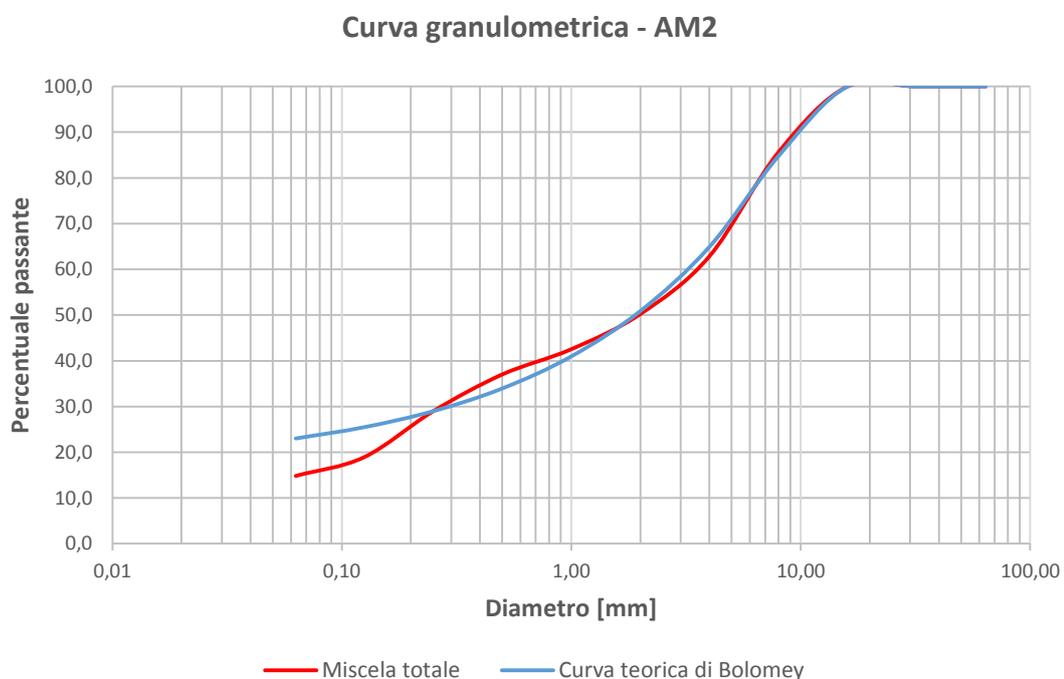


Figura 3-11: Curva granulometrica dell'impasto AM2, calcestruzzo di controllo e rapporto a/c di 0,60.

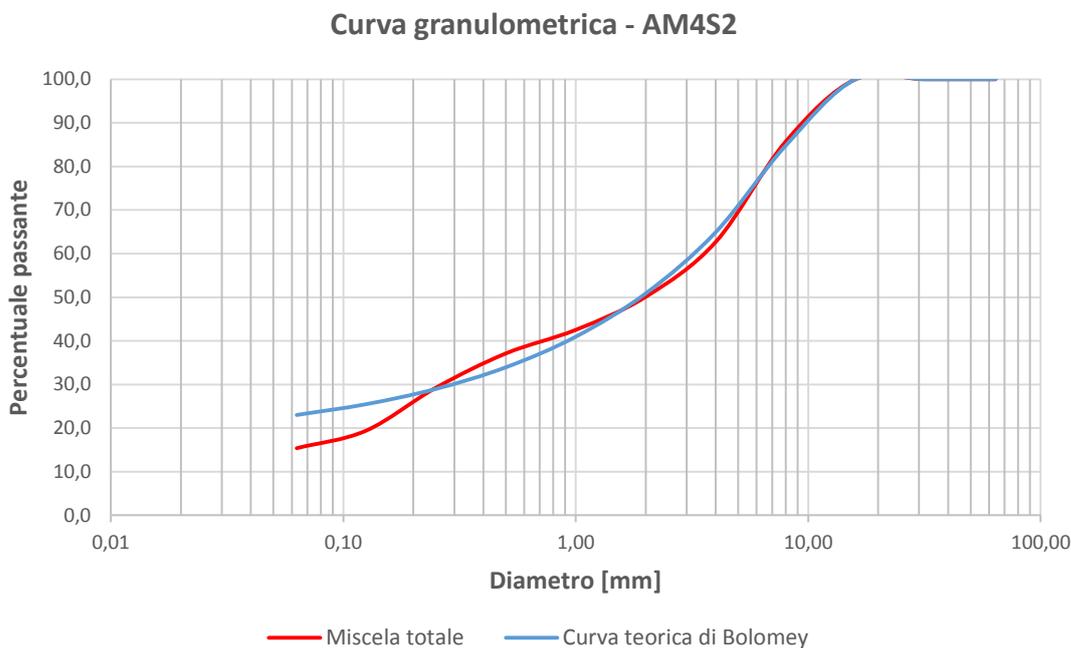


Figura 3-12: Curva granulometrica dell'impasto AM4S2, calcestruzzo con additivo cristallino (4%) e rapporto a/c di 0,60.

La quantità dell'additivo fluidificante è stata variata a seconda delle necessità e in funzione della consistenza del calcestruzzo in fase di miscelazione, dato che il suo rendimento è influenzato molto dalle condizioni ambientali esterne, ovvero temperatura e umidità relativa. Al fine di garantire una buona lavorabilità è stato deciso di ricercare un valore di abbassamento al cono (slump) tra 100 e 210 mm.

Il contenuto del filler è stato cambiato di volta in volta, a seconda della presenza o meno dell'additivo cristallino, ma la somma tra la quantità di quest'ultimo e quella di filler è stata mantenuta costante, ovvero pari a  $50 \text{ kg/m}^3$ . Inoltre la percentuale di additivo cristallino, in peso di cemento, è pari allo 0% e al 4%.

Per quanto riguarda le fibre di acciaio, è stata utilizzata una percentuale di circa 0,5% in volume di calcestruzzo, equivalente a  $40 \text{ kg/m}^3$ . È stato utilizzato un calcestruzzo fibrorinforzato per conferire una maggiore tenacità al materiale, evitando così una rottura meno fragile, e garantire un maggior controllo sull'apertura delle fessure raggiungendo le ampiezze desiderate. Inoltre la scelta di impiegare fibre in acciaio è stata fatta con l'obiettivo di evitare che la natura delle stesse potesse influenzare il fenomeno dell'autoguarigione. Per questo motivo non state prese in considerazione fibre ad alta polarità, come ad esempio fibre di polietilene o in poli-vinil-alcool, che avrebbero potuto incrementare la formazione dei cristalli di carbonato di calcio, come riportato in letteratura [15] [16].

In tabella 4.3 viene riportato il dosaggio utilizzato per la realizzazione del calcestruzzo:

Materiale	Kg/m <sup>3</sup>	Materiale	Kg/m <sup>3</sup>
Cemento II/A-L	350	Cemento II/A-L	275
Acqua	158	Acqua	165
Aggregati (4-12 mm)	950	Aggregati (4-12 mm)	908
Sabbia	901	Sabbia	987
Fibre in acciaio (RC 65/35 BN)	40	Fibre in acciaio (RC 65/35 BN)	40
Additivo fluidificante	XX	Additivo fluidificante	XX
Filler + Additivo cristallino	50	Filler + Additivo cristallino	50

Tabella 3-3: Dosaggio calcestruzzo rapporto a/c di 0,45 (a sinistra), di 0,6 (a destra).

Per effettuare le giuste correzioni e determinare la quantità di acqua effettiva da aggiungere alla miscela è stato necessario calcolare l'umidità contenuta nelle diverse tipologie di inerti da utilizzare, perciò il giorno prima della fabbricazione dei cilindri vengono prelevati dei campioni. Il peso di questi ultimi è variabile a seconda dell'inerte: infatti, nel caso della sabbia, è stato ritenuto sufficiente un peso di circa 1000 g per favorire l'evaporazione di tutto il contenuto di acqua e ottenere così un valore di assorbimento più attendibile, mentre per i restanti inerti il peso considerato è di circa 1500 g. Una volta pesati tutti i campioni tramite una bilancia di sensibilità 1 gr e annotati i rispettivi valori, vengono posti all'interno di un forno a 120°C per una durata di 24 ore così da permettere una completa essiccazione. Il giorno seguente i campioni vengono pesati nuovamente in modo tale da calcolare l'umidità di ogni inerte secondo la formula riportata di seguito:

$$W (\%) = \frac{\text{Peso umido} - \text{Peso secco}}{\text{Peso secco}} * 100$$

### 3.5.1.2. Fabbricazione dei campioni

In funzione del numero dei campioni cilindrici che si vuole ottenere, prima del processo di miscelazione viene calcolato il peso e le quantità dei materiali che verranno utilizzati (figura 3.11 a). E' stata utilizzata una procedura precisa che ha disciplinato l'ordine e le tempistiche dell'utilizzo di ogni singolo componente. Il processo di miscela è il seguente:

- 1) Viene inumidita l'impastatrice alcuni minuti prima dell'attivazione;
- 2) Vengono versati gli aggregati, la sabbia e metà dell'acqua all'interno dell'impastatrice, e viene avviata per una durata di 15 minuti al fine di omogeneizzare il tutto (figura 3.11 b);
- 3) Vengono aggiunti il cemento, il filler e, nei rispettivi impasti, l'additivo cristallino. Si impasta per un minuto;
- 4) Viene versata la restante metà dell'acqua e si impasta per un altro minuto (figura 3.11 c);
- 5) Viene aggiunto l'additivo fluidificante per una durata di 1 minuto, e si lascia reagire per circa 3 minuti osservando il cambiamento di consistenza del calcestruzzo (figura 3.11 d);

- 6) Vengono aggiunte le fibre lentamente e si impasta per altri 3-4 minuti in modo che le fibre si distribuiscano in modo omogeneo all'interno dell'impasto (figura 3.11 e);
- 7) Osservando la consistenza dell'impasto, se necessario, viene aggiunto un'ulteriore quantità di additivo fluidificante, pesata e preparata per questa evenienza.

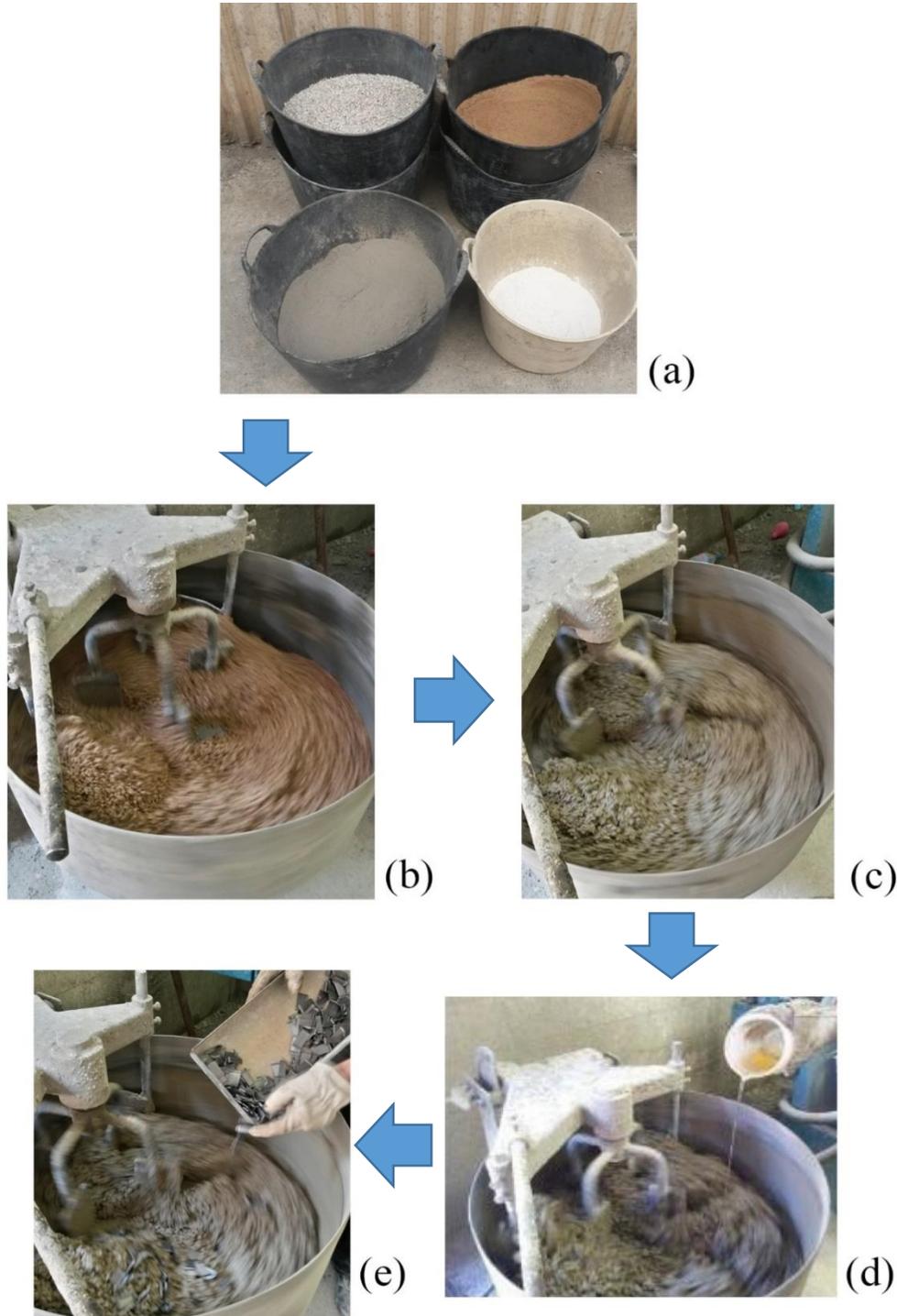


Figura 3-13: Miscelazione dei componenti, fasi principali: calcolo del peso dei singoli materiali (a), miscelazione inerti con metà acqua (b), aggiunta cemento, filler ed eventuale additivo cristallino (c), aggiunta additivo fluidificante (d), aggiunta fibre (e).

Al termine della procedura di miscelazione viene prelevato un campione per eseguire la prova di consistenza, attraverso la misurazione dell'abbassamento al cono, come spiegato nell'appendice A. Eseguita la prova, il calcestruzzo utilizzato a tale scopo viene gettato nell'impastatrice che viene attivata nuovamente per pochi secondi. Le forme cilindriche utilizzate come casseri sono state preparate durante la miscelazione, inumidendone completamente la superficie interna con del disarmante (figura 3.12 a). In seguito viene gettato il calcestruzzo in tre strati successivi aventi altezza pari a circa un terzo dello stampo. Ogni strato viene compattato con 25 colpi utilizzando la barra di costipazione, avente sezione circolare di diametro  $16\pm 1$  mm, lunghezza  $600\pm 5$  mm e estremità arrotondate. Una volta terminato di compattare il calcestruzzo (figura 3.12 b), viene tolta la quantità in eccesso dalle superfici superiori dei cilindri in modo da ottenere una maggiore planarità e regolarità delle stesse. In seguito, le forme vengono lasciate riposare su un piano orizzontale per una durata di 24 ore all'aria non trattata di laboratorio (figura 3.12 c), al fine di permettere la presa e parte dell'indurimento da parte del materiale. Il giorno seguente i provini vengono disarmati (figura 3.12 d) e posti in una camera umida a saturazione e temperatura pari a  $20^{\circ}\text{C}$  per 24 ore.



Figura 3-14: Preparazione delle forme inumidendone le superfici con disarmante (a), calcestruzzo compattato (b), lisciatura delle superfici e riposo dei campioni per 24 ore (c), disarmo dei campioni e sistemazione in camera umida (d).

### 3.5.2. Generazione del danno

Dopo 42 ore dalla fabbricazione dei campioni vengono iniziate le lavorazioni necessarie alla generazione del danno e alla prova di permeabilità.

Con l'obiettivo di ottenere entrambe le facce dei campioni perfettamente piane e regolari, facilitando così l'identificazione e misurazione della fessura, viene utilizzata una sega circolare per calcestruzzi (figura 3.13 a) per asportare le superfici esterne per uno spessore di circa mezzo centimetro. In seguito, dopo aver misurato la nuova altezza, i provini vengono divisi a metà.



Figura 3-15. Sega circolare per calcestruzzi utilizzata per asportare le facce esterne dei campioni e, successivamente, dividerli a metà.

Come mostrato in figura 3.14 a, la prefessurazione dei campioni, date le loro dimensioni e forma, è stata eseguita mediante prova a trazione indiretta, o brasiliana. Il provino viene posizionato tra i piatti della pressa (figura 3.14 b) in modo che il carico sia indotto in modo concentrico, al fine di creare delle fessure con ampiezza simile su entrambe le facce del campione. In seguito, viene aumentato il carico con velocità bassa fino alla formazione della fessura, percepita sia dal rumore prodotto sia tramite gli strumenti di analisi della macchina.

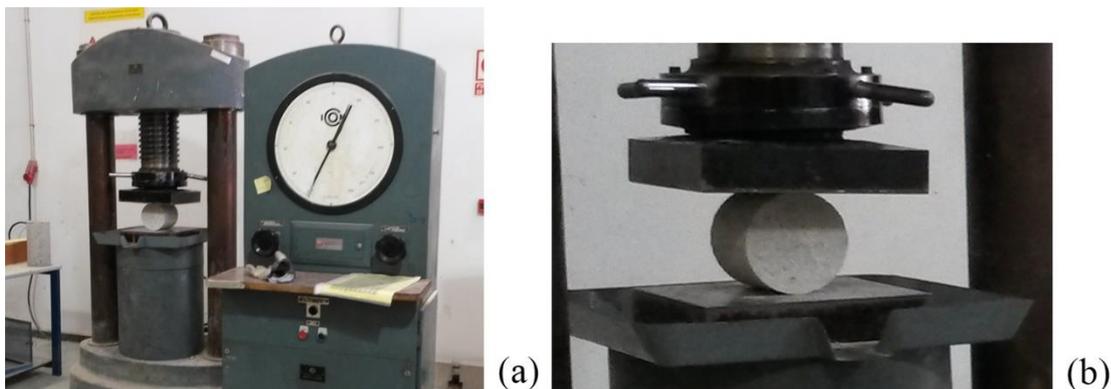


Figura 3-16: Generazione del danno mediante prova a trazione indiretta (a), disposizione del campione tra i piatti della pressa (b).

L'obiettivo dello studio è quello di ricercare fessure di ampiezza massima di 0,40 mm, perciò dopo aver prodotto la fessura è stata effettuata una prima misurazione visiva mediante la

sovrapposizione di un fessurimetro. Una volta liberato il campione dai piatti della pressa, è stata osservata una riduzione dell'ampiezza massima della fessura dovuto al recupero della deformazione elastica. Per questo motivo, dopo aver effettuato la prima misurazione, è stato deciso di riavviare la pressa con una velocità più bassa rispetto a quella utilizzata nel primo carico e, con l'ausilio del fessurimetro, è stata misurata la fessura massima fino a raggiungere ampiezze di circa 0,50 mm. Analizzando i dati ottenuti, si sono ottenute fessure di ampiezze comprese nell'intervallo di 0,078 e 0,51 mm.

Al termine della prova, i campioni sono stati posti su un carro disponendoli lungo la superficie laterale al fine di evitare che l'entrata di polveri o residui, presenti sulla superficie del carro, potesse compromettere lo stato delle fessure.

### 3.5.3. Prova di permeabilità

Prima di effettuare la prova di permeabilità sono state effettuate alcune lavorazioni necessarie alla preparazione dei campioni. Infatti, eseguendo la prova brasiliana, si formano una serie di fessure longitudinali in corrispondenza dei punti di contatto del cilindro con i piatti della pressa. Viene scelta la superficie che verrà posta a contatto con la parte superiore del permeabilmetro, dalla quale uscirà il flusso di acqua, in funzione dell'omogeneità della dimensione della fessura. Infatti, spesso, le ampiezze presenti sulle facce dei campioni risultano simili ma è sempre possibile determinare quali delle due possiede un'apertura costante.

Per evitare fuoriuscite laterali durante la prova di permeabilità e direzionare il flusso di acqua attraverso la sola fessura, è stata posta una pasta sigillante bicomponente di natura epossidica sulle superfici laterali del campione e parzialmente sulla faccia superiore (figura 3.15).

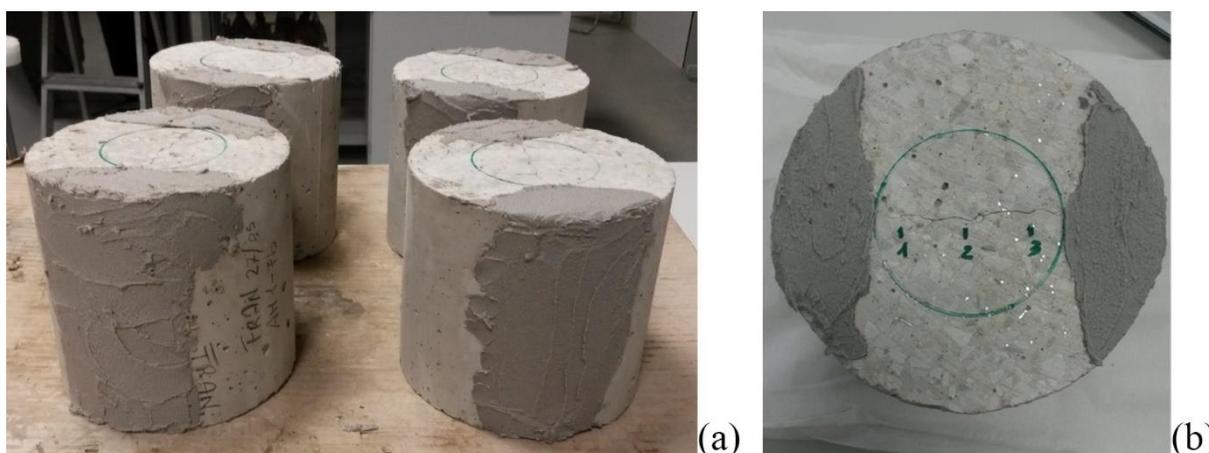


Figura 3-17: Pasta sigillante posta sulle superfici laterali (a), e superiori (b) dei campioni.

La prova di permeabilità è stata effettuata al quarto giorno dalla fabbricazione dei campioni, in quanto la pasta adesiva ha bisogno di circa 24 ore per terminare il processo di indurimento. Prima della prova, sono state riportate delle tacche equidistanti su entrambe le facce dei campioni, in particolare tre sulla superficie superiore e quattro su quella inferiore. In seguito, in corrispondenza delle tacche, vengono scattate le foto delle fessure tramite l'utilizzo di un microscopio ottico, necessarie per valutare l'ampiezza iniziale e poter effettuare un confronto con i valori ottenuti al termine della cura. La procedura di misurazione verrà descritta nel paragrafo seguente.

Il concetto di base della prova di permeabilità è che il flusso di acqua sia proporzionale all'ampiezza della fessura. Ciò significa che quanto maggiore è l'apertura della fessura, tanto maggiore sarà la quantità di acqua che la attraversa, con una pressione costante e un intervallo di tempo prestabilito. Perciò, al termine del periodo di cura, per i campioni che hanno subito una guarigione parziale il flusso d'acqua risulterà inferiore a quello iniziale, mentre per quelli guariti completamente la quantità di acqua sarà nulla.

La prova consiste nell'utilizzare il medesimo permeabilmetro che viene utilizzato per svolgere la prova di penetrazione all'acqua descritta nella normativa UNI EN 12390-8 *“Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 8: Profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione”*. Inoltre la prova è stata progettata basandosi sulla Legge di Darcy che descrive le caratteristiche del flusso di acqua attraverso un mezzo poroso.

Per eseguire la prova in modo corretto è necessario che le superfici laterali del campione siano sigillate mediante l'applicazione della pasta sigillante, come descritto in precedenza. Inoltre sulla faccia superiore sottoposta direttamente al flusso di acqua, viene posto un anello isolante in gomma per ottenere una sigillatura completa tra il piatto superiore del permeabilmetro e il campione, direzionando il flusso solo nella zona della fessura interessata allo studio. In figura 3.16 viene illustrato lo schema di esecuzione della prova:

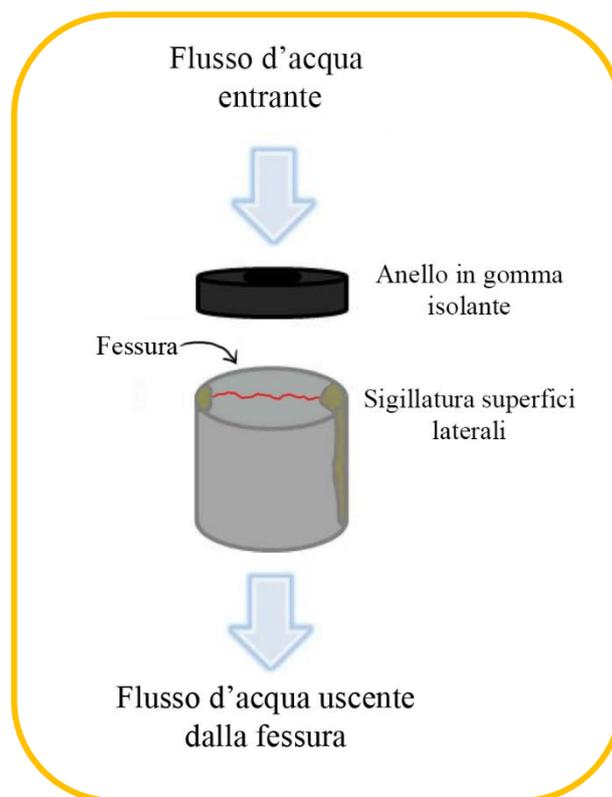


Figura 3-18: Prova di permeabilità utilizzata

I parametri utilizzati per eseguire la prova sono i seguenti:

- Pressione dell'acqua di circa 2 bar. Una volta avviata la macchina, viene controllato costantemente che il compressore fornisca sempre la stessa pressione al flusso d'acqua;
- Tempo della prova pari a 5 minuti.

Prima dell'attivazione della macchina di prova, vengono collocati i campioni cilindrici all'interno dei piatti del permeabilmetro e, dopo aver posto l'anello in gomma sulle facce superiori (figura 3.17 c), viene imposta la completa aderenza tra le parti di cui è composto il sistema, stringendo la bullonatura della macchina fino a quando non si osserva la deformazione dell'anello isolante (figura 3.17 e). In seguito, viene posizionato un secchio al di sotto dei piatti per raccogliere l'acqua uscente dalla fessura e viene attivato un timer al momento dell'apertura dei rubinetti. Durante il funzionamento della macchina, viene costantemente controllata la pressione fornita dal barometro (figura 3.17 b) che oscilla in un intervallo tra 1,9 bar e 2,1 bar poiché man mano che l'acqua attraversa la fessura, la pressione scende fino a 1,9 bar e, una volta raggiunto tale valore, viene attivato il compressore che fa risalire nuovamente la pressione a 2,1 bar. Al termine dei 5 minuti, viene pesato il volume di acqua presente all'interno del secchio mediante una bilancia standard. Le lavorazioni a cui sono stati sottoposti i campioni e le procedure di esecuzione hanno permesso di ottenere un sistema nel quale l'acqua permea all'interno dei cilindri solo attraverso la fessura interna (figura 3.17 f). Questo fenomeno è stato osservato in ogni prova effettuata. Di seguito

vengono riportate le parti principali della macchina di prova e le condizioni del campione al momento della prova:

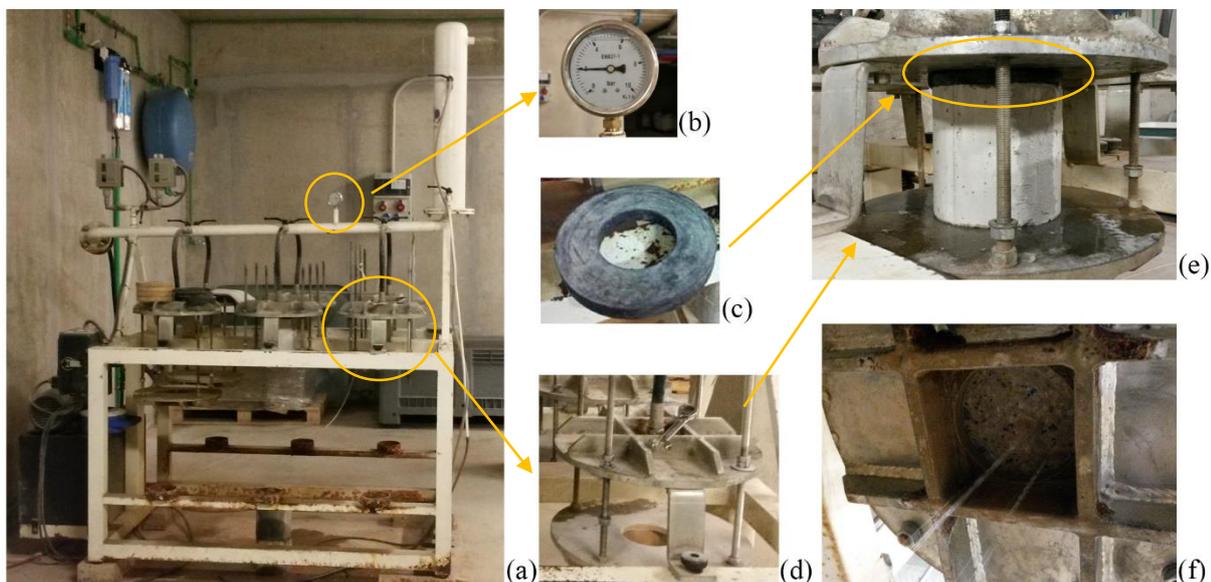


Figura 3-19: Permeabilmetro utilizzato per eseguire la prova (a), barometro (b), anello in gomma usato per impermeabilizzare la connessione tra il campione e la macchina (c), parte del macchinario utilizzata per effettuare la prova (d), condizione del campione al momento della prova (e), flusso d'acqua uscente dalla fessura (f).

La prova di permeabilità viene eseguita nuovamente al termine dei 42 giorni del periodo di cura. Infatti è stato deciso di utilizzare un tempo di prova di 5 minuti, ritenuto sufficiente per comprendere il grado di impermeabilizzazione dei cristalli formatisi durante il periodo di cura e la loro resistenza ad un flusso d'acqua con pressione 2 bar. Ciò rispetta quanto affermato in letteratura [7].

#### 3.5.4. Ambienti di cura

Con riferimento a quanto affermato in letteratura e in studi precedenti [46], la presenza costante dell'acqua è la condizione necessaria per garantire un livello accettabile di autoguarigione. Questo presupposto ha determinato la scelta di quale tipologia di ambienti analizzare in questo studio. È stato deciso di considerare ambienti nei quali i campioni in calcestruzzo fibrorinforzato si trovano completamente immersi in acqua durante tutto il periodo di cura o a intervalli regolari.

Gli ambienti esaminati sono i seguenti:

- Immersione in acqua a temperatura 15°C, all'interno di apposite vasche;
- Immersione in acqua a temperatura 30°C, all'interno di apposite vasche;

- Cicli asciutto/bagnato, caratterizzati dall'immersione in acqua con temperatura di circa 15°C per una durata di 3 giorni e mezzo e successiva esposizione all'aria non trattata di laboratorio per ulteriori 3 giorni e mezzo.

Il tempo di cura per ogni ambiente è stato di 42 giorni, corrispondenti a sei settimane. Dato che ogni ambiente studiato ha previsto l'immersione totale o parziale dei campioni, è stato ritenuto opportuno utilizzare sempre lo stesso volume di acqua, nel quale è presente l'anidride carbonica necessaria per la reazione di carbonatazione. Fissando questo parametro è stato possibile confrontare da un punto di vista oggettivo il comportamento dei campioni, sottoposti ai diversi ambienti di cura. E' stata considerata una quantità d'acqua potabile pari a circa 14,14 litri per ogni campione, per un totale di circa 99 litri per ogni vasca contenente 7 cilindri, prelevata direttamente dall'acquedotto. Al termine di ciascun periodo di cura, l'acqua viene cambiata.

Per il primo ambiente di cura non è stato necessario eseguire particolari lavorazioni. Le quattro tipologie di campioni, con e senza additivo e caratterizzati da un rapporto a/c differente, sono stati posti in vasche distinte (figura 3.18 a). Durante il periodo di cura è stata misurata la temperatura dell'acqua ad intervalli regolari mediante l'utilizzo di un comune termometro a mercurio, controllando che rimanesse costante nel tempo e rispettasse il valore prefissato di 15°C (figura 3.18 b). Inoltre lo stato dei campioni è stato monitorato visivamente ogni giorno, in particolare nella prima settimana di cura, per verificare l'eventuale formazione di carbonato di calcio. Infatti nei primi giorni di cura è stata accertata la precipitazione dei cristalli bianchi sulle superfici esterne delle fessure, come mostrato in figura 3.18 c.

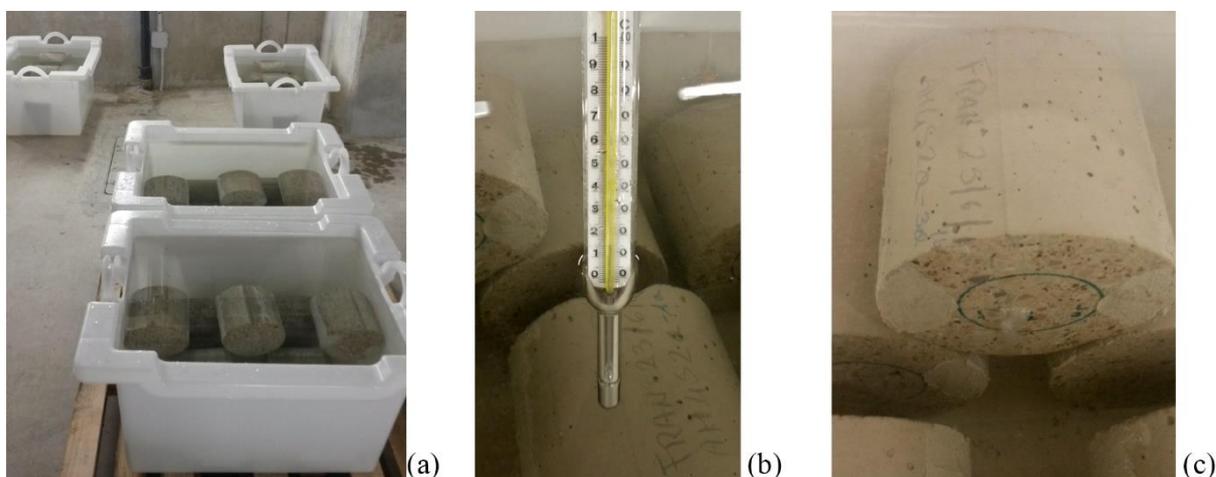


Figura 3-20: Immersione in acqua a temperatura di 15°C: Immersione dei campioni con e senza additivo in vasche distinte (a), misurazione della temperatura dell'acqua (b), formazione di carbonato di calcio visibile nei primi giorni cura, impasto con il 4% di additivo cristallino e rapporto a/c di 0,45 (c).

E' stata, inoltre, eseguita un'altra misurazione riguardante il pH dell'acqua dopo un periodo di circa due settimane di immersione dei campioni. Sono state utilizzate tre diverse cartine indicatrici di pH, per ciascuna vasca, così da ottenere un risultato più attendibile (figura 3.19 a). Dopo un attesa di circa 1 minuto dall'immersione della cartina in acqua, è stato confrontato il colore ottenuto con quello di riferimento fornito dal produttore ottenendo un pH neutro, corrispondente ad un valore di circa 7 (figura 3.19 b).



Figura 3-21: Cartine indicatrici di pH utilizzate (a), riscontro del colore ottenuto con quello di riferimento (b).

Riguardo il secondo ambiente di cura, è stato necessario svolgere uno studio preliminare per individuare un valore opportuno di temperatura che permettesse di effettuare un valido confronto con il primo ambiente di cura. Noto che da un incremento di temperatura deriva una maggiore velocità di reazione, è stato deciso di aumentare la temperatura in maniera proporzionale, ponendola pari a 30°C, così da poter studiare il grado di influenza della temperatura sul fenomeno dell'autoguarigione. Questa scelta, inoltre, è stata condizionata dalla natura della pasta adesiva di natura epossidica utilizzata per sigillare le superfici dei campioni cilindrici. Infatti, superata la temperatura di 30°C, il prodotto non conserva più le proprie caratteristiche di resistenza pregiudicando lo stato dei provini al momento della prova di permeabilità e rischiando di compromettere la prova stessa.

Per questa tipologia di ambiente è stato necessario progettare un sistema che mantenesse la temperatura dell'acqua sempre costante pari a circa 30°C. Sono stati predisposte due vasche per l'immersione dei campioni, con e senza additivo cristallino, caratterizzati da un rapporto a/c di 0,45 (figura 3.20 b). Per il riscaldamento dell'acqua è stato utilizzato uno scaldacqua ad immersione (figura 3.20 c), composto da un termostato per la regolazione della temperatura di esercizio, un interruttore per controllare l'errore del valore impostato ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ), una resistenza elettrica a spirale e un sistema di ventilazione. Questi ultimi due elementi sono stati posti in immersione ad un'altezza stabilita, mantenuta sempre costante per evitare malfunzionamenti del sistema. Il funzionamento si basa sul principio che l'energia elettrica, transitando all'interno della resistenza, scalda la parte in rame che a contatto con l'acqua cedendo il suo calore. Inoltre la presenza di un sistema di ventilazione ad aria permette di uniformare e ottenere la stessa temperatura in tutto il volume di acqua.

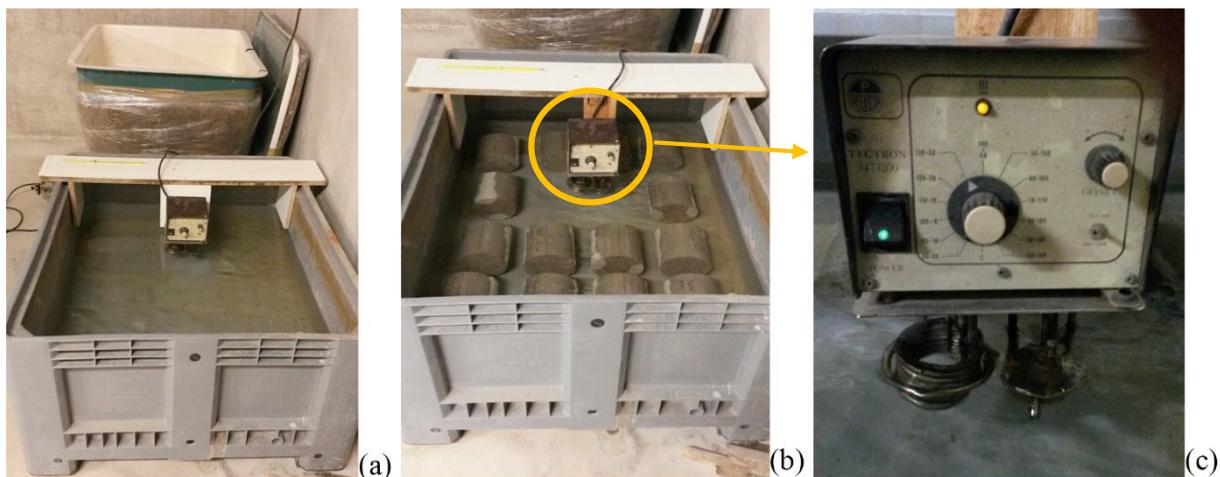


Figura 3-22: Immersione in acqua a temperatura 30°C: Preparazione del sistema di riscaldamento per entrambe le vasche (a), sistema in funzionamento con campioni cilindrici in immersione (b), apparecchio per il riscaldamento dell'acqua (c).

Durante le sei settimane di cura, è stata misurata la temperatura dell'acqua ad intervalli regolari per accertarsi che il sistema la mantenesse costante e, inoltre, a causa dell'evaporazione dell'acqua, ogni due giorni è stato necessario aggiungere un volume di acqua pari a circa 10 litri, tale da mantenere costante il volume per tutto il periodo di cura.

Anche per l'ultimo ambiente di cura è stato considerato solo il calcestruzzo con rapporto a/c di 0,45. Il programma sperimentale ha previsto sei cicli bagnato/asciutto con durata di sette giorni per ogni ciclo, caratterizzati dall'immersione in acqua a temperatura 15°C per una durata di tre giorni e mezzo (figura 3.21 a). Nei restanti, i campioni cilindrici sono stati esposti all'aria non trattata di laboratorio (figura 3.21 b). Con l'ausilio di un termoigrometro è stato possibile calcolare la temperatura e l'umidità relativa dell'ambiente, pari rispettivamente a  $17 \pm 1^\circ\text{C}$  e  $40 \pm 5\%$ .



Figura 3-23: Cicli bagnato/asciutto: immersione in acqua dei campioni (a), esposizione all'aria di laboratorio (b).

L'obiettivo di utilizzare questa tipologia di ambiente di cura è stato quello di simulare condizioni reali alle quali le strutture sono normalmente esposte. Infatti la scelta di "asciugare" i campioni esponendoli alle condizioni sopra riportate è stata motivata dalla volontà di ricreare ambienti prevalentemente secchi. È stato scelto un tempo di tre giorni e mezzo di esposizione all'aria poiché è stato ritenuto un tempo sufficiente per l'asciugatura completa dei campioni.

### 3.6. Valutazione della fessura

Lo studio della variazione del flusso d'acqua all'interno della fessura dovuta ai processi di autoguarigione, è stato affiancato a quello relativo all'evoluzione dello stato delle fessure superficiali. Perciò si tratta di utilizzare una metodologia di misurazione delle ampiezze con l'obiettivo di ottenere una relazione attendibile con il flusso d'acqua attraversante la fessura.

L'obiettivo è stato quello di ricercare e studiare fessure con ampiezza compresa tra 0,1 e 0,4 mm, perciò la metodologia utilizzata è stata suddivisa in due fasi: una fase preliminare, nella quale è stata eseguita una misurazione visiva dell'ampiezza massima della fessura. Una volta prodotto il danno, questa è stata effettuata attraverso la sovrapposizione di un fessurimetro trasparente lungo tutta la superficie della fessura, registrando l'ampiezza massima delle fessure presenti su entrambe le facce del campione. Attraverso questa procedura, è stato possibile controllare se le ampiezze delle fessure prodotte rientrassero nell'intervallo definito nel programma sperimentale.

La seconda fase, invece, è caratterizzata dalla misurazione vera e propria delle ampiezze al fine di ottenere dei valori reali da poter confrontare con il flusso d'acqua misurato durante la prova di permeabilità. La metodologia si basa sull'utilizzo di foto scattate tramite un microscopio ottico con zoom 60x che ha permesso di comporre dei panorami ad alta risoluzione sui quali è stata effettuata la misurazione. La superficie planare ottenuta dal taglio eseguito con la sega circolare prima della fessurazione, ha permesso di scattare foto della fessura mantenendo sempre la stessa messa a fuoco del microscopio. Così la distanza focale tra l'obiettivo e la superficie è rimasta costante durante tutto il procedimento di esecuzione, permettendo di confrontare le foto delle fessure con una di riferimento. Quest'ultima raffigura il fessurimetro, il quale riporta i valori in centimetri, sovrapposto a una parte della fessura e riprendente una dimensione nota, pari a 5 mm (figura 3.22). Attraverso l'uso di software grafici, è stato possibile tradurre le misurazioni in pixel nei valori corrispondenti in millimetri [46]



Figura 3-24: Esempio foto di riferimento per la determinazione della relazione tra pixel e millimetri.

Le foto sono state scattate prima e dopo il periodo di cura in modo tale da esaminare l'evoluzione delle fessure e poter confrontare i valori di ampiezza iniziali con quelli finali. Al termine dei quarantadue giorni di cura, è stato deciso di fotografare lo stato delle fessure sia prima di eseguire la prova di permeabilità sia al termine della stessa, in modo da osservare

eventuali variazioni nell'aspetto delle fessure. I campioni analizzati dopo la prova sono stati lasciati ad asciugare per circa 1-2 giorni all'aria non trattata di laboratorio per ottenere una superficie asciutta e pulita.

Come mostrato in figura 3.23, le foto scattate prima della prova di permeabilità presentano una superficie nella quale l'ampiezza della fessura non risulta del tutto chiara, a causa della diffusa precipitazione dei prodotti formati, rendendo difficile l'individuazione dello stato reale della fessura. Ciò potrebbe portare ad una valutazione e misurazione del tutto errata, in quanto in un primo momento la fessura appare completamente sigillata. Nei panorami ottenuti dopo la prova, invece, la variazione dell'apertura dovuta al processo di autoguarigione è ben visibile e facilmente misurabile. Questa procedura ha permesso di individuare quali siano i cristalli che siano in grado di resistere ad un flusso di acqua, con pressione 2 bar, e garantire di conseguenza una ottima impermeabilizzazione del materiale.

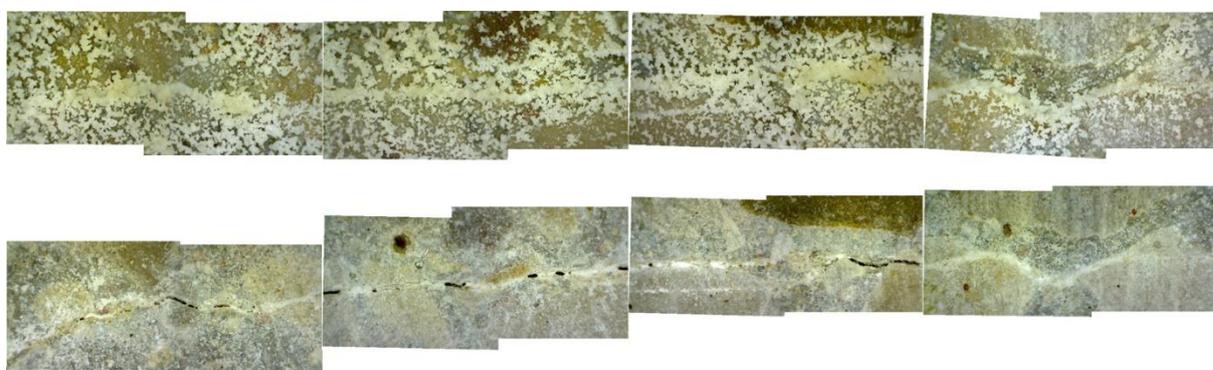


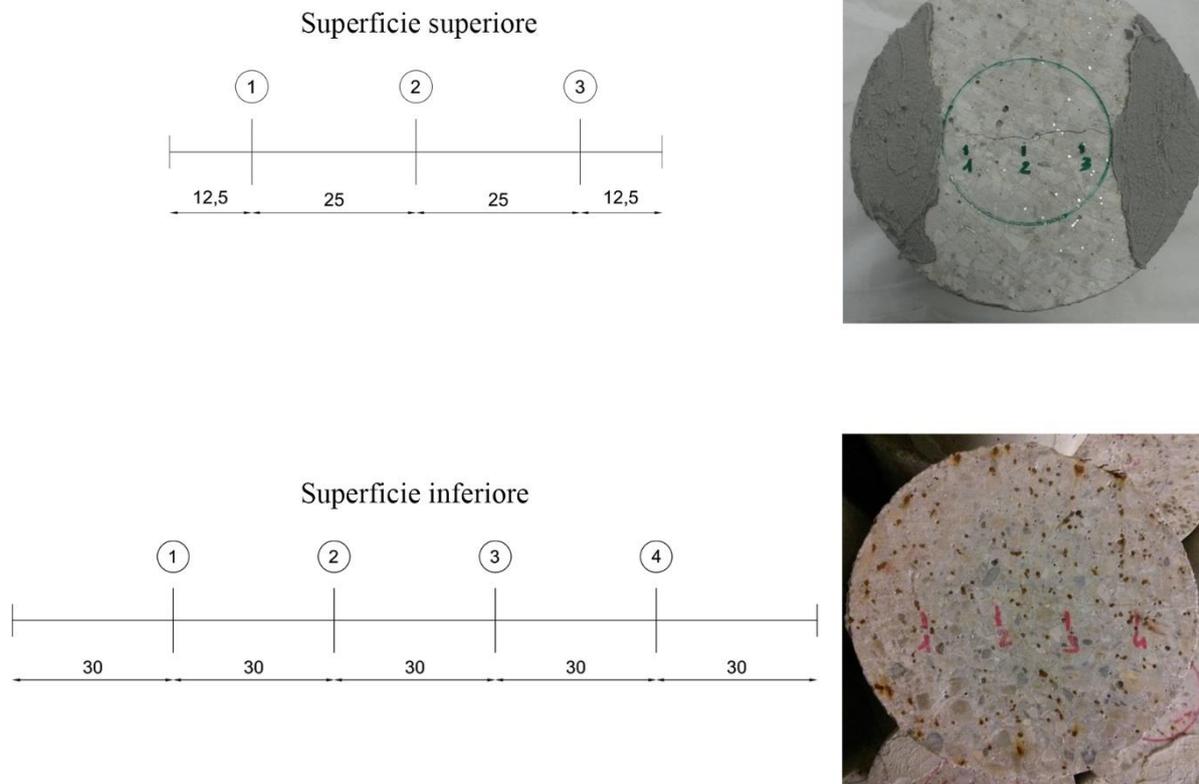
Figura 3-25: Confronto stato della fessura prima (in alto) e dopo (in basso) la prova di permeabilità a 42 giorni. Campione in esame 4a dell'impasto di controllo AM1 con rapporto a/c di 0,45, fessura inferiore.

### 3.6.1. Procedura di misurazione dell'ampiezza della fessura

Per la metodologia di misurazione della fessura è stato considerato il sistema utilizzato in studi precedenti, in particolare nella ricerca svolta da S. Moscato [46]. Con questa procedura è stato possibile tradurre il valore in pixel dell'ampiezza della fessura, fornita da un software grafico, in millimetri così da ottenere una corrispondenza con la misura reale.

Per quanto riguarda la procedura di misurazione, l'obiettivo è stato quello di creare un metodo che risulti il più possibile oggettivo, ovvero non dipendente dalla persona che esegue lo studio. Dopo la fase di prefessurazione e applicazione della pasta sigillante, sono stati riportati dei reticoli su entrambe le superfici dei campioni, i quali sono stati definiti in funzione del diametro dei cilindri e caratterizzati da tacche equidistanti tra di loro. In particolare, un numero pari a tre per le fessure sulle superfici superiori e quattro per quelle inferiori. Questa differenza di numero è dovuta al fatto che le fessure della faccia inferiore sono lunghe circa il doppio di quelle superiori, in quanto su quest'ultima è stata posta la pasta sigillante su metà

della fessura per evitare perdite di acqua durante la prova di permeabilità. In figura 3.24 viene illustrato lo schema dei reticoli con le relative misure:



*Figura 3-26: Reticoli riportati sulle superfici dei campioni utilizzati per la misurazione dell'ampiezza delle fessure in corrispondenza dei punti numerati. Le misure sono riportate in millimetri.*

Una volta definiti i reticoli, è stato possibile procedere con lo scatto di coppie di foto in corrispondenza dei punti numerati presenti sui reticoli, come mostrato in figura 3.25 a. Successivamente l'utilizzo del software commerciale Adobe Photoshop CS6 ha permesso di comporre sette panorami ad alta risoluzione per ogni campione, in particolare tre per le fessure presenti sulla superficie superiore e quattro per quelle inferiori.

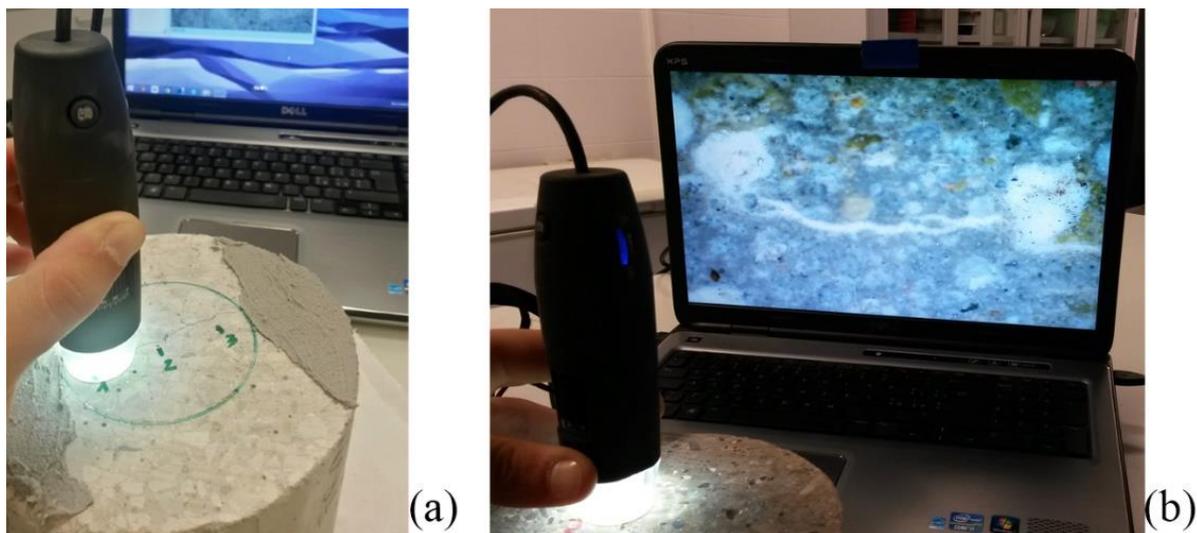


Figura 3-27: Utilizzo del microscopio ottico per scattare foto ad alta risoluzione della fessura (a), visualizzazione fessura e elaborazione delle immagini mediante software (b).

In questo modo è stato possibile confrontare lo stato delle fessure prima e dopo la cura, effettuando una serie di misurazioni per valutare l'evoluzione subita. In figura 3.26 viene riportato un esempio di fessura sigillatasi durante il periodo di cura in immersione con temperatura di 30°C. Il campione in esame è l'1a dell'impasto contenente additivo cristallino AM4S5, e la fessura è quella presente sulla superficie superiore. Si può notare come, dopo il periodo di cura, la fessura risulti completamente sigillata.

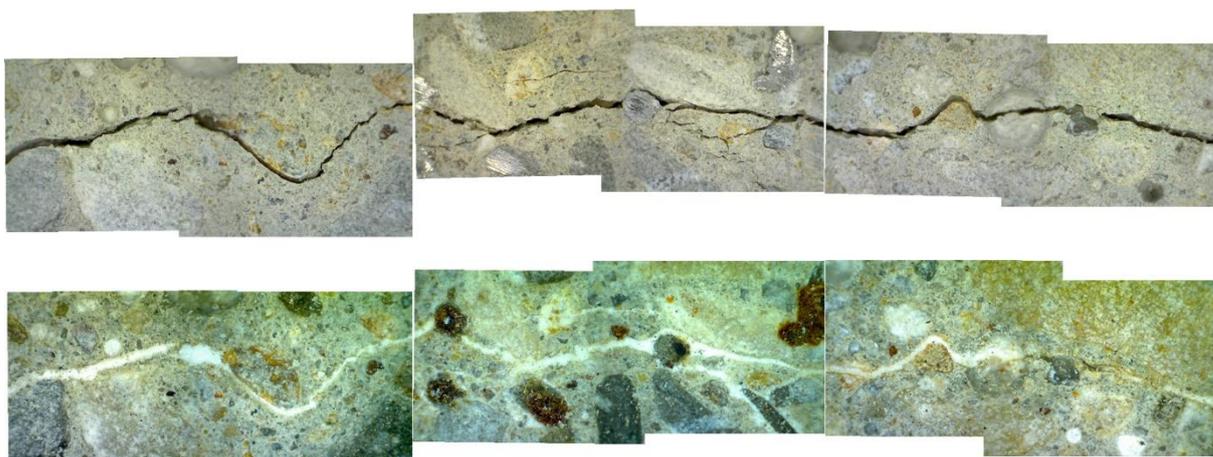


Figura 3-28: Confronto stato della fessura prima (in alto) e dopo (in basso) il periodo di cura. Campione in esame 1a dell'impasto con additivo cristallino AM4S5 e con rapporto a/c di 0,45, fessura superiore.

Composti tutti i panorami, per ciascuno di essi sono state effettuate diverse misurazioni a intervalli regolari in funzione della forma della fessura per ottenere un valore più attendibile e preciso. Per le fessure che possiedono un'ampiezza quasi costante è stato sufficiente prelevare dieci misure, mentre per quelle ritenute variabili circa venti e, una volta terminate tutte le misurazioni, viene eseguita una media di tutti i valori così da ottenere una misura in

millimetri per ogni panorama. Avendo considerato tre panorami per le superfici superiori e quattro per quelle inferiori, è stato possibile estrapolare un valore minimo, massimo e medio dell'ampiezza della fessura per ogni faccia del campione. Non conoscendo l'andamento della fessura all'interno del campione, è stato deciso di effettuare una media tra la misura della superficie superiore e quella inferiore con l'obiettivo di ottenere una misura unica che descrivesse l'ampiezza della fessura in ciascun campione.

Ricavato il valore minimo, massimo e medio della fessura per ciascun campione, è stato possibile valutare se esiste una relazione attendibile con la variazione del flusso d'acqua.

### 3.7. Prove aggiuntive

Il programma sperimentale ha previsto lo svolgimento di ulteriori prove, aventi come obiettivo quello di determinare qualitativamente la natura precipitati a seguito del periodo di cura.

La prima prova ha avuto lo scopo di osservare quale fosse la resistenza e durezza dei prodotti formati sulla superficie delle fessure, mediante l'utilizzo di un compressore ad aria impostato su una pressione di 0,7 MPa (figura 3.27 a). E' stato deciso di considerare una pressione maggiore, di circa tre volte e mezzo rispetto a quella utilizzata durante la prova di permeabilità, per dimostrare la resistenza dei prodotti e, di conseguenza, la loro capacità di impermeabilizzazione della superficie. La prova è stata effettuata considerando i campioni, con e senza additivo cristallino, sottoposti ad immersione ad una temperatura di 15°C e 30°C poiché in quest'ultimi è stata osservata un maggiore compattezza e coesione con la superficie della fessura. È stato utilizzato il compressore a tre diverse altezze dalla superficie del campione, rispettivamente 3, 5 e 10 cm, per comprendere meglio il livello di resistenza dei prodotti (figura 3.27 b).

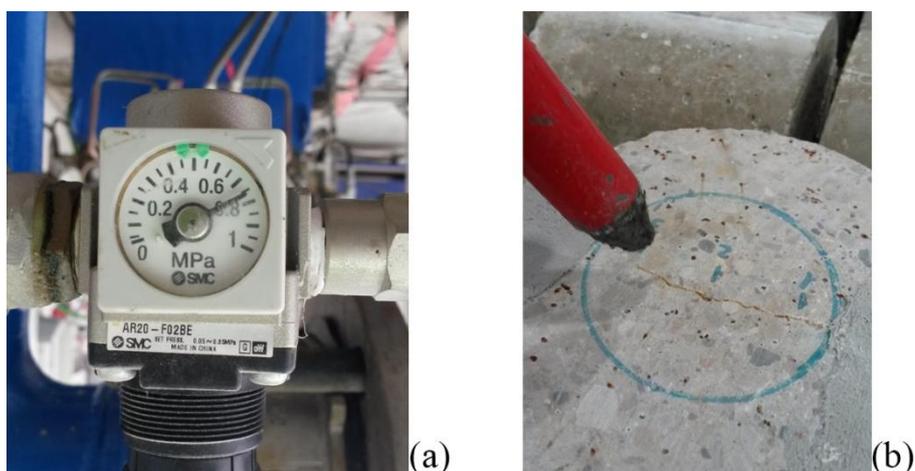
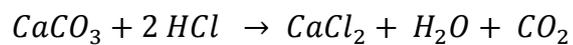


Figura 3-29: Prova di durezza: barometro (a), utilizzo del compressore ad aria sulla superficie della fessura (b).

La seconda prova, invece, ha previsto uno studio preliminare riguardante la natura dei cristalli precipitati sulle superfici della fessura, basandosi su una semplice reazione chimica, riportata qui di seguito:



Nel capitolo 4.7 verranno riportati e discussi i risultati ottenuti dalle seguenti prove.



## Capitolo 4 - ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI

Con riferimento a studi precedenti [45], [46] per l'elaborazione dei risultati è stata considerata la sola ampiezza media della fessura in quanto risulta essere il valore che presenta una migliore correlazione con il flusso d'acqua. In questo capitolo vengono analizzati i dati ottenuti dalle prove effettuate in questo studio. I risultati, legati alle miscele aventi rapporti a/c pari a 0,45 e 0,60 e posti in immersione, sono in numero superiore rispetto a quelli analizzati per gli altri ambienti di cura in quanto è stato ritenuto opportuno realizzare ulteriori campioni per garantire una minore aleatorietà dei dati, aumentano così la loro affidabilità. In particolare sono esposti solo i grafici ritenuti più rilevanti e che hanno permesso di trarre le conclusioni finali esposte nel capitolo 5.

Al fine di rendere la visualizzazione più chiara, è stato deciso di riportare i soli campioni che hanno mostrato un flusso d'acqua iniziale inferiore a 10000 ml, scelta ritenuta accettabile in quanto solo il 5% dei campioni presenta valori maggiori di flusso. In aggiunta, quest'ultimi presentano una dispersione troppo accentuata e un comportamento troppo aleatorio. I grafici completi sono allegati in appendice C. Questa scelta ha permesso, inoltre, di limitare l'analisi e la valutazione di ampiezze di fessura che ricadono in un intervallo di valori tra 0,1 e 0,4 mm, con un errore di  $\pm 0,05$  mm.

In appendice B viene riportata una tabella riassuntiva dei risultati ottenuti, evidenziando i valori che non sono stati considerati.

### 4.1. Relazione tra flusso e ampiezza media della fessura

L'obiettivo di questo paragrafo è quello di capire se esiste una relazione tra il flusso d'acqua passante attraverso la fessura e l'ampiezza iniziale della stessa, ovvero se vi è un legame tra il livello di permeabilità e l'entità del danno prodotto. Il concetto di base è che quanto maggiore è l'apertura della fessura, tanto maggiore sarà la quantità d'acqua che la attraversa. Una relazione di questo tipo potrebbe fornire maggiori informazioni relative all'entità del danno, dando un'idea della quantità di flusso di acqua capace di penetrare all'interno e, di conseguenza, sulla velocità di degrado.

Nel grafico riportato in figura 4.1 è stata riportata l'ampiezza media  $W_{media}$  della fessura sull'asse delle ascisse, mentre in quello delle ordinate è presente la quantità di acqua rilevata nella prova di permeabilità prima di sottoporre i campioni alle condizioni di cura. Per l'elaborazione del grafico sono state considerate tutte le miscele studiate poiché non vi è alcuna dipendenza con la tipologia di impasto o con la presenza o meno dell'additivo cristallino.

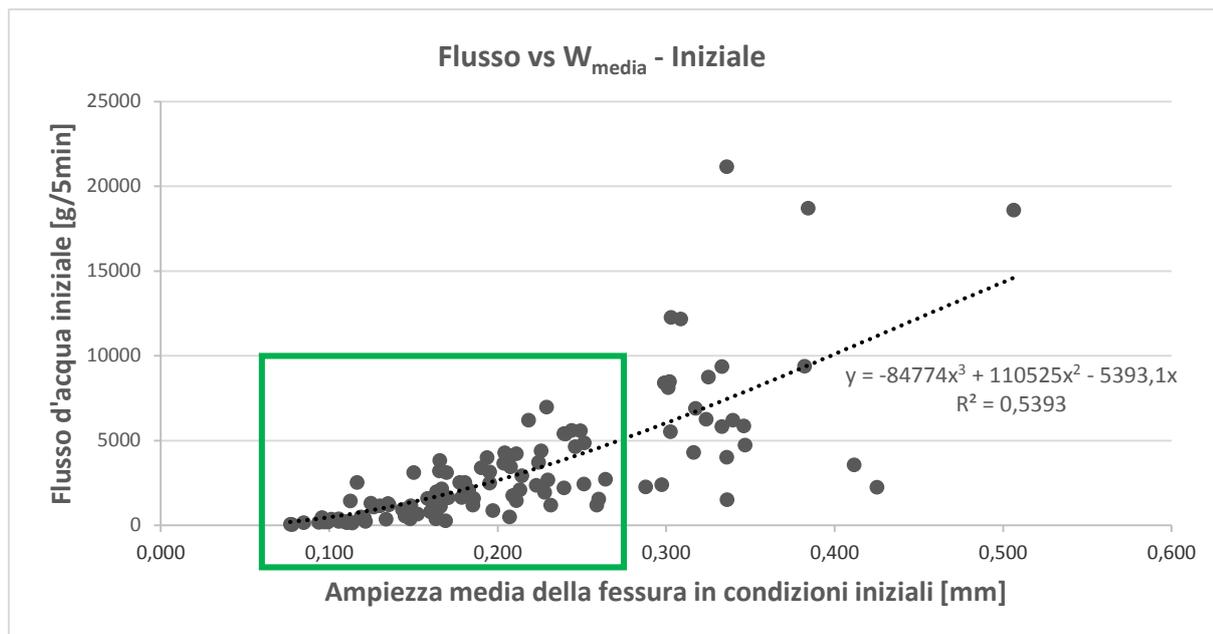


Figura 4-1: Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza della fessura, in condizioni iniziali.

Il grafico mostra come per fessure di piccola-media entità, caratterizzate da un'ampiezza della fessura compresa nell'intervallo 0,078 e 0,26 mm circa, si ottenga una buona relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura il cui andamento può essere descritto mediante l'utilizzo di curve polinomiali cubiche. Per ampiezze maggiori, invece, è visibile una maggiore dispersione che rende difficile l'individuazione di un legame. Questa dispersione è dovuta principalmente al fatto che il flusso di acqua dipende dall'ampiezza superficiale della fessura e dal suo andamento all'interno del campione. Perciò, non essendo a conoscenza della struttura interna al provino e avendo definito una procedura di misurazione della fessura superficiale che fornisce valori approssimati, risulta difficile definire una relazione precisa e attendibile ed evitare una piccola dispersione dei dati. Inoltre la presenza della fibra all'interno dell'impasto potrebbe impedire il passaggio del flusso.

## 4.2. Healing Rate

Con l'obiettivo di analizzare meglio gli effetti del *self-healing* sulla permeabilità e sull'ampiezza della fessura, sono stati definiti indici capaci di descrivere il grado di guarigione dei campioni. Tali indici seguono la seguente relazione:

$$I_x = 1 - \frac{X_{finale}}{X_{iniziale}}$$

dove:

- $X_{finale}$  è il valore finale del parametro considerato dopo le sei settimane di cura;

- $X_{iniziale}$  è il valore iniziale del parametro considerato prima del periodo di cura.

Nei paragrafi successivi verranno riportati i parametri utilizzati per determinare tale percentuale di guarigione.

### 4.3. Andamento generale del flusso

In questo paragrafo viene effettuato uno studio sulla variazione del flusso d'acqua prima e dopo la cura, relativa a tutti gli impasti studiati nei rispettivi ambienti. Nonostante la variazione della quantità di acqua passante attraverso la fessura sia considerato uno dei parametri principali per valutare gli effetti dell'autoguarigione, ciò consente solo di fornire una prima valutazione del fenomeno.

Sugli assi dei grafici mostrati per descrivere questo comportamento vengono riportate le quantità di acqua calcolate al termine della prova di permeabilità e misurate in millilitri. La bisettrice, invece, rappresenta una situazione nella quale la quantità di acqua finale risulta pari a quella iniziale e permette di comprendere facilmente se i campioni hanno ottenuto una riduzione del flusso e, di conseguenza, beneficiato degli effetti dell'autoguarigione.

La figura 4.2 mostra la variazione del flusso per i campioni caratterizzati da un rapporto a/c di 0,45 e immersi in acqua con temperatura di 15°C per una durata di sei settimane. La sua diminuzione risulta evidente per tutti i campioni analizzati e, in particolare, non si osserva una differenza sostanziale tra i provini di controllo e quelli contenenti l'additivo cristallino. Quest'ultima specie, però, presenta una riduzione del flusso maggiore, come si può dedurre dalle linee di tendenza riportate in figura. Inoltre ha dimostrato di possedere un comportamento più stabile per valori di flusso fino a circa 4000 ml corrispondenti a fessure di circa 0,26 mm, superati i quali entrambe le miscele presentano un comportamento disperso. Nonostante ciò, la maggior parte dei campioni presenta un flusso finale quasi nullo.

Nella figura 4.3, invece, sono riportati i campioni caratterizzati da un rapporto a/c di 0,60 e sottoposti al medesimo ambiente e condizioni. Si nota come entrambe le miscele contenenti una maggiore quantità di acqua hanno un comportamento simile e stabile, ottenendo una visibile riduzione di flusso solo per valori inferiori a 1500 ml, corrispondente a fessure di piccole entità. Sono pochi, comunque, i campioni che presentano un completo azzeramento del flusso. In questo caso, non vi è alcuna differenza tra campioni di controllo e quelli contenenti l'additivo cristallino.

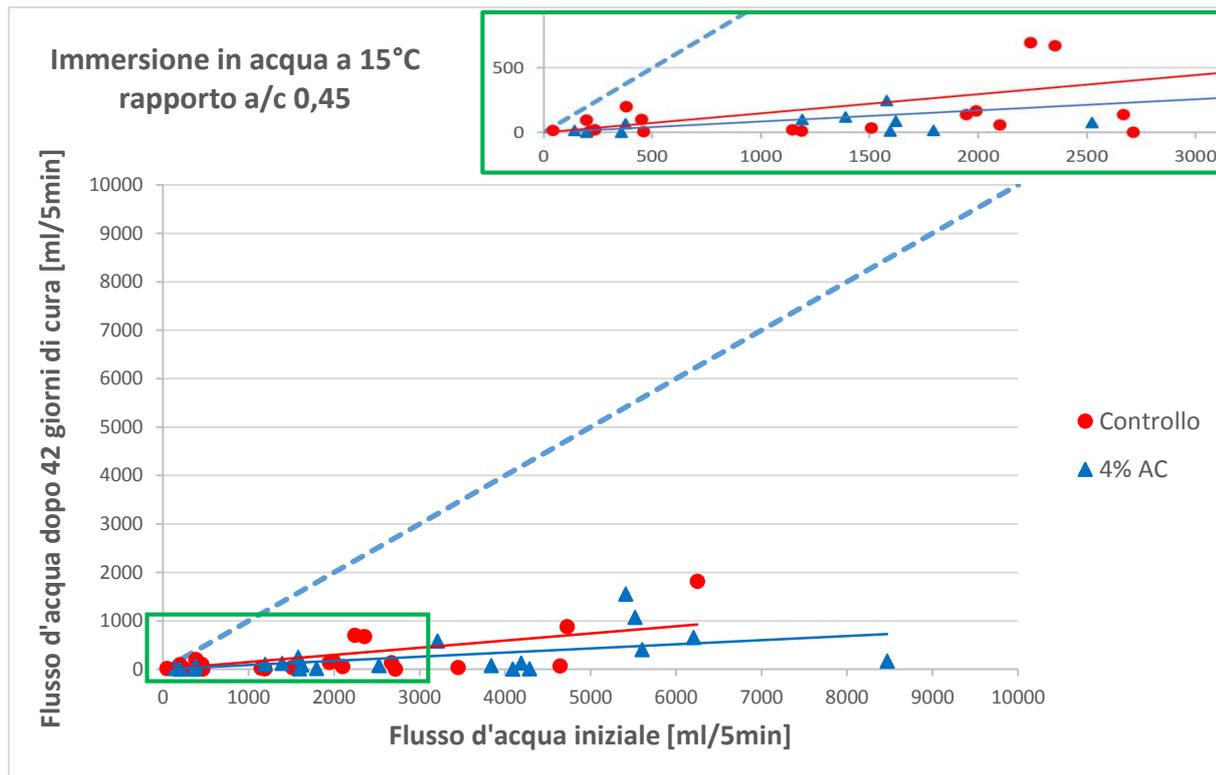


Figura 4-2: Confronto tra flusso di acqua iniziale e finale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e posti in immersione a 15°C.

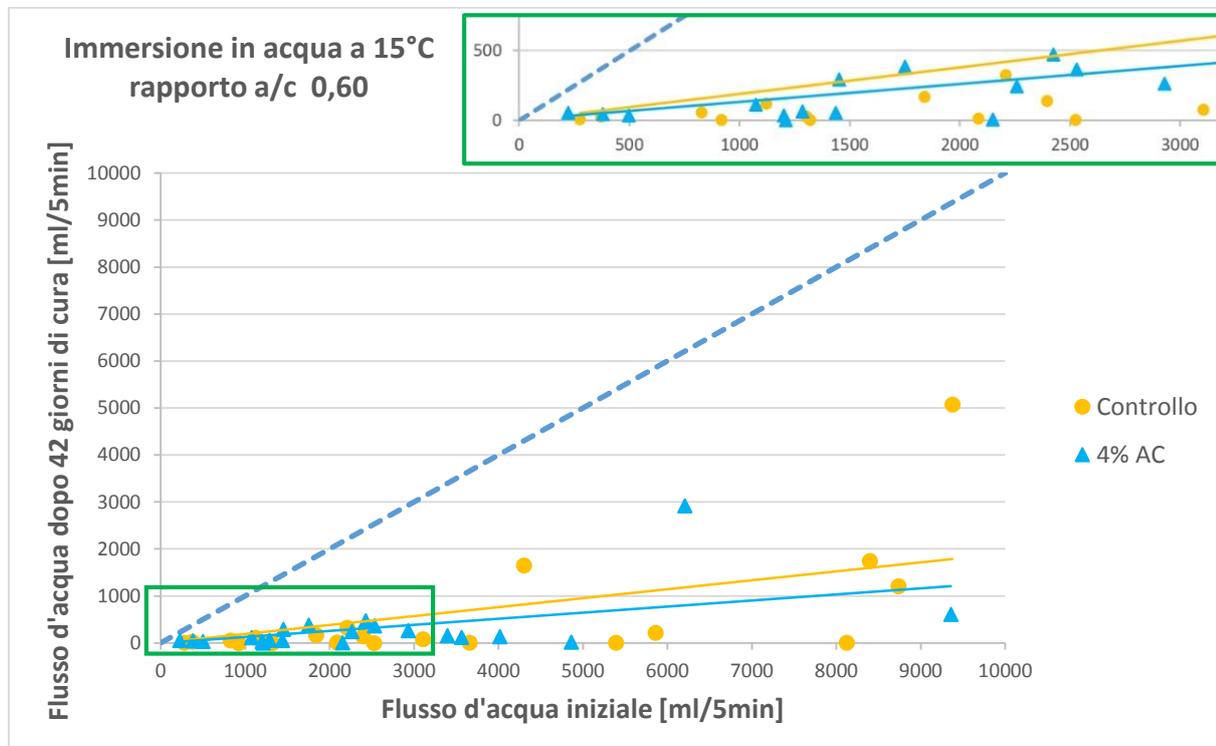


Figura 4-3: Confronto tra flusso di acqua iniziale e finale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,60 e posti in immersione a 15°C.

Nonostante questa tipologia di grafici permette di effettuare una valutazione preliminare, è possibile notare nella figura 4.4 come un aumento di temperatura possa apportare dei benefici notevoli in termini di riduzione di flusso. Infatti i campioni con l'additivo cristallino e quelli di controllo presentano un comportamento stabile anche per valori significativi di flusso, garantendo una riduzione totale. Solo un provino contenente l'additivo mostra un aumento di flusso rispetto al valore iniziale, considerato un punto anomalo che verrà analizzato in appendice C in quanto ritenuto ininfluenza.

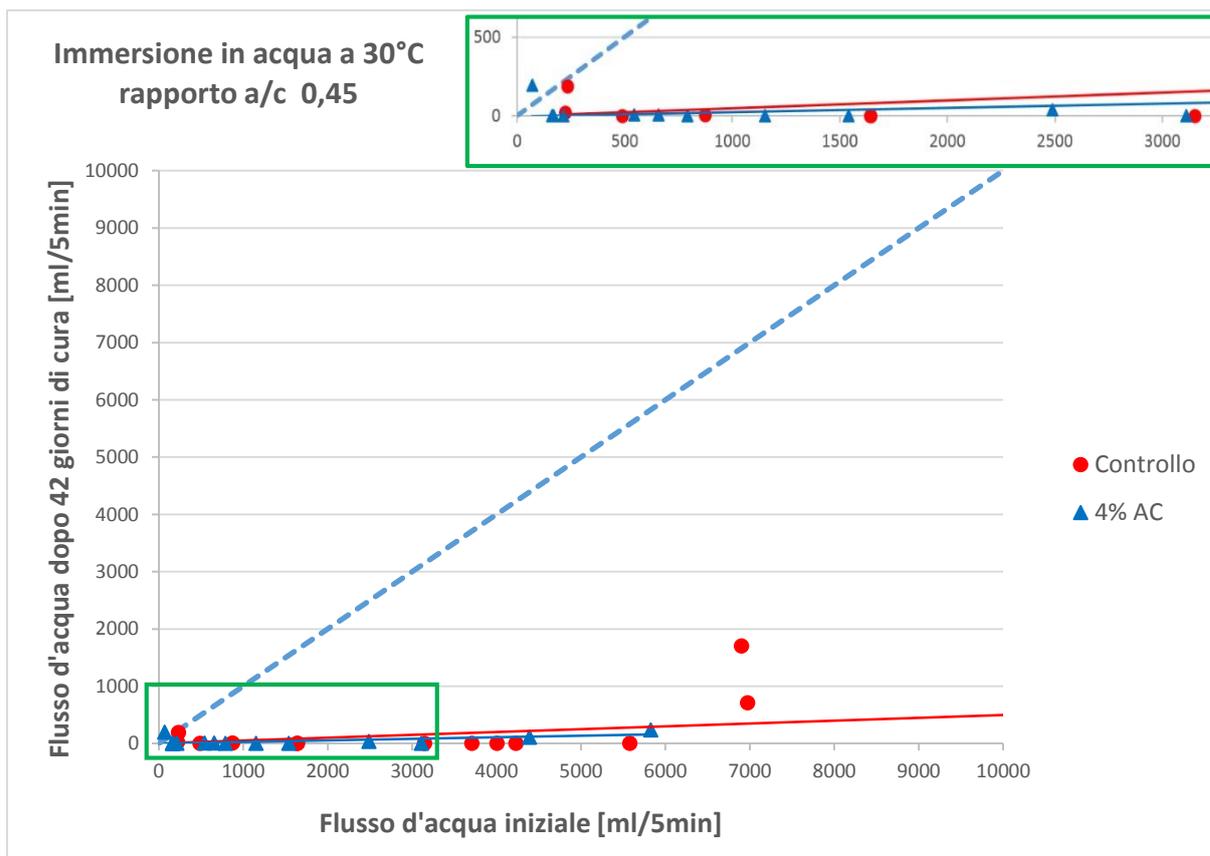


Figura 4-4: Confronto tra flusso di acqua iniziale e finale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e posti in immersione a 30°C.

La figura 4.5 mostra, invece, quale sia l'importanza della presenza dell'acqua. Infatti entrambe le tipologie di campioni sottoposti a cicli bagnato/asciutto presentano una forte dispersione e una difficoltà nella riduzione del flusso. La possibile spiegazione di questo fenomeno verrà riportata in seguito, dopo un'analisi più ampia e approfondita di tutti i dati ottenuti. Risulta, comunque, molto difficile individuare un andamento e affermare quale delle due miscele ha manifestato una maggiore diminuzione del flusso a causa del livello di dispersione presente.

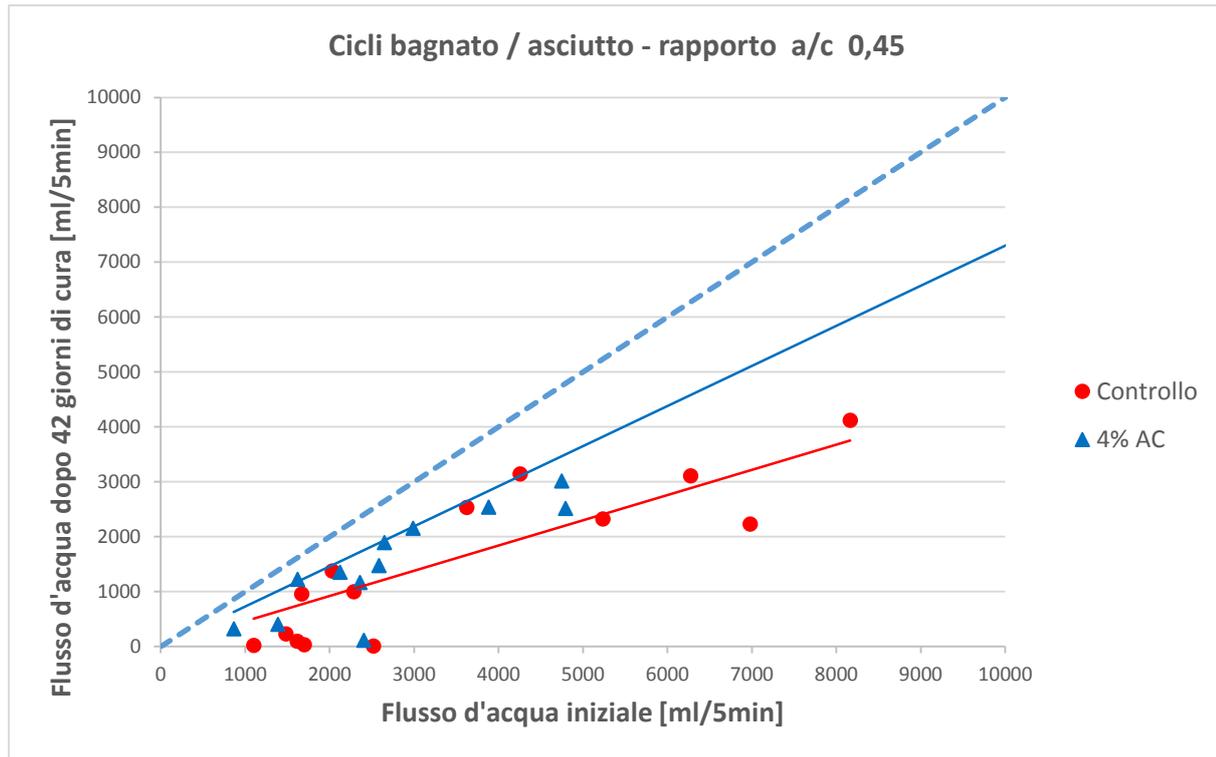


Figura 4-5: Confronto tra flusso di acqua iniziale e finale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e sottoposti a cicli bagnato/asciutto.

#### 4.4. Riduzione del flusso

Questo studio ha focalizzato l'attenzione sulla variazione di permeabilità che rappresenta il parametro fondamentale per analizzare e quantificare gli effetti del *self-healing* nel calcestruzzo. Per valutare di tale fenomeno, a esso è stata affiancata l'osservazione e la misurazione della chiusura della fessura, la quale può avvenire sia superficialmente sia interessare la parte interna al campione. Di conseguenza, la variazione di ampiezza della fessura dovuta agli effetti dell'autoguarigione comporta una riduzione parziale o totale del flusso d'acqua. Per quantificare questa variazione di flusso è stato definito un indice che ha permesso di comprendere ed esaminare quale fosse il grado di autoguarigione dei campioni e quali condizioni di cura abbiano influito maggiormente. L'indice utilizzato per la variazione del flusso, caratterizzato da valori compresi tra 0 e 1, è il seguente:

$$I_{V.F.} = 1 - \frac{WF_{finale}}{WF_{iniziale}}$$

dove:

- $WF_{finale}$  è la quantità di acqua passante attraverso la fessura al termine della cura, espresso in millilitri;
- $WF_{iniziale}$  è la quantità di acqua passante attraverso la fessura prima della cura, espresso in millilitri;

In seguito verranno riportati due tipologie di grafici con i quali è stato possibile analizzare i risultati relativi ad ogni ambiente di cura, con le rispettive miscele, confrontando di volta in volta il comportamento dei campioni di controllo e quelli contenenti l'additivo cristallino. Con riferimento a quanto affermato all'inizio del capitolo, vengono considerati soli i dati relativi a quei provini che hanno ottenuto un flusso di acqua inferiore a 10000 ml.

Questa ricerca ha lo scopo di valutare e analizzare gli effetti dell'autoguarigione per ampiezze di fessura comprese nell'intervallo tra 0,1 e 0,4 mm, con errore  $\pm 0,05$  mm. Per questo motivo risulta interessante riportare un grafico, appartenente alla prima tipologia, nella quale viene messa in relazione l'ampiezza media iniziale della fessura con la variazione di flusso, con l'obiettivo di comprendere quale sia la riduzione del flusso di acqua in funzione del danno prodotto. Nella seconda, invece, viene relazionata il flusso iniziale con l'indice di guarigione (HR – Healing Rate) così da esaminare gli effetti del *self-healing* in ciascun ambiente di cura. I campione che presentano un valore di HR pari a 1 dimostrano di aver beneficiato della completa chiusura della fessura con la conseguente riduzione totale del flusso.

#### 4.4.1. Immersione in acqua con temperatura di 15°C

In questa sezione verranno riportati i grafici sopra descritti relativi alle due miscele, aventi differente rapporto acqua/cemento, sottoposte al medesimo ambiente di cura. Questa suddivisione ha il solo obiettivo di rendere più chiara la lettura e valutazione dei risultati riguardanti le due tipologie di calcestruzzo.

##### 4.4.1.1. Calcestruzzo con rapporto acqua/cemento di 0,45

In generale si può affermare che tutti i campioni, sia di controllo sia con additivo, presentano un'elevata riduzione del flusso. In particolare è possibile osservare in figura 4.6 che, per fessure di ampiezza compresa tra 0,15 e 0,35 mm, questa diminuzione risulta rilevante. In particolare, mettendo in relazione l'Healing Rate con il flusso iniziale è possibile osservare un comportamento più stabile da parte dei campioni con additivo cristallino, i quali presentano la maggior parte dei valori di HR superiori a 0,80 e ritenuti accettabili.

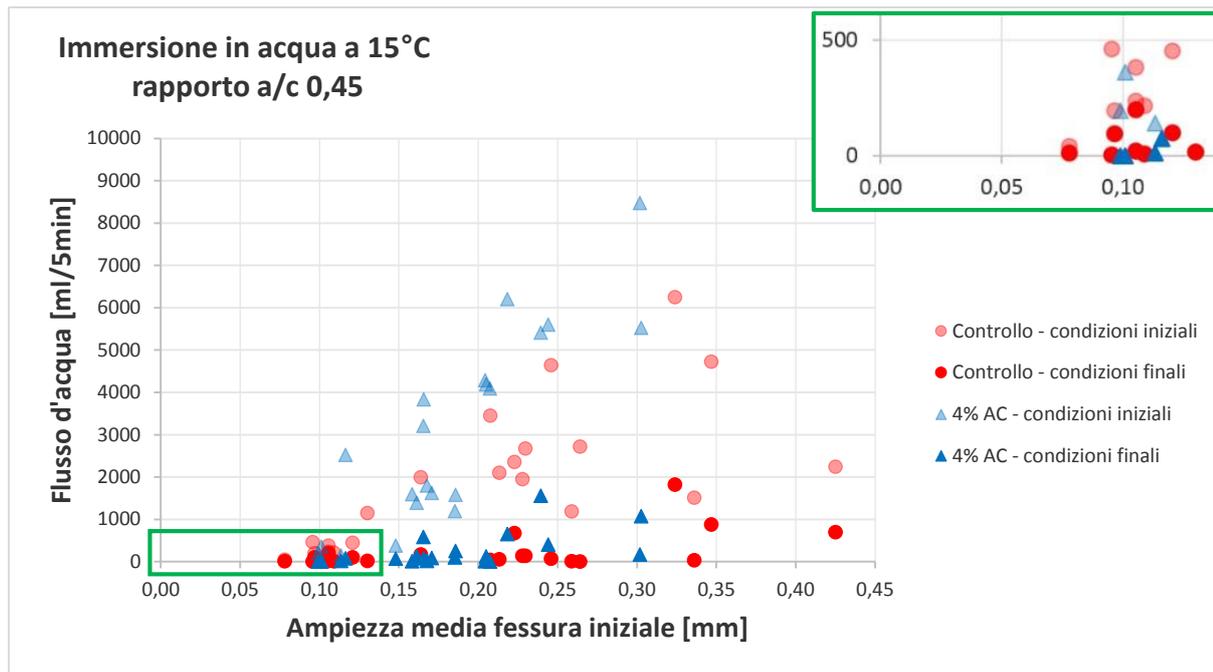


Figura 4-6: Confronto variazione flusso di acqua con ampiezza iniziale della fessura. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e posti in immersione a 15°C.

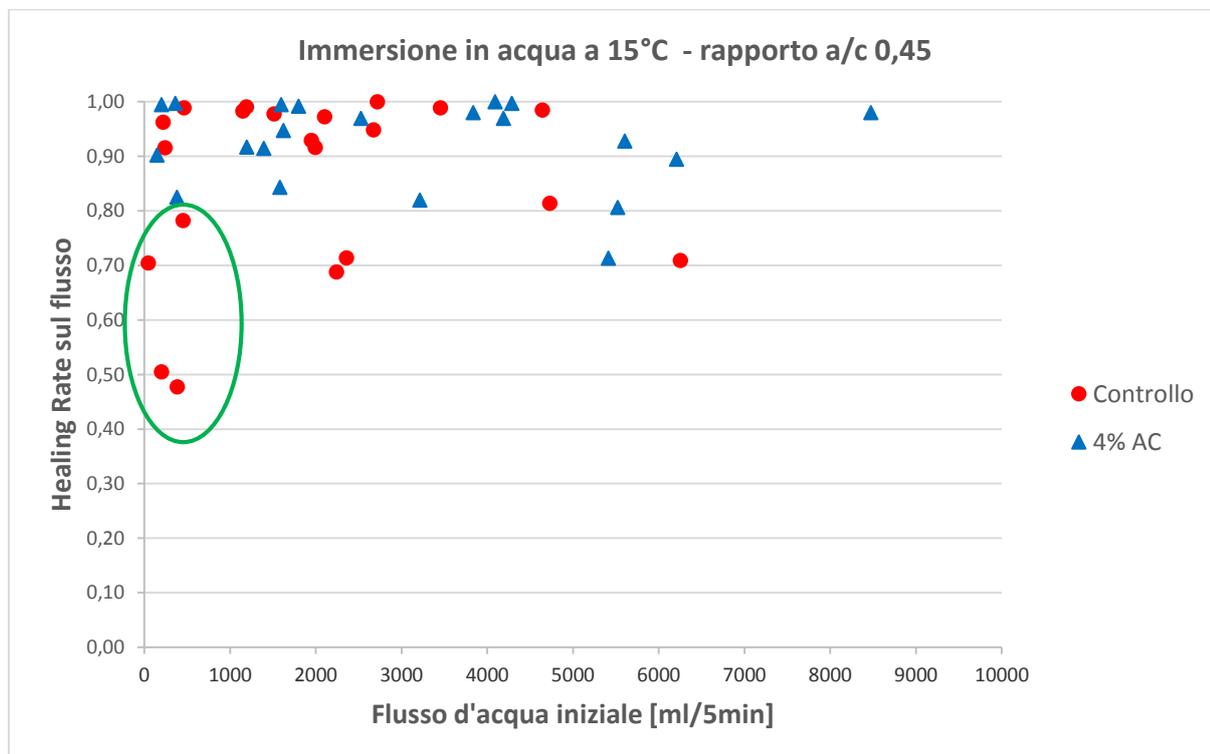


Figura 4-7: Healing Rate in relazione con il flusso di acqua iniziale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e posti in immersione a 15°C.

La scelta di utilizzare il primo grafico a supporto del secondo è stata effettuata per illustrare meglio il comportamento di fessure di piccola entità, caratterizzati da un flusso inferiore a 500 ml. Infatti, nonostante la forte dispersione presente nella seconda tipologia di grafico, anch'esse possiedono una buona capacità di riduzione del flusso, apprezzabile in figura 4.6. L'elevata dispersione, segnalata in figura 4.7, è causata principalmente dal fatto che quando si considerano flussi molto piccoli risulta difficile individuare un valore di HR che rispecchi la reale diminuzione di flusso, dovuta alla definizione dell'indice. Inoltre è presumibile che, data la ridotta ampiezza, la quantità di acqua capace di permeare all'interno della fessura non sia sufficiente ad attivare i processi di autoguarigione.

Complessivamente, i campioni contenenti l'additivo presentano un comportamento più stabile e percentuali di guarigione sempre maggiori di quelli di controllo, raggiungendo un valore medio pari a 0,92.

#### 4.4.1.2. *Calcestruzzo con rapporto acqua/cemento di 0,60*

Aumentando la quantità di acqua nell'impasto, si ottiene complessivamente una considerevole diminuzione del flusso da parte di entrambe le tipologie di campioni, ottenendo una percentuale di guarigione di circa il 90% in tutto l'intervallo di ampiezze di fessura studiate, fenomeno visibile in figura 4.8. In particolare, la figura 4.9 mostra che la miscela di controllo sembra possedere una capacità di riduzione del flusso migliore rispetto a quella con additivo, in quanto una buona percentuale di campioni presenta valori più stabili di HR superiori a 0,90, raggiungendo a volte il completo annullamento del flusso. La differenza risulta comunque molto leggera.

La notevole capacità di riduzione del flusso è probabilmente dovuta all'utilizzo di un rapporto a/c superiore che favorisce il processo di idratazione delle particelle di cemento. Inoltre, data la difficoltà dell'acqua di permeare all'interno di fessure di piccole entità durante il periodo di cura, una continua disponibilità di acqua potrebbe permettere l'attivazione dei processi relativi all'autoguarigione anche all'interno della fessura e non solo superficialmente.

Invece, per valori di flusso maggiori a 6000 ml corrispondenti ad ampiezze di fessura maggiori di 0,30 mm, si osserva una maggiore dispersione legata ad un abbassamento dell'indice di autoguarigione, confermando quanto riportato in letteratura riguardo la difficoltà di "guarire" fessure con ampiezze medio-grandi. Complessivamente, entrambe le tipologie di miscele hanno ottenuto una percentuale di guarigione di circa il 90%.

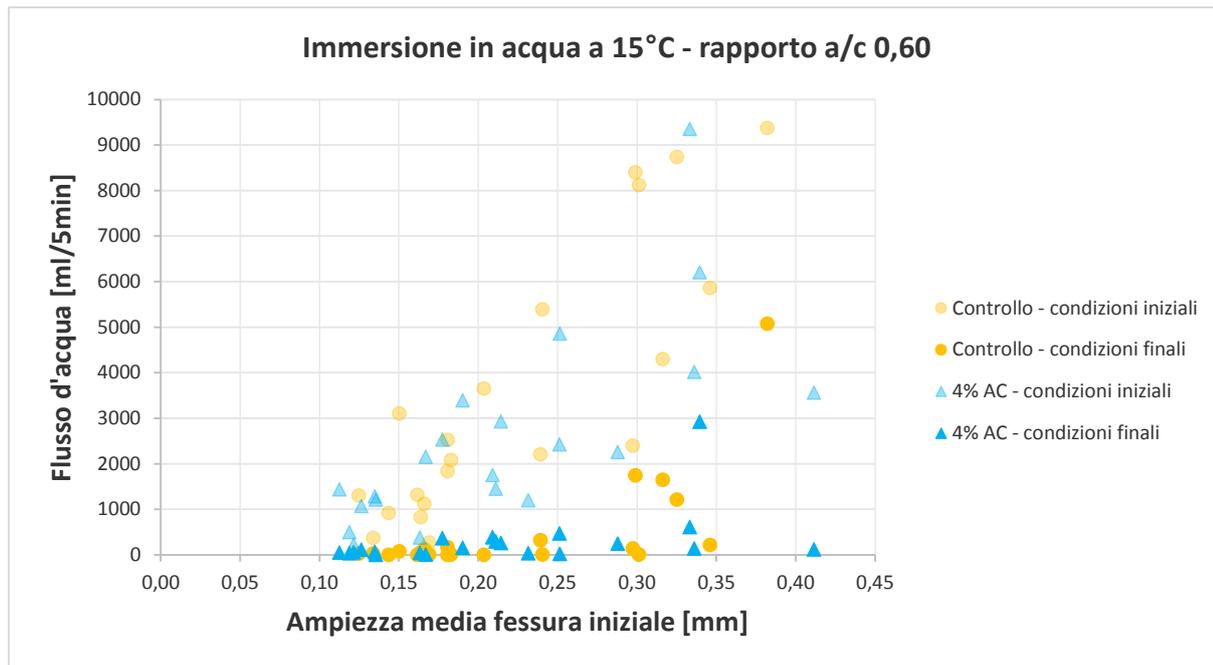


Figura 4-8: Confronto variazione flusso di acqua con ampiezza iniziale della fessura. Campioni con rapporto a/c pari a 0,60 e posti in immersione a 15°C.

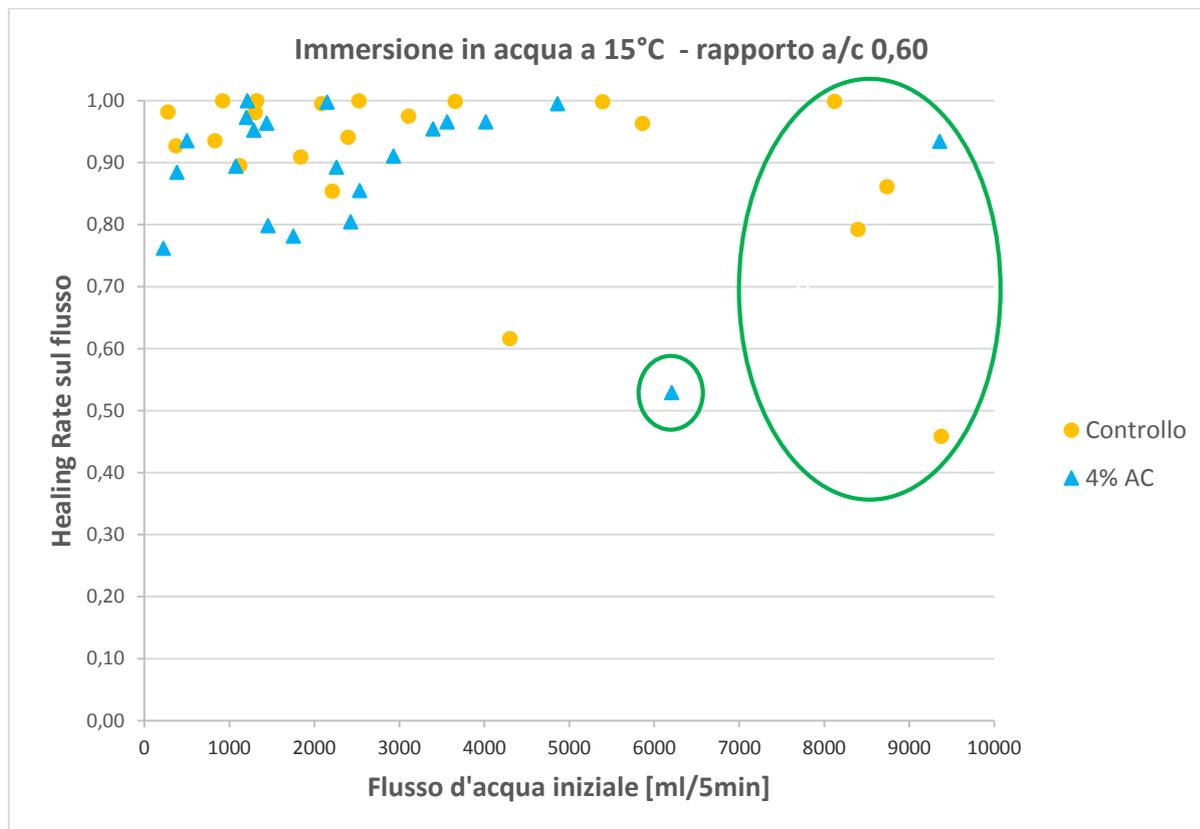


Figura 4-9: Healing Rate in relazione con il flusso di acqua iniziale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,60 e posti in immersione a 15°C.

#### 4.4.2. Immersione in acqua con temperatura di 30°C

Lo studio di questa tipologia di ambiente ha permesso di ottenere i risultati sperati. È noto che la temperatura gioca un ruolo di fondamentale importanza sulla cinetica del processo di idratazione del cemento alle brevi stagionature. Infatti l'aumento della stessa comporta un incremento della velocità di reazione di tutti i minerali costituenti il clinker in presenza di acqua.

Ciò è chiaramente visibile dai risultati riportati in entrambe le tipologie di grafici (figure 4.10-4.11), nei quali si ha una riduzione del flusso di una certa rilevanza con valori di HR molto prossimi a 1 e un andamento molto stabile. Infatti le due tipologie di campioni presentano una ottima capacità di bloccare il flusso, anche se quelli con l'additivo godono di una percentuale di guarigione ben superiore, pari al 99%, rispetto al 90% della miscela di controllo, ritenuto comunque un ottimo valore.

In figura 4.10 si osserva una certa difficoltà nel "guarire" fessure di ampiezza superiore a 0,30 mm che presentano, comunque, valori di guarigione intorno a 0,80÷0,90. Nella figura 4.11, invece, è stata segnalata in verde la presenza di un punto ritenuto anomalo. Inoltre, è stato ritenuto opportuno non considerare un valore, relativo alla miscela contenente additivo cristallino, il quale ha presentato un valore di flusso finale superiore a quello iniziale. Queste situazioni considerate anomale verranno analizzate nel paragrafo nel quale si valuta la relazione tra flusso e fessura. Tutti i dati e i relativi grafici completi sono comunque riportati nelle appendici B e C.

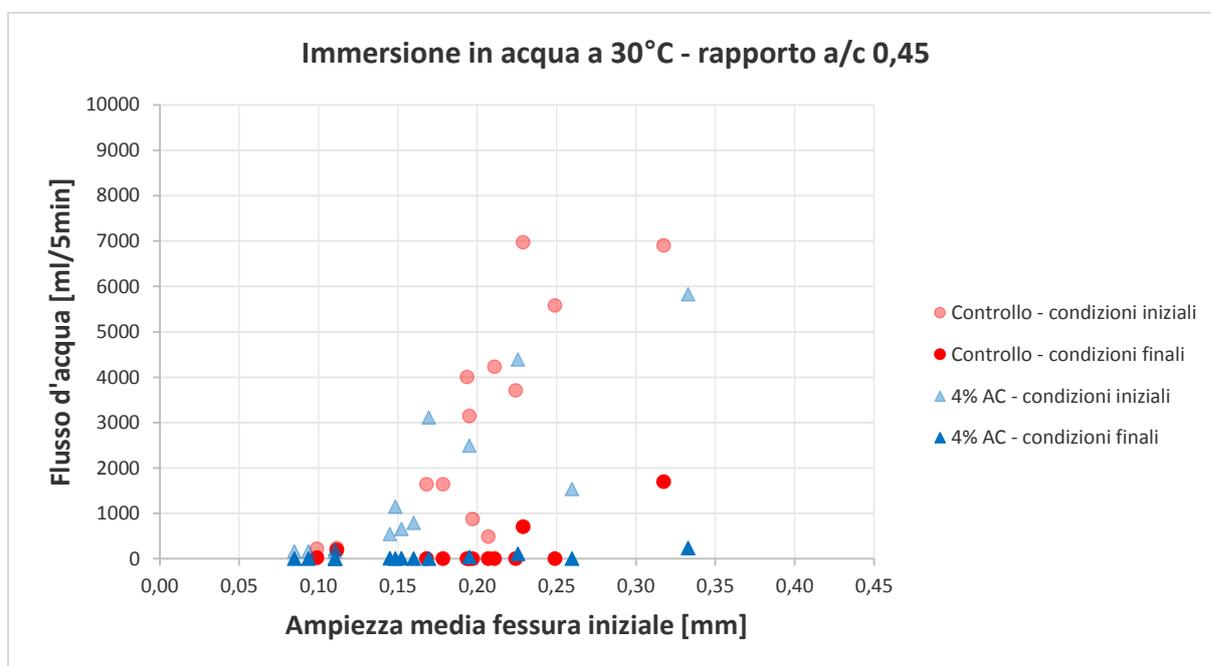


Figura 4-10: Confronto variazione flusso di acqua con ampiezza iniziale della fessura. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e posti in immersione a 30°C.

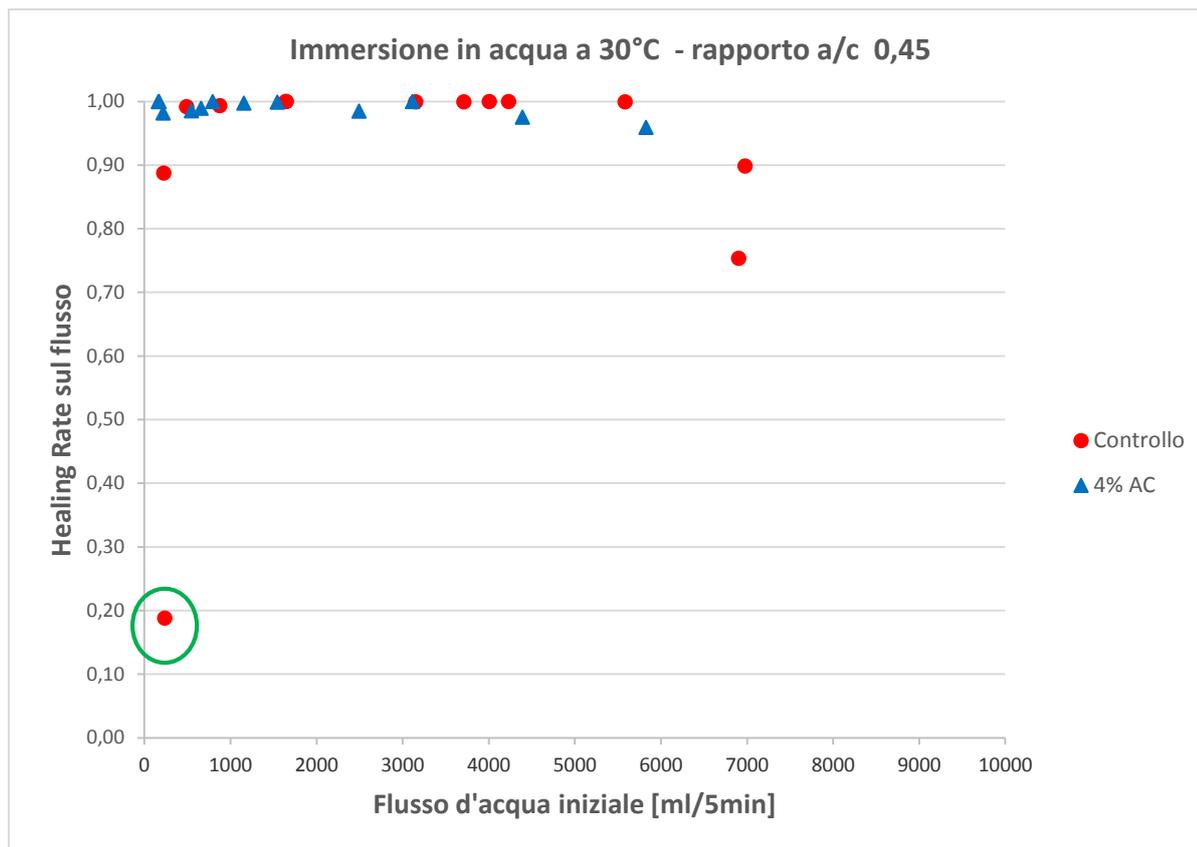


Figura 4-11: Healing Rate in relazione con il flusso di acqua iniziale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e posti in immersione a 30°C.

#### 4.4.3. Cicli bagnato/asciutto

I risultati ottenuti in questo caso evidenziano quanto sia importante la presenza di acqua in un ambiente considerato di cura. Infatti i dati presentano una forte dispersione per entrambe le tipologie di campioni, con e senza additivo cristallino, rendendo difficile l'individuazione di un andamento preciso. Inoltre, il limitato contatto con l'acqua da parte dei provini produce una incapacità, anche se parziale, di bloccare il passaggio del flusso ottenendo valori di "guarigione" compresi tra 0,20 e 0,70 per tutte le ampiezze di fessura considerate. Pochi sono i campioni in grado di ridurre il flusso in maniera rilevante ed, in aggiunta, data l'elevata dispersione dei dati non è possibile trarre conclusioni certe riguardanti il grado di guarigione dei campioni.

Questa dispersione e la conseguente difficoltà nel ridurre il flusso è dovuta probabilmente sia al tempo limitato di immersione in acqua (3 giorni e mezzo per ogni ciclo) che non ha permesso l'attivazione totale del processo di autoguarigione sia alle condizioni di esposizione all'aria, temperatura di circa 17°C e U.R. di 40%, che ha provocato l'interruzione di tale processo e, probabilmente, ha accentuato maggiormente il fenomeno del ritiro producendo l'effetto contrario a quello sperato.

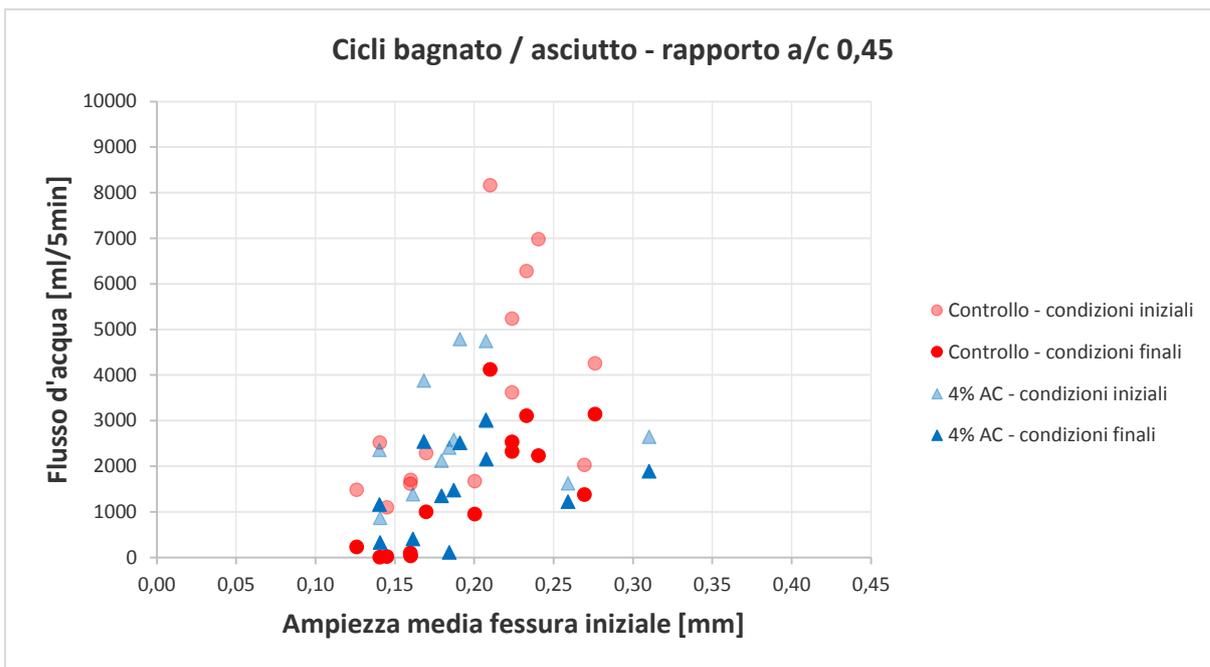


Figura 4-12: Confronto variazione flusso di acqua con ampiezza iniziale della fessura. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e sottoposti a cicli bagnato/asciutto.

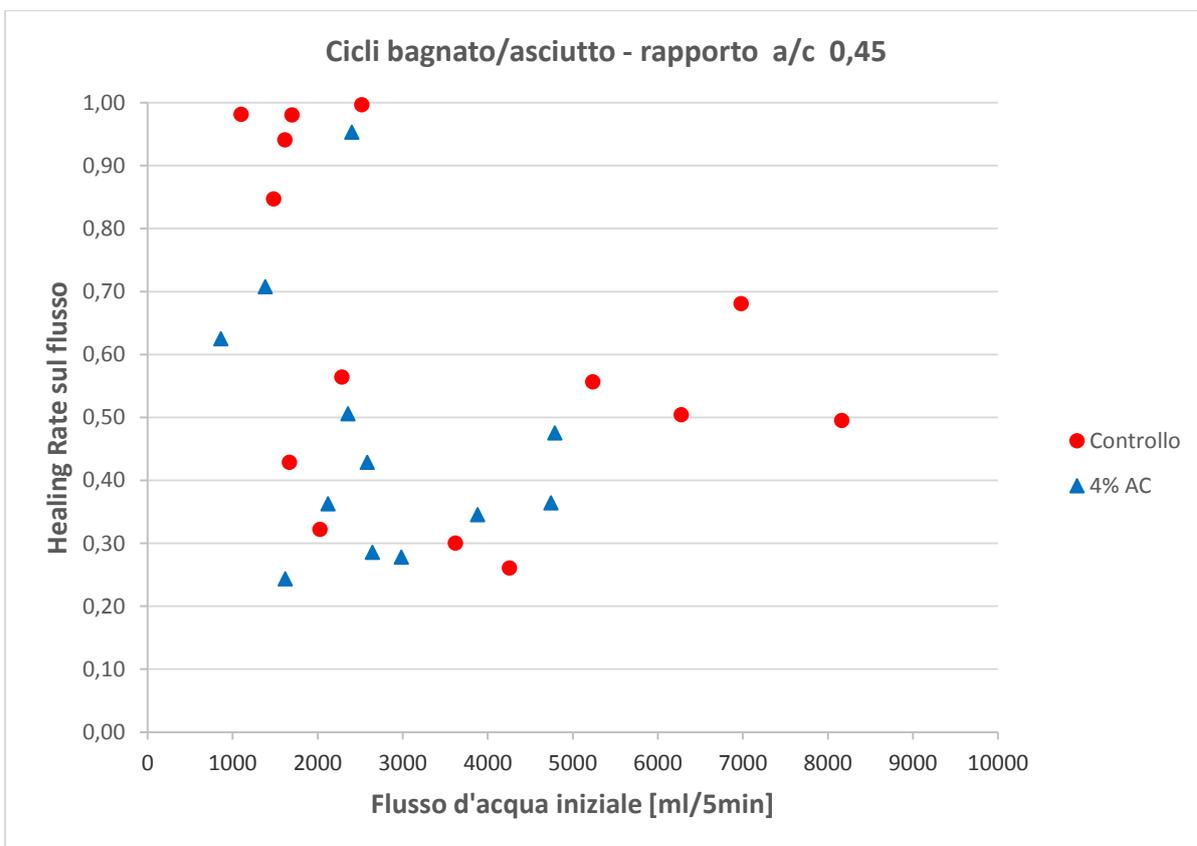


Figura 4-13: Healing Rate in relazione con il flusso di acqua iniziale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e sottoposti a cicli bagnato/asciutto.

#### 4.4.4. Confronto calcestruzzo di controllo e con additivo cristallino

Per una esposizione più chiara dei risultati è stato suddiviso questo paragrafo in due gruppi, in funzione della tipologia di calcestruzzo e degli ambienti di cura studiati, con lo scopo di eseguire un confronto dei dati ottenuti.

Mediante la sovrapposizione dei risultati esposti in precedenza, nella prima sezione eseguiremo un confronto tra le due tipologie di campioni di controllo e quelli contenenti additivo cristallino, caratterizzati da un diverso rapporto acqua/cemento con l'obiettivo di osservare come quest'ultima influisca sulla variazione del flusso. Entrambe le tipologie di miscele sono state poste in immersione ad una temperatura di 15°C per una durata di 42 giorni.

In figura 4.14 sono stati analizzati i soli campioni di controllo. Si nota una discreta dispersione dei dati, specialmente per flussi maggiori di 4000 ml, da parte di entrambe le miscele. I risultati non mostrano una differenza sostanziale tra la tipologia con rapporto a/c di 0,45 e quella con 0,60, infatti entrambi sono in grado di raggiungere una percentuale di guarigione superiore al 90%. L'unica differenza che è possibile osservare riguarda la riduzione del flusso per fessure di piccola entità e rispettivi valori di flusso inferiori a 500 ml, infatti sembra che il calcestruzzo con un rapporto maggiore presenti una minor dispersione dei dati con valori di guarigione maggiori di 0,90.

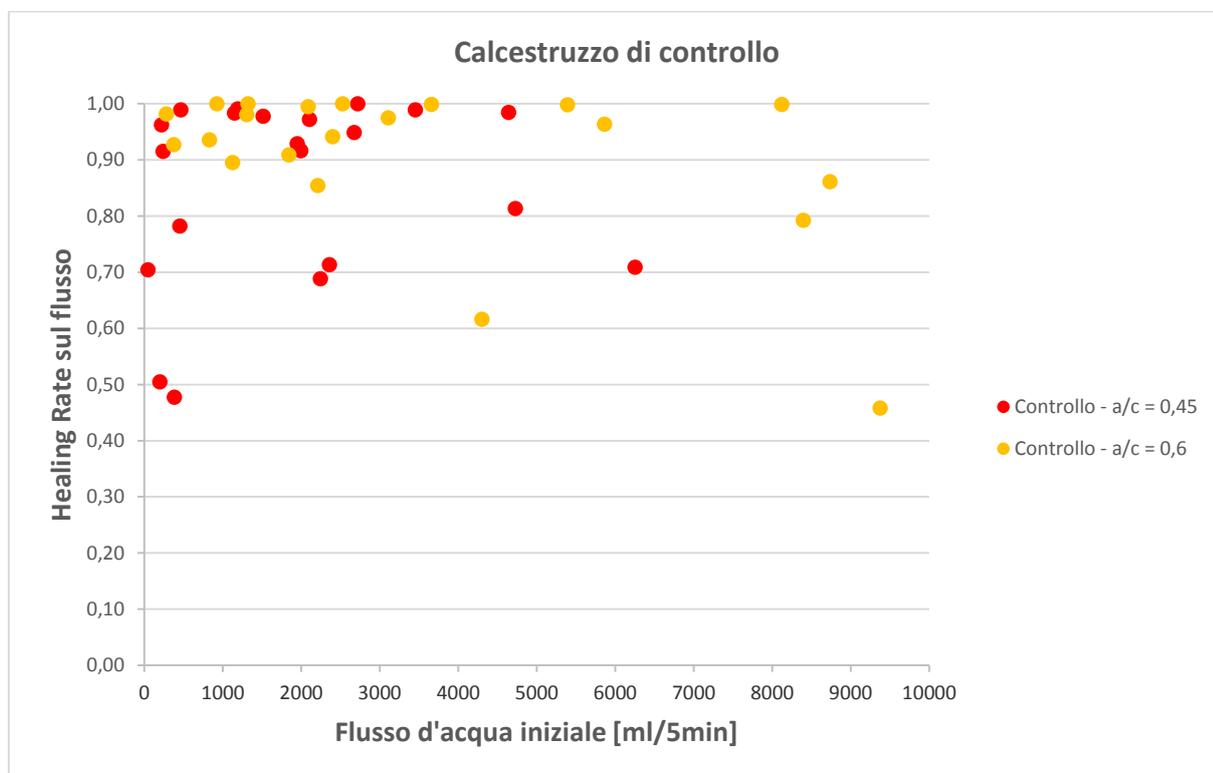


Figura 4-14: Healing Rate in relazione con il flusso di acqua iniziale. Sovrapposizione dei dati relativi ai soli campioni di controllo e con rapporto a/c pari rispettivamente a 0,45 e 0,60. Ambiente di cura: immersione a 15°C.

Per i campioni con additivo cristallino la situazione è abbastanza simile, salvo alcune differenze. Come è possibile osservare nella figura 4.15, rappresentante un grafico che mette in relazione l'indice di autoguarigione con il flusso iniziale, entrambe le miscele presentano una maggiore stabilità fino a valori di 5000 ml. Infatti in questo intervallo i campioni mostrano una discreta capacità di riduzione del flusso di acqua con valori di HR superiori a 0,80. Per le miscele con minor rapporto a/c, il 45% dei provini studiati dimostra di avere un completo annullamento del flusso con valori molto prossimi a 1, contro il 27% appartenenti all'altra tipologia.

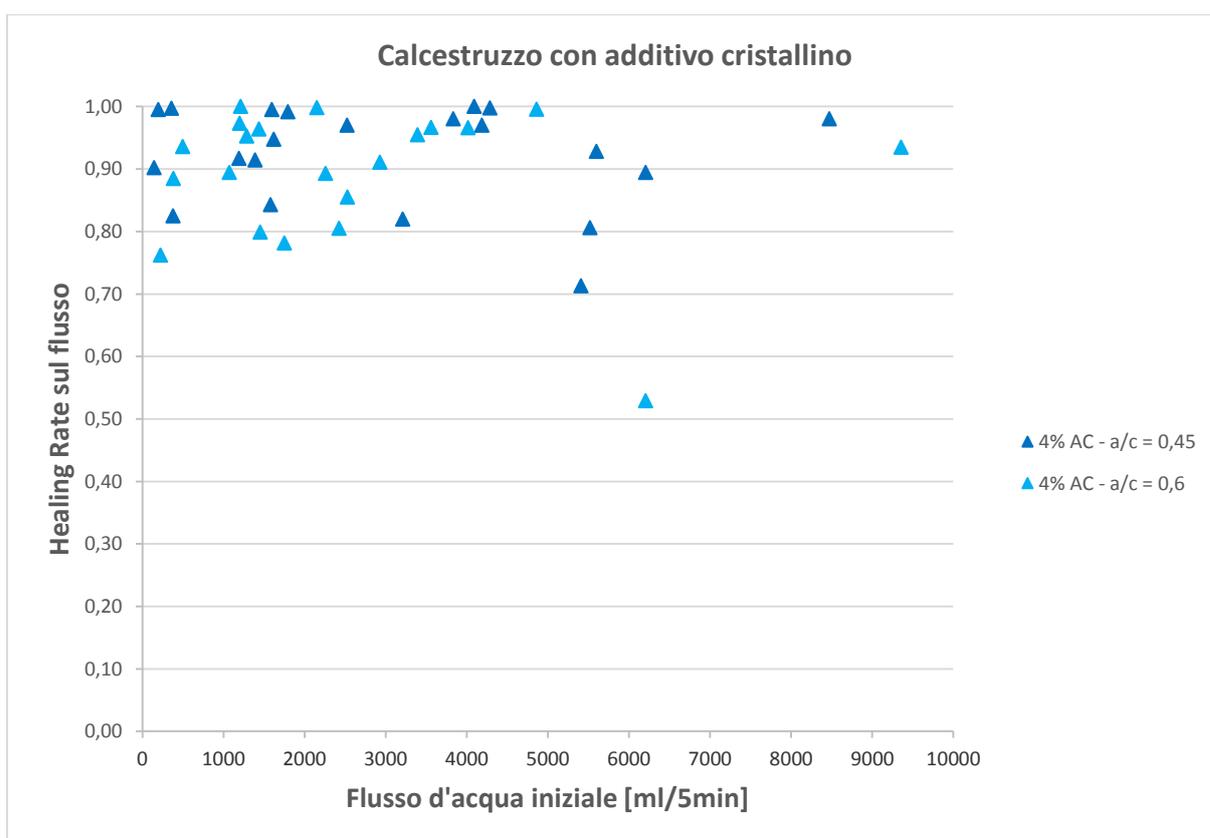


Figura 4-15: Healing Rate in relazione con il flusso di acqua iniziale. Sovrapposizione dei dati relativi ai soli campioni con additivo cristallino e con rapporto a/c pari rispettivamente a 0,45 e 0,60. Ambiente di cura: immersione a 15°C.

Il comportamento delle due diverse miscele può essere compreso meglio osservando la figura 4.16, nella quale viene illustrato un grafico che riporta il valore medio di Healing Rate per ogni tipologia di miscela. Il grafico mostra che i campioni contenenti l'additivo cristallino e con minor rapporto a/c presentano una percentuale media leggermente maggiore rispetto a quella relativa all'altra tipologia di calcestruzzo. Inoltre analizzando la miscela con maggior rapporto, si osserva che non esiste alcuna differenza tra campioni di controllo e con additivo.

I campioni di controllo relativi alle due miscele presentano valori leggermente diversi dovuto probabilmente al fatto che la miscela con un maggiore rapporto a/c possiede una continua

disponibilità di acqua nell'impasto che favorisce la idratazione continuata delle particelle di cemento. Complessivamente, però, dall'analisi dei risultati possiamo dedurre che il comportamento delle due risulta molto simile per quanto riguarda la capacità di ridurre il flusso di acqua attraverso la fessura.

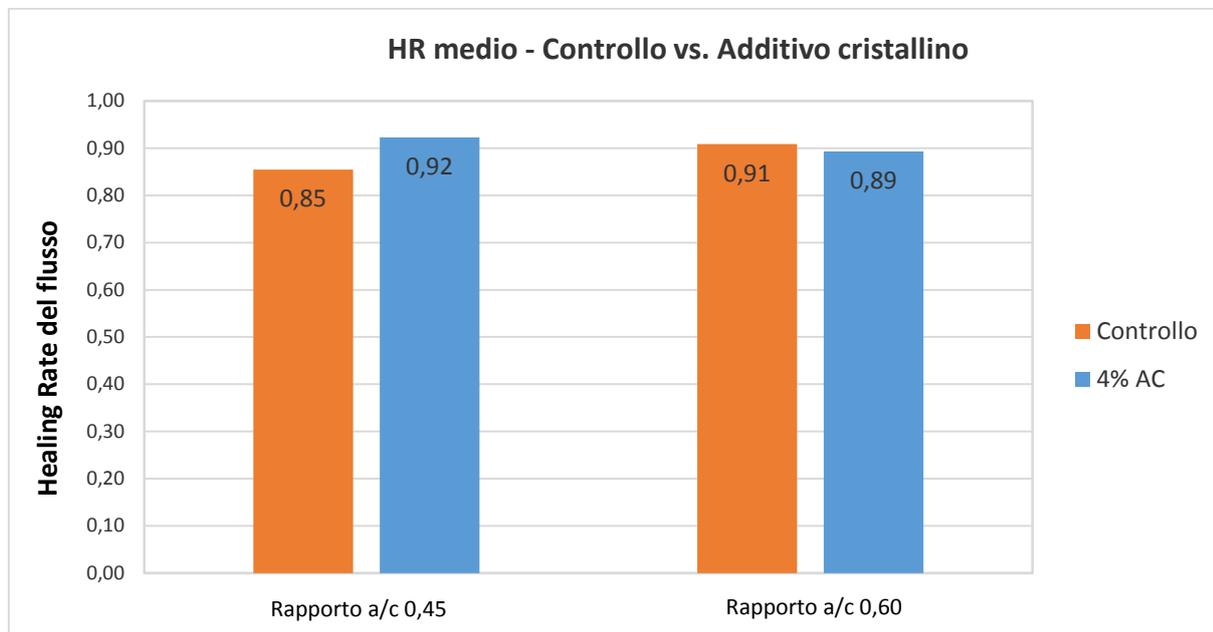


Figura 4-16: Rappresentazione Healing Rate medio per le tipologie di miscele aventi un differente rapporto a/c. Ambiente di cura: immersione a temperatura 15°C.

Nella seconda sezione, invece, si effettua un confronto tra le diverse tipologie di campioni di controllo e quelli contenenti additivo cristallino, con il medesimo rapporto acqua/cemento e sottoposti a condizioni di cura differenti, osservando come gli ambienti considerati possano influire sulla variazione del flusso.

In figura 4.17 vengono analizzati i soli campioni di controllo. Si osserva una forte concentrazione di dati, con valori superiori a 0,90, per quegli ambienti di cura che prevedono un contatto con l'acqua per tutto il periodo di cura, nonostante vi sia una piccola dispersione riguardante flussi di piccola entità. Inoltre è visibile una netta distinzione, eccetto alcuni valori, tra gli ambienti con la presenza costante di acqua e quello nel quale i campioni si trovano a contatto solo ad intervalli regolari. Infatti i campioni "curati" attraverso cicli bagnato/asciutto si concentrano in un'area compresa tra i valori 0,20 e 0,70 di Healing Rate, presentando comunque una forte dispersione che non consente di individuare una tendenza.

In particolare, l'immersione in acqua con una temperatura di 30°C risulta essere l'ambiente che dimostra di avere una maggiore capacità di annullamento del flusso, presentando valori abbastanza stabili e prossimi a 1.



La situazione, rappresentata in figura 4.18 e relativa ai campioni contenenti additivo cristallino, non è molto diversa. È ben visibile la differenza tra gli ambienti posti a contatto costante con acqua e quello caratterizzato da cicli bagnato/asciutto. Infatti quest'ultimo infatti presenta risultati con una discreta dispersione, trovandosi in un intervallo compreso tra 0,20 e 0,50, ovvero in un'area ben distinta dal resto dei risultati.

Questo grafico mostra chiaramente l'importanza della presenza di acqua sui campioni contenenti l'additivo cristallino. Infatti viene dimostrato che gli effetti dell'autoguarigione risultano rilevanti solo nel caso in cui il materiale rimane a contatto diretto con l'acqua per tutto il periodo di cura. Ciò permette di registrare valori di Healing Rate superiori a 0,80 e in molti casi pari a 1, specialmente con l'immersione ad una temperatura di 30°C.

Per fornire un'idea più chiara di quale sia l'influenza degli ambienti di cura e il contributo fornito dall'additivo cristallino sulla guarigione del calcestruzzo, in figura 4.19 viene riportato un grafico ad istogrammi nel quale vengono confrontati i valori medi di Healing Rate relativi a ciascun ambiente di cura e alle due differenti tipologie di calcestruzzo. Osservando questi valori medi è possibile dedurre che, per quanto riguarda gli ambienti che prevedono l'immersione in acqua, non vi è una differenza sostanziale tra i campioni di controllo e quelli contenenti l'additivo cristallino, nonostante sia stato utilizzato un alto contenuto di additivo pari al 4% rispetto al volume di cemento. Infatti per i campioni immersi con una temperatura dell'acqua di 15°C e 30°C, è stata registrata una guarigione media superiore rispettivamente di circa il 7% e il 9% rispetto a quelli di controllo.

Per quanto riguarda l'ambiente che prevede l'alternanza tra immersione in acqua ed esposizione all'aria, si osserva un forte differenza nei valori medi, nonostante siano valori bassi che si traducono in una scarsa capacità di guarigione. In particolare, in questo caso, i campioni di controllo presentano valori superiori del 17% rispetto a quelli con additivo.

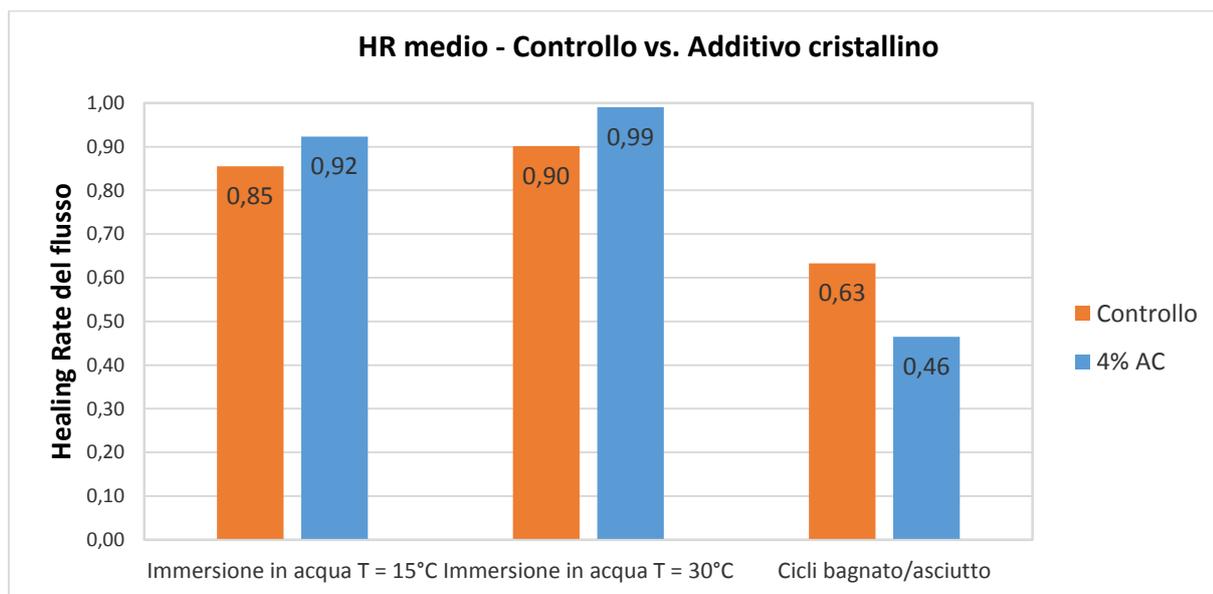


Figura 4-19: Rappresentazione Healing Rate medio del flusso per ciascun ambiente di cura e tipologia di calcestruzzo.

Complessivamente gli ambienti che prevedono il contatto costante con l'acqua per tutti i 42 giorni di cura garantiscono un ottimo livello di guarigione, per entrambe le tipologie di calcestruzzo. I campioni con additivo cristallino, però, dimostrano di avere una maggiore capacità nel ridurre il flusso. In particolare, per questa tipologia l'incremento della temperatura dell'acqua fornisce un grado di guarigione molto elevato presentando un valore del 99%, dovuto probabilmente all'aumento della velocità del processo di idratazione. Infatti l'immersione in acqua con una temperatura di 30°C risulta essere l'ambiente nel quale i campioni, specialmente contenenti additivo cristallino, sono in grado di trarre un maggior beneficio dai processi legati al *self-healing*.

#### 4.5. Variazione dell'ampiezza media della fessura

Un altro parametro per valutare gli effetti dell'autoguarigione sul calcestruzzo è l'evoluzione delle fessure durante il periodo di cura. Per questo motivo, in questo paragrafo verranno esposti e confrontati i risultati per ogni tipologia di calcestruzzo e ogni ambiente di cura per comprendere la loro influenza sulla variazione di ampiezza. Per fare ciò sono stati utilizzati grafici relativi all'apertura media, calcolata attraverso la metodologia esposta nel paragrafo 3.6, il cui valore risulta affidabile e in grado di descrivere gli effetti che le condizioni di cura hanno prodotto sulla fessura.

Per valutare la variazione di ampiezza della fessura, quantificare l'eventuale livello di guarigione di cui ha beneficiato e determinare quali condizioni influiscono maggiormente, è stato introdotto un indice caratterizzato da valori compresi tra 0 e 1. L'indice è il seguente:

$$I_{A.M.} = 1 - \frac{AW_{media,finale}}{AW_{media,iniziale}}$$

dove:

- $AW_{media, finale}$  è l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, al termine della cura, espressa in millimetri;
- $AW_{media, iniziale}$  è l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, prima della cura, espressa in millimetri;

Di seguito vengono riportati i risultati relativi alle due tipologie di calcestruzzo, per ogni miscela e ambiente di cura studiato.

#### 4.5.1. Immersione in acqua con temperatura di 15°C

##### 4.5.1.1. Calcestruzzo con rapporto acqua/cemento di 0,45

Per i campioni immersi in acqua con temperatura pari a 15°C durante tutto il periodo di cura, lo stato delle fessure mostra un'ampiezza media molto ridotta. In figura 4.20 è possibile osservare che, per entrambe le tipologie di calcestruzzo, i valori di Healing Rate risultano elevati raggiungendo, in alcuni casi, la completa chiusura della fessura. Infatti i campioni di controllo e con additivo mostrano un comportamento molto simile, presentando una percentuale media di guarigione pari al 94%. Inoltre l'andamento delle linee di tendenza evidenzia maggiormente la somiglianza tra le due tipologie, mostrando come all'aumentare dell'ampiezza iniziale della fessura si riduce, anche se in percentuale minima, la capacità di guarigione restando comunque in un intervallo di valori di HR superiori a 0,80. Infatti nonostante la presenza di fessure con ampiezza rilevante, pari a  $0,30 \div 0,45$  mm, si osserva un'apprezzabile capacità di chiusura con valori di circa 0,90.

Ciò conferma quanto accennato in letteratura riguardo la riduzione della capacità di guarigione all'aumentare dell'ampiezza iniziale.

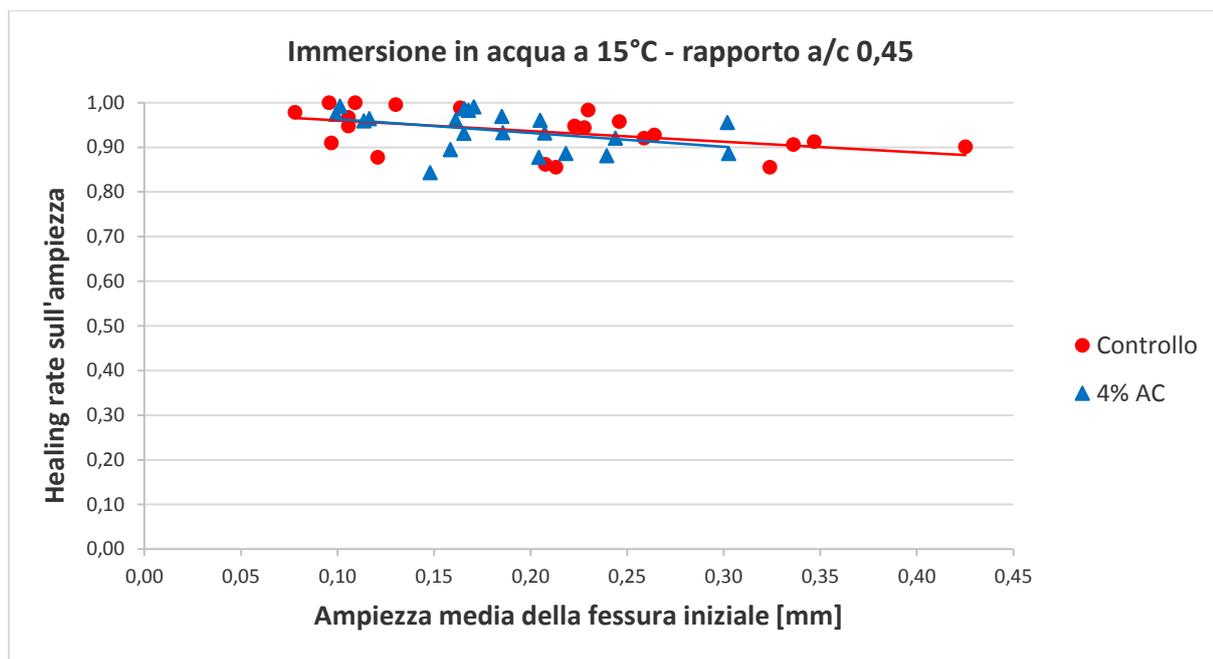


Figura 4-20: Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e posti in immersione a 15°C.

#### 4.5.1.2. Calcestruzzo con rapporto acqua/cemento di 0,60

Il grafico 4.21 mostra come variando il rapporto a/c non si ottengono differenze sostanziali riguardo gli effetti dell'autoguarigione sulle fessure. È possibile osservare una maggiore stabilità di dati per fessure di media entità, con ampiezza tra 0,10 e 0,20 mm, con una capacità di chiusura rilevante che si traduce in valori superiori a 0,90 e, in molti casi, pari a 1. Entrambe le tipologie di calcestruzzo presentano questo comportamento, non mostrando nessuna differenza. Complessivamente sia i campioni di controllo che quelli contenenti additivo possiedono una ottima percentuale di guarigione, pari circa al 95%. Inoltre l'andamento delle rispettive linee di tendenza sottolinea una riduzione di capacità all'aumentare dell'ampiezza iniziale delle fessure, rimanendo comunque al di sopra dell'80%, valore ritenuto piuttosto buono.

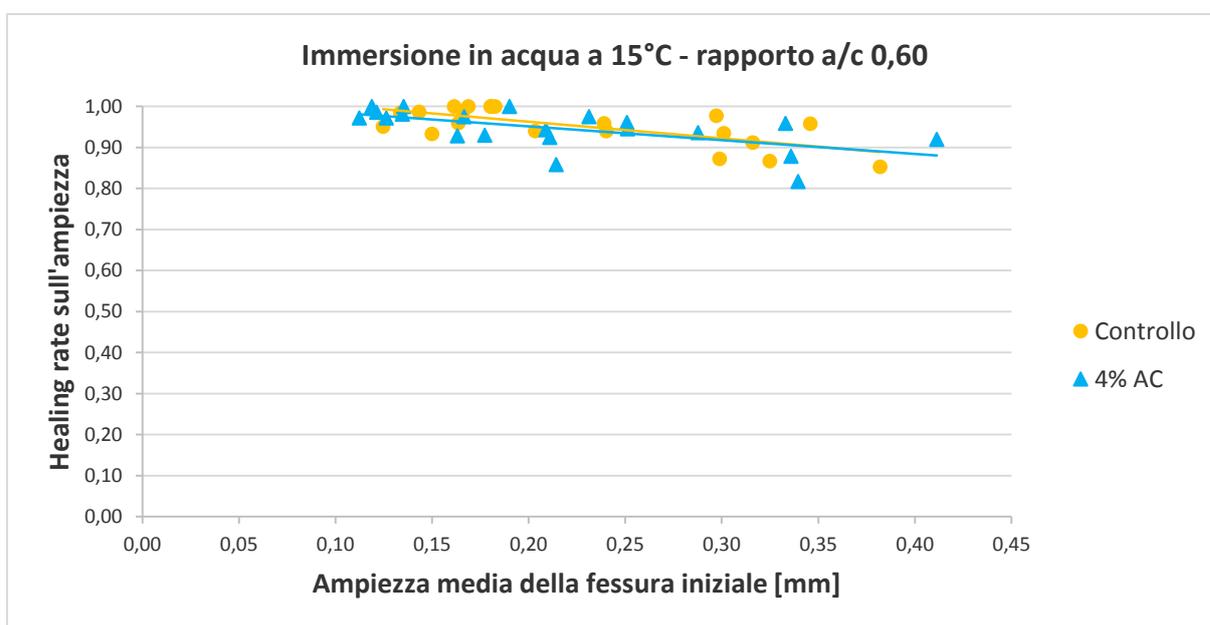


Figura 4-21: Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,60 e posti in immersione a 15°C.

#### 4.5.2. Immersione in acqua con temperatura di 30°C

In figura 4.22 vengono mostrati gli effetti del *self-healing* per i campioni sottoposti ad immersione con una temperatura di 30°C. I risultati presentano un comportamento piuttosto stabile, con valori di guarigione prossimi a 1, per entrambe le tipologie di calcestruzzo. In questo caso risulta irrilevante evidenziare l'andamento mediante linee di tendenza poiché i risultati mostrano già un comportamento chiaro e preciso.

In particolare, è leggera la differenza tra i campioni di controllo e quelli contenenti l'additivo nonostante quest'ultimi possiedano una maggiore capacità di sigillatura di fessure di ampiezza ridotta, compresa tra 0,08 e 0,17 mm. Infatti si ottengono valori di percentuale pari a rispettivamente al 96% e 98%.

Gli elevati valori di guarigione, stabili in un intervallo di 0,90 e 1, trovano una corrispondenza con quelli relativi al flusso, esposti in precedenza. Infatti l'analisi progressiva dei dati ottenuti sta dimostrando che la presenza contemporanea dell'acqua e un aumento della temperatura è la condizione che maggiormente influisce sul fenomeno dell'autoguarigione.

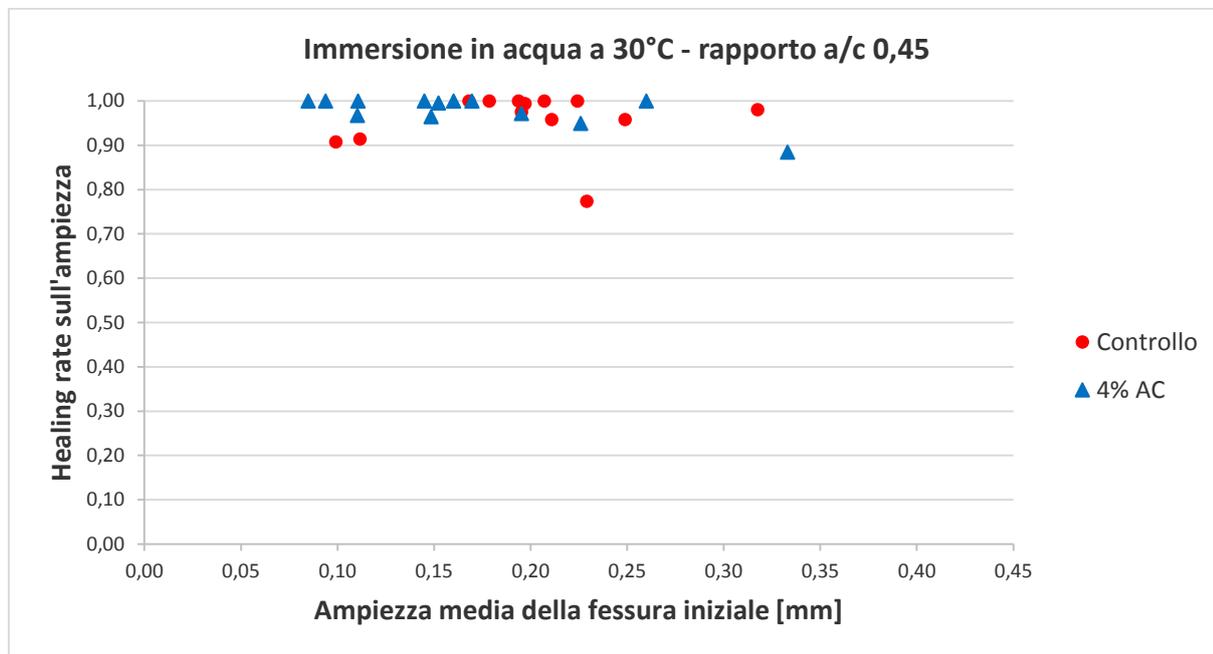


Figura 4-22: Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e posti in immersione a 30°C.

#### 4.5.3. Cicli bagnato/asciutto

L'alternanza tra l'immersione in acqua e esposizione all'aria dimostra ancora una volta di possedere una scarsa influenza sugli effetti dell'autoguarigione, in questo caso relativa alla variazione dell'ampiezza delle fessure.

Il grafico 4.23 mostra valori di guarigione delle fessure piuttosto variabili e poco stabili che permettono però di individuare un andamento preciso. Infatti per i campioni con additivo si visualizza una tendenza abbastanza costante, mentre quelli di controllo mostrano un andamento fortemente decrescente all'aumentare dell'ampiezza, come evidenziato dalle rispettive linee di tendenza, presentando una buona capacità di chiusura di fessure con ampiezze intorno a 0,15 mm.

Rispetto a quanto osservato per la variazione di flusso dove i risultati erano abbastanza dispersi e confusi per entrambe le tipologie di calcestruzzo, in questo caso, i campioni di controllo dimostrano di avere un comportamento più stabile, ottenendo un valore medio di HR superiore rispetto a quello dei provini con additivo, pari all'83% contro il 72%.

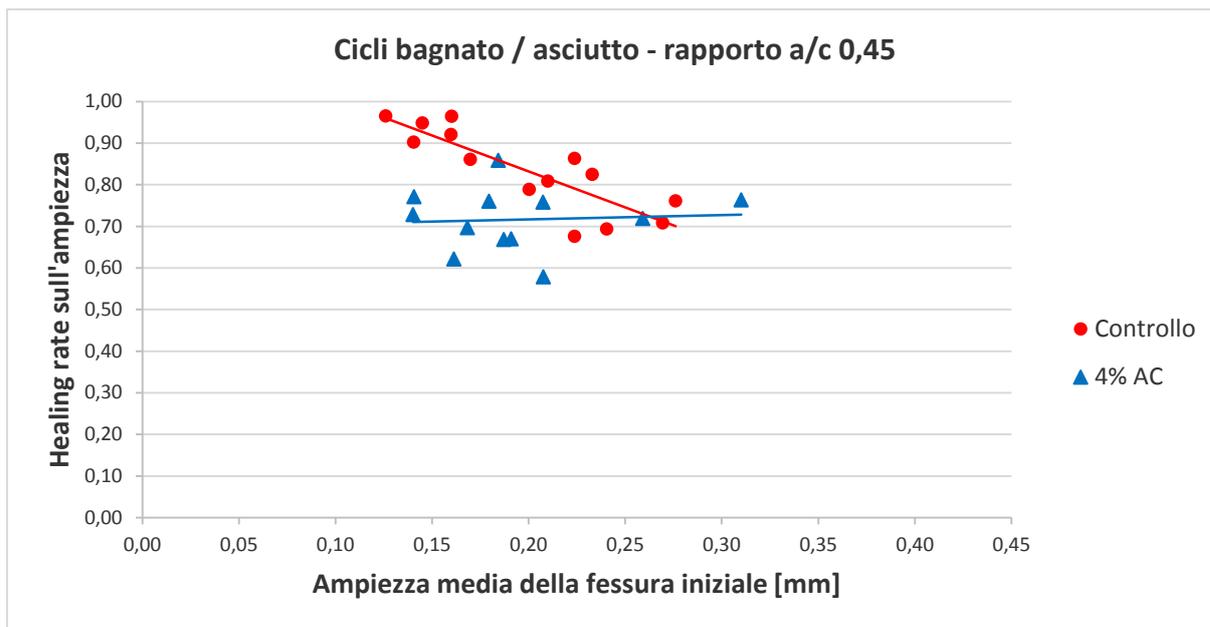


Figura 4-23: Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Campioni con rapporto a/c pari a 0,45 e sottoposti a cicli bagnato/asciutto.

#### 4.5.4. Calcestruzzo di controllo e con additivo cristallino

Anche in questo caso, al fine di fornire una esposizione più chiara dei risultati è stato suddiviso questo paragrafo in due gruppi, in funzione della tipologia di calcestruzzo e degli ambienti di cura studiati, effettuando un confronto dei dati ottenuti.

Attraverso la sovrapposizione dei risultati esposti in precedenza, nella prima sezione eseguiremo un confronto tra le tipologie di campioni di controllo e quelli contenenti additivo cristallino, caratterizzati da un diverso rapporto acqua/cemento con l'obiettivo di osservare come quest'ultima influisca sull'evoluzione della fessura. Entrambe le tipologie di miscele sono state poste in immersione ad una temperatura di 15°C per una durata di 42 giorni.

In figura 4.24 viene posto a confronto il comportamento dei campioni di controllo realizzati con differente rapporto a/c, pari rispettivamente a 0,45 e 0,60. Al contrario di quanto osservato nel paragrafo precedente per la variazione del flusso, in questo caso, entrambe le tipologie sono caratterizzate da un comportamento simile presentando una significativa capacità nella sigillatura delle fessure durante il periodo di cura. Infatti entrambe le miscele di controllo godono di una percentuale media di guarigione di circa il 94-95% e una tendenza lineare decrescente all'aumentare dell'ampiezza media della fessura iniziale, la quale rimane sempre all'interno di un intervallo di valori tra 0,80 e 1.

In particolare, per fessure di piccola-media ampiezza, si ottiene spesso la completa chiusura con valori molto prossimi a 1.

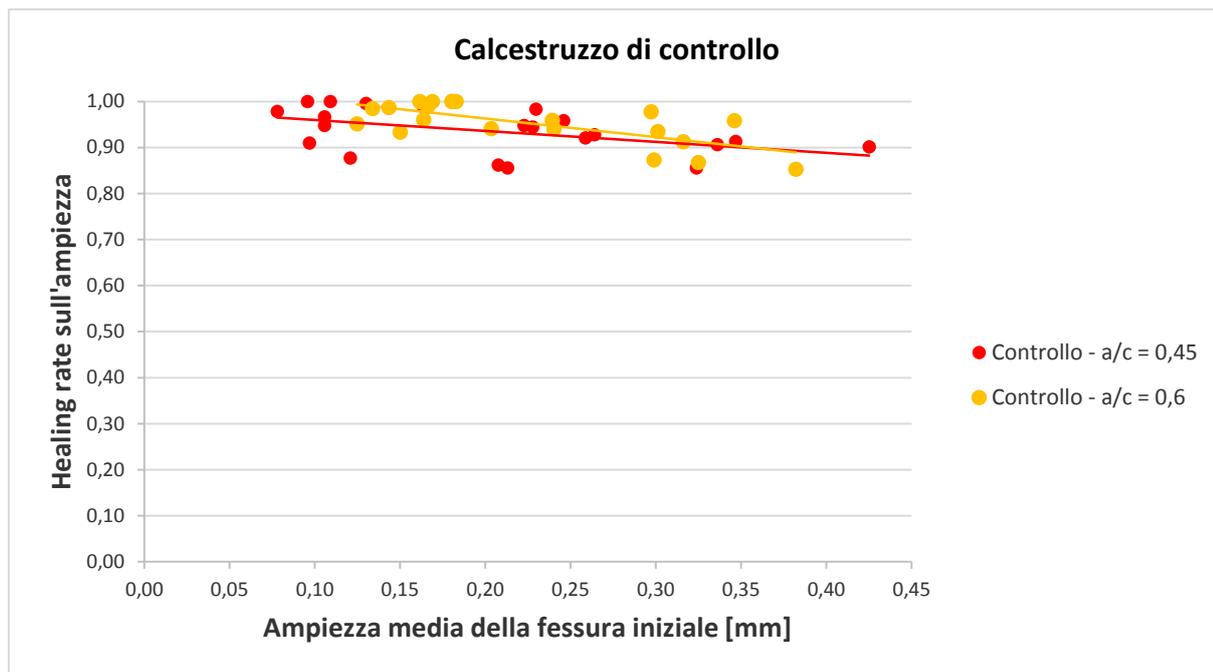


Figura 4-24: Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Sovrapposizione dei dati relativi ai soli campioni di controllo e con rapporto a/c pari rispettivamente a 0,45 e 0,60. Ambiente di cura: immersione in acqua a 15°C.

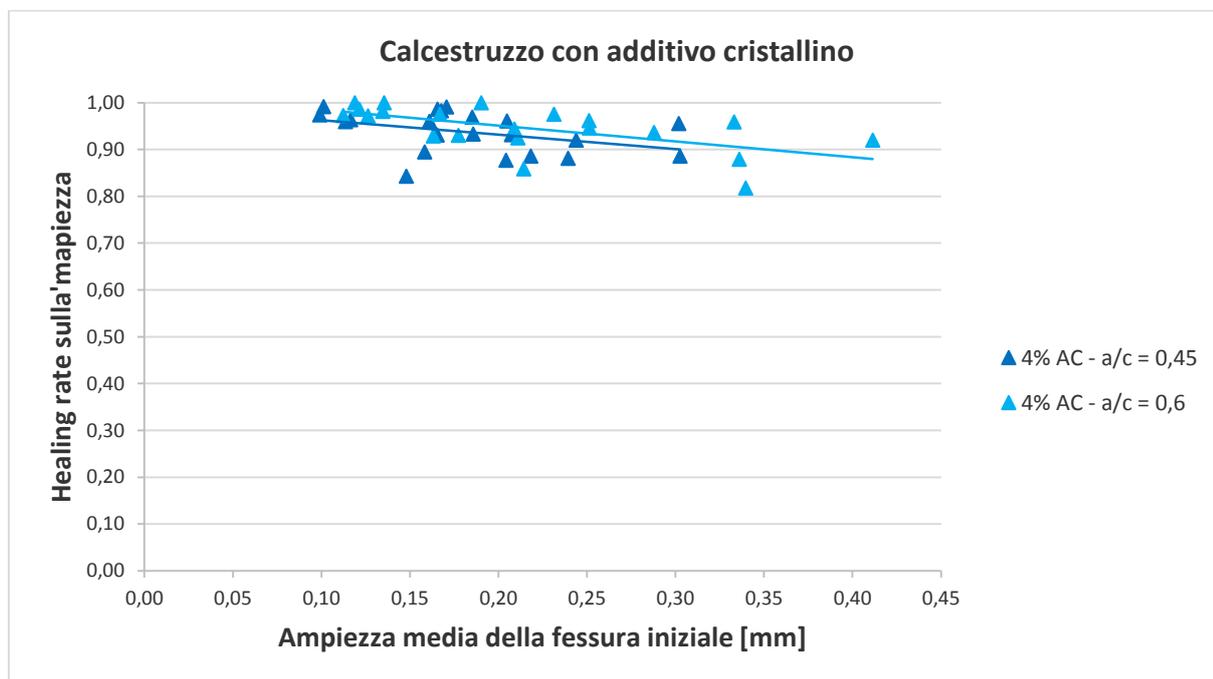


Figura 4-25: Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Sovrapposizione dei dati relativi ai soli campioni con additivo cristallino e con rapporto a/c pari rispettivamente a 0,45 e 0,60. Ambiente di cura: immersione in acqua a 15°C.

La situazione, rappresentata in figura 4.25, non risulta differente ponendo a confronto i campioni contenenti l'additivo cristallino e con diverso rapporto a/c. Infatti entrambe le miscele presentano un andamento molto simile, presentando un'ottima attitudine nel sigillare fessure con ampiezza di circa  $0,10 \div 0,20$  mm. Inoltre i valori di HR risultano essere in una relazione molto stretta con l'apertura della fessura, infatti all'aumentare della stessa si verifica una riduzione della capacità di chiusura, con risultati concentrati sempre in una fascia di valori compresi tra 0,80 e 1.

Viene riportato in figura 4.26 un grafico ad istogramma che fornisce una visione complessiva e, in funzione del valore medio di Healing Rate, permette di studiare quale sia stata l'influenza della variazione del rapporto a/c nei processi di autoguarigione delle fessure. Da questa rappresentazione risulta evidente come non esiste alcuna differenza tra le due tipologie di calcestruzzo ed, inoltre, entrambe le miscele possiedono circa la stessa capacità di "guarire" le fessure. Dalle percentuali riportate, infatti, si può dedurre che gli effetti del *self-healing* sono notevoli e, in molti casi, garantiscono la completa chiusura della fessura ottenuta grazie alla precipitazione di cristalli insolubili sulla superficie, come verrà illustrato nel paragrafo 4.7.

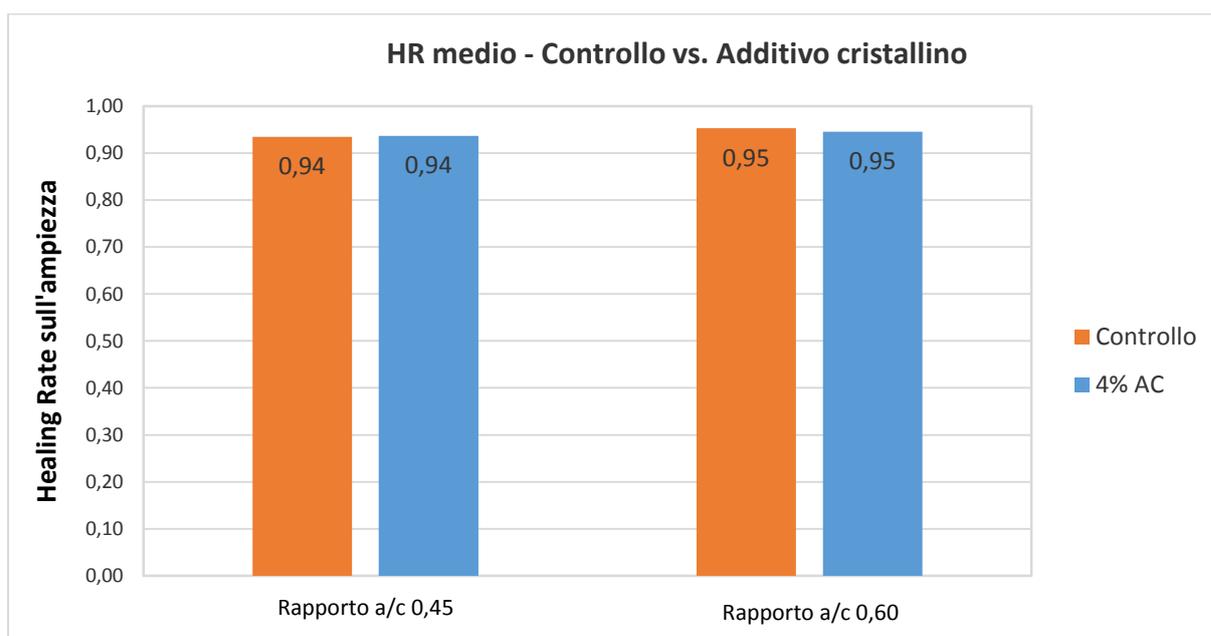


Figura 4-26: Rappresentazione Healing Rate medio per le tipologie di miscele aventi un differente rapporto a/c. Ambiente di cura: immersione a temperatura 15°C.

I risultati ottenuti risultano abbastanza inaspettati poiché, con riferimento a quanto sostenuto in letteratura, un minore rapporto a/c garantisce la presenza di un maggior numero di particelle di cemento che rimangono non idratate per mancanza di acqua nell'impasto. Al momento dell'immersione in acqua, ciò avrebbe dovuto favorire maggiormente la produzione dei prodotti insolubili, come risultato dei processi legati al *self-healing*. Perciò, per una valutazione più affidabile di questo fenomeno, probabilmente, sarebbe opportuno verificare se esistono condizioni al contorno nelle quali si possa notare un comportamento o attitudine differente, come ad esempio studiare la cinetica della reazione. Risulterebbe interessante

verificare quali sono gli effetti sulle due miscele considerando diverse condizioni di cura, potendo così comprendere il grado di influenza degli ambienti di cura ai quali è sottoposto il calcestruzzo.

Con questa prima analisi, però, è possibile affermare che la scelta di utilizzare uno specifico rapporto a/c non comporta variazioni sugli effetti o benefici che il *self-healing* apporta al calcestruzzo, ma dipende dalla funzione e prestazioni che una determinata struttura deve garantire.

È ben noto che una riduzione del rapporto a/c permette di ottenere un calcestruzzo con maggiori prestazioni, in termini di resistenza meccanica, fenomeno confermato dai risultati ottenuti dalle prove di compressione a 28 giorni. Infatti la miscela con rapporto di 0,45 presenta una resistenza a compressione pari a circa 58 MPa, ovvero una volta e mezza quella ottenuta con a/c 0,60. Considerando i valori ottenuti dalla prova, l'influenza dell'additivo cristallino non è visibile in modo rilevante.

Inoltre l'utilizzo di bassi rapporti permette di ridurre la porosità capillare della matrice cementizia, conferendo al materiale una maggiore durabilità ma, al tempo stesso, viene diminuita la lavorabilità dell'impasto. Perciò l'utilizzo di un rapporto a/c rispetto ad un'altra dipende da molteplici fattori.

Nella seconda sezione, invece, viene analizzato il comportamento dei campioni di controllo e quelli contenenti additivo cristallino, con il medesimo rapporto acqua/cemento, osservando come gli ambienti a cui sono stati sottoposti hanno influito sulla variazione dell'ampiezza di fessura. In figura 4.27 vengono riportati i soli campioni di controllo sottoposti ai diversi ambienti di cura.

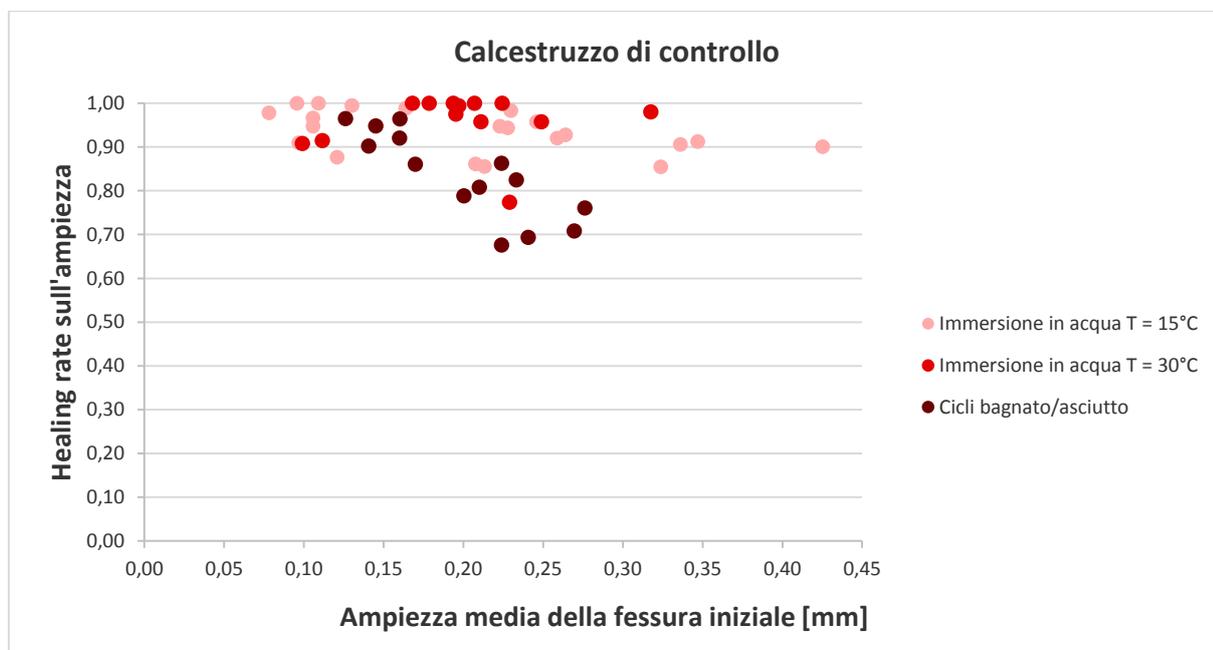


Figura 4-27: Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Sovrapposizione dei dati relativi ai soli campioni di controllo sottoposti a differenti ambienti di cura.

Si osserva un comportamento molto simile per fessure di piccola entità con una discreta capacità di guarigione che si traduce nel raggiungimento di valori superiori a 0,90, eccetto per i campioni sottoposti ad un immersione continua per tutto il periodo di cura che sono maggiormente propensi alla sigillatura completa, presentando valori molto prossimi a 1. All'aumentare dell'ampiezza media, invece, si evidenzia una maggiore differenza tra i calcestruzzi posti a contatto costante con l'acqua e quello caratterizzato dall'alternanza tra immersione ed esposizione all'aria. Infatti quest'ultimo ha un andamento fortemente decrescente rispetto agli altri, i quali mostrano una tendenza abbastanza costante, evidenziando una minore capacità di "guarire" fessure con ampiezza superiore a 0,20 mm.

Osservando i risultati ottenuti, si deduce che i campioni sottoposti ad immersione con temperatura di 30°C hanno mostrato, ancora una volta, un'attitudine leggermente migliore, godendo di un comportamento molto più stabile e con una percentuale media di guarigione della fessura pari al 96%.

Per le miscele contenenti l'additivo cristallino, riportate in figura 4.28, la situazione si mostra leggermente diversa. Infatti, in questo caso, i campioni sottoposti ai cicli bagnato/asciutto occupano un'area distinta del grafico all'interno di una fascia compresa tra circa 0,55 e 0,80, valori che rappresentano una ridotta capacità di sigillare fessure di qualsivoglia ampiezza considerata. L'immersione in acqua, invece, ha fornito risultati abbastanza stabili e rilevanti che si posizionano in un'area concentrata quasi al di sopra di 0,90, anche per fessure di grande ampiezza. Non vengono mostrate differenze sostanziali tra le due diverse temperature, ma l'utilizzo di un'alta temperatura permette di ottenere una guarigione completa per la maggior parte dei campioni, presentando una percentuale media del 98%.

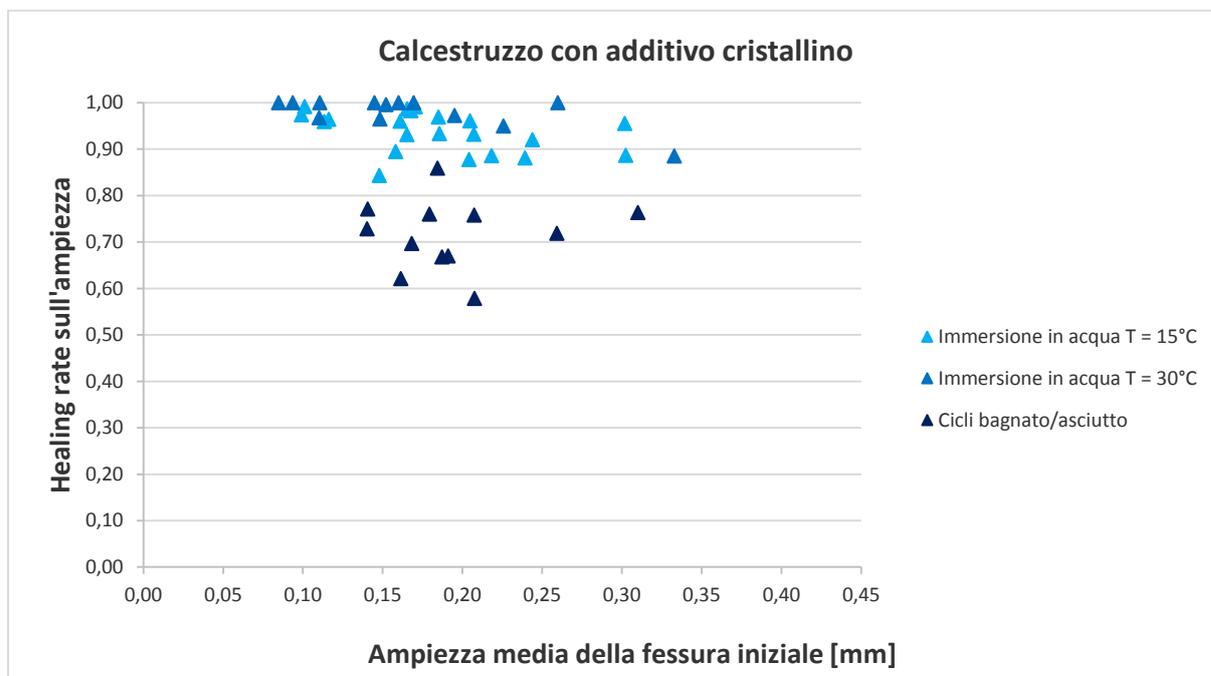


Figura 4-28: Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Sovrapposizione dei dati relativi ai soli campioni con additivo cristallino sottoposti a differenti ambienti di cura.

Nella figura 4.29 viene mostrato un quadro complessivo sul grado di influenza che hanno gli ambienti di cura studiati sulle diverse tipologie di calcestruzzo, valutando gli effetti del *self-healing* mediante un valore medio di Healing Rate calcolato sull'ampiezza della fessura.

Viene dimostrato, ancora una volta, quanto sia importante la presenza continua di acqua ai fini dell'autoguarigione delle fessure e quale sia il livello di efficacia sui campioni sottoposti a questa tipologia di ambiente. E' ben visibile, infatti, come un immersione parziale del calcestruzzo non conferisca la stessa percentuale di guarigione, nonostante siano considerati valori accettabili. Inoltre l'aggiunta dell'additivo cristallino sembra incidere negativamente sui processi legati al fenomeno, presentando una percentuale del 72% rispetto a quella ottenuta per i campioni di controllo pari all'83%.

La situazione risulta differente per le specie poste a contatto costante con l'acqua per tutto il periodo di 42 giorni. In particolare l'utilizzo di temperature diverse non influisce in maniera sostanziale sulla capacità di sigillare la fessura, infatti con una temperatura dell'acqua di 15°C si raggiunge, comunque, un ottimo grado di guarigione pari al 94% per entrambe le tipologie di calcestruzzo. Un aumento di temperatura, però, conferisce principalmente una maggiore stabilità dei risultati rispetto alle specie di tutte le altre tipologie, visibile dai grafici riportati in precedenza. Inoltre gli effetti del fenomeno dell'autoguarigione e l'influenza dell'additivo cristallino risultano leggermente migliori, raggiungendo valori di Healing Rate pari a circa 0,96 e 0,98 rispettivamente per i campioni di controllo e quelli con additivo.

Una differenza rilevante che è possibile osservare utilizzando questi due livelli di temperatura riguarda la consistenza dei prodotti insolubili formati al termine del periodo di cura, tema che verrà affrontato nel paragrafo 4.7, relativo allo studio della fessura e formazione dei cristalli.

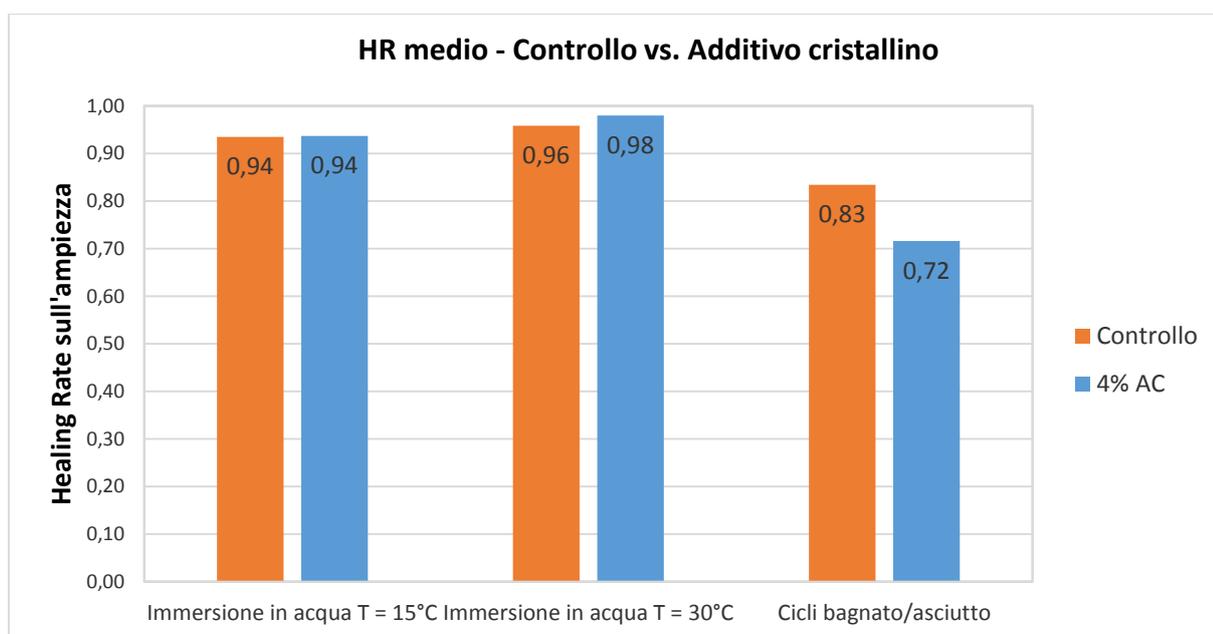


Figura 4-29: Rappresentazione Healing Rate medio sull'ampiezza per ciascun ambiente di cura e tipologia di calcestruzzo.

#### 4.6. Considerazioni generali sulla relazione tra flusso e fessura

Come già descritto in precedenza, in questo studio sperimentale è stato ritenuto importante utilizzare due parametri per la valutazione del grado di guarigione del calcestruzzo in modo da rendere maggiormente affidabile l'interpretazione dei risultati ottenuti, riducendo l'aleatorietà. Nei paragrafi finora descritti sono stati esaminati gli effetti relativi al *self-healing* in funzione dei due parametri, ma sempre considerati singolarmente. Questa sezione, quindi, ha l'obiettivo di mettere in relazione il flusso di acqua e l'ampiezza media della fessura visibile sulla superficie del campione, determinando la tipologia di legame che possiedono. In particolare è stato osservato che, utilizzando la metodologia di misurazione scelta, al diminuire dell'ampiezza media della fessura si registra sempre una diminuzione del flusso di acqua. In studi precedenti [45], [46] è stato osservato che esiste un rapporto tra i due parametri, avente un andamento approssimabile a curve di secondo o terzo ordine.

I risultati ottenuti per entrambe le tipologie di calcestruzzo sono stati rappresentati attraverso un grafico a dispersione, come illustrato in figura 4.30. Con l'ausilio del software Matlab è stato possibile individuare le rispettive linee di tendenza approssimabili a curve polinomiali cubiche passanti per l'origine, con i relativi coefficienti di determinazione  $R^2$  che forniscono il livello di bontà della curva. Data la presenza di punti anomali e la forte dispersione dei dati per aperture finali maggiori di 0,05 mm, è stato ritenuto opportuno non utilizzare il metodo dei minimi quadrati per l'individuazione della curva di regressione poiché avrebbe fornito un andamento e un  $R^2$  inadeguati. Perciò, è stato usato un algoritmo fornito dal software che ha permesso di tener conto della presenza di possibili punti anomali che sono stati eliminati dal processo di determinazione della curva. Per dimostrare la correttezza del metodo, nel paragrafo successivo, verrà analizzata l'anomalia di alcuni dei risultati evidenziati nel grafico.

Nella figura 4.30 viene riportata la relazione tra il flusso di acqua e l'apertura media della fessura, riportando inoltre le curve di tendenza che risultano abbastanza affidabili per entrambe le tipologie di calcestruzzo. È possibile osservare che all'aumentare dell'apertura della fessura si ottiene una maggiore dispersione dei dati, mentre per fessure di piccola entità il comportamento risulta più stabile evidenziando la presenza di una buona relazione tra i due parametri. Nonostante la dispersione dei risultati è necessario puntualizzare che le ampiezze considerate corrispondono a decimi di micrometri, valori che evidenziano la forte riduzione della fessura se confrontati con l'intervallo di ampiezze iniziali pari a  $0,10 \div 0,40$  mm.

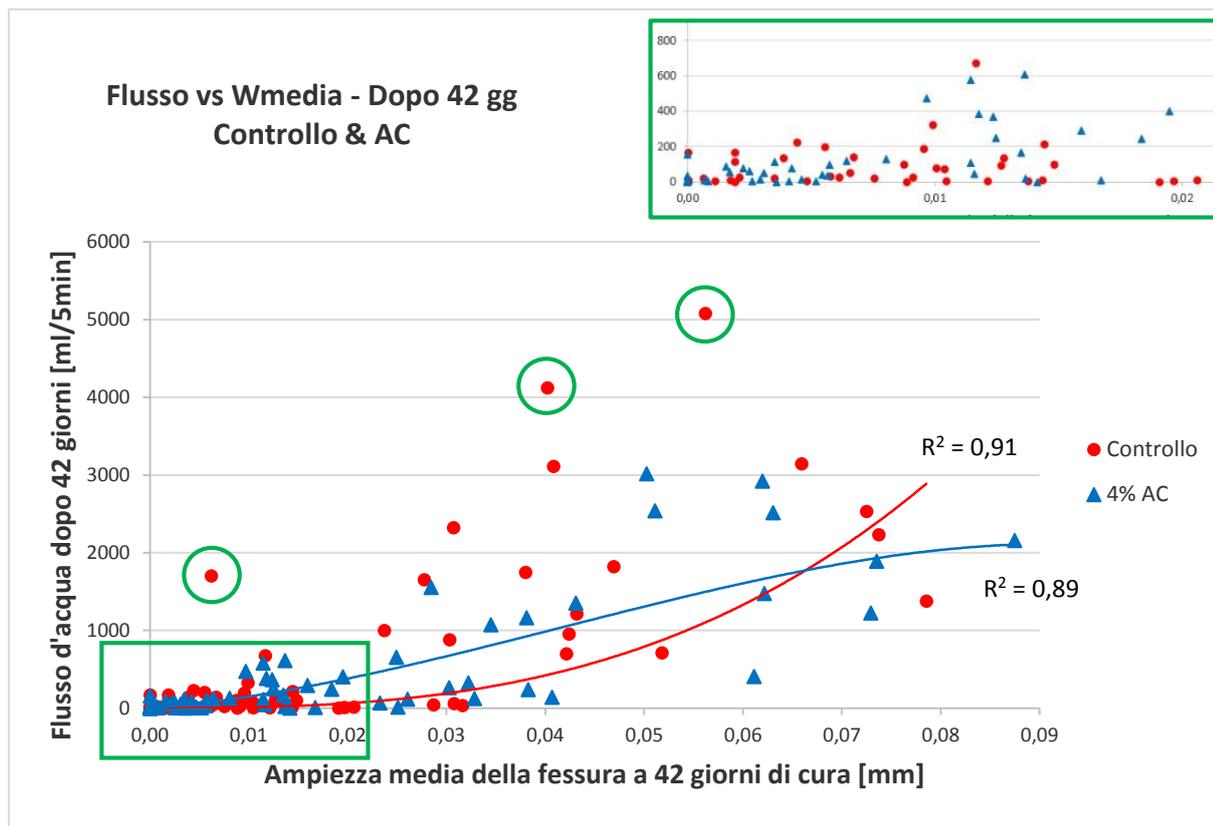


Figura 4-30: Relazione tra flusso di acqua e ampiezza media della fessura dopo 42 giorni di cura, considerando entrambe le tipologie di calcestruzzo.

L'andamento di questi risultati dimostra come risulta rischioso e insufficiente considerare il solo studio della fessura superficiale per valutare gli effetti dell'autoguarigione poiché si nota come, a volte, per piccole ampiezze si ottengano flussi di acqua significativi. Con l'obiettivo di evidenziare questo fenomeno viene riportato di seguito il confronto tra gli Healing Rate del flusso e dell'ampiezza media della fessura considerando tutti i dati ottenuti. Successivamente, verranno mostrati i grafici per ciascun ambiente così da permettere una valutazione più dettagliata del legame in funzione delle condizioni di cura e l'individuazione dei punti ritenuti anomali. I grafici di questa categoria relativi ai singoli ambienti di cura sono riportati in appendice C.

In figura 4.31 vengono posti in relazione gli indici di autoguarigione del flusso e dell'ampiezza media della fessura per entrambe le tipologie di calcestruzzo. Nel grafico viene riportata la bisettrice che divide il quadrante in due aree ben distinte, mediante le quali è possibile comprendere se la guarigione è avvenuta maggiormente per una riduzione di flusso o di fessura. Perciò i risultati prossimi a questa retta risultano essere quelli che presentano una relazione tra i due parametri maggiore. Parallelamente alla bisettrice sono state tracciate due rette, definite con un errore di  $\pm 0,10$ , che definiscono gli estremi di un intervallo all'interno del quale la relazione tra flusso di acqua e ampiezza media della fessura risulta accettabile. Ciò ha permesso di individuare la quantità di dati che ricadono in questa fascia, pari al 66%, i quali

dimostrano di possedere indici di autoguarigione in rapporto tra di loro. In aggiunta, il 51% presenta valori di entrambi gli Healing Rate superiori a 0,90.

Nel grafico è visibile, inoltre, la presenza di una discreta dispersione dei dati che interessa la parte inferiore alla bisettrice e si concentra al di fuori dell'intervallo definito. Infatti è possibile osservare che per valori di Healing Rate dell'ampiezza media della fessura, compresi tra 0,55 e 0,90, si registra una riduzione del flusso abbastanza ridotta. Ciò dimostra che la chiusura superficiale della fessura non sempre comporta una riduzione della permeabilità. Questa dispersione potrebbe essere dovuta alla metodologia di misurazione in quanto lo stato della fessura superficiale è stato esaminato in punti ben definiti e il calcolo dell'ampiezza eseguito attraverso una media di valori. Come vedremo nel paragrafo 4.6.3, però, la maggior parte dei risultati che creano la dispersione appartiene ai campioni sottoposti a cicli bagnato/asciutto, i quali hanno presentato un comportamento instabile fin dal principio e con scarsa capacità di autoguarigione. Le altre tipologie di ambienti, invece, mostrano una relazione più accettabile tra i due Healing Rate.

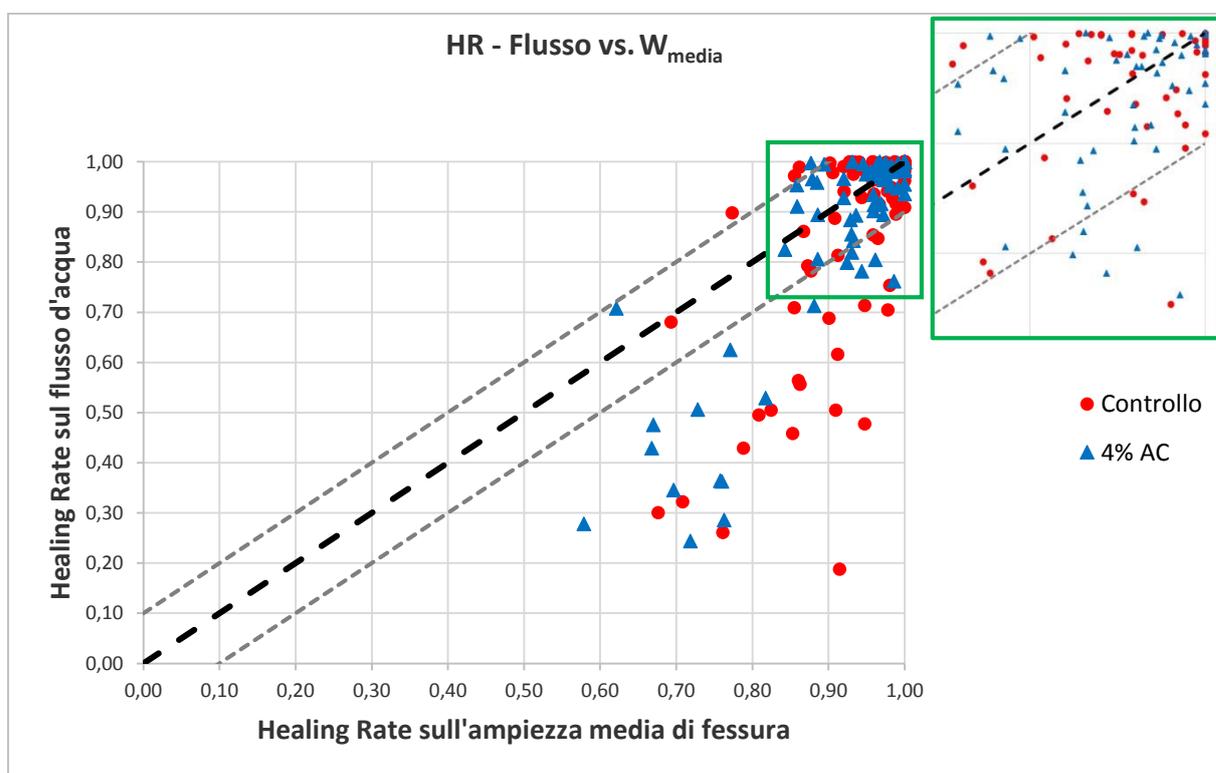


Figura 4-31: Confronto tra gli Healing Rate del flusso e dell'ampiezza media della fessura, considerando tutti i dati ottenuti dallo studio.

Quanto affermato dimostra che, quando si parla di guarigione del calcestruzzo intesa come riduzione della permeabilità, non è sufficiente studiare solo lo stato superficiale della fessura ma risulta necessario analizzare anche l'evoluzione interna. Lo studio della fessura adottato, comunque, permette di garantire un livello di approssimazione abbastanza affidabile, consentendo di osservare il fenomeno in modo generale.

Nelle sezioni successive vengono riportati i grafici della stessa categoria per ogni ambiente di cura così da analizzare più in dettaglio la relazione tra i due indici di autoguarigione e comprendere quali condizioni di cura comportano una maggiore dispersione. Inoltre verranno analizzati alcuni dei dati ritenuti anomali e, i restanti, saranno allegati in appendice C.

#### 4.6.1. Immersione in acqua con temperatura di 15°C

La figura 4.32 riporta entrambe le tipologie di calcestruzzo con rapporto a/c pari a 0,45 e posti in immersione con temperatura di 15°C. Il grafico mostra che una buona parte dei risultati, circa il 70%, ricade all'interno dell'intervallo definito in precedenza e, alcuni di questi, presentano valori di Healing Rate prossimi a 1. Complessivamente, si nota la presenza di un'ottima relazione tra i due indici di autoguarigione confermata, inoltre, dalla concentrazione di dati nell'area del grafico evidenziata e caratterizzati da valori superiori a 0,90.

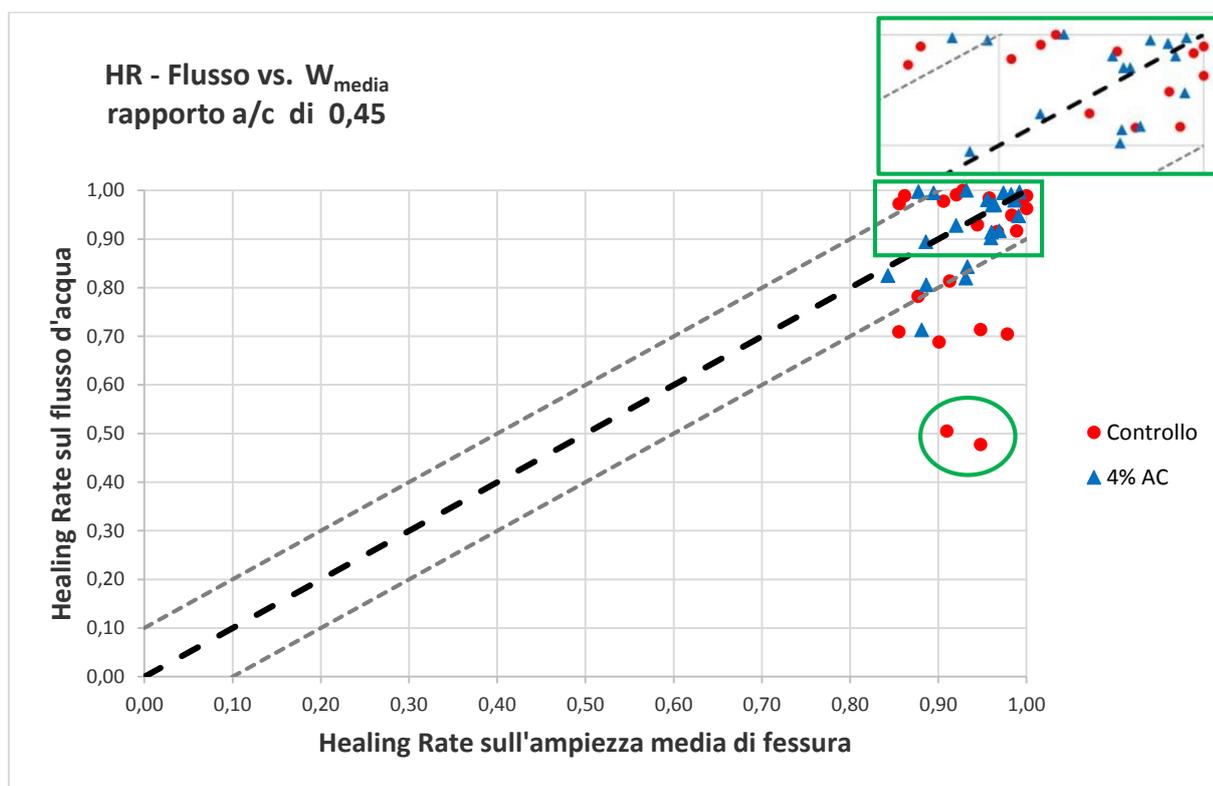


Figura 4-32: Confronto tra gli Healing Rate del flusso e dell'ampiezza media della fessura. Calcestruzzo con rapporto a/c pari a 0,45 e posto in immersione a 15°C.

Nell'area al di sotto della bisettrice sono stati evidenziati due punti ritenuti anomali, in quanto il legame tra i rispettivi indici non risulta accettabile poiché la guarigione dei due campioni sembra essere avvenuta solo attraverso la sigillatura della fessura, la quale però non garantisce una riduzione di permeabilità. Si è proceduto quindi all'analisi visiva dello stato

superficiale della fessura con l’obiettivo di comprendere l’anomalia. In questo paragrafo vengono riportati i panorami relativi ad un solo campione data la somiglianza tra i due.

In figura 4.33 vengono riportati i panorami relativi alla superficie superiore e inferiore del campione 3a dell’impasto di controllo AM1, con in allegato una tabella con i rispettivi valori iniziali e finali.



Figura 4-33: Stato della fessura superiore e inferiore dopo il periodo di cura. Campione in esame 3a dell’impasto di controllo AM1 e con rapporto a/c di 0,45. In allegato una tabella con i rispettivi valori iniziali e finali.

E’ possibile osservare che, grazie alla formazione dei cristalli di carbonato di calcio sulla superficie esterna, la fessura con ampiezza iniziale pari a 0,11 mm è stata sigillata totalmente, escludendo alcuni punti nei quali l’apertura presenta dimensioni molto ridotte. Infatti il valore di Healing Rate relativo all’ampiezza risulta pari a 0,95, mentre quello relativo al flusso è pari a 0,48. Questa mancanza di relazione potrebbe essere dovuta alla metodologia di misurazione della fessura come descritto in precedenza, oppure alla presenza delle piccole aperture, evidenziate in figura, che potrebbero facilitare il passaggio del flusso di acqua all’interno del campione. Non essendo a conoscenza dello stato interno della fessura e data la ridotta quantità di acqua registrata, questo potrebbe essere una delle cause che ha generato l’anomalia.

La figura 4.34 riporta, invece, le tipologie di calcestruzzo con rapporto a/c pari a 0,60 e posti in immersione con temperatura di 15°C. Il grafico mostra una buona stabilità dei risultati, in particolare nella zona caratterizzata da un livello di guarigione superiore a circa 0,80, nella quale è presente un’ottima relazione tra gli Healing Rate del flusso e quelli dell’ampiezza media della fessura. È visibile come la maggior parte dei risultati, circa il 72%, appartenga all’intervallo ritenuto accettabile e, alcuni di questi, presentano valori di guarigione prossimi a 1.

Anche in questo caso sono stati evidenziati punti ritenuti insoliti, nell’area al di sotto della bisettrice, in quanto il legame tra i rispettivi indici non risulta accettabile. Come effettuato

precedentemente, si analizza lo stato della fessura relativa a un solo campione in quanto i tre dati, cerchiati in figura, presentano valori molto simili.

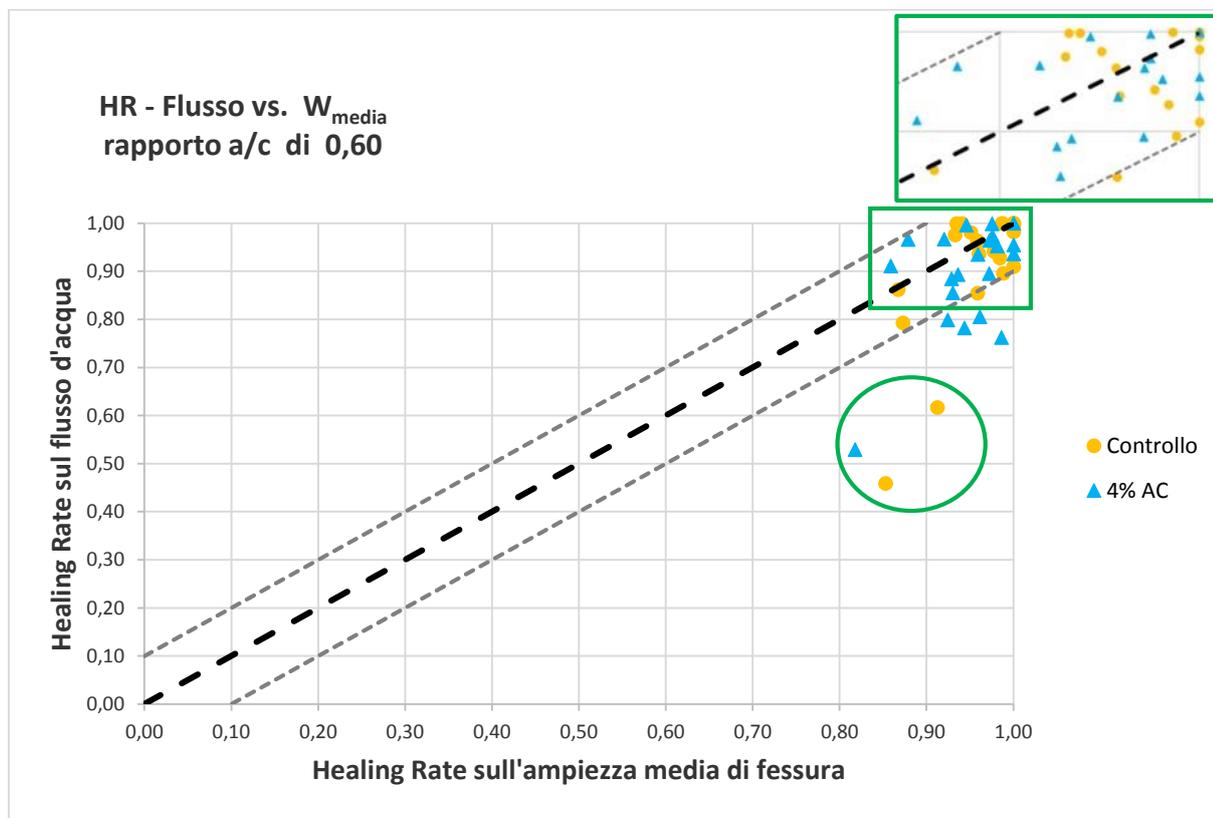


Figura 4-34: Confronto tra gli Healing Rate del flusso e dell'ampiezza media della fessura. Calcestruzzo con rapporto a/c pari a 0,60 e posto in immersione a 15°C.

In figura 4.35 vengono riportati i panorami relativi alla superficie superiore e inferiore del campione 6b dell'impasto di controllo AM2, con in allegato una tabella con i rispettivi valori iniziali e finali.



Figura 4-35: Stato della fessura superiore e inferiore dopo il periodo di cura. Campione in esame 6b dell'impasto di controllo AM2 e con rapporto a/c di 0,60. In allegato una tabella con i rispettivi valori iniziali e finali.



Anche in questo caso, sono presenti due punti ritenuti anomali che presentano un valore di guarigione, inerente all'ampiezza della fessura, superiore a 0,90 ma con una scarsa capacità di ridurre il flusso di acqua. L'analisi dello stato della fessura verrà riportata in appendice C, in quanto le anomalie risultano analoghe a quelle illustrate in precedenza.

#### 4.6.3. Cicli bagnato/asciutto

La figura 4.37 mostra i campioni di entrambe le tipologie di calcestruzzo, aventi rapporto a/c pari a 0,45, e sottoposti a cicli bagnato/asciutto. In questo grafico risulta difficile determinare una relazione fra i due indici di autoguarigione a causa dell'alta dispersione dei dati, a esclusione di alcuni risultati che presentano valori di HR maggiori di 0,90. In aggiunta, è chiaramente visibile una scarsa efficacia della correlazione tra il flusso d'acqua e l'apertura della fessura. Infatti i campioni delle due tipologie di calcestruzzo mostrano una parziale risigillatura delle fessure, con valori di Healing Rate compresi tra 0,65 e 0,90, a cui corrisponde però una ridotta capacità di riduzione del flusso. Ciò potrebbe essere dovuto alla metodologia di misurazione della fessura che prevede l'analisi dell'ampiezza in punti prestabili o alla scarsa formazione dei prodotti dell'autoguarigione all'interno del campione che non hanno permesso di ristabilire la continuità tra le superfici. Riguardo a quest'ultima considerazione, è possibile fornire solo un'ipotesi in quanto non si è a conoscenza dell'aspetto della fessura interna.

Questa situazione era abbastanza prevedibile vista la forte e costante dispersione ottenuta nei grafici descritti nei precedenti paragrafi. Inoltre, i valori di HR permettono di dimostrare ancora una volta la scarsa capacità di autoguarigione che si ottiene considerando questa tipologia di ambiente di cura.

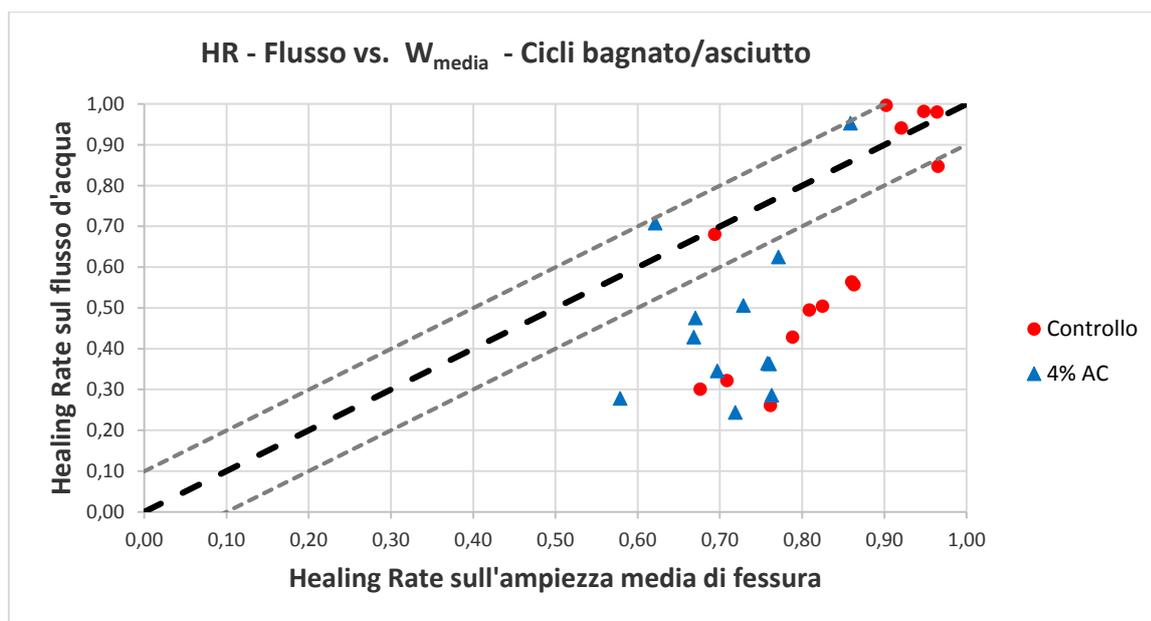


Figura 4-37: Confronto tra gli Healing Rate del flusso e dell'ampiezza media della fessura. Calcestruzzo con rapporto a/c pari a 0,45 e sottoposto a cicli bagnato/asciutto.

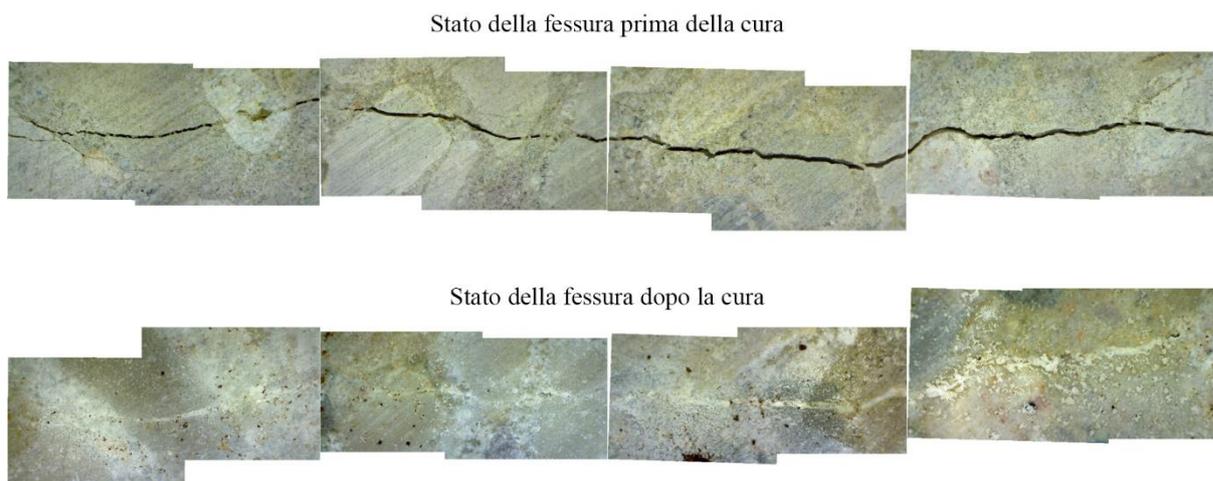
## 4.7. Studio della fessura e formazione dei cristalli

### 4.7.1. Valutazione visiva sulla risigillatura della fessura

In questo paragrafo viene proposta l'analisi dell'evoluzione dello stato superficiale delle fessure, focalizzando l'attenzione sulla formazione e la diffusione dei cristalli in funzione della tipologia di calcestruzzo e degli ambienti di cura studiati.

La precipitazione dei prodotti insolubili è stata considerevole nei campioni sottoposti a contatto costante con acqua per tutto il periodo di cura, i quali hanno presentato una maggiore riduzione del flusso e dell'ampiezza della fessura.

In figura 4.38 viene mostrata l'evoluzione della fessura inferiore del campione 1b relativo all'impasto AM4S1, contenente additivo cristallino e caratterizzato da un rapporto a/c pari a 0,45. È possibile osservare che, dopo il periodo di cura in immersione con temperatura di 15°C, la fessura con ampiezza iniziale di circa 0,16 mm è stata sigillata completamente grazie alla formazione dei cristalli sulla superficie esterna. Il campione ha presentato un valore di Healing Rate pari a 0,99. Nonostante ciò, al termine della prova finale di permeabilità, è stato registrato un flusso di acqua seppure molto ridotto.



*Figura 4-38: Campione 1b, impasto con additivo AM4S1 e rapporto a/c di 0,45, superficie inferiore. Ambiente di cura: immersione in acqua a temperatura 15°C. Evoluzione della fessura prima e dopo la cura.*

In figura 4.39, invece, viene riportato lo stato iniziale e finale della fessura del campione 3a, relativo all'impasto di controllo AM2 con rapporto a/c pari a 0,60. Anche in questo caso, la fessura di ampiezza iniziale di circa 0,18 mm ha goduto di una completa chiusura, confermata da un valore di Healing Rate pari a 1. La formazione dei cristalli, che ha permesso di ripristinare la continuità tra le due facce della fessura, risulta ben visibile e in quantità superiore rispetto al caso precedente. È stato registrato, però, un flusso di acqua quasi trascurabile che è stato in grado di permeare attraverso la fessura. Con riferimento a quanto già affermato nei paragrafi precedenti, in questo caso, la sola chiusura superficiale della fessura non permette di garantire una riduzione totale di permeabilità. Per questo motivo e per una maggiore interpretazione del fenomeno, risulta necessario studiare anche l'evoluzione interna al campione.

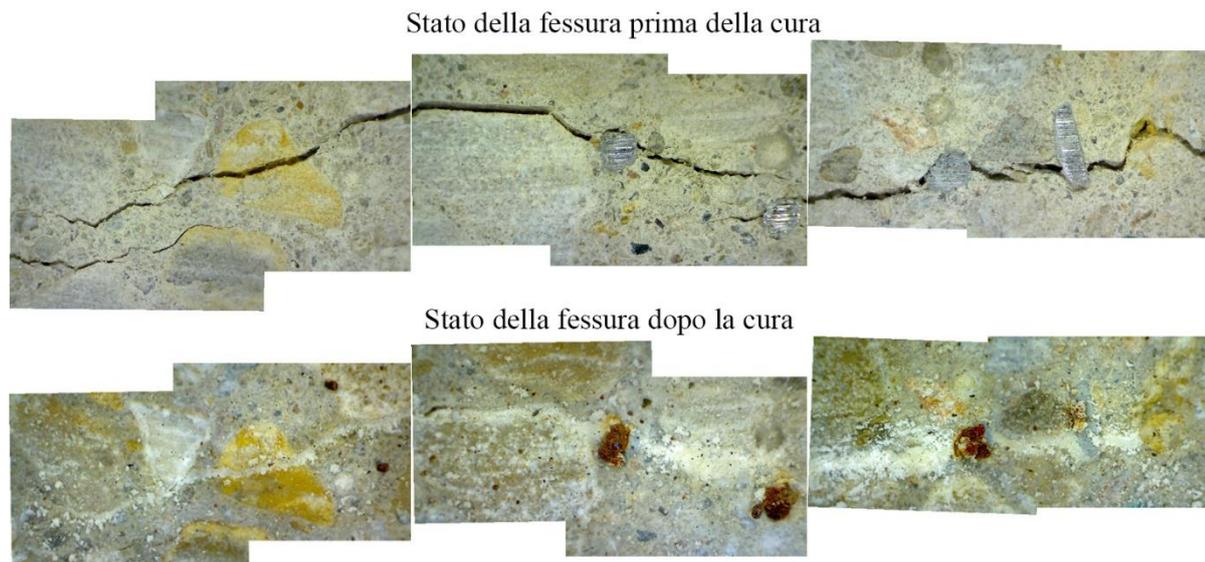


Figura 4-39: Campione 3a, impasto di controllo AM2 e rapporto a/c di 0,60, superficie superiore. Ambiente di cura: immersione in acqua a temperatura 15°C. Evoluzione della fessura prima e dopo la cura.

In figura 4.40 viene rappresentato lo stato della fessura dopo un periodo di 42 giorni di immersione in acqua a temperatura di 15°C. Il campione in esame è il 2b, relativo all'impasto con additivo cristallino AM4S2a con rapporto a/c pari a 0,60. È ben visibile la sigillatura completa della fessura, eccetto in corrispondenza dell'aggregato. Ciò è dovuto principalmente al fatto che la formazione dei cristalli è il risultato di una reazione tra la pasta cementizia, in particolare le particelle di cemento non idratate, e l'acqua. Infatti, nel caso in cui l'aggregato presenta dimensioni ridotte, è possibile che i prodotti formati attorno ad esso possano portare alla chiusura totale della fessura, come risulta visibile dalla figura 4.39 e 4.40. Ma, in questo caso evidenziato in figura 4.40, l'aggregato presenta una dimensione superficiale abbastanza importante che comporta una maggiore difficoltà nella sigillatura totale.

Inoltre si nota la precipitazione dei prodotti all'interno di un poro dove una serie di cristalli bianchi si sono formati partendo dalle pareti laterali del poro stesso.

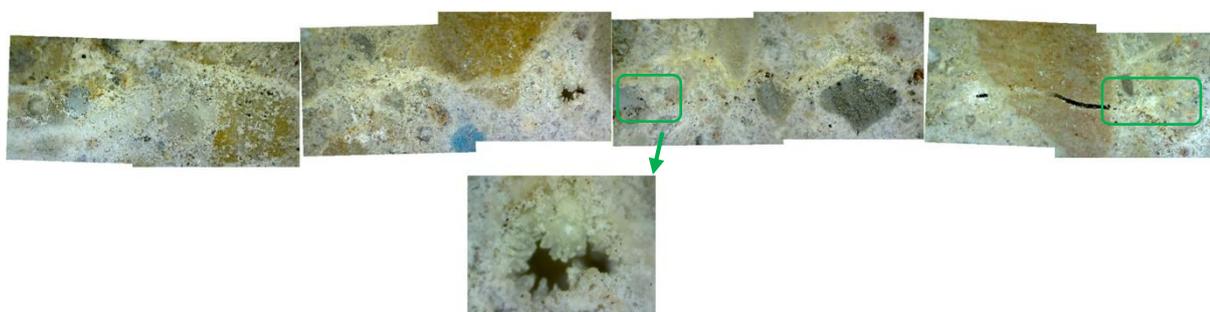


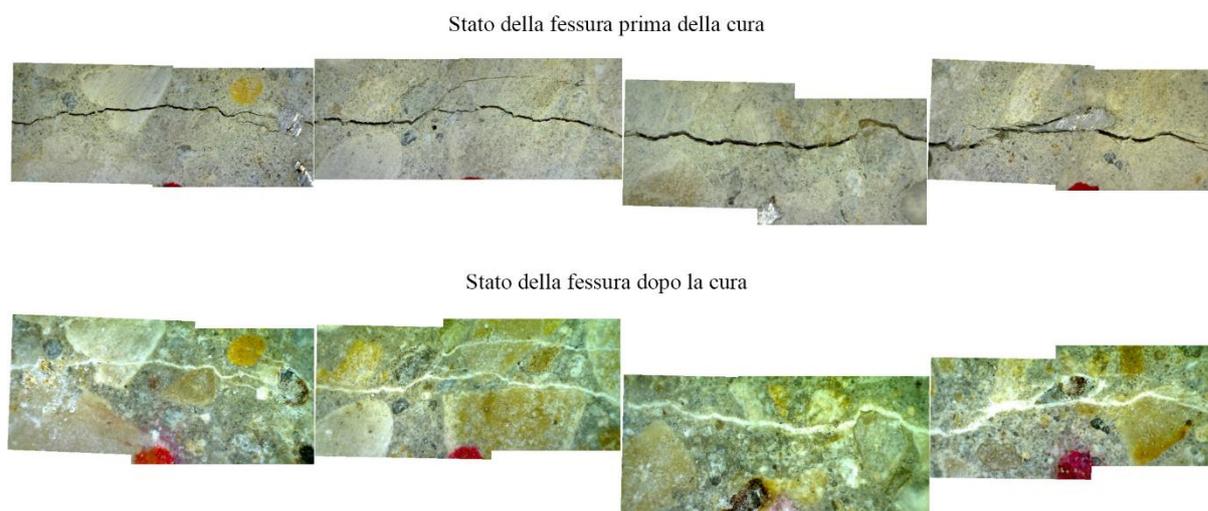
Figura 4-40: Campione 2b, impasto con additivo cristallino AM4S2a e rapporto a/c di 0,60, superficie inferiore. Ambiente di cura: immersione in acqua a temperatura 15°C. Stato della fessura al termine del periodo di cura.

I risultati esposti nei precedenti paragrafi hanno permesso di valutare l'importanza dell'aumento della temperatura negli ambienti dove è prevista l'immersione in acqua dei

campioni e, come questa, influisca in modo rilevante sugli effetti dell'autoguarigione anche per fessure di ampiezza considerevole. Qui di seguito, infatti, viene riportata l'evoluzione di due fessure con ampiezze iniziali diverse, rispettivamente pari a 0,17 e 0,26 mm, e appartenenti al medesimo impasto AM4S5, contenente l'additivo cristallino. Per l'apertura minore è stato preso in esame il campione 6a, mentre per quella maggiore il 3b.

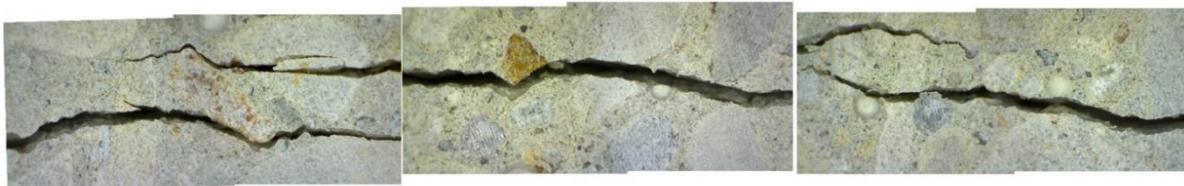
In entrambe è possibile osservare la formazione dei cristalli bianchi che hanno portato alla completa chiusura delle fessure, con valori di Healing Rate pari a 1 e una riduzione totale della permeabilità. Infatti, fin dal principio, questa tipologia di ambiente ha dimostrato di essere in grado di garantire una completa guarigione, in termini di riduzione del flusso e di ampiezza della fessura.

Inoltre, durante l'analisi della fessura, è stato osservato che i cristalli formati presentavano una consistenza diversa e una maggiore coesione con le superfici della fessura, rispetto a quelli presenti sui campioni curati in altre tipologie di ambienti. Per questo motivo, sono state eseguite delle prove di durezza, mostrate nel paragrafo seguente, per comprendere la resistenza dei prodotti per quanto riguarda gli ambienti che prevedono l'immersione in acqua dei campioni.



*Figura 4-41: Campione 6a, impasto con additivo AM4S5 e rapporto a/c di 0,45, superficie inferiore. Ambiente di cura: immersione in acqua a temperatura 30°C. Evoluzione della fessura prima e dopo la cura.*

Stato della fessura prima della cura



Stato della fessura dopo la cura

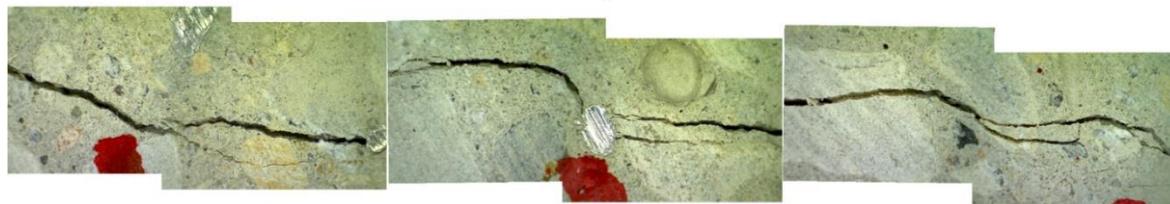


Figura 4-42: Campione 3b, impasto con additivo AM4S5 e rapporto a/c di 0,45, superficie superiore. Ambiente di cura: immersione in acqua a temperatura 30°C. Evoluzione della fessura prima e dopo la cura.

Le immagini riportate fino ad ora hanno permesso di mostrare come la presenza costante di acqua, durante tutto il periodo di cura, consenta la formazione di cristalli visibili ad occhio nudo e in quantità elevate. Qui di seguito viene illustrato il caso in cui si ha un parziale contatto con l'acqua, ovvero nel quale i campioni sono sottoposti a cicli di immersione in acqua ed esposizione all'aria.

La figura 4.43 mostra l'evoluzione della fessura appartenente alla superficie superiore del campione 6a, relativo all'impasto con additivo AM4S6, e sottoposto a cicli bagnato/asciutto. Dall'immagine è visibile come un'immersione parziale in acqua non sia sufficiente a garantire la completa chiusura della fessura, che presenta un'ampiezza iniziale di 0,18 mm. Nonostante ciò, la scarsa formazione di cristalli ha comunque permesso una parziale riduzione dell'ampiezza, registrando un valore di Healing Rate pari a 0,67, e una diminuzione del flusso di circa il 57%.

Stato della fessura prima della cura



Stato della fessura dopo la cura



Figura 4-43: Campione 6a, impasto con additivo AM4S6 e rapporto a/c di 0,45, superficie superiore. Ambiente di cura: cicli bagnato/asciutto. Evoluzione della fessura prima e dopo la cura.

In figura 4.44 viene riportata una tabella dove vengono confrontati gli effetti dell'autoguarigione in funzione di ogni tipologia di ambiente di cura e del rapporto a/c.

È possibile notare subito che le fessure poste a contatto con acqua durante tutto il periodo di cura presentano una maggiore capacità di sigillare fessure di diverse ampiezze, grazie alla formazione di una grande quantità di cristalli bianchi e insolubili. Come già affermato nei paragrafi precedenti, non esiste una differenza netta tra i campioni di controllo e quelli con additivo cristallino, per quanto riguarda la riduzione dell'ampiezza delle fessure. In alcuni casi, la presenza dell'additivo permette di ottenere una maggiore stabilità dei risultati. Inoltre, i calcestruzzi con diverso rapporto a/c presentano un comportamento molto simile.

I campioni sottoposti a cicli di immersione in acqua ed esposizione all'aria, invece, mostrano una ridotta capacità di chiusura delle fessure che non permette di ottenere un recupero di permeabilità del materiale. Probabilmente, le condizioni di esposizione all'aria, con una temperatura di circa 17°C e 40% di U.R., potrebbero essere una delle cause che ha portato ad una scarsa formazione di cristalli sulla superficie della fessura.

Complessivamente, è possibile affermare che la presenza continua di acqua influisce maggiormente sulla capacità di riduzione del flusso e dell'ampiezza della fessura, con una formazione di cristalli rilevante.

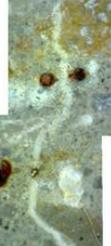
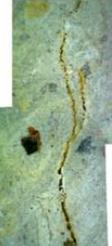
Impasto	a/c	Dosaggio	Ambiente di cura	Tempo di cura	
				Iniziale - 0 giorni	Finale - 42 giorni
Controllo AM3-3a	0,45	0%	Immersione in acqua T = 15°C	 w = 0,164 mm wf = 1990 ml	 w = 0,002 mm wf = 166 ml
AC - AM4S3-1a	0,45	4%	Immersione in acqua T = 15°C	 w = 0,185 mm wf = 1191 ml	 w = 0,006 mm wf = 99 ml
Controllo AM2-5b	0,6	0%	Immersione in acqua T = 15°C	 w = 0,180 mm wf = 2525 ml	 w = 0,000 mm wf = 0 ml
AC - AM4S4-3a	0,6	4%	Immersione in acqua T = 15°C	 w = 0,167 mm wf = 2150 ml	 w = 0,004 mm wf = 4 ml
Controllo AM5-1b	0,45	0%	Immersione in acqua T = 30°C	 w = 0,224 mm wf = 3710 ml	 w = 0,000 mm wf = 2 ml
AC - AM4S5-6a	0,45	4%	Immersione in acqua T = 30°C	 w = 0,170 mm wf = 3110 ml	 w = 0,000 mm wf = 0 ml
Controllo AM6-9a	0,45	0%	Cicli bagnato/asciutto	 w = 0,224 mm wf = 3620 ml	 w = 0,072 mm wf = 2531 ml
AC - AM4S6-6a	0,45	4%	Cicli bagnato/asciutto	 w = 0,187 mm wf = 2583 ml	 w = 0,062 mm wf = 1475 ml

Figura 4-44: Influenza degli ambienti di cura e del differente rapporto a/c sugli effetti relativi alla chiusura delle fessure.

#### 4.7.2. Analisi della durezza dei prodotti

L'analisi ha previsto lo svolgimento di una prova avente l'obiettivo di osservare quale fosse la resistenza e durezza dei prodotti formati sulla superficie delle fessure, mediante l'utilizzo di un compressore ad aria con pressione 0,7 MPa.

Al termine della prova sono stati ottenuti risultati interessanti. È stato notato che, utilizzando il compressore ad una distanza di 10 cm, i cristalli presenti su ciascun campione hanno dimostrato di possedere un'ottima resistenza al getto d'aria imposto. Invece, ad una distanza di 5 cm, i prodotti presenti sulle superfici dei campioni "curati" con una temperatura di 15°C hanno ceduto facilmente (figura 4.45 a-b), mentre per quelli immersi ad una temperatura di 30°C solo in un provino i cristalli hanno ceduto quando è stata ridotta la distanza a 3 cm (figura 4.46 a-b). I restanti non hanno subito variazioni, dimostrando di possedere una resistenza visibilmente superiore. Da ciò è possibile dedurre che probabilmente l'aumento della temperatura, e di conseguenza l'incremento della velocità di reazione, potrebbe portare alla formazione di cristalli insolubili con maggiore compattezza e coesione con le superfici del materiale, conferendo un livello di impermeabilità più alto.

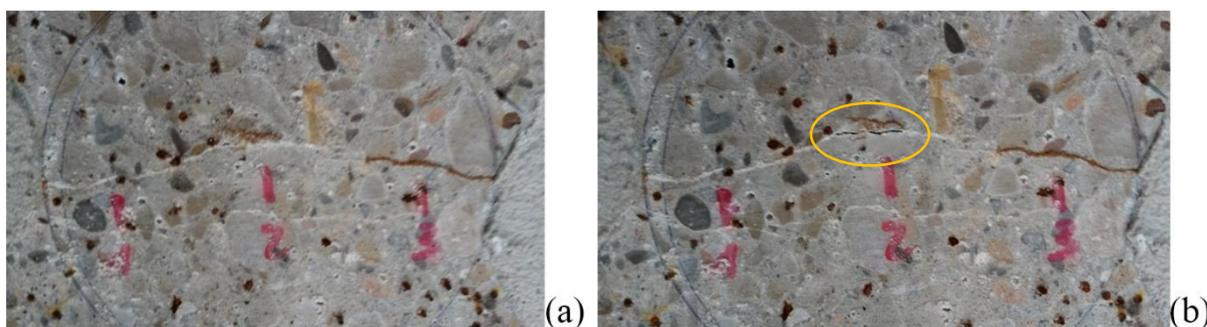


Figura 4-45: Stato iniziale (a) e finale (b) della fessura. Campione in esame 4a dell'impasto di controllo AM3 e con rapporto a/c di 0,45, fessura superiore.



Figura 4-46: Stato iniziale (a) e finale (b) della fessura. Campione in esame 6a dell'impasto con additivo cristallino AM455 e con rapporto a/c di 0,45, fessura superiore.

#### 4.7.3. Analisi della natura dei prodotti

Nota la reazione riportata nel paragrafo 3.7, è stato possibile eseguire uno studio preliminare relativo alla natura dei cristalli bianchi che si formano sulle superfici delle fessure, in seguito al periodo di cura. Nota la reazione, sono stati prelevati dei cristalli presenti sulla superficie di diversi campioni, di controllo e con additivo cristallino, sottoposti ad immersione in acqua con temperatura di 15°C e 30°C. Una volta posti all'interno di un vetrino trasparente (figura 4.47 a), sono state aggiunte alcune gocce di acido cloridrico. Dalla reazione è stato ottenuto una effervescenza dovuta allo sviluppo di anidride carbonica sotto forma di gas (figura 4.47 b). Da ciò è stato possibile dedurre che i prodotti precipitati sulle superfici delle fessure sono probabilmente carbonato di calcio.

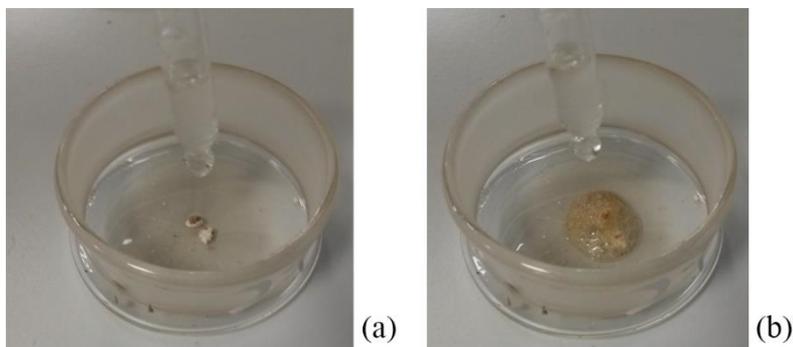


Figura 4-47: Cristalli insolubili all'interno del vetrino (a), effervescenza dovuta allo sviluppo di anidride carbonica (b).

Lo studio è stato effettuato solo osservando il risultato della reazione, perciò non è stato possibile affermare con certezza la natura dei prodotti.

#### 4.8. Confronto con studi precedenti

Nel seguente paragrafo verranno messi a confronto i risultati ottenuti con quelli di uno studio precedente e avente il medesimo obiettivo di questa ricerca. Nel paragrafo 3.2 sono già state esposte le informazioni relative al programma sperimentale che è stato adottato, perciò di seguito verranno riportate solo quelle necessarie ad effettuare il confronto.

La già citata ricerca di S. Moscato del 2012 [46] ha avuto l'obiettivo di studiare gli effetti dell'autoguarigione del calcestruzzo in termini di riduzione del flusso e dell'ampiezza della fessura. È stato utilizzato un calcestruzzo fibrorinforzato, con rapporto a/c pari a 0,45, mediante il quale sono state realizzate due serie di campioni cilindrici, di controllo e contenenti additivo cristallino con una percentuale del 4% in volume di cemento. La prefessurazione è stata eseguita mediante prova a trazione indiretta, o brasiliana, fino al raggiungimento di fessure con ampiezza compresa tra 0,1 e 0,3 mm. In seguito è stata effettuata la prova di permeabilità che ha consentito di registrare la quantità di acqua passante attraverso la fessura. I campioni, infine, sono stati sottoposti per una durata di 42 giorni a quattro diversi ambienti di cura, di seguito riportati:

- Completa immersione in acqua normale a temperatura costante;
- Esposizione ad aria non trattata;
- Esposizione ad aria in condizione di saturazione, 95-100% U.R., e ad una temperatura costante di 20°C;
- Contatto con una quantità di acqua necessaria al mantenimento dell'interno della fessura in condizione bagnata.

Al termine del periodo di cura, è stata valutata la riduzione di ampiezza della fessura ed eseguita nuovamente la prova di permeabilità per esaminare il grado di recupero.

Il confronto è stato effettuato con l'obiettivo di valutare l'influenza degli ambienti di cura sugli effetti dell'autoguarigione. Per fare ciò, è stato considerato l'indice di Healing Rate relativo al flusso di acqua in quanto permette di valutare con maggiore affidabilità il grado di autoguarigione del calcestruzzo e, quindi, il recupero di permeabilità. Nonostante sia stata adottata una diversa metodologia di misurazione, è stato ritenuto opportuno considerare anche l'indice relativo all'apertura media della fessura con l'obiettivo di osservare l'influenza degli ambienti di cura sulla risigillatura della fessura, fornendo così un quadro più completo.

Per fornire un paragone più oggettivo che non dipenda dal dosaggio utilizzato per la realizzazione del calcestruzzo, sono stati considerati i soli campioni fabbricati con un rapporto a/c pari a 0,45. Si è ritenuto opportuno mantenere divisi gli ambienti di cura che prevedono l'immersione in acqua, in quanto le condizioni al contorno risultano differenti. Infatti, nello studio precedente, non si è a conoscenza del valore di temperatura dell'acqua poiché non è stata eseguita una misura ad intervalli regolari. In aggiunta non è stato utilizzato un volume di acqua costante, il cui valore risulta differente rispetto a quello calcolato nello studio attuale, e ciò potrebbe condizionare il processo di autoguarigione dei campioni.

Qui di seguito vengono riportate due sezioni nelle quali è stato eseguito il confronto dei risultati ottenuti da entrambe le ricerche per ogni tipologia di ambiente di cura, valutati in funzione della riduzione del flusso e della variazione dell'ampiezza della fessura. I dati derivanti dai due studi sono stati separati visivamente mediante l'utilizzo di differenti tonalità di colore per evidenziare i risultati ottenuti nella ricerca attuale e poterli confrontare meglio con i restanti.

#### 4.8.1. Riduzione del flusso

In questa sezione vengono riportati i dati suddivisi in due gruppi, in funzione della tipologia di calcestruzzo, mediante i quali è possibile osservare quale sia l'incidenza dei singoli ambienti di cura sulla variazione del flusso. È stato ritenuto opportuno considerare un flusso di acqua iniziale inferiore a 3500 ml per avere la possibilità di confrontare risultati caratterizzati dallo stesso livello di danno.

In figura 4.48 vengono analizzati i soli campioni di controllo. Si nota una discreta dispersione, in particolare per gli ambienti che non prevedono il contatto costante con l'acqua per tutto il periodo di cura. Infatti i campioni esposti all'aria trattata e non, risultano essere quelli con una capacità di riduzione del flusso abbastanza ridotta e caratterizzati, nella maggior parte dei casi, da un aumento del flusso di acqua che ha portato ad ottenere valori negativi di Healing Rate, come illustrato in figura.

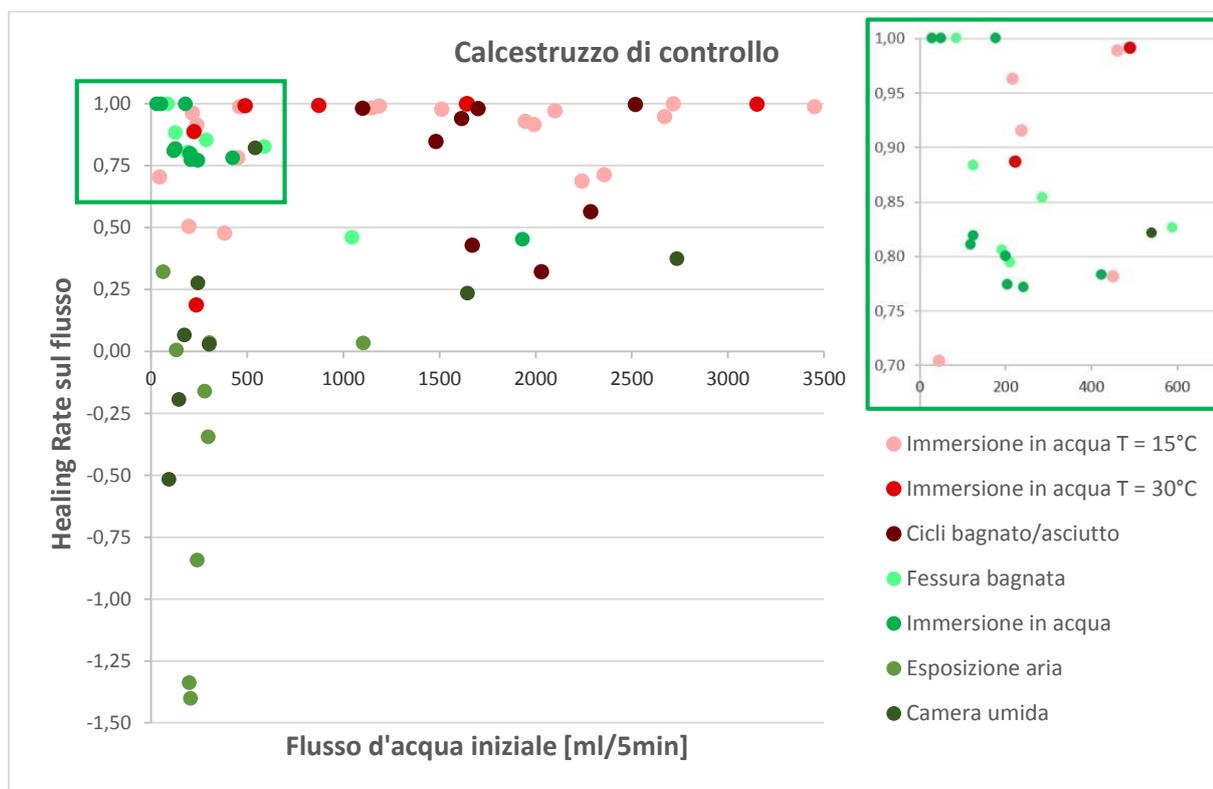


Figura 4-48: Healing Rate in relazione con il flusso di acqua iniziale. Confronto dei dati relativi ai soli campioni di controllo sottoposti a differenti ambienti di cura.

Per i restanti ambienti caratterizzati da una presenza continua di acqua, invece, è possibile osservare il raggiungimento di buon livello di guarigione, con valori di Healing Rate superiori a 0,75. In particolare, l'immersione in acqua con temperatura costante, sia 15°C o 30°C, consente di ottenere un comportamento più stabile garantendo, il più delle volte, la totale riduzione del flusso di acqua anche per valori di flusso rilevanti. Inoltre i campioni sottoposti a cicli di immersione in acqua ed esposizione all'aria si comportano complessivamente meglio rispetto a quelli posti in camera umida, nonostante risulti difficile individuare un particolare andamento.

In figura 4.49 viene analizzato il comportamento dei campioni contenenti l'additivo cristallino. La situazione, in questo caso, risulta ben diversa. Infatti si può osservare come la presenza costante di acqua o meno consenta un grado di guarigione tale da comportare la concentrazione dei risultati in due aree ben distinte del grafico. Si nota, infatti, come gli ambienti che prevedono sia l'immersione in acqua a differenti temperature sia il mantenimento di una delle due superfici in condizioni bagnate abbiano permesso di ottenere risultati che occupano la sola zona superiore del grafico, con valori di Healing Rate superiori a 0,73 e, il più delle volte, molto vicini a 1. In particolare, l'attenzione ricade sui campioni sottoposti ad immersione con una temperatura di 30°C in quanto mostrano un'ottima capacità di riduzione del flusso, in alcuni casi totale, e in grado di raggiungere un valore di Healing Rate medio pari a 0,99.

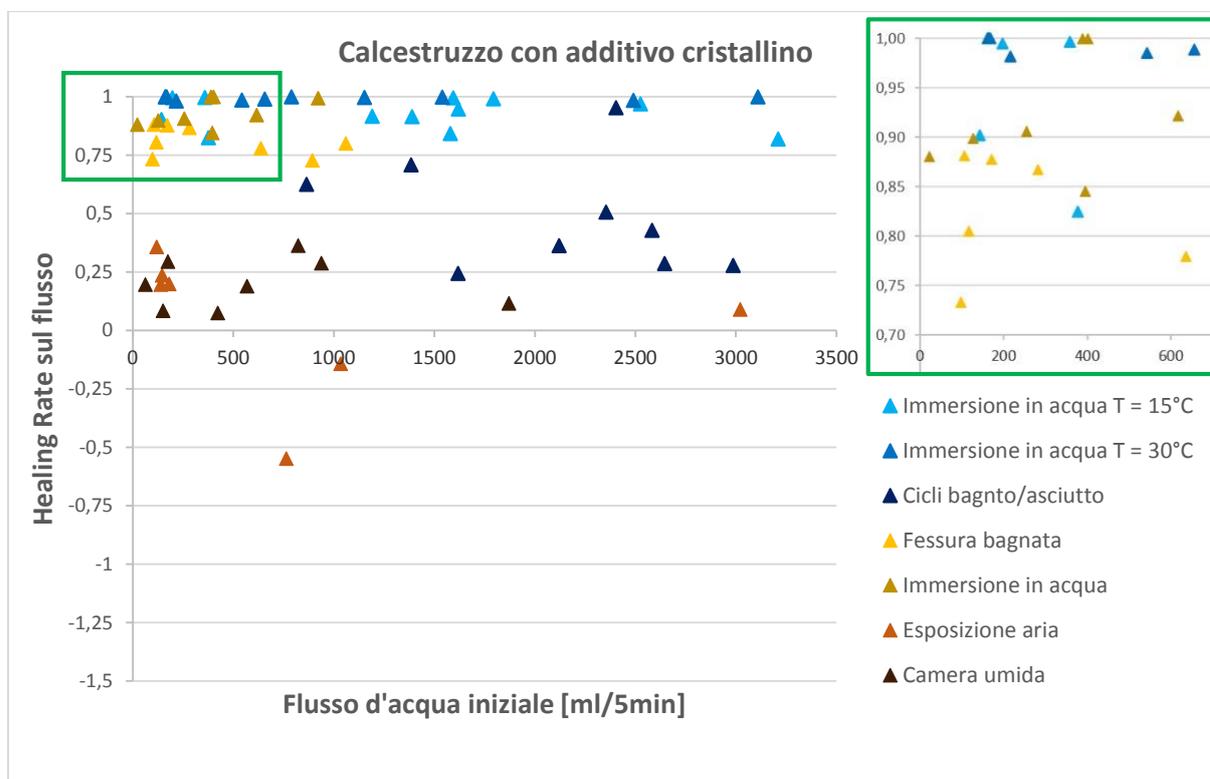


Figura 4-49: Healing Rate in relazione con il flusso di acqua iniziale. Confronto dei dati relativi ai soli campioni contenenti additivo cristallino e sottoposti a differenti ambienti di cura.

Mentre i restanti ambienti sono caratterizzati da valori molto più bassi, inferiori a 0,50, e una capacità abbastanza scarsa di riduzione del flusso. Si nota come i cicli di immersione ed esposizione all'aria abbiamo un'attitudine leggermente migliore rispetto agli altri due ambienti che occupano la medesima area, ma il numero ridotto di dati, concentrati in due intervalli di flussi differenti, fornisce alcune informazioni interessanti ma non permette di trarre delle conclusioni affidabili.

Complessivamente si osserva come la presenza dell'additivo cristallino negli impasti conferisca una maggiore stabilità dei risultati rispetto a quelli ottenuti per le specie di controllo che, invece, risultavano maggiormente dispersi. Da tale comportamento è possibile individuare una tendenza ben precisa e comprendere meglio quali siano gli effetti dell'autoguarigione, in termini di riduzione di flusso, per ogni tipologia di ambiente di cura.

Per fornire un'idea più chiara dell'influenza dell'additivo cristallino sulla guarigione del calcestruzzo, in figura 4.50 viene riportato un grafico ad istogrammi nel quale vengono confrontati i valori medi di Healing Rate relativi ad ogni singolo ambiente di cura e alle due tipologie di calcestruzzo. Come affermato in precedenza, gli ambienti caratterizzati dalla presenza costante di acqua permettono di raggiungere valori di guarigione elevati garantendo una buona capacità di riduzione del flusso. Nella maggior parte dei casi, l'influenza dell'additivo cristallino risulta molto più efficace rispetto alle specie di controllo permettendo di ottenere una maggiore stabilità e affidabilità dei risultati. In particolare, l'immersione in acqua rappresenta la condizione in grado di fornire un maggior beneficio. Da ciò è deducibile ancora una volta che la presenza di acqua, in forma liquida, è la condizione necessaria per garantire un buon livello di recupero della permeabilità del materiale.

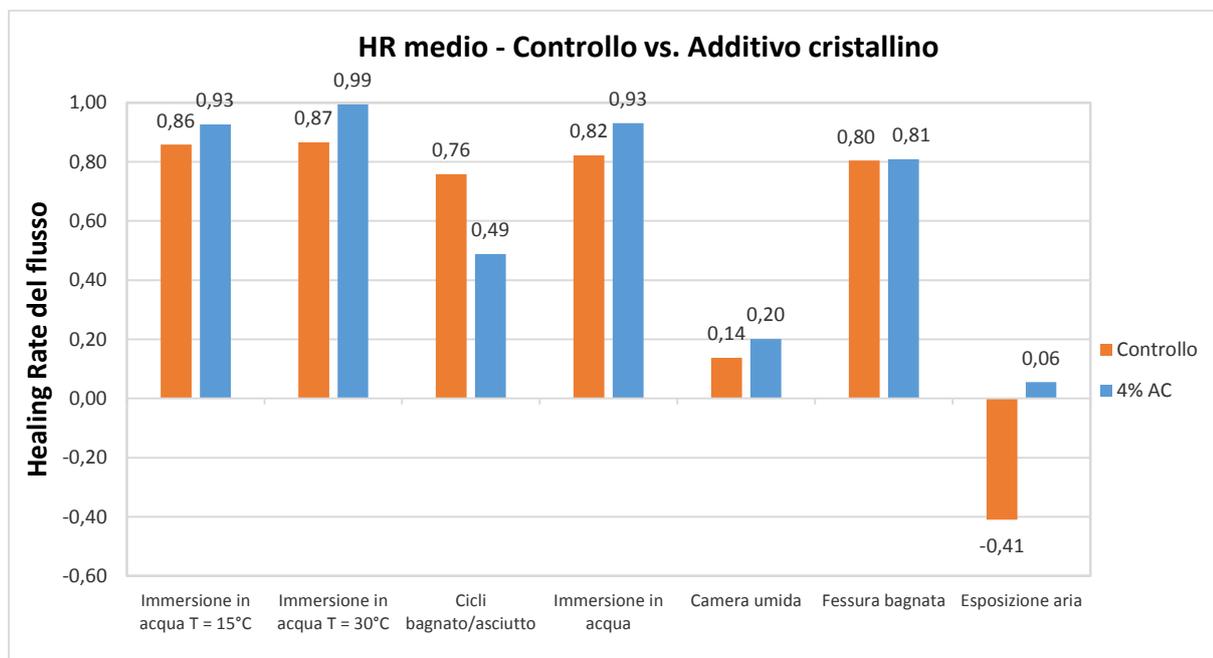


Figura 4-50: Rappresentazione Healing Rate medio relativo al flusso di acqua, per ogni ambiente di cura e tipologia di calcestruzzo.

È possibile notare come la mancanza di acqua, in forma liquida, non permetta di ottenere una sufficiente riduzione del flusso di acqua e, di conseguenza, garantire una adeguata permeabilità del calcestruzzo. Infatti i campioni posti in camera umida in condizioni di saturazione mostrano valori leggermente migliori rispetto alla sola esposizione all'aria, risultando comunque non troppo rilevanti. In questo caso, però, è visibile una differenza nei valori medi, pari al 6%, tra i campioni di controllo e quelli con additivo cristallino, dovuta principalmente alla natura idrofila di quest'ultimo. Ciò permette di catturare una maggiore quantità di acqua, contenuta nell'aria allo stato di vapore, promuovendo maggiormente i processi relativi al fenomeno del *self-healing*. La situazione peggiore, per quanto riguarda la capacità di riduzione del flusso, è rappresentata dalla sola esposizione all'aria non trattata di laboratorio dove i campioni di controllo presentano un valore medio di Healing Rate negativo dovuto ad un aumento del flusso finale, fenomeno opposto a quello desiderato. Tale comportamento può essere dovuto ad un allargamento della fessura durante il periodo di cura e a un degrado maggiore del materiale. Come affermato nello studio precedente [46], una possibile causa di quanto accaduto può essere ricondotta al fenomeno del ritiro proprio del periodo d'indurimento del calcestruzzo che, data l'età giovane dei campioni al momento della prefessurazione, ha mostrato effetti più accentuati comportando il restringimento dell'area superficiale del campione e, di conseguenza, l'allargamento dell'ampiezza della fessura. I campioni con additivo cristallino, invece, sembrano aver contrastato questo ritiro, poiché catturando una maggiore quantità di acqua dall'aria hanno permesso di ridurre le eccessive variazioni di volume.

Complessivamente, per gli ambienti di cura che prevedono la presenza di acqua in stato liquido è possibile osservare una buona capacità di guarigione per entrambe le tipologie di calcestruzzo, anche se i campioni con additivo cristallino garantiscono un livello maggiore. È necessario evidenziare, però, come l'immersione in acqua a temperatura di 30°C rappresenta le condizioni al contorno che influenzano maggiormente il fenomeno di autoguarigione, ottenendo valori di Healing Rate considerevoli. In particolare le specie contenenti additivo cristallino raggiungono un valore medio pari a 0,99.

#### 4.8.2. Variazione dell'ampiezza media della fessura

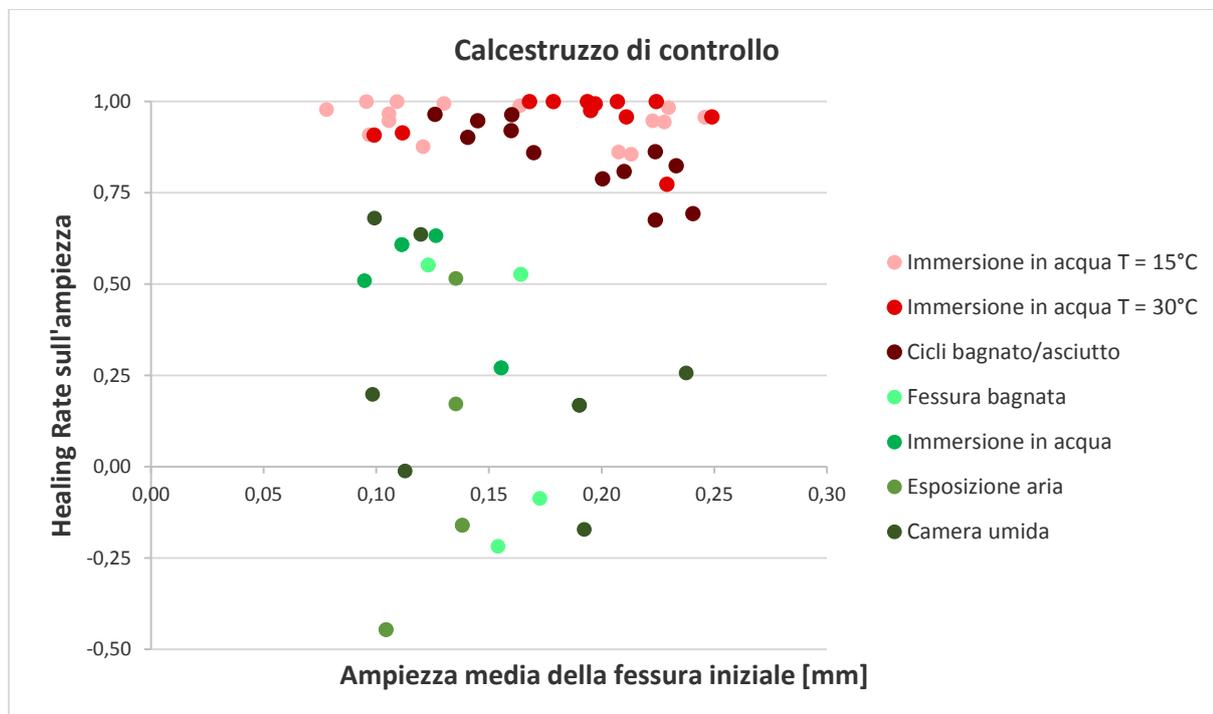
In questo paragrafo viene analizzata la variazione dell'ampiezza media della fessura e confrontata l'influenza dei singoli ambienti di cura su entrambe le tipologie di calcestruzzo. L'obiettivo di questa ricerca è stato quello di studiare fessure con ampiezza compresa in un intervallo che risulta più ampio rispetto a quello considerato nello studio precedente. È stato deciso perciò di limitare questo intervallo, riportando le sole ampiezze caratterizzate da valori inferiori a 0,30 mm, potendo così confrontare gli effetti dell'autoguarigione su fessure appartenenti alla stessa categoria.

La figura 4.51 mostra qual è il livello di influenza che i singoli ambienti di cura hanno sulla risigillatura di fessure appartenenti ai soli campioni di controllo. I risultati ottenuti dalle due ricerche occupano due aree distinte del grafico e mostrano comportamenti differenti. Infatti nella parte superiore si collocano i dati relativi agli ambienti di cura analizzati in questa ricerca,

i quali presentano un comportamento stabile con valori di Healing Rate superiori a 0,75, mentre i restanti mostrano una maggiore dispersione che rende difficile l'individuazione di un preciso andamento, anche per quegli ambienti che prevedono la presenza continua di acqua. Si nota come i campioni di controllo sottoposti agli ambienti di cura studiati nella ricerca precedente possiedono una ridotta capacità di risigillare fessure di qualsivoglia ampiezza, presentando a volte valori di Healing Rate negativi che si traducono in un aumento dell'ampiezza finale della fessura.

È importante evidenziare che l'ambiente che prevede l'immersione in acqua presenta valori di Healing Rate inferiori rispetto a quelli ottenuti nello studio attuale, nonostante il tempo di cura a diretto contatto con acqua sia il medesimo. Questa differenza potrebbe essere dovuta principalmente alla diversa metodologia adottata per la misurazione dell'ampiezza media della fessura superficiale o alle differenti condizioni di cura relative al volume e temperatura dell'acqua, già descritte in precedenza. Inoltre è possibile osservare come i campioni analizzati nella presente ricerca sono caratterizzati da valori di Healing Rate che risultano analoghi a quelli relativi alla riduzione del flusso, permettendo così di individuare una buona relazione tra i due indici di autoguarigione come già illustrato nel capitolo 4.6.

Complessivamente, l'ambiente di cura che garantisce una buona stabilità dei risultati e una maggiore capacità di guarigione risulta essere quello nel quale i campioni sono immersi in acqua con una temperatura di 30°C, i quali godono di un valore medio di Healing Rate pari a 0,96.



La situazione per i campioni con additivo cristallino, illustrata in figura 4.52, risulta leggermente diversa. È sempre presente una forte dispersione relativa agli ambienti analizzati nello studio precedente, ma è possibile osservare che i provini “curati” a diretto contatto con l’acqua, nonostante siano abbastanza sparsi, tendono ad occupare la parte superiore del grafico, presentando valori di Healing Rate sensibilmente superiori rispetto a quelli ottenuti per i campioni di controllo. Mentre gli ambienti che non prevedono la presenza di acqua liquida mostrano ancora una scarsa capacità nel ridurre l’ampiezza delle fessure ottenendo valori di Healing Rate molto bassi e, a volte, negativi.

I risultati ottenuti in questo studio, invece, presentano ancora un comportamento abbastanza stabile con un andamento leggermente decrescente all’aumentare dell’apertura media della fessura, in particolare per quegli ambienti nei quali i campioni sono posti in immersione durante tutto il periodo di cura. Proprio questa tipologia di cura risulta essere quella che influenza maggiormente il fenomeno del *self-healing*, in termini di riduzione della fessura, e permette di raggiungere una percentuale media pari al 94%. In particolare, l’incremento di temperatura consente di ottenere un livello di guarigione rilevante, pari all’99%.

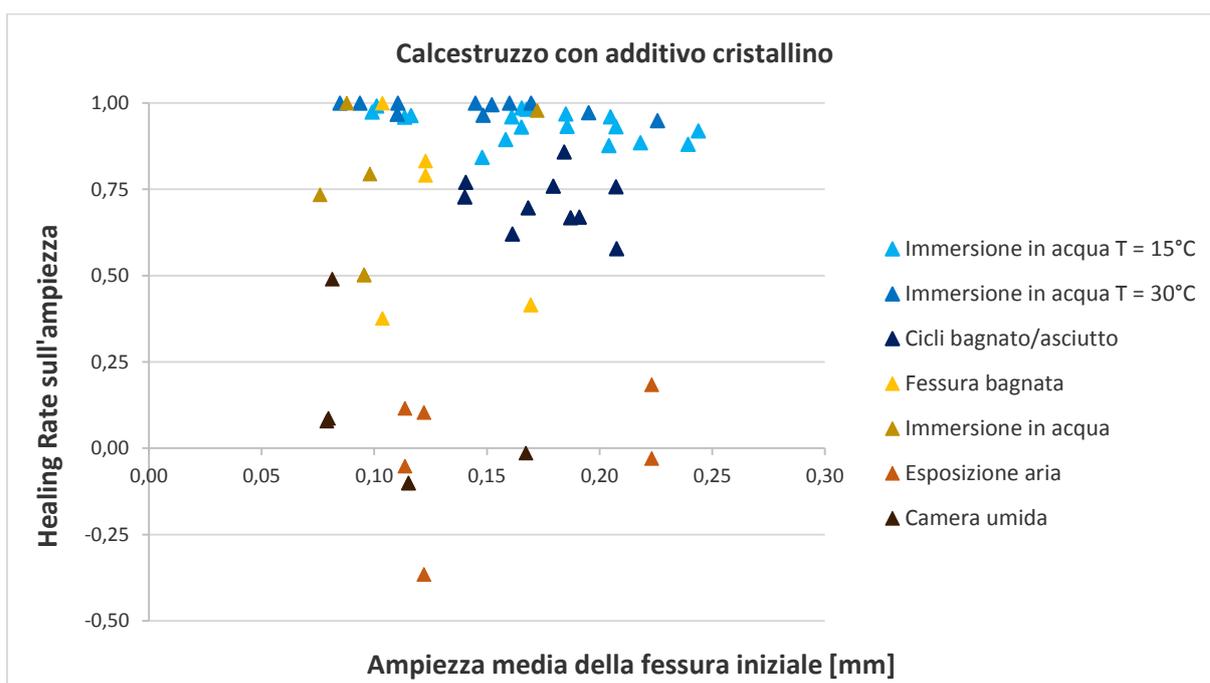


Figura 4-52: Healing Rate sull'ampiezza media della fessura. Confronto dei dati relativi ai soli campioni contenenti additivo cristallino e sottoposti a differenti ambienti di cura.

Per fornire un quadro complessivo e comprendere meglio l’influenza dei singoli ambienti di cura su entrambe le tipologie di calcestruzzo, viene riportato in figura 4.53 un grafico nel quale viene illustrato il grado di guarigione del calcestruzzo in funzione del valore medio di Healing Rate relativo all’ampiezza media della fessura. È possibile osservare come la presenza di acqua liquida sia la condizione necessaria per avviare le reazioni connesse al fenomeno del *self-*

*healing* ed ottenere un ottimo grado di guarigione, che consente la parziale o completa richiusura delle fessure promossa dalla formazione dei cristalli di carbonato di calcio. In particolare i campioni con additivo cristallino dimostrano di avere un comportamento migliore rispetto a quelli di controllo.

Risulta evidente la differenza con le altre tipologie di cura. Infatti l'esposizione all'aria non trattata di laboratorio rappresenta la condizione peggiore nella quale si ha un aumento dell'ampiezza finale della fessura che porta ad ottenere valori di Healing Rate negativi. Tale comportamento è dovuto principalmente al fenomeno del ritiro del calcestruzzo, già descritto nella sezione precedente, che comporta un allargamento dell'ampiezza della fessura. Anche in questo caso, l'utilizzo dell'additivo cristallino ha permesso di contrastare tale fenomeno riducendo le variazioni di volume a cui il calcestruzzo è soggetto durante il periodo di indurimento.

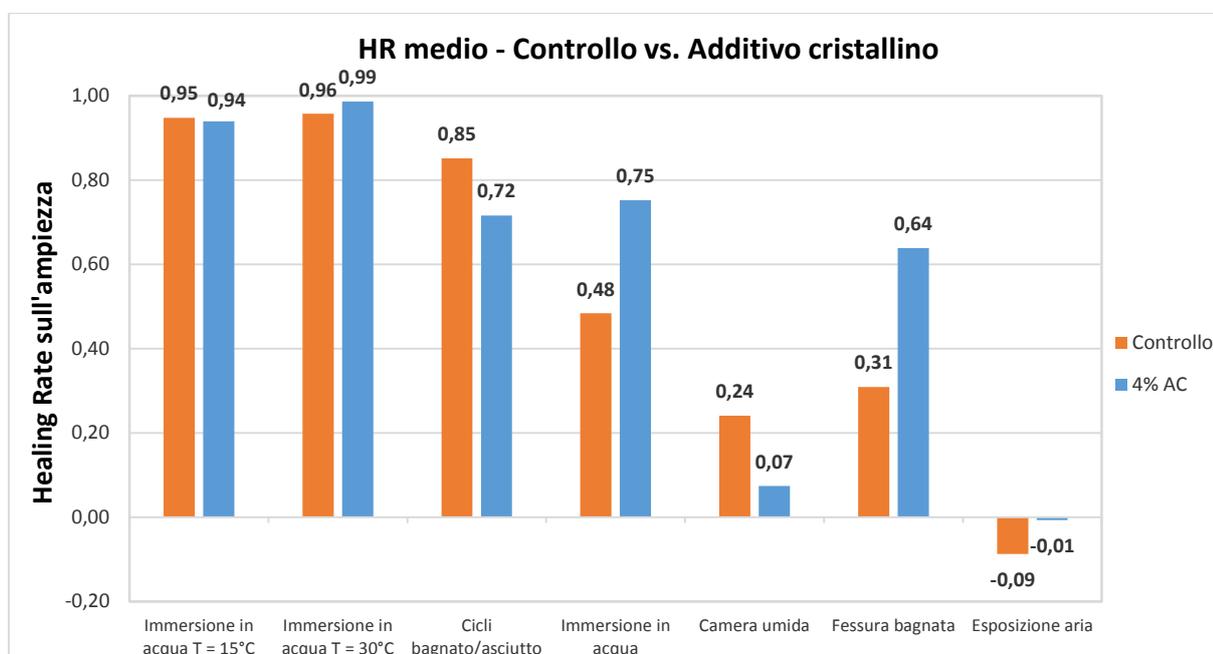


Figura 4-53: Rappresentazione Healing Rate medio relativo all'ampiezza media della fessura, per ogni ambiente di cura e tipologia di calcestruzzo.

In conclusione, nonostante la metodologia di misurazione adottata nei due studi risulta differente, è possibile comunque affermare che la presenza di acqua liquida conferisce una maggiore capacità di autoguarigione, permettendo di raggiungere valori di Healing Rate elevati e favorendo la formazione di cristalli insolubili. In particolare l'utilizzo dell'additivo cristallino consente di ottenere, nella maggior parte dei casi, valori superiori di Healing Rate garantendo una notevole riduzione della fessura.

---

## Capitolo 5 - CONCLUSIONI

### 5.1. Conclusioni

L'obiettivo di questo studio è stato quello di analizzare la capacità di autoguarigione del calcestruzzo mediante l'utilizzo di additivi cristallini, già presenti in commercio come riduttori di permeabilità, e le condizioni nelle quali tali prodotti sono capaci di promuovere i processi legati al *self-healing*. L'analisi di tale capacità è stata possibile grazie allo sviluppo di una metodologia che ha previsto lo svolgimento di specifiche prove finalizzate a valutare e quantificare gli effetti dell'autoguarigione, in termini sia di riduzione di permeabilità sia di variazione dell'ampiezza delle fessure. Il programma sperimentale ha previsto la realizzazione di quattro differenti miscele, caratterizzate dalla presenza o meno dell'additivo cristallino e da un diverso rapporto a/c posto pari a 0,45 e 0,60, con le quali sono stati fabbricati campioni cilindrici in calcestruzzo fibrorinforzato, prefessurati in età giovane mediante prova a trazione indiretta. Inoltre, per osservare sotto quali condizioni il fenomeno del *self-healing* possa essere considerato efficiente ai fini del miglioramento delle capacità del calcestruzzo, sono stati studiati tre diversi ambienti di cura ai quali i campioni sono stati sottoposti per una durata di 42 giorni. Noto che la presenza di acqua rappresenta il parametro necessario all'attivazione delle reazioni connesse all'autoguarigione, è stato ritenuto opportuno considerare due ambienti nei quali i campioni si trovano immersi in un volume di acqua prestabilito e a differenti temperature, per tutto il periodo di cura. La scelta del terzo ambiente, caratterizzato da cicli di immersione in acqua ed esposizione all'aria non trattata, è stata effettuata con l'obiettivo di osservare quale fosse il grado di guarigione dei campioni posti a contatto con acqua solo ad intervalli regolari.

I parametri principali utilizzati per esaminare il grado di guarigione dei campioni fessurati sono stati la variazione di permeabilità e la valutazione dell'apertura della fessura. Il primo è relativo allo svolgimento della prova di permeabilità, descritta nel capitolo 3, con la quale è stato possibile valutare la variazione del flusso di acqua passante attraverso la fessura e comprendere, a seguito del periodo di cura, il livello di recupero di permeabilità del materiale. L'analisi dell'apertura della fessura, invece, è stata eseguita mediante l'ausilio di strumenti ottici che hanno permesso di osservare il reale cambiamento dello stato superficiale della fessura e la relativa riduzione di ampiezza, grazie alla diffusa precipitazione di cristalli di carbonato di calcio.

Mediante l'analisi dei risultati ottenuti dalla prova di permeabilità è stato possibile concludere che l'utilizzo dell'additivo cristallino influisce positivamente sulla variazione di permeabilità. Nella maggior parte dei casi è stato osservato che il calcestruzzo contenente tale prodotto permette una maggiore riduzione di permeabilità rispetto a quello ordinario. Questa differenza è stata rilevata per gli ambienti nei quali i campioni sono stati posti a diretto contatto con acqua per tutto il periodo di cura, raggiungendo una percentuale di guarigione pari al 92%. In aggiunta, l'utilizzo di un diverso rapporto a/c non ha influito in modo rilevante

sulla capacità di autoguarigione del calcestruzzo, mostrando un comportamento analogo. L'aumento di temperatura, però, ha permesso di ottenere valori di indici di guarigione, opportunamente definiti, pari al 99%, rivelandosi la migliore condizione di cura in cui i campioni ottengono la totale riduzione del flusso e, quindi, il totale recupero di permeabilità. In presenza di acqua il calcestruzzo ordinario, anche se non fornisce valori superiori a quelli dell'additivo, permette comunque di raggiungere percentuali notevoli di guarigione. Solo nel caso in cui i campioni sono sottoposti a cicli bagnato/asciutto, il calcestruzzo di controllo presenta una maggiore capacità di riduzione del flusso rispetto a quello contenente l'additivo cristallino.

La definizione di una metodologia di misurazione delle fessure ha permesso di fornire un metodo, utilizzabile in futuro, mediante il quale è possibile individuare una relazione con la permeabilità dei campioni in calcestruzzo danneggiati dalla presenza delle fessure. Infatti i dati ottenuti dalla misurazione dell'ampiezza delle fessure sono stati sempre posti a confronto con quelli derivanti dalla prova di permeabilità. In particolare è stato ritenuto opportuno considerare l'ampiezza media della fessura ottenuta tramite la misurazione eseguita in punti precisi e a distanza definita l'una dall'altra. Ciò ha permesso di individuare una relazione nella quale la diminuzione del flusso di acqua è sempre accompagnata da una riduzione dell'ampiezza media della fessura.

È stato possibile, quindi, osservare il cambiamento dello stato della fessura durante il periodo di cura e comprendere qual è stata l'influenza dei singoli ambienti di cura sulla riduzione dell'ampiezza media. I dati ottenuti risultano essere analoghi a quelli acquisiti dallo studio della permeabilità e, nella maggior parte dei casi, si trovano in stretto rapporto tra di loro. Ciò ha permesso di valutare con buona approssimazione gli effetti del *self-healing* e il recupero di permeabilità del calcestruzzo danneggiato.

L'acquisizione delle foto scattate al microscopio ha consentito di realizzare panorami ad alta risoluzione, con i quali è stato possibile valutare visivamente il cambiamento dello stato delle fessure in funzione dell'ambiente di cura analizzato. Queste osservazioni hanno permesso di constatare la diffusa formazione di cristalli bianchi precipitati sulle superfici dei campioni posti in immersione per tutto il periodo di cura. In aggiunta, è stata verificata la resistenza di tali cristalli sottoponendoli ad un getto di aria con pressione stabilita, con lo scopo di osservare quale fosse il livello di permeabilità che sono in grado di garantire. È stato accertato che, nella maggior parte dei casi, i prodotti formati possiedono una buona resistenza e coesione con la superficie dei campioni.

In conclusione, per le ragioni esposte finora, un utilizzo dell'additivo cristallino può risultare vantaggioso per quegli ambienti che prevedono la completa immersione in acqua. L'aggiunta di tale prodotto, però, comporta un incremento del costo iniziale di circa il 30%, utilizzando una percentuale pari al 4% in peso di cemento. Nonostante ciò, è importante evidenziare che il suo utilizzo è da valutare caso per caso. Infatti, nel caso di strutture immerse e più soggette a degrado in caso di fessurazione, può essere conveniente utilizzare gli additivi cristallini in quanto porterebbe ad un aumento della vita utile e ad una diminuzione delle manutenzioni

ritenute necessarie, con conseguente riduzione dei costi totali che vanno a compensare il maggior costo iniziale.

## 5.2. Future linee di studio

Noto l'obiettivo di questa ricerca e i risultati ottenuti, risulta interessante comprendere quali parametri o condizioni possono essere cambiati al fine di caratterizzare meglio il problema legato al *self-healing*.

Nel presente studio i campioni sono stati prefessurati in età giovane, in particolare all'età di due giorni, e ciò ha permesso di ottenere una elevata percentuale di particelle di cemento reattive, favorendo il più possibile i processi di idratazione che hanno portato alla richiusura delle fessure. Potrebbe risultare molto interessante studiare campioni prefessurati in età più avanzata così da permettere la reazione tardiva delle sole particelle di additivo cristallino, durante il periodo di cura. Ciò permetterebbe di osservare con maggiore chiarezza l'effettiva influenza di tale prodotto e comprendere se una percentuale così elevata, pari al 4% in peso di cemento, possa migliorare o meno la capacità di autoguarigione del calcestruzzo. Inoltre, potrebbe risultare utile studiare altre condizioni di cura ai quali sottoporre i campioni in calcestruzzo, come ad esempio l'immersione in acqua marina, o variare le condizioni poste alla base dei cicli bagnato/asciutto come la temperatura e l'umidità relativa dell'aria alla quale sono esposti. In particolare studiare la cinetica della reazione potrebbe risultare particolarmente interessante, eseguendo prove intermedie ad intervalli stabiliti durante il periodo di cura, per osservare se la presenza dell'additivo cristallino consente di accelerare la reazione.

Per quanto riguarda la metodologia di misurazione della fessura, sarebbe interessante studiare l'andamento interno al campione e poterne misurare l'ampiezza a distanze stabilite, al fine di individuare una relazione più affidabile tra l'apertura della fessura e il flusso di acqua che la attraversa. Inoltre, conoscendo lo stato della fessura interna, sarebbe possibile osservare e valutare la natura dei prodotti che si formeranno in seguito al periodo di cura. Tale valutazione potrebbe essere effettuata mediante l'utilizzo di tecniche non distruttive come ad esempio la radiografia neutronica, utilizzata per osservare il grado di assorbimento e la profondità di penetrazione dell'acqua in un mezzo poroso come il calcestruzzo.



---

## Bibliografia

- [1] A. Neville, "Consideration of durability of concrete structures: Past, present, and future," *Mater. Struct.*, vol. 34, no. March, pp. 114–118, 2001.
- [2] A. Neville, "Properties of Concrete, Fourth and Final Edition Standards," 1996.
- [3] K. Van Breugel, "Is there a market for self-healing cement-based materials," ... *self-healing Mater. Noordwijk aan Zee, ...*, no. April, pp. 1–9, 2007.
- [4] E. Schlangen and S. Sangadji, "Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms - Recent advances in self healing concrete and asphalt," *Procedia Eng.*, vol. 54, pp. 39–57, Jan. 2013.
- [5] H. Mihashi and T. Nishiwaki, "Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art Report," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 10, no. 5, pp. 170–184, 2012.
- [6] M. De Rooij, K. Van Tittelboom, N. De Belie, and E. Schlangen, *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State of the Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement*. 2013.
- [7] Carola Katharina Edvardsen, "Wasserdurchlässigkeit und Selbstheilung von Trennrissen in Beton (Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete)," University of Technology, Aachen, 1996.
- [8] W. Ramm and M. Biscop, "Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 179, no. 2, pp. 191–200, 1998.
- [9] N. Ter Heide, "Crack healing in hydrating concrete," *Delft Univ. Technol. Delft*, 2005.
- [10] C. Edvardsen, "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 96, pp. 448–454, 1999.
- [11] K. Van Tittelboom, E. Gruyaert, H. Rahier, and N. De Belie, "Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 349–359, Dec. 2012.
- [12] H.-W. Reinhardt and M. Jooss, "Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 7, pp. 981–985, Jul. 2003.
- [13] S. Granger and A. Loukili, "Mechanical characterization of the self-healing effect of cracks in Ultra High Performance Concrete (UHPC)," *Proc. Third ...*, 2005.

- [14] M. Şahmaran, S. B. Keskin, G. Ozerkan, and I. O. Yaman, "Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 10, pp. 872–879, 2008.
- [15] D. Homma, H. Mihashi, and T. Nishiwaki, "Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 217–228, 2009.
- [16] Y. Yang, E.-H. Yang, and V. C. Li, "Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 2, pp. 176–183, Feb. 2011.
- [17] E. Herbert and V. Li, "Self-Healing of Microcracks in Engineered Cementitious Composites (ECC) Under a Natural Environment," *Materials (Basel)*, vol. 6, no. 7, pp. 2831–2845, Jul. 2013.
- [18] S. C. Pattanaik, "Self-Sealing Crystalline Coating and Self-Cleaning Nanocoating for the Concrete Substrate for a Sustainable Development," 2011.
- [19] E. Takagi, M. Lima, and P. Helene, "Contribution to study of the self-healing effect activated by crystalline catalysts in concrete structures when subjected to continuous exposure to water," *concretophd.com.br*, 1998.
- [20] L. Ferrara and V. Krelani, "A fracture testing based approach to assess the self healing capacity of cementitious composites," *framcos.org*.
- [21] L. Ferrara, V. Krelani, and M. Carsana, "A 'fracture testing' based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 535–551, Oct. 2014.
- [22] V. Rossetti, A. Ferraro, and G. Ranzo, "Utilizzo di additivi espansivi per fronteggiare i fenomeni di fessurazione da ritiro termico - Use of expansive admixtures to minimize thermal shrinkage cracking."
- [23] D. Jaroenratanapirom and R. Sahamitmongkol, "Self-crack closing ability of mortar with different additives," *J Met Mater Min.*, vol. 21, no. 1, pp. 9–17, 2011.
- [24] K. Sisomphon and O. Copuroglu, "Self healing mortars by using different cementitious materials," ... *RILEM Conf. ...*, no. 2007, 2011.
- [25] K. Sisomphon, O. Copuroglu, and E. a. B. Koenders, "Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 566–574, Apr. 2012.
- [26] K. Sisomphon, O. Copuroglu, and E. a. B. Koenders, "Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 42, pp. 217–224, May 2013.

- 
- [27] T.-H. Ahn and T. Kishi, "Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 171–186, 2010.
- [28] I. C. London, "Self-sealing cracks with superabsorbent polymer," *imperial.ac.uk*. [Online]. Available: <http://www3.imperial.ac.uk/concretedurability/researchprojects/determiningwatercementratio>. [Accessed: 01-Dec-2014].
- [29] J. S. Kim and E. Schlangen, "Self-healing in ECC stimulated by SAP under flexural cyclic load," in *Proceedings of 3rd International Conference on Self Healing Materials, Bath, UK*, 2011, pp. 27–29.
- [30] D. Snoeck, K. Van Tittelboom, S. Steuperaert, P. Dubruel, and N. De Belie, "Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 25, no. 1, pp. 13–24, Mar. 2012.
- [31] K. Van Tittelboom and N. De Belie, *Self-Healing in Cementitious Materials—A Review*, vol. 6, no. 6. 2013, pp. 2182–2217.
- [32] C. Dry, "Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 2000, pp. 1969–1977, 2000.
- [33] H. Huang and G. Ye, "Application of sodium silicate solution as self-healing agent in cementitious materials," in *International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering*, 2011, pp. 530 – 536.
- [34] K. Van Tittelboom, N. De Belie, W. De Muynck, and W. Verstraete, "Use of bacteria to repair cracks in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 157–166, Jan. 2010.
- [35] H. M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, and E. Schlangen, "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete," *Ecol. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 230–235, Feb. 2010.
- [36] H. M. Jonkers, "Bacteria-based self-healing concrete," *Heron*, vol. 56, pp. 5–16, 2011.
- [37] J. Wang, K. Van Tittelboom, N. De Belie, and W. Verstraete, "Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 532–540, Jan. 2012.
- [38] J. Dick, W. De Windt, B. De Graef, H. Saveyn, P. Van der Meeren, N. De Belie, and W. Verstraete, "Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species," *Biodegradation*, vol. 17, no. 4, pp. 357–367, 2006.
- [39] J. Wang and K. Van Tittelboom, "Potential of applying bacteria to heal cracks in concrete," *Proc. ...*, 2010.
-

- [40] C. Dry and W. McMillan, "Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete," *Smart Mater. Struct.*, vol. 5, no. 3, pp. 297–300, Jun. 1996.
- [41] R. Lark, C. Joseph, B. Isaacs, D. Gardner, and a. D. Jefferson, "Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials," *Mag. Concr. Res.*, vol. 62, no. 11, pp. 831–843, Nov. 2010.
- [42] T. Nishiwaki, H. Mihashi, B.-K. Jang, and K. Miura, "Development of Self-Healing System for Concrete with Selective Heating around Crack," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 267–275, 2006.
- [43] S. Sangadji and E. Schlangen, "Porous network concrete: a new approach to make concrete structures self-healing using prefabricated porous layer," vol. 1, no. June, pp. 27–29, 2011.
- [44] S. Sangadji and E. Schlangen, "Mimicking Bone Healing Process to Self Repair Concrete Structure Novel Approach Using Porous Network Concrete," *Procedia Eng.*, vol. 54, pp. 315–326, 2013.
- [45] M. Roig Flores, "Caracterizaciòn del efecto de un aditivo cristalino en la capacidad de autosanaciòn de un hormigòn. Aplicaciòn pràctica en dos intervenciones en el auditorio de Cartagena.," Universitat Politècnica de València, 2013.
- [46] S. R. Moscato, "Self-healing capacity of fibre reinforced cementitious composites improved by using of crystalline admixture. Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.," Politecnico di Milano, 2013.

---

## Appendice A – PROVE STANDARD

### A.1. Prova di abbassamento al cono di Abrams

Per l'esecuzione della prova sono state seguite le indicazioni fornite dalla norma UNI EN 12350-2 "Prova sul calcestruzzo fresco – Parte 2: Prova di abbassamento al cono". Lo scopo di tale prova è quello di determinare la consistenza del calcestruzzo fresco mediante la misurazione dell'abbassamento al cono.

Lo stampo utilizzato è di metallo e ha una forma di tronco di cono cavo, caratterizzato dalle seguenti dimensioni:

- Spessore 2 mm;
- Diametro della base inferiore:  $200\pm 2$  mm;
- Diametro della base superiore:  $100\pm 2$  mm;
- Altezza:  $300\pm 2$  mm

Una volta inumidito lo stampo e la piastra di base, viene posizionato il cono sulla superficie di base posta orizzontalmente. Durante l'introduzione del conglomerato, lo stampo di metallo viene mantenuto fermo contro la piastra di base utilizzando le maniglie presenti nella parte superiore del cono o appoggiando i piedi sulle staffe della base inferiore (figura A.1a). Lo stampo viene riempito in tre strati successivi pari a circa un terzo della sua altezza. Ogni strato viene opportunamente costipato mediante l'uso della barra di acciaio eseguendo 25 colpi distribuiti in maniera uniforme (figura A.1b). Una volta riempito lo stampo ed eliminato il calcestruzzo in eccesso con l'uso della barra, utilizzando le maniglie viene sollevato verticalmente con un movimento regolare e in un tempo compreso tra 5 s e 10 s (figura A.1c). Subito dopo averlo rimosso, il cono viene capovolto e appoggiato alla piastra di base e, con l'ausilio della barra, viene misurata la distanza tra il punto più alto del calcestruzzo e la barra stessa (figura A.1d).



Figura A-1: Prova di abbassamento al cono: inserimento del conglomerato nello stampo (a), costipazione del calcestruzzo mediante la barra di acciaio (b), sollevamento del cono in un tempo compreso tra 5 s e 10 s (c), misurazione della distanza tra il punto più alto del calcestruzzo e la barra (d).

La classe di consistenza, in funzione del valore di abbassamento al cono, viene definita dalla norma UNI EN 206-1 “Calcestruzzo – Parte 1: Specificazioni, prestazione, produzione e conformità”. In figura A.2 viene riportata la tabella, dove vengono riportati intervalli di abbassamento al cono a cui corrisponde una classe specifica di consistenza e nella quale è stato evidenziato il valore considerato nel presente studio.

Classe	Abbassamento al cono
S1	da 10 a 40
S2	da 50 a 90
S3	da 100 a 150
S4	da 160 a 210
S5 <sup>1)</sup>	≥220

Figura A-2: Classi di abbassamento al cono (slump). UNI EN 206-1:2006

La figura A.3 mostra un grafico nel quale vengono riportati i valori di abbassamento al cono relativi ad ogni impasto realizzato.

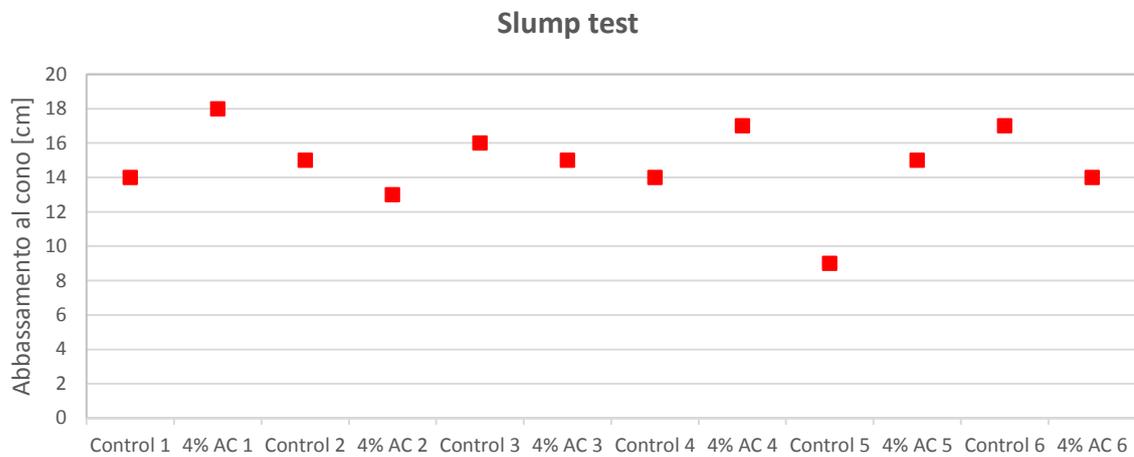


Figura A-3: Abbassamento al cono, slump test.

Impasto	Data miscelazione	Abbassamento al cono
[-]	[-]	[cm]
Control 1	27/05/2014	14
4% AC 1	03/06/2014	18
Control 2	16/06/2014	15
4% AC 2	23/06/2014	13
Control 3	21/07/2014	16
4% AC 3	28/07/2014	15
Control 4	20/10/2014	14
4% AC 4	20/10/2014	17
Control 5	29/10/2014	9
4% AC 5	03/11/2014	15
Control 6	30/12/2014	17
4% AC 6	03/11/2014	14

Tabella A-1: Abbassamento al cono relativo ad ogni impasto realizzato.

## A.2. Resistenza alla compressione dei campioni

Per la determinazione della resistenza a compressione dei campioni, sono stati selezionati tre campioni per ogni impasto realizzato e immagazzinati in camera umida per una durata di 28 giorni. I provini sono stati confezionati e stagionati secondo quanto prescritto dalla norma UNI EN 12309-2 “Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 2: Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza”.

Una volta posto il conglomerato nelle apposite casseforme cilindriche, i campioni vengono lasciati su un piano liscio e orizzontale in un ambiente con temperatura di  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Dopo la rimozione delle casseforme, vengono immagazzinati in una camera umida con temperatura pari a  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e un valore di umidità relativa compresa tra il  $95\div 100\%$ .

Lo svolgimento della prova e la valutazione della resistenza a compressione è stata eseguita secondo le indicazioni fornite dalla norma UNI EN 12390-3 “Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini”. I campioni vengono puliti e, in seguito, rimosse le eventuali fibre che fuoriescono dalla superficie superiore. Con l’obiettivo di ottenere una superficie planare ed evitare di compromettere la prova, è stato necessario utilizzare una miscela di zolfo per formare uno strato di spessore inferiore a 5 mm (figura A.4). La miscela è stata scaldata a una temperatura di  $150^{\circ}\text{C}$  e, terminata la completa fusione dei componenti solidi, si è proceduto alla cappatura.



Figura A-4: Cappatura della superficie superiore del campione utilizzando una miscela di zolfo.

Le fasi principali del processo vengono riportate di seguito:

1. Viene posizionato il campione con la superficie da cappare rivolta verso il basso;
2. Viene posto del disarmante sul piatto di supporto così da facilitare il distacco del campione al termine della prova ed evitare la rottura del materiale posto;

3. Viene versata la miscela liquida sul piatto di supporto;
4. Viene posto lentamente il campione sopra il piatto di supporto;
5. Con l'ausilio di un martello in gomma, viene eseguita la battitura della superficie libera del campione così da permettere la fuoriuscita di eventuali bolle d'aria formatesi al momento del posizionamento;
6. Si attende circa 30 secondi per consentire l'indurimento della miscela e, in seguito, si procede alla battitura del piatto di supporto con il martello in gomma, così da permettere il distacco del campione;
7. Il campione viene sollevato e posizionato su un piano orizzontale. In seguito si procede a verificare l'uniformità della nuova superficie.

Al termine della procedura di cappatura, è necessario aspettare circa un'ora per permettere la completa solidificazione della miscela. Al termine dell'attesa, il campione viene posizionato centralmente sul piatto inferiore della pressa e si avvita il piatto superiore fino ad ottenere la completa aderenza tra le due superfici (figura A.5a). In seguito, si avvia la macchina e, di conseguenza, la pressa idraulica impostando una velocità del carico costante tra i  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s e aspettando il raggiungimento del carico massimo che porta alla rottura del campione (figura A.5b).

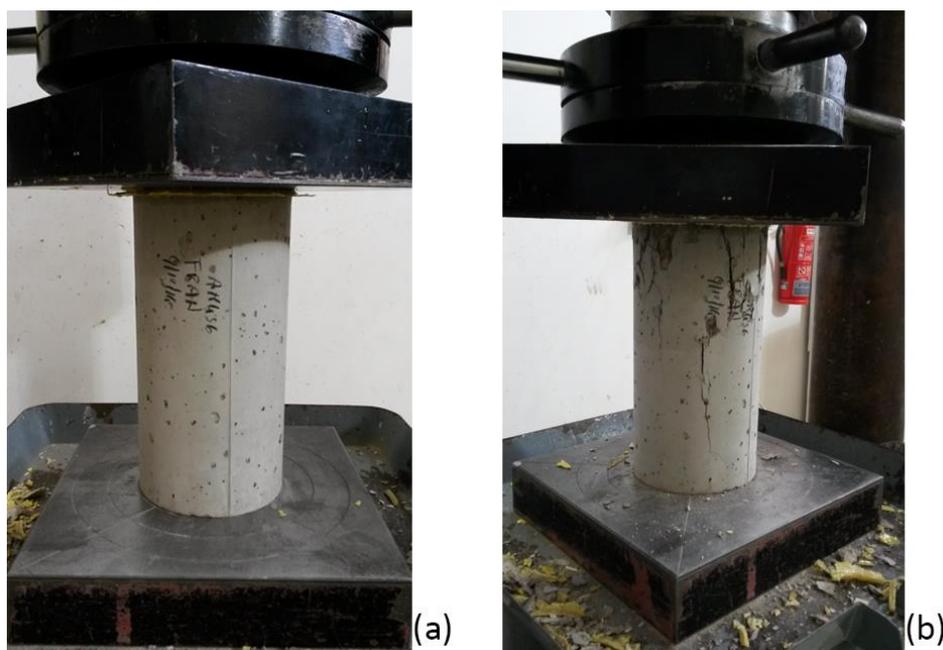


Figura A-5: Posizionamento del campione tra i piatti della pressa, in posizione centrale (a), rottura del campione al raggiungimento del carico massimo (b).

Al termine della prova, si ottiene il valore in kN e viene convertito in MPa attraverso la seguente formula:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

dove:

- $f_c$  è la resistenza a compressione, espressa in MPa [ $N/mm^2$ ];
- $F$  è il carico massimo a rottura, espresso in N;
- $A_c$  è l'area della sezione trasversale del provino sulla quale agisce lo sforzo di compressione [ $mm^2$ ].

Al termine delle prove relative a tutti gli impasti, è stata sempre ottenuta il tipo di rottura evidenziato in figura A.6 nella quale vengono riportate le rotture ritenute soddisfacenti dalla norma sopra citata. Questa tipologia di rottura si verifica nella maggior parte dei casi per la presenza delle fibre, le quali ripartiscono il carico in tutto il volume del campione.

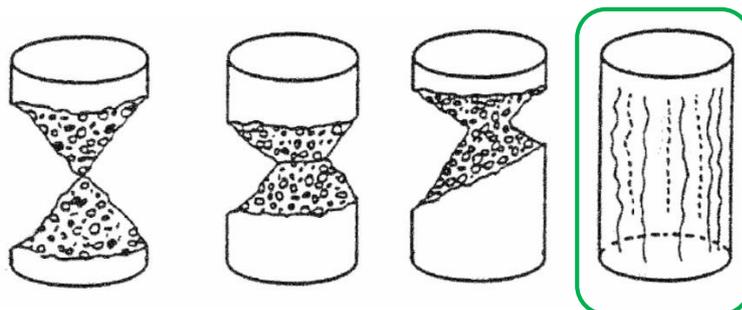


Figura A-6: Tipi di rotture ritenute soddisfacenti dalla norma UNI EN 12390-3.

In figura A.7 vengono riportati i valori di resistenza a compressione di ogni tipologia di impasto studiato.



Figura A-7: Resistenza a compressione a 28 giorni degli impasti studiati. I campioni di controllo sono rappresentati in rosso, mentre in blu quelli con additivo cristallino con un contenuto del 4% in peso di cemento.

Appendice B – TABELLA DEI DATI COMPLETI

B.1. Tabella dati

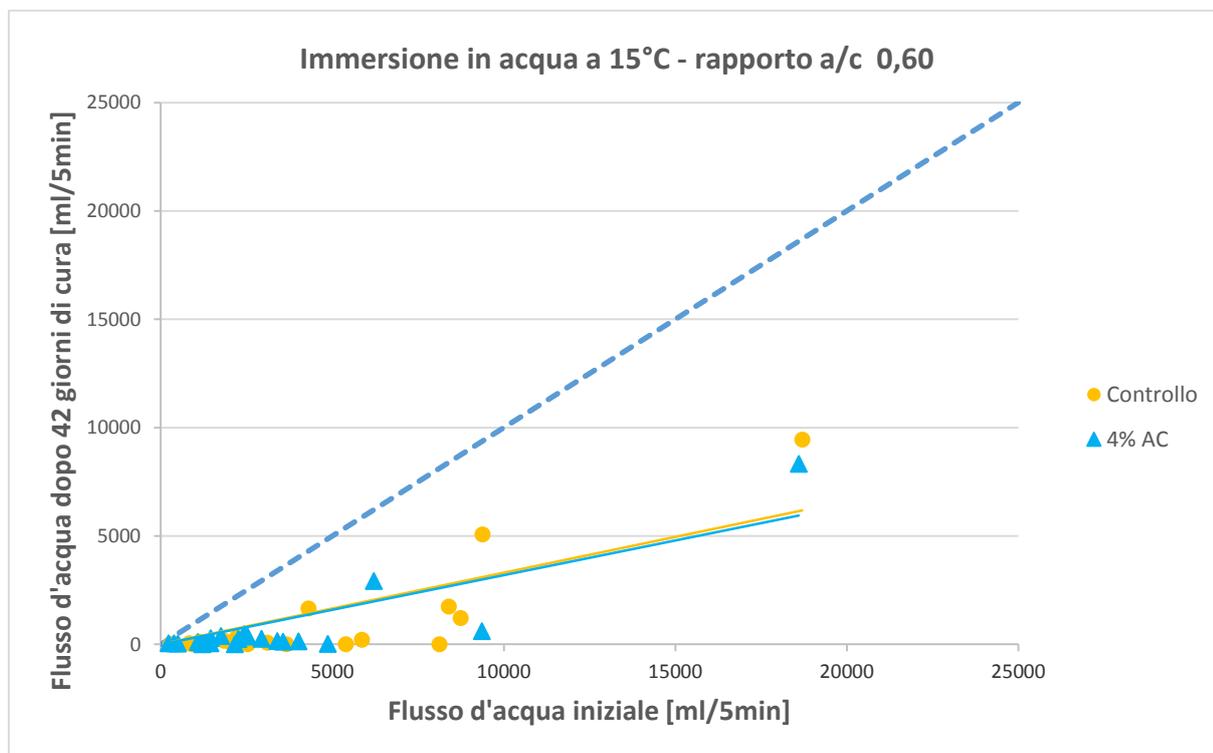
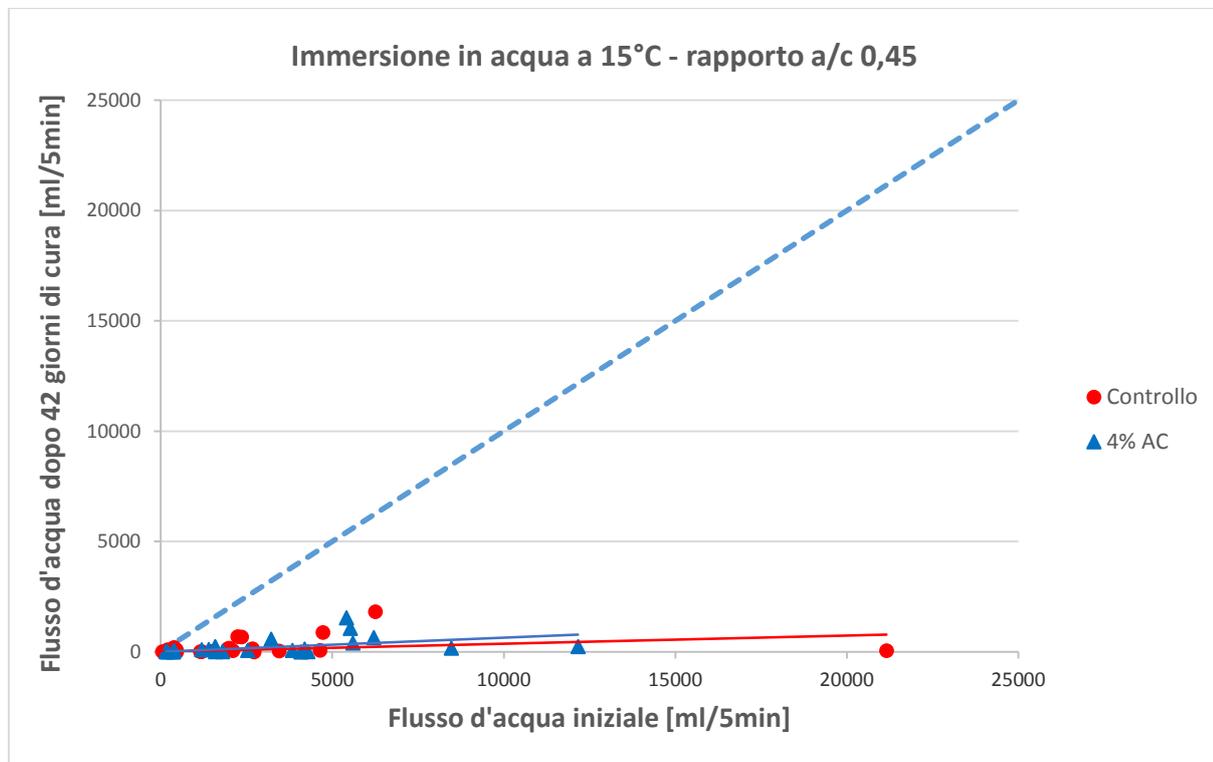
Impasto	Rapporto a/c	Condizioni di cura	Campioni	Iniziale		Finale - 42 giorni		Ratio flusso	Healing Rate flusso	Ratio apertura media fessura	Healing Rate ampiezza media fessura
				Flusso d'acqua [ml/5min]	Ampiezza media fessura [mm]	Flusso d'acqua [ml/5min]	Ampiezza media fessura [mm]				
Controllo - AM 1	0,45	Immersione in acqua T = 15°C	1a	196	0,097	97	0,009	0,49	0,51	0,09	0,91
			1b	450	0,121	98	0,015	0,22	0,78	0,12	0,88
			2a	4725	0,347	880	0,030	0,19	0,81	0,09	0,91
			2b	2240	0,425	698	0,042	0,31	0,69	0,10	0,90
			3a	381	0,106	199	0,006	0,52	0,48	0,05	0,95
			3b	237	0,106	20	0,004	0,08	0,92	0,03	0,97
			4a	3450	0,207	38	0,029	0,01	0,99	0,14	0,86
			4b	1945	0,228	138	0,013	0,07	0,93	0,06	0,94
			5a	4640	0,246	71	0,010	0,02	0,98	0,04	0,96
			5b	6250	0,324	1818	0,047	0,29	0,71	0,14	0,86
			6a	44	0,078	13	0,002	0,30	0,70	0,02	0,98
			6b	2715	0,264	0	0,019	0,00	1,00	0,07	0,93
			7a	1187	0,259	11	0,021	0,01	0,99	0,08	0,92
			7b	1510	0,336	33	0,032	0,02	0,98	0,09	0,91
Additivo cristallino 4% - AM 451	0,45	Immersione in acqua T = 15°C	1a	5410	0,239	1552	0,028	0,29	0,71	0,12	0,88
			1b	3835	0,165	76	0,002	0,02	0,98	0,01	0,99
			2a	2525	0,116	76	0,004	0,03	0,97	0,04	0,96
			2b	3210	0,165	579	0,011	0,18	0,82	0,07	0,93
			3a	197	0,099	3	0,003	0,01	0,99	0,03	0,97
			3b	359	0,101	1	0,001	0,00	1,00	0,01	0,99
			4a	5520	0,302	1070	0,034	0,19	0,81	0,11	0,89
			4b	1620	0,171	85	0,002	0,05	0,95	0,01	0,99
			5a	1795	0,168	15	0,003	0,01	0,99	0,02	0,98
			5b	4090	0,207	0	0,014	0,00	1,00	0,07	0,93
			6a	4185	0,205	126	0,008	0,03	0,97	0,04	0,96
			6b	12165	0,309	242	0,033	0,02	0,98	0,11	0,89
			7a	8470	0,302	166	0,013	0,02	0,98	0,08	0,96
			7b	5600	0,244	402	0,019	0,07	0,93	0,04	0,92
Controllo - AM 2	0,6	Immersione in acqua T = 15°C	1a	8735	0,325	1211	0,043	0,14	0,86	0,13	0,87
			1b	920	0,143	0	0,002	0,00	1,00	0,01	0,99
			2a	5860	0,346	214	0,014	0,04	0,96	0,04	0,96
			2b	2395	0,297	140	0,007	0,06	0,94	0,02	0,98
			3a	2085	0,183	10	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00
			3b	276	0,169	5	0,000	0,02	0,98	0,04	1,00
			4a	827	0,164	53	0,007	0,06	0,94	0,00	0,96
			4b	2210	0,239	322	0,010	0,15	0,85	0,04	0,96
			5a	8120	0,301	7	0,020	0,00	1,00	0,07	0,93
			5b	2525	0,180	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00
			6a	3655	0,203	3	0,012	0,00	1,00	0,06	0,94
			6b	9375	0,382	5076	0,056	0,54	0,46	0,15	0,85
			7a	18695	0,384	9452	0,131	0,51	0,49	0,34	0,66
			7b	8395	0,299	1743	0,038	0,21	0,79	0,13	0,87

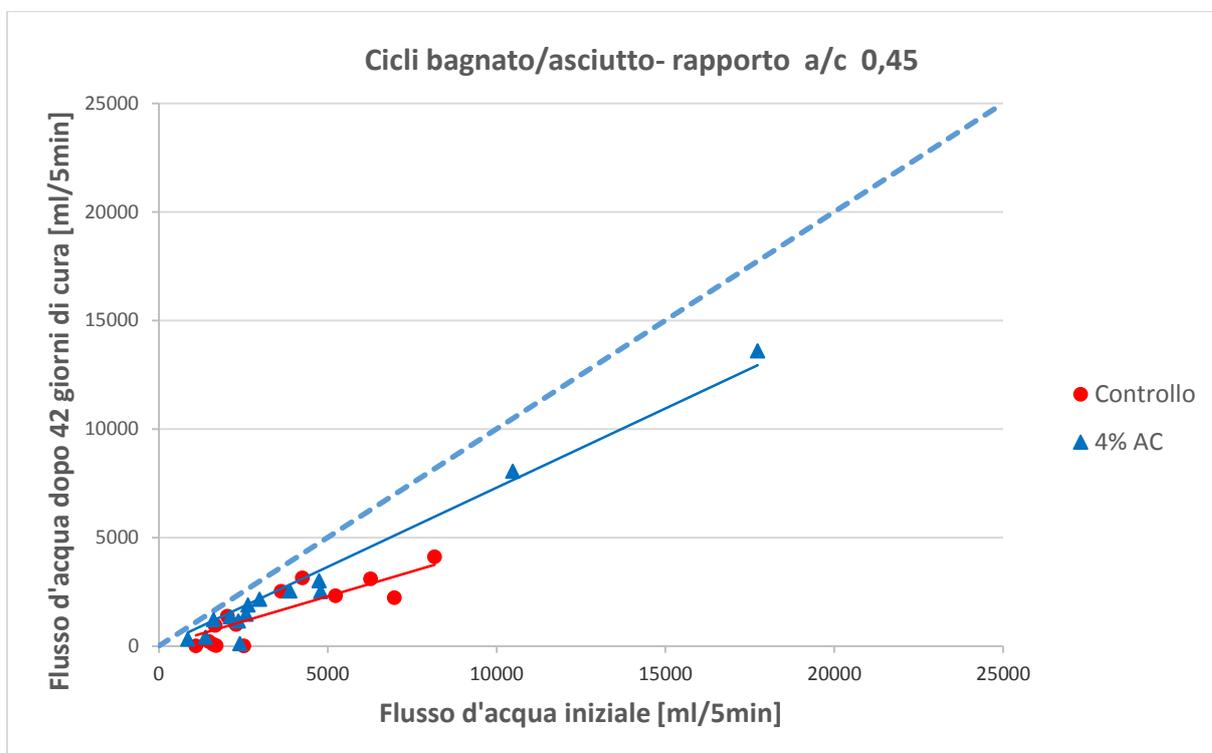
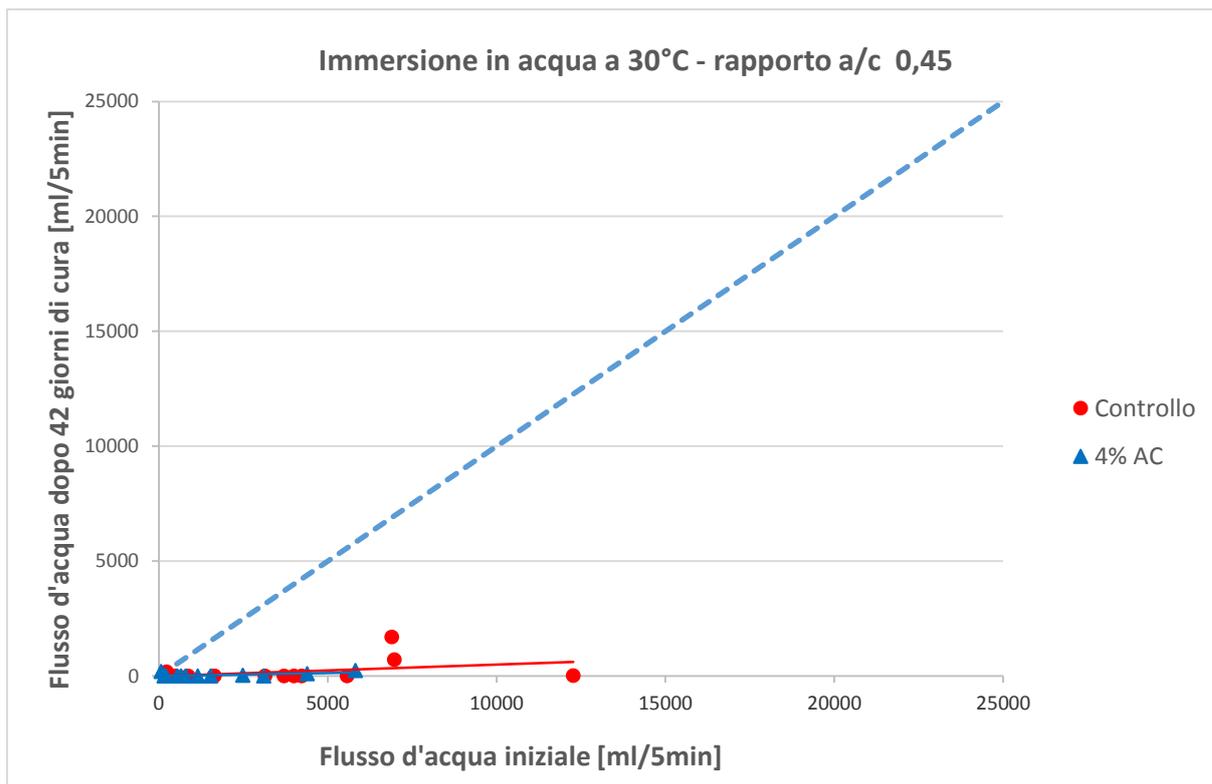
Impasto	Rapporto a/c	Condizioni di cura	Campioni	Iniziale		Finale - 42 giorni		Ratio flusso	Healing Rate flusso	Ratio apertura media fessura	Healing Rate ampiezza media fessura
				Flusso d'acqua [ml/5min]	Ampiezza media fessura [mm]	Flusso d'acqua [ml/5min]	Ampiezza media fessura [mm]				
Additivo cristallino 4% - AM 4S	0,6	Immersione in acqua T = 15°C	1a	4015	0,336	137	0,041	0,03	0,97	0,12	0,88
			1b	1438	0,112	52	0,003	0,04	0,96	0,03	0,97
			2a	1452	0,211	292	0,016	0,20	0,80	0,08	0,92
			2b	4860	0,251	21	0,014	0,00	1,00	0,05	0,95
			3a	18595	0,506	8326	0,260	0,45	0,55	0,51	0,49
			3b	6205	0,340	2921	0,062	0,47	0,53	0,18	0,82
	0,45	Immersione in acqua T = 15°C	1a	381	0,163	44	0,012	0,12	0,88	0,07	0,93
			1b	3560	0,411	120	0,033	0,03	0,97	0,08	0,92
			2a	223	0,121	53	0,002	0,24	0,76	0,01	0,99
			2b	2260	0,288	242	0,018	0,11	0,89	0,06	0,94
			3a	2530	0,177	366	0,012	0,14	0,86	0,07	0,93
			3b	1285	0,135	61	0,003	0,05	0,95	0,02	0,98
Controllo - AM 3	0,6	Immersione in acqua T = 15°C	4a	9355	0,333	611	0,014	0,07	0,93	0,04	0,96
			4b	2930	0,214	261	0,030	0,09	0,91	0,14	0,86
			1a	1146	0,130	19	0,001	0,02	0,98	0,00	1,00
			1b	2355	0,223	674	0,012	0,29	0,71	0,05	0,95
			2a	21155	0,336	52	0,015	0,00	1,00	0,04	0,96
			2b	2100	0,213	58	0,031	0,03	0,97	0,14	0,86
	0,45	Immersione in acqua T = 15°C	3a	1990	0,164	8	0,002	0,08	0,92	0,01	0,99
			3b	215	0,109	8	0,000	0,04	0,96	0,00	1,00
			4a	460	0,096	5	0,000	0,01	0,99	0,00	1,00
			4b	2670	0,230	137	0,004	0,05	0,95	0,02	0,98
			1a	1191	0,185	99	0,006	0,08	0,92	0,03	0,97
			1b	143	0,114	14	0,005	0,10	0,90	0,04	0,96
Additivo cristallino 4% - AM 4S3	0,45	Immersione in acqua T = 15°C	2a	1390	0,161	119	0,006	0,09	0,91	0,04	0,96
			2b	1580	0,186	248	0,012	0,16	0,84	0,07	0,93
			3a	1595	0,158	8	0,017	0,01	0,99	0,11	0,89
			3b	4285	0,204	11	0,025	0,00	1,00	0,12	0,88
			4a	6205	0,218	654	0,025	0,11	0,89	0,11	0,89
			4b	377	0,148	66	0,023	0,18	0,82	0,16	0,84
	0,6	Immersione in acqua T = 15°C	1a	3105	0,150	77	0,010	0,02	0,98	0,07	0,93
			1b	1320	0,162	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00
			2a	4300	0,316	1649	0,028	0,38	0,62	0,09	0,91
			2b	1120	0,166	117	0,002	0,10	0,90	0,01	0,99
			3a	1302	0,125	25	0,006	0,02	0,98	0,05	0,95
			3b	1840	0,180	167	0,000	0,09	0,91	0,00	1,00
Controllo - AM 4	0,6	Immersione in acqua T = 15°C	4a	371	0,134	27	0,002	0,07	0,93	0,02	0,98
			4b	5390	0,240	8	0,014	0,00	1,00	0,06	0,94
			1a	498	0,119	32	0,000	0,06	0,94	0,00	1,00
			1b	1200	0,231	32	0,006	0,03	0,97	0,02	0,98
			2a	1211	0,135	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00
			2b	1073	0,126	113	0,004	0,11	0,89	0,03	0,97
	0,45	Immersione in acqua T = 15°C	3a	2150	0,167	4	0,004	0,00	1,00	0,02	0,98
			3b	3395	0,190	154	0,000	0,05	0,95	0,00	1,00
			4a	2425	0,251	473	0,010	0,20	0,80	0,04	0,96
			4b	1750	0,209	382	0,012	0,22	0,78	0,06	0,94

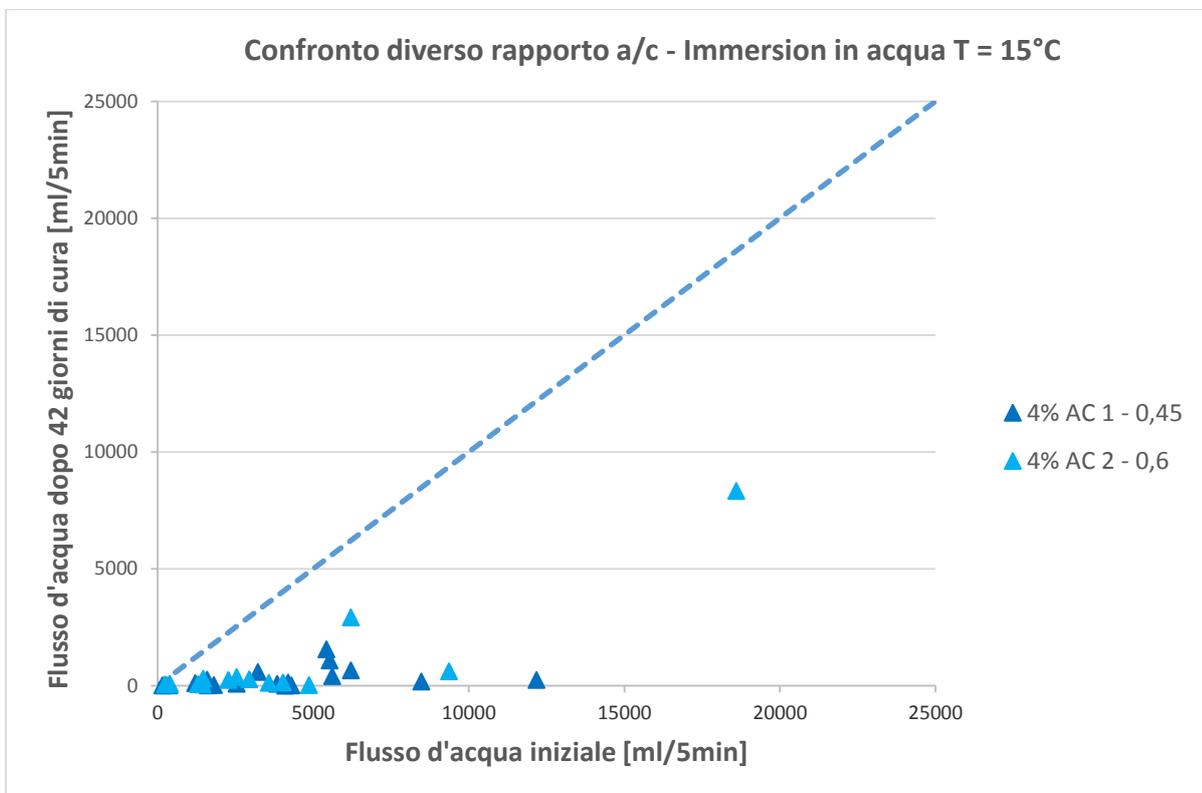
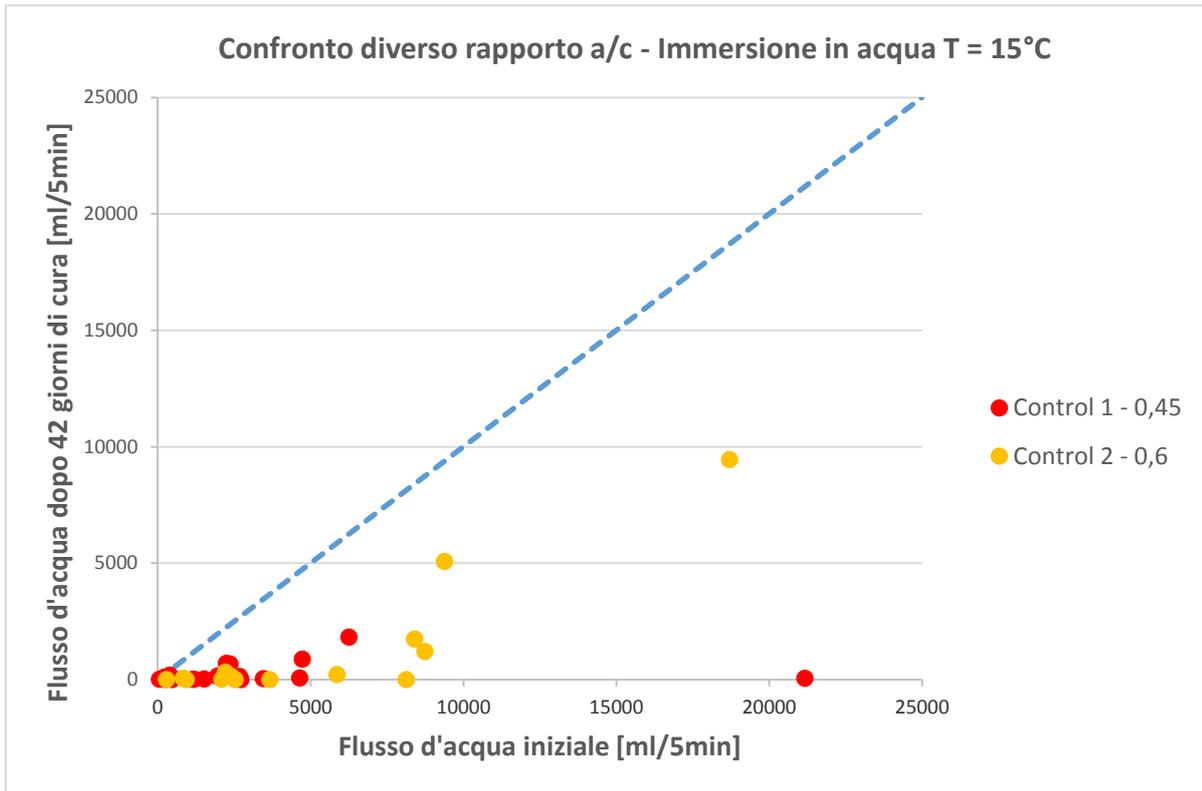
Impasto	Rapporto a/c	Condizioni di cura	Campioni	Iniziale		Finale - 42 giorni		Ratio flusso	Healing Rate flusso	Ratio apertura media fessura	Healing Rate ampiezza media fessura	
				Flusso d'acqua [ml/Sm/ia]	Ampiezza media fessura [mm]	Flusso d'acqua [ml/Sm/ia]	Ampiezza media fessura [mm]					
Controllo - AM 5	0,45	Immersione in acqua T = 30°C	1a 1b 2a 2b 3a 3b 4a 4b 5a 5b 6a 6b 7a 7b	6975	0,229	709	0,052	0,10	0,90	0,23	0,77	
				3710	0,224	2	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	
				3150	0,195	3	0,005	0,02	1,00	0,02	0,98	0,98
				6900	0,317	1700	0,006	0,25	0,75	0,02	0,98	0,98
				1640	0,168	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00
				489	0,207	4	0,000	0,01	0,99	0,00	1,00	1,00
				5580	0,249	3	0,010	0,04	0,96	0,04	0,96	0,96
				12270	0,303	19	0,012	0,04	1,00	0,04	0,96	0,96
				234	0,112	190	0,010	0,81	0,19	0,09	0,91	0,91
				1645	0,178	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00
				4230	0,211	0	0,009	0,00	1,00	0,04	0,96	0,96
				872	0,197	6	0,001	0,01	0,99	0,01	0,99	0,99
				222	0,099	25	0,009	0,11	0,89	0,09	0,91	0,91
				4005	0,194	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00
790	0,160	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
2490	0,195	38	0,005	0,02	0,98	0,03	0,97	0,97				
163	0,085	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
69	0,077	195	0,000	2,83	-1,83	0,00	1,00	1,00				
4390	0,226	108	0,011	0,02	0,98	0,05	0,95	0,95				
1540	0,260	2	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
168	0,094	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
1153	0,148	3	0,005	0,00	1,00	0,03	0,97	0,97				
216	0,111	4	0,000	0,02	0,98	0,00	1,00	1,00				
164	0,110	0	0,004	0,00	1,00	0,03	0,97	0,97				
3110	0,170	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
5825	0,333	239	0,038	0,04	0,96	0,11	0,89	0,89				
543	0,145	8	0,000	0,01	0,99	0,00	1,00	1,00				
656	0,152	7	0,001	0,01	0,99	0,00	1,00	1,00				
1481	0,126	226	0,004	0,15	0,85	0,03	0,97	0,97				
1100	0,145	20	0,008	0,02	0,98	0,05	0,95	0,95				
1699	0,160	33	0,006	0,02	0,98	0,04	0,96	0,96				
2286	0,170	996	0,024	0,44	0,56	0,14	0,86	0,86				
2518	0,141	7	0,014	0,00	1,00	0,10	0,90	0,90				
2029	0,269	1375	0,079	0,68	0,32	0,29	0,71	0,71				
6980	0,240	2228	0,074	0,32	0,68	0,31	0,69	0,69				
8165	0,210	4119	0,040	0,50	0,50	0,19	0,81	0,81				
6275	0,233	3108	0,041	0,50	0,50	0,18	0,82	0,82				
4255	0,276	3144	0,066	0,74	0,26	0,24	0,76	0,76				
3620	0,224	2531	0,072	0,70	0,30	0,32	0,68	0,68				
1669	0,200	953	0,042	0,57	0,43	0,21	0,79	0,79				
5235	0,224	2320	0,031	0,44	0,56	0,14	0,86	0,86				
1614	0,160	95	0,013	0,06	0,94	0,08	0,92	0,92				
864	0,141	324	0,032	0,38	0,62	0,23	0,77	0,77				
2604	0,184	112	0,026	0,05	0,95	0,14	0,86	0,86				
2555	0,140	1163	0,058	0,27	0,73	0,27	0,73	0,73				
4790	0,191	2512	0,063	0,52	0,48	0,33	0,67	0,67				
10480	0,304	8053	0,109	0,77	0,23	0,34	0,66	0,66				
1619	0,259	1224	0,070	0,76	0,24	0,28	0,72	0,72				
4745	0,207	3016	0,050	0,64	0,36	0,24	0,76	0,76				
2646	0,310	1889	0,073	0,71	0,29	0,24	0,76	0,76				
1384	0,161	404	0,061	0,29	0,71	0,38	0,62	0,62				
2121	0,179	1351	0,043	0,64	0,36	0,24	0,76	0,76				
2583	0,187	1475	0,062	0,57	0,43	0,33	0,67	0,67				
17730	0,447	13606	0,264	0,77	0,23	0,59	0,41	0,41				
2986	0,208	2155	0,087	0,72	0,28	0,42	0,58	0,58				
3880	0,168	2538	0,051	0,65	0,35	0,30	0,70	0,70				
Additivo cristallino 4% - AM 455	0,45	Cicli bagnato/asciutto	1a 1b 2a 2b 3a 3b 4a 4b 5a 5b 6a 6b 7a 7b	6975	0,229	709	0,052	0,10	0,90	0,23	0,77	
				3710	0,224	2	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	
				3150	0,195	3	0,005	0,02	1,00	0,02	0,98	0,98
				6900	0,317	1700	0,006	0,25	0,75	0,02	0,98	0,98
				1640	0,168	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00
				489	0,207	4	0,000	0,01	0,99	0,00	1,00	1,00
				5580	0,249	3	0,010	0,04	0,96	0,04	0,96	0,96
				12270	0,303	19	0,012	0,04	1,00	0,04	0,96	0,96
				234	0,112	190	0,010	0,81	0,19	0,09	0,91	0,91
				1645	0,178	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00
				4230	0,211	0	0,009	0,00	1,00	0,04	0,96	0,96
				872	0,197	6	0,001	0,01	0,99	0,01	0,99	0,99
				222	0,099	25	0,009	0,11	0,89	0,09	0,91	0,91
				4005	0,194	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00
790	0,160	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
2490	0,195	38	0,005	0,02	0,98	0,03	0,97	0,97				
163	0,085	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
69	0,077	195	0,000	2,83	-1,83	0,00	1,00	1,00				
4390	0,226	108	0,011	0,02	0,98	0,05	0,95	0,95				
1540	0,260	2	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
168	0,094	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
1153	0,148	3	0,005	0,00	1,00	0,03	0,97	0,97				
216	0,111	4	0,000	0,02	0,98	0,00	1,00	1,00				
164	0,110	0	0,004	0,00	1,00	0,03	0,97	0,97				
3110	0,170	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00				
5825	0,333	239	0,038	0,04	0,96	0,11	0,89	0,89				
543	0,145	8	0,000	0,01	0,99	0,00	1,00	1,00				
656	0,152	7	0,001	0,01	0,99	0,00	1,00	1,00				
1481	0,126	226	0,004	0,15	0,85	0,03	0,97	0,97				
1100	0,145	20	0,008	0,02	0,98	0,05	0,95	0,95				
1699	0,160	33	0,006	0,02	0,98	0,04	0,96	0,96				
2286	0,170	996	0,024	0,44	0,56	0,14	0,86	0,86				
2518	0,141	7	0,014	0,00	1,00	0,10	0,90	0,90				
2029	0,269	1375	0,079	0,68	0,32	0,29	0,71	0,71				
6980	0,240	2228	0,074	0,32	0,68	0,31	0,69	0,69				
8165	0,210	4119	0,040	0,50	0,50	0,19	0,81	0,81				
6275	0,233	3108	0,041	0,50	0,50	0,18	0,82	0,82				
4255	0,276	3144	0,066	0,74	0,26	0,24	0,76	0,76				
3620	0,224	2531	0,072	0,70	0,30	0,32	0,68	0,68				
1669	0,200	953	0,042	0,57	0,43	0,21	0,79	0,79				
5235	0,224	2320	0,031	0,44	0,56	0,14	0,86	0,86				
1614	0,160	95	0,013	0,06	0,94	0,08	0,92	0,92				
864	0,141	324	0,032	0,38	0,62	0,23	0,77	0,77				
2604	0,184	112	0,026	0,05	0,95	0,14	0,86	0,86				
2555	0,140	1163	0,058	0,27	0,73	0,27	0,73	0,73				
4790	0,191	2512	0,063	0,52	0,48	0,33	0,67	0,67				
10480	0,304	8053	0,109	0,77	0,23	0,34	0,66	0,66				
1619	0,259	1224	0,070	0,76	0,24	0,28	0,72	0,72				
4745	0,207	3016	0,050	0,64	0,36	0,24	0,76	0,76				
2646	0,310	1889	0,073	0,71	0,29	0,24	0,76	0,76				
1384	0,161	404	0,061	0,29	0,71	0,38	0,62	0,62				
2121	0,179	1351	0,043	0,64	0,36	0,24	0,76	0,76				
2583	0,187	1475	0,062	0,57	0,43	0,33	0,67	0,67				
17730	0,447	13606	0,264	0,77	0,23	0,59	0,41	0,41				
2986	0,208	2155	0,087	0,72	0,28	0,42	0,58	0,58				
3880	0,168	2538	0,051	0,65	0,35	0,30	0,70	0,70				
Additivo cristallino 4% - AM 456	0,45	Cicli bagnato/asciutto	1a 1b 2a 2b 3a 3b 4a 4b 5a 5b 6a 6b 7a 7b	6975	0,229	709	0,052	0,10	0,90	0,23	0,77	
				3710	0,224	2	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	
				3150	0,195	3	0,005	0,02	1,00	0,02	0,98	0,98
				6900	0,317	1700	0,006	0,25	0,75	0,02	0,98	0,98
				1640	0,168	0	0,000	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00
				489	0,207	4	0,000	0,01	0,99	0,00	1,00	1,00
				5580	0,249	3	0,010	0,04	0,96	0,04	0,96	0,96
				12270	0,303	19	0,012	0,04	1,00	0,04	0,96	0,96
				234	0,112	190	0,010	0,81	0,19	0,09	0,91	0,91
				1645								

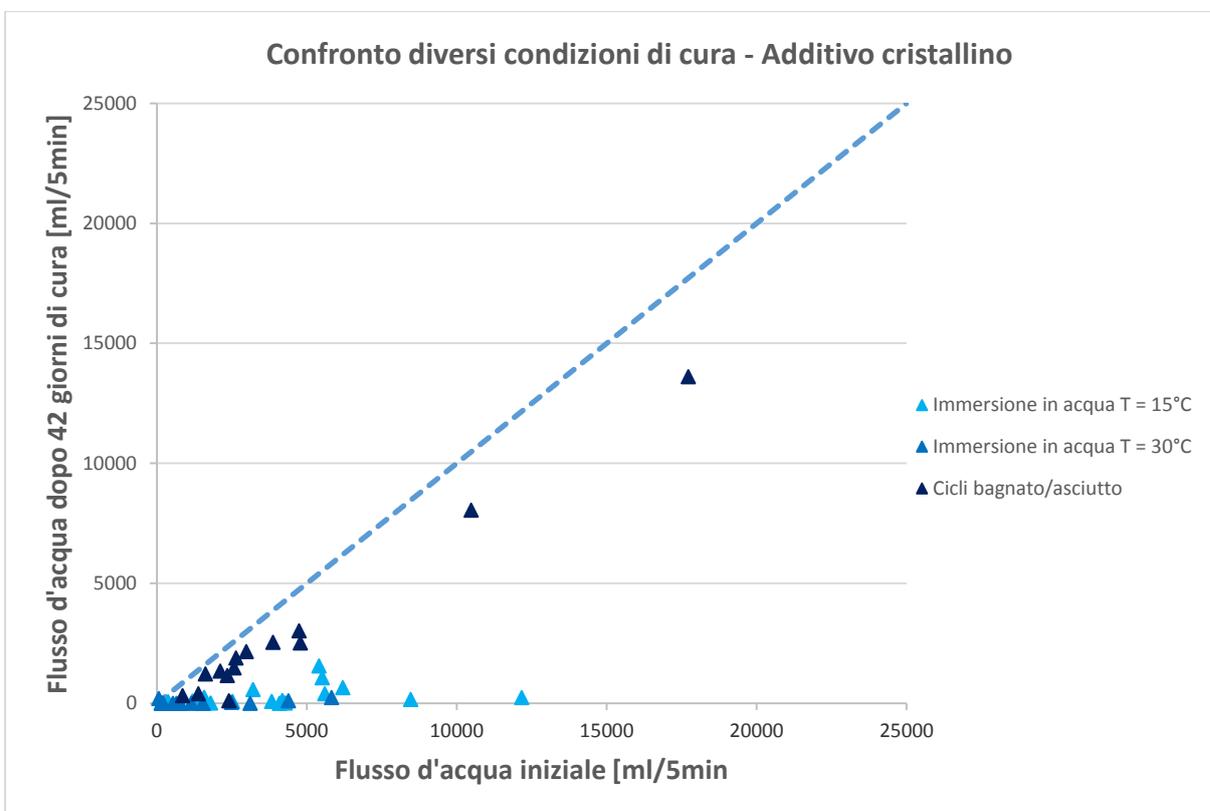
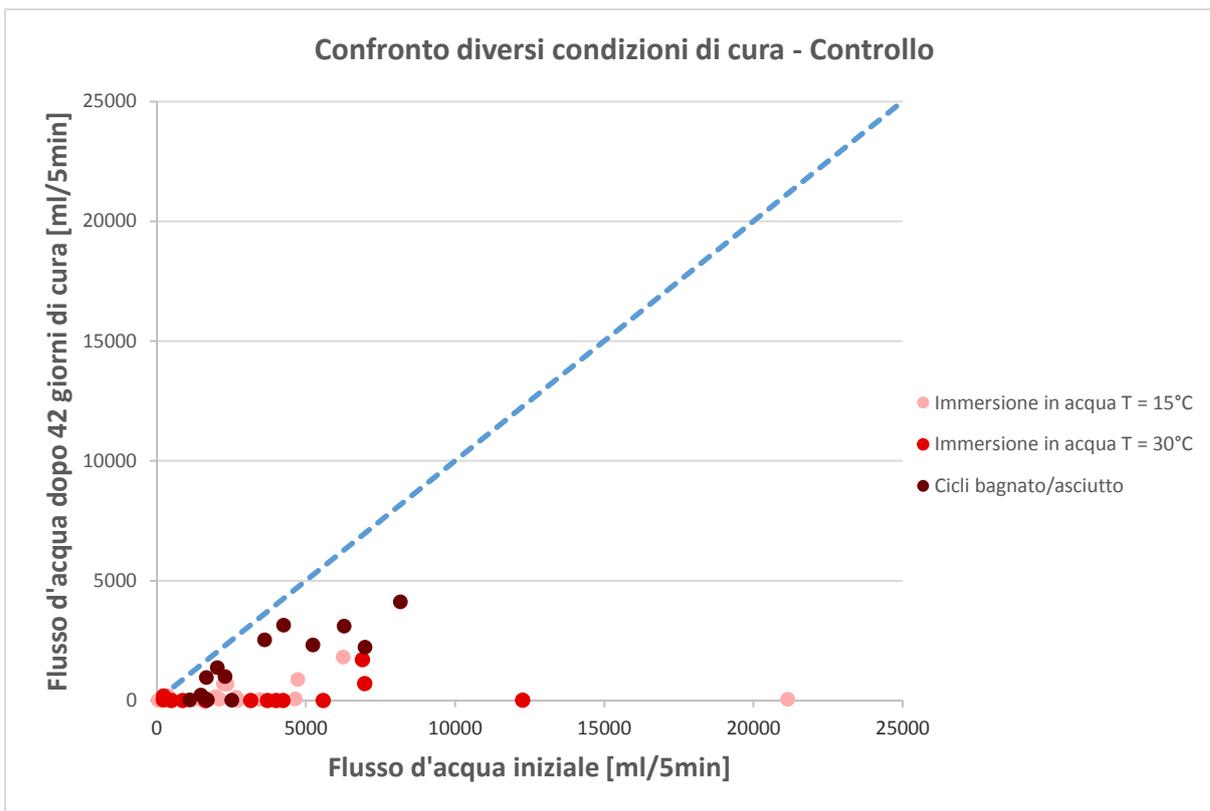
## Appendice C – GRAFICI COMPLETI

### C.1. Andamento generale del flusso per ogni rapporto a/c e ambiente di cura

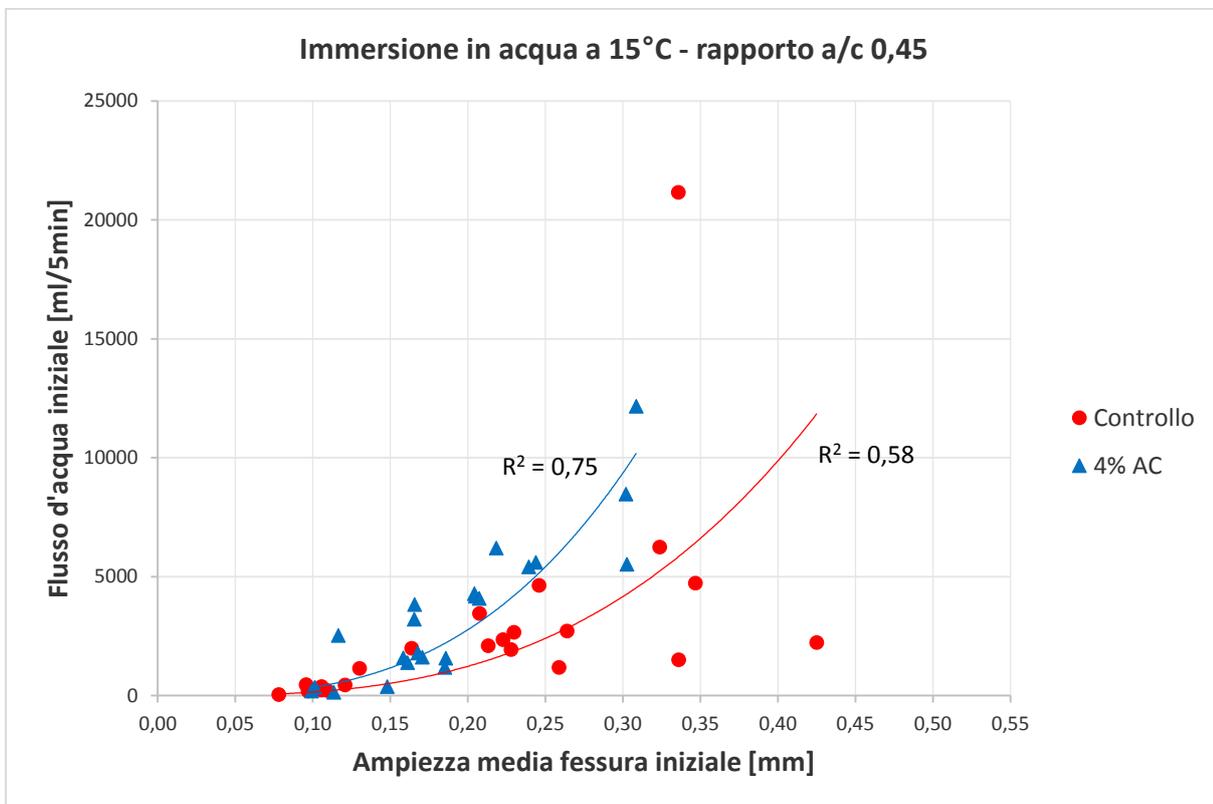
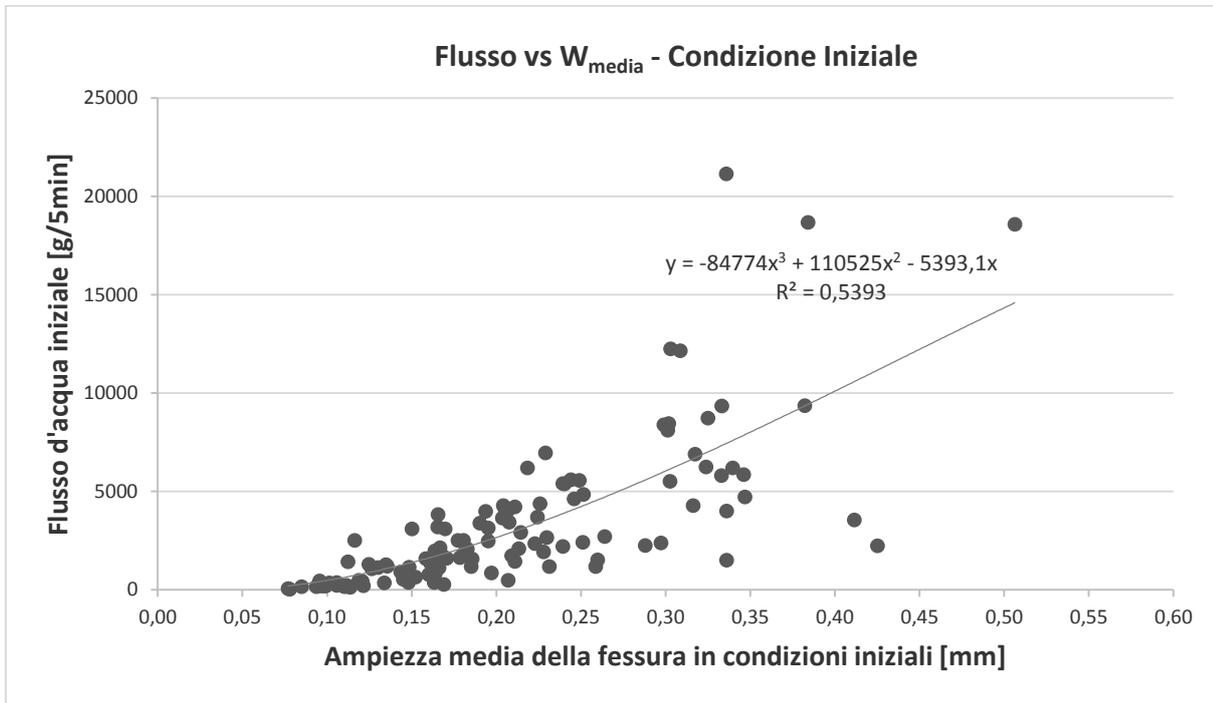


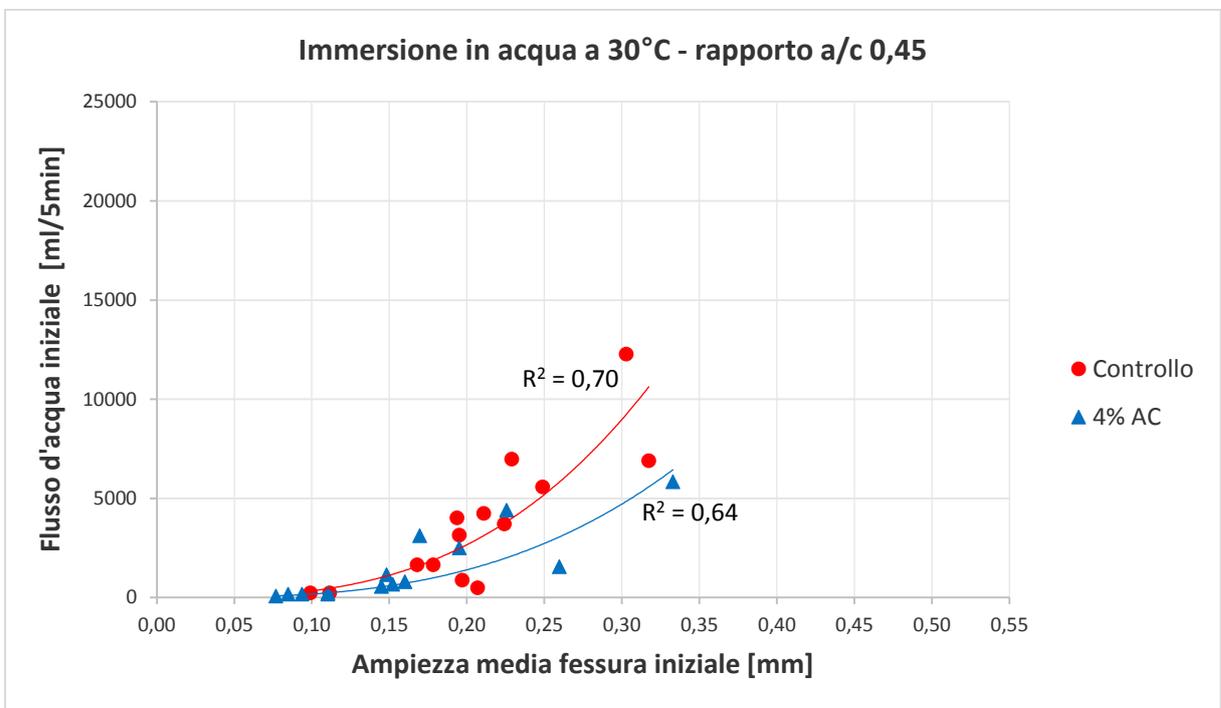
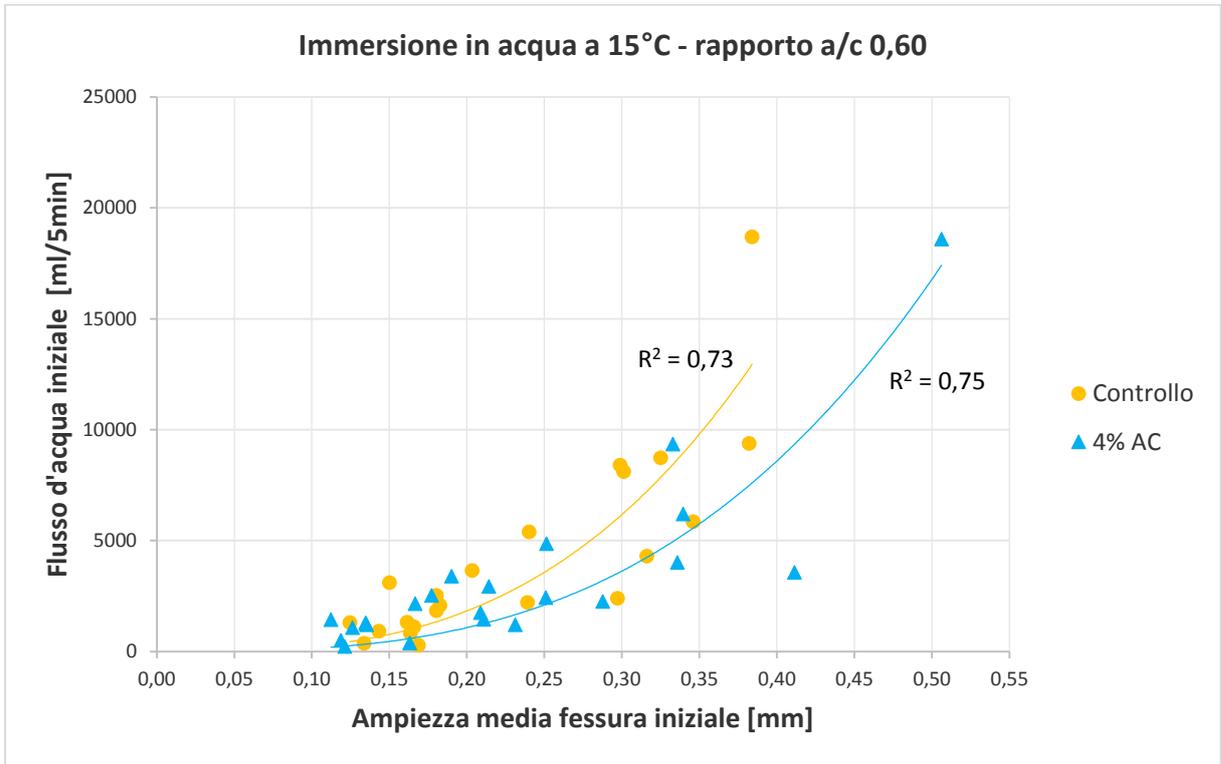


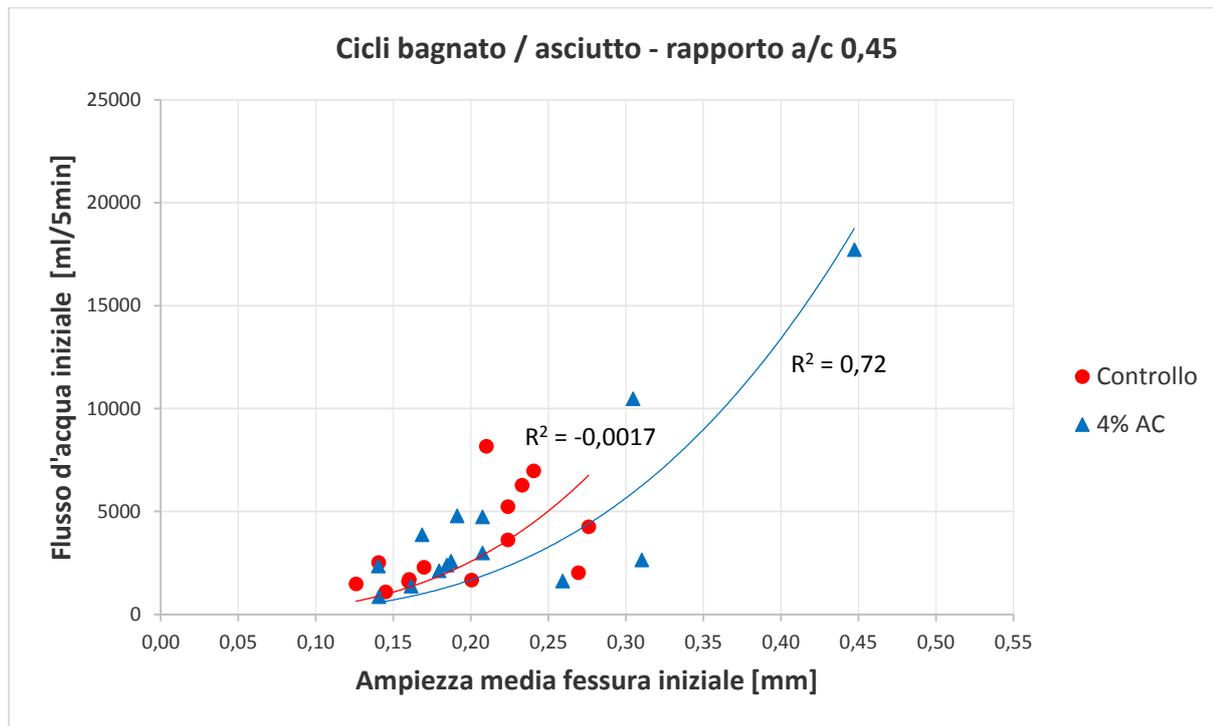




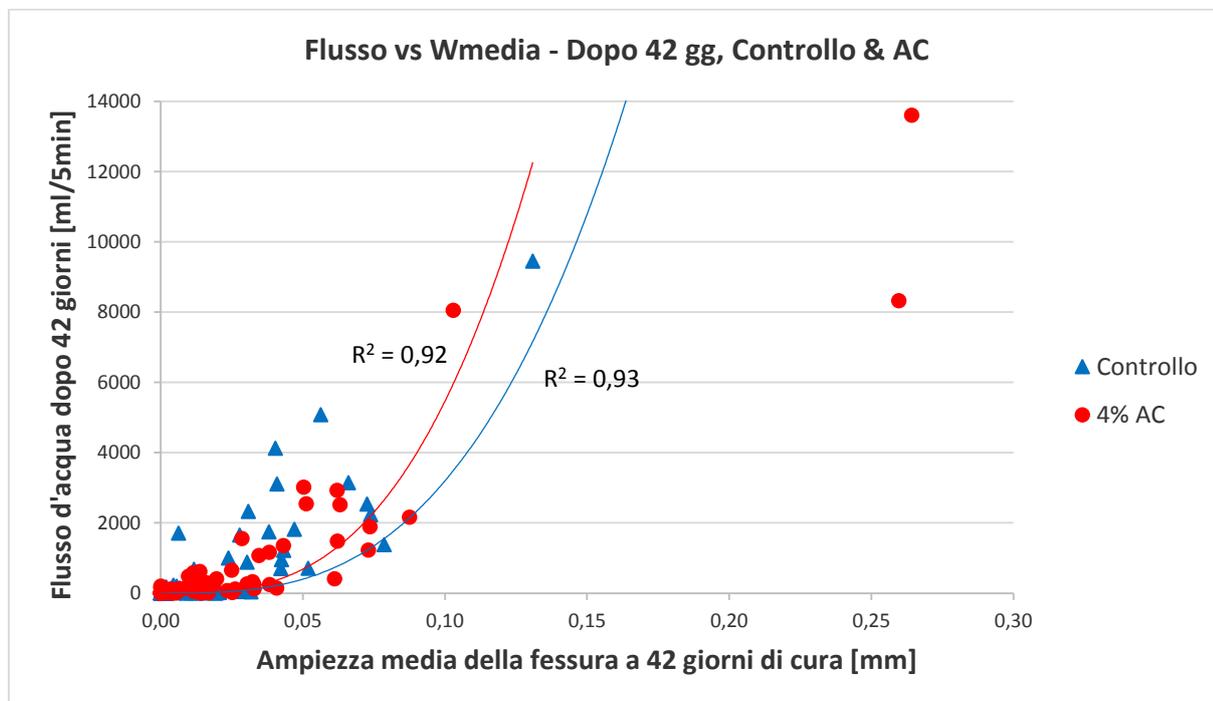
C.2. Relazione tra flusso d'acqua e ampiezza media della fessura, in condizioni iniziali

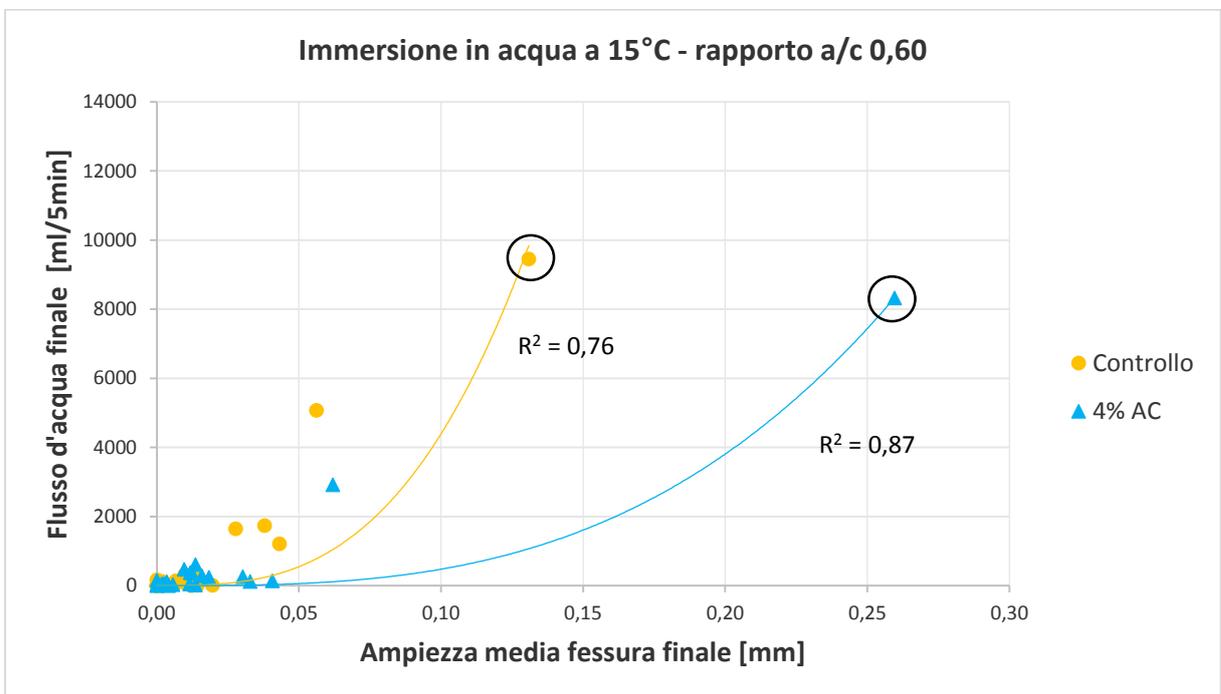
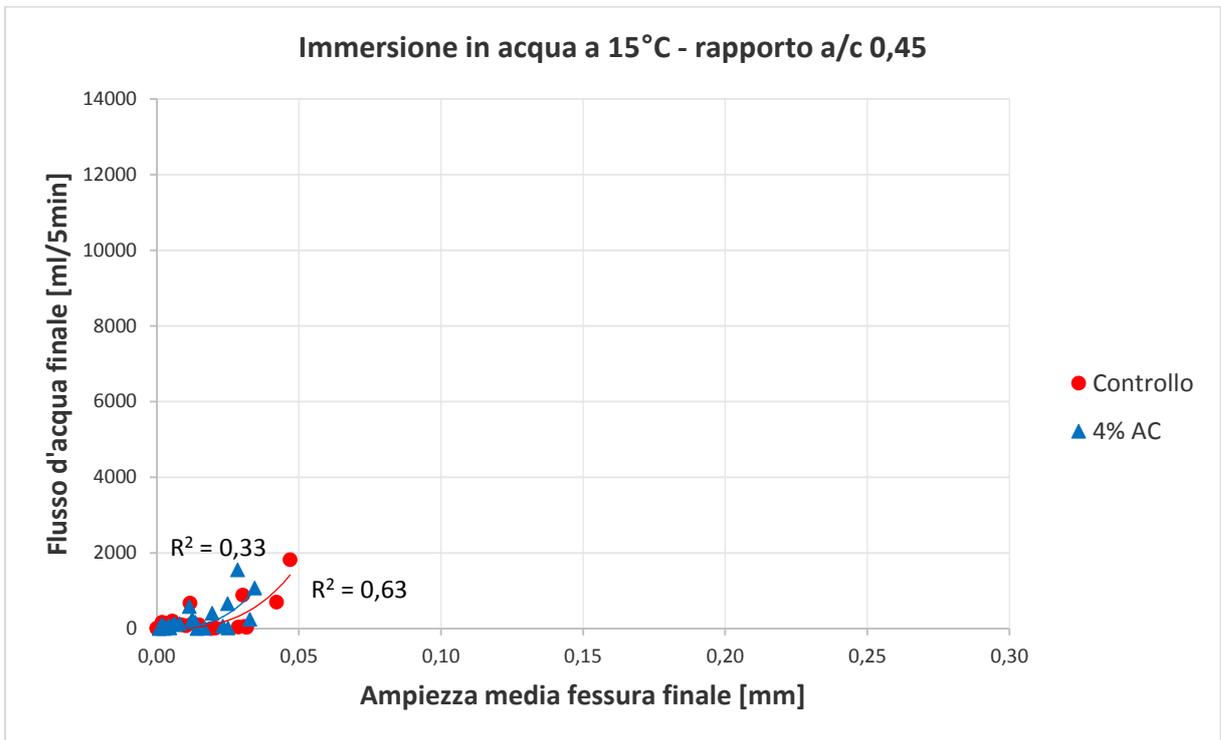


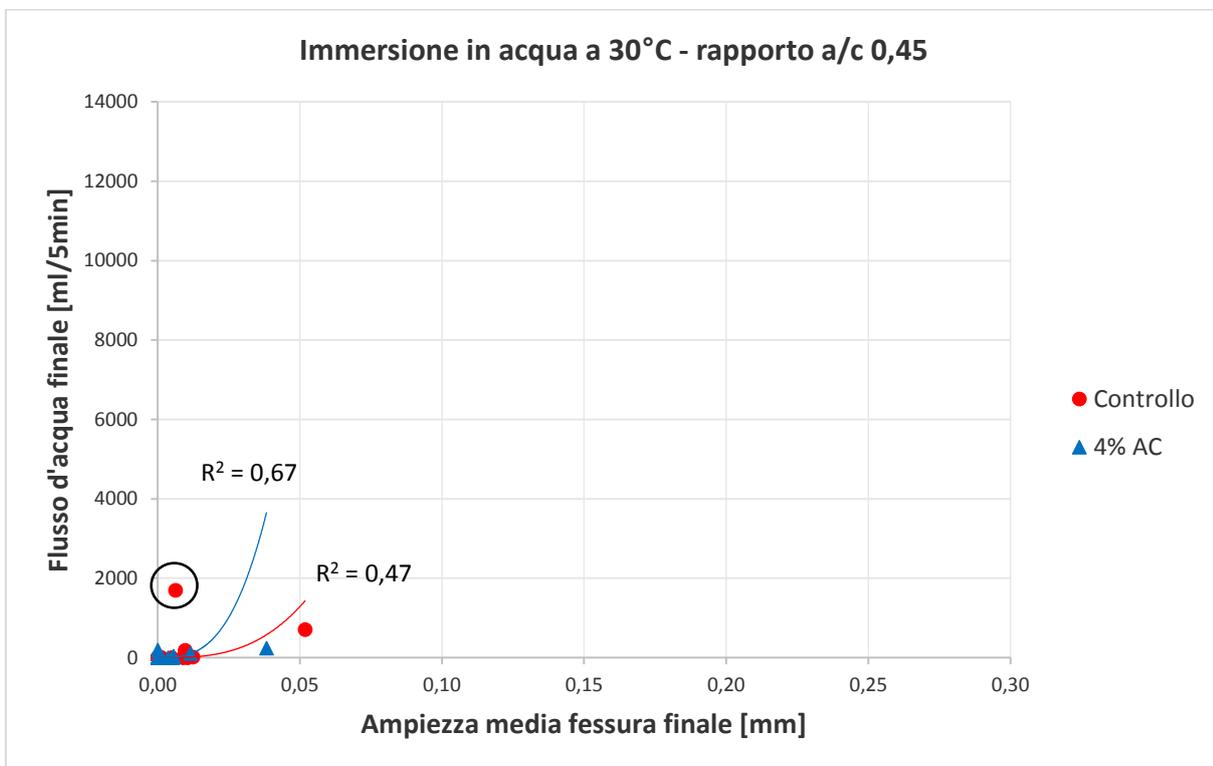
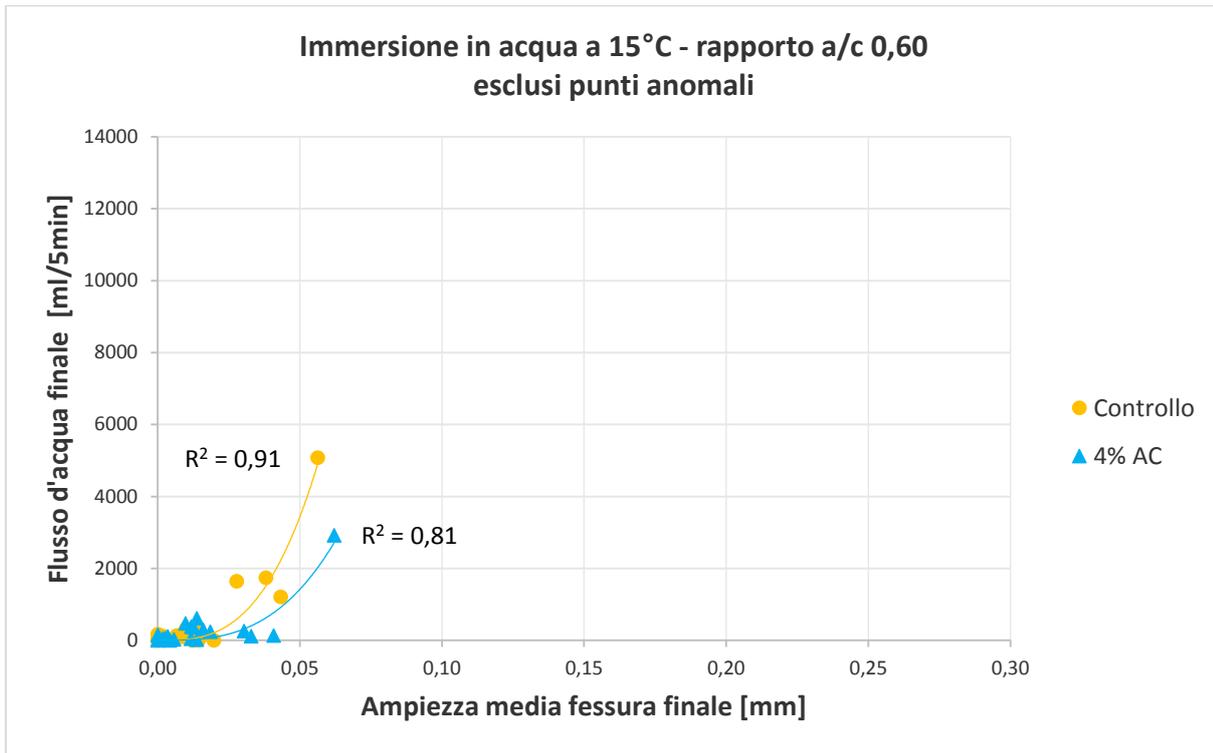


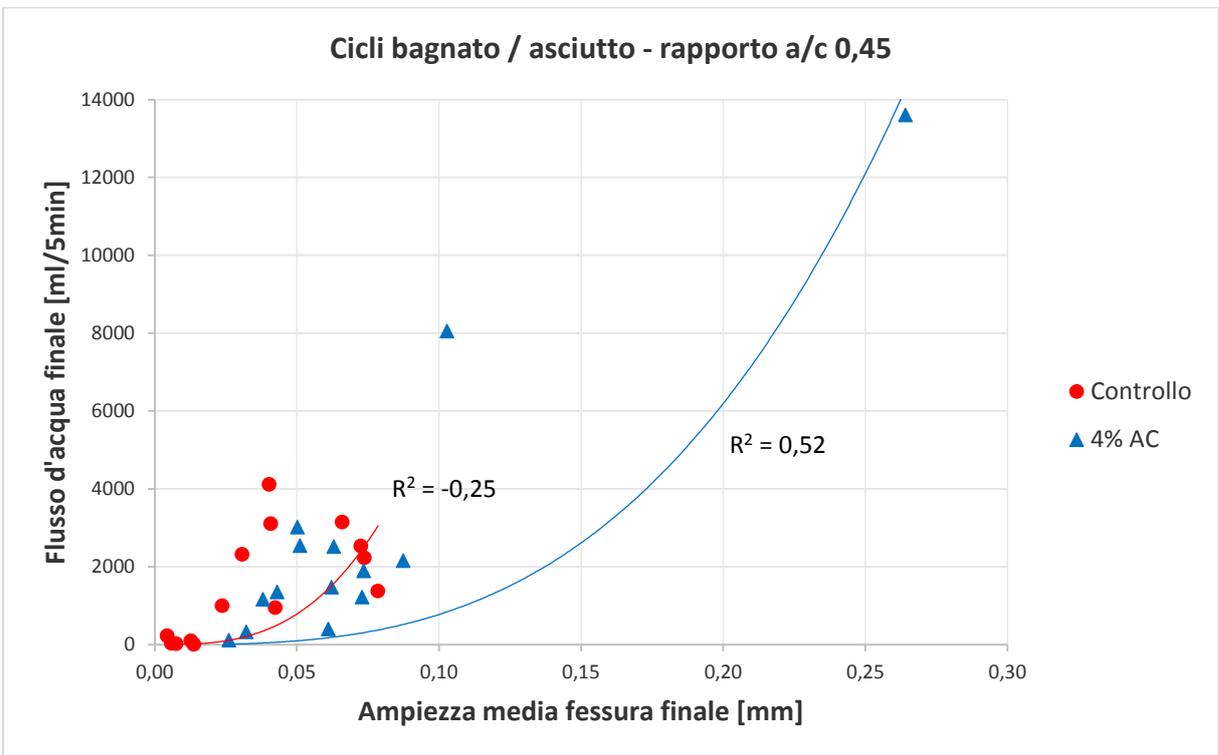
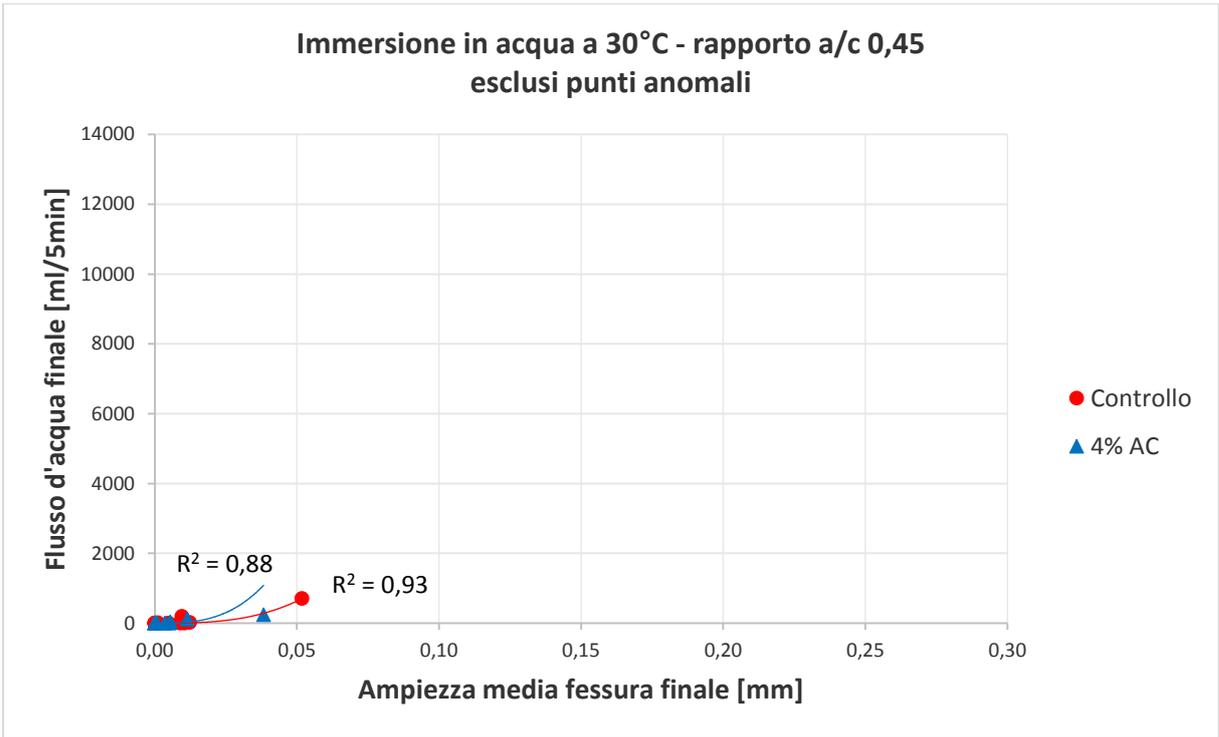


C.3. Relazione tra flusso d'acqua e ampiezza media della fessura, in condizioni finali

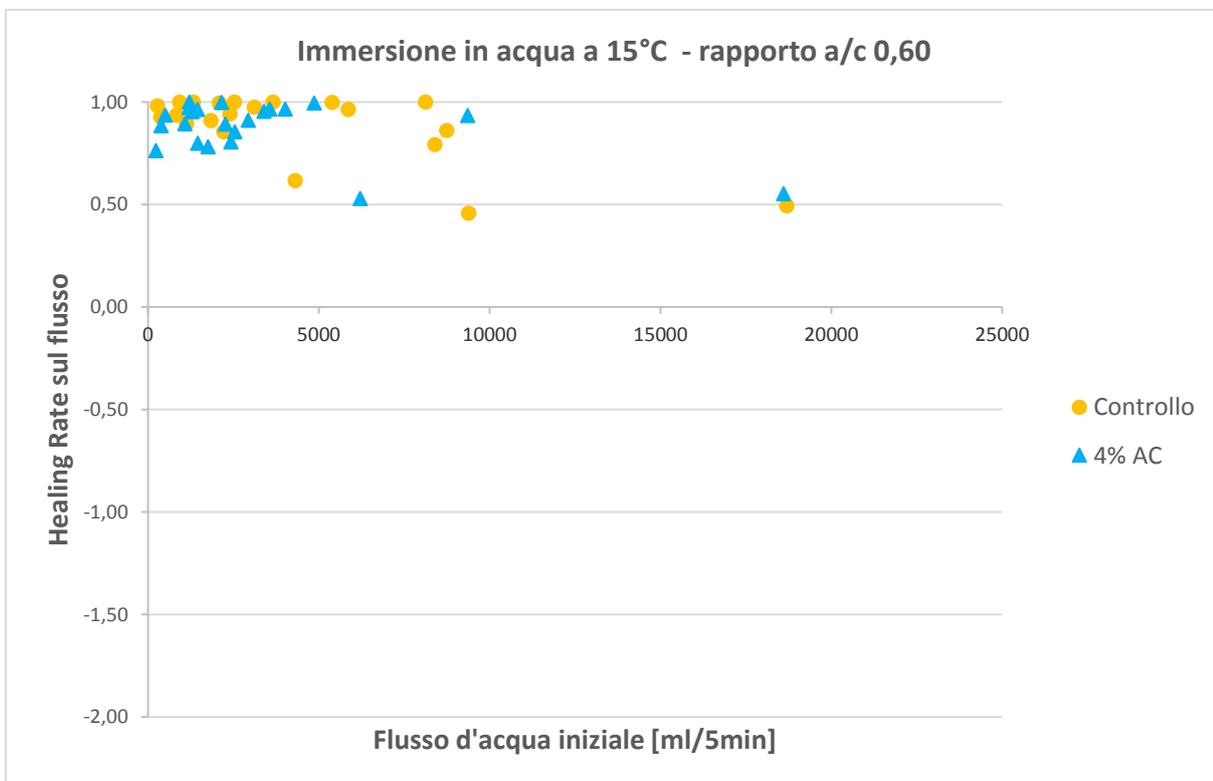
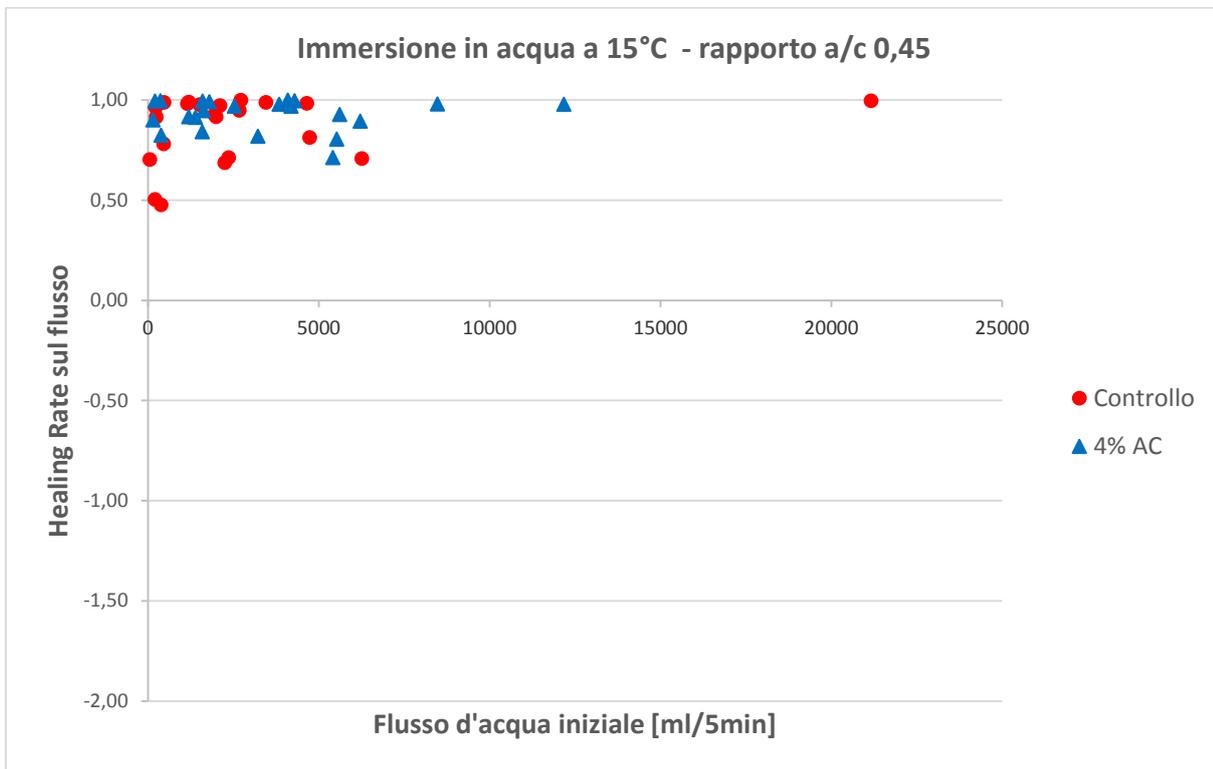




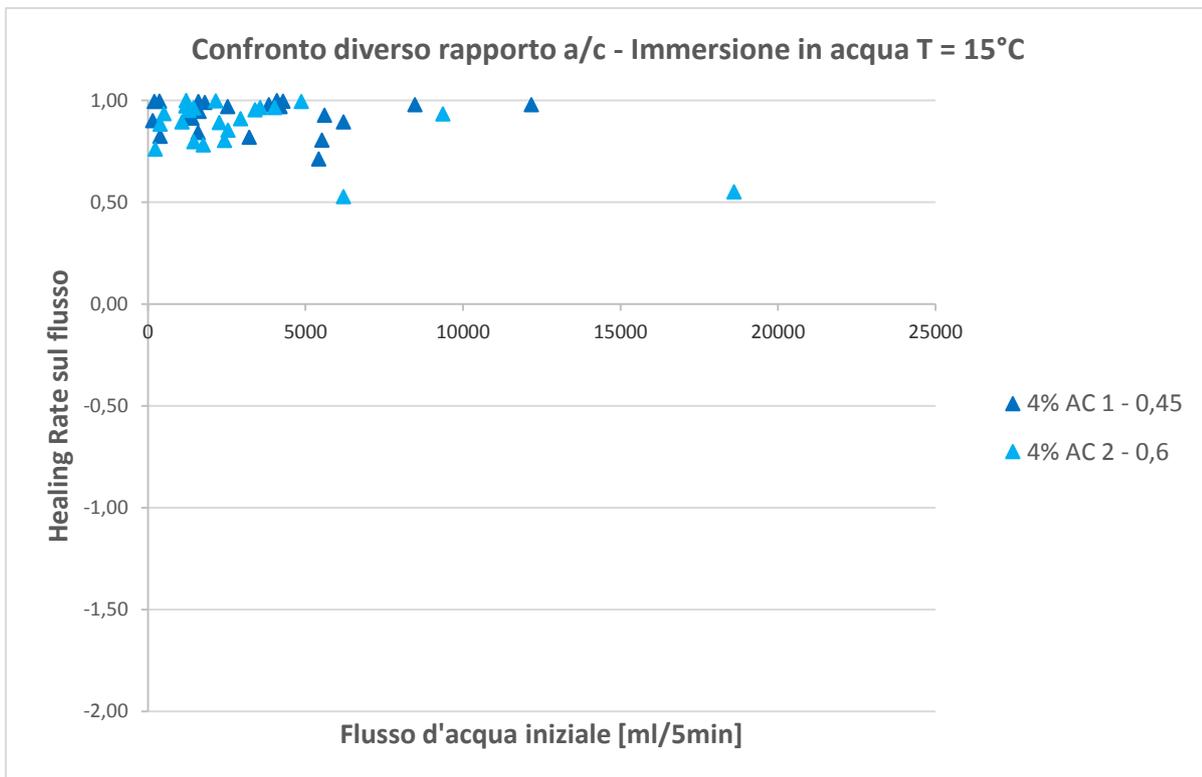
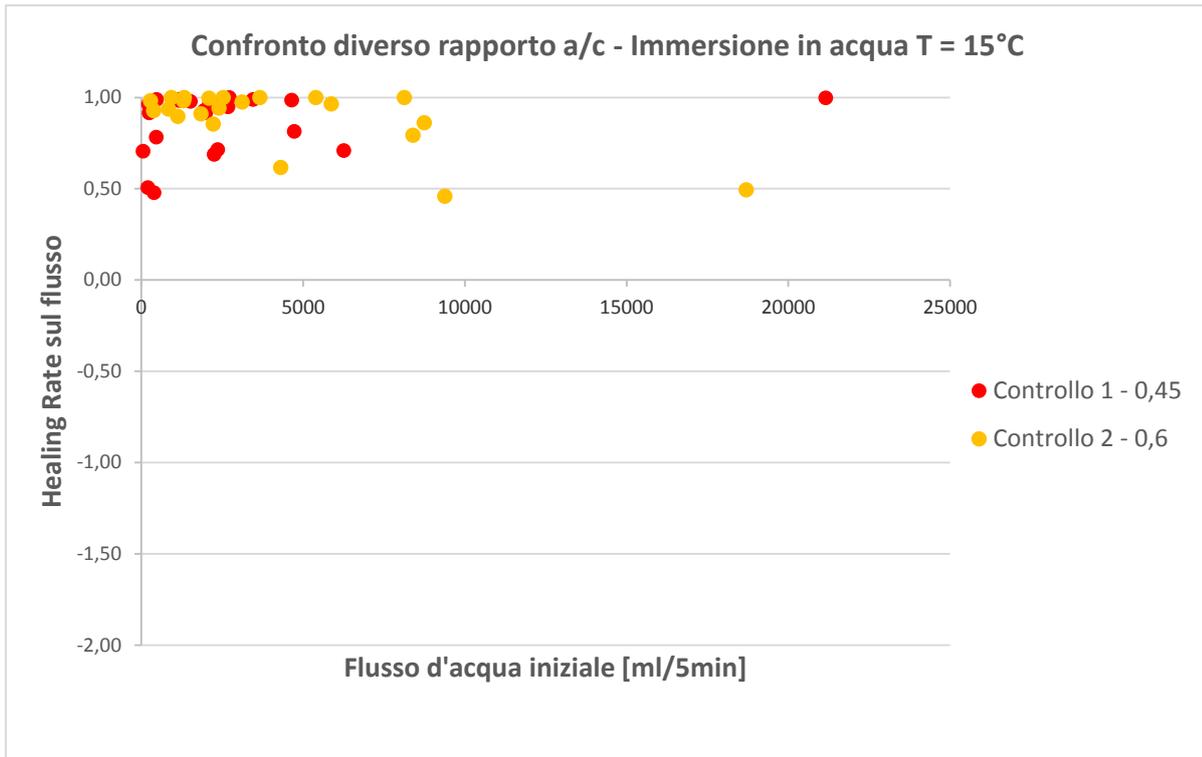


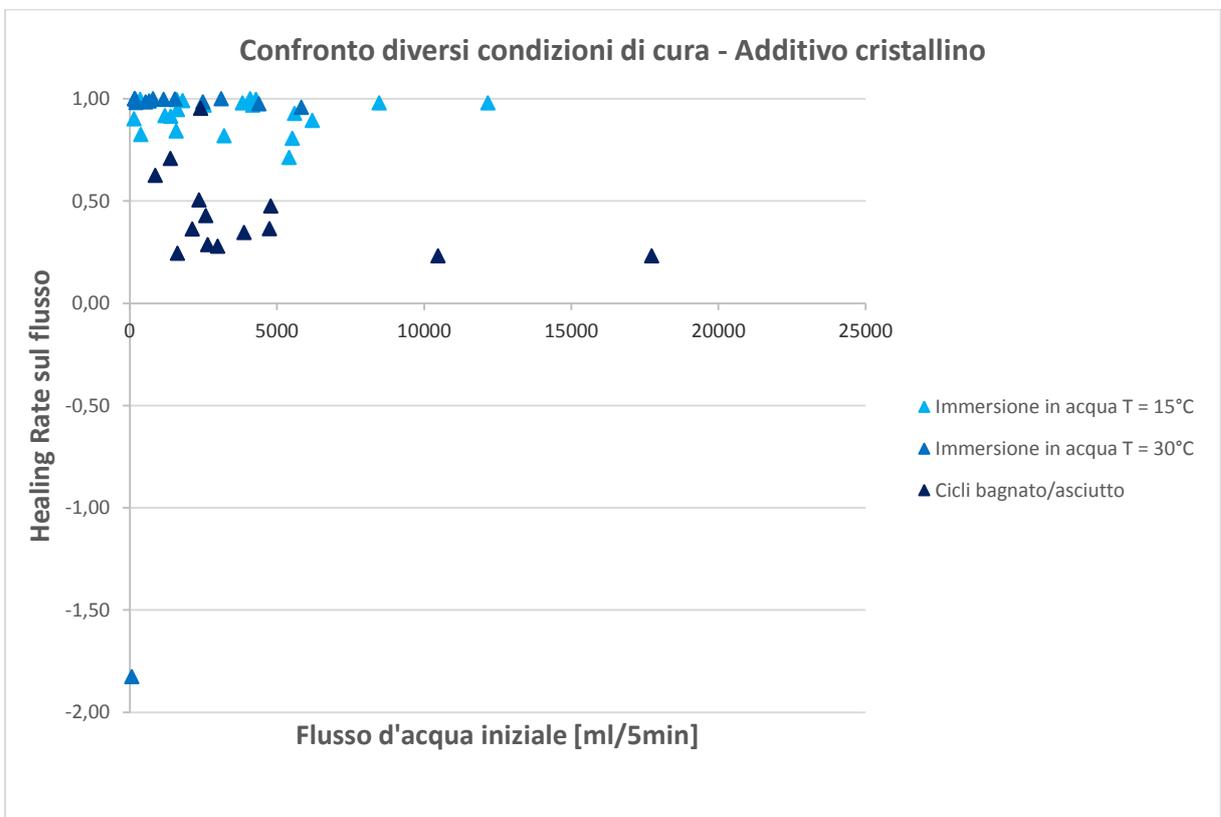
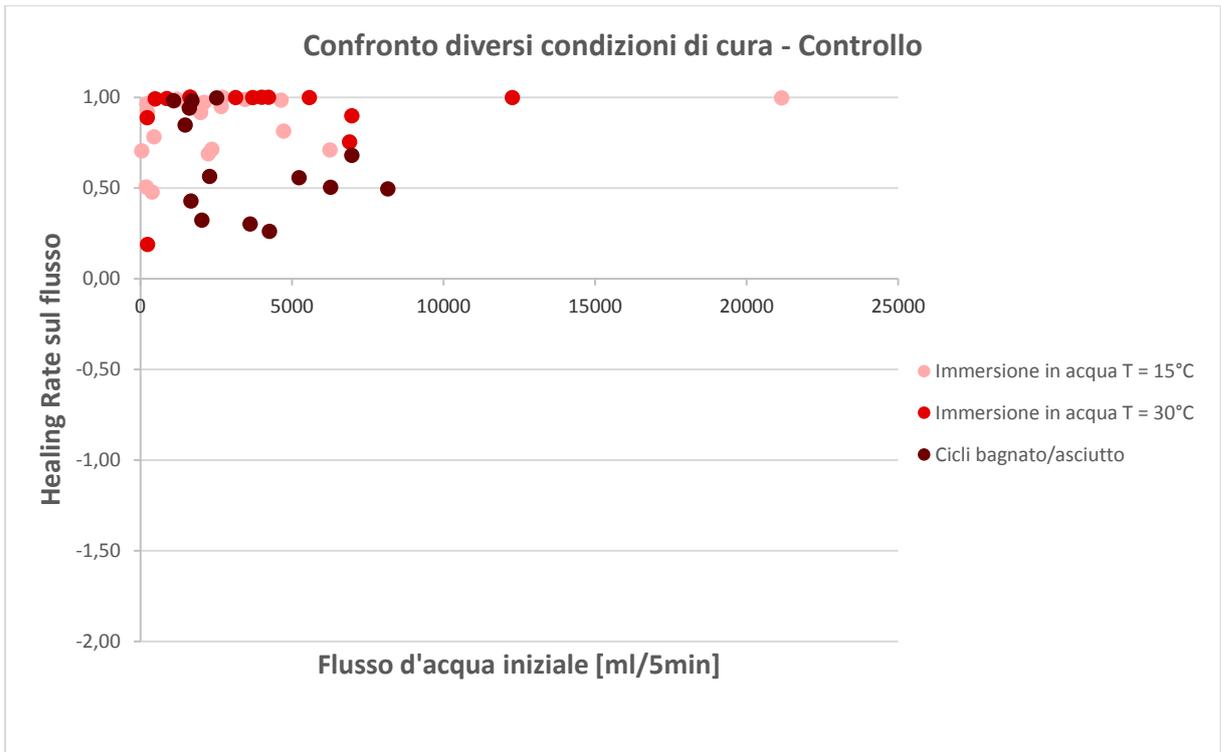


C.4. Healing Rate sul flusso per ogni rapporto a/c e ambiente di cura

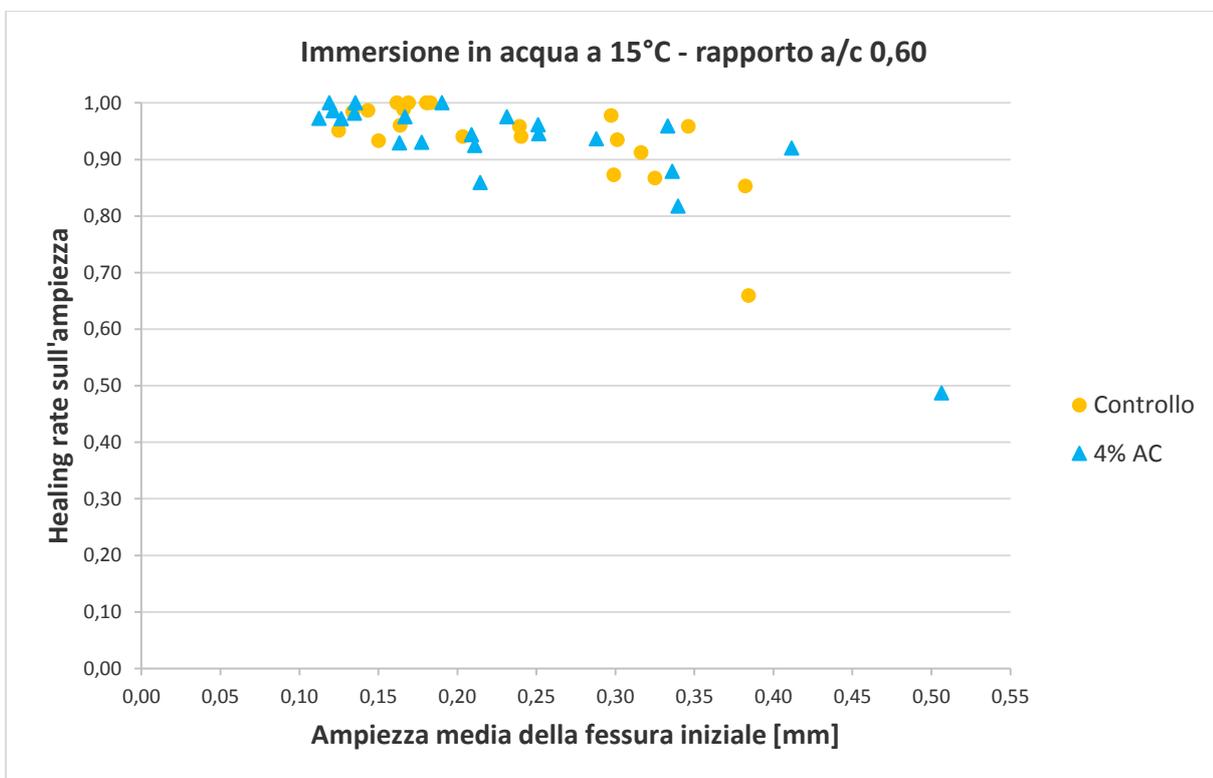
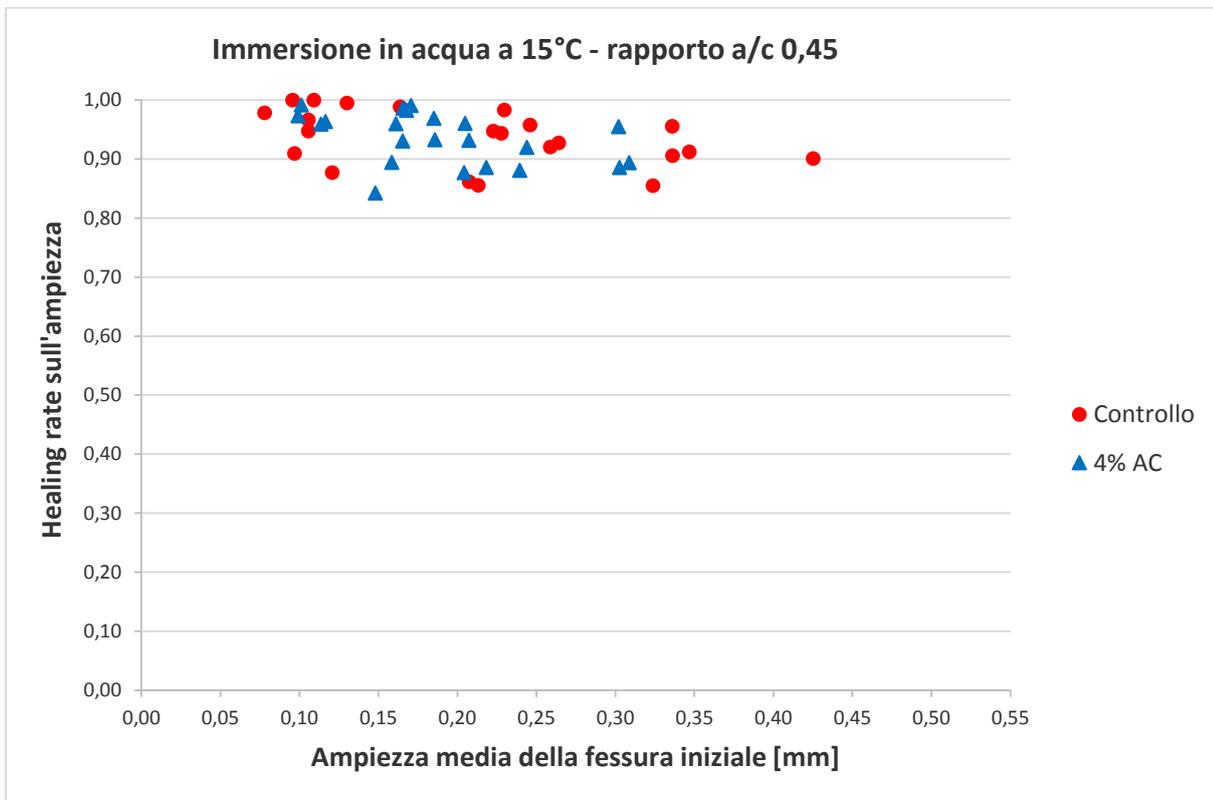


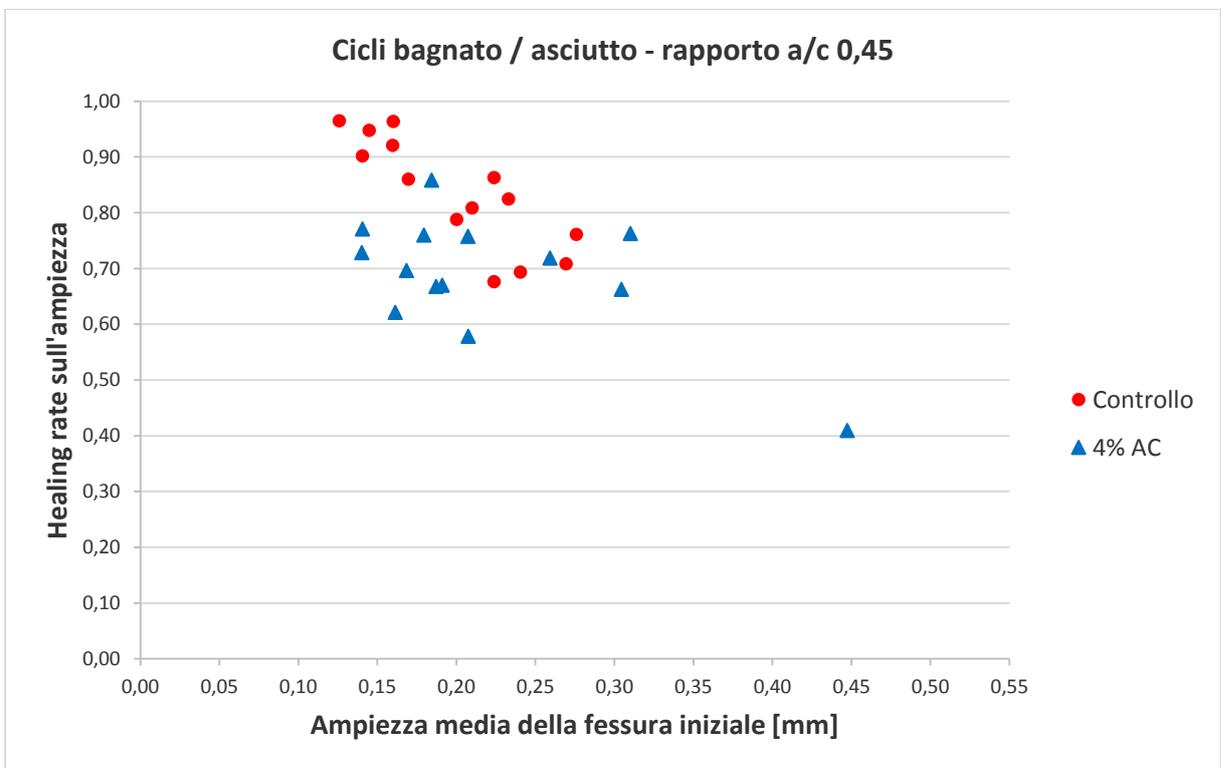
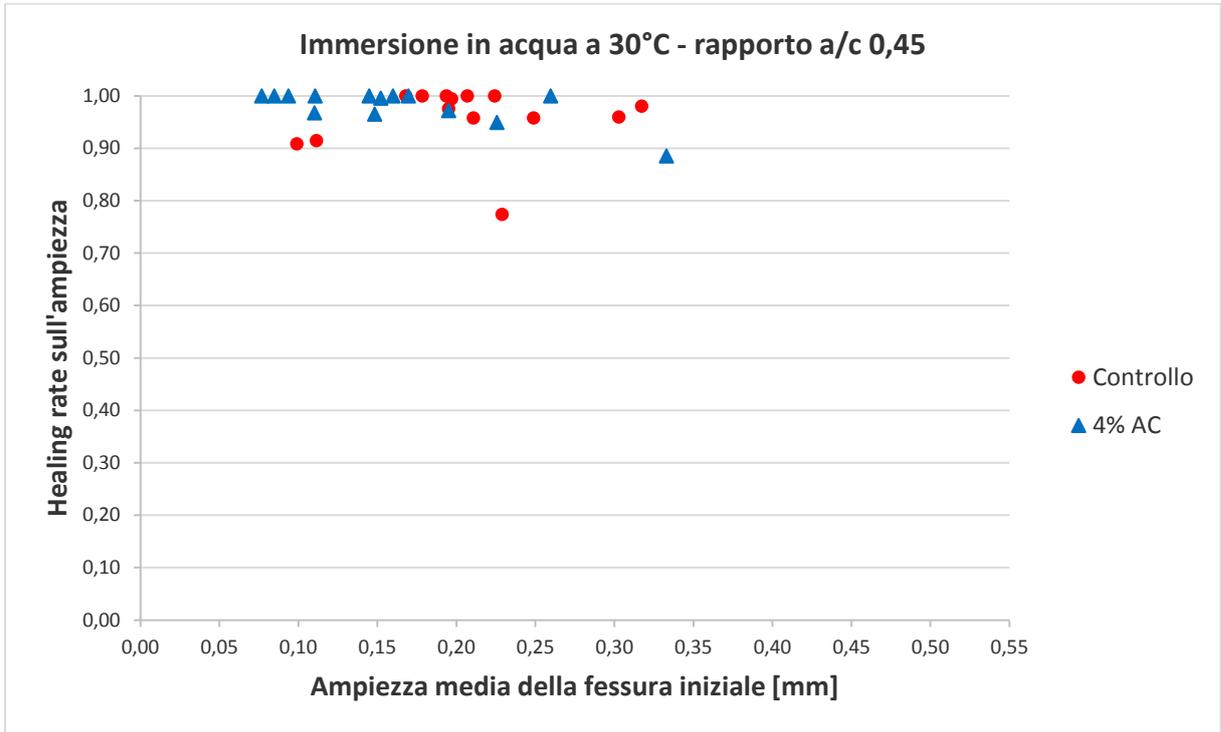


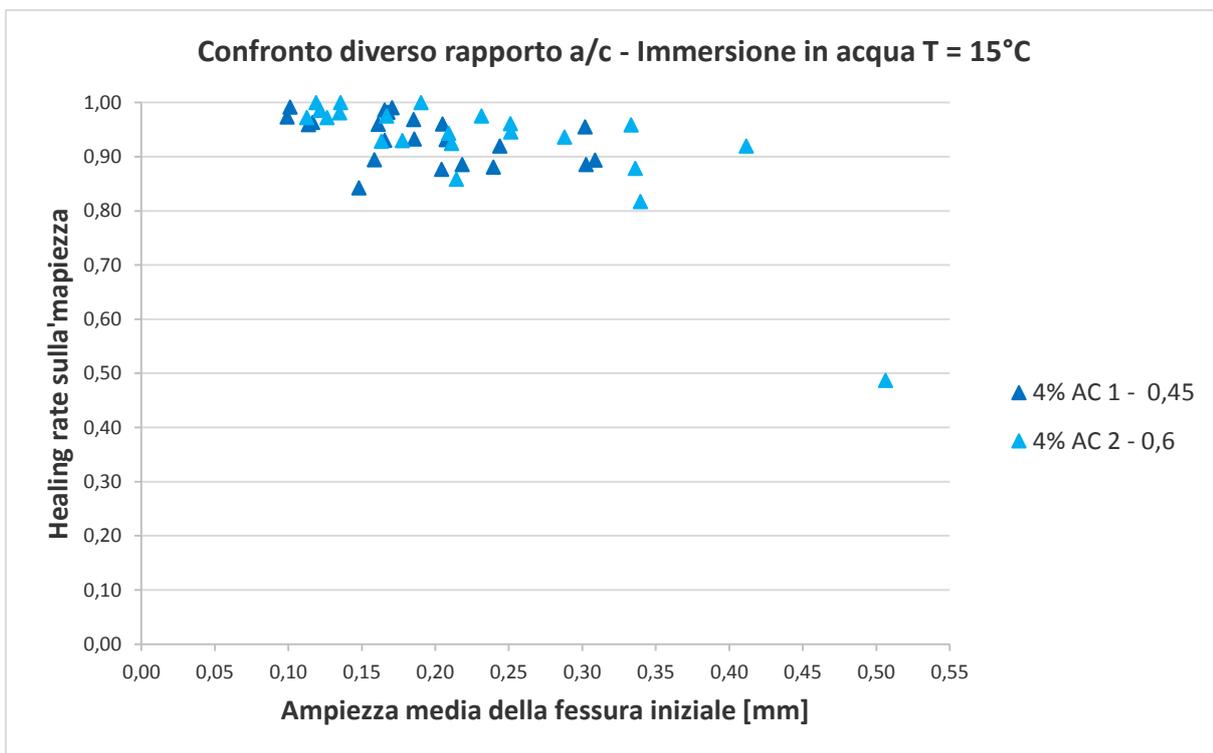
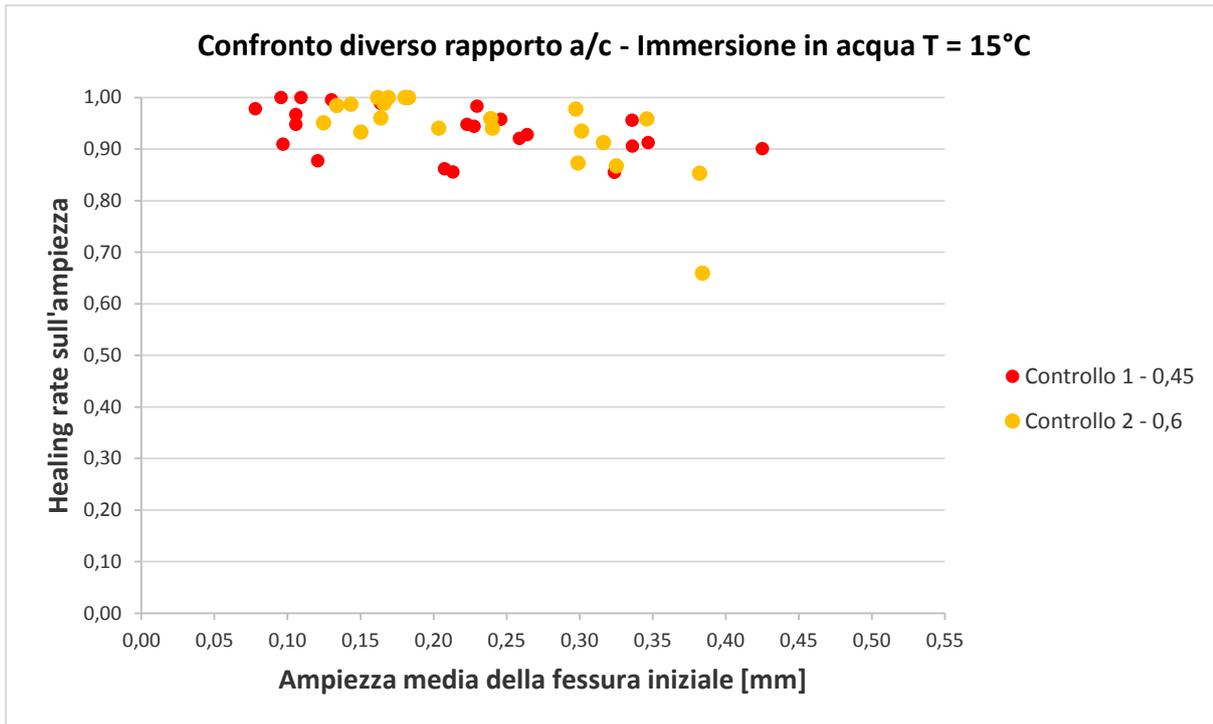




C.5. Healing Rate sull'ampiezza per ogni rapporto a/c e ambiente di cura

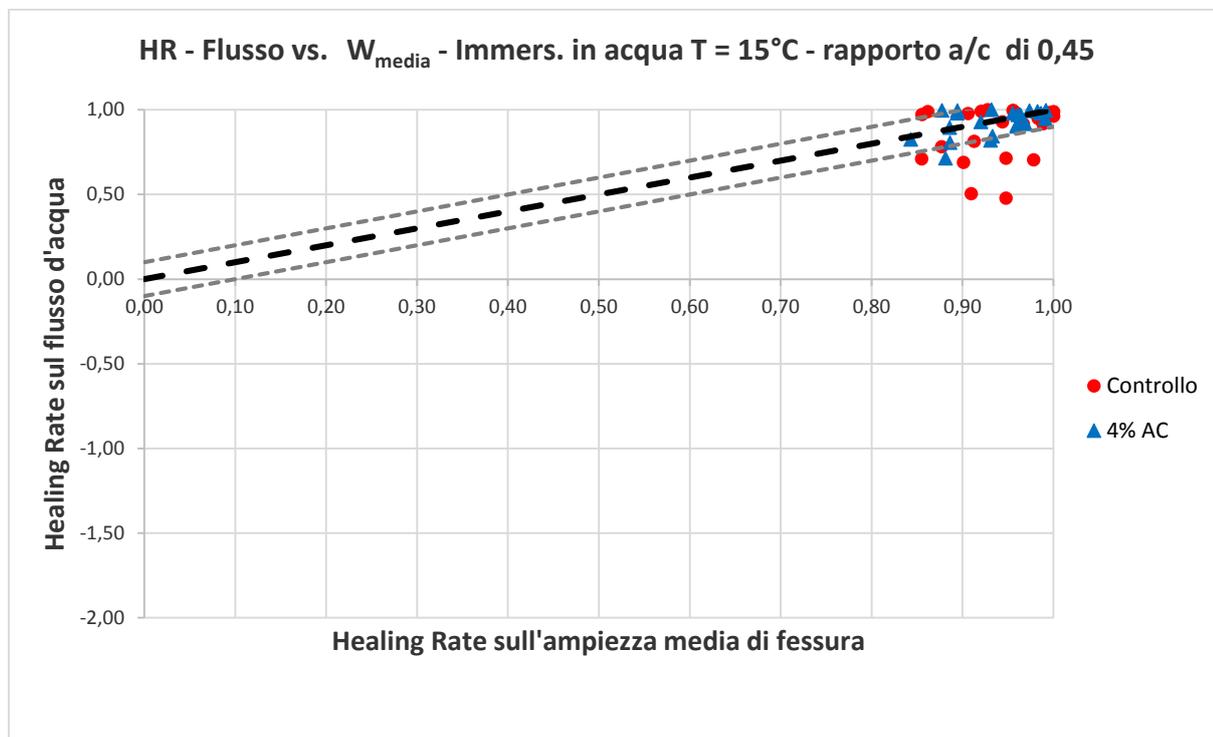
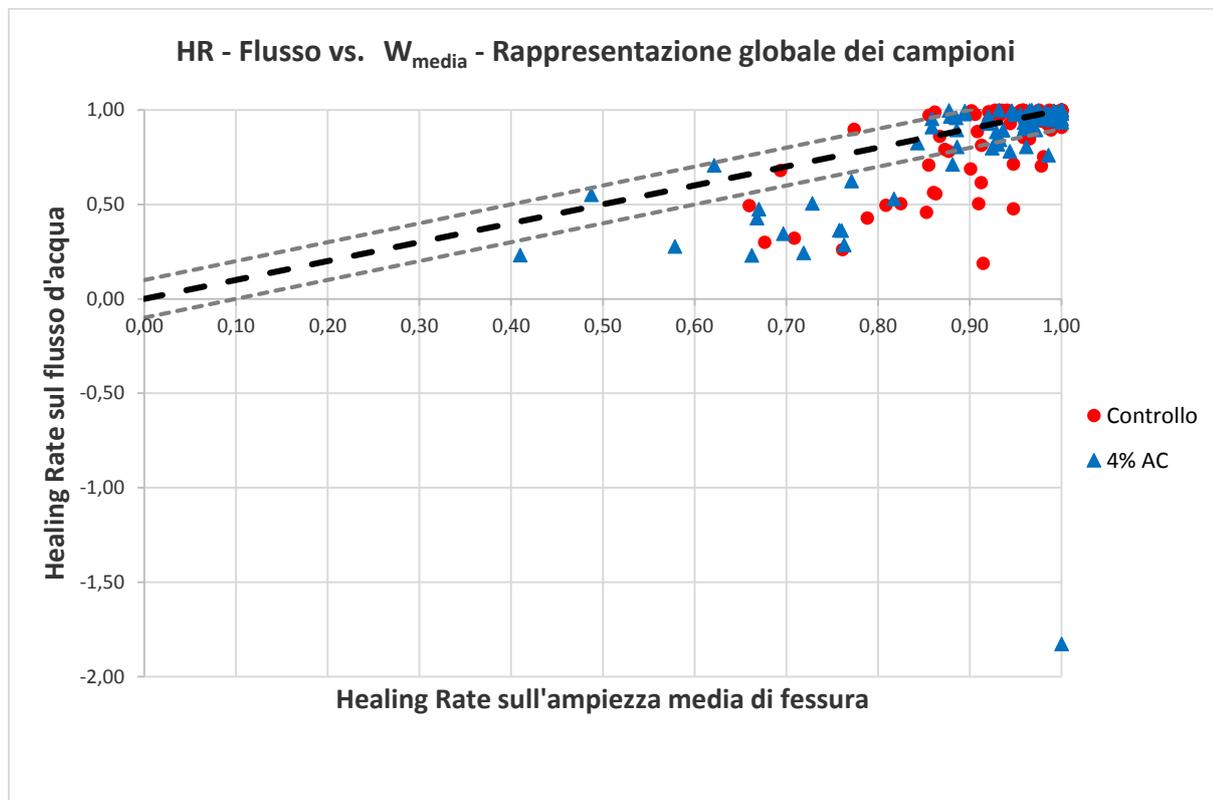


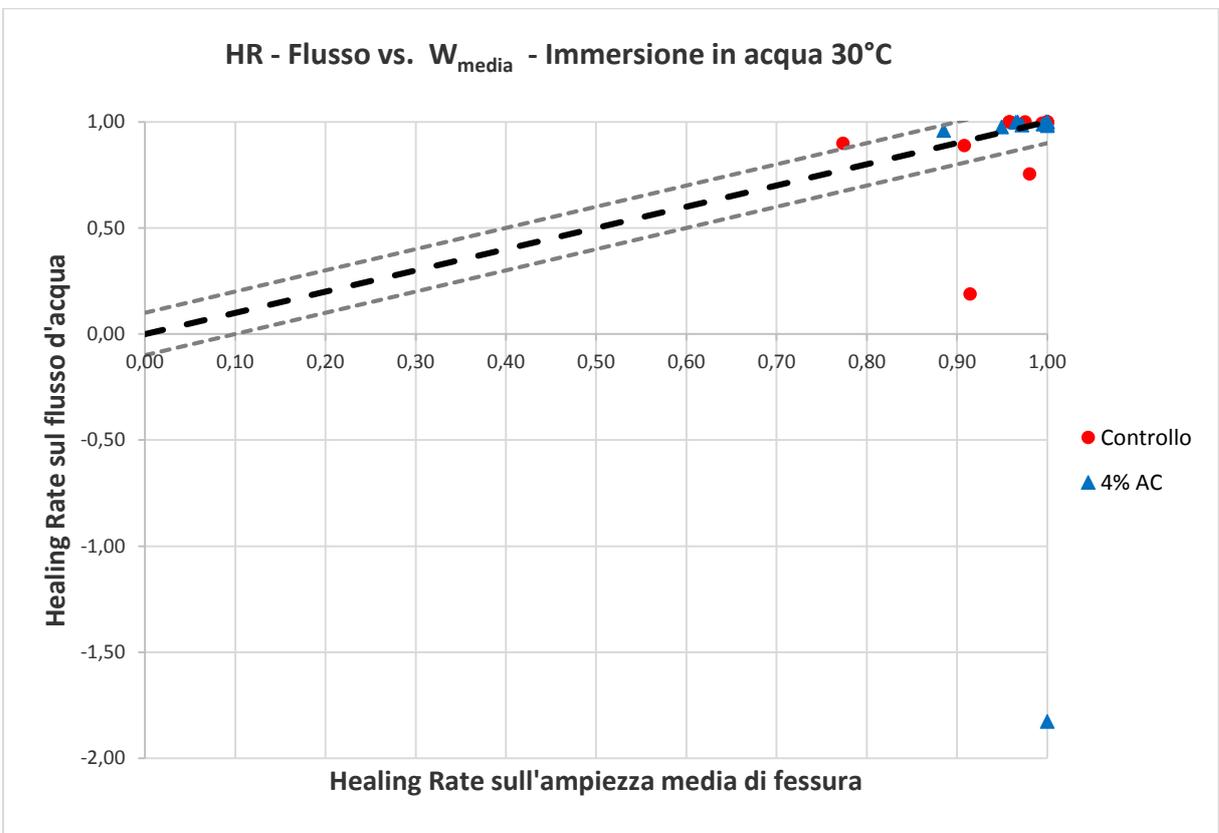
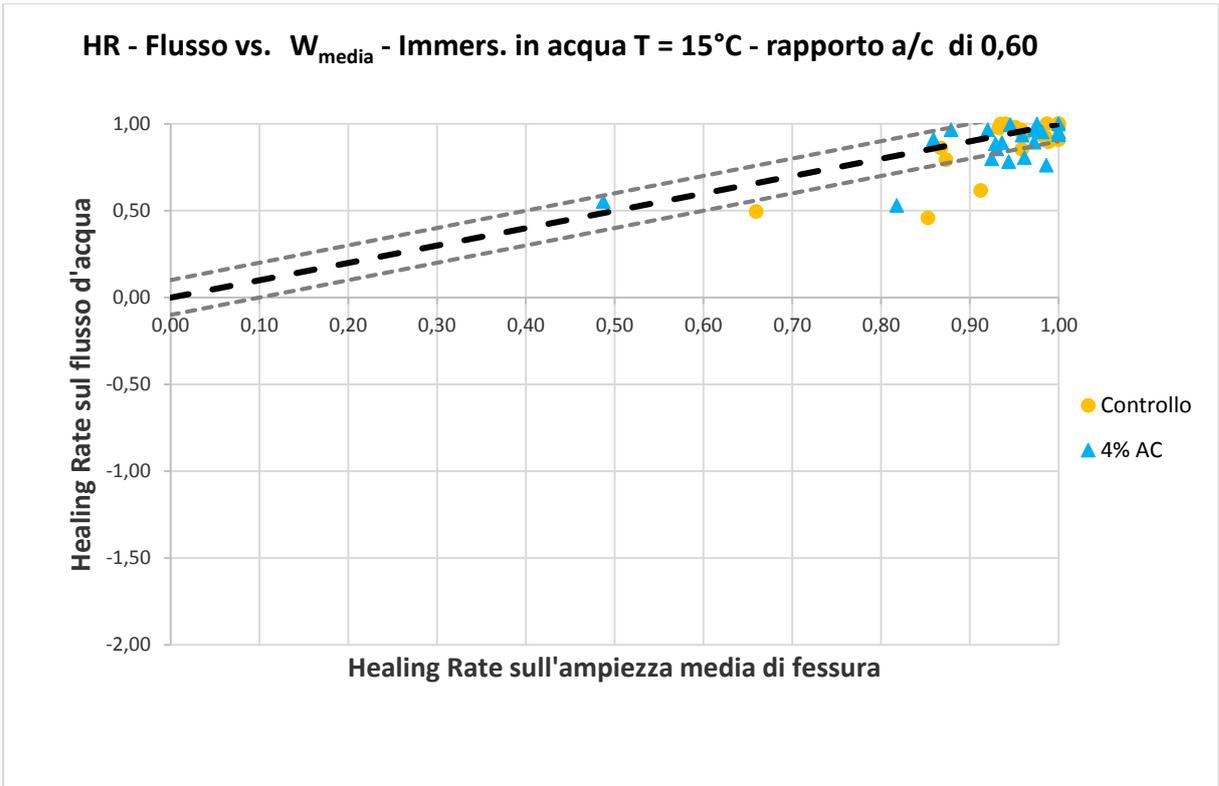


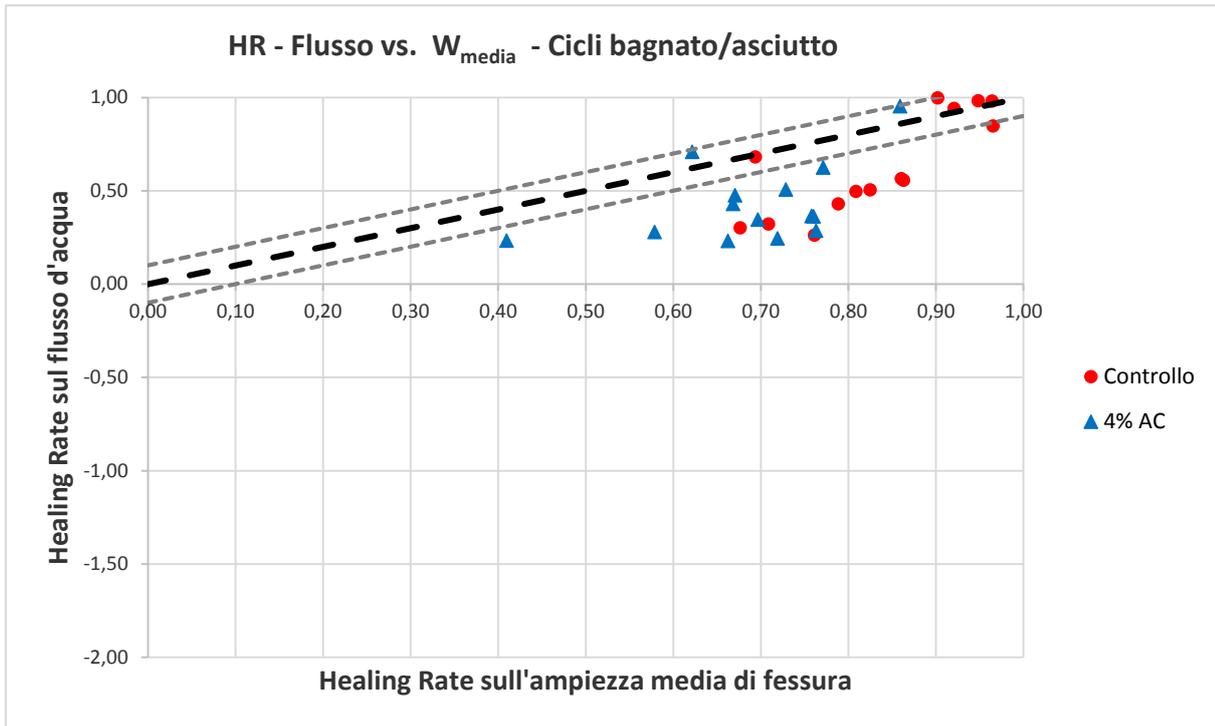




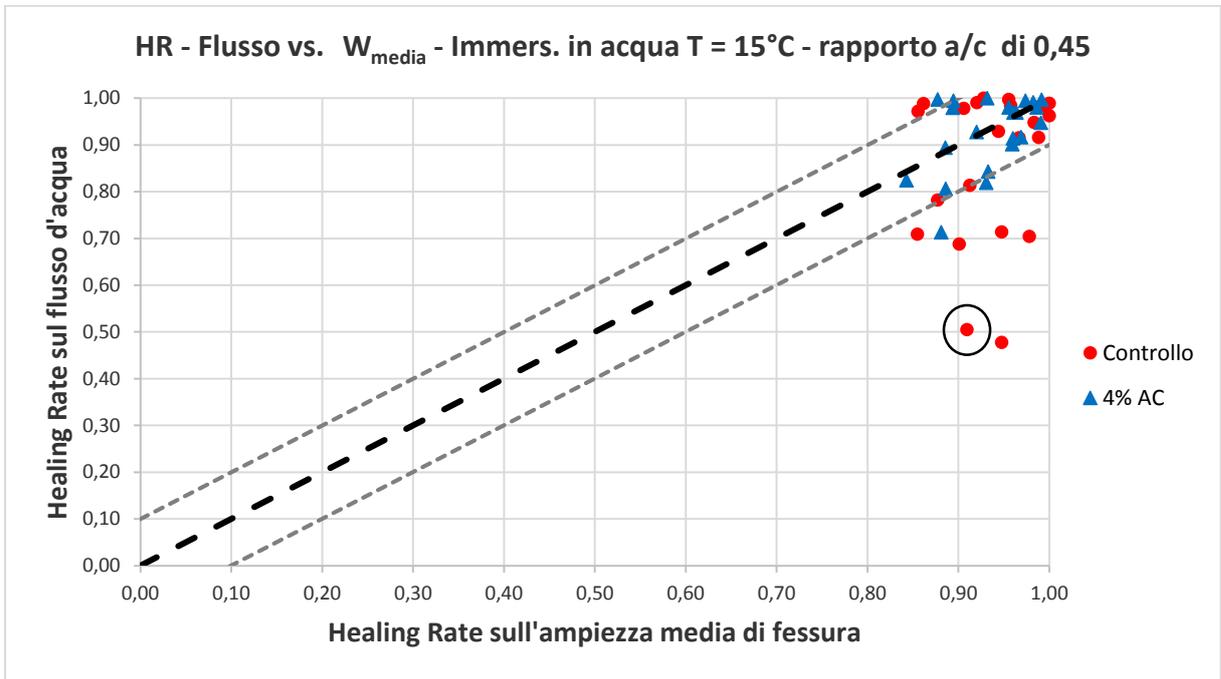
C.6. Relazione tra gli Healing Rate rispettivamente del flusso d'acqua e dell'ampiezza media della fessura



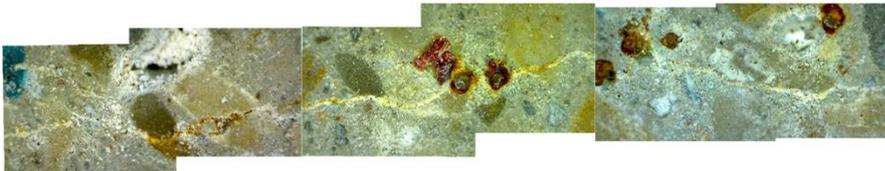




C.7. Punti anomali



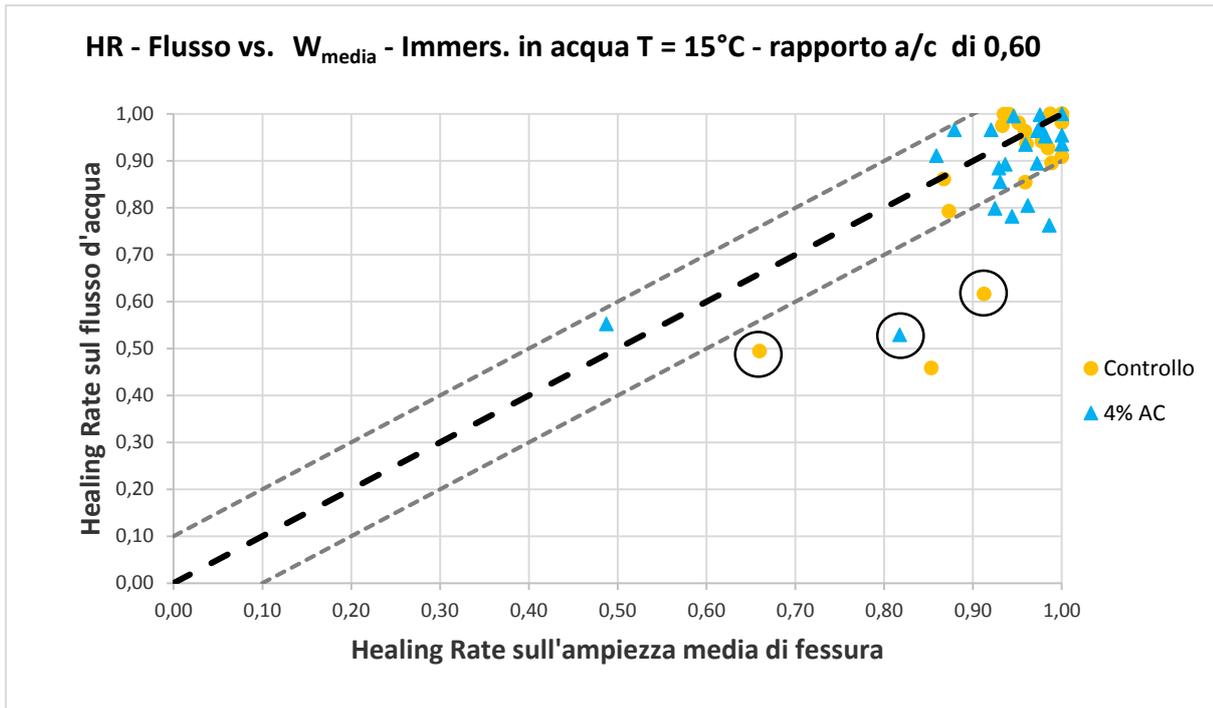
Stato della fessura superiore



Campione AM1 - 1a		
Flusso iniziale	196	ml/5min
Ampiezza media iniziale	0,10	mm
Flusso finale	97	ml/5min
Ampiezza media finale	0,01	mm
HR flusso	0,51	-
HR ampiezza	0,91	-

Stato della fessura inferiore





Stato della fessura superiore

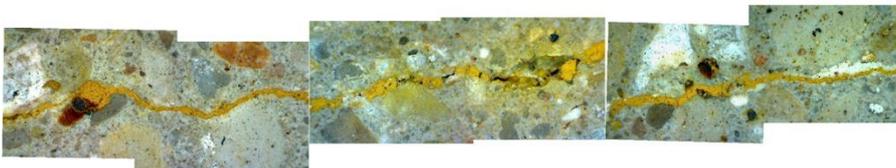


Campione AM2 - 7a		
Flusso iniziale	18695	ml/5min
Ampiezza media iniziale	0,38	mm
Flusso finale	9452	ml/5min
Ampiezza media finale	0,13	mm
HR flusso	0,49	-
HR ampiezza	0,66	-

Stato della fessura inferiore

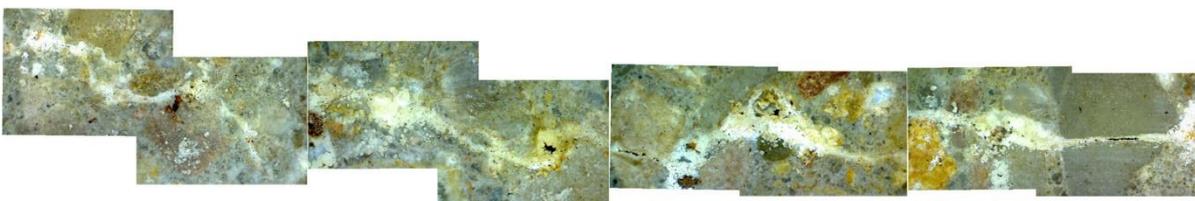


Stato della fessura superiore

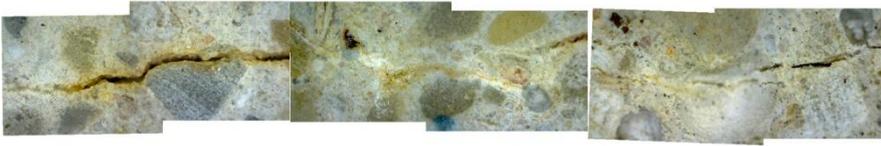


Campione AM4 - 2a		
Flusso iniziale	4300	ml/5min
Ampiezza media iniziale	0,32	mm
Flusso finale	1649	ml/5min
Ampiezza media finale	0,03	mm
HR flusso	0,62	-
HR ampiezza	0,91	-

Stato della fessura inferiore

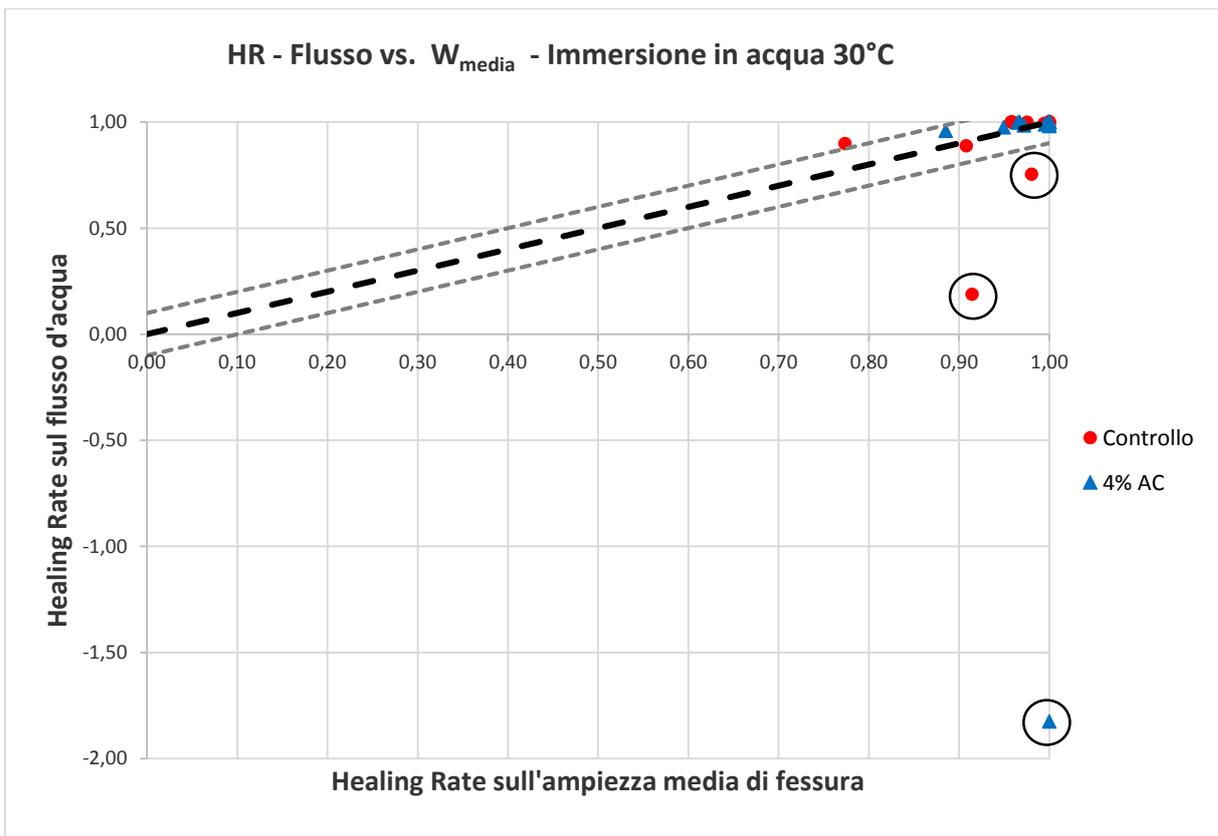


Stato della fessura superiore

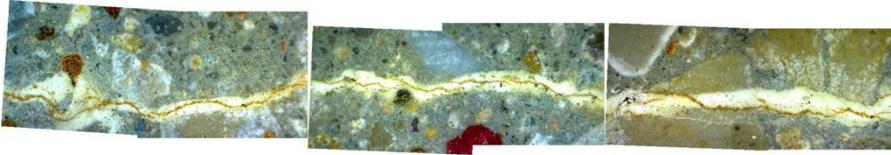


Campione AM4S2a - 3b		
Flusso iniziale	6205	ml/5min
Ampiezza media iniziale	0,34	mm
Flusso finale	2921	ml/5min
Ampiezza media finale	0,06	mm
HR flusso	0,53	-
HR ampiezza	0,82	-

Stato della fessura inferiore

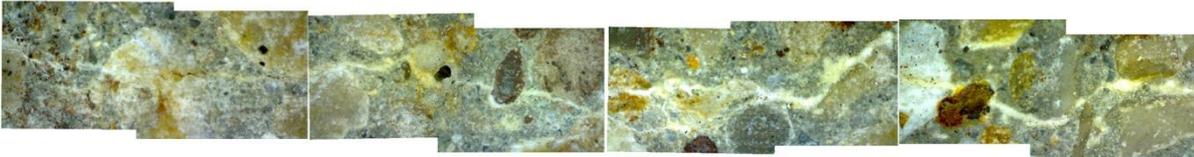


Stato della fessura superiore



Campione AMS - 2b		
Flusso iniziale	6900	ml/5min
Ampiezza media iniziale	0,32	mm
Flusso finale	1700	ml/5min
Ampiezza media finale	0,01	mm
HR flusso	0,75	-
HR ampiezza	0,98	-

Stato della fessura inferiore

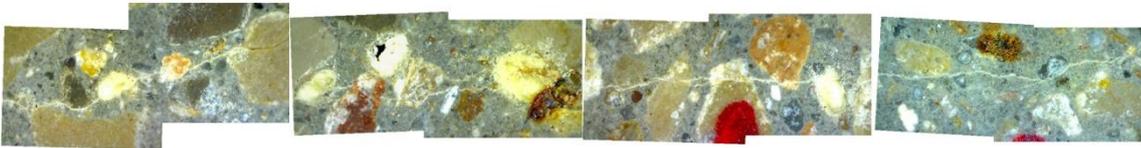


Stato della fessura superiore



Campione AMS - 5a		
Flusso iniziale	234	ml/5min
Ampiezza media iniziale	0,11	mm
Flusso finale	190	ml/5min
Ampiezza media finale	0,01	mm
HR flusso	0,19	-
HR ampiezza	0,91	-

Stato della fessura inferiore



Stato della fessura superiore



Campione AM455 - 2b		
Flusso iniziale	69	ml/5min
Ampiezza media iniziale	0,08	mm
Flusso finale	195	ml/5min
Ampiezza media finale	0,00	mm
HR flusso	-1,83	-
HR ampiezza	1,00	-

Stato della fessura inferiore

