

POLITECNICO DI MILANO



Scuola di Ingegneria Edile – Architettura
Corso di laurea magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

**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.**

Relatore: Prof. Liberato Ferrara

Co-relatore: Prof. Pedro Serna Ros

Tesi di Laurea di:

Simone Rocco Moscato Matr. 787560

Anno Accademico 2012-2013

Abstract

La durabilità delle strutture è da sempre stata oggetto di studi, in particolare per la riduzione dei costi dovuti al mantenimento delle caratteristiche prestazionali delle strutture stesse nel tempo. In un periodo in cui il concetto di sostenibilità sta acquistando sempre più importanza, la possibilità di realizzare strutture ed infrastrutture caratterizzate da vita utile più estesa e con ridotte necessità manutentive, diventa un obiettivo fondamentale della concezione e progettazione delle suddette opere. Ciò ha portato all'applicazione del concetto di materiali autoriparanti, già utilizzato in altri campi, nell'ambito edilizio, in particolare per le strutture in calcestruzzo. L'apertura delle fessure e la conseguente penetrazione di agenti dannosi all'interno della matrice cementizia, è la principale causa del degrado sia del calcestruzzo sia delle armature in acciaio. L'obiettivo di questa ricerca è stato quello di studiare come l'aggiunta di un additivo cristallizzante possa migliorare la capacità, intrinseca del calcestruzzo, di chiudere le fessure. È stato predisposto un piano sperimentale incentrato sulla produzione di un danno controllato, la valutazione della ampiezza di fessura generata e la misurazione della permeabilità nei campioni danneggiati. Dopo averli sottoposti a diversi ambienti di cura, sono stati valutati nuovamente i parametri studiati in fase iniziale e tratte le conclusioni. L'utilizzo dell'additivo cristallino ha influito positivamente sulla variazione della permeabilità in tutti gli ambienti studiati. È stata raggiunta la quasi completa chiusura delle fessure negli ambienti in cui i campioni sono stati a contatto con acqua liquida, mentre in quelli a contatto con aria a diverse temperature e umidità relative, la continua idratazione delle particelle di cemento è riuscita a contrastare fenomeni di ritiro e ha permesso, anche se in minor misura, la diminuzione della permeabilità. Ritenendo le strutture immerse quelle più soggette al degrado in caso di fessurazione, l'uso di tali additivi porta a un aumento della vita utile e a una riduzione della manutenzione, con conseguente diminuzione dei costi totali che possono compensare il maggior costo iniziale.

Abstract

The durability of the structures has always been an object of study, in particular the reduction of costs due to the maintenance of the performance characteristics of the structures over time. In a period when the concept of sustainability is becoming increasingly important, one of the main objectives to be achieved in the project conception and design is the possibility to build structures and infrastructures with longer lifetime and lower necessity of maintenance. This has led to the application of the concept of self-repairing materials on the construction field, in particular for concrete structures. The opening of the cracks and the consequent penetration of harmful agents within the cement matrix is the main cause of the degradation of the concrete and the steel reinforcement. The objective of this research was to investigate how the addition of a crystalline admixture can improve the inherent ability of the concrete to close the cracks. It has been prepared an experimental plan focused on: the production of a controlled damage, evaluation of the generated crack width and measurement of the permeability in the damaged samples. After being placed to different curing conditions, the parameters studied in the initial phase were evaluated again to get the conclusions. The use of the crystalline admixture has a positive effect on the variation of permeability in all the studied curing conditions, instead for those in contact with air at different temperatures and relative humidity, the continuous hydration of cement particles was able to oppose to shrinkage phenomenas and allowed the permeability decrease. Considering the submerged structures those most susceptible to degradation in case of cracking, the use of such admixtures brings an increase of the structure's lifetime and a reduction of the maintenance requests, with a consequent total cost decrease that compensates the higher initial cost.

Sommario

Abstract.....	3
Capitolo 1 – INTRODUZIONE.....	19
1.1 – Introduzione.....	19
1.2 – Obiettivi.....	20
1.3 - Struttura del documento.....	21
Capitolo 2 - STATO DELL'ARTE.....	23
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.....	30
2.3.2 Engineered Cementitious Concrete.....	33
2.4 Self-Healing Ingegnerizzato.....	39
2.4.1 Polimeri super assorbenti (SAP).....	39
2.4.2 Leghe a memoria di forma.....	42
2.4.3 Un approccio biologico.....	46
2.4.4 Additivi cristallini e aggiunte espansive.....	50
2.4.5 Prodotti incapsulati.....	63
2.4.6 Tubi fragili e prodotti sigillanti.....	70
2.4.7 Altri approcci.....	74
Capitolo 3 – METODOLOGIA E PROGRAMMA SPERIMENTALE.....	79
3.1 Obiettivi dello studio.....	79
3.2 Considerazioni sulla metodologia di riferimento.....	81
3.3 Programma sperimentale.....	84
3.4 Materiali.....	87
3.4.1 Cemento.....	87
3.4.2 Acqua.....	88
3.4.3 Aggregati.....	88
3.4.4 Additivo fluidificante.....	90
3.4.5 Fibre.....	90
3.4.6 Resina epossidica sigillante.....	91
3.4.7 Additivo cristallino.....	91
3.5 Metodologia.....	93

3.5.1 Dosaggio, miscelazione del calcestruzzo e fabbricazione dei campioni.....	93
3.5.2 Prefessurazione.....	98
3.5.3 Prova di permeabilità.....	99
3.5.4 Ambienti di cura.....	103
3.6 Valutazione della fessura.....	107
3.6.1 Misurazione ampiezza massima.....	109
3.6.2 Calcolo approssimato della fessura media e della sua area.....	111
3.6.3 Calcolo approssimato dell'area, secondo metodo.....	113
Capitolo 4 – ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI.....	115
4.1 Generale andamento del flusso.....	115
4.2 Healing Rate.....	118
4.3 Analisi delle metodologie di misurazione della fessura.....	119
4.3.1 Confronto flusso e metodologia di misurazione.....	120
4.3.2 Rapporto valori finali su iniziali: confronto tra variazione del flusso e variazione della fessura.....	125
4.3.3 Influenza dimensione superficie superiore sulla variazione del flusso.....	128
4.3.4 Metodologia scelta, studio separato dei campioni di controllo e con additivo.....	130
4.4 Riduzione del flusso.....	133
4.4.1 Immersione in acqua.....	133
4.4.2 Fessura costantemente bagnata e strato di due centimetri di acqua sulla superficie superiore.....	134
4.4.3 Camera umida.....	135
4.4.4 Esposizione all'aria non trattata.....	136
4.4.5 Calcestruzzo di controllo e con additivo.....	137
4.5 Variazione dell'ampiezza media della fessura.....	141
4.5.1 Immersione in acqua.....	142
4.5.2 Fessura bagnata costantemente e strato di due centimetri di acqua sulla superficie superiore.....	142
4.5.3 Camera umida.....	143
4.5.4 Esposizione ad aria non trattata.....	144
4.5.5 Calcestruzzo di controllo e con additivo.....	145
4.6 Considerazioni generali sulla relazione tra flusso e fessura.....	147
4.7 Studio visivo della fessura, formazione di cristalli e sigillatura completa.....	148

4.8 Confronto con studi precedenti	153
Capitolo 5 – CONCLUSIONI.....	157
5.1 Conclusioni	157
5.2 Future linee di studio	158
Bibliografia	161
APPENDICE A - Prove standard	165
A.1 Prova di abbassamento del cono	165
A.2 Resistenza alla compressione dei provini	168
APPENDICE B – Relazione tra flusso e metodologia di misurazione della fessura	171
Metodologia: misurazione area della fessura, approssimazione come somma di cinque rettangoli definiti, $Area_{mm}$	171
Metodologia: misurazione ampiezza massima della fessura, W_{max}	174
Metodologia: misurazione ampiezza media della fessura, W_{media}	176
Metodologia: misurazione dell'area della fessura, mediante software di grafica in grado di fornire il numero dei pixel neri contenuti all'interno di immagini ad alta risoluzione rappresentanti la fessura, $Area_{px}$	178
Metodologia: misurazione dell'ampiezza della fessura, mediante l'utilizzo di un fessurimetro standard, FM.	180
APPENDICE C – Confronto RATIO dei flussi e della fessura misurata con le metodologie studiate	181
Metodologia: misurazione area della fessura, approssimazione come somma di cinque rettangoli definiti, $Area_{mm}$	181
Metodologia: misurazione ampiezza massima della fessura, W_{max}	184
Metodologia: misurazione ampiezza media della fessura, W_{media}	186
Metodologia: misurazione dell'area della fessura, mediante software di grafica in grado di fornire il numero dei pixel neri contenuti all'interno di immagini ad alta risoluzione rappresentanti la fessura, $Area_{px}$	188
APPENDICE D – Relazione tra il flusso e la sola superficie superiore, misurata con le metodologie studiate	190
Metodologia: misurazione area della fessura, approssimazione come somma di cinque rettangoli definiti, $Area_{mm}$	190
Metodologia: misurazione ampiezza massima della fessura, W_{max}	192
Metodologia: misurazione ampiezza media della fessura, W_{media}	193
Metodologia: misurazione dell'area della fessura, mediante software di grafica in grado di fornire il numero dei pixel neri contenuti all'interno di immagini ad alta risoluzione rappresentanti la fessura, $Area_{px}$	194

APPENDICE E – Metodologia scelta W_{media} : grafici completi	196
Relazione tra flusso e ampiezza media della fessura, in condizioni iniziali	196
Relazione tra flusso e ampiezza media della fessura, dopo 42 giorni di cura	198
Relazione tra flusso e ampiezza media della fessura, rappresentazione globale campioni.....	200
APPENDICE F – Relazione tra il flusso e l'ampiezza media della fessura nei differenti ambienti di cura.....	202
Ambiente di cura: immersione in acqua	202
Ambiente di cura: fessura bagnata e strato di 2 cm di acqua sulla superficie superiore del campione	204
Ambiente di cura: camera umida a 20°C e 100% U.R.	206
Ambiente di cura: esposizione ad aria non trattata.....	208
APPENDICE G – Healing rate	211
Healing rate sul flusso d'acqua nei differenti ambienti di cura	211
Healing rate sull'ampiezza media della fessura, studio contemporaneo di tutte le fessure.....	213
Healing rate sull'ampiezza media della fessura, massima tra le due del campione.....	215
Healing rate sull'ampiezza media della fessura, minima tra le due del campione.....	217
Healing rate sull'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione.....	219
Healing rate sull'ampiezza media della fessura superiore del campione.....	221
APPENDICE H – Relazione tra gli healing rate rispettivamente del flusso d'acqua e dell'ampiezza della fessura	223

Indice delle figure

Capitolo 2

Figura 2.1 Rappresentazione schematica di prestazioni e costi, inclusi i costi diretti di riparazione, in funzione del tempo per strutture/costruzioni/infrastrutture realizzate con materiali normali (A) e di alta qualità (B).	24
Figura 2.2 Definizione di Self-Healing e Self-Repairing del calcestruzzo. Mihashi, Nishiwaki [4].	25
Figura 2.3 Possibili cause dell'auto guarigione: (a) formazione di carbonato di calcio o idrossido di calcio, (b) sedimentazione di particelle, (c) idratazione continua, (d) rigonfiamento della matrice cementizia. Ter Heide [6].	27
Figura 2.4 Approcci per facilitare l'auto guarigione autogena. Presenza di stati tensionali di compressione attraverso la fessura (A), fornitura di acqua (B), miglioramento dell'idratazione e della cristallizzazione (C). Tittelboom, De Belie [8].	30
Figura 2.5 Indice di auto-chiusura delle fessure in rapporto al tempo di cura e all'apertura iniziale delle fessure. (a) intervallo tra 0-125 μm , (b) intervallo tra 125-250 μm . Vengono analizzati cinque diversi calcestruzzi: CEM I, controllo; 50 BFS, contenente 50% nel peso di volume di cemento di scorie d'alto forno; 85 BFS, contenente 85% di scorie d'alto forno; 30 FA, contenente 30% di ceneri volanti; 50 FA, contenente 50% di ceneri volanti. [11].	32
Figura 2.6 Mix Design delle tre tipologie studiate da Homma et al. [13].	34
Figura 2.7 Dipendenza dello spessore medio dei prodotti di cristallizzazione con il tempo di cura. Homma et al. [13].	34
Figura 2.8 Resistenza a trazione prima e dopo 28 giorni di cura, confronto tra le tre tipologie di campioni. Homma et al. [13].	35
Figura 2.9 Cambiamento della frequenza di risonanza all'aumentare del numero dei cicli. Estratto dei soli campioni a stretto contatto con acqua. Yang et al. [15].	36
Figura 2.10 Recupero della rigidità (sinistra) e larghezza media delle fessure (destra) dei campioni soggetti a prefessurazione a 3 giorni e a 6 mesi. Yang et al. [15].	37
Figura 2.11 (1) Prova di flessione a tre punti per rompere i campioni in due parti. (2) Immersione in acqua di parte dei campioni. (3) Valutazione del diametro delle fibre che presentano un precipitato cristallino. Nishiwaki et al. [16].	37
Figura 2.12 Polvere di SAP secca (sinistra), gel formatosi dall'espansione del SAP. ICL [17].	40
Figura 2.13 Meccanismo di sigillatura svolto dai polimeri super assorbenti. ICL [17].	40
Figura 2.14 A sinistra, confronto recupero di rigidità con i due differenti periodi di prefessurazione: G1, G2 e G3 indicano i tre diversi tipi di calcestruzzo, mentre i tre colori le diverse età di prefessurazione. A destra, confronto tra i diversi ambienti di cura per i campioni fessurati a 7 giorni. [18].	41
Figura 2.15 Esempio di radiografia a neutroni. Specie contenente SPA. Snoeck et al. [19].	42
Figura 2.16 Evoluzione della fessura in campioni contenenti cavi in SMA, al massimo valore di deformazione raggiunto (sinistra) e al termine della prova, successivamente alla rimozione del carico (destra). Sakai et al. [21].	43
Figura 2.17 Rappresentazione campioni prismatici contenenti barre in SMA. Kuang, Ou [22].	44
Figura 2.18 Evoluzione della fessura in fase di carico (a) e in fase di scarico (b). Kuang, Ou [22]. ..	45

Figura 2.19 Schema campioni con fibre in vetro fragili contenenti adesivo epossidico a bassa viscosità. Kuang, Ou [22].	45
Figura 2.20 Evoluzione fessura dalla sigillatura alla seconda prova di flessione: (a) Fessura nella mezzeria del campione; (b) Fessura riparata dall'adesivo fuoriuscito dalle fibre in vetro; (c) Fessura iniziale ancora chiusa e apertura di una nuova fessura. Kuang, Ou [22].	46
Figura 2.21 Chiusura di una fessura grazie alla presenza di batteri presenti sulla superficie della fessura, si attivano a causa dell'ingresso di acqua, moltiplicandosi e precipitando minerali (CaCO_3), che sigillano la fessura e proteggono le barre d'armatura. Jonkers [23].	47
Figura 2.22 Resistenza a flessione (a) e a compressione (b) rilevate dopo 3,7 e 28 giorni di maturazione. Non è stata rilevata alcuna differenza significativa tra campioni di controllo e calcestruzzo contenente batteri. Tipologia di batteri utilizzati è <i>S. pasteurii</i> . Jonkers [23].	47
Figura 2.23 Miscela composta di particelle di argilla espansa (sinistra) cariche di spore batteriche e di un composto precursore bio-minerale organico (lattato di calcio). Incorporato nella matrice cementizia (destra) le particelle di argilla espansa possiedono un serbatoio interno con l'agente di riparazione bi-componente. Jonkers [25].	49
Figura 2.24 Resistenza a compressione a 7 e a 28 giorni (sinistra), i campioni contenenti i batteri vivi e quelli contenenti le sole pareti cellulari mostrano maggiore resistenza, mentre la riduzione della porosità (destra) è superiore nei secondi. Pei et al. [26].	49
Figura 2.25 Complessa rete tridimensionale formata da cristalli (a), formazione e crescita dei cristalli (b). Pattanaik [27].	51
Figura 2.26 (a) Dimensioni campioni cubici; (b) Fessurazione mediante splitting; (c) Misurazione dell'ampiezza delle fessure. Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [28].	52
Figura 2.27 Evoluzione del self-healing ratio durante il periodo di cura per fessure di diversa ampiezza e campioni prefessurati a tre giorni. Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [28].	53
Figura 2.28 Evoluzione del self-healing ratio durante il periodo di cura per fessure di diversa ampiezza e campioni prefessurati a ventotto giorni. Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [28].	54
Figura 2.29 Prodotti di sigillatura presenti sulle superfici delle fessure di differenti malte: OPC, calcestruzzo con cemento Portland ordinario; FA, calcestruzzo con ceneri volanti; SF, calcestruzzo con fumo di silice, CA, calcestruzzo con additivo cristallino. Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [28].	55
Figura 2.30 Perdita della resistenza a compressione e recupero dovuto all'auto guarigione delle micro fessure. Takagi et al. [7].	56
Figura 2.31 Curva carico-spostamento ottenuta nella prova di flessione prima e dopo la cura (a), procedura per la valutazione della chiusura delle fessure (b). Ferrara e Krelani [29].	57
Figura 2.32 Indice di auto guarigione delle fessure, per calcestruzzo con (b) o senza (a) additivo cristallino, come funzione dell'apertura delle fessure e della durata dell'esposizione. Ferrara e Krelani [29].	58
Figura 2.33 Indici di recupero della resistenza in funzione della durata dell'esposizione e dell'apertura delle fessure. Ferrara e Krelani [29].	58
Figura 2.34 Indice di recupero del danno in funzione della durata dell'esposizione e dell'apertura della fessura. Ferrara e Krelani (2013) [29].	59

Figura 2.35 Confronto chiusura fessura dopo un mese di cura in acqua tra calcestruzzo comune (a), calcestruzzo con agenti espansivi (b), calcestruzzo con agenti espansivi progettato per il self-healing (c). Ahn e Kishi [31].....	60
Figura 2.36 Fenomeno del self-healing analizzato per le diverse ampiezze della stessa fessura. Ahn e Kishi [31].....	60
Figura 2.37 Prefessurazione campioni (a), fissaggio staffa in PVC (b). Sisomphon et al. [33].....	61
Figura 2.38 Analisi dell'ampiezza delle fessure. Sisomphon et al. [32].	62
Figura 2.39 Prodotti incapsulati. Rilascio dell'agente sigillante, inizialmente 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 presente all'interno della matrice (E,F); alla presenza di un secondo componente incapsulato separatamente (G,H). [8].....	63
Figura 2.40 Metodo di applicazione del carico dal basso per indurre la fessurazione da taglio su piastre in calcestruzzo. [34]	64
Figura 2.41 Grafico carico-spostamento delle diverse tipologie di campioni dopo il periodo di cura (a), confronto del recupero delle proprietà meccaniche delle diverse tipologie di campioni (b). [35]	66
Figura 2.42 Formule strutturali del metil-metacrilato, perossido di benzoile, N,N-dimetil-p-toluidine e polimetilmetacrilato. [36].....	67
Figura 2. 43 Coefficiente di permeabilità all'acqua in funzione dell'ampiezza delle fessure. [36] ...	68
Figura 2.44 Tipologie di campioni del piano sperimentale di Wang et al. [37]	69
Figura 2.45 Globale recupero della resistenza delle specie fessurate (a), permeabilità all'acqua dei cilindri fessurati dopo essere stati riparati da diversi agenti di guarigione (b). [37].....	70
Figura 2.46 Fuoriuscita del materiale sigillante monocomponente (A), e del sigillante bicomponente (B), entrambi collegati a serbatoi esterni alla struttura. [8]	71
Figura 2.47 Campioni prismatici con armatura in acciaio e tubo fragile contenente l'adesivo cianoacrilato. [38]	71
Figura 2.48 Grafici carico-apertura fessura (a) e carico-spostamento (b). Confronto tra i campioni di controllo (identificati con la curva "a"), portati direttamente a rottura, e i campioni contenenti l'adesivo, sottoposti a due cicli di carico (identificati con le curve "b", per il primo carico, e "c" per il secondo). [38].....	72
Figura 2.49 Sezione di provino con cavi d'acciaio, tubi di diametro 8.8 mm con soluzione MMA/cobalto e tubo di diametro 6.2 mm con idroperossido di cumene. [40].....	73
Figura 2.50 Schema di funzionamento del sistema smart concrete di Nishiwaki. [41].....	75
Figura 2.51 Test di permeabilità per piastre (a), relazione tra la massima fessura generata e la quantità di acqua passante attraverso. [41]	76
Figura 2.58 Sezione di un osso esternamente compatto e internamente spugnoso (sinistra), sezione di un cilindro in calcestruzzo poroso in analogia con la composizione di un osso tipo (destra). [42]	76
Figura 2.53 Prova di trazione a deformazione controllata prima e dopo l'utilizzo della resina epossidica. [43]	77

Figura 2.54 Fessura iniziale e formazione fessura finale (a), sezione del campione nella nuova fessura formatasi durante la seconda prova di trazione (b), sezione longitudinale del campione sottoposta a luce ultravioletta e mostrante la matrice porosa e la fessura completamente riempite dalla resina epossidica (c). [43]	78
Figura 2.55 Diagramma carico-apertura fessura relativo a entrambe le prove di flessione, prima e dopo l'iniezione della resina. [43]	78

Capitolo 3

Figura 3.1 Piano sperimentale	86
Figura 3.2 Cemento CEM II/A-L 42,5 R. Confezione (a sinistra), aspetto del materiale (a destra)....	87
Figura 3.3 Foto esemplificative pietrisco frantumato 7/12 (a sinistra), sabbia (a destra).	89
Figura 3.4 Curve granulometriche inerti.....	90
Figura 3.5 Fibre in acciaio, lunghezza 35 mm e diametro 0,55 mm. Immagine presa dal catalogo (a sinistra), aspetto fibre calcestruzzo nelle condizioni di fornitura.....	91
Figura 3.6 Aspetto additivo cristallino al momento della fabbricazione del calcestruzzo.	92
Figura 3.7 Schema logico della metodologia sperimentale.....	93
Figura 3.8 Curva granulometrica impasto AM 0-5, calcestruzzo di controllo.	94
Figura 3.9 Curva granulometrica impasto AM 4S-3, calcestruzzo con additivo cristallino (4%).	95
Figura 3.10 Miscelazione componenti calcestruzzo, fasi principali: Pesatura singoli materiali (1), miscelazione inerti con metà dell'acqua (2), aggiunta cemento, filler e additivo cristallino (3), aggiunta additivo fluidificante (4), aggiunta fibre (5)	97
Figura 3.11 Preparazione stampi in acciaio mediante, utilizzo disarmante (a), campioni lasciati a riposo all'interno della forma per 24 ore (b), disarmo del campioni e sistemazione in camera umida (c).	98
Figura 3.12 Asportazione superfici fino a uno spessore di circa mezzo centimetro e divisione a metà del campione (a), ottenimento di due provini cilindrici con superfici planari (b).....	98
Figura 3.13 Prefessurazione campione con la prova di trazione indiretta (a), disposizione campione tra le piastre (b).....	99
Figura 3.14 Sigillatura delle parti a contatto con i piatti della piastra (a), sigillatura parte della faccia superiore che andrà a contatto con l'anello di gomma necessario per eseguire la prova di permeabilità (b).	100
Figura 3.15 Schema utilizzato per la dimostrazione della Legge di Darcy.....	101
Figura 3.16 Prova di permeabilità modificata.....	102
Figura 3.17 Permeabilmetro utilizzato per effettuare la prova (a), barometro (b), anello di gomma per l'impermeabilizzazione della connessione tra il macchinario e il campione (c), parte del permeabilmetro utilizzata durante la prova (d), stato del campione al momento della prova (e).	103
Figura 3.18 Immersione dei campioni con e senza additivo in due diverse vasche (a), stato dei campioni all'interno delle vasche (b).....	104
Figura 3.19 Campioni immagazzinati in camera umida a 20°C e 95-100% U.R. (a), campioni esposti a aria non trattata (b).....	104

Figura 3.20 Schema del sistema progettato per l'ambiente di cura in cui la fessura è mantenuta sempre bagnata e uno strato di 2 cm di acqua viene mantenuto sopra la superficie superiore....	105
Figura 3.21 Fasi principali montaggio sistema per la sottomissione all'ambiente di cura desiderato.	106
Figura 3.22 Campioni con sistema per il mantenimento della fessura sempre bagnata e di uno strato di 2 cm di acqua sulla superficie superiore immagazzinati all'interno della camera umida a 20°C e 95-100% U.R..	107
Figura 3.23 Utilizzo microscopio ottico per scattare foto ad alta risoluzione della fessura (sinistra), visualizzazione fessura e elaborazione immagini mediante software.	108
Figura 3.24 Comparazione stato della fessura prima (in alto) e dopo (in basso) il periodo di cura. Campione in esame 1—A dell'impasto con additivo cristallino AM 4S-2, fessura inferiore.....	109
Figura 3.25 Esempio foto di riferimento per la determinazione della relazione tra pixel e millimetri.	109
Figura 3.26 Utilizzo dell'aggregato evidenziato come punto di riferimento al momento della sovrapposizione.	110
Figura 3.27 Misurazione distanza tra due punti di riferimento equivalenti tra il panorama e l'immagine di riferimento	111
Figura 3.28 Reticoli sovrapposti alle fessure per la misurazione di cinque ampiezze a distanze definite e quotate in millimetri.....	112
Figura 3.29 Sovrapposizione del reticolo sulla fessura.....	112
Figura 3.30 Calcolo approssimato dell'area come somma delle superfici di cinque rettangoli.....	113
Figura 3.31 Fessura sulla superficie superiore del campione AM 0-7 1-B prima della cura (in alto), pixel neri evidenziati dopo il conteggio (in basso).....	113
Figura 3.32 Fessura sulla superficie superiore del campione AM 0-7 1-B dopo la cura (in alto), pixel neri evidenziati dopo il conteggio (in basso).	114

Capitolo 4

Figura 4.1 Confronto tra flusso d'acqua iniziale e finale. Ambiente di cura: immersione in acqua.	116
Figura 4.2 Confronto tra flusso d'acqua iniziale e finale. Ambiente di cura: fessura bagnata e strato di 2 cm d'acqua sulla superficie superiore.....	116
Figura 4.3 Confronto tra flusso d'acqua iniziale e finale. Ambiente di cura: camera umida.	117
Figura 4.4 Confronto tra flusso d'acqua iniziale e finale. Ambiente di cura: esposizione all'aria non trattata del laboratorio.	117
Figura 4.5 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura, massima tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.	120
Figura 4.6 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura, minima tra le due del campione, in condizioni iniziali.	121
Figura 4.7 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza massima della fessura, minima tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.	121

Figura 4.8 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza massima della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali.	122
Figura 4.9 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.	122
Figura 4.10 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, massima tra le due del campione, in condizioni iniziali.	123
Figura 4.11 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura, media tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.	124
Figura 4.12 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali.	124
Figura 4.13 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza massima della fessura, massima tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.	125
Figura 4.14 Relazione tra i ratio del flusso e dell'ampiezza massima della fessura, media tra le due del campione.	126
Figura 4.15 Relazione tra i ratio del flusso e dell'area in millimetri della fessura, media tra le due del campione.	127
Figura 4.16 Relazione tra i ratio del flusso e dell'ampiezza media della fessura, massima tra le due del campione.	127
Figura 4.17 Relazione tra i ratio del flusso e dell'area in pixel della fessura, media tra le due del campione.	128
Figura 4.18 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura sulla superficie del campione dopo 42 giorni di cura.	129
Figura 4.19 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza massima della fessura sulla superficie del campione dopo 42 giorni di cura.	129
Figura 4.20 Relazione tra i ratio del flusso e dell'ampiezza media della fessura sulla superficie superiore del campione.	130
Figura 4.21 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali.	131
Figura 4.22 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali. Particolare confronto tra i valori relativi ai campioni di controllo e quelli con additivo.	132
Figura 4.23 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali e dopo 42 giorni di cura. Particolare confronto tra i valori relativi ai campioni di controllo e quelli con additivo.	132
Figura 4.24 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Ambiente di cura: immersione in acqua.	134
Figura 4.25 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Ambiente di cura: fessura bagnata e strato di 2 cm d'acqua sulla superficie superiore.	135
Figura 4.26 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Ambiente di cura: camera umida.	136
Figura 4.27 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Ambiente di cura: esposizione all'aria non trattata.	137

Figura 4.28 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Sovrapposizione dati differenti ambienti di cura rispetto il solo calcestruzzo di controllo.	138
Figura 4.29 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Sovrapposizione dati differenti ambienti di cura rispetto il solo calcestruzzo con additivo cristallino.	139
Figura 4.30 Rappresentazione healing rate medio per ogni ambiente di cura e tipologia di calcestruzzo. Le abbreviazioni corrispondono a: I.A. immersione in acqua, C.U. camera umida, F.B. fessura costantemente bagnata, E.A. esposizione ad aria non trattata.	140
Figura 4.31 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Ambiente di cura: immersione in acqua.	142
Figura 4.32 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Ambiente di cura: fessura bagnata e strato di 2 cm d'acqua sulla superficie superiore.	143
Figura 4.33 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Ambiente di cura: camera umida.	144
Figura 4.34 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Ambiente di cura: esposizione all'aria non trattata.	144
Figura 4.35 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Sovrapposizione dati differenti ambienti di cura rispetto il solo calcestruzzo di controllo.	145
Figura 4.36 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Sovrapposizione dati differenti ambienti di cura rispetto il solo calcestruzzo con additivo cristallino.	146
Figura 4.37 Relazione tra flusso d'acqua e ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura. Particolare studio separato dei dati relativi ai campioni di controllo e con additivo.	147
Figura 4.38 Confronto tra gli healing rate del flusso e dell'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione.	148
Figura 4.39 Impasto AM4S-2, campione 2B, superficie inferiore, immersione in acqua. Stato della fessura dopo la cura, evidente formazione di cristalli.	149
Figura 4.40 Impasto AM0-7, campione 1B, superficie superiore, immersione in acqua. Stato della fessura dopo la cura, evidente formazione di cristalli.	149
Figura 4.41 Impasto AM4S-2, campione 2B, superficie inferiore, immersione in acqua. cristalli prima e dopo la pulitura con aria compressa.	150
Figura 4.42 Impasto AM4S-2, campione 2B, superficie inferiore, immersione in acqua. Particolare formazione di cristalli all'interno di un poro di grosse dimensioni.	150
Figura 4.43 Impasto AM4S-4, campione 2A, superficie inferiore, fessura costantemente bagnata e strato spesso 2 cm di acqua liquida sulla superficie superiore. Stato della fessura dopo 42 giorni di cura.	151
Figura 4.44 Impasto AM4S-4, campione 2A, superficie superiore, fessura costantemente bagnata e strato spesso 2 cm di acqua liquida sulla superficie superiore. Stato della fessura dopo 42 giorni di cura.	152
Figura 4.45 Impasto AM0-5, campione 1°, superficie superiore, fessura costantemente bagnata e strato spesso 2 cm di acqua liquida sulla superficie superiore. Stato della fessura prima e dopo la cura, particolare zoom sulla formazione di cristalli.	152

Figura 4.46 Evoluzione delle fessure dei campioni esposti all'aria trattata della camera umida e all'aria non trattata del laboratorio. Particolare zoom della stessa sezione di fessura, prima e dopo la cura.....	153
Figura 4.47 Effetto dell'ampiezza iniziale della fessura sulla sua riduzione. [33].....	154
Figura 4.48 Evoluzione del self-healing ratio durante il periodo di cura per fessure di diversa ampiezza e campioni prefessurati a tre giorni. [28].	155

Appendici

Figura A.1 Prova di abbassamento del cono: riempimento del cono (a), costipazione dell'impasto tramite barra d'acciaio con punta arrotondata (b), sfilamento del cono in un tempo compreso tra 2 e 5 secondi (c), misurazione differenza delle altezze tra la forma e il cono di calcestruzzo.....	166
Figura A.2 Misurazione dell'abbassamento. UNI EN 12350-2.....	166
Figura A.3 Classi di abbassamento al cono (slump). UNI EN 206-1:2006.	167
Figura A.4 Slump test, abbassamento del cono. Codificazione impasti: 0%, campioni di controllo, 4% campioni con additivo cristallino.	167
Figura A.5 Tipi di rotture ritenute soddisfacenti dalla norma UNI EN 12390-3.	169
Figura A.6 Resistenza a compressione a 28 giorni degli impasti miscelati. In rosso sono rappresentati i campioni di controllo, mentre in blu quelli con contenuto di additivo cristallino pari al 4% nel peso di volume del cemento.	170

Indice delle tabelle

Tabella 3.1 Granulometria inerti.....	89
Tabella 3.2 Caratteristiche inerti.....	89
Tabella 3.3 Dosaggio utilizzato.....	95
Tabella A.1 Abbassamento del cono relativo ad ogni impasto miscelato	167

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

Capitolo 1 – INTRODUZIONE

1.1 – Introduzione

Negli ultimi trent'anni il concetto di sostenibilità ha acquistato molta importanza, poiché il problema dell'utilizzo eccessivo delle risorse ha portato al formarsi di una coscienza collettiva atta a valorizzare le risorse naturali in ogni aspetto della società moderna, integrandolo nella dimensione economica, sociale e istituzionale. Col tempo si è cercato di applicare questo concetto in ogni processo di produzione, che sia industriale o manifatturiera, cambiandone l'organizzazione e la gestione. Questo cambiamento ha coinvolto tutte le tipologie di aziende, dalle classiche, il cui principale obiettivo è di produrre e vendere un determinato prodotto in grandi quantità, a quelle più particolari i cui prodotti richiedono periodi di fabbricazione lunghi e una vita utile superiore ai cinquant'anni.

In questa seconda categoria rientrano tutte le aziende che lavorano nel campo dell'edilizia. Questo nuovo approccio, infatti, ha avuto un impatto molto forte poiché la rivoluzione nella gestione del processo costruttivo ha coinvolto tutti gli aspetti, dalla progettazione fino alla gestione e smaltimento dei rifiuti in cantiere. Quando si parla di strutture in calcestruzzo il parametro principale da soddisfare è quello della durabilità, in altre parole la capacità di durare per l'intero periodo di vita atteso garantendo il servizio per il quale la struttura stessa è stata progettata, riducendo al minimo la manutenzione ordinaria ed eliminando quella straordinaria.

Il fattore principale che influisce sulla durabilità di una struttura in calcestruzzo armato è la fessurazione degli elementi che la costituiscono. Infatti, ciò permette la penetrazione di acqua o di altri agenti aggressivi che possono compromettere lo stato dell'armatura in acciaio presente al suo interno. Ci si è così avvicinati al concetto di self-healing, in altre parole auto guarigione, del calcestruzzo. L'utilizzo del termine "guarigione" serve proprio a evidenziare il paragone con la medicina; l'idea è proprio quella di trovare una metodologia di mix-design che permetta di pensare al calcestruzzo come un materiale capace di riparare danni di piccole entità così da recuperare le proprietà compromesse da tale danno. Il paragone è molto forte quando si pensa alle fessure come a ferite superficiali del corpo umano, capaci di ripararsi in tempi mediamente brevi.

Il problema della fessurazione, come accennato in precedenza, implica il possibile ingresso di acqua o di semplice umidità all'interno dell'elemento strutturale. Tale fenomeno, oltre che essere responsabile di alcune reazioni chimiche non desiderate, favorisce il flusso di altre sostanze aggressive sulle strutture e determina la loro penetrazione all'interno dei pori del calcestruzzo.

I processi di deterioramento cui sono soggetti gli elementi strutturali che presentano una fessurazione eccessiva sono diversi. Innanzitutto la corrosione delle armature, poiché i prodotti di tali reazioni chimiche comportano un iniziale aumento di volume con conseguente espansione, formazione di fessure da splitting ed espulsione dei copri-ferri; si ha, inoltre, la riduzione della

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

sezione dell'acciaio con conseguente riduzione della capacità portante. Quindi si citano gli effetti dei cicli di gelo/disgelo dovuti alla ripetuta formazione di ghiaccio, che provocano effetti di degrado a causa delle pressioni interne dovute all'aumento di volume dell'acqua, presente all'interno delle fessure, durante il processo di solidificazione. Infine la possibilità di attacchi chimici dovuti alla presenza di sostanze aggressive solide, liquide o gassose il cui ingresso è stato favorito proprio dalla presenza dell'acqua o dell'umidità. [1]

Recentemente sono state proposte diverse metodologie per la progettazione di calcestruzzo in grado di auto ripararsi, partendo dal semplice studio di particolari miscele capaci di indurre un processo di guarigione autogeno, fino alla completa ingegnerizzazione di tale processo utilizzando batteri o additivi specifici capaci di attivarsi solo all'apertura della fessura. Tali studi saranno esposti in seguito così da rendere più chiare le scelte effettuate in questo lavoro di tesi.

1.2 - Obiettivi

Questo studio si è posto come obiettivo quello di verificare l'effettiva influenza di specifici additivi cristallini sulla capacità di chiusura delle fessure negli elementi in calcestruzzo fibrorinforzato. In particolare è stato usato un dosaggio elevato di tale additivo, pari al 4% del peso di volume del cemento. Essendo un tema di recente implementazione, non esista ancora una metodologia di studio consolidata, cosicché sono state studiate diverse tipologie di misurazione dei dati, verificando contemporaneamente gli effetti dell'additivo cristallino.

Per fare ciò è stato predisposto un piano sperimentale basato sulla metodologia implementata dall'università ospitante, che utilizza provini cilindrici, sostanzialmente mutati dalle prescrizioni per la prova di trazione indiretta (splitting), prefessurati. Analizzando i risultati e osservando i problemi riscontrati durante studi precedenti, si è cercato di migliorare la metodologia modificando la procedura di alcune prove e circostanziando in maniera adeguata il campo di studio.

I parametri scelti per la determinazione degli effetti dell'additivo cristallino sono il flusso d'acqua, misurato in peso del fluido, che passa all'interno dei campioni fessurati e l'area delle fessure. Per la prima tipologia di parametri è stata eseguita la prova di permeabilità con pressione quasi costante (1,9÷2,1 bar) e con durata stabilita pari a cinque minuti. Mentre per quanto riguarda la seconda, sono state analizzate foto al microscopio delle fessure presenti sulle superfici dei campioni.

I risultati ottenuti appartengono a due gruppi principali di campioni, il primo composto da cilindri in calcestruzzo fibrorinforzato ordinario mentre il secondo da cilindri in calcestruzzo nel cui impasto è stato aggiunto l'additivo. Dal confronto dei valori dei due rispettivi gruppi sono state tratte le conclusioni riguardanti lo studio in oggetto. In particolare sono state studiate quattro condizioni di esposizione ambientale, così da verificare sotto quali vincoli il fenomeno di "guarigione" possa essere attivato e con quale diversa efficacia.

1.3 - Struttura del documento

Il presente elaborato è strutturato in cinque sezioni. La prima è il presente capitolo e comprende l'introduzione alla ricerca, gli obiettivi che si vogliono raggiungere e la struttura del documento.

Nel secondo capitolo viene presentato lo stato dell'arte relativo all'applicazione del concetto di self-healing per le strutture in calcestruzzo. In particolare viene spiegato cosa si intende in generale con il termine self-healing e quali approcci sono stati proposti e studiati in precedenti ricerche. Particolare attenzione è stata posta per quelle riguardanti gli additivi cristallini.

Nel terzo capitolo vengono spiegati la metodologia utilizzata e il piano sperimentale. Il capitolo comprende, inoltre, la descrizione dei materiali utilizzati e delle principali fasi della fabbricazione dei campioni necessari per effettuare lo studio. Infine, vengono descritte le diverse metodologie utilizzate per la valutazione delle fessure presenti sui campioni.

Nel quarto capitolo vengono presentati tutti i risultati ritenuti rilevanti ai fini delle conclusioni. Viene mostrato l'andamento generale del flusso d'acqua durante il periodo di cura. In seguito valutata quale metodologia di misurazione della fessura risulti la più adatta allo studio della permeabilità nei campioni cilindrici di calcestruzzo. Particolare enfasi è stata data agli indici di guarigione, in grado di valutare numericamente il grado di self-healing raggiunto. È stato presentato, quindi, uno studio sull'aspetto delle fessure al termine della cura e sulla formazione dei cristalli visibili all'interno delle fessure sigillate o dei pori presenti sulla superficie. In conclusione, vengono confrontati i risultati con quelli ottenuti in ricerche analoghe.

Il capitolo cinque spiega in maniera sintetica le conclusioni finali, valutando il self-healing del calcestruzzo inteso come diminuzione della permeabilità. Vengono, infine, presentate le future linee di studio in base a quanto rilevato in questa ricerca, focalizzandosi sulla possibilità di migliorare la caratterizzazione del self-healing.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

Capitolo 2 - STATO DELL’ARTE

2.1 Introduzione

Come in precedenza detto nell’introduzione di questo elaborato, la possibilità di migliorare la sostenibilità delle strutture in calcestruzzo armato mediante l’uso di materiali autoriparanti, motiva la necessità di meglio indagare sulle proprietà di tali materiali e sugli effettivi vantaggi conseguenti al loro utilizzo. Ciò risulta essere ancora più importante quando si parla di infrastrutture, in quanto proprio per questo tipo di costruzioni vengono, in maniera sempre più determinante, richiesti un alto livello di prestazione d’uso, una elevata durabilità ed il minimo impatto ecologico possibile. Molte opere destinate ai servizi pubblici costruite nella seconda metà del secolo scorso stanno rapidamente raggiungendo livelli di degrado elevati, riducendo la propria funzionalità a causa del deterioramento dei materiali. Inoltre il continuo aumento della popolazione ha causato un incremento della domanda d’infrastrutture in grado di garantire un elevato livello di prestazione in servizio.

Il graduale degrado di una struttura continua fino a quando è necessario un primo intervento urgente di riparazione, mentre i successivi, molto spesso, sono richiesti dopo intervalli di tempo via via più ridotti. Questo tipo di manutenzione influisce molto sul costo totale di una struttura, poiché sarebbe più economico spendere di più in fase di costruzione, utilizzando materiali migliori dal punto di vista prestazionale, evitando o dilazionando nel tempo l’intervento umano legato a riparazioni più o meno importanti ed estendendo il più possibile la vita utile di un edificio. Diversi studi si sono concentrati sull’impatto della manutenzione ordinaria e straordinaria sui costi totali di una struttura mostrando un quadro piuttosto preciso della situazione attuale. Van Bruegel [2] sostiene che in Europa, per esempio, il 50% del budget annuale relativo alle costruzioni è speso nella riqualificazione e riparazione di edifici esistenti. La realtà non è molto diversa negli Stati Uniti dove il costo per la manutenzione di un ponte arriva mediamente a circa 5.2 miliardi di dollari in totale, ai quali vanno aggiunti i costi dovuti all’incremento del traffico, all’impatto economico che il rallentamento della viabilità comporta ed alla produzione di CO₂ collegata, portando questa spesa a essere dieci volte maggiore. Sempre Van Bruegel [2] propone un grafico relativo alla variazione dei costi e delle prestazioni di una struttura durante la sua vita utile, qui ne viene riportata la versione semplificata da Schlangen e Sangadji [3]:

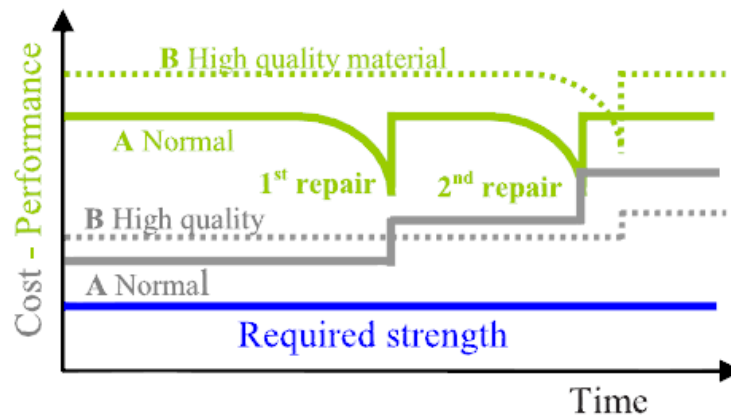


Figura 2.1 Rappresentazione schematica di prestazioni e costi, inclusi i costi diretti di riparazione, in funzione del tempo per strutture/costruzioni/infrastrutture realizzate con materiali normali (A) e di alta qualità (B).

Citando Van Bruegel, “migliorando la longevità delle infrastrutture esistenti verrà ridotto, senza dubbio, l’impatto delle attività dell’uomo sulla stabilità della biosfera” [2]. Basti pensare, per esempio, che solo l’aumentare della vita utile di una struttura importante per l’erogazione di servizi, comporta una diminuzione della richiesta di realizzazione di nuove infrastrutture simili e così l’uso di materiale grezzo da costruzione.

È così che si è iniziato a pensare ai self-healing materials (materiali auto-riparanti), ispirandosi ai sistemi biologici in grado di curare danni di piccole entità senza interventi esterni. La caratteristica comune di questi materiali è di riuscire a rilevare un danno e avviare una procedura di auto riparazione, rinnovando le proprie prestazioni continuamente e allungando la vita utile propria e dei manufatti con essi realizzati. L’ideale per le infrastrutture sarebbe di non avere costi di manutenzione e riparazione poiché il materiale possiede la capacità intrinseca di ripararsi continuamente e completamente al semplice innescarsi di qualsivoglia forma di danno.

La sostenibilità non è l’unico fattore positivo dei materiali auto riparanti nell’edilizia. In alcuni casi è molto difficile accedere alle parti danneggiate, sia per verificare l’entità del danno sia per ripararlo, a causa della loro posizione o delle condizioni ambientali. Alcuni esempi possono essere gli elementi strutturali sotterranei, gli impianti di smaltimento dei rifiuti radioattivi, o le pareti di serbatoi per lo stoccaggio di rifiuti molto tossici.

Detto ciò, il nuovo modo di concepire il calcestruzzo come materiale auto riparante permetterà di usufruire di questa capacità, in parte intrinseca, rivoluzionando il mix design e modificando la progettazione delle strutture. Per compiere tali cambiamenti, però, sono necessarie una conoscenza completa del fenomeno, la definizione dei vincoli ai quali è soggetto e l’implementazione di una serie di tecnologie o metodologie in grado di renderlo più efficace. Per questo motivo, l’argomento ha destato l’interesse di molti ricercatori negli ultimi anni che si sono concentrati nello sviluppare questo tipo di tecnologia al fine di implementarla concretamente nei processi di realizzazione propri dell’ingegneria civile ed edile.

2.2 Self-Healing and Self-Repairing materials

I materiali auto riparanti sono una classe di materiali intelligenti che hanno la capacità intrinseca di riparare i danni causati da un utilizzo meccanico prolungato nel tempo. L’apertura di fessure e altri danni, anche a livello microscopico, hanno dimostrato un’influenza rilevante sulle proprietà termiche, elettriche, acustiche e meccaniche dei materiali, portandoli al di sotto dei valori di progetto. Normalmente le fessure vengono riparate a mano, ma questo non sempre si riesce a fare in quanto spesso le fessure stesse sono molto difficili da individuare. Perché un materiale si possa definire auto riparante, è necessario che il processo di guarigione avvenga senza l’intervento umano.

Nel calcestruzzo con il termine self-healing, ci si riferisce ai meccanismi di chiusura delle fessure, molti dei quali richiedono la presenza di acqua o di un’umidità elevata. Negli ultimi anni molte ricerche si sono focalizzate sul possibile recupero delle proprietà meccaniche e sulla completa sigillatura delle fessure così da bloccare il passaggio dell’acqua. Generalmente, tali fessure possono svilupparsi in qualsiasi momento della vita di servizio di una struttura in calcestruzzo e sono dovute principalmente alle instabilità di volume, ossia a fenomeni quali il ritiro autogeno o l’igrometrico, oltre che ovviamente ad azioni di qualsiasi natura che inducano tensioni superiori alla resistenza a trazione del materiale.

Nel corso degli anni diverse sono state le definizioni date ai fenomeni legati al self-healing, in funzione di come si cerca di implementarli e di quali proprietà si vogliono recuperare. Mihashi e Nishiwaki [4], in un esaustivo stato dell’arte sull’argomento, hanno raggruppato tutte le metodologie studiate in due grandi categorie. Essi inquadrano nell’ambito del cosiddetto “engineered self-healing” gli approcci che si focalizzano su opportune tecnologie ingegneristiche volte a stimolare la capacità del calcestruzzo di risigillare le fessure, mentre definiscono quali “self-repairing” gli approcci che mirano raggiungere la completa riparazione delle fessure, integrando, già nell’impasto, opportuni “costituenti additivi” finalizzati a tale scopo. La seconda tipologia viene suddivisa in auto riparazione passiva e attiva: la prima si riferisce all’utilizzo di elementi funzionali posti nelle parti maggiormente soggette alla formazione di fessure, come ad esempio i lembi tesi delle travi, mentre la seconda si riferisce a tutti quei sistemi che monitorano, mediante l’ausilio di sensori, la larghezza delle fessure e attivano sistemi per la riparazione solo al superamento di un dato valore di soglia.

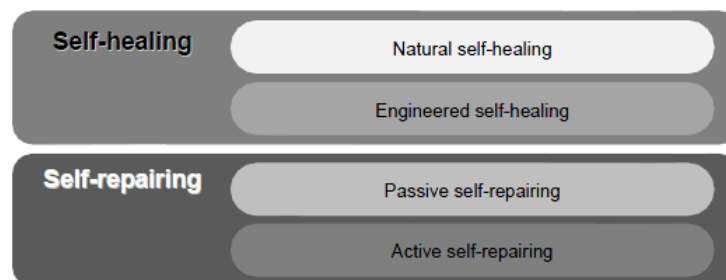


Figura 2.2 Definizione di Self-Healing e Self-Repairing del calcestruzzo. Mihashi, Nishiwaki [4].

In questo studio si è inoltre preferito suddividere i processi relativi al self-healing, in due gruppi principali: auto riparazione autogena, o naturale, e auto riparazione ingegnerizzata. Con la prima si fa riferimento a quelle procedure e modalità di progettazione della composizione della miscela che permettono di ottenere calcestruzzo auto riparante con la scelta di opportuni componenti, e delle relative quantità, che normalmente già si utilizzano per il confezionamento di calcestruzzi: si citano ad esempio aggiunte come ceneri volanti, loppe di altoforno, fumo di silice e altri materiali pozzolanici. Con la seconda dizione invece si fa riferimento a tutti quei sistemi che prevedono l'utilizzo di specifici additivi con la sola funzione di implementare tale fenomeno, o l'impiego di elementi funzionali immersi nel getto che si attivano all'apertura delle fessure.

2.3 Self-Healing autogeno

È risaputo da diverso tempo che il calcestruzzo possiede la capacità intrinseca di chiudere piccole fessure, diminuendo, e a volte bloccando completamente, il flusso d’acqua attraverso di esse. In questo caso si parla di self-healing autogeno poiché si vuole enfatizzare come un normale calcestruzzo riesca a ripararsi senza alcun aiuto dall’esterno. Diversi studi si sono quindi concentrati nel capire quali sono i parametri che effettivamente influenzano lo svolgersi di questo fenomeno. Già Ramm e Bischoff [5] hanno affermato che i possibili meccanismi per la chiusura delle fessure sono:

- La idratazione continuata del cemento;
- L’espansione delle particelle del calcestruzzo lungo i labbri delle fessure;
- La precipitazione del carbonato di calcio per “carbonatazione”;
- Il deposito di materia solida contenuta nell’acqua;
- Il deposito di frammenti di calcestruzzo derivanti dalla fessurazione stessa.

Ter Heide [6] ha fornito una spiegazione più approfondita riguardo alle possibili cause e ha studiato anche quali siano le condizioni che rendono possibile questo fenomeno.

Nella figura seguente sono riassunte le possibili cause della riparazione autogena, in particolare gli ultimi due meccanismi, sopra citati, sono stati raggruppati (caso b in figura 2.3), perché non si riferiscono a nessuna reazione chimica ma solo ad una condizione probabile.

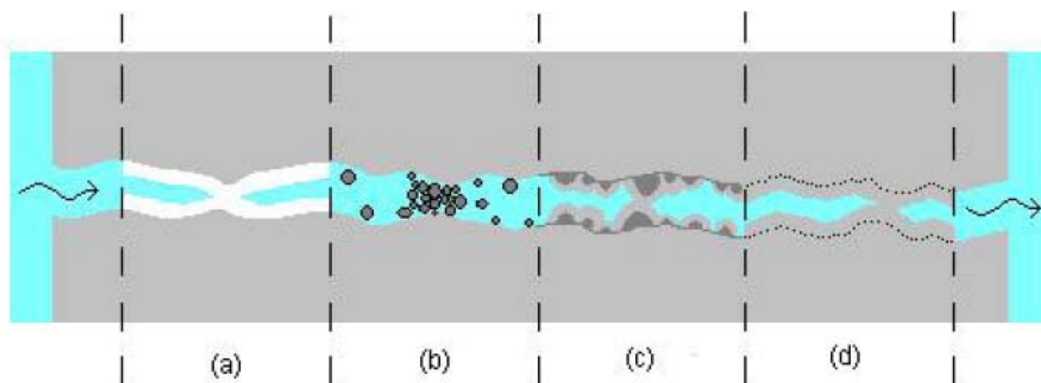
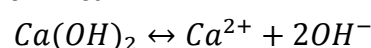


Figura 2.3 Possibili cause dell'auto guarigione: (a) formazione di carbonato di calcio o idrossido di calcio, (b) sedimentazione di particelle, (c) idratazione continua, (d) rigonfiamento della matrice cementizia. Ter Heide [6].

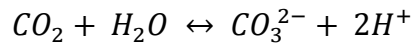
Le possibili cause della riparazione autogena sono:

1) Formazione di carbonato di calcio o idrossido di calcio

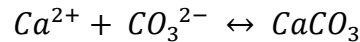
Per la formazione del carbonato di calcio è necessaria la presenza sia dell'idrossido di calcio sia dell'anidride carbonica, entrambi dissolti in acqua. Il primo è un prodotto della reazione d'idratazione del cemento e all'interno della fessura può sciogliersi in acqua e precipitare sulla superficie. Di seguito la reazione chimica:



In questo modo vengono liberati i cationi Ca^{2+} , dissoltisi nell'acqua penetrata all'interno della fessura. La presenza di anidride carbonica in acqua, invece, comporta la formazione di CO_3^{2-} secondo la seguente reazione:



Si crea, quindi, un ambiente in cui sono presenti cationi Ca^{2+} e anioni CO_3^{2-} disciolti in acqua. Tale condizione promuove la formazione del carbonato di calcio, come illustrato di seguito, il quale, precipitando lungo i labbri della fessura ne promuove la richiusura:



2) *Sedimentazione di particelle*

Le particelle contenute nel liquido che attraversa la fessura, o i frammenti generatisi al momento della formazione delle due nuove superfici, possono essere trasportati dal flusso e incastrarsi nelle zone più strette, così da ostruire il passaggio di fluidi.

3) *Idratazione continuata*

Al momento della formazione della fessura, sarà presente, all'interno di essa, del cemento non ancora idratatosi, che viene così a trovarsi esposto all'acqua ovvero alla umidità esterna. Il procedere delle reazioni di idratazione per tale cemento e la conseguente formazione di nuovo idrossido di calcio contribuiscono alla sigillatura della fessura.

4) *Rigonfiamento della matrice cementizia*

In condizione di saturazione le superfici della fessura sono soggette ad un rigonfiamento che comporta la riduzione dello spessore della sua apertura. In questo modo si possono chiudere fessure poco aperte o possono verificarsi altri meccanismi di "guarigione". Resta, comunque, il fatto che una volta evaporata l'acqua, le dimensioni della fessura ritornano quelle iniziali.

Diversi studi si sono concentrati sul determinare quale di questi meccanismi influisca maggiormente sulla sigillatura. La formazione del carbonato di calcio è la causa più probabile ed efficace poiché è supportata dal fatto che i risultati di tali reazioni chimiche sono molto evidenti nei campioni studiati, e i precipitati appaiono come eruzioni bianche fuoriuscenti dalle fessure. Inoltre è stato osservato che la causa principale dell'iniziale e veloce riduzione del flusso è dovuta al depositarsi delle particelle contenute nell'acqua.

Tuttavia la probabilità che si attui un meccanismo rispetto a un altro dipende dall'età del calcestruzzo al momento della fessurazione. Nei calcestruzzi molto giovani, infatti, l'idratazione continua è il principale meccanismo di autoriparazione, e ciò è dovuto all'alto contenuto di particelle di cemento non ancora idratatesi. In quelli più vecchi, invece, la precipitazione del carbonato di calcio è il meccanismo principale del self healing.

Takagi et al. [7] sostengono che qualsiasi meccanismo che promuova la carbonatazione di $Ca(OH)_2$ dissolto permette la significativa riduzione del flusso di acqua. Principalmente si parla di trovare un metodo sistematico per la determinazione di un mix-design che permetta, in determinate condizioni, di promuovere tale processo. Per fare ciò diversi ricercatori hanno provato differenti miscele di calcestruzzo aggiungendo rispettivamente:

- a. ceneri volanti, fumo di silice e scorie di alto forno con la funzione di riempire le fessure con la formazione dei silicati idrati di calcio quasi amorfo (C-S-H) dovuta alla reazione pozzolanica;
- b. fibre di tipo duttile per rafforzare la matrice cementizia che, rendendo il materiale stesso più duttile, permettono l'apertura di fessure di piccole dimensioni, così da promuovere la formazione di prodotti di guarigione autogeni grazie allo spazio ristretto tra le superfici delle fessure stesse;
- c. geo-materiali e agenti chimici a base di carbonato, utilizzati come catalizzatori cristallini così da favorire la ricristallizzazione dei vuoti creati per la formazione delle fessure.

Sempre Ter Heide [6] afferma che esistono delle condizioni necessarie per massimizzare la probabilità che avvenga il fenomeno del self-healing. Tali condizioni sono:

1) Presenza di acqua

La presenza di acqua è essenziale per tutti i meccanismi sopra citati, basti pensare che già quando l'umidità relativa scende sotto il 95%, l'entità di tale fenomeno è di molto inferiore.

2) Ampiezza della fessura

L'auto guarigione è possibile solo per le fessure di piccola entità. È stato osservato che con il passare del tempo è possibile chiudere fessure più grandi, ma che, superato un certo limite, il fenomeno non continua a verificarsi. Tale limite, ad oggi, non è ancora stato definito, in quanto le tecniche sperimentali variano molto da ricerca a ricerca e resta ancora un tema di discussione aperto e difficile da affrontare. Molti autori hanno analizzato fessure con ampiezze che variano dai 10 μm ai 300 μm dimostrando che solo per le più piccole è assicurata la completa ri-sigillatura. Ter Heide [6] ha studiato gli effetti dell'applicazione di una forza di compressione atta ad avvicinare le facce della fessura, e verificando come questo ne favorisca la chiusura.

3) Pressione dell'acqua

Quando l'acqua attraversa la fessura con velocità troppo elevata il self-healing non si verifica, e questo è dovuto principalmente al fatto che i cristalli hanno bisogno di tempo per precipitare.

4) Il liquido non può portare a una reazione di filtrazione o dissoluzione

Un liquido con queste proprietà, può influenzare i prodotti di cura formati all'interno della fessura.

5) Stabilità della fessura

La fessura deve essere stabile, infatti, quando passa da una condizione statica a una dinamica, che ne comporta la variazione dell'ampiezza, i prodotti delle reazioni di self healing vengono danneggiati.

In conclusione, la seguente immagine riassume i principali criteri dell'auto riparazione intrinseca:

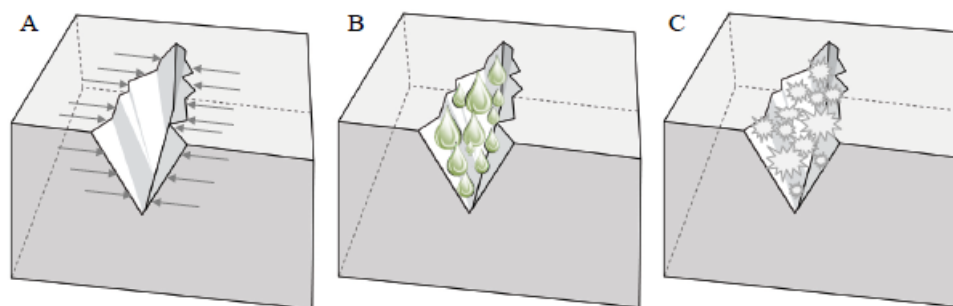


Figura 2.4 Approcci per facilitare l'auto guarigione autogena. Presenza di stati tensionali di compressione attraverso la fessura (A), fornitura di acqua (B), miglioramento dell'idratazione e della cristallizzazione (C). Tittelboom, De Belie [8].

Per sfruttare i meccanismi sopra citati sono state approntate diverse metodologie. L'aumento della quantità di cemento e la diminuzione dell'acqua dell'impasto sono alla base di tali ragionamenti, poiché favoriscono l'aumento del numero delle particelle di cemento che non riescono ad idratare e si rendono disponibili per le reazioni di "idratazione ritardata" che caratterizzano i processi di self healing. A tal fine, il rapporto acqua/cemento, che nei calcestruzzi ordinari si attesta intorno a 0,60/0,65, deve scendere fino a valori di 0,35/0,40.

Di seguito vengono descritti in breve gli approcci e le tecniche utilizzate per favorire il processo di riparazione autogena.

2.3.1 Utilizzo di aggiunte reattive

L'utilizzo di materiali reattivi, come ceneri volanti (fly ashes - FA), loppe (blast furnace slags - BFS) e fumi di silice (silica fume - SF), quando si parla di self-healing, ha lo scopo di sfruttare la tardiva idratazione delle particelle che li compongono. L'idea è di aumentare la probabilità che, al momento della formazione di una fessura, siano presenti particelle in grado, a contatto con acqua, di avviare una reazione capace di far precipitare cristalli di carbonato di calcio e idrossido di calcio.

Già nel 1956 Lauer e Slate [9] notarono un aumento della resistenza a trazione dovuto alla sigillatura delle fessure in campioni di calcestruzzo contenenti aggiunte di calce e ceneri volanti. L'analisi al microscopio evidenziò che a chiudere le fessure non erano stati i prodotti amorfi dell'idratazione del cemento, ma i cristalli di carbonato di calcio e d'idrossido di calcio formati a contatto con l'acqua.

Zhong e Yao [10] nel 2008 hanno studiato il grado di "guarigione" di calcestruzzi a normale resistenza, contenenti ceneri volanti nella proporzione del 25% in peso di cemento, e ad alta resistenza, contenenti scorie d'altoforno (90%) e fumo di silice (10%). Essi sono giunti a sostenere che il self-healing è marcatamente influenzato dal livello del danno prodotto sul calcestruzzo. Valutando le caratteristiche meccaniche e ultrasoniche è stato notato che superata una certa soglia di danno, il fenomeno non è più rilevante. Tale limite è presente per entrambe le tipologie e, in particolare, quella del calcestruzzo a normale prestazione è superiore, risultando, in termini di self-healing più performante.

Tittelboom et al. [11] nel 2012 sostengono che sostituendo parte del cemento con scorie d’altoforno o ceneri volanti viene incrementato il meccanismo dell’idratazione tardiva delle particelle di cemento, mentre la quantità di carbonato di calcio prodotto rimane invariata. Il programma sperimentale da essi realizzato ha previsto la preparazione di diverse miscele di calcestruzzo caratterizzate da un rapporto a/c pari a 0.40 e raggruppabili in tre categorie: di controllo, contenenti il 66-80% di scorie d’altoforno (in peso rispetto al cemento) e contenenti il 21-35% tra scorie d’altoforno, ceneri volanti e calcare (sempre in peso rispetto al cemento). A 28 giorni, i campioni (prismi aventi dimensioni pari a 10x40x160 mm) sono stati fessurati mediante una prova di flessione a tre punti e l’ampiezza delle fessure valutata mediante metodi ottici. In seguito i campioni sono stati immersi in acqua per la durata di sei settimane, eseguendo test intermedi durante il periodo di cura a 1, 4, 7, 14, 21 giorni.

Nei primi due giorni di cura i provini realizzati con il calcestruzzo e di controllo hanno mostrato una maggiore produzione di calore, dovuta alla reazione esotermica di idratazione del cemento, mentre per campioni contenenti un’alta percentuale di scorie d’altoforno e quelli contenenti ceneri volanti il calore prodotto è stato inferiore. Questo fatto è dovuto alla quantità di legante idraulico non ancora reagito, che quindi avvia una reazione veloce all’ingresso di acqua nella fessura.

Per quanto riguarda la formazione di cristalli, sono stati osservati solo quelli presenti sulle superfici dei provini. È stato notato che molti dei campioni sono riusciti a sigillare completamente le fessure già dopo solo un giorno di cura, (si parla, comunque, di fessure mediamente più piccole). Per le fessure di maggiore entità (con ampiezza superiore ai 50-100 μm), invece, la chiusura è avvenuta in modo più graduale durante i successivi 45 giorni. Nella figura 2.5 le specie sono state suddivise in due gruppi principali in funzione della larghezza della fessura iniziale, ovvero a sinistra troviamo quelle tra 0 e 125 μm , mentre a destra tra 125 e 250 μm . Si può notare come solo i campioni di controllo e quelli contenenti ceneri volanti sono stati prefessurati fino a valori di ampiezza di fessura appartenenti al secondo gruppo. Inoltre dai grafici proposti risulta evidente come il calcestruzzo ordinario abbia raggiunto un indice di auto-chiusura quasi sempre maggiore rispetto alle altre tipologie. Questo fatto suggerisce come l’utilizzo di questi materiali reattivi in realtà ostacoli la formazione dei cristalli di carbonato di calcio e quindi il meccanismo di self-healing più efficace. Tale comportamento potrebbe essere, comunque, dovuto al fatto che le reazioni pozzolaniche proprie di queste aggiunte si attivano solo dopo che è avvenuta una significativa idratazione del cemento, perchè la presenza di CaOH è necessaria per la loro attivazione.

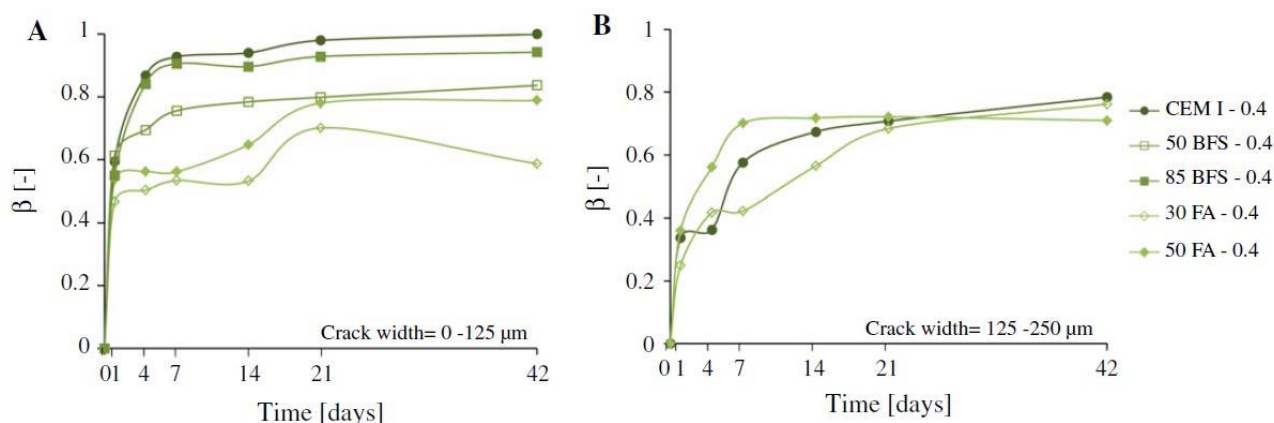


Figura 2.5 Indice di auto-chiusura delle fessure in rapporto al tempo di cura e all'apertura iniziale delle fessure. (a) intervallo tra 0-125 μm , (b) intervallo tra 125-250 μm . Vengono analizzati cinque diversi calcestruzzi: CEM I, controllo; 50 BFS, contenente 50% nel peso di volume di cemento di scorie d'alto forno; 85 BFS, contenente 85% di scorie d'alto forno; 30 FA, contenente 30% di ceneri volanti; 50 FA, contenente 50% di ceneri volanti. [11]

Nella prima settimana di cura la formazione dei cristalli è molto veloce, soprattutto nelle fessure di piccole dimensioni. Il grafico a destra mostra che, per ampiezze superiori a 125 μm , l'incremento dell'indice β è più basso, confermando quanto affermato in altri studi riguardo la difficoltà di chiudere fessure di ampiezza maggiore.

Per valutare il recupero della resistenza, i campioni sono stato sottoposti di nuovo alla prova di flessione a tre punti dopo 71 giorni di cura. Non è stata evidenziata nessuna particolare differenza tra i diversi impasti studiati. Il recupero, comunque, si attesta intorno al 20% e sembra essere dovuto alla continua idratazione del cemento più che alla precipitazione di CaCO_3 , poiché il materiale che ha riempito la fessura possiede una resistenza di molto inferiore a quella del composto cementizio originario.

Aumentando il contenuto di ceneri volanti, fino a percentuali molto elevate, Sahmaran et al. [12] hanno studiato il recupero della resistenza meccanica dovuto alla riparazione delle fessure. Il calcestruzzo utilizzato è di tipo auto-compattante e ad altissimo contenuto di ceneri volanti (High Volume Fly Ash Self Consolidated Concrete - HVFA-SCC). Più precisamente sono state approntate tre diverse miscele in cui la massa totale di legante (cemento portland + ceneri volanti) è stata mantenuta costante: la prima contenente il 35% di ceneri volanti, la seconda il 55% e l'ultima di controllo. Il danno è stato indotto mediante il raggiungimento del 70% e del 90% del carico massimo a compressione a 28 giorni e, una volta fessurati, i campioni sono stati immersi in acqua satura di calce per i successivi 30 giorni.

I risultati indicano che utilizzando una quantità così elevata di ceneri volanti la resistenza a compressione è minore, mentre la permeabilità inferiore. Tali risultati confermano precedenti studi, poiché l'utilizzo di tali aggiunte permette di ottenere un impasto più denso, con minore resistenza in calcestruzzi giovani, minore porosità e micro-fessurazione di minore entità nelle zone di transizione fra pasta cementizia e aggregati. L'effetto della "guarigione" delle fessure è evidente dal confronto tra la perdita di resistenza al momento della prefessurazione e quella dopo il periodo di cura. Tale perdita è stata valutata come rapporto tra il valore di resistenza, a 28 giorni, dei provini caricati fino al 70% o al 90%, con quelli di controllo non danneggiati. In particolare sono

stati studiati due gruppi di campioni: il primo composto da provini non danneggiati, utili per controllare l'influenza della presenza delle aggiunte sulla resistenza, mentre il secondo composto da provini precaricati a diversi livelli. Per i campioni in calcestruzzo auto-compattante con elevato contenuto in ceneri volanti (HVFA-SCC High volume fly ash Self Compacting Concrete), caricati fino al 90% della resistenza a compressione, si è passati da una perdita del 27% ad una del 7% rispetto al valore delle specie vergini a 28 giorni. Al contrario per il calcestruzzo ordinario si è passati da una perdita del 19%, al momento della prefessurazione, a una pari al 13% dopo un mese di cura. Il recupero della resistenza e la diminuzione della permeabilità dei campioni HVFA-SCC sono dovuti al progressivo riempimento delle fessure con il nuovo gel C-S-H formatosi con reazione pozzolanica.

2.3.2 Engineered Cementitious Concrete

I composti cementizi ingegnerizzati, d'ora in avanti chiamati ECC (Engineered Cementitious Composites), sono particolari composti cementizi (malte, visto il ridotto valore del diametro massimo dell'aggregato) rinforzati con fibre corte (circa il 2% nella frazione di volume dell'impasto), solitamente polimeriche o in acciaio, e sono caratterizzati da una capacità di deformazione a trazione che va dal 3% al 7%, rispetto allo 0,1% del cemento portland ordinario. Il loro comportamento è paragonabile a quelli di un metallo duttile e, proprio per questa caratteristica, vengono anche chiamati calcestruzzi flessibili o piegabili (flexible/bendable concretes). La presenza delle fibre permette l'apertura di molte fessure di dimensione molto ridotta, invece che poche fessure ma di ampiezza elevata, e questo permette il raggiungimento di elevate deformazioni sotto livelli di carico sostanzialmente costanti o addirittura moderatamente crescenti (strain gardening). In presenza di acqua, le particelle di cemento non ancora idratatesi, avviano reazioni che formano diversi prodotti in grado di riempire la fessura.

Homma et al. [13] nel 2009 hanno studiato come diversi tipi di fibra influiscano sulle proprietà meccaniche e sulla morfologia delle fessure. Sono state predisposte tre diverse miscele di calcestruzzo fibrorinforzato, in ognuna delle quali è stata utilizzata una diversa tipologia di fibra: fibre di polietilene (polyethylene fibre - PE) (diametro = 12 μ m, lunghezza = 6 mm), fibre di acciaio (steel cord - SC) (diametro = 400 μ m, lunghezza = 32 mm) e un composito rinforzato con fibre miste (entrambe PE e SC). In particolare l'impasto contenente entrambe le tipologie di fibre è stato progettato per essere ad alte prestazioni. Nella figura 2.6 viene riportato il dosaggio delle tre miscele approntate per lo studio. Le fibre in polietilene sono state utilizzate con una percentuale volumetrica pari all'1,5%, mentre le fibre in acciaio con percentuale pari allo 0,75%. Per quanto riguarda il terzo tipo di calcestruzzo, rinforzato con entrambe le fibre, il contenuto di entrambe è stato dello 0,75% in volume. Al cemento è stato aggiunto il 15% di fumo di silice e i rapporti a/c e i/c (rapporto tra il peso degli inerti e del cemento) della sono stati calcolati considerando c come miscela tra cemento e fumo di silice (rapporti mostrati in figura 2.6).

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

Figura 2.6 Mix Design delle tre tipologie studiate da Homma et al. [13].

I campioni prismatici sono stati pre-fessurati, mediante prova di trazione uni assiale, e una volta effettuata la prova di permeabilità sono stati immersi in acqua per 28 giorni. Superato questo periodo di “cura”, è stata eseguita nuovamente la prova di trazione uni-assiale.

I risultati hanno dimostrato come per i campioni contenenti le fibre in polietilene, quindi anche quelli con il composito misto, il processo di cristallizzazione abbia portato alla completa chiusura delle fessure. Mentre per i restanti campioni con le fibre di acciaio la fessura è rimasta invariata se non per la presenza di alcuni prodotti dell'ossidazione della fibra stessa. Nella figura 2.7 è evidente come i campioni con le fibre PE abbiano formato cristalli più robusti di quelli dei campioni con fibre SC.

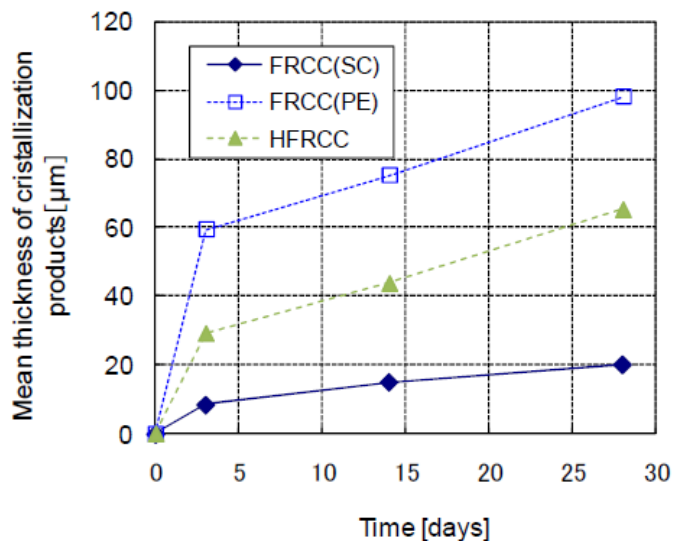


Figura 2.7 Dipendenza dello spessore medio dei prodotti di cristallizzazione con il tempo di cura. Homma et al. [13].

È stata studiata, inoltre, la variazione di permeabilità in relazione al tempo di cura e alla dimensione iniziale delle fessure. I risultati mostrano come per i campioni con fibre in polietilene e miste, con fessure più piccole, dell'ordine di 10⁻² mm, si ha una riduzione notevole della permeabilità nei primi giorni di cura, poiché la formazione dei prodotti cristallini è molto veloce in fase iniziale. Mentre per quelli contenenti le fibre in acciaio, la diminuzione si nota solo in parte e ha bisogno di maggiore tempo per verificarsi.

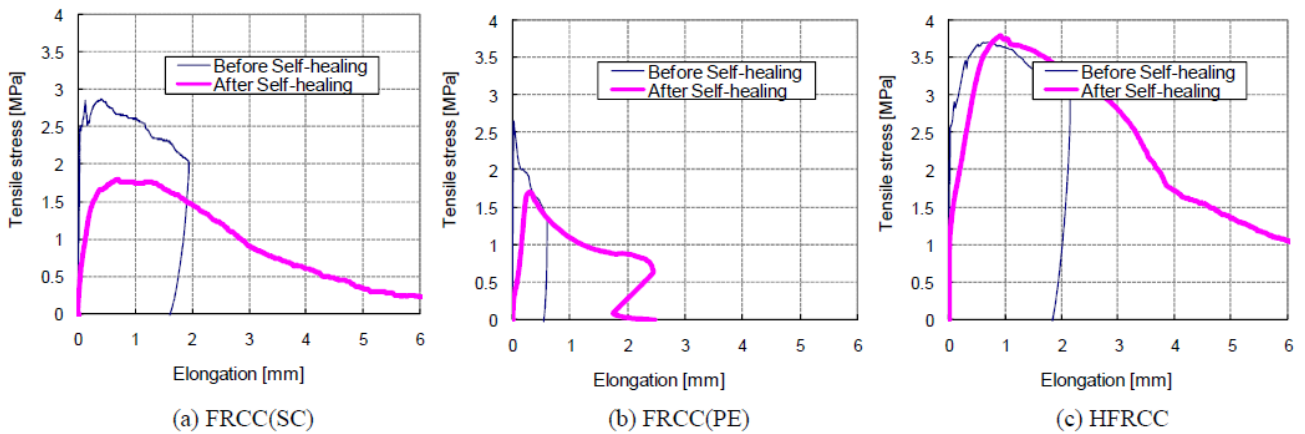


Figura 2.8 Resistenza a trazione prima e dopo 28 giorni di cura, confronto tra le tre tipologie di campioni. Homma et al. [13].

La figura 2.8 riporta i risultati della prova di trazione uni assiale, eseguita nuovamente dopo 28 giorni, mostrando come nel caso del calcestruzzo rinforzato con fibre PE (b) il comportamento è stato di tipo quasi fragile, dovuto principalmente alla lunghezza delle fibre stesse, circa mezzo centimetro. I campioni contenenti le fibre di acciaio (a), pur mostrando un comportamento meno fragile rispetto a quelli rinforzati con fibre polietileniche, sono comunque caratterizzati da una resistenza inferiore e da una minore duttilità rispetto, ovviamente, ai campioni in calcestruzzo ad alte prestazioni. La risposta migliore è stata data dai campioni con fibre miste (c) che hanno mostrato maggiore resistenza e duttilità, effetti certamente a motivo della sinergia dei due tipi di fibre, che, a motivo delle diverse lunghezze, esercitano il loro effetto di cucitura su fessure di diverse ampiezze.

Herbert e Li [14] nel 2011 hanno esaminato come l’esposizione alle condizioni ambientali possa influire sul self-healing di calcestruzzo rinforzato con fibre in poli-vinil-alcool (PVA) e contenente ceneri volanti (FA). Hanno utilizzato come parametri di misura la frequenza di risonanza e la resistenza a trazione misurata mediante con la prova uniassiale, il tutto eseguito in fase iniziale e dopo il primo e il terzo mese di cura. I campioni all’età di tre giorni sono stati caricati a trazione fino allo 0,5% della deformazione e in seguito esposti alle condizioni ambientali per un periodo di tre mesi. Lo studio è stato eseguito in Michigan nel periodo che va tra febbraio e maggio, esponendo le specie a pioggia, neve e a un intervallo di temperatura compreso tra i -14° e 28° . Prove fotografiche documentano come fessure di ampiezza inferiore a $20\ \mu\text{m}$ si siano completamente chiuse e che i prodotti si sono formati grazie alla lenta cinetica della reazione pozzolanica. Inoltre, i campioni hanno recuperato il 90% della frequenza di risonanza, rispetto a quella posseduta prima della fessurazione, mentre il recupero dell’iniziale rigidità si è attestato intorno al 31% dopo un mese, e intorno al 65% a tre mesi. In conclusione, gli autori sostengono che sotto normali condizioni ambientali, a volte estreme, il self-healing dell’ECC è promettente, anche se non è robusto come quello dei campioni soggetti alle condizioni controllate del laboratorio.

Yang et al. [15] nel 2011 hanno eseguito un analogo studio prefessurando in trazione diretta ed a diversi livelli di deformazione, rispettivamente pari a 0.3%, 0.5%, 1%, 2%, 3% i campioni a tre giorni ed esponendoli successivamente a cinque diversi ambienti di cura:

- Cicli di 48 ore in cui i campioni sono stati immersi in acqua per un giorno e poi lasciati ad asciugarsi per il giorno successivo;
- Cicli di 48 ore in cui i campioni sono stati immersi in acqua per 24 ore e, dopo aver passato le successive 22 ore in un ambiente la cui temperatura era mantenuta a 55°, sono stati asciugati per due ore con aria calda. L'elevata temperatura accelera la reazione delle particelle non idratate e delle ceneri volanti, migliorando il legame tra le fibre e la matrice cementizia all'interno della fessura;
- Cicli di 48 ore in cui i campioni sono stati posti in una camera umida con 90% U.R. e 20°, e in seguito lasciati in un ambiente con 50% U.R. e 20°;
- Immersione in acqua a 20° per il tempo necessario ai fini dell'esperimento;
- Diretta esposizione all'aria, in ambiente con 20° e 50% U.R., per il tempo necessario ai fini dell'esperimento.

L'ECC utilizzato in questo studio contiene ceneri volanti ed è rinforzato con fibre in poli-vinil-alcool, con concentrazione pari al 2% in volume. Il dosaggio è stato calcolato in modo da massimizzare la duttilità a trazione. La prefessurazione è stata eseguita tramite la prova di trazione uniassiale.

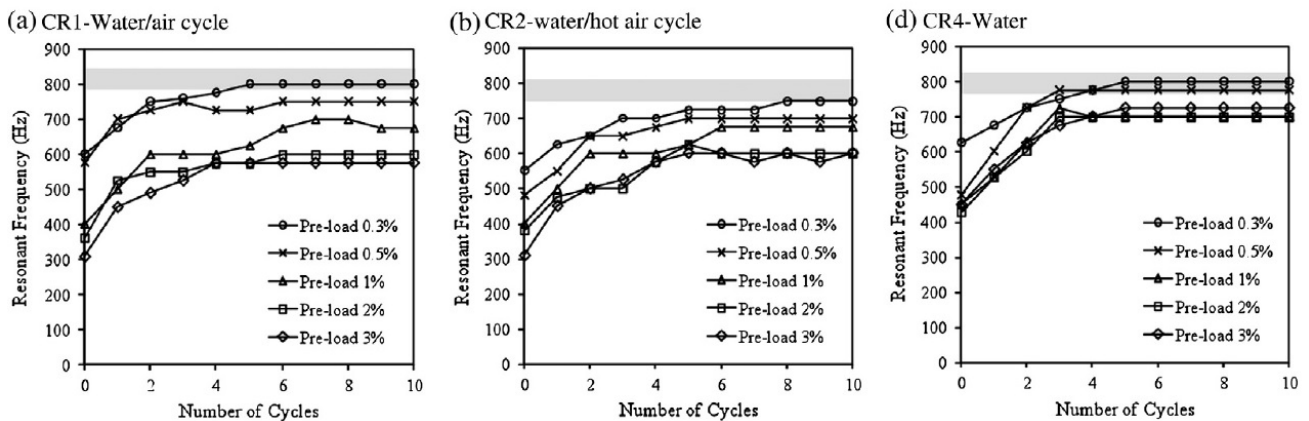


Figura 2.9 Cambiamento della frequenza di risonanza all'aumentare del numero dei cicli. Estratto dei soli campioni a stretto contatto con acqua. Yang et al. [15].

Come nel precedente studio, uno dei parametri utilizzato per misurare il grado di guarigione delle fessure, è stato la frequenza di risonanza. Nei campioni di controllo, non prefessurati, è stata attestata una frequenza pari a 800 Hz. Nella figura 2.9 sono riportati i grafici riguardanti gli ambienti di cura che hanno mostrato un recupero della frequenza molto elevato. Come si nota i suddetti ambienti sono quelli che mantengono i campioni a stretto contatto con acqua e raggiungendo valori di frequenza che vanno dal 60% al 96% di quelli riguardanti i campioni di controllo. Come dimostrato dagli studi citati in precedenza, la presenza di acqua è sempre fondamentale, giacché essa permette la continua reazione del cemento non idratato. Si può notare che il self-healing si manifesta soprattutto durante i primi 4-5 cicli, ma superati i dieci, la curva si stabilizza, approssimandosi a una costante, e questo vale per tutti gli ambienti studiati.

In questo studio, inoltre, sono state confrontate le caratteristiche del self-healing di campioni danneggiati a tre giorni e a sei mesi. Come mostrato dalla figura sottostante 2.10, si ha maggiore recupero della rigidità per il calcestruzzo prefessurato in età matura. Yang et al. [15] sostengono che questa caratteristica derivi dalla tipologia di fessure apertesesi al momento della

prefessurazione. In età giovane, infatti, il calcestruzzo tende a sviluppare un minor numero di fessure ma di dimensione maggiore, la cui “guarigione” avviene più difficilmente (figura 2.10).

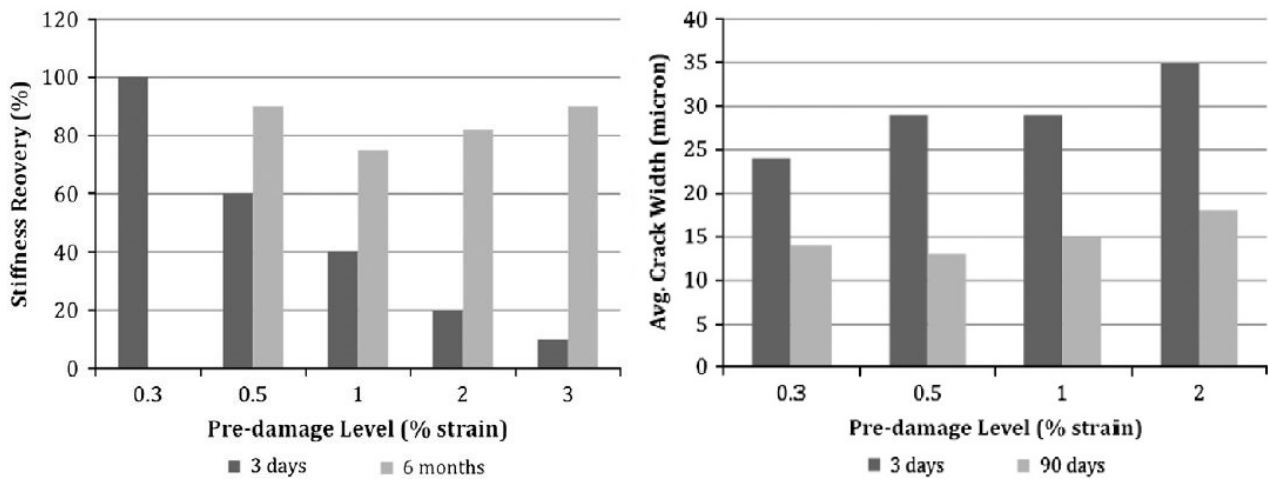


Figura 2.10 Recupero della rigidità (sinistra) e larghezza media delle fessure (destra) dei campioni soggetti a prefessurazione a 3 giorni e a 6 mesi. Yang et al. [15].

Il calcestruzzo maturo reagisce in maniera differente allo sforzo imposto dalla prova di trazione uniassiale, sviluppando un numero maggiore di fessure ma mantenendo la dimensione media intorno ai 15 μm . Le fessure più grandi dei campioni prefessurati in giovane età riflettono il legame ancora debole tra le fibre in PVA e la matrice cementizia, determinandone la rigidità e il livello dell’apertura.

Nishiwaki et al. [16] sostengono che l’alta polarità delle fibre sintetiche permette il concentrarsi dei precipitati attorno a quelle presenti tra le facce opposte delle fessure. Per l’esperimento sono state studiate quattro tipologie di materiali sintetici: alcool polivinilico (PVA), alcool vinil-etilenico (EVOH), poliacetato (POM) e polipropilene (PP). È stato approntato un esperimento, riassunto in breve nella figura 2.11, nel quale i campioni prismatici vengono portati fino a rottura e separati in due metà e successivamente messi in acqua per sette giorni. In questo modo è stato possibile studiare la natura dei prodotti della cristallizzazione e valutarne la dimensione e la quantità depositatasi attorno alle fibre fuoriuscenti dalle superfici create alla rottura dei campioni.

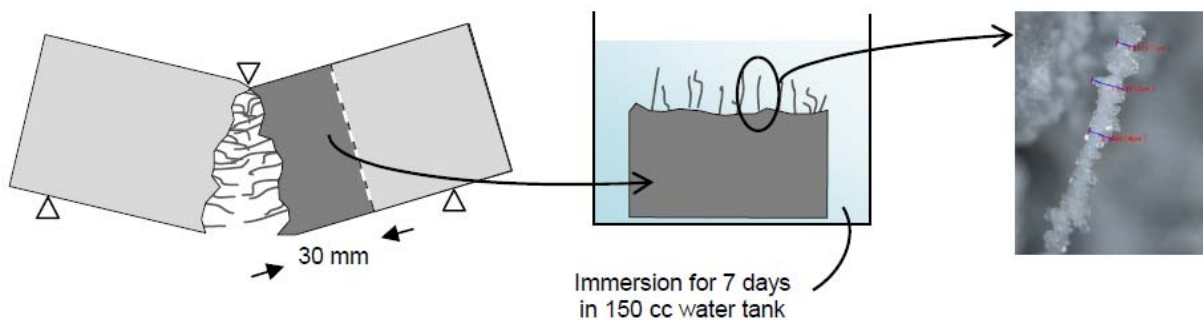


Figura 2.11 (1) Prova di flessione a tre punti per rompere i campioni in due parti. (2) Immersione in acqua di parte dei campioni. (3) Valutazione del diametro delle fibre che presentano un precipitato cristallino. Nishiwaki et al. [16].

Per la loro composizione chimica i materiali sintetici, di cui sono formate le fibre, presentano polarità differenti. In particolare le fibre in PVA possiedono la maggiore polarità, mentre le PP sono molecole apolari. Le fibre EVOH e le POM, invece, sono caratterizzate da una modesta polarità. I risultati hanno dimostrato come all'aumentare della polarità è aumentata la quantità di precipitato presente sulla fibra. Questo è dovuto ai cationi Ca^{2+} che, attratti dalle fibre polarizzate, precipitano, in seguito, carbonato di calcio.

2.4 Self-Healing Ingegnerizzato

Come anticipato in precedenza, con il termine di self-healing ingegnerizzato s’intende la riparazione permessa dall’utilizzo di particolari tecniche di additivi/componenti nella composizione della miscela, senza i quali il fenomeno non si verificherebbe. L’idea principale è quella di avere elementi all’interno dell’impasto, dispersi o concentrati, che contengano agenti in grado di reagire con i componenti della matrice di calcestruzzo in determinate condizioni, o più semplicemente di agenti in grado di riparare la fessura reagendo secondo determinate condizioni. Questi composti, quindi, si troveranno in uno stato dormiente durante l’esercizio della struttura, e, una volta verificatosi un danno ed apertesi delle fessure, vengono liberati, così da riparare e sigillare le fessure stesse, proteggendo la struttura dall’ingresso di agenti esterni ed agendo dunque favorevolmente sulla durabilità.

Negli ultimi anni sono state approntate e studiate numerose tecniche di self-healing ingegnerizzato, che dalla semplice aggiunta di additivi in grado di reagire in ritardo, ossia al momento della fessurazione, e di cristallizzare al contatto con acqua, all’utilizzo di particolari resine incapsulate e disperse all’interno del getto, o di batteri in grado di precipitare cristalli di carbonato di calcio all’interno delle fessure.

In questa categoria entrano anche i cosiddetti materiali intelligenti, definiti da Mihashi e Nishiwaki [4] nel 2012 come quei materiali che possiedono le tre seguenti funzioni:

- Funzione di rilevamento: per localizzare e individuare la presenza di determinati cambiamenti, come ad esempio l’apertura di una fessura;
- Funzione di elaborazione: per giudicare quali azioni dovrebbero essere intraprese e/o quando dovrebbero essere attuate;
- Funzione di attuazione: per attuare le riparazioni pianificate in precedenza.

Con queste caratteristiche, un materiale intelligente è in grado di trattare gli stimoli ricevuti dal mutevole ambiente esterno per elaborare le informazioni riguardanti le condizioni dell’elemento stesso. Queste funzioni possono essere incorporate all’interno di materiali cementizi, non solo sotto forma del processo di “guarigione” naturale, come mostrato in precedenza, ma anche attraverso l’implementazione di dispositivi specializzati nella riparazione delle fessure. Tali dispositivi includono congegni per il rilevamento, vasi tubolari collegati alla rete informatica e resine sintetiche che induriscono senza la presenza di acqua.

2.4.1 Polimeri super assorbenti (SAP)

Con l’obiettivo di fornire dell’acqua aggiuntiva all’interno delle fessure, molti ricercatori hanno pensato di utilizzare un tipo di polimeri innovativi, denominati polimeri super-assorbenti (SAP Super Absorbent Polymers) o idrogel. Tittelboom e De Belie [8] hanno definito tali materiali come polimeri reticolati in grado di assorbire una grande quantità di liquido e, gonfiandosi, di formare un gel morbido e insolubile (figura 2.12).

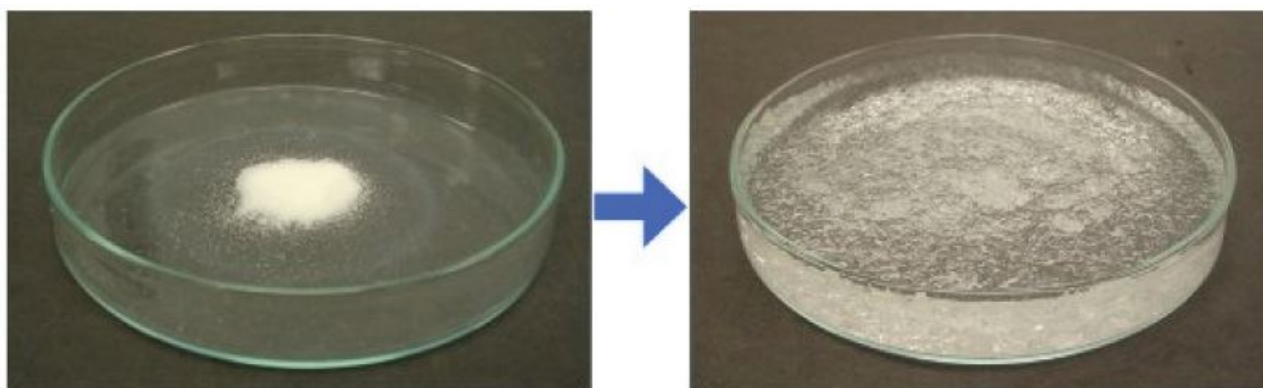


Figura 2.12 Polvere di SAP secca (sinistra), gel formatosi dall'espansione del SAP. ICL [17].

La loro capacità di rigonfiamento dipende fortemente dall'alcalinità e dalla concentrazione ionica della soluzione (ad esempio la presenza di ioni Ca^{++} diminuisce molto la capacità di assorbimento), questo comporta che quando il calcestruzzo è fresco e sono ancora in atto i meccanismi di presa o d'indurimento, il rigonfiamento è minimo. Durante l'idratazione del cemento i SAP rilasciano l'acqua assorbita e, riducendosi il loro volume, lasciano dei macro pori all'interno della pasta cementizia. Al momento dell'apertura delle fessure, e raggiunti, appunto, tali pori, l'acqua e l'umidità presenti nell'aria penetrano all'interno e vengono assorbite dai SAP che tornano nuovamente a gonfiarsi. Se la concentrazione ionica del fluido penetrato è bassa, il rigonfiamento sarà maggiore di quello raggiunto al momento della formazione dei pori, in questo modo l'espansione raggiungerà la parte interna della fessura bloccando fisicamente l'entrata di corpi estranei o agenti dannosi. Tale procedimento viene mostrato in figura 2.13.

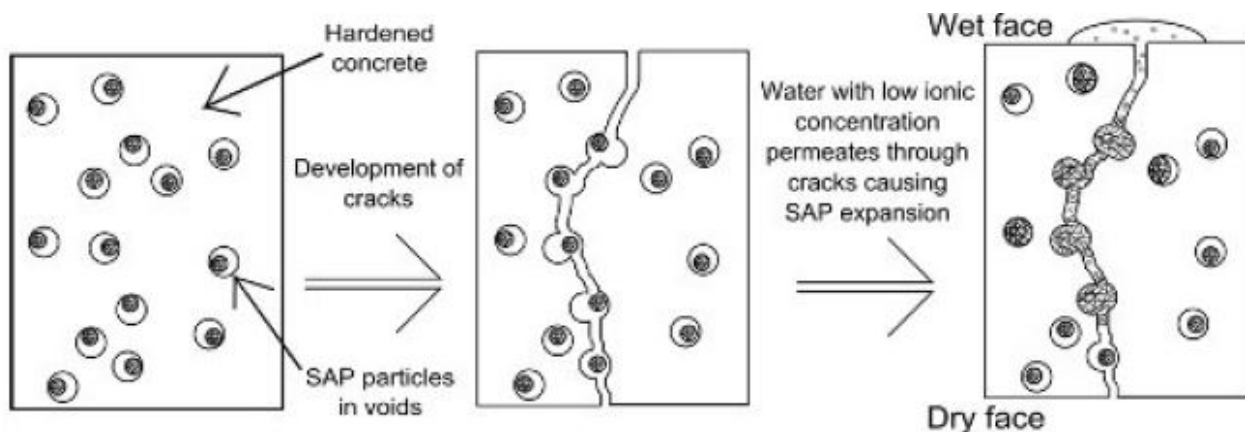


Figura 2.13 Meccanismo di sigillatura svolto dai polimeri super assorbenti. ICL [17].

Durante i periodi secchi, l'acqua viene rilasciata nuovamente favorendo la continua idratazione delle particelle di cemento.

Kim e Schlangen [18], nella loro ricerca del 2011, hanno confrontato tre differenti miscele di ECC contenente fibre in PVA (0.05%) e ceneri volanti (1%): una miscela di controllo (G1) e due ulteriori miscele contenenti rispettivamente lo 0,5% (G2) e l'1% (G3) in peso del cemento di polimeri super assorbenti. I campioni di forma prismatica, divisi in due gruppi, sono stati fessurati, mediante prova di flessione su quattro punti, fino alla formazione di fessure con aperture dell'ordine di 2 mm: un gruppo a sette giorni e l'altro a ventotto giorni. Le specie sono state, quindi, poste in tre

diversi ambienti di cura: esposizione all’aria con costanti umidità relativa (50%) e temperatura (20°), cicli immersione/secco della durata di quattro giorni (uno in acqua, e tre ad asciugare) e immersione in acqua a temperatura costante (20°). Passati ventotto giorni i campioni sono stati sottoposti nuovamente alla prova di flessione a quattro punti fino alla rottura completa.

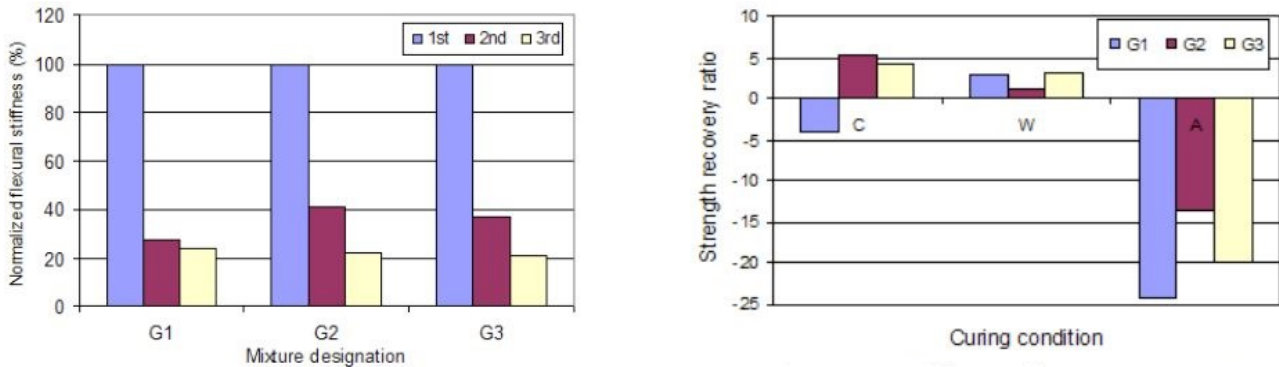


Figura 2.14 A sinistra, confronto recupero di rigidezza con i due differenti periodi di prefessurazione: G1, G2 e G3 indicano i tre diversi tipi di calcestruzzo, mentre i tre colori le diverse età di prefessurazione. A destra, confronto tra i diversi ambienti di cura per i campioni fessurati a 7 giorni. [18].

In figura 2.14 sono riportati i risultati di tale studio. Nel grafico a sinistra si nota come entrambi gli impasti contenenti i SAP abbiano recuperato maggiore rigidezza rispetto le specie di controllo, ma quest’effetto si manifesta solo nel periodo di cura relativo alla prima prefessurazione. Il secondo periodo di cura, infatti, non manifesta notevoli differenze tra le tre tipologie di calcestruzzo. Questo è spiegato dal fatto che in età giovane, i primi sette giorni, è presente una grande quantità di particelle non ancora idratatesi e che quindi sono in grado di reagire. Utilizzando i SAP, quindi, si riesce a fornire una maggiore quantità di acqua, cosicché l’idratazione riesca ad avvenire in modo più completo e riesca a dotare il calcestruzzo di maggiore rigidezza. Nel grafico a destra, invece, si nota come i tre differenti ambienti di cura abbiano influito nel recupero della resistenza. L’esposizione in aria, con umidità e temperatura costante, non ha fornito risultati positivi evidenziando come un’umidità relativa pari al 50% non riesca a fornire la quantità di acqua necessaria all’idratazione delle particelle interne alla fessura. Mentre nei restanti due ambienti di cura, l’immersione in acqua ha permesso un modesto, seppur non nullo, recupero di resistenza; la differenza maggiore con le specie di controllo si è evidenziata con i cicli bagnato/asciutto e soprattutto con un contenuto di SAP pari allo 0,5%.

Snoeck et al. [19] nel 2012, hanno utilizzato la radiografia a neutroni per studiare la distribuzione dell’umidità all’interno dei campioni durante le prove di permeabilità e di assorbimento. Sono stati studiati due tipi differenti di polimeri super assorbenti misurandone la capacità di rigonfiamento e dell’assorbimento capillare. Una volta note queste caratteristiche, sono stati mischiati, in condizione secca, al cemento e gettati nell’impasto. La capacità auto sigillante di questi composti è stata dimostrata in maniera concreta, in quanto i campioni contenenti i SAP diminuiscono la propria permeabilità fino al completo blocco del flusso d’acqua in meno di quaranta secondi dall’inizio della prova, mentre per le specie di controllo non avviene nessuna diminuzione.

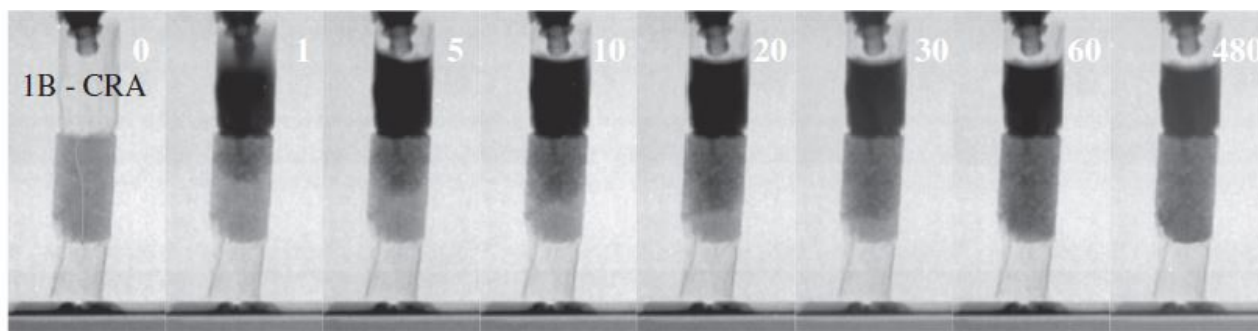


Figura 2.15 Esempio di radiografia a neutroni. Specie contenente SPA. Snoeck et al. [19].

Nella figura 2.15 viene riportata una delle immagini ricavate dalla radiografia a neutroni, tecnica non distruttiva in grado di fornire molte informazioni sul fenomeno di assorbimento dell'acqua da parte di un mezzo poroso quale il calcestruzzo. Si può osservare, infatti, come è stata determinata con facilità la distribuzione e la profondità di penetrazione dell'acqua nelle fessure del calcestruzzo.

Diversi studi hanno provato che il principale effetto dell'utilizzo dei SAP all'interno di una miscela di calcestruzzo è di ridurre molto la resistenza meccanica, effetto dovuto principalmente all'eccessiva formazione di pori. Hasholt [20] partendo da tali affermazioni, ha analizzato tutti gli studi effettuati su questo tema affermando che, in realtà, l'uso dei polimeri super assorbenti mitiga la deformazione autogena causando, però, solo una minima riduzione della resistenza a compressione e che, in alcuni casi, ne è stato registrato addirittura un aumento.

2.4.2 Leghe a memoria di forma

Alcune ricerche propongono di sfruttare i materiali a memoria di forma come sistema per la chiusura delle fessure. Particolari leghe e polimeri (shape memory alloys – SMA, e Shape memory polymers SMP) vengono definiti come materiali intelligenti poiché posseggono l'abilità di "ricordare" la forma iniziale e, una volta deformati, di ritornarvi. Per innescare questo fenomeno sono necessari degli stimoli esterni, come ad esempio una variazione di temperatura. La lega utilizzata maggiormente è il Nitinol, composta da nickel e titanio, poiché possiede ottime proprietà elettriche e meccaniche e un'alta resistenza alla corrosione. Recentemente, diversi studiosi hanno proposto l'utilizzo di questi materiali per le strutture civili con lo scopo di migliorarne la resistenza ai fenomeni ambientali estremi come terremoti e tifoni.

Sakai et al. [21] nel 2003 hanno utilizzato le leghe a memoria di forma come barre d'armatura principali per travi in calcestruzzo, con l'obiettivo di chiudere automaticamente grandi fessure formatesi nel caso dell'applicazione di un carico eccezionale. Prima di approntare un piano sperimentale e iniziare la fabbricazione dei provini, sono state effettuate le prove ordinarie per la determinazione del modulo di Young, la tensione di snervamento e la resistenza massima, confrontando i valori con quelli dell'acciaio utilizzato per le barre d'armatura ordinarie. La lega utilizzata è a base di Nickel e Titanio, e possiede un modulo elastico pari al 25% (circa 50 GPa) di quello dell'acciaio ordinario, una tensione di snervamento minore del 17% (circa 425 MPa) e una

resistenza a trazione massima doppia. Sono state misurate inoltre le temperature alle quali si verificano le variazioni di forma.

I campioni studiati sono di forma prismatica (dimensione 100x100x440 mm). Al posto delle barre d’acciaio sono stati utilizzati cavi lunghi 500 mm e con diametro pari a 2 mm. Per le dimensioni contenute dei provini, gli autori hanno deciso di non utilizzare aggregati di grosse dimensioni e di limitarsi alla fabbricazione di campioni di sola malta. In particolare sono state preparate tre tipologie di campioni: una contenente nove cavi in SMA sia nel corrente superiore sia in quello inferiore, un’altra contenente cinque cavi, sempre in SMA, in entrambi i correnti e infine una terza di controllo contenente cinque cavi di diametro pari a 1.9 mm in acciaio estruso a freddo. Per ottenere un ancoraggio stabile dei cavi fuoriuscenti dai campioni, sono stati utilizzati due blocchi d’acciaio posti agli estremi e ai quali sono stati vincolati.

Il carico è stato imposto mediante la prova di flessione a tre punti. I dati studiati sono gli spostamenti rilevati da tre sensori, che hanno permesso di calcolare, oltre le rotazioni, le deformazioni. I campioni, portati a rottura, sono stati sottoposti alla prova fino alla formazione di una fessura di grandi dimensioni (figura 2.16 (a)). Una volta eliminato il carico, è stata misurata l’ampiezza finale della fessura.

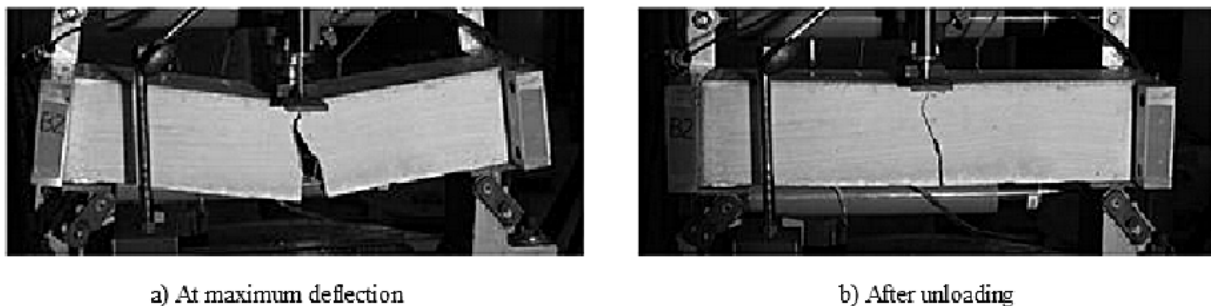


Figura 2.16 Evoluzione della fessura in campioni contenenti cavi in SMA, al massimo valore di deformazione raggiunto (sinistra) e al termine della prova, successivamente alla rimozione del carico (destra). Sakai et al. [21].

Lo studio ha dimostrato che solo nelle specie contenenti i cavi in SMA, sia in quelle con nove sia in quelle con cinque cavi, è stato riscontrato il restringimento della fessura fino a un’ampiezza pari a un decimo di quella raggiunta al momento del carico. Inoltre è stato notato che la presenza dei cavi in SMA ha migliorato la capacità di deformazione dei provini. Durante l’applicazione del carico è stato rilevato che la deformazione a trazione non ha corrisposto all’aumento del carico, ciò è stato spiegato con la rottura del legame malta-acciaio e il distacco delle barre dalla matrice cementizia. Tale distacco è avvenuto a causa dell’enorme deformazione assiale subita dagli elementi in metallo. Nella pubblicazione non viene spiegato, però, come i cavi in nitinol siano stati attivati per esplicitare la “memoria di forma”.

Tale esperimento è interessante per quanto riguarda il nuovo approccio proposto al problema della chiusura delle fessure. I risultati ottenuti, però, mostrano solamente il funzionamento delle leghe a memoria di forma, senza però applicarlo a casi di studio possibili nella realtà delle costruzioni. Infatti, non sono stati analizzati né la resistenza finale dei campioni, così da verificare

un mantenimento o l'entità delle proprietà meccaniche, né i fenomeni riguardanti la durabilità, come ad esempio la permeabilità.

Kuang e Ou [22] nel 2008 hanno riproposto parte dell'esperimento eseguito da Sakai et al. [21] introducendo, però, prove incentrate sullo studio del recupero delle proprietà meccaniche. Per fare ciò hanno utilizzato una metodologia, spiegata nel dettaglio nel cap. 2.4.6, che implica l'inserimento all'interno del campione di tubi fragili contenenti un agente sigillante.

Nella figura 2.17 sono mostrati i provini utilizzati in questo esperimento. Si tratta di travi in calcestruzzo a normale resistenza di dimensioni 100x100x400 mm, nel cui corrente teso sono stati posti cavi di SMA lunghi 500 mm e di diametro 2.0 mm. La lega utilizzata per i cavi è Ni-50.8%Ti (in frazione massica), stessa lega descritta in precedenza e il cui nome è Nitinol. È caratterizzata da una resistenza a trazione ultima pari a 920 MPa e da una deformazione ultima pari a circa il 19%.

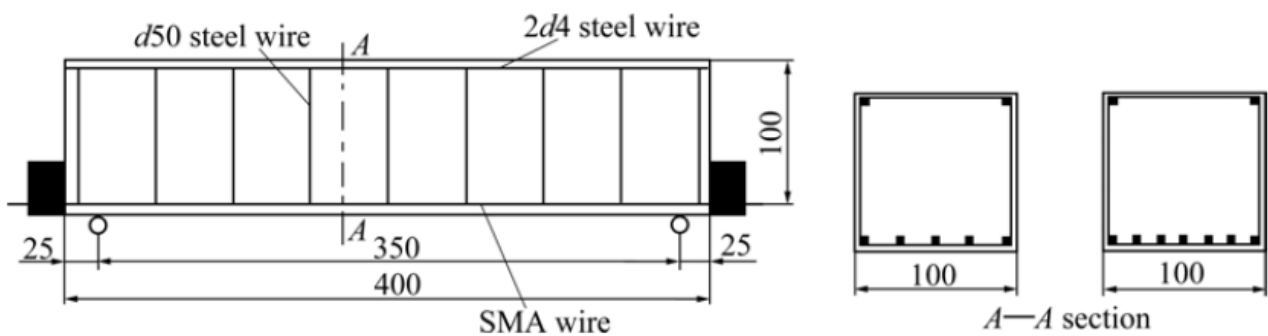


Figura 2.17 Rappresentazione campioni prismatici contenenti barre in SMA. Kuang, Ou [22].

Sono stati eseguiti due diversi esperimenti basati sullo stesso test, la prova di flessione a tre punti.

Nel primo esperimento sono state utilizzate tre serie di campioni: due contenenti i cavi in SMA, rispettivamente in numero di cinque e sette, disposti nel corrente teso dei campioni, mentre un terzo di controllo aveva due barre di acciaio principali di diametro pari a 4.0 mm. I campioni sono stati sottoposti alla prova di flessione a 28 giorni. Questo esperimento è analogo a quello effettuato da Sakai et al. [21]; infatti, ha avuto lo scopo di studiare il grado finale di chiusura della fessura imposto dal recupero della forma dei cavi in SMA. Come mostrato nella figura 2.18 la fessura viene chiusa completamente una volta rilasciato il carico, ma ciò non è da intendersi come autoriparazione, poiché al manifestarsi del carico la fessura si riapre nuovamente e raggiunge la stessa ampiezza.

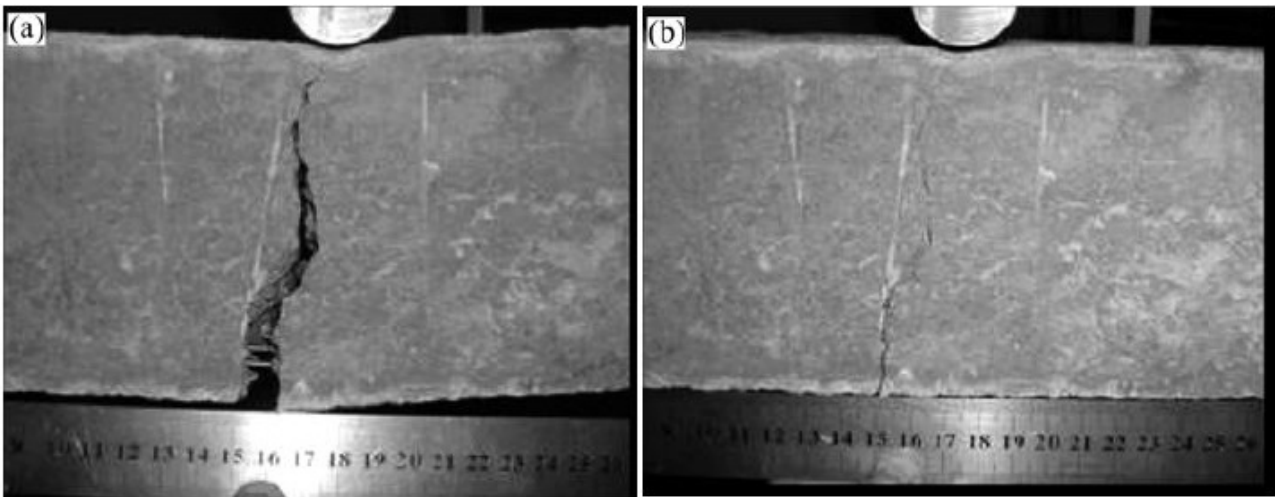


Figura 2.18 Evoluzione della fessura in fase di carico (a) e in fase di scarico (b). Kuang, Ou [22].

Il secondo esperimento invece ha avuto come obiettivo quello di valutare il recupero della resistenza a flessione permesso dall'utilizzo di un materiale adesivo all'interno della fessura. Le specie utilizzate sono dello stesso tipo dell'esperimento descritto in precedenza, ma per fornire tale materiale sono state predisposte delle fibre fragili, contenenti il prodotto, all'interno dei campioni al momento della fabbricazione. Le fibre sono in vetro, hanno un diametro pari a 0,6 mm e contengono un adesivo epossidico a bassa viscosità. Per fornire la giusta quantità di adesivo, le fibre sono state collegate a un sistema di tubi di gomma (figura 2.19).

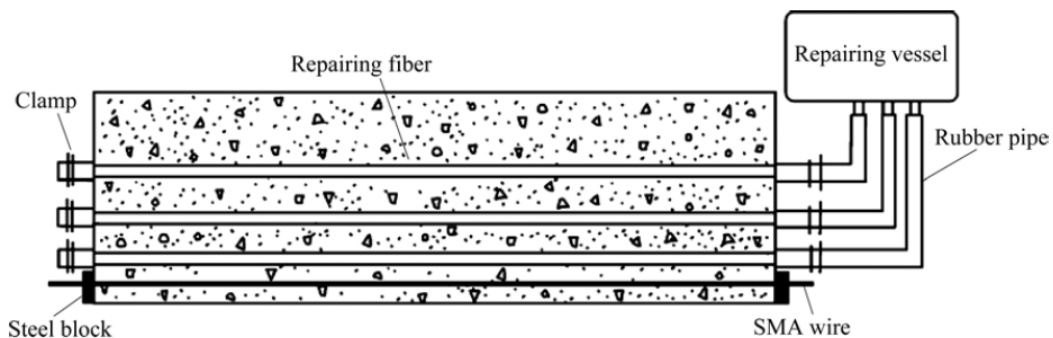


Figura 2.19 Schema campioni con fibre in vetro fragili contenenti adesivo epossidico a bassa viscosità. Kuang, Ou [22].

All'età di 28 giorni i campioni sono stati sottoposti alla prova di flessione. Al momento del carico/scarico si verifica lo stesso fenomeno del primo esperimento. Durante l'apertura della fessura, però, anche le fibre fragili si danneggiano rilasciando il materiale adesivo. La prova è stata quindi fermata, al raggiungimento del massimo valore di resistenza massima, ed eseguita nuovamente dopo 10 giorni di attesa, necessari perché l'adesivo raggiunga si indurisca completamente. I risultati hanno mostrato un aumento della resistenza a flessione, rispetto alla prima fessurazione, pari al 28.6% nei campioni contenenti le SMA e pari al 21.2% in quelli contenenti acciaio ordinario.

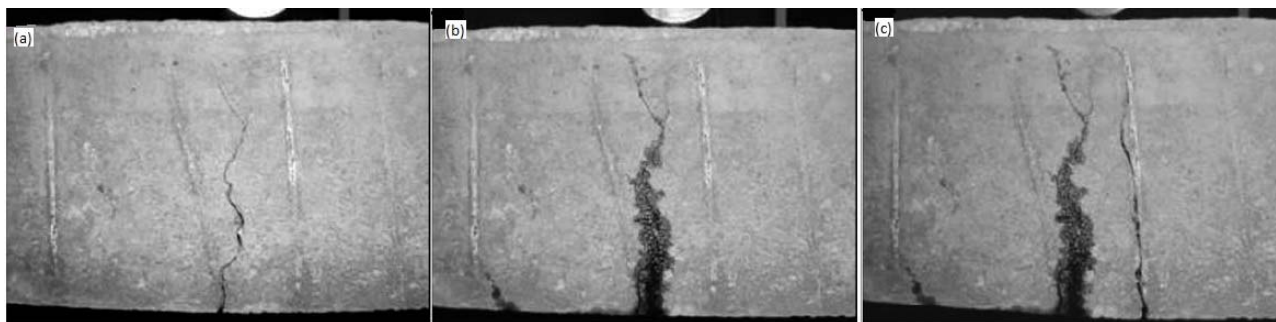


Figura 2.20 Evoluzione fessura dalla sigillatura alla seconda prova di flessione: (a) Fessura nella mezzeria del campione; (b) Fessura riparata dall'adesivo fuoriuscito dalle fibre in vetro; (c) Fessura iniziale ancora chiusa e apertura di una nuova fessura. Kuang, Ou [22].

In figura 2.20 è mostrata l'evoluzione della fessura durante la seconda prova di flessione eseguita a 38 giorni. Come si nota nell'immagine (c) al momento della rottura si forma una nuova fessura differente da quella iniziale. Questo dimostra che il materiale che ha sigillato la fessura iniziale ha conferito maggiore resistenza al campione.

Tale sistema, comunque, non può definirsi legato al self-healing, almeno non completamente. Infatti, è stato necessario un intervento esterno per fornire la giusta quantità di materiale adesivo. Più avanti verranno spiegati i vantaggi e gli svantaggi nell'utilizzo di materiali incapsulati o di tubi fragili all'interno del calcestruzzo.

2.4.3 Un approccio biologico

Come detto in precedenza, uno dei meccanismi principali per la chiusura delle fessure è quello della precipitazione di cristalli di calcio. Per stimolare tale reazione chimica sono stati studiati alcuni additivi per il calcestruzzo a base di spore batteriche capaci di produrre minerali.

Jonkers [23] nel 2007 ha osservato che, nonostante l'ambiente interno della matrice di calcestruzzo possa sembrare a prima vista inospitale per la vita, perché secco e altamente alcalino, esistono dei sistemi naturali analoghi in cui alcune specie di batteri prosperano. Inizialmente il meccanismo alla base della precipitazione del carbonato di calcio mediante l'utilizzo di determinati bacilli prevedeva l'idrolisi dell'urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). In presenza di acqua contenente CO_2 e ammoniaca (NH_3) l'urea reagisce incrementando il pH e avviando la produzione di calcite. Di seguito (figura 2.21) viene rappresentato lo schema di funzionamento di tale meccanismo, enfatizzando come la formazione casuale di cristalli di CaCO_3 protegga per le barre d'armatura.

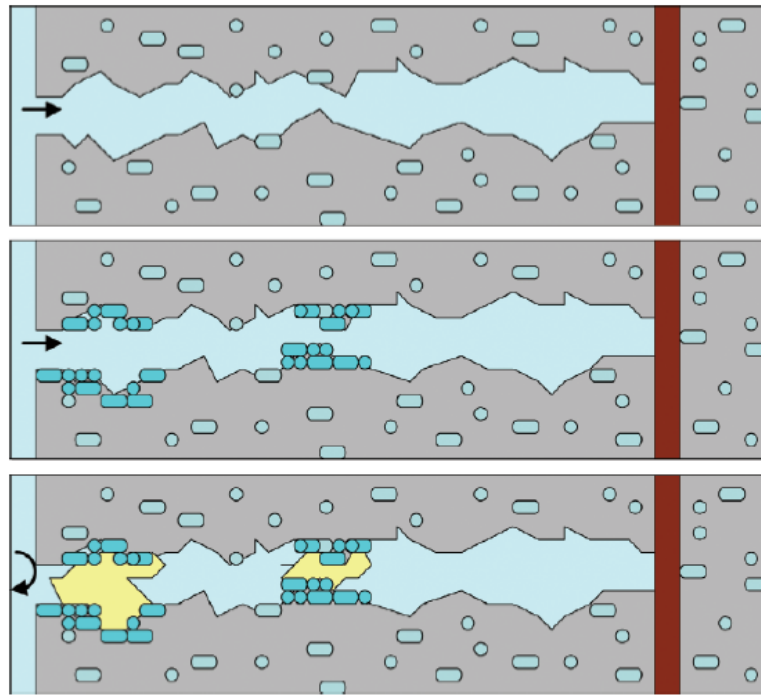


Figura 2.21 Chiusura di una fessura grazie alla presenza di batteri presenti sulla superficie della fessura, si attivano a causa dell'ingresso di acqua, moltiplicandosi e precipitando minerali (CaCO_3), che sigillano la fessura e proteggono le barre d'armatura. Jonkers [23].

L’ideale agente il cui compito è quello di favorire il self-healing deve rispettare determinate caratteristiche, la più importante delle quali è che la sua presenza non deve incidere negativamente sulle caratteristiche del materiale. Per verificare ciò, Jonkers [23] ha aggiunto una coltura di batteri *Sporosarcina pasteurii*, in proporzione definita, all’acqua da fornire all’impasto di calcestruzzo con l’obiettivo di verificare la presenza di differenze nella resistenza a compressione e a trazione con campioni di controllo.

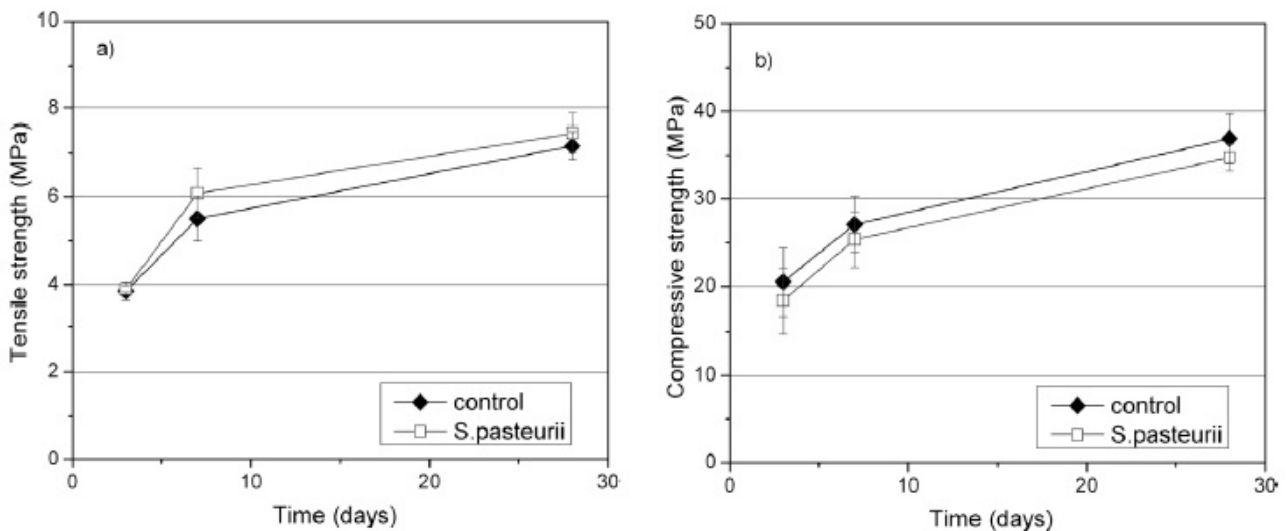


Figura 2.22 Resistenza a flessione (a) e a compressione (b) rilevate dopo 3,7 e 28 giorni di maturazione. Non è stata rilevata alcuna differenza significativa tra campioni di controllo e calcestruzzo contenente batteri. Tipologia di batteri utilizzati è *S. pasteurii*. Jonkers [23].

I grafici in figura 2.22 dimostrano come i batteri aggiunti all’impasto, con una concentrazione finale di 10^9 cm^{-3} , non hanno influenzato le caratteristiche di resistenza. Inoltre fornendo un

determinato nutriente, durante il periodo di maturazione, i batteri alcalino-resistenti hanno mostrato un'evidente formazione di cristalli sulla superficie esterna dei provini. Perché si possa definire un materiale auto-riparante, tutti gli elementi necessari devono far parte del materiale stesso. Questo studio, comunque, dimostra che tale tipo di approccio è potenzialmente fattibile, ma è necessario trovare un giusto nutriente e bisogna scegliere delle specie batteriologiche in grado di sopravvivere per l'intera vita utile della costruzione.

Tittelboom et al. [24] nel 2010 hanno utilizzato un altro tipo di batteri, i *Bacillus sphaericus*, incorporati all'interno di gel di silice. La ricerca si è concentrata sullo studio di tre diversi tipi di campioni prismatici, per forma e per periodi di maturazione, dividendoli in tre gruppi distinti: un primo gruppo di controllo composto da campioni in calcestruzzo normale, un secondo nel quale i campioni sono stati ricoperti da una resina bicomponente epossidica, e un terzo contenente i batteri sopra citati immobilizzati all'interno di gel di silice. L'utilizzo del gel in particolare è stato pensato per salvaguardare i batteri dall'ambiente molto alcalino del calcestruzzo.

I provini cilindrici sono stati prefessurati mediante prove di splitting. Per valutare il grado di "guarigione" delle fessure è stata studiata la variazione di permeabilità con prove effettuate a date stabilite. Avendo rilevato la formazione di cristalli di CaCO_3 è stato dedotto che la resina ha effettivamente protetto i batteri permettendo di avviare, appunto, la reazione che ha portato alla precipitazione dei cristalli. Inoltre in questo tipo di campioni è stato rilevato, con diversi metodi di misura, che la completa chiusura della fessura è avvenuta con successo. Tittelboom conclude la ricerca affermando che uno dei motivi principali per il quale l'utilizzo di questo approccio è altamente consigliato è che la precipitazione minerale, indotta a seguito di attività microbica, è del tutto naturale e non comporta nessun tipo di inquinamento, aggiungendo, inoltre, che per essere fattibile bisogna ancora studiare e verificare la durata di questa tecnica di riparazione.

Sempre Jonkers [25] nel 2011 ha provato ad utilizzare una miscela di batteri in stato dormiente e composti organici all'interno di particelle di argilla espansa. L'obiettivo è di sfruttare il meccanismo metabolico che permette la conversione di lattato di calcio in carbonato di calcio per avviare una reazione in grado di precipitare cristalli. È stato ipotizzato che l'inserimento delle spore batteriche all'interno di aggregati leggeri, quindi molto porosi, potesse estendere il periodo vitale di tali batteri, così da permetterne l'uso all'interno della matrice cementizia.

I batteri vengono utilizzati come catalizzatori in grado di trasformare particolari composti in un materiale di riempimento. Sono resistenti all'alcalinità e possono formare delle spore, in altre parole cellule con pareti molto sottili e sferiche molto simili ai semi delle piante. All'interno di queste spore, possono resistere alle sollecitazioni di tipo meccanico e chimico, rimanendo in stato dormiente, e, in condizioni secche, possono sopravvivere per più di cinquant'anni. La situazione è differente nel caso in cui vengano aggiunti direttamente all'impasto del calcestruzzo, poiché la durata della vita risulterebbe limitata a circa due mesi. È stato dimostrato, infatti, che dopo sei mesi la vitalità dei batteri contenuti nelle particelle di argilla espansa è rimasta invariata.

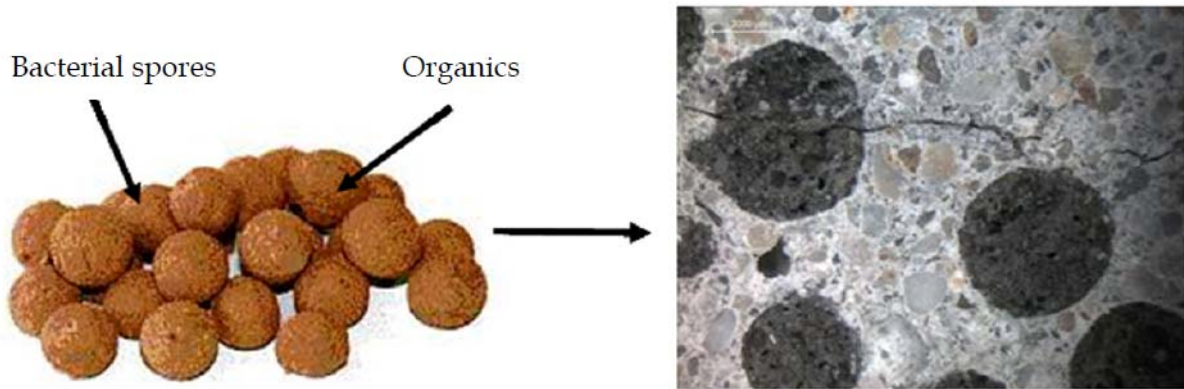


Figura 2.23 Miscela composta di particelle di argilla espansa (sinistra) cariche di spore batteriche e di un composto precursore bio-minerale organico (lattato di calcio). Incorporato nella matrice cementizia (destra) le particelle di argilla espansa possiedono un serbatoio interno con l’agente di riparazione bi-componente. Jonkers [25].

I calcestruzzi contenenti questo tipo di aggiunta, l’argilla espansa, mostrano una sostanziale diminuzione della resistenza, mentre la chiusura delle fessure, avvenuta per i processi spiegati in precedenza, è migliorata sensibilmente. Per misurare ciò, è stata confrontata la permeabilità di campioni di controllo e con additivo, osservando che la chiusura delle fessure nei secondi è avvenuta completamente e in tutte le specie, mentre solo pochi dei primi hanno mostrato lo stesso fenomeno, meno del 33% del numero totale dei campioni provati.

Pei et al. [26] nel 2013 hanno studiato l’influenza che una tipologia di batteri, i *Bacillus subtilis*, o le sole pareti cellulari possano avere sulle prestazioni meccaniche del calcestruzzo. L’idea di utilizzare le pareti cellulari e non batteri vivi, è molto interessante perché risolverebbe tutti i problemi legati alla durata della vita dei batteri stessi. Questa tecnica, inoltre, sembra migliorare il precipitato di carbonato di calcio, poiché le suddette pareti cellulari si sono dimostrate più efficaci dei batteri vivi.

In questo esperimento i batteri e il loro nutriente sono stati gettati direttamente nell’acqua preparata per l’impasto e quindi incorporati all’interno della matrice di calcestruzzo. Per ridurre al minimo le differenze tra le miscele di controllo e con aggiunta, il mezzo liquido contenente il nutriente è stato usato anche nelle prime.

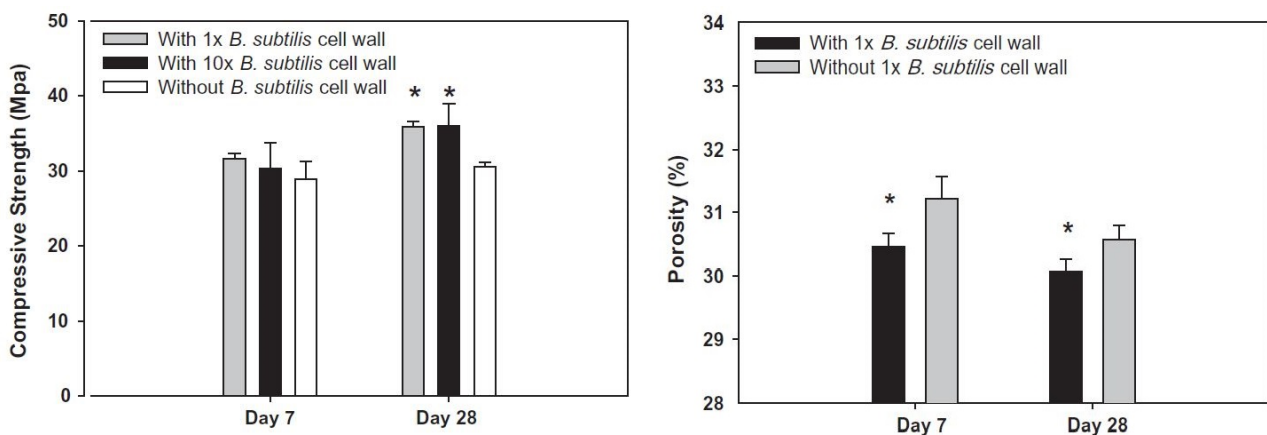


Figura 2.24 Resistenza a compressione a 7 e a 28 giorni (sinistra), i campioni contenenti i batteri vivi e quelli contenenti le sole pareti cellulari mostrano maggiore resistenza, mentre la riduzione della porosità (destra) è superiore nei secondi. Pei et al. [26].

Come si può notare nella figura 2.24 i campioni contenenti i batteri, hanno mostrato un apprezzabile aumento della resistenza a compressione, pari a circa il 15%, rispetto alle specie di controllo. Tale incremento si ha solo dopo un periodo di maturazione superiore a 28 giorni, poiché al momento della prova a 7 giorni non è stata notata nessuna sostanziale differenza. Per quanto riguarda la porosità, i campioni contenenti le sole pareti cellulari hanno mostrato una riduzione maggiore in entrambi i periodi di prova. Pei et al. [26] sostengono che la differenza tra i batteri vivi e le pareti cellulari batteriche è che, una volta decedute, le cellule batteriche rilasciano proteine e polisaccaridi in grado di modificare il pH della soluzione di Ca(OH)_2 .

In conclusione, Pei et al. [26] affermano che le pareti cellulari batteriche possono avere potenziale influenza su altre proprietà legate alla carbonatazione del calcestruzzo, come ad esempio la chiusura delle fessure, il riassorbimento di CO_2 , e la riduzione dell'alcalinità del calcestruzzo. La chiusura delle fessure sfrutta il meccanismo della precipitazione di carbonato di calcio e, come accennato prima, le pareti cellulari, sembrano favorire più dei batteri stessi questo processo. In secondo luogo, il riassorbimento di CO_2 da parte della struttura in calcestruzzo viene accelerato dalla loro presenza, e potrebbe avere un enorme impatto ambientale poiché la produzione di cemento contribuisce al 5% dell'annuale rilascio di CO_2 ed è stato dimostrato come in settant'anni una struttura riesce a riassorbire meno del 40% del diossido di carbonio rilasciato durante la sua produzione. La riduzione dell'alcalinità del calcestruzzo, in parte ne accelera il processo di carbonatazione, ma comporta la perdita dello strato di protezione dell'acciaio con conseguente corrosione dell'armatura. Questo studio, quindi, dimostra come l'utilizzo delle pareti cellulari dei batteri influisca positivamente sui processi di cristallizzazione e sulla resistenza a compressione del calcestruzzo, ma afferma anche che bisogna valutare quanto pesi la riduzione dell'alcalinità sulla corrosione dell'armatura.

2.4.4 Additivi cristallini e aggiunte espansive

Gli additivi cristallini e le aggiunte espansive sono materiali che vengono aggiunti direttamente all'impasto, e non hanno bisogno di essere protetti da sistemi come capsule o tubi fragili. Reagiscono all'interno della matrice cementizia ma non completamente, mantenendo una capacità latente di reagire in presenza di acqua o di umidità.

2.4.4.1 Additivi cristallini

Gli additivi cristallini sono formati principalmente di silice reattiva, cemento e vari catalizzatori cristallini. In presenza di acqua, reagiscono con l'idrossido di calcio formando cristalli non solubili in grado di riempire i pori e interrompere le connessioni tra di essi. L'effetto principale, quindi, è quello di diminuire la permeabilità dei composti cementizi. Si presentano come una polvere molto fine, possiedono un'alta affinità con l'acqua e sono in grado di reagire se a contatto con essa, mentre in condizioni asciutte si trovano in uno stato dormiente. Il processo di sigillatura dipende fortemente dai fattori ambientali come temperatura, densità del calcestruzzo, umidità interna ed esterna. In commercio sono presenti diversi prodotti a base di additivi cristallini. In particolare essi vengono utilizzati, nel caso di riparazioni di elementi fessurati, sotto forma di malte da applicare o inseriti in polvere direttamente nel mix design del calcestruzzo quando risulti più economico rispetto all'utilizzo di manti impermeabilizzanti esterni.

Suresh Chandra Pattanaik [27] nel 2011 ha proposto di utilizzare tali additivi come agenti riparanti da applicare alle parti danneggiate dalla formazione di fessure così da conferire completa impermeabilità all'elemento in calcestruzzo. L'additivo viene aggiunto direttamente in acqua con una quantità pari al 40% del peso dell'acqua e applicato direttamente alla parte danneggiata. Nel proporre questo sistema, le tre fasi principali del fenomeno di sigillatura dovuto alla presenza di questi materiali sono così descritte:

- 1) Le microfibre di cristalli aghiformi, formati dalle reazioni di cristallizzazione, si disperdono in un ambiente umido iniziando a incastrarsi tra di loro formando una complessa rete tridimensionale di rinforzo (figura 2.25 (a)) durante il processo di maturazione in acqua;
- 2) L'impermeabilità propria del calcestruzzo, gioca un ruolo molto importante poiché dipende dai sottoprodotti chimici naturali del processo d'idratazione del cemento, come idrossido di calcio e vari ossidi minerali, e dalle particelle di cemento. Il risultato di tale reazione è la formazione di miliardi di cristalli aghiformi non solubili (figura 2.25 (b)) che riempiono i pori capillari, i vuoti e le micro fessure del calcestruzzo. Una volta ostruiti tutti i pori e i tratti capillari, la loro struttura diventa discontinua e riesce a fermare il passaggio di acqua in tutte le direzioni;
- 3) Quando la superficie fessurata entra nuovamente a contatto con acqua avviene la diffusione dei prodotti chimici organici, promuovendo la formazione di cristalli a maggiore profondità.

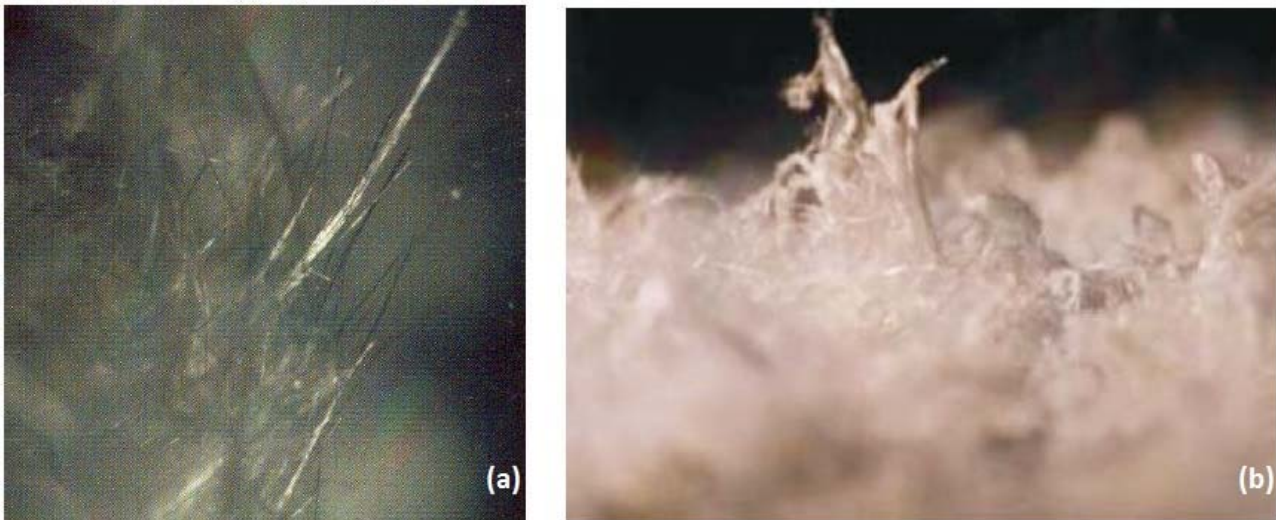


Figura 2.25 Complessa rete tridimensionale formata da cristalli (a), formazione e crescita dei cristalli (b). Pattanaik [27].

Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [28] nel 2010 hanno confrontato miscele diverse di calcestruzzo nelle quali sono stati utilizzati fumi di silice, ceneri volanti e additivi cristallini, osservando la capacità che ognuno di questi materiali possiede di chiudere le fessure con ampiezza determinata.

Oltre al normale cemento per i provini di controllo (OPC – Ordinary Portland Cement), sono stati studiati mix con 30% di ceneri volanti (FA), 10% di fumo di silice (SF) e 1% di additivi cristallini (CA), mentre il rapporto a/c è stato imposto a 0,4. I campioni usati sono cubi di dimensione 5x5x5 cm rinforzati con due barre di acciaio ad aderenza migliorata del diametro di 10 mm (figura 2.26 (a)).

Metà dei provini sono stati fessurati a 3 giorni mentre gli altri a 28 e successivamente immersi in acqua, in vasche differenti per ogni tipologia di calcestruzzo. Per eseguire la fessurazione è stata usata la prova di splitting (figura 2.26 (b)). Prima e dopo l'immersione sono state fotografate le fessure e misurata la loro larghezza. Inoltre sono state scattate foto durante il periodo di cura per verificare l'effettivo andamento della guarigione.

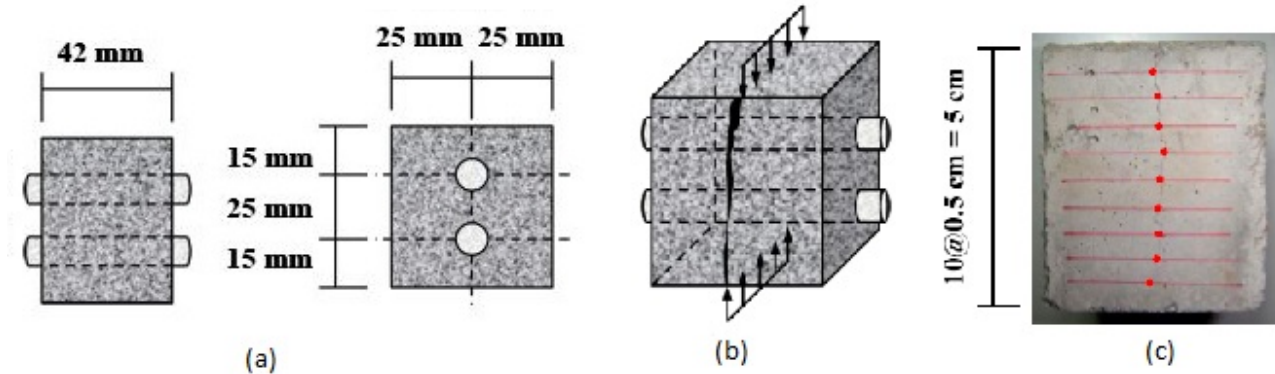


Figura 2.26 (a) Dimensioni campioni cubici; (b) Fessurazione mediante splitting; (c) Misurazione dell'ampiezza delle fessure. Jaroenratanirom e Sahamitmongkol [28].

Per determinare la tipologia dei prodotti della reazione sigillante, è stato usato uno spettroscopio a infrarossi basato sulla trasformata di Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FT-IR). Una volta prelevati campioni di materiale cristallino presente nelle fessure, le specie sono state inserite nello spettroscopio per poi essere analizzate dal software in grado di fornire gli spettri. Tali risultati sono stati ottenuti studiando la percentuale di radiazione infrarossa trasmessa attraverso il materiale e la sua lunghezza d'onda.

In figura 2.27 sono stati riportati i grafici mostrano l'evoluzione del parametro $\beta(t)$ in funzione dei giorni di cura per i campioni fessurati al terzo giorno. Tale parametro è stato calcolato come:

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

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 per il tempo t .

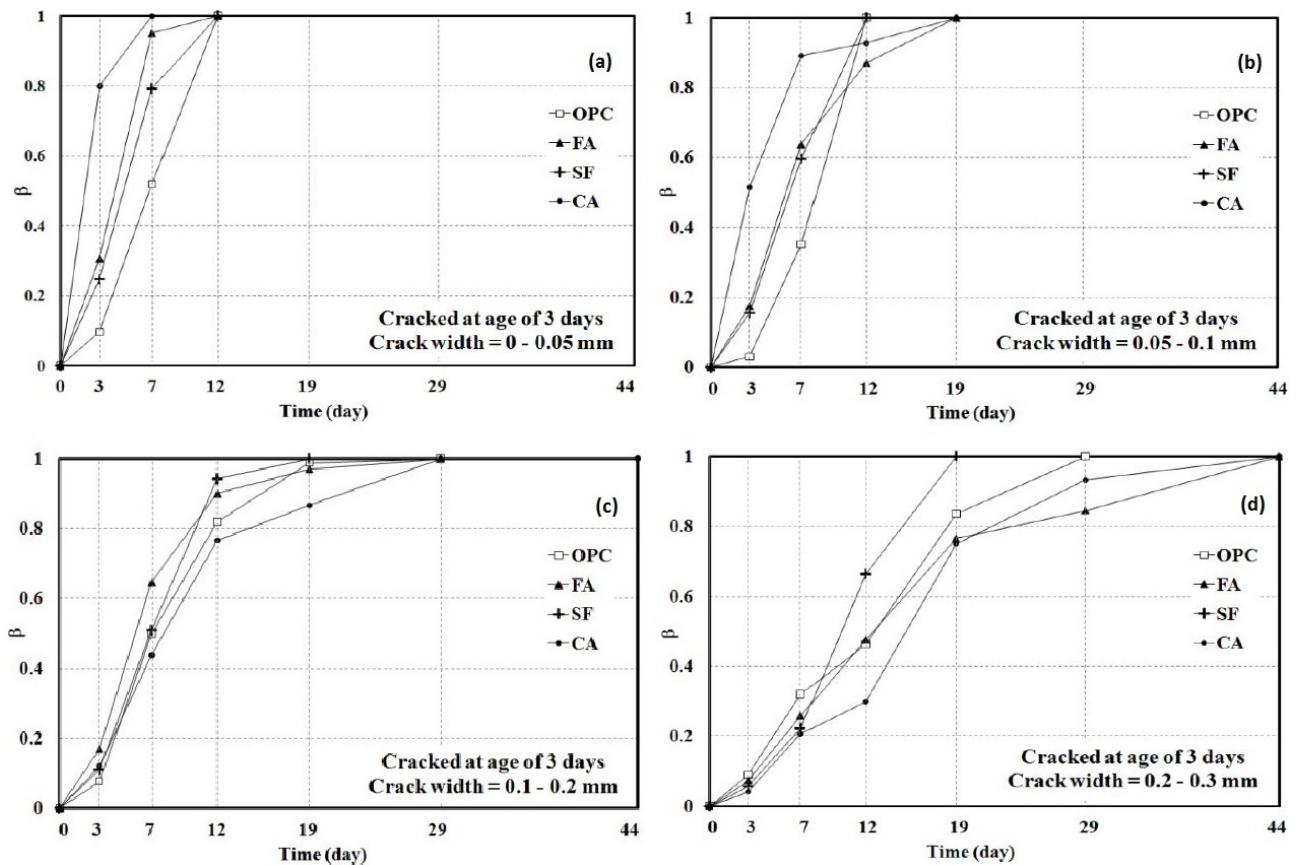


Figura 2.27 Evoluzione del self-healing ratio durante il periodo di cura per fessure di diversa ampiezza e campioni prefessurati a tre giorni. Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [28].

Per i provini prefessurati a 3 giorni, le fessure di ampiezza compresa tra 0.00 e 0.05 mm sono state completamente riparate durante i primi 12 giorni; tale risultato riguarda tutte le tipologie di malte utilizzate in questo studio (figura 2.27 (a)). È, però, da evidenziare come la malta contenente 1% di additivo cristallino abbia chiuso completamente le fessure in soli 7 giorni, mentre nei primi 3 aveva già raggiunto l’80% della riparazione. Le altre, contenenti ceneri volanti o fumo di silice hanno richiesto più di 7 giorni. Per le fessure più grandi, con ampiezza che va da 0.05 a 0.3 mm (figura 2.27 (b), (c), (d)), è stato necessario un periodo di riparazione più lungo; tuttavia, mentre per le tipologie di malte contenenti ceneri volanti e fumo di silice il tempo richiesto è stato proporzionale a quello necessario per le fessure più piccole, le malte contenenti l’additivo cristallino sono state caratterizzate da una riduzione drastica del tasso di guarigione (parametro utilizzato per la valutazione del self-healing). La malta a base di fumo di silice ha riparato le fessure più velocemente rispetto le altre, impiegando soli 19 giorni per ampiezze tra 0.1 e 0.3 mm.

In figura 2.28 vengono riportati i grafici che mostrano la relazione tra il parametro $\beta(t)$, spiegato in precedenza, e il tempo di cura.

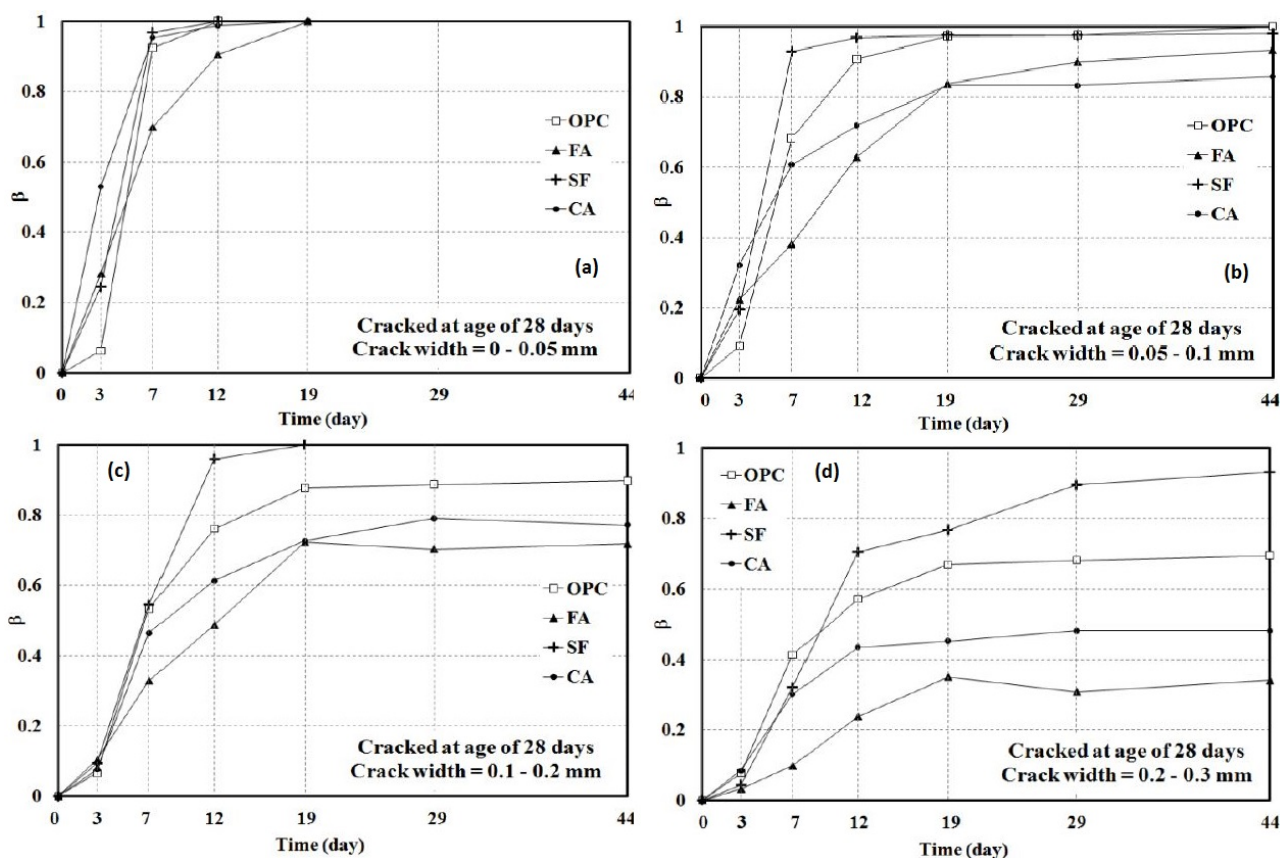


Figura 2.28 Evoluzione del self-healing ratio durante il periodo di cura per fessure di diversa ampiezza e campioni prefessurati a ventotto giorni. Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [28].

Per quanto riguarda i provini fessurati a 28 giorni i risultati sono stati molto differenti. Per le fessure piccole (figura 2.28 (a)) sono stati rilevati healing ratio simili a quelli dei campioni prefessurati a tre giorni evidenziando nuovamente l'efficacia e la rapidità dell'additivo cristallino. Per fessure di dimensione maggiore, fino a 0.2 mm (figura 2.28 (b) e (c)), tuttavia la malta con fumo di silice ha dimostrato un'attitudine migliore nella riparazione (in soli 19 giorni chiude completamente le fessure), anche se la malta di controllo ha raggiunto livelli simili. Le fessure più grandi, fino a 0.3 mm (figura 2.28 (d)), non hanno riscontrato una completa riparazione e le malte contenenti FA, AC e quella di controllo hanno esaurito il processo di riparazione dopo i primi 19 giorni, mentre quella contenente FS ha continuato, seppur per poco, tale processo.

Nella figura 2.29 sono mostrate le fessure prima e dopo il trattamento di cura. I prodotti, analizzati con il microscopio ad infrarossi, risultano essere di natura cristallina, in particolare carbonato di calcio, in tutte le tipologie di malte anche se presentano forme diverse, mentre l'additivo cristallino forma cristalli di piccola dimensione. Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol sostengono che questo potrebbe essere il motivo per il quale l'additivo cristallino riesca a riparare più velocemente le fessure di piccola dimensione, poiché la precipitazione di tali cristalli richiede meno tempo. Affermano, infine, che il principale processo di auto guarigione delle fessure, nel caso degli additivi cristallini, dipende dalla precipitazione dei cristalli di carbonato di calcio all'interno della fessura.

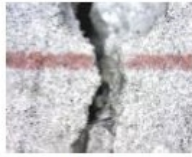


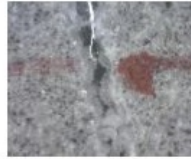

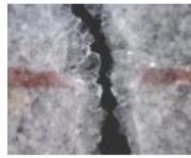


OPC (cracked at the age of 3 days)		
Photo at	Initial (0.3051 mm)	19 days (0.0698 mm)
FA (cracked at the age of 3 days)		
Photo at	Initial (0.3051 mm)	29 days (0.1397 mm)
SF (cracked at the age of 28 days)		
Photo at	Initial (0.6787 mm)	19 days (0.1502 mm)
CA (cracked at the age of 3 days)		
Photo at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

Figura 2.29 Prodotti di sigillatura presenti sulle superfici delle fessure di differenti malte: **OPC**, calcestruzzo con cemento Portland ordinario; **FA**, calcestruzzo con ceneri volanti; **SF**, calcestruzzo con fumo di silice, **CA**, calcestruzzo con additivo cristallino. Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [28].

Secondo Takagi et al. [7] la semplice riduzione della permeabilità è da sempre associata erroneamente al fenomeno del self-healing. L’errore, sostengono, sta nel fatto che tale riduzione può avvenire per diversi motivi, per esempio in seguito allo scioglimento e riposizionamento di idrati, grazie alla presenza di catalizzatori attivi. Tale processo è differente da quello che normalmente è dovuto alla guarigione autogena, in altre parole all’idratazione continua di materiale non idratatosi e contenente calcite (CaCO_3). Per lo più questi fenomeni vengono attivati quando la matrice è a contatto continuo con acqua.

Il loro esperimento ha avuto lo scopo di studiare il recupero della resistenza a compressione dovuto ai fenomeni legati al self-healing, utilizzando additivi cristallini e confrontando campioni di controllo fabbricati con cemento a base di scorie d’altoforno, più precisamente di due tipologie differenti, normale e modificata, con campioni contenenti l’additivo. Sono state così ottenute quattro serie di campioni, due di controllo e due con additivo. Il mix-design è stato caratterizzato da un rapporto acqua/cemento pari a 0,50, un contenuto di additivo fluidificante pari all’2.1% e catalizzatori cristallini pari al 2.5% in contenuto di cemento.

Per studiare il recupero della resistenza a compressione, i provini, all’età di ventotto giorni, sono stati sottoposti alla prova di compressione. Raggiunto il 90% del carico massimo, la pressione è stata mantenuta per altri due minuti così da permettere il formarsi di un numero maggiore di micro fessure. I campioni sono stati divisi in ulteriori due gruppi e immersi in acqua per due diversi

periodi di cura, 28 e 56 giorni. Superate tali durate sono stati sottoposti nuovamente alla prova di compressione per valutare il nuovo valore di resistenza.

È stato valutato anche l'assorbimento d'acqua, con i provini sono stati essiccati in un forno a 50° e messi in contatto con 5 mm di acqua sulla superficie superiore.

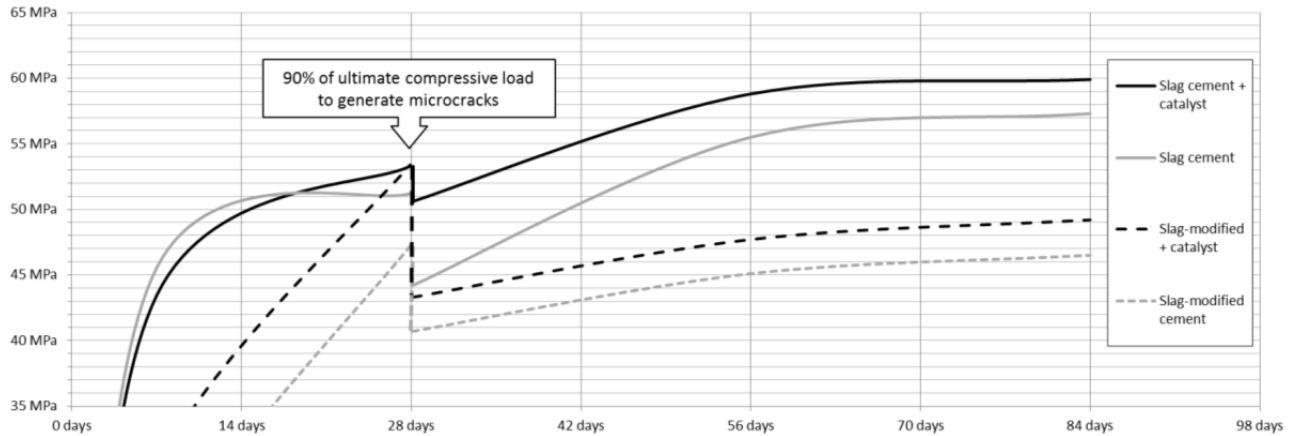


Figura 2.30 Perdita della resistenza a compressione e recupero dovuto all'auto guarigione delle micro fessure. Takagi et al. [7].

Come mostrato in figura 2.30, tutti i campioni composti dal cemento con scorie modificate hanno avuto un recupero parziale della resistenza a compressione, pari all'11-25.6%, mentre quelli composti con cemento a base di scorie d'altoforno hanno raggiunto valori di resistenza maggiori di quelli iniziali, pari al 112%. Questo recupero elevato è dovuto soprattutto alla presenza, nei calcestruzzi pozzolanici, di un gran numero di particelle non idratate che consente, grazie alla presenza del catalizzatore, di avviare i processi di cristallizzazione. Infatti, è molto probabile che in questi calcestruzzi venga prodotto nuovamente gel C-S-H durante l'effetto di self-healing. In entrambi i casi, infatti, i campioni contenenti l'additivo cristallino hanno raggiunto livelli di resistenza maggiori.

Oltre al recupero delle proprietà meccaniche è stata rilevata una riduzione della permeabilità complessiva dei provini.

Ferrara e Krelani [29] nel 2013 hanno sviluppato una metodologia per verificare e quantificare la capacità di auto guarigione e i suoi effetti sul recupero delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo. Il recupero è stato valutato in termini di rigidezza, carico massimo e apertura efficace della fessura.

La metodologia approntata comprende la fabbricazione di campioni prismatici, di dimensioni 50x100x500 mm, contenenti e non additivo cristallino. Dopo 72 ore di cura in condizione permanentemente bagnata, i provini sono stati immagazzinati in camera umida (95% U.R., 20°) per 35 giorni. Durante questo periodo lo sviluppo della resistenza è stato continuamente monitorato non rilevando particolari differenze tra le specie contenenti additivo e quelle di controllo. Una volta terminato il periodo di cura iniziale, è stata eseguita la prefessurazione raggiungendo due diversi livelli di apertura, con ampiezza di 0.13 e 0.27 mm, mediante il test della flessione controllata a tre punti. In seguito i provini sono stati sottoposti per le successive quattro settimane

a cicli accelerati con lo scopo di simulare l’esposizione alle condizioni autunnali dell’Italia settentrionale. Sia i campioni prefessurati sia quelli lasciati integri, sono stati sottoposti nuovamente alla prova di flessione a tre punti così da ottenere risultati in termini di curve carico-spostamento, da comparare con quelle ottenute al momento della fessurazione iniziale. È stato possibile valutare la guarigione in termini di apertura delle fessure e recupero di carico massimo e rigidità.

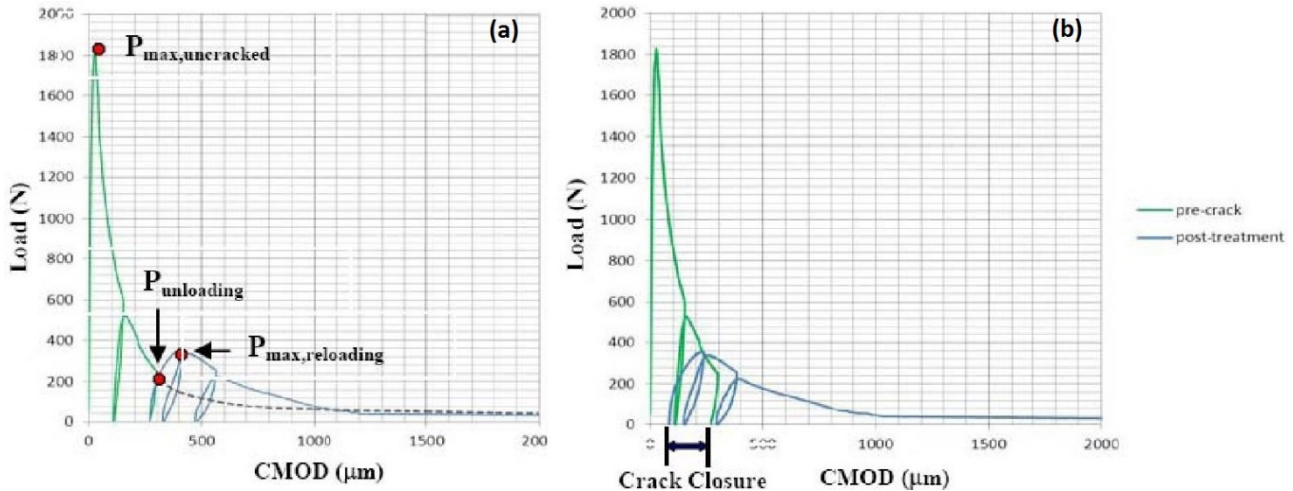


Figura 2.31 Curva carico-spostamento ottenuta nella prova di flessione prima e dopo la cura (a), procedura per la valutazione della chiusura delle fessure (b). Ferrara e Krelani [29].

In figura 2.31 (a), è riportato un esempio della curva carico-spostamento relativa ai campioni studiati durante le prove di flessione, prima e dopo il periodo di cura. Si osserva un evidente recupero della resistenza dovuto alla presenza dell’additivo, funzione della durata dell’esposizione, delle condizioni igrotermiche e dell’ampiezza della fessura. Ferrara e Krelani [29] sostengono che tale recupero si è verificato, molto probabilmente, grazie ai meccanismi legati al self-healing che ha portato ad una parziale chiusura delle fessure. In figura 2.31 (b), invece, è stata riportata la procedura proposta per la valutazione della chiusura delle fessure. La curva della seconda prova a flessione è stata traslata a sinistra fino all’ottenimento dell’intersezione del punto di picco con la curva della prima prova. La quantità di questa traslazione è stata utilizzata per la valutazione della chiusura e il rapporto con l’ampiezza originale è stato assunto come indice dell’auto guarigione della fessura.

I risultati in figura 2.32 rivelano che anche il calcestruzzo ordinario mostra, dopo un periodo d’invecchiamento convenzionale, un’autoguarigione delle fessure non trascurabile dovuta alla continua idratazione delle particelle di cemento. Questa capacità però sembra verificarsi casualmente e non dipende dalla durata dell’esposizione all’alta umidità relativa. L’utilizzo dell’additivo cristallino, invece, rafforza la capacità del self-healing, e sembra dipendere dalla durata dell’esposizione e soprattutto funzionare bene anche per fessure di ampiezza maggiore.

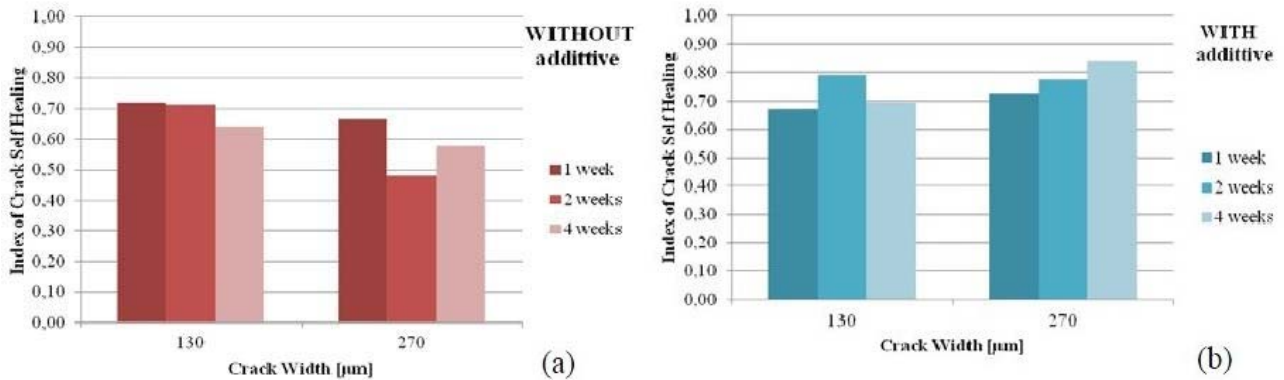


Figura 2.32 Indice di auto guarigione delle fessure, per calcestruzzo con (b) o senza (a) additivo cristallino, come funzione dell'apertura delle fessure e della durata dell'esposizione. Ferrara e Krelani [29].

Per quanto riguarda la valutazione del recupero della resistenza sono stati definiti due diversi indici riferiti al materiale vergine, che non ha subito la prefessurazione, o alla resistenza residua post-fessurazione. In figura 2.33 vengono mostrati gli indici di recupero in funzione della durata dell'esposizione e della dimensione delle fessure. Si può osservare come la presenza dell'additivo abbia funzionato come catalizzatore per la reazione del self-healing, migliorando il recupero della resistenza. Inoltre si vuole porre l'accento sul fatto che l'ampiezza maggiore delle fessure ha portato a un recupero più elevato e questo è dovuto alla maggiore esposizione della fessura alle condizioni ambientali. Questo fenomeno non si è verificato per le specie non contenenti l'additivo.

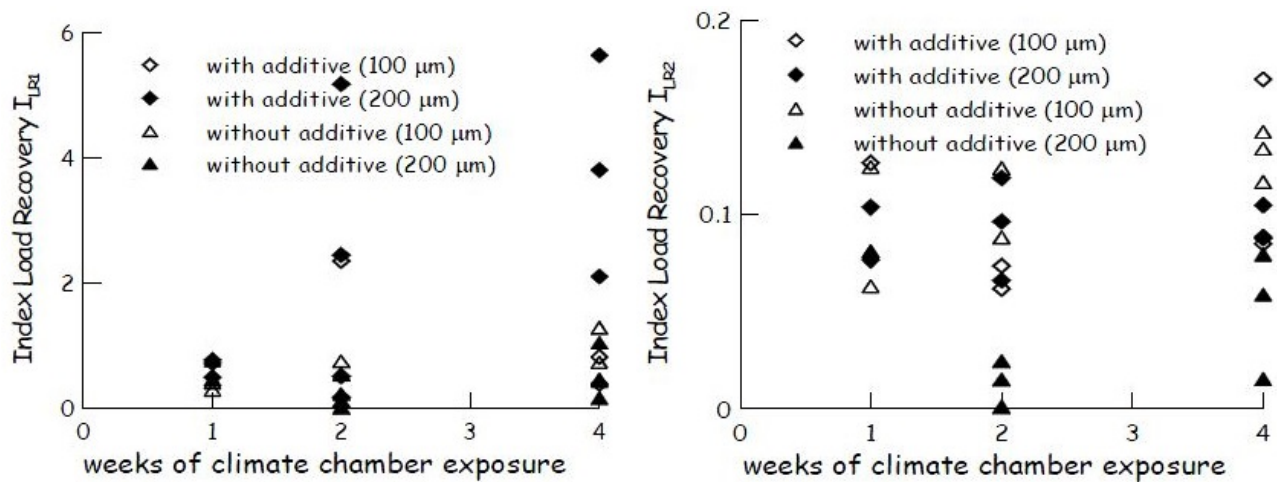


Figura 2.33 Indici di recupero della resistenza in funzione della durata dell'esposizione e dell'apertura delle fessure. Ferrara e Krelani [29].

È stato valutato anche il recupero della rigidità del materiale poiché direttamente correlata al danno. Viene proposto un nuovo indice, relativo al recupero del danno e, come mostrato nella figura 2.34, durante le prime due settimane di esposizione i campioni di controllo hanno registrato risultati migliori, mentre nelle ultime due l'additivo cristallino si comporta meglio soprattutto per fessure più piccole. Ferrara e Krelani sostengono che questo è dovuto al fatto che i prodotti della cristallizzazione sono di natura più soffice rispetto quelli dell'idratazione del cemento.

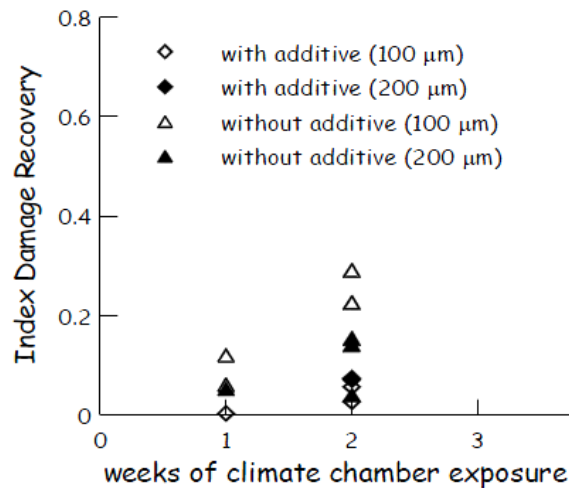


Figura 2.34 Indice di recupero del danno in funzione della durata dell'esposizione e dell'apertura della fessura. Ferrara e Krelani (2013) [29].

In conclusione l'utilizzo degli additivi cristallini migliora la capacità di auto guarigione del calcestruzzo, raggiungendo fino a più dell'80% della chiusura delle fessure, e rendendolo più affidabile e consistente.

2.4.4.2 Aggiunte espansive

Gli additivi espansivi vengono utilizzati principalmente al fine di minimizzare la fessurazione dovuta al ritiro da essiccamento. Rossetti et al. [30] spiegano che tali additivi sono principalmente a base di ossido di calcio o di solfoalluminati di calcio. In seguito all'idratazione, producono un'espansione che, essendo impedita (dall'armatura), fa nascere delle tensioni di compressione nel calcestruzzo. Si crea quindi uno stato di precompressione chimica indotta dall'additivo espansivo. In seguito al raffreddamento nella struttura si avranno tensioni di trazione ridotte o annullate e, quindi, la corrispondente riduzione o annullamento delle fessure.

Ahn e Kishi [31] nel 2010, hanno studiato i diversi effetti dei prodotti espansivi e cristallini combinati con diversi agenti chimici con lo scopo di conseguire una guarigione più efficace. Sono stati utilizzati additivi espansivi, formati da haüyne, anidrite e calce libera, due "geomateriali" (A e B) composti principalmente da SiO_2 , Al_2O_3 e a cui sono state aggiunte anche percentuali di montmorillonite, feldspato e quarzo. Queste aggiunte sono state necessarie poiché il geomateriale di tipo B possiede una struttura che non gli permette di espandersi tanto quanto il geomateriale A che, invece, riesce a dilatarsi fino a diciotto volte il volume a secco. Infine per garantire e migliorare l'effetto della ricristallizzazione cementizia sono stati utilizzati dei carbonati come agenti chimici, più precisamente NaHCO_3 , Na_2CO_3 e Li_2CO_3 .

Gli autori hanno utilizzato provini cilindrici di 10 cm di diametro e 20 cm di altezza, lasciati maturare per un mese prima di effettuare una prefessurazione controllata per ottenere fessure di ampiezza variabile tra 0.1 e 0.3 mm (massima tolleranza per gli stati limite d'esercizio) e quindi immersi in acqua per un altro mese.

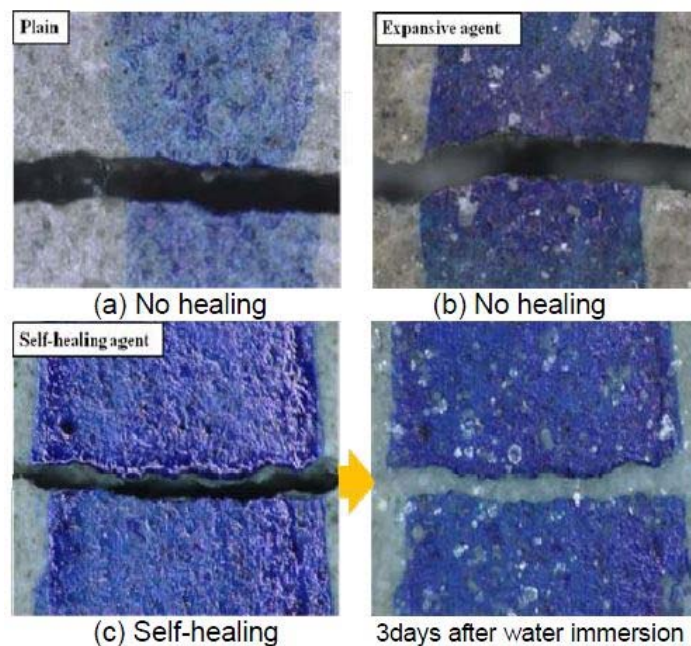


Figura 2.35 Confronto chiusura fessura dopo un mese di cura in acqua tra calcestruzzo comune (a), calcestruzzo con agenti espansivi (b), calcestruzzo con agenti espansivi progettato per il self-healing (c). Ahn e Kishi [31].

Ahn e Kishi hanno notato che utilizzando solamente l'agente espansivo, le fessure non riescono a chiudersi e anche se avviene l'espansione, questa non è sufficiente a sigillare la fessura (figura 2.35 (a) e (b)).

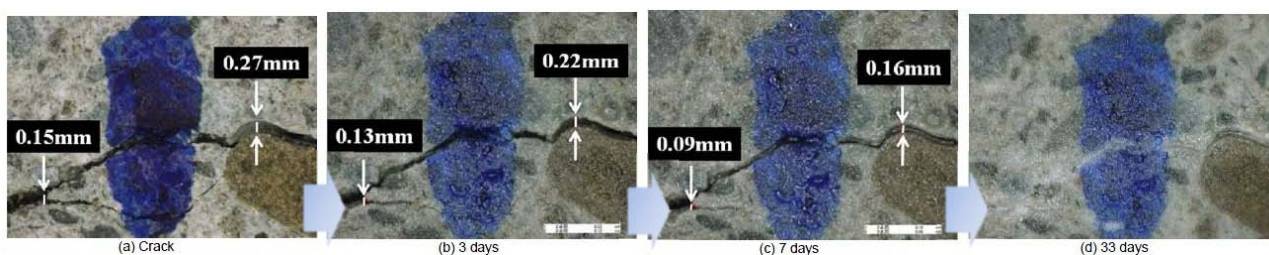


Figura 2.36 Fenomeno del self-healing analizzato per le diverse ampiezze della stessa fessura. Ahn e Kishi [31].

Aggiungendo il resto dei componenti, sopra citati, il sistema si stabilizza e aumenta la velocità di reazione riuscendo a chiudere alcune fessure di 0,15 mm in 3 giorni, di 0,22 mm in 7 giorni e garantendo la completa sigillatura in un mese di cura (figura 2.35 (c) e figura 2.36).

Sisomphon, Copuroglu e Koenders [32] [33] nel 2011 hanno confrontato le capacità di autoriparazione di miscele di calcestruzzo contenenti additivi cristallini ed espansivi. Il cemento usato è un Portland CEM I 42.5 N, gli additivi cristallini sono materiali cementizi sintetici contenenti silice e alcuni catalizzatori cristallini. Questi catalizzatori cristallini si attivano anche solo alla presenza di elevata umidità. Gli additivi espansivi, invece, sono a base di solfoalluminato di calcio, prodotto commerciale di solito utilizzato per la compensazione del ritiro.

Sono state predisposte quattro miscele di calcestruzzo:

- Controllo;
- CA1.5, contenente l'1.5% di additivo cristallino nel peso di cemento;

- CSA10, contenente il 10% di additivo espansivo nel peso di cemento;
- CA1.5/CSA10, contenente l’1.5% di additivo cristallino e il 10% di additivo espansivo.

Il rapporto a/c delle miscele è stato pari a 0.25, mentre rapporto s/c (sabbia/cemento) pari a 2.0. E’ stato utilizzato additivo super fluidificante e, per controllare l’apertura delle fessure, è stata posta una maglia in filo galvanizzato a metà dell’altezza dei campioni. Dopo 24 ore sono stati liberati dalle forme e messi in camera umida per i successivi tre giorni. I campioni studiati sono dischi in malta caratterizzati da un diametro di 75 mm e un’altezza di 20 mm. Sono stati prefessurati, mediante prova di splitting, con l’obiettivo di ottenere fessure con ampiezza compresa tra i 100 e i 400 micron (figura 2.37 (a)) e in seguito fissati a una staffa in PVC di diametro 75 mm per simulare un vincolo strutturale (figura 2.37 (b)). Per valutare la larghezza delle fessure in superficie è stato usato uno stereomicroscopio. I campioni sono stati quindi immersi per 28 giorni in acqua, cambiata ogni 7 giorni, e sono stati effettuati saggi intermedi a 4, 7, 14 e 28 giorni.

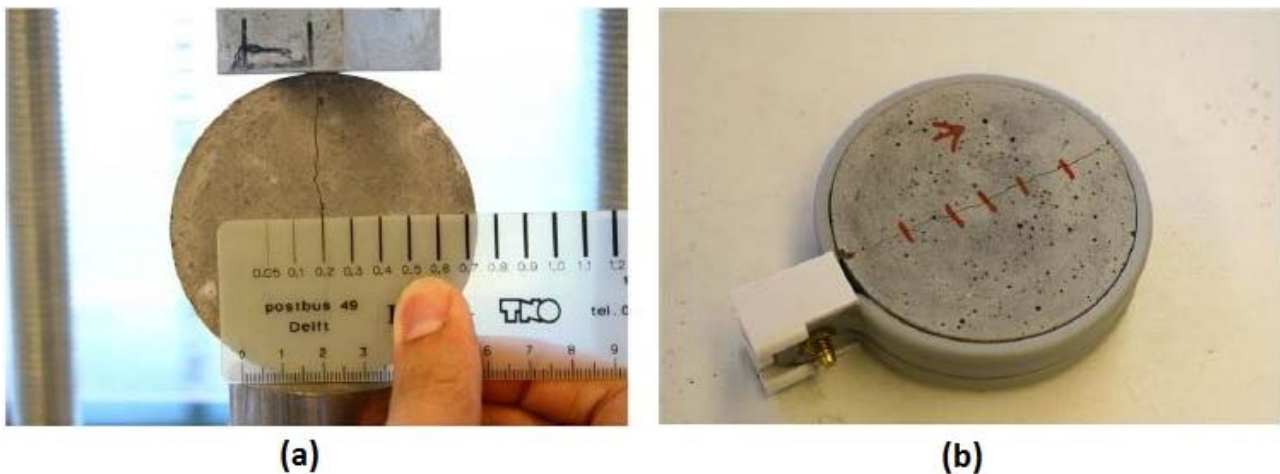


Figura 2.37 Prefessurazione campioni (a), fissaggio staffa in PVC (b). Sisomphon et al. [33].

È stata approntata, inoltre, una prova di filtrazione che consiste nel predisporre 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 pesata in precedenza. Lo scopo di tale prova è di verificare e quantificare il flusso d’acqua attraverso la fessura a pressione atmosferica per una durata di dieci minuti.

Come parametro di misura del grado di riparazione delle fessure è stata usata l’ampiezza della fessura prima e dopo l’immersione in acqua. Per tutte le tipologie di malte usate non è stata riscontrata differenza nella riparazione tra le due facce dei campioni. Le fessure si sono sigillate in tutti i casi, anche se i tempi sono variati in funzione del tipo di malta; analizzando i risultati esposti in figura 2.38 si evince che la chiusura è avvenuta secondo l’ordine $Control < CA1.5 \approx CSA10 < CA1.5/CSA10$. L’ultima miscela contiene entrambe le aggiunte studiate in questo esperimento e ha dimostrato di essere la migliore miscela per garantire il self-healing, infatti fessure della dimensione di 400 μm si sono sigillate in meno di 28 giorni.

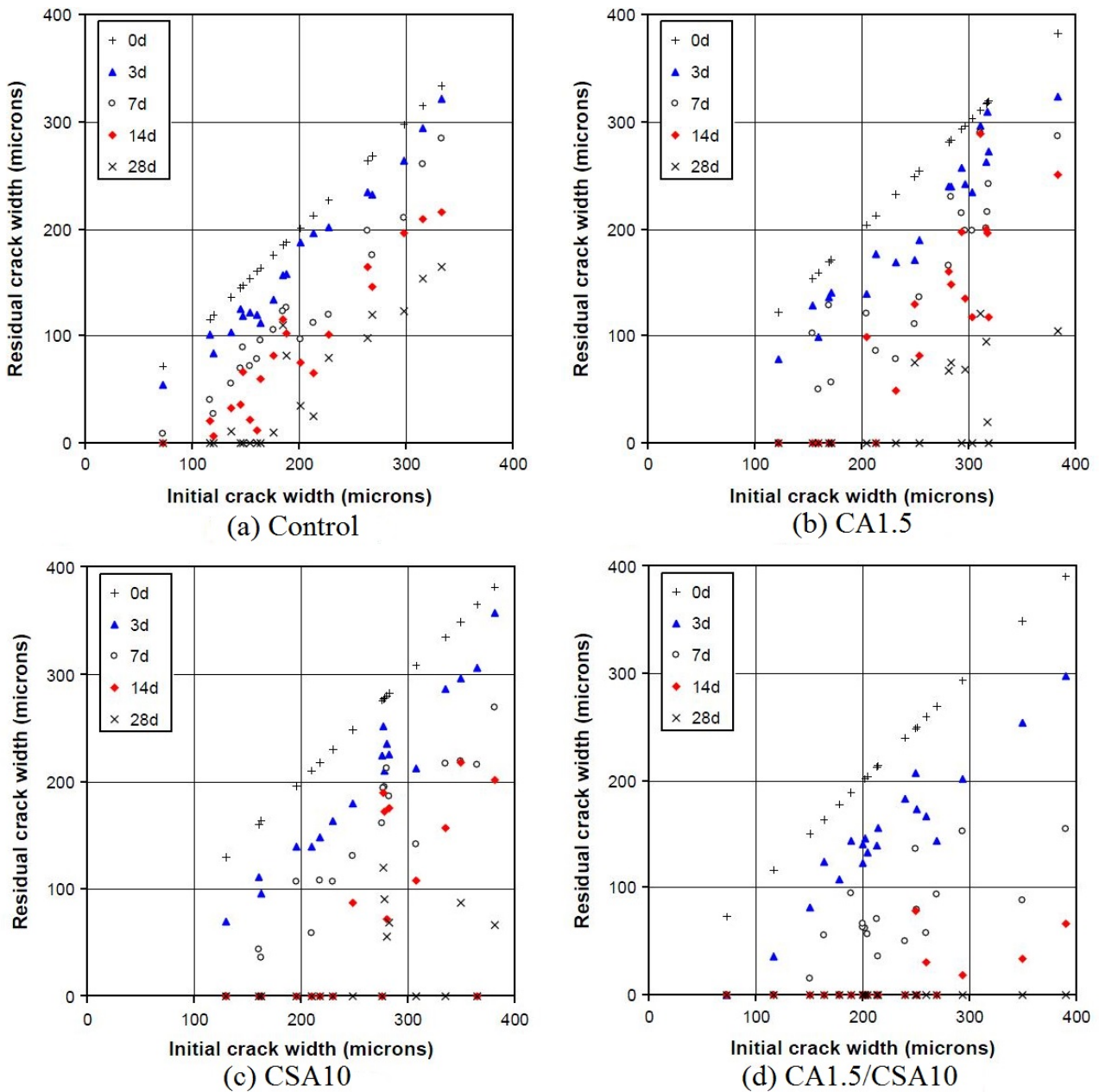


Figura 2.38 Analisi dell'ampiezza delle fessure. Sisomphon et al. [32].

Riassumendo, i campioni di controllo sono stati gli unici a non essere riusciti a sigillare completamente le fessure (fino al 90%), mentre gli altri hanno chiuso fessure di piccole dimensioni, fino a 150 μm , in meno di 28 giorni; per quanto riguarda la richiusura delle fessure di ampiezza compresa fra i 200 e i 400 μm le miscele con additivo cristallino (CA) e additivo espansivo (CSA), ovvero entrambi, hanno dimostrato di possedere grandi potenzialità.

Per quanto riguarda la prova di filtrazione, è stato misurato il passaggio di acqua attraverso i provini subito dopo la fase di fessurazione e in seguito a intervalli stabiliti, è stata verificata la diminuzione del flusso d'acqua. Durante il periodo di cura, l'acqua è stata cambiata a intervalli regolari, subito dopo l'esecuzione della prova di permeabilità intermedia. È stato, quindi, notato come al cambiare dell'acqua il flusso sia inizialmente aumentato.

È stato altresì rilevato che la presenza del confinamento dei campioni, quale introdotto mediante la staffa in PVC, ha giovato al processo di guarigione. Con le miscele contenenti additivo espansivo il confinamento migliora la capacità di riparazione e riduce al minimo le micro fessure sulla zona di transizione tra matrice cementizia e aggregati. Questa situazione non si allontana dal reale funzionamento in opera del calcestruzzo indurito, in quanto si troverà sempre soggetto a carichi e vincoli strutturali.

2.4.5 Prodotti incapsulati

Uno degli approcci studiati per la fabbricazione di calcestruzzo in grado di auto ripararsi, è quello basato sull’utilizzo di agenti confinati all’interno di capsule e dispersi nella matrice cementizia e capaci di avviare il processo di guarigione. Quando le capsule vengono rotte, ad esempio in seguito alla fessurazione, il meccanismo del self-healing viene attivato attraverso il rilascio e la successiva reazione dell’agente all’interno della fessura o della parte danneggiata.

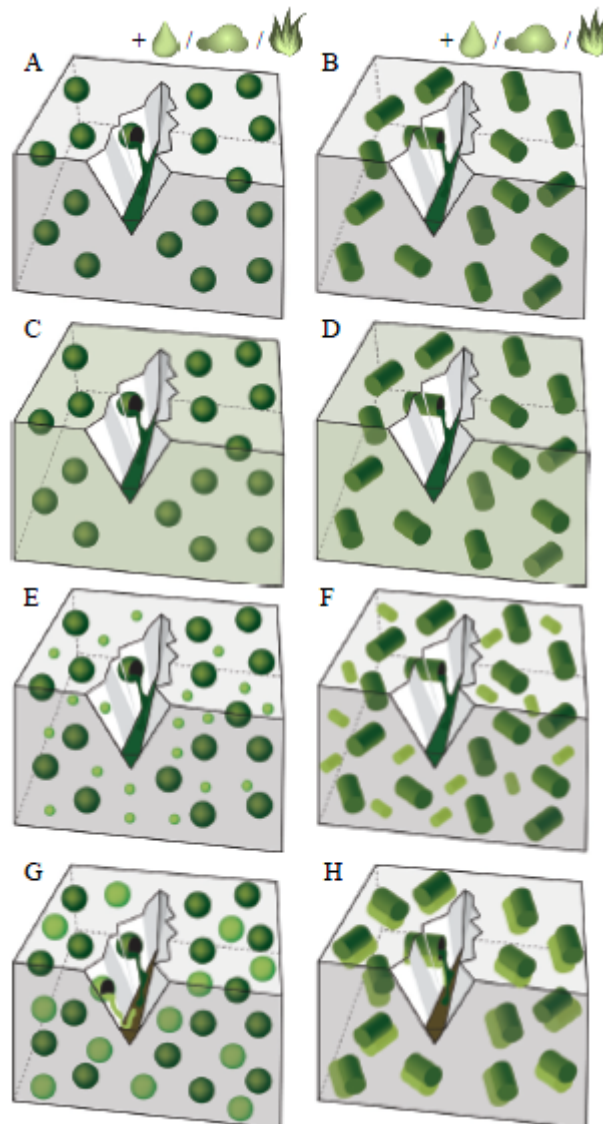


Figura 2.39 Prodotti incapsulati. Rilascio dell’agente sigillante, inizialmente confinato in capsule sferiche o cilindriche, all’interno della fessura. Reazione dell’agente dovuta: al contatto con l’umidità, con l’aria o all’aumento della temperatura (A,B); al

contatto con la matrice cementizia (C,D); alla presenza di un secondo componente presente all'interno della matrice (E,F); alla presenza di un secondo componente incapsulato separatamente (G,H). [8]

Mentre alcuni agenti reagiscono al semplice contatto con l'aria, con l'umidità o all'aumentare della temperatura (figura 2.39 A, B) o tramite il contatto con la matrice cementizia (figura 2.39 C, D), altri hanno bisogno di entrare in contatto con un altro componente che può trovarsi disperso all'interno della matrice (figura 2.39 E, F) o all'interno di altre capsule (figura 2.39 G, H). Le capsule possono avere forma sferica o cilindrica.

Dry [34] nel 2000 ha utilizzato capsule cilindriche contenenti un forte adesivo ad alto modulo elastico e capace di indurire a contatto con l'aria (figura 2.39 B). In particolare ha voluto studiare l'applicabilità e la longevità posseduta dagli adesivi utilizzati, confrontando i risultati con i valori relativi al calcestruzzo ordinario di controllo. I campioni studiati sono piastre in calcestruzzo di quattro tipologie differenti, in funzione del tipo di adesivo presente all'interno delle capsule:

- Controllo, non contenente alcun tipo di adesivo riparante;
- Capsule contenenti cianoacrilato e superfici dei campioni incorporanti composti organici volatili (Volatile Organic Compounds – VOC);
- Capsule contenenti un adesivo denominato Tripp, posizionate casualmente in un'area larga circa 60 cm nella mezzeria dell'elemento (le cui dimensioni non sono state specificate in modo completo), e capsule contenenti VOC posizionate poco al di sotto della superficie superiore del campione;
- Capsule contenenti un adesivo denominato Tripp, sistemato solamente sulla superficie dell'elemento e non all'interno della sezione.

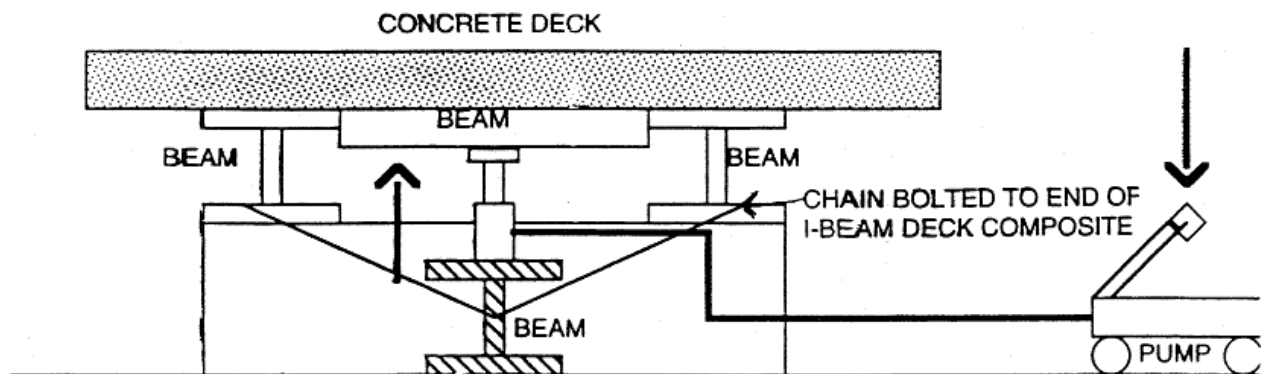


Figura 2.40 Metodo di applicazione del carico dal basso per indurre la fessurazione da taglio su piastre in calcestruzzo. [34]

Per imporre la fessurazione da taglio, è stato seguito il metodo illustrato in figura 2.40. Il carico è stato applicato dal basso verso l'alto mediante l'utilizzo di un martinetto idraulico posto in mezzera. Le piastre in calcestruzzo sono state sistemate sugli appoggi e lasciate flettere sotto il peso proprio in modo da portare in tensione la superficie inferiore. Dopodiché è stato attivato il martinetto che ha applicato una forza opposta a quella del peso proprio, portando prima la piastra completamente in piano e in seguito flettendola verso l'alto così da porre in tensione il lembo superiore. Il graduale aumento del carico è stato fermato per quattro minuti una volta raggiunti 1000 psi (circa 7 MPa), in seguito lasciato proseguire fino alla formazione delle prime fessure in

mezzeria per poi essere fermato per altri quattro minuti prima del termine della prova. È stata osservata la fuoriuscita dell'adesivo in ognuno dei campioni, misurando la distanza tra le capsule danneggiate. Dopo diversi mesi, i campioni sono stati sottoposti nuovamente alla prova fino al raggiungimento della rottura, in modo da verificare il grado di riparazione della fessura.

Al momento del secondo carico, solo i campioni contenenti l'adesivo Tripp hanno mostrato un modesto recupero della resistenza, fino al 20%, mentre i campioni di controllo e quelli contenenti il cianoacrilato hanno mostrato una resistenza inferiore a quella iniziale. Avendo osservato un'ulteriore fuoriuscita di adesivo dalle capsule, non rottesi al momento della prima prova, i campioni sono stati lasciati riposare per altre tre settimane, così da dare la possibilità all'adesivo di indurirsi, e poi sottoposti a una terza prova di carico. In questo caso i provini contenenti il cianoacrilato hanno mostrato un modesto recupero di resistenza, dovuto probabilmente alla rottura di un maggior numero di capsule, mentre solo i campioni contenenti l'adesivo Tripp sulla superficie superiore sono stati caratterizzati da un ulteriore recupero di resistenza, pari al 13%, rispetto il valore della resistenza raggiunto nella prima prova. I campioni di controllo, invece, hanno mostrato, in entrambe le prove, una perdita di resistenza pari al 33%.

Con questo studio è stato dimostrato come sia possibile ottenere un recupero di resistenza in seguito al danneggiamento di un elemento strutturale utilizzando adesivi ad alta resistenza incapsulati. Risulta molto interessante come, al momento della seconda prova, dopo più di un anno dopo la fabbricazione dei campioni, l'adesivo all'interno delle capsule si trovasse ancora in ottime condizioni, riuscendo ancora a conferire resistenza.

Huang e Ye [35] nel 2011 hanno utilizzato capsule sferiche, di diametro 5 mm, contenenti una soluzione di silicato di sodio in grado di reagire con la matrice cementizia (figura 2.39 C). Il loro piano sperimentale ha previsto l'utilizzo di calcestruzzo rinforzato con fibre di alcol polivinilico (2%) e contenente scorie d'alto forno (1.4%). Gli autori hanno preparato diverse serie di campioni prismatici (dimensioni 160x40x40 mm): due contenenti capsule con differente concentrazione di soluzione riparante (10 e 20 g/100g), una con capsule contenenti solo acqua e infine quella di controllo nella quale sono state poste capsule vuote. I campioni, dopo un periodo di cura di 14 giorni in un'ambiente a temperatura costante, sono stati sottoposti alla prova di flessione su tre punti fino alla formazione di fessure di ampiezza pari a 1,0 mm. In seguito sono stati lasciati nuovamente in un ambiente a temperatura costante pari a 20° per 42 giorni e infine sottoposti alla stessa prova di flessione così da poter misurare e confrontare i valori di resistenza a flessione, rigidità e capacità di deformazione.

I prodotti della guarigione sono stati analizzati tramite un microscopio ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope) ed è stato osservato che la soluzione di silicato di sodio, interna alle capsule, ha reagito con il calcio presente nella matrice cementizia formando del gel C-S-H all'interno della fessura. Per verificare l'influenza della presenza delle capsule sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo, campioni contenenti capsule vuote sono stati confrontati con altri di controllo nella prova di flessione a tre punti. I risultati indicano come le capsule riducano la resistenza a flessione del 27%.

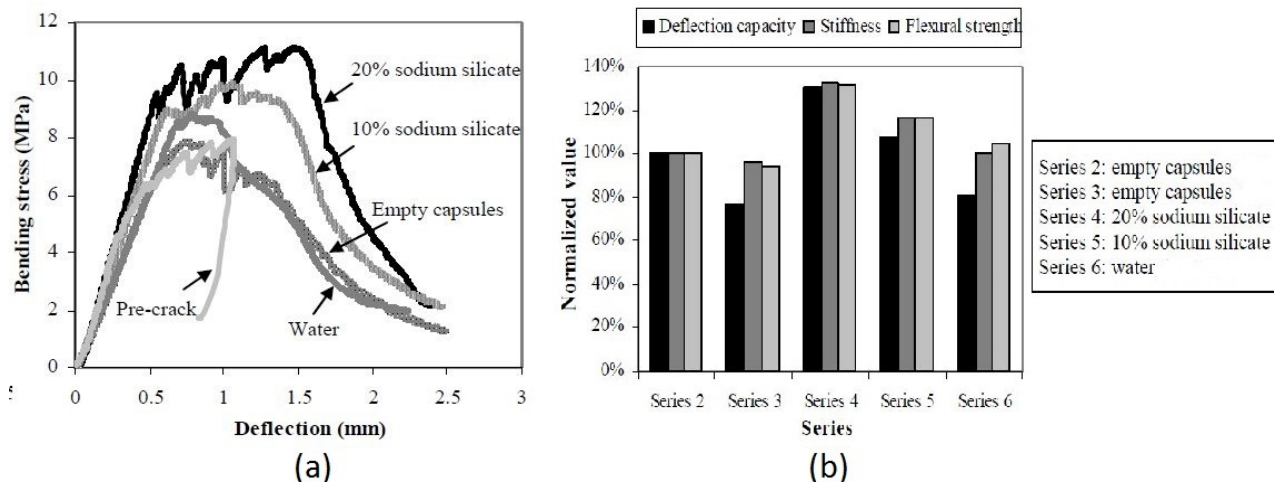


Figura 2.41 Grafico carico-spostamento delle diverse tipologie di campioni dopo il periodo di cura (a), confronto del recupero delle proprietà meccaniche delle diverse tipologie di campioni (b). [35]

I grafici in figura 2.41 riportano il confronto delle proprietà meccaniche delle diverse tipologie di campioni studiati. In figura 2.41 (a) si nota facilmente come le specie contenenti le capsule con la soluzione abbiano dimostrato resistenza a flessione superiore, in particolare la maggiore concentrazione del silicato ha comportato un recupero di resistenza più elevato. In figura 2.42 (b), invece, viene mostrato come le specie contenenti la soluzione con il 20% di silicato di sodio (Series 4) abbia raggiunto, dopo il self-healing, un valore di resistenza pari al 130% rispetto quello dei provini di riferimento (Series 2). È da osservare come le diverse concentrazioni della soluzione abbiano comportato una differenza del 22% nelle proprietà meccaniche dei campioni. Huang e Ye hanno affermato che tale differenza è dipesa dalla quantità e dalla coesione dei prodotti di guarigione. Quando la concentrazione è pari a zero, come nei campioni con semplice acqua, l'ammontare dei prodotti è molto limitato. Concludono la ricerca affermando che sono necessari altri studi per definire la concentrazione ottimale per raggiungere i livelli di self-healing desiderati per il calcestruzzo.

Tittelboom et al. [36] hanno voluto sfruttare il processo di polimerizzazione del metilmetacrilato (MMA) per chiudere le fessure e diminuire la permeabilità del calcestruzzo. Per fare ciò utilizzano diverse serie di capsule cilindriche contenenti al loro interno il metilmetacrilato e i catalizzatori necessari per avviare la reazione (figura 2.9 H). Per avviare la polimerizzazione del metilmetacrilato in polimetilpetacrilato (PMMA) è necessario che avvenga prima la polimerizzazione dei radicali liberi vinilici. Per favorire questo procedimento, quindi, è stato usato il perossido di benzoile (BPO) come iniziatore termico, ma essendo un composto che non è in grado di reagire a temperatura ambiente, è stato utilizzato anche il N,N-dimetil-p-toluidine (DMPT) per avviare tale reazione (figura 2.42).

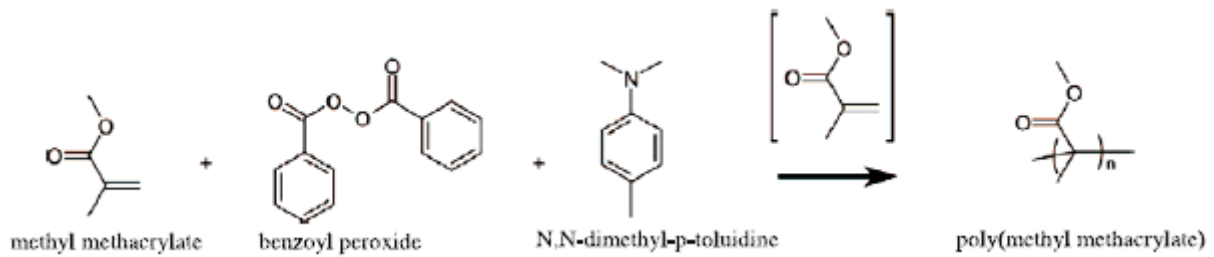


Figura 2.42 Formule strutturali del metil-metacrilato, perossido di benzoile, N,N-dimetil-p-toluidine e polimetilmetacrilato. [36]

I tre composti sono stati suddivisi in due gruppi di capsule, più precisamente uno formato da quelle contenenti sia il MMA che il DMPT e l'altro da capsule contenenti MMA e BPO. Una volta che i componenti di questi due gruppi di capsule entrano in contatto viene avviata la reazione di polimerizzazione.

Tra i diversi problemi riscontrati da Tittelboom et al., il principale è stato quello di garantire una viscosità tale da permettere il riempimento della fessura prima della completa stabilizzazione della reazione. Per ovviare a questo problema sono state fatte misurazioni reologiche in modo da trovare le giuste proporzioni di ogni composto e così garantire la viscosità ottimale. Inoltre, per essere sicuri che l'agente di guarigione polimerizzato non subisca gli effetti dell'alta alcalinità del calcestruzzo degradandosi, sono stati eseguiti test di stabilità. Il grado del self-healing, invece, è stato valutato mediante prove di permeabilità, misurando il flusso d'acqua passante attraverso la fessura.

La ricerca si è incentrata sul confronto di due differenti materiali incapsulati: capsule cilindriche in ceramica (diametro interno pari a 2 mm, lunghezza 30 mm) e tubi di vetro (diametro interno 2 mm e lunghezza 13,5 mm). Metà delle capsule è stata riempita con la miscela degli iniziatori, mentre l'altra con la miscela degli attivatori. I campioni fabbricati sono di forma cilindrica e composti da malta con rapporto a/c pari a 0.5. Raggiunta l'età di sette giorni, sono stati prefessurati mediante lo splitting test con l'obiettivo di ottenere fessure di ampiezza pari a 400 μm e, una volta verificata la rottura delle capsule e l'avvenuta reazione di polimerizzazione, sono stati sottoposti alla prova di permeabilità. Per ogni tipo di prova e di capsule sono state predisposte serie di campioni di controllo. È stata preparata inoltre una serie con provini riparati manualmente mediante l'iniezione diretta del composto all'interno della fessura subito dopo la sua formazione.

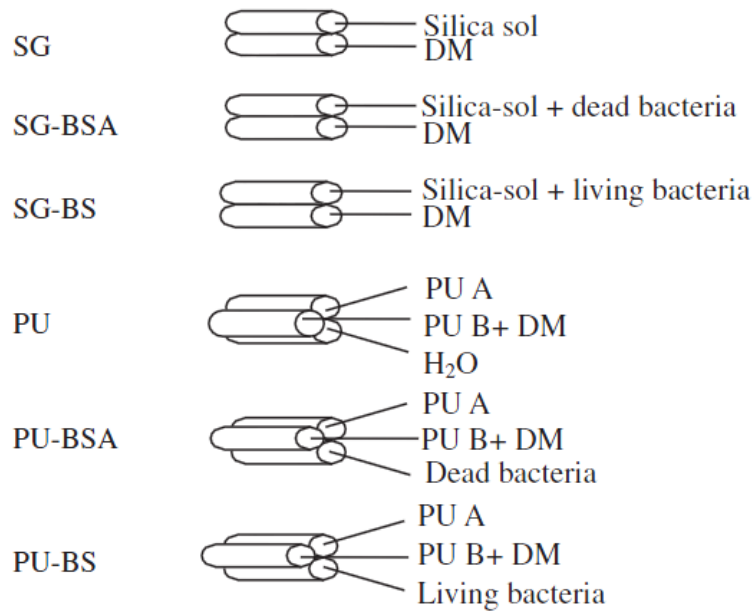


Figura 2.44 Tipologie di campioni del piano sperimentale di Wang et al. [37]

L'efficienza del self-healing è stata valutata misurando il recupero della resistenza e la diminuzione della permeabilità all'acqua. Sono stati preparati due tipi di campioni: prismi 40x40x160 mm per lo studio sul recupero della resistenza e cilindri di diametro 80 mm e altezza 22 mm, per la misurazione della permeabilità. Passate due settimane dalla fabbricazione, i provini sono stati prefessurati, fino al raggiungimento di fessure ampie 0,5 mm, mediante la prova di flessione a tre punti per i prismi e la prova di splitting per i cilindri.

I campioni prismatici, una volta fessurati, sono stati sistemati per una settimana all'interno di una camera con umidità e temperatura costanti e in seguito nuovamente sottoposti alla prova di flessione a tre punti. In figura 2.45 (a) si può notare come i campioni di controllo siano stati gli unici a non aver recuperato resistenza, mentre quelli con i batteri immobilizzati nel gel di silice hanno mostrato un discreto recupero dell'ordine del 5%, dovuto alla precipitazione dei cristalli di CaCO₃ all'interno della fessura. Le specie contenenti i batteri immobilizzati nel poliuretano, invece, hanno mostrato un elevato recupero delle proprietà meccaniche, arrivando a valori pari all'80% nei campioni contenenti i batteri vivi. In realtà non è stata rilevata una differenza sostanziale tra i provini contenenti i batteri vivi e quelli con i batteri morti. Wang et al. sostengono che il recupero, in questo caso, sia dovuto principalmente alla presenza del poliuretano più che alla precipitazione dei cristalli, poiché il carbonato di calcio rilevato all'interno della schiuma poliuretanicca era in quantità molto limitata.

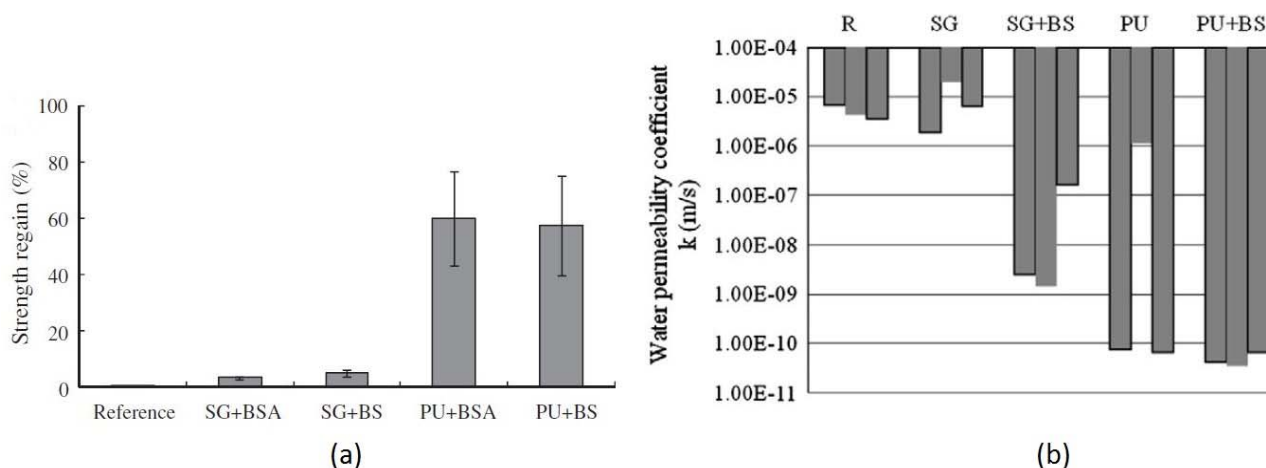


Figura 2.45 Globale recupero della resistenza delle specie fessurate (a), permeabilità all'acqua dei cilindri fessurati dopo essere stati riparati da diversi agenti di guarigione (b). [37]

I cilindri, una volta prefessurati, sono stati mantenuti in un ambiente a temperatura e umidità costanti per il periodo necessario alla formazione della schiuma poliuretanic, in seguito alla fuoriuscita dei composti dalle capsule danneggiate al momento della fessurazione. Dopodiché sono stati immersi in acqua per un totale di quattro giorni, superati i quali è stata eseguita la prova di permeabilità a pressione atmosferica. Tale procedura è stata ripetuta ciclicamente per i 30 giorni successivi alla prefessurazione, così da osservare l'evoluzione del coefficiente di permeabilità k . In figura 2.45 (b) vengono rappresentati i valori finali di tale coefficiente. In tutti i campioni contenenti i batteri è stata rilevata un'importante riduzione della permeabilità dovuta, nel caso del gel di silice, alla precipitazione dei cristalli di carbonato di calcio, mentre negli altri per la presenza del poliuretano, ovvero di un materiale il cui utilizzo principale in edilizia è quello di impermeabilizzante.

Quello che risulta evidente in questa ricerca è che, utilizzando un sistema di capsule contenenti i composti necessari alla formazione di schiuma poliuretanic, si riesce a raggiungere livelli di autoguarigione più che soddisfacenti, diminuendo la permeabilità e garantendo un recupero importante della resistenza. Tali risultati pongono l'accento su quanto migliore questo sistema risulti rispetto quello basato sul solo utilizzo dei batteri per migliorare la produzione di cristalli di carbonato di calcio.

2.4.6 Tubi fragili e prodotti sigillanti

Questa metodologia per l'implementazione del self-healing nel calcestruzzo comprende l'utilizzo di una rete di tubi fragili riempiti con materiale sigillante, in grado di chiudere una fessura al momento della sua formazione. Tale sistema può essere composto da singoli tubi, nel caso di un sigillante monocomponente (figura 2.46 A), o a coppie di tubi, quando invece il sigillante è bicomponente (figura 2.46 B). Entrambe le tipologie possono contenere una propria riserva di composti o essere collegati con serbatoi, esterni alla struttura, in grado di fornire continuamente il sigillante.

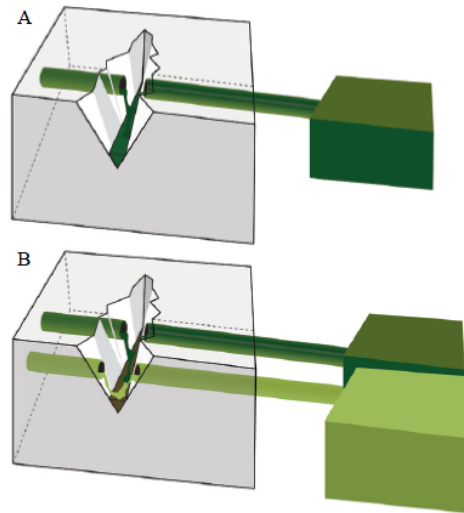


Figura 2.46 Fuoriuscita del materiale sigillante monocomponente (A), e del sigillante bicomponente (B), entrambi collegati a serbatoi esterni alla struttura. [8]

Joseph et al. nel 2010 [38] hanno studiato gli effetti sulla resistenza a flessione di provini in calcestruzzo ai quali è stato applicato il sistema mostrato nella figura 2.46 A. In particolare è stato utilizzato il cianoacrilato, un adesivo fluido capace di indurire in pochi secondi quando entra in contatto con umidità e aria. Il piano sperimentale ha previsto la fabbricazione di provini prismatici all’interno dei quali è stata disposta un’armatura di acciaio nel lembo inferiore e un tubo di vetro le cui estremità ricurve fuoriuscivano all’esterno dei campioni. Le specie sono state prodotte principalmente in due serie distinte, poiché gli stessi test sono stati eseguiti per campioni con età pari a 28 e 72 giorni per verificare le condizioni dell’adesivo e la sua affidabilità nel tempo. I provini di controllo sono stati fabbricati anch’essi inserendo all’interno il tubo fragile ma riempiendolo con del semplice inchiostro, in modo da rendere evidente la rottura del tubo al momento della frattura.

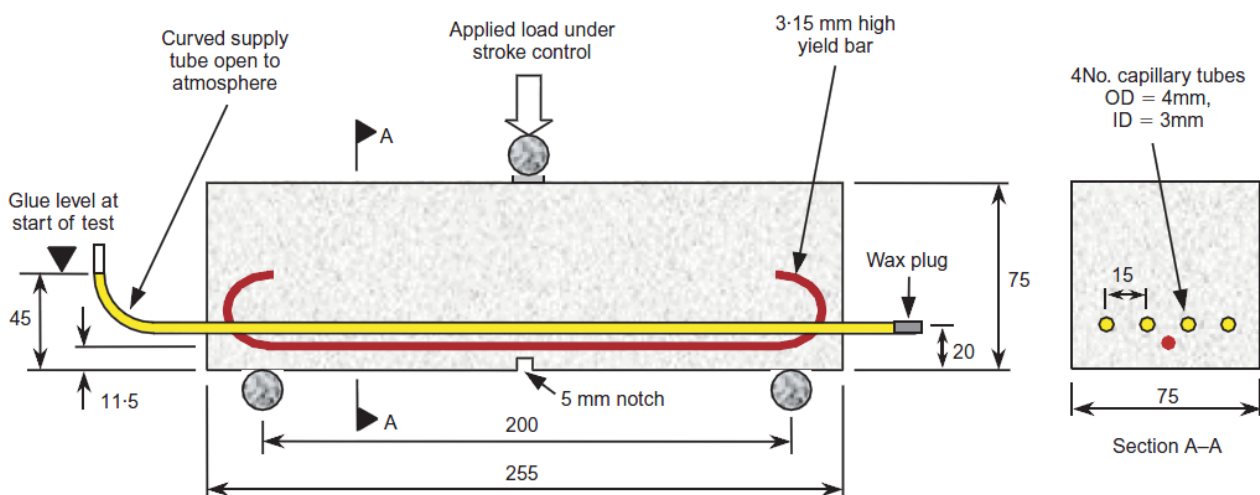


Figura 2.47 Campioni prismatici con armatura in acciaio e tubo fragile contenente l’adesivo cianoacrilato. [38]

Dopo un periodo stabilito di maturazione, rispettivamente 28 e 72 giorni, i campioni sono stati sottoposti alla prova di flessione su tre punti, come mostrato in figura 2.47, arrestando la prova una volta raggiunta un’apertura di fessura, in corrispondenza dell’intaglio praticato in mezzera,

pari a 0,5 mm. Durante la prova sono stati elaborati i grafici carico-apertura di fessura (CMOD Crack Mouth Opening Displacement) grazie all'utilizzo di un sensore per la rilevazione dello spostamento relativo delle due metà dei campioni. Verificata la rottura dei tubi fragili, i provini sono stati scaricati e lasciati a riposo per 24 ore, tempo ritenuto necessario per il completo indurimento dell'adesivo, per poi eseguire nuovamente la prova di flessione fino alla completa rottura.

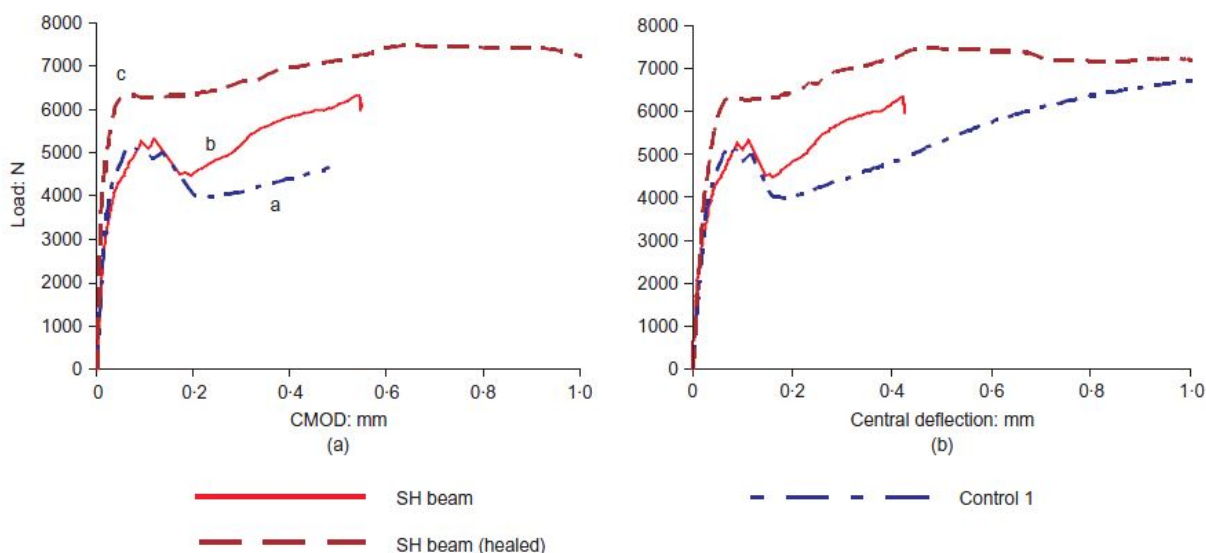


Figura 2.48 Grafici carico-apertura fessura (a) e carico-spostamento (b). Confronto tra i campioni di controllo (identificati con la curva "a"), portati direttamente a rottura, e i campioni contenenti l'adesivo, sottoposti a due cicli di carico (identificati con le curve "b", per il primo carico, e "c" per il secondo). [38]

I risultati più interessanti di questo studio sono mostrati in figura 2.48. Nel grafico a sinistra si può notare come fino alla prima fessurazione entrambe le tipologie dei campioni si comportano in modo molto simile; superato tale stadio, il comportamento cambia sensibilmente. Si può notare come le specie contenenti l'adesivo siano caratterizzati da un sostanziale aumento della resistenza dovuto alla rapida reazione di indurimento del cianoacrilato che già durante la prova riesce a conferire resistenza al calcestruzzo. Superate le successive 24 ore, i campioni con l'adesivo sono stati sottoposti nuovamente alla prova di flessione e caricati fino alla completa rottura. Sempre in figura 2.48 (a) si può facilmente notare come il valore di resistenza finale sia circa il 20% maggiore rispetto quello dei campioni di controllo. Il cianoacrilato, infatti, non solo ha riparato la fessura ma ha anche conferito maggiore resistenza e reso il materiale più duttile. In figura 2.48 (b), invece, si nota come l'abbassamento finale di entrambe le tipologie di campioni venga raggiunto con un carico simile.

Per quanto riguarda la diversa età al momento della prova di flessione, non sono state notate differenze sostanziali tra le due serie di campioni. Ciò è dovuto al fatto che, superati i 28 giorni, i processi di idratazione interna del calcestruzzo sono quasi del tutto esauriti e quindi gli effetti del self-healing sono dovuti in entrambi i casi alla sola presenza dell'adesivo sigillante.

Sun et al. [39], hanno ottenuto risultati simili utilizzando fibre di vetro cave poste nei lembi tesi di travi prismatiche in calcestruzzo. Essi sostengono che le principali qualità di un adesivo destinato a riparare le fessure degli elementi strutturali siano una buona viscosità, la capacità di reagire in

condizioni ambientali e la capacità di formare un forte legame con il calcestruzzo. L’adesivo scelto è simile a quello del precedente studio, si tratta dell’etilcianoacrilato. Le fibre di vetro cave, invece, hanno diametro esterno pari a 4 mm. Sono stati utilizzati campioni prismatici aventi dimensioni 100x100x400 mm e suddivisi in una serie di controllo, contenenti le fibre vuote, ed in una serie con le fibre riempite all’interno con l’adesivo.

Per la valutazione delle proprietà meccaniche prima e dopo la cura, i provini, una volta superato il periodo di maturazione di 28 giorni, sono stati sottoposti alla prova di flessione a quattro punti. La forza applicata è stata aumentata fino al raggiungimento del 75-80% della resistenza massima così da creare fessure di dimensione tale da permettere la rottura delle fibre di vetro, rottura verificata dal rumore prodotto dalle fibre stesse. Accertata la fuoriuscita dell’adesivo, i provini sono stati mantenuti in condizioni standard (temperatura 20°C e 65% di U.R.) per cinque giorni per poi essere sottoposti nuovamente alla prova di flessione fino alla rottura completa.

Il self-healing è stato valutato mediante un indice che ha tenuto conto della resistenza iniziale e del suo successivo incremento. I campioni con l’adesivo etilcianoacrilato hanno mostrato un recupero pari al 20.2%, valore simile a quello ottenuto da Joseph et al. [38], mentre i provini di controllo hanno mostrato una diminuzione della resistenza del 20.4%.

Già nel 1996 Dry e McMillan [40] avevano utilizzato un adesivo tri componente, il cui composto principale è il metilmetacrilato (MMA). L’adesivo in questione è composto da 100 parti di MMA, 4 parti di idroperossido di cumene e 2 parti di cobalto neodecanoato. Gli ultimi due sono gli iniziatori necessari ad avviare la reazione di polimerizzazione del MMA. Il problema principale nell’utilizzo di tali composti è che se mescolati insieme senza il MMA causano una reazione esplosiva. Per ovviare a questo problema, i tre composti sono stati divisi in due gruppi: uno formato dalla soluzione di cobalto e MMA, e l’altro dall’idroperossido di cumene. In figura 2.49, nella quale è riportata la sezione tipo dei campioni prismatici, si possono notare le diverse dimensioni dei tubi di vetro. Quelli contenenti la soluzione MMA/cobalto hanno diametro interno pari a 8,8 mm, mentre quello con l’idroperossido di cumene ha diametro interno di 6,2 mm.

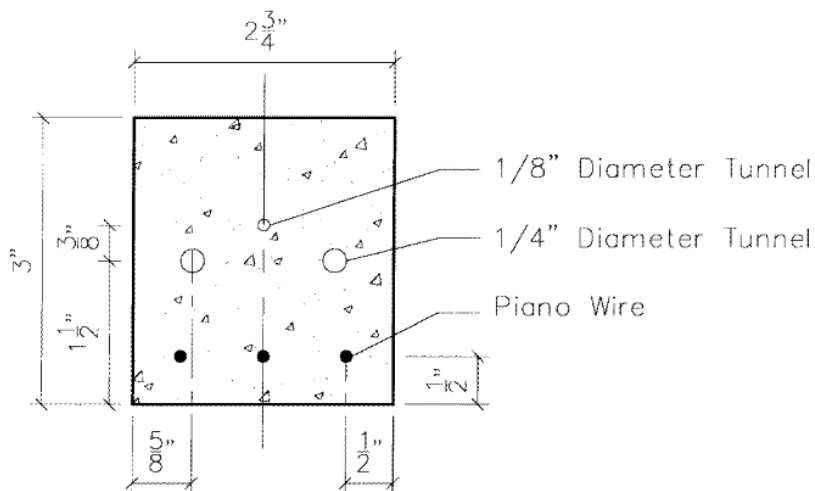


Figura 2.49 Sezione di provino con cavi d’acciaio, tubi di diametro 8.8 mm con soluzione MMA/cobalto e tubo di diametro 6.2 mm con idroperossido di cumene. [40]

Dopo un periodo di maturazione di 28 giorni i campioni sono stati sottoposti alla prova di flessione a tre punti fino alla formazione di fessure di ampiezza pari a 0,5 mm. In seguito lasciati a riposo per 24 ore così da permettere all'adesivo di indurirsi, e poi sottoposti nuovamente alla prova di flessione.

I campioni con l'adesivo hanno mostrato una resistenza a flessione pari al 130% del valore iniziale, mentre quelli di controllo sono arrivati alla completa rottura una volta raggiunto il 65% del carico raggiunto durante la prima prova.

Questi studi dimostrano la fattibilità di quest'approccio per quanto riguarda il recupero delle proprietà meccaniche di elementi strutturali in calcestruzzo danneggiati. I problemi comunque restano molti poiché non è stata ancora definita la quantità di adesivo necessaria alla completa chiusura delle fessure. Nelle ricerche presentate, infatti, il composto sigillante è sempre stato fornito dall'esterno, tramite un apposito serbatoio posto ad altezza maggiore del campione o tramite iniezione manuale. A ciò bisogna aggiungere che nessuno studio di fattibilità di tale sistema è stato eseguito e quindi una sua applicazione nel campo dell'edilizia resta ancora solo teorica.

2.4.7 Altri approcci

Gli approcci presentati finora sono quelli che hanno ottenuto risultati rilevanti e che hanno dimostrato come la produzione di calcestruzzo auto riparante sia possibile. Molti studi, però, sono ancora in fase iniziale e anche se i risultati ottenuti sono molto positivi, è necessario un'attenta valutazione sulla fattibilità economica e sulla reale applicabilità di tali sistemi. Di seguito vengono presentati altri approcci non rientranti nelle categorie sopra descritte.

Nishiwaki et al. [41] nel 2006 hanno proposto una nuova tipologia di calcestruzzo intelligente caratterizzato dalla presenza di dispositivi in grado di rilevare un danno e di avviare il processo di riparazione. Lo scopo principale del sistema è di permettere la riparazione del danno senza l'intervento diretto da parte dell'uomo ma utilizzando sistemi di controllo remoto incorporati nell'elemento strutturale. Il sistema si basa sull'azione combinata di un dispositivo in grado di aumentare la temperatura ed effettuare l'autodiagnosi del danno mediante la variazione della resistenza, e una tubatura organica contenente l'agente riparante, entrambi posti all'interno dell'elemento in calcestruzzo. Quando si genera una fessura, il dispositivo riduce la lunghezza della linea conduttiva aumentando la propria resistenza elettrica e quindi la temperatura nella zona danneggiata. Quest'aumento di temperatura scioglie la superficie dei tubi organici, sensibili al calore, e permette all'agente riparante di fuoriuscirne. La presenza di un dispositivo elettrico permette inoltre di rilevare il punto esatto della fessura permettendone la riparazione manuale. In figura 2.50 è stato rappresentato lo schema di funzionamento del sistema appena descritto.

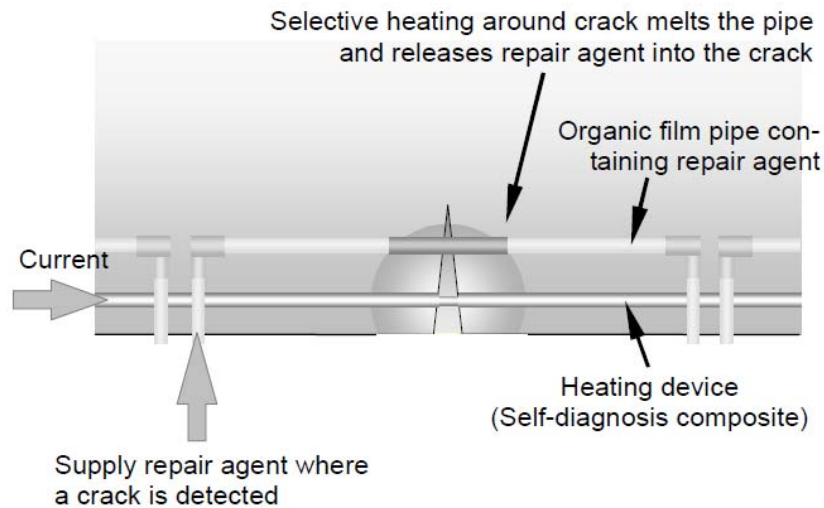


Figura 2.50 Schema di funzionamento del sistema smart concrete di Nishiwaki. [41]

L'agente riparante utilizzato è una resina epossidica a bassa viscosità caratterizzata da una buona stabilità durante la reazione, viscosità tale da permetterne l'entrata in fessure di piccole dimensioni (0,2 mm) e un regolare indurimento all'alte temperature.

Le prove sperimentali eseguite in questa ricerca hanno avuto due obiettivi principali: verificare il funzionamento congiunto del dispositivo riscaldante e della tubatura contenente la resina, provare l'efficacia di questo tipo di self-healing. Per la prima tipologia di prove sono state fabbricate piastre di dimensioni 250x80x10 mm, in malta con aggregati fini e con un rapporto a/c pari a 0,45. Al momento della prefessurazione, il carico è stato aumentato fino alla formazione di fessure di ampiezza pari a 2,5 mm, rilevando nel frattempo la variazione di resistenza. Non è stata osservata fuoriuscita del fluido dai tubi organici che hanno dimostrato, quindi, una buona elasticità. Una volta messi in tensione i dispositivi, è stata utilizzata la termografia tridimensionale per valutare l'aumento di temperatura. È rilevata un'alta dispersione di calore all'interno del provino dovuta principalmente al complesso processo di fabbricazione. I valori sono stati ritenuti comunque accettabili. Precedenti prove, inoltre, avevano dimostrato come l'aumento della temperatura nel dispositivo, in assenza di fessure, non riesca a sciogliere i tubi organici. Dopo circa venti minuti dalla messa in tensione del dispositivo per l'autodiagnosi, la temperatura sulla superficie dei tubi organici ha raggiunto i 93° causandone lo scioglimento e la conseguente fuoriuscita della resina. Il test ha dimostrato che il sistema non funziona ancora perfettamente poiché la completa fuoriuscita del fluido era stata prevista in meno di dieci minuti. Il rilascio della resina è stato fermato solo dopo il comprovato indurimento della stessa, avvenuto a trenta minuti dall'elettrificazione del dispositivo.

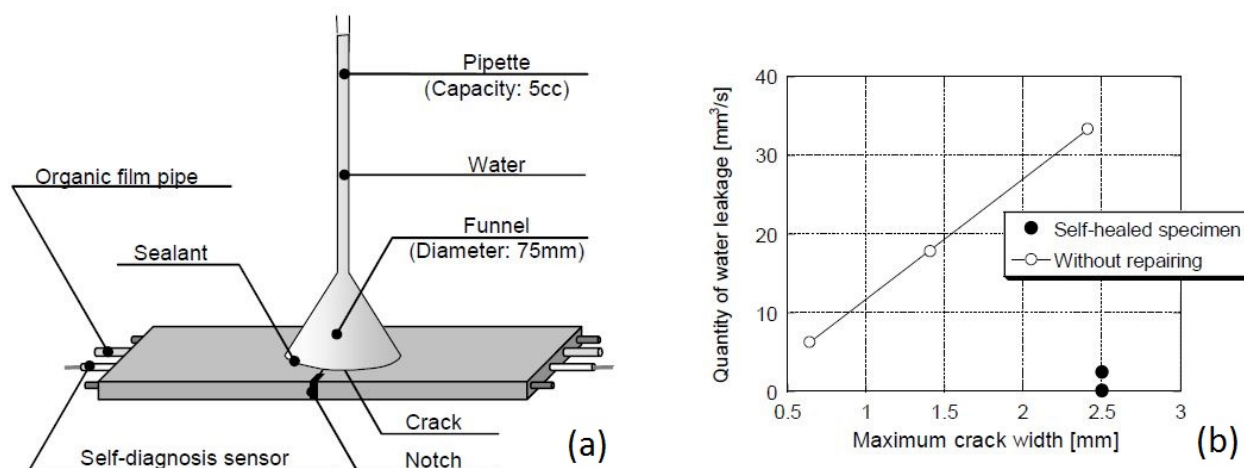


Figura 2.51 Test di permeabilità per piastre (a), relazione tra la massima fessura generata e la quantità di acqua passante attraverso. [41]

La seconda prova è stata eseguita per studiare il recupero della permeabilità nella zona della piastra fessurata (figura 2.51 (a)). Due campioni, cui è stato applicato il sistema per l'attuazione del self-healing, sono stati confrontati con tre campioni di malta normale e prefessurata nello stesso modo. La prova di permeabilità mostrata in figura 2.51 (a) è normalmente utilizzata per valutare la tenuta all'acqua dei rivestimenti strutturali, ma, in questa ricerca, è stata modificata per essere adattata al tipo di campioni. I risultati mostrati in figura 2.51 (b) mostrano come il fenomeno di autoguarigione abbia quasi annullato il flusso d'acqua all'interno della fessura, nonostante l'elevata entità del danno iniziale.

Un altro approccio molto interessante è quello proposto da Sangadji e Schlangen nel 2011 [42] [43]. L'idea è di imitare i sistemi vascolari naturali presenti, ad esempio, nelle parti spugnose delle ossa (figura 2.52 sinistra). Per fare ciò, sono stati fabbricati provini in calcestruzzo contenenti all'interno un reticolo poroso, prefabbricato e posto negli stampi prima del getto.



Figura 2.52 Sezione di un osso esternamente compatto e internamente spugnoso (sinistra), sezione di un cilindro in calcestruzzo poroso in analogia con la composizione di un osso tipo (destra). [42]

I campioni prodotti sono di forma cilindrica e sono formati da due parti perfettamente distinguibili in figura 2.52 destra. Il cilindro ha un diametro di 56 mm, mentre quello interno di 35 mm. La

matrice interna porosa può essere usata per l’iniezione di un’agente in grado di riempire e riparare una fessura. Un sistema di questo tipo può essere applicato a strutture intelligenti in grado di rilevare, controllare un danno e attuare sistemi di riparazione senza l’intervento umano.

All’età di sette giorni i campioni sono stati essiccati all’interno di una camera con temperatura costante pari a 35° per 24 ore, quindi sottoposti a una prova di trazione per provocare la formazione di fessure, di ampiezza massima di 200 μm . In seguito sono stati sistemati in una stanza pressurizzata per dieci minuti. L’agente di cura, a base epossidica, è stato fatto scorrere dalla superficie superiore dei campioni all’interno del nucleo poroso fino al completo riempimento di tutti i pori e degli spazi fessurati. Un colorante fluorescente in polvere è stato mescolato con una proporzione pari all’1% del peso della resina in modo da poter essere visualizzato all’interno dei pori e delle fessure mediante luce agli ultravioletti. Dopo la completa polimerizzazione, i campioni sono stati sottoposti nuovamente alla prova di trazione.

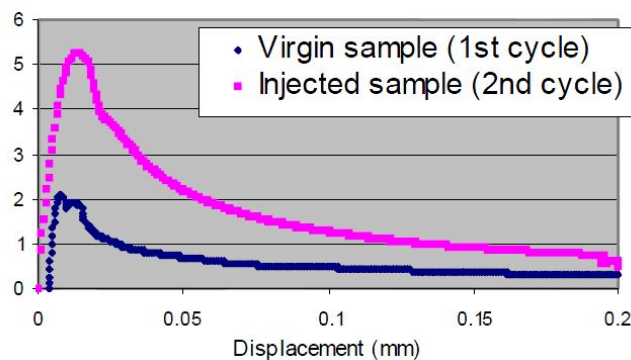


Figura 2.53 Prova di trazione a deformazione controllata prima e dopo l’utilizzo della resina epossidica. [43]

In figura 2.53 viene mostrato il grafico forza-spostamento dei provini sottoposti alla prova di trazione prima e dopo la guarigione. Si nota che durante il primo ciclo di carico viene raggiunto il picco di 2.2 kN in corrispondenza di uno spostamento pari a 15 μm (fessura iniziale). Dopo l’iniezione della resina e la sua polimerizzazione, il calcestruzzo ha recuperato resistenza massima facendo registrare un carico massimo pari a 5.2 kN, in corrispondenza di uno spostamento pari a 25 μm , con la formazione di una nuova fessura in prossimità di quella iniziale (figura 2.54 (a)). Tale fenomeno è dovuto a due cause principali: la resina a bassa viscosità è defluita all’interno dei pori fino al completo riempimento della fessura e, creando un composto cementizio polimerizzato, ha migliorato le proprietà meccaniche dei cilindri. In figura 2.54 (c) i cilindri, spezzati a metà longitudinalmente, sono stati illuminati con luce ad ultravioletti mostrando chiaramente come la resina sia riuscita a infiltrarsi all’interno della matrice porosa e abbia raggiunto la fessura chiudendola completamente.

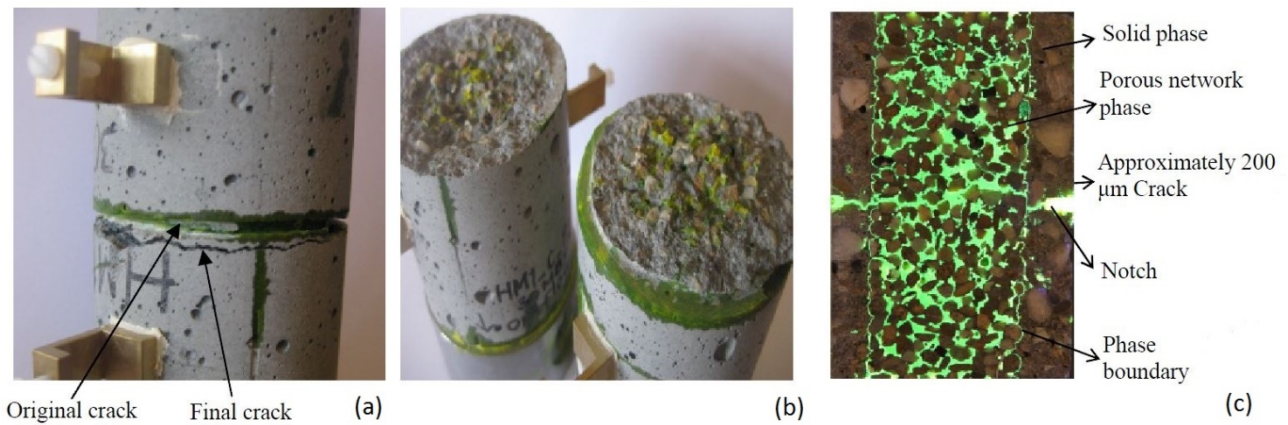


Figura 2.54 Fessura iniziale e formazione fessura finale (a), sezione del campione nella nuova fessura formata durante la seconda prova di trazione (b), sezione longitudinale del campione sottoposta a luce ultravioletta e mostrante la matrice porosa e la fessura completamente riempite dalla resina epossidica (c). [43]

Una volta verificato il corretto funzionamento del metodo, è stata predisposta una procedura per la valutazione del recupero delle proprietà meccaniche, in particolare della resistenza a flessione. Un campione prismatico di dimensioni 55x55x295 mm e contenente cavi d'acciaio con diametro 3 mm e lunghi 295 mm, è stato fabbricato inserendo, al suo interno, un cilindro poroso di diametro 26 mm e lungo 295 mm. La fessurazione è avvenuta mediante prova di flessione su tre punti ed è stata fermata solo dopo aver raggiunto aperture di ampiezze pari a 400 μm, che si sono ridotte fino a circa 250 μm una volta scaricato il provino. La resina epossidica è stata iniettata manualmente e, per favorirne la reazione di polimerizzazione, il campione è stato immagazzinato in una camera a temperatura costante e pari a 35° per 24 ore. In seguito è stata eseguita nuovamente la prova di flessione.

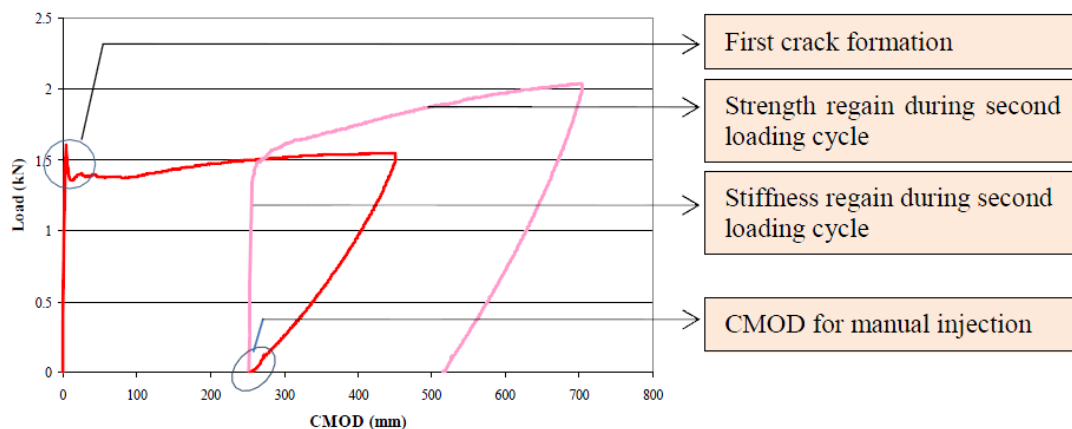


Figura 2.55 Diagramma carico-apertura fessura relativo a entrambe le prove di flessione, prima e dopo l'iniezione della resina. [43]

In figura 2.55 è stato riportato il diagramma che mette in relazione il carico applicato con l'ampiezza della fessura prodotta. È evidente come, durante il secondo ciclo, il campione abbia dimostrato maggiore resistenza a flessione raggiungendo il 133% del valore iniziale.

Capitolo 3 – METODOLOGIA E PROGRAMMA SPERIMENTALE

3.1 Obiettivi dello studio

Nel capitolo 1 è stato spiegato quali sono i benefici che le strutture possono trarre dall'utilizzo di additivi che ne promuovano le capacità di autoriparazione, siano queste legate al solo aumento della durabilità ovvero ad un parziale o completo recupero delle proprietà fisico-meccaniche. Questo studio si propone come scopo principale quello di analizzare il contributo che un prodotto, già presente nel mercato con tale proposito, possa dare alla formazione di cristalli di carbonato di calcio all'interno di fessure di determinata ampiezza. In commercio esistono già diversi prodotti che promettono risultati sia nella riduzione della permeabilità sia nella sigillatura di fessure formatesi durante l'esercizio della struttura.

Per verificare l'influenza di tale aggiunta si è deciso di aumentarne la concentrazione fino al 4% del volume del cemento, così da poter osservare sensibili differenze con i campioni di controllo.

La ricerca, quindi, si propone di osservare l'effettivo miglioramento delle capacità rigeneranti del calcestruzzo dato dagli additivi cristallini. Essendo il principale obiettivo di un calcestruzzo autoriparante il mantenimento di una durabilità molto alta, questo studio si è concentrato sulla variazione della permeabilità per effetto dell'additivo cristallino. La prova di permeabilità, quindi, diventa il mezzo principale per la valutazione della guarigione.

Si è partito da studi precedenti, analizzando i vari programmi sperimentali, i meccanismi studiati e i risultati ottenuti. Tra tutti i possibili approcci ci si è concentrati sull'utilizzo dei soli additivi cristallini, in quanto a parità di risultati sembrano garantire costi relativamente contenuti, oltre che facilità d'impiego.

Per definire sotto quali condizioni al contorno l'utilizzo di tali additivi cristallini possa effettivamente influire sull'autoguarigione del calcestruzzo, è stato deciso di studiare quattro differenti tipi di ambienti di cura. Ciò che precedenti studi hanno confermato, è che la condizione necessaria ad avviare la reazione sia la presenza di acqua. Partendo da questo presupposto sono stati scelti degli ambienti che fossero in grado di fornire una differente quantità di acqua in stati e concentrazioni differenti. In particolare due ambienti sono caratterizzati dalla presenza di acqua liquida, mentre gli altri la forniscono sotto forma di vapore contenuto nell'aria.

I quattro ambienti studiati sono:

- 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 a temperatura costante, 20°C;
- contatto con una quantità di acqua necessaria al mantenimento dell'interno della fessura in condizione bagnata.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

Quest'approccio permette di individuare quali tipologie di strutture possano usufruire dei vantaggi legati al self-healing, promosso dagli additivi cristallini. Cosicché ogni ambiente osservato simula una determinata condizione cui le strutture sono normalmente esposte. Questo è facilmente immaginabile nel caso della completa immersione in acqua, situazione cui sono soggette molte strutture di fondazione, ad esempio i piloni dei ponti, infrastrutture legate alla ritenzione delle acque, come le dighe, o semplici serbatoi. Lo stesso vale per l'esposizione ad aria non trattata e che, quindi, è caratterizzata da un'umidità relativa e una temperatura tipici della posizione geografica del sito in cui è stato effettuato lo studio, in questo caso Valencia, Spagna in un periodo che va da novembre a gennaio. L'esposizione ad aria in condizioni di saturazione, invece, permette di imitare condizioni ambientali proprie del periodo invernale in Europa o delle stagioni delle piogge nelle zone tropicali o equatoriali. Infine l'ambiente più particolare, e che ha richiesto maggiori risorse per essere improntato, è quello che permette di mantenere la superficie interna delle fessure in condizione bagnata. Per consentire ciò è stato studiato un sistema che permette di impermeabilizzare le due facce del campione e di porre sopra una delle due uno strato di due centimetri di acqua che permette il riempimento della fessura e il controllo delle eventuali perdite dell'isolamento, grazie al continuo monitoraggio del livello d'acqua. Così è stato pensato di simulare la condizione cui sono esposte particolari strutture interrato e che si trovano sempre al di sotto del livello di falda, la cui superficie, quindi, sarà sempre bagnata e la pressione non elevata.

Durante la fase di sperimentazione, inoltre, è stato deciso di incentrare parte dello studio sulla determinazione del metodo migliore per la misurazione della ampiezza di fessura. Trovare un sistema più affidabile permetterebbe la ricerca di una relazione tra il livello del danno, dato proprio da questa misura, e la permeabilità del calcestruzzo. Quando si parla di permeabilità, in questo documento, s'intende, più precisamente il passaggio di acqua all'interno della fessura, in altre parole la quantità che entra da una delle superfici, attraversa l'interno del campione e fuoriesce dall'altra. Una relazione di questo tipo permetterebbe di comunicare maggiori informazioni al momento del rilevamento del danno, dando un'idea del flusso d'acqua che potrà penetrarne all'interno e quindi all'entità e alla velocità del futuro degrado. Per fare ciò, sono state analizzate diverse metodologie di misura, confrontando, ad esempio, l'ampiezza massima misurata con semplici fessurimetri al momento della prefessurazione, o mediante l'utilizzo di software che permettono di analizzare con precisione immagini al microscopio così da valutare la vera dimensione massima o l'area della fessura.

3.2 Considerazioni sulla metodologia di riferimento

In questo paragrafo viene descritta la metodologia approntata per le ricerche svolte nel Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università Politecnica di Valencia. In particolare si è partiti dal lavoro svolto da M. Roig Flores [44] per la sua tesi di laurea. Esaminando le prove eseguite e i risultati ottenuti, sono state modificate alcune procedure e l'ordine dell'esecuzione delle stesse con l'obiettivo di migliorare il metodo e ottenere risultati più precisi. Di seguito viene descritta brevemente la metodologia utilizzata.

I punti chiave di tale ricerca sono stati:

- 1) Studio del mix-design e del comportamento di diversi tipi di calcestruzzo con o senza l'additivo cristallino;
- 2) Generazione del danno mediante una prova in grado di creare fessure di ampiezza controllata, misurazione di resistenza a compressione e della permeabilità;
- 3) Riposo dei provini in un ambiente che permetta l'attivazione del prodotto e la chiusura della fessura;
- 4) Ripetizione delle prove agli stessi campioni, dopo la cura, così da comparare i risultati e verificare il recupero delle proprietà studiate.

La valutazione del danno, e del successivo recupero, è stata eseguita mediante l'osservazione visiva, misurazione della permeabilità e della resistenza. Sono stati valutati gli effetti del self-healing riguardanti la chiusura delle fessure e come questo fenomeno possa influire sul recupero della resistenza e della permeabilità di campioni fessurati in precedenza.

La valutazione della ampiezza della fessura è stata, quindi, eseguita semplicemente a vista e con metodi ottici. Infatti, è stato utilizzato un microscopio per scattare foto ad alta risoluzione, studiate in seguito con software per l'elaborazione d'immagini.

I campioni sono stati fabbricati con un dosaggio che ha previsto un rapporto a/c pari a 0,45, aggregati con $D_{max} = 12$, fibre in acciaio, additivo fluidificante e due differenti tipi di additivo cristallino (AC tipo A, AC tipo B). Sono state provate quattro diverse miscele di calcestruzzo, nelle quali è variata la percentuale nel peso del cemento dell'additivo cristallino:

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

I provini fabbricati sono stati di due tipi, cilindrici e prismatici, rispettivamente per lo studio della permeabilità e della resistenza a flessione. Il danno è stato prodotto mediante la prova di trazione indiretta, o brasiliana, nel primo caso, mentre mediante flessione semplice, o a tre punti, nel secondo. Si è voluto produrre una fessurazione controllata e per fare ciò è stato utilizzato calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio in grado di aumentarne la duttilità e permettere una rottura non completamente fragile. Infatti, una volta prodotta la fessura è stato possibile

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

aumentarne l'ampiezza aumentando il carico a bassa velocità. Il controllo dell'apertura è stato possibile anche grazie all'utilizzo di sensori di spostamento, micrometri e dispositivi simili. In questo modo sono stati realizzati tre gruppi di specie in base alla fessura massima generata:

- Fessura piccola: tra 0,0 e 0,2 mm;
- Fessura media: tra 0,2 e 0,4 mm;
- Fessura grande: tra 0,4 e 0,6 mm.

I campioni cilindrici, una volta fessurati, hanno subito diverse lavorazioni prima di essere sottoposti alla prova di permeabilità. Una volta tagliate entrambe le superfici a uno spessore pari a circa 0,5 cm, i provini sono stati divisi a metà così da ottenere due parti da sottoporre alle prove con tempistiche diverse. Una delle metà, infatti, è stata sottoposta a prove intermedie, ogni 14 giorni, mentre l'altra solo ad un'unica prova al termine della cura. In questo modo si è voluto verificare se tali prove di permeabilità possano incidere sulla guarigione del calcestruzzo rompendo, ad esempio, cristalli di carbonato di calcio ancora in via di formazione.

Per compiere la prova di permeabilità è stata utilizzata una pasta sigillante in modo da bloccare il passaggio d'acqua nelle fessure laterali del campione e dirigere il flusso nella sola parte centrale. Nella prova di permeabilità è stato imposto un flusso d'acqua con pressione variabile tra 1 e 2 bar per una durata pari a 5 minuti. L'acqua passante attraverso la fessura è stata raccolta e pesata, mentre i campioni sono stati in seguito disposti nei relativi ambienti di cura per un tempo di 56 giorni. In particolare sono stati studiati tre ambienti:

- immersione in acqua;
- camera umida a 20° e 95-100% di umidità relativa, valori mantenuti costanti;
- mantenimento della fessura sempre piena di acqua e di uno strato di circa 2 cm di acqua al di sopra di una delle due fessure.

Lo studio delle proprietà meccaniche e della permeabilità è stato affiancato con l'osservazione qualitativa mediante fotografie ad alta risoluzione scattate con microscopio ottico. Questo sistema ha permesso la composizione di panorami ad alta risoluzione che hanno dato la possibilità di confrontare lo stato delle fessure prima e dopo la guarigione.

Durante l'applicazione della metodologia sono stati evidenziati i limiti e i margini di miglioramento di alcune delle sue fasi principali. In primo luogo, l'utilizzo della sega circolare, per il taglio delle superfici e la divisione dei provini, ha comportato l'alterazione di parte delle fessure. Inoltre, la prefessurazione con il metodo della trazione indiretta non ha permesso la formazione di fessure di dimensioni simili in entrambe le superfici dei campioni. Queste osservazioni hanno portato alla modifica dell'ordine delle operazioni, infatti, è stato deciso di tagliare i campioni prima della prefessurazione così da permettere la formazione di fessure più omogenee ed evitarne l'alterazione. In fase di prova, però, ci si è accorti che applicando lo sforzo di compressione su campioni più piccoli, sono state accentuate le deformazioni laterali dei cilindri, rendendo i dati forniti dai sensori di spostamento poco affidabili e differenti dalla misurazione manuale dell'ampiezza della fessura. È stato deciso, quindi, di non utilizzare i sensori ma di servirsi solo di micrometri per la valutazione dell'ampiezza massima. Tale cambiamento ha reso molto più veloce

la prova, poiché non è stato più necessario forare entrambe le facce dei campioni per apporre il sensore e calibrarlo una volta collegato ai supporti.

La metodologia per lo studio dello stato delle fessure sulle superfici è stata, inoltre, ampliata e verificata la sua applicabilità ed è stata confrontata con altri metodi di misura e ideati altri sistemi approssimati per la valutazione del danno.

3.3 Programma sperimentale

Il programma sperimentale approntato comprende l'utilizzo di campioni cilindrici in calcestruzzo fibrorinforzato di diametro 150 mm e altezza 300 mm in seguito divisi a metà. I campioni così ottenuti hanno una nuova altezza pari a circa 140. In particolare per ogni tipologia di ambiente sono stati preparati due serie di campioni:

- 4) AM4S, calcestruzzo fibrorinforzato contenente il 4% del volume di cemento di additivo cristallino;
- 5) AM0, calcestruzzo fibrorinforzato di controllo contenente lo 0% del volume di cemento di additivo cristallino.

Una volta miscelato, l'impasto viene gettato all'interno delle forme cilindriche e lasciato maturare per due giorni, il primo all'aria non trattata del laboratorio e il secondo, una volta liberati i campioni dalle forme, all'interno di una camera con U.R. pari a 100%. Le quantità dei materiali sono state calcolate in modo da ottenere sette cilindri per ogni impasto.

Il terzo giorno, vengono scelti i tre cilindri che in seguito subiranno le lavorazioni necessarie ad effettuare lo studio. I restanti cilindri sono stati utilizzati per eseguire la prova di compressione a ventotto giorni, necessaria per determinare la classe di resistenza del calcestruzzo utilizzato. Tale prova sarà eseguita per ogni impasto.

I tre cilindri selezionati verranno, quindi, divisi a metà mediante l'utilizzo di una sega circolare per calcestruzzi, e in seguito prefessurati con il metodo della prova di trazione indiretta, utilizzando una pressa idraulica. L'apertura delle fessure è stata controllata e fermata al raggiungimento di valori nell'intervallo di $0,1 \div 0,3$ mm, procedimento permesso dalla natura duttile del calcestruzzo fibrorinforzato.

Per eseguire la prova di permeabilità, modificata per questo tipo di campioni, è stato necessario apporre della pasta sigillante sulla superficie superiore e laterale dei cilindri. Questo tipo di pasta epossidica ha bisogno di circa 24 ore per completare la reazione di indurimento e ciò ha comportato l'attesa di un altro giorno prima di poter assoggettare i campioni alla prova di permeabilità. Eseguita tale prova e pesata la quantità di acqua passata attraverso la fessura, i campioni sono stati posti nei rispettivi ambienti di cura per una durata di quarantadue giorni. Al termine di tale periodo, è stata ripetuta la prova di permeabilità e confrontato il peso dell'acqua con il valore iniziale.

È stato ritenuto sufficiente utilizzare un numero di 6 cilindri per ogni ambiente e tipologia di calcestruzzo. Una volta analizzati i risultati finali, si è deciso di aggiungere altri campioni allo studio così da avere dati più chiari e rendere più precisi i grafici ottenuti. Di seguito vengono riassunti il numero di cilindri ritenuti necessari per completare lo studio su ogni ambiente di cura:

- 19 cilindri, 10 dei quali di controllo e 9 con additivo, per l'immersione in acqua;
- 16 cilindri, 8 dei quali di controllo e 8 con additivo, per la camera umida in condizioni di saturazione;

- 15 cilindri, 7 dei quali di controllo e 8 con additivo, per il sistema della fessura bagnata e con 2 cm di acqua sulla superficie superiore;
- 16 cilindri, 9 dei quali di controllo e 7 con additivo, per l'esposizione ad aria non trattata.

In totale nello studio riguardante il self-healing sono stati analizzati 66 campioni cilindrici, dei quali 34 di controllo e 32 con additivo, mentre per il calcolo della resistenza a compressione 39 (cilindri con dimensioni normate dalla UNI EN 12390).

Lo studio riguardante la valutazione del danno in funzione del rilevamento della dimensione delle fessure, invece, è stato incentrato sull'analisi di foto al microscopio che hanno permesso di comporre panorami ad alta risoluzione delle fessure. In questo modo, tramite l'utilizzo di software di grafica, è stato possibile osservare meglio le fessure e il loro cambiamento dopo il periodo di cura. Più precisamente sono stati composti 117 panorami da 7359 foto scattate al microscopio.

Di seguito viene mostrato lo schema relativo al piano sperimentale appena descritto.

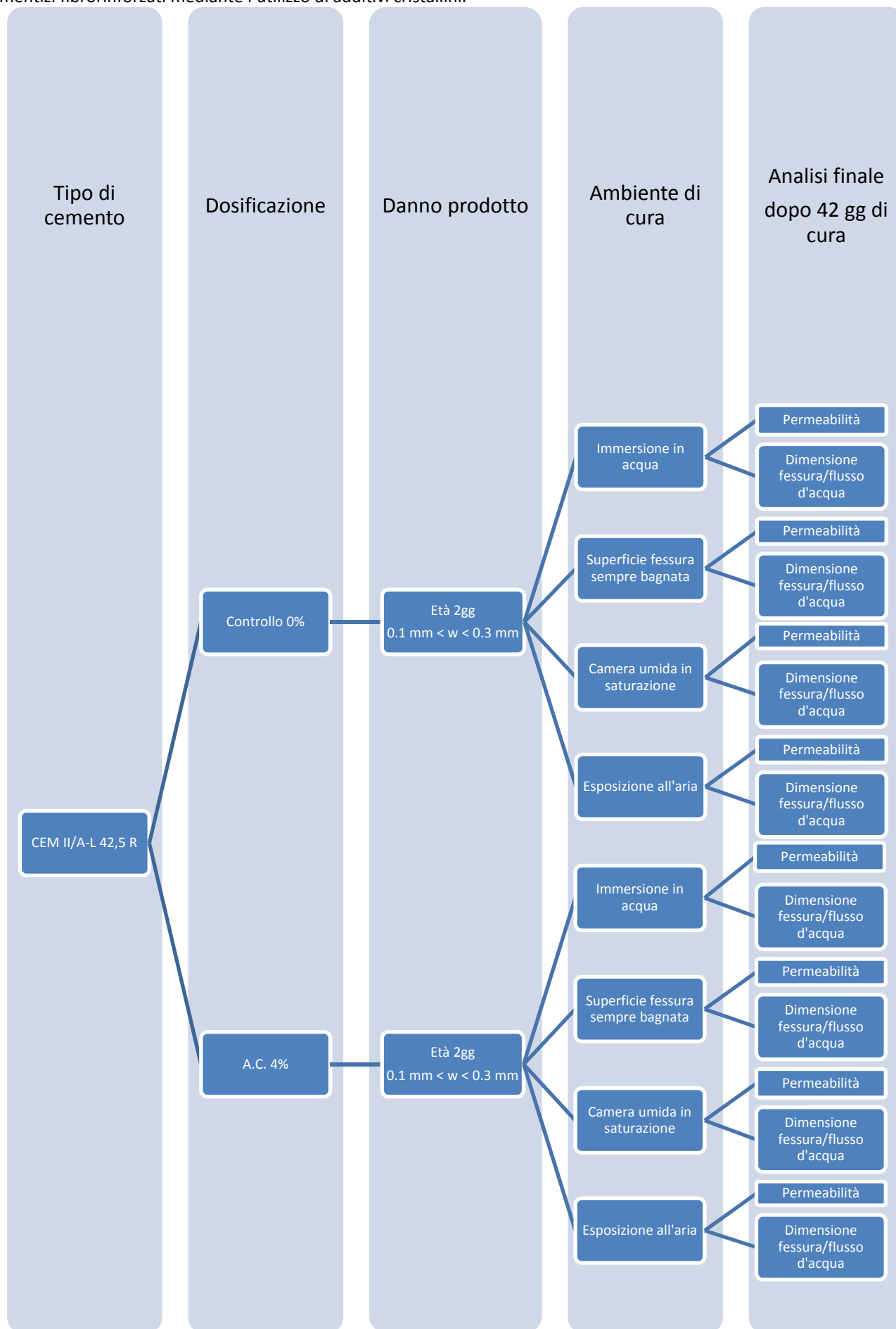


Figura 3.1 Piano sperimentale

3.4 Materiali

3.4.1 Cemento

Il cemento utilizzato per la fabbricazione dei campioni è un CEM II A/L 42,5 R. Come definito 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 il cui costituente principale è rappresentato dal clinker di cemento Portland in combinazione con una o più aggiunte minerali. La dicitura A/L, invece, indica che tali aggiunte sono presenti con una percentuale pari al $6 \div 20\%$ e sono principalmente a base di calcare.

In figura 3.2 sono mostrate la confezione del cemento e l’aspetto presentato al momento della fabbricazione del calcestruzzo.



Figura 3.2 Cemento CEM II/A-L 42,5 R. Confezione (a sinistra), aspetto del materiale (a destra).

La classe di resistenza 42,5 R indica, appunto, il valore in MPa della resistenza a compressione a ventotto giorni di campioni prismatici 40x40x160 mm, fabbricati con una malta standard caratterizzata da un a/c pari a 0,50 e un i/c pari a 3.

Questo tipo di calcestruzzo viene definito a rapido sviluppo di resistenza in quanto già a due giorni dalla miscelazione dell’impasto può resistere a una pressione maggiore di 20 MPa. Come descritto in precedenza, i campioni cilindrici sono stati fessurati a due giorni. Per questo motivo la scelta del cemento è ricaduta su questo tipo, poiché per poter essere sottoposto alla prefessurazione è necessaria almeno un’apprezzabile resistenza.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

Per la determinazione delle quantità di cemento i valori sono stati comparati con i minimi e i massimi richiesti per i calcestruzzi con armatura d'acciaio, poiché rinforzato con fibre dello stesso materiale.

Essendo uno degli ambienti di cura studiati, caratterizzato dalla completa immersione in acqua per un periodo pari a sei settimane, è stato deciso di preparare calcestruzzi con classe di esposizione XC2 (Bagnato, raramente asciutto) per tutti i campioni fabbricati in questo studio. Sempre dalla normativa UNI EN 206-1, sono stati presi i valori minimi relativi alla classe di esposizione scelta:

- Rapporto massimo a/c pari a 0,60;
- Classe di resistenza minima C25/30;
- Contenuto minimo di cemento 280 kg/m³.

3.4.2 Acqua

L'acqua utilizzata non ha proprietà particolari, poiché è stata utilizzata quella proveniente dall'acquedotto cittadino e, quindi, potabile. La normativa italiana UNI EN 1008 considera idoneo, per la produzione di calcestruzzo, questo tipo di acqua, pertanto non sono state predisposte prove.

Partendo dalle normali tecniche per il mix design del calcestruzzo, sono state fatte le seguenti considerazioni per la determinazione dell'acqua da fornire alla miscela. Prima di ogni impasto è stata calcolata l'umidità relativa posseduta dagli inerti, di cui si conosce la capacità di assorbimento.

Una volta determinata la quantità di acqua d'impasto, dedotta dal valore scelto di rapporto a/c, si è proceduto al calcolo della quantità da aggiungere per sopperire alla perdita dovuta all'assorbimento degli aggregati. A questa, inoltre, è stata sottratta la parte d'acqua contenuta all'interno dell'additivo fluidificante descritto in seguito. In questo modo è stato considerato il valore di acqua effettiva, così da aggiungere la minima quantità necessaria all'ottenimento del tipo di calcestruzzo voluto.

3.4.3 Aggregati

Gli inerti utilizzati per la confezione dei calcestruzzi sono di tre tipi:

- pietrisco proveniente da frantumazione di rocce, dimensione (d_{min}/D_{max}) 7/12;
- pietrisco proveniente da frantumazione di rocce, dimensione (d_{min}/D_{max}) 4/7;
- sabbia.

In figura 3.3 sono mostrati il pietrisco frantumato 7/12 e la sabbia utilizzati per la fabbricazione del calcestruzzo.



Figura 3.3 Foto esemplificative pietrisco frantumato 7/12 (a sinistra), sabbia (a destra).

Di seguito sono mostrate le tabelle riguardanti la granulometria e le caratteristiche degli aggregati sopra descritti.

Dimensione setaccio	Aggregati		
	7./12	4./7	Sabbia
[mm]	[%]	[%]	[%]
64	100	100	100
32	100	100	100
16	100	100	100
8	27.1	100	100
4	0	30	95.6
2	0	4.9	80
1	0	0	64.8
0.5	0	0	52.5
0.25	0	0	34.6
0.125	0	0	12.2
0.063	0	0	3.1

Tabella 3.1 Granulometria inerti.

Inerte	Assorbimento medio	Densità
[-]	[%]	[kg/m ³]
7/12	1,7	2600
4/7	1,7	2600
sabbia	1	2650

Tabella 3.2 Caratteristiche inerti.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

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

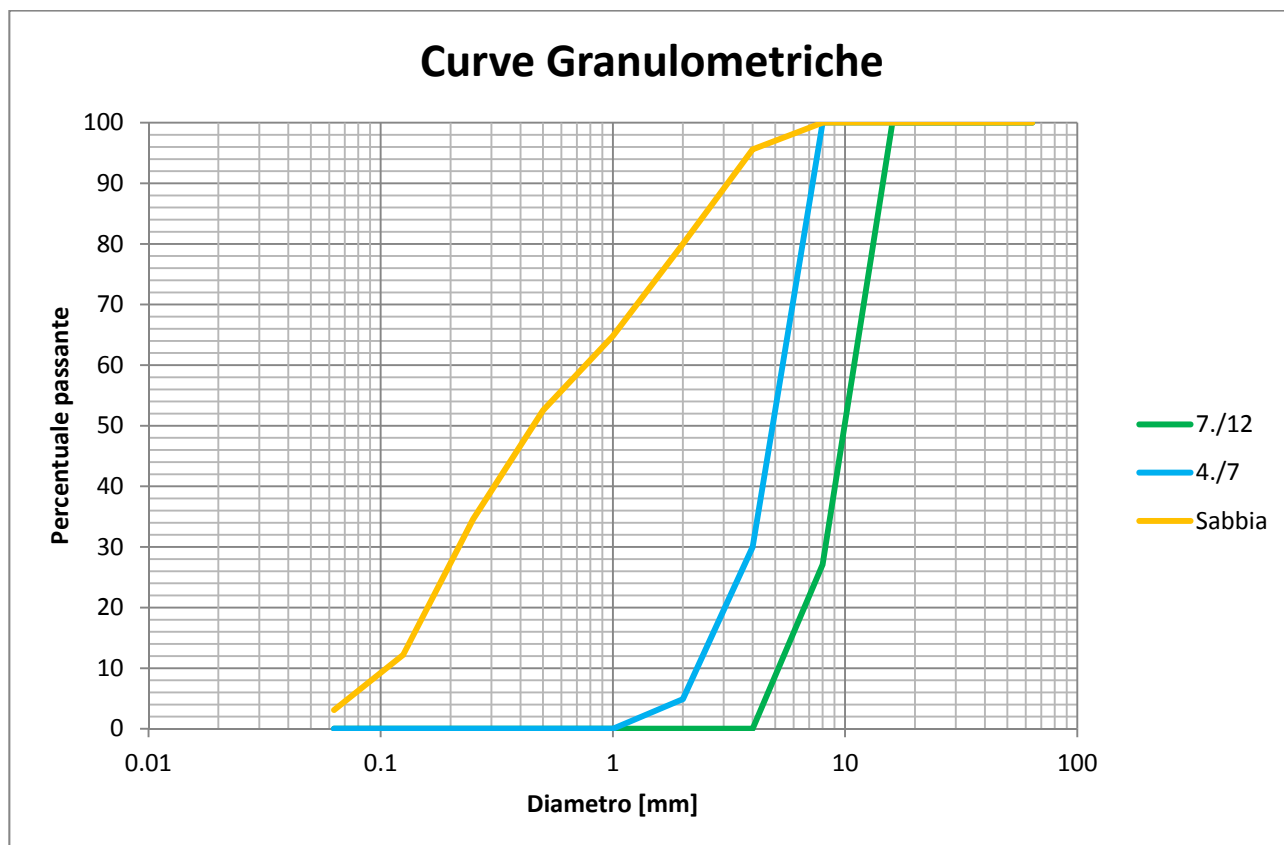


Figura 3.4 Curve granulometriche inerti.

Per regolare la distribuzione dei valori della curva granulometrica è stato aggiunto filler fino ($d < 0,063$ mm, densità pari a 2600 kg/m^3) con un contenuto pari a 86 kg/m^3 .

3.4.4 Additivo fluidificante

La progettazione della miscela di calcestruzzo ha avuto come obiettivo quello di ottenere un calcestruzzo semifluido con classe di consistenza S3 e abbassamento (slump) tra 100 e 150 mm. Visti il basso contenuto di acqua e la presenza delle fibre, è stato utilizzato il Sika ViscoCrete 5720, un additivo fluidificante per calcestruzzi ad alte prestazioni.

Per quanto riguarda la quantità utilizzata, di volta in volta è stato ipotizzato un contenuto dell'additivo, in percentuale di peso, e in seguito, osservando il cambiamento della consistenza durante la miscelazione, è stato deciso se aggiungerne. Si è proceduto in questo modo, poiché, durante l'utilizzo di tale additivo, è stato notato come le condizioni ambientali esterne e il tempo trascorso dall'apertura di un nuovo flacone abbiano influito molto sul rendimento e sui tempi di reazione. I valori finali, infatti, variano dallo 0,5% all'1,5%.

3.4.5 Fibre

L'utilizzo delle fibre è stato ritenuto fondamentale per il controllo dell'ampiezza delle fessure al momento della prefessurazione. Il contenuto di miscela è pari a 60 kg su metro cubo di calcestruzzo.

Sono state usate fibre di acciaio Dramix RC 65/35 BN della Bekaert, caratterizzate da una lunghezza di 35 mm e un diametro di 0,55 mm. Tali fibre sono state prodotte mediante un procedimento di trafilatura e piegatura a freddo, hanno estremità uncinata e vengono fornite incollate in pacchetti.

In figura 3.5 è mostrata una foto presa dal catalogo che mostra le fibre nelle condizioni di fornitura (così come vengono aggiunte al calcestruzzo).



Figura 3.5 Fibre in acciaio, lunghezza 35 mm e diametro 0,55 mm. Immagine presa dal catalogo (a sinistra), aspetto fibre calcestruzzo nelle condizioni di fornitura.

3.4.6 Resina epossidica sigillante

Per condizionare il flusso d'acqua al solo passaggio attraverso le due superfici circolari dei campioni, è stato utilizzato un sigillante bicomponente a base di resina epossidica. Il tempo richiesto perché si completi il processo d'indurimento è di circa 24 ore, motivo per il quale la prova di permeabilità è stata effettuata a quattro giorni dalla fabbricazione del calcestruzzo. Il prodotto utilizzato è il Sikadur-3.

3.4.7 Additivo cristallino

In commercio sono numerosi i prodotti che promettono un'elevata riduzione della permeabilità se utilizzati come additivi al momento dell'impasto. Molti di questi affermano di poter potenziare i meccanismi di self-healing propri del calcestruzzo.

L'additivo utilizzato in questo studio è composto da cemento, silice reattiva, o silicati trattati, e altri componenti chimici che, in presenza di acqua, formano prodotti non solubili in grado di riempire i pori e la struttura capillare della matrice cementizia. Possono essere usati, quindi, per la fabbricazione di calcestruzzi impermeabili o per favorire la chiusura di piccole fessure formatesi dopo il processo d'indurimento. Altri effetti positivi sono la diminuzione della profondità di penetrazione e dell'assorbimento d'acqua.

In figura 3.6 è mostrato l'additivo cristallino al momento della fabbricazione del calcestruzzo.



Figura 3.6 Aspetto additivo cristallino al momento della fabbricazione del calcestruzzo.

Le prescrizioni e le specificazioni fornite dall'azienda produttrice sono le seguenti:

- Densità 1200-1400 kg/m³.
- Dosaggio consigliato: 1-2% in peso di cemento.
- Può essere utilizzato come riduttore di acqua dell'ordine del 5-10%, per ciò viene consigliato un rapporto a/c $\leq 0,45$.
- Effetto minimo nell'inglobamento di aria, compatibilità con la maggior parte degli additivi superplastificanti.
- Può essere aggiunto all'impasto in qualsiasi momento.
- Può sigillare fessure con ampiezza massima di 0,4 mm, e in alcuni casi anche fino a 0,6 mm.
- Impermeabilizzante, poiché blocca il passaggio d'acqua all'interno del calcestruzzo.
- Protegge l'acciaio d'armatura dalla corrosione.
- Permeabilità, blocca l'entrata dell'acqua.
- La capacità impermeabilizzante di questo tipo di trattamento permane durante il tempo.
- Non è tossico e si può usare per le cisterne destinate al deposito di acqua potabile.
- I prodotti della cristallizzazione resistono ad una pressione idrostatica superiore a 40-50 mca (4-5 bar) e in molti casi può arrivare a 140 mca.

L'utilizzo di questo tipo di additivi è consigliato per le strutture destinate alla ritenzione di acqua, come piscine, dighe, cisterne, serbatoi, canali, etc., ma anche in tutte le strutture che sono soggette al contatto ripetuto o costante con acqua, come ad esempio fondazioni, elementi strutturali interrati, muri controterra, opere di difesa costiera, etc.

Come accennato prima, in questo studio viene rispettato il rapporto a/c, suggerito dal produttore, ma il dosaggio dell'additivo è stato aumentato fino al 4%.

3.5 Metodologia

In questo capitolo sono descritte nel dettaglio tutte le fasi del piano sperimentale esposto in precedenza.

Questa ricerca ha avuto come obiettivo quello di studiare gli effetti dell'additivo cristallino sulla durabilità del calcestruzzo. Per questo motivo sono stati fabbricati solo campioni cilindrici, con e senza additivo, seguendo le procedure mostrate dalle normative europee ed eseguendo le prove per la determinazione della tipologia di calcestruzzo.

Poco prima del getto del calcestruzzo all'interno delle forme cilindriche, è stata eseguita la prova di consistenza basata sulla misurazione dello slump, o abbassamento del cono di Abrams, per ogni impasto. Avendo progettato un calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio, si è cercato di ottenere una consistenza fluida, categoria S3, e quindi come valore obiettivo un abbassamento rientrante nell'intervallo 10÷15 cm. Per la determinazione della resistenza a compressione sono stati utilizzati tre campioni cilindrici per ogni impasto, lasciati in camera umida in condizioni di saturazione e temperatura costante per 28 giorni. In seguito sono stati sottoposti alla prova di compressione per valutarne il valore di resistenza.

I campioni cilindrici, quindi, hanno subito una serie di lavorazioni che hanno permesso lo svolgimento delle prove necessarie all'ottenimento dei dati utili allo studio. Le fasi principali sono riassunte nel seguente schema:

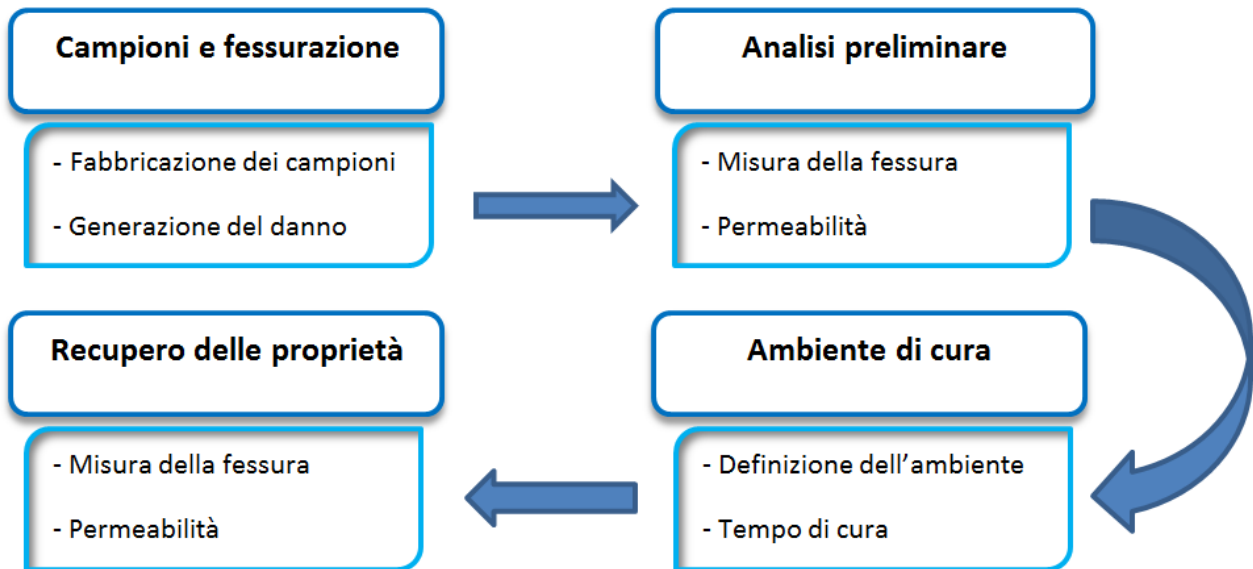


Figura 3.7 Schema logico della metodologia sperimentale.

3.5.1 Dosaggio, miscelazione del calcestruzzo e fabbricazione dei campioni

In questo paragrafo vengono descritte le modalità per la determinazione del mix-design utilizzato per la fabbricazione del calcestruzzo. Gli impasti progettati sono stati di due tipi, in funzione della

presenza o meno dell'additivo cristallino. Tale presenza ha influito principalmente nel dosaggio del filler utilizzato per aggiustare la curva di Bolomey, modificandone la quantità.

3.5.1.1 Parametri iniziali

È stato utilizzato un rapporto acqua/cemento pari a 0,45, considerando il valore dell'acqua effettiva come spiegato nel capitolo 3.3.2. È stato utilizzato il valore minimo di acqua così da permettere la fabbricazione di un calcestruzzo che una volta indurito posseda il più alto numero possibile di particelle non idratate.

La curva di Bolomey teorica è quella corrispondente ai parametri $a=17$ e $D_{max}=12$ per l'ottenimento di una curva di granulometria fina e più lavorabile. I risultati sono leggermente differenti tra gli impasti contenenti e non l'additivo cristallino poiché cambiano alcuni valori della miscela, restando però molto simili.

Di seguito sono rappresentate le curve granulometriche di due distinti impasti:

- AM 0-5, calcestruzzo di controllo con contenuto di additivo cristallino pari allo 0% (figura 3.8);
- AM 4S-3, calcestruzzo con contenuto di additivo cristallino pari al 4% (figura 3.9).

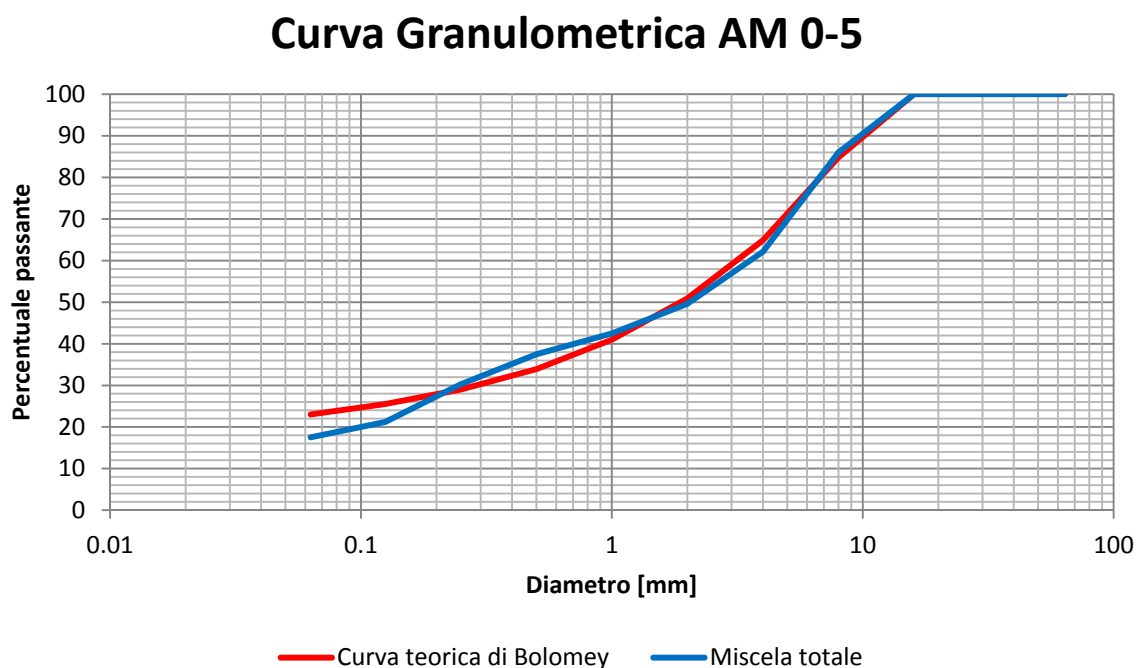


Figura 3.8 Curva granulometrica impasto AM 0-5, calcestruzzo di controllo.

Curva Granulometrica AM 4S-3

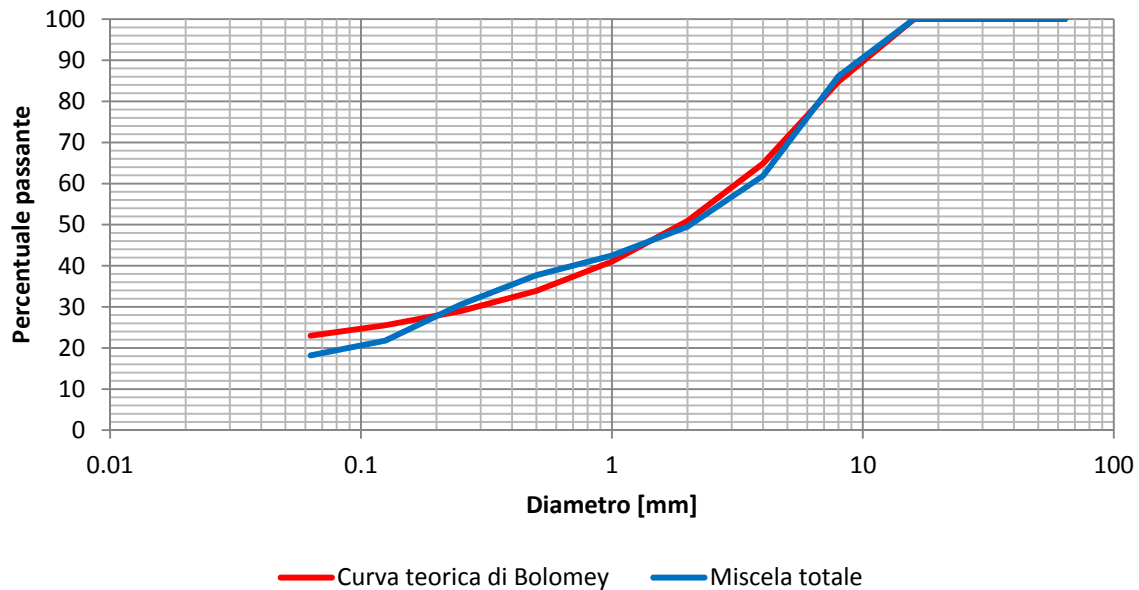


Figura 3.9 Curva granulometrica impasto AM 4S-3, calcestruzzo con additivo cristallino (4%).

Per il stimare il coefficiente di regolazione della curva, si calcola il quadrato della differenza tra i valori della curva teorica e quelli della miscela totale, si sommano e si divide il risultato per il numero di setacci con percentuale di passante non nullo. È stato ottenuto un valore del coefficiente pari a circa 3 ed è stato considerato accettabile poiché inferiore a 4.

La quantità dell'additivo fluidificante è variata di volta in volta poiché il suo rendimento dipende molto dalle condizioni ambientali, temperatura e umidità relativa, e dal tempo trascorso dall'apertura di una nuova confezione. Il valore obiettivo dello slump è stato deciso pari o maggiore a 10 cm in modo da garantire una buona lavorabilità per la fabbricazione dei campioni.

La quantità di fibre utilizzata è di 40 kg/m^3 , che permette di raggiungere un valore pari a circa lo 0,50% nel volume del calcestruzzo.

In tabella 3.3 viene rappresentato il dosaggio del calcestruzzo realizzato in questo progetto.

Materiale	Kg/m ³
Cemento II/A-L	350
Acqua	157.5
Aggregati (4-12 mm)	959
Sabbia	875
Fibre d'acciaio (RC-65/35)	40
Additivo Fluidificante	XX
Filler + Additivo Cristallino	50

Tabella 3.3 Dosaggio utilizzato

La somma delle quantità di filler e additivo cristallino è stata mantenuta costante, poiché il loro effetto sulla lavorabilità del calcestruzzo, durante la fabbricazione, è lo stesso. La quantità del filler è stata cambiata di volta in volta così da mantenere costante questo valore.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

I dosaggi dell'additivo cristallino sono due, 0% e 4% in peso di cemento. Mentre è stato scelto di utilizzare un calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio per permettere una rottura del campione meno fragile così da poter controllare meglio l'apertura della fessura e raggiungere le ampiezze desiderate. Il materiale delle fibre è stato scelto con lo scopo di ottenere un tipo di guarigione dipendente solamente dalla presenza dell'additivo cristallino. Infatti, sono state scartate fibre ad alta polarità che avrebbero potuto incrementare la precipitazione dei cristalli di carbonato di calcio come conseguenza di questa proprietà [13] [16] [15].

Il giorno prima della miscelazione dell'impasto, vengono presi campioni dei tre tipi di inerti utilizzati. Ogni campione pesa circa 1000 gr e una volta pesato, tramite una bilancia di sensibilità 1 gr e appuntato il valore, viene sistemato all'interno di un forno a 120° per 24 ore in modo da essiccarlo. Il giorno successivo i campioni vengono pesati nuovamente così da calcolare l'umidità di ogni aggregato secondo la seguente formula:

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

In questo modo è possibile compiere le correzioni necessarie alla quantità di acqua.

3.5.1.2 Fabbricazione dei campioni

Per la miscelazione del calcestruzzo è stata usata una regola che ha disciplinato l'ordine e le tempistiche dell'utilizzo di ogni singolo componente. Il processo dell'impasto 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 attivata per un tempo che va dai 10 ai 12 minuti con lo scopo di omogeneizzare gli inerti. Figura 3.10 (b);
3. Vengono versati il filler, il cemento e, negli impasti corrispondenti, l'additivo cristallino. Si impasta per un altro minuto;
4. Viene versata l'altra metà dell'acqua durante un tempo pari a 1 minuto. Si impasta per un altro minuto. Figura 3.10 (c);
5. Viene aggiunto l'additivo fluidificante durante un tempo pari a 1 minuto, e si lascia reagire per 3-4 minuti osservando il cambiamento di consistenza del calcestruzzo. Quando necessario ne viene aggiunta una quantità calcolata in precedenza e tenuta pronta per questa evenienza. Figura 3.10 (d);

6. Vengono aggiunte le fibre lentamente e si impasta per altri 3-4 minuti in modo che le fibre si ripartiscano omogeneamente all'interno dell'impasto. Figura 3.10 (e).

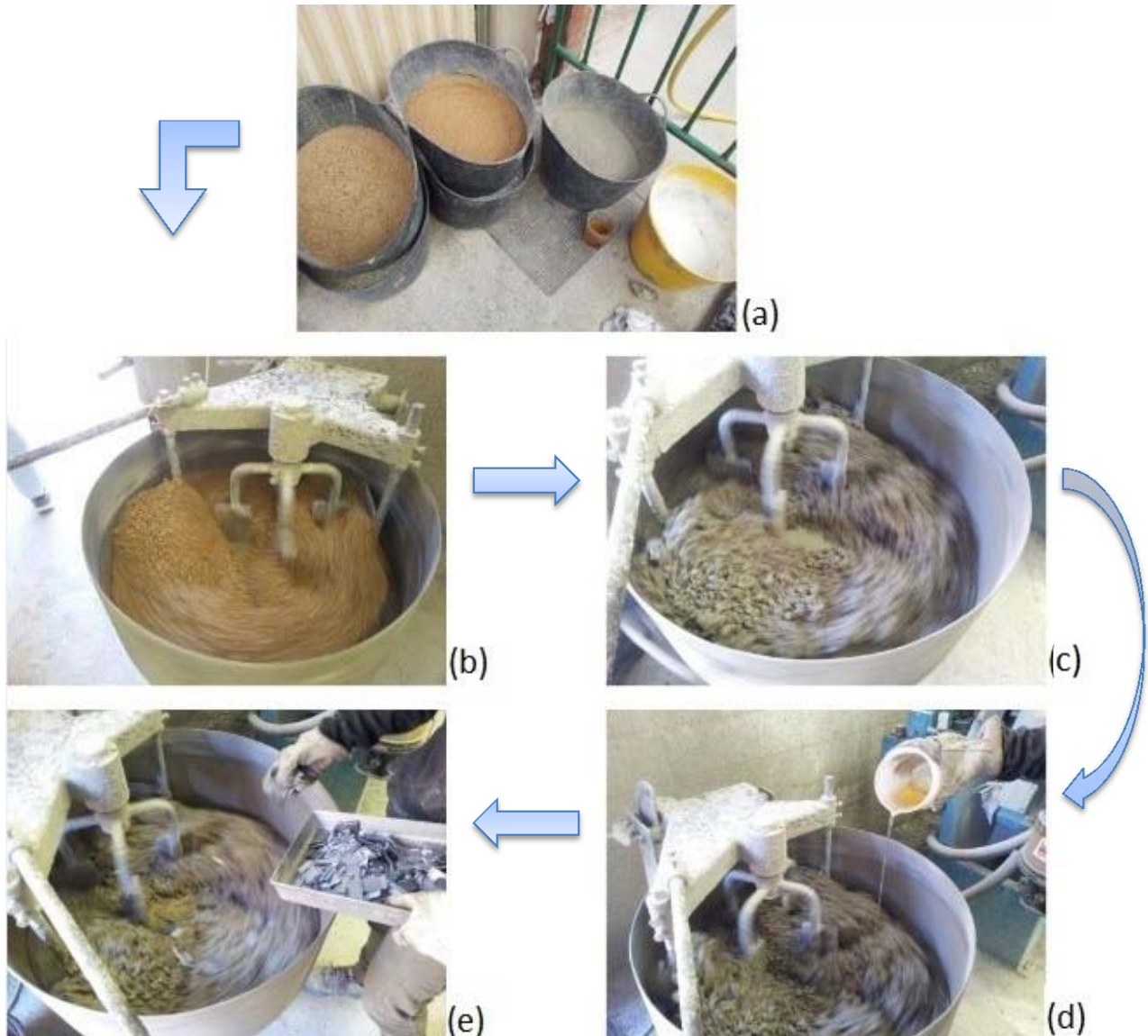


Figura 3.10 Miscelazione componenti calcestruzzo, fasi principali: Pesatura singoli materiali (1), miscelazione inerti con metà dell'acqua (2), aggiunta cemento, filler e additivo cristallino (3), aggiunta additivo fluidificante (4), aggiunta fibre (5)

A questo punto si esegue la prova dello slump per la determinazione della consistenza, procedura spiegata nel capitolo 3.7.1.

Misurato l'abbassamento, il calcestruzzo utilizzato per la prova viene gettato nell'impastatrice, che viene avviata nuovamente per alcuni secondi. Gli stampi vengono preparati prima e durante la miscelazione del calcestruzzo, inumidendone completamente la superficie con del disarmante (figura 3.11 (a)). In seguito viene versato il calcestruzzo in tre strati successivi pari a circa un terzo dell'altezza dello stampo. Ogni strato viene compattato con 25 colpi della barra di costipazione, un'asta in acciaio di sezione circolare, dritta, con estremità arrotondate, avente diametro di 16 ± 1 mm e lunghezza di 600 ± 5 mm (UNI EN 12350-2).

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

Una volta compattato il calcestruzzo, gli stampi vengono lasciati su un piano orizzontale a riposare per un periodo di 24 ore (figura 3.11 (b)), così da permettere il fenomeno della presa e parte dell'indurimento. Il giorno dopo i campioni vengono disarmati (figura 3.11 (c)) e sistemati in una camera umida a saturazione e temperatura pari a 20° per altre 24 ore.



Figura 3.11 Preparazione stampi in acciaio mediante, utilizzo disarmante (a), campioni lasciati a riposo all'interno della forma per 24 ore (b), disarmo dei campioni e sistemazione in camera umida (c).

3.5.2 Prefessurazione

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

Utilizzando una sega circolare per calcestruzzo, ai provini vengono asportate le due superfici fino ad uno spessore di circa mezzo centimetro (figura 3.12 (a)), questo permette di ottenere due facce perfettamente planari dove sarà possibile identificare e misurare le fessure. In seguito, dopo aver misurato la nuova altezza, vengono divisi a metà (figura 3.12 (b)).

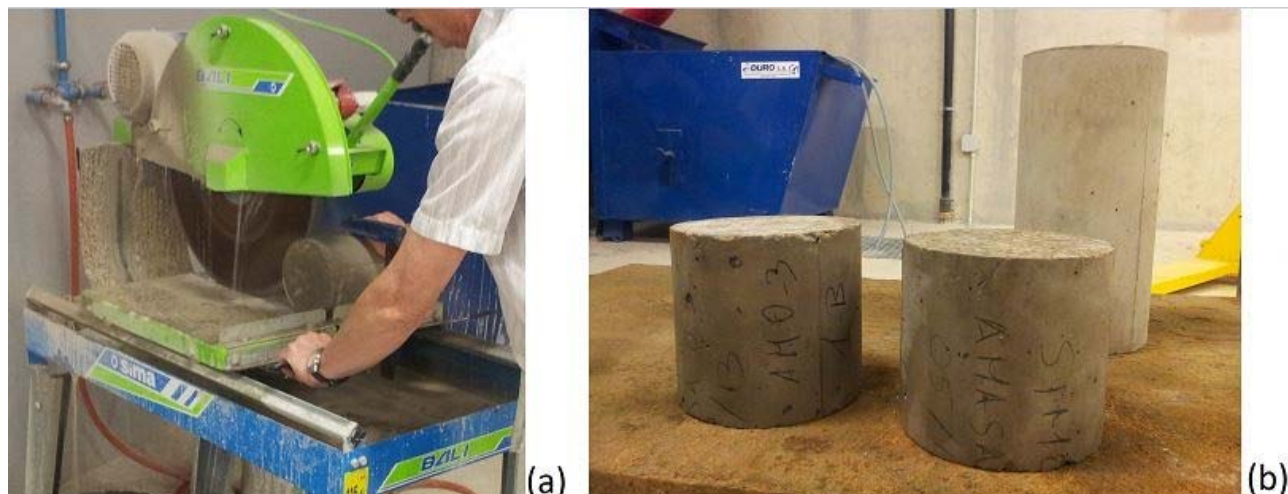


Figura 3.12 Asportazione superfici fino a uno spessore di circa mezzo centimetro e divisione a metà del campione (a), ottenimento di due provini cilindrici con superfici planari (b).

Per prefessurare i campioni è stata utilizzata la prova di trazione indiretta (figura 3.13), o prova brasiliana, modificata per poter controllare l'apertura della fessura durante lo svolgimento della stessa. È stato scelto questo tipo di prova per la forma e dimensione dei provini e perché l'attrezzatura necessaria alla sua esecuzione è stata disponibile in laboratorio fin dall'inizio del piano sperimentale. Come si nota in figura 3.13 (b) una volta disposto il campione tra i piatti della

pressa, viene aumentato il carico a velocità bassa fino alla sua rottura, avvertita sia tramite gli strumenti di analisi della macchina, sia dal rumore prodotto.

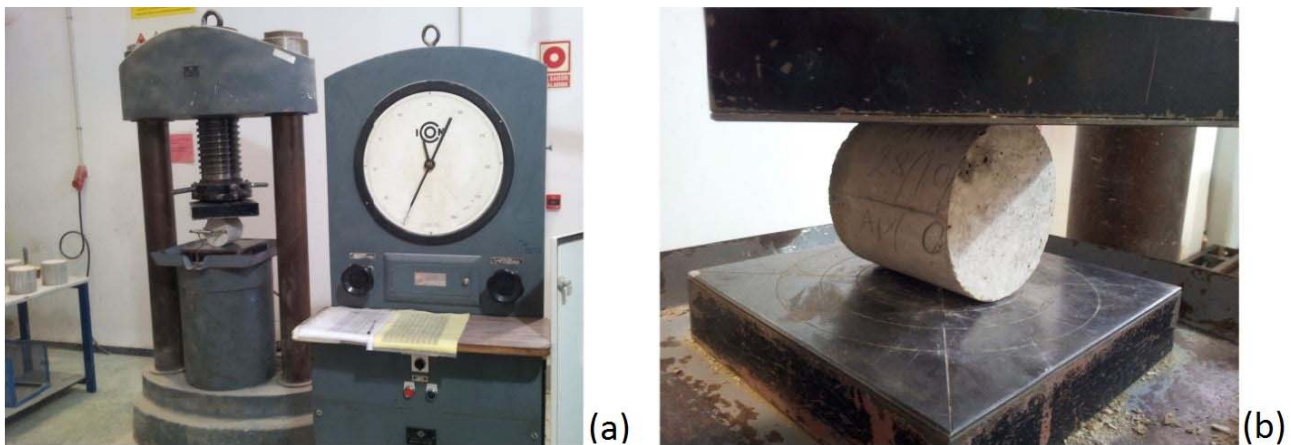


Figura 3.13 Prefessurazione campione con la prova di trazione indiretta (a), disposizione campione tra le piastre (b).

Viene, quindi, eseguita una prima misurazione della fessura massima mediante la sovrapposizione di un micrometro. La ricerca ha come obiettivo quello di studiare fessure di ampiezza non superiore a 0,3-0,35 mm. Quando ritenuto necessario, è stata riattivata la pressa a velocità inferiore a quella del primo carico e, con l'ausilio del micrometro, onde indurre un aumento dell'ampiezza della fessura fino a 0,4-0,45 mm, superiore a quello obiettivo. Il motivo di tale scelta è dovuto al fatto che una volta scaricata la pressa e lasciati i campioni a riposo, è stata notata una diminuzione dell'ampiezza massima della fessura dovuto al recupero della deformazione elastica delle fibre d'acciaio. Per studiare una variabilità maggiore di dati, le fessure accettate hanno avuto ampiezze comprese nell'intervallo di 0,076 e 0,30 mm.

3.5.3 Prova di permeabilità

Prima di eseguire la prova è necessario preparare i campioni in modo da garantire che il flusso d'acqua attraversi le sole superfici di base dei cilindri e non la laterale. Eseguendo la prefessurazione con la prova brasiliana, infatti, si forma una serie di fessure longitudinali dove il cilindro è a contatto con le piastre della pressa. Viene scelta la superficie che verrà posta a contatto con la parte superiore del permeabilmetro in base alla dimensione della fessura. Infatti, anche se i campioni presentano in entrambe le facce fessure di ampiezza simile, si può sempre determinare quale delle due sia la maggiore. Per facilitare il passaggio di acqua, quindi, si è preferito porla sempre superiormente orientando di conseguenza il provino.

Per condizionare la direzione del flusso d'acqua è stata spalmata una pasta adesiva bicomponente epossidica ai lati del campione e in parte della superficie superiore (figura 3.14), in modo da ottenere la completa aderenza con il disco di gomma impermeabile mostrato in seguito. Tale pasta ha bisogno di circa 24 ore per indurirsi completamente. Per questo motivo la prova di permeabilità viene eseguita al quarto giorno dalla fabbricazione dei cilindri.

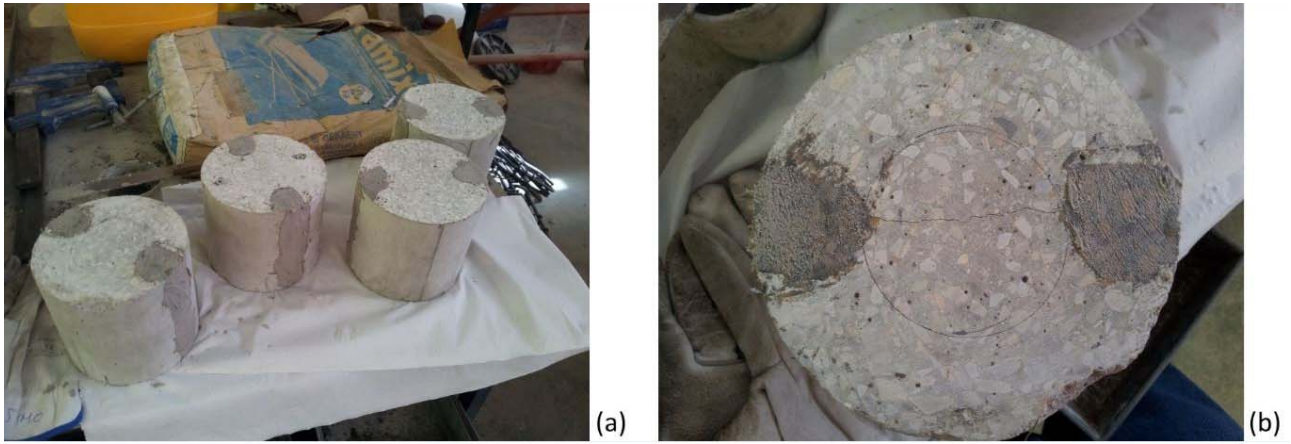


Figura 3.14 Sigillatura delle parti a contatto con i piatti della piastra (a), sigillatura parte della faccia superiore che andrà a contatto con l'anello di gomma necessario per eseguire la prova di permeabilità (b).

Nella scelta del tipo di prova di permeabilità sono stati tenuti in conto diversi fattori. Per questa ricerca è stato fondamentale studiare un sistema valido sia per elementi a elevata permeabilità, campioni fessurati, sia per elementi a bassa permeabilità, campioni sigillati per effetto del self-healing.

Il concetto base di questa prova è che quanto maggiore è l'ampiezza della fessura, tanto maggiore sarà la quantità d'acqua che la attraversa, per una pressione determinata e costante e un intervallo di tempo stabilito. Cosicché per campioni in parte "guariti" il flusso d'acqua sarà inferiore a quello iniziale, mentre per quelli completamente "guariti", la quantità d'acqua dovrà essere nulla.

La prova di permeabilità approntata per questo studio è stata progettata basandosi sulla prova per la determinazione della profondità di penetrazione di acqua applicata sotto pressione descritta nella normativa UNI EN 12390-8 "Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 8: Profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione". La modifica apportata si è basata, inoltre, sulla Legge di Darcy che descrive le caratteristiche del flusso di acqua attraverso un mezzo poroso. L'equazione di questa legge è:

$$Q = k * \frac{h_1 - h_2}{L} * A = k * i * A$$

dove

Q è il flusso che attraversa il campione;

L è l'altezza totale del campione;

k è il coefficiente di permeabilità del materiale;

A è la sezione trasversale del campione;

$h_1 - h_2$ è la differenza di carico piezometrico, e h_1 e h_2 sono le altezze delle due colonne d'acqua dal punto in contatto con il mezzo studiato e il pelo libero, come mostrato in figura 3.15.

$\frac{h_1 - h_2}{L}$ è il gradiente idraulico, i .

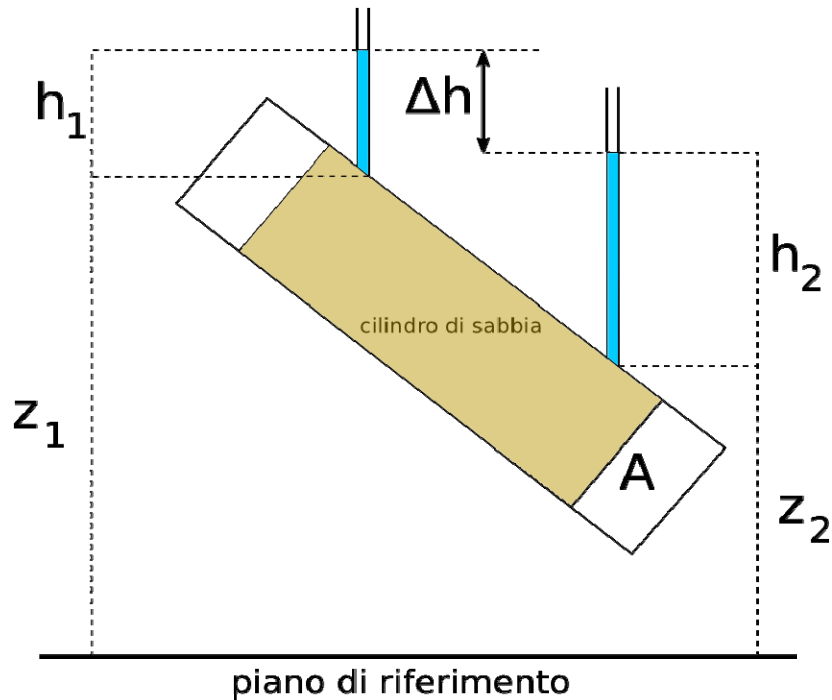


Figura 3.15 Schema utilizzato per la dimostrazione della Legge di Darcy.

La prova, quindi, consiste nel collocamento dei provini cilindrici nel permeabilometro utilizzato per la prova di penetrazione di acqua della normativa sopra citata per il calcestruzzo. A causa dell'alta permeabilità attesa, si è deciso di fornire acqua sotto una pressione di circa 2 bar. La sensibilità della macchina utilizzata ha permesso di rimanere in un intervallo di pressione che va da 1,9 bar a 2,1 bar (figura 3.17 (b)). Man mano che l'acqua attraversa la fessura, la pressione dell'intero sistema scende fino a 1,9 bar, raggiunto tale limite si attiva il compressore che fa salire nuovamente la pressione a 2,1 bar, cosicché la pressione media si aggiri sempre intorno ai 2 bar.

Una volta calibrata la macchina e inserito il provino all'interno, viene posizionato un secchio al di sotto per raccogliere l'acqua. Aperti i rubinetti, viene attivato un timer e si lascia la macchina in funzionamento per i successivi 5 minuti, al termine dei quali viene pesato il volume d'acqua presente all'interno del secchio.

Per eseguire queste prove correttamente è necessario che il campione sia sigillato lateralmente e che sia posto un anello isolante in gomma (figura 3.17 (c)) tra le superfici del cilindro e del piatto superiore della macchina, così da condizionare il passaggio dell'acqua al solo interno del provino. Per la sigillatura laterale è stata usata la resina epossidica bicomponente, come illustrato in precedenza. L'anello di gomma, invece, ha permesso di sigillare la faccia superiore, sottomessa direttamente al flusso del permeabilometro. Al momento dell'inserimento del campione, viene imposta la completa aderenza tra le tre parti di cui è composto il sistema, stringendo la bullonatura della macchina fino a quando non viene notata la deformazione dell'anello isolante (figura 3.17 (e)).

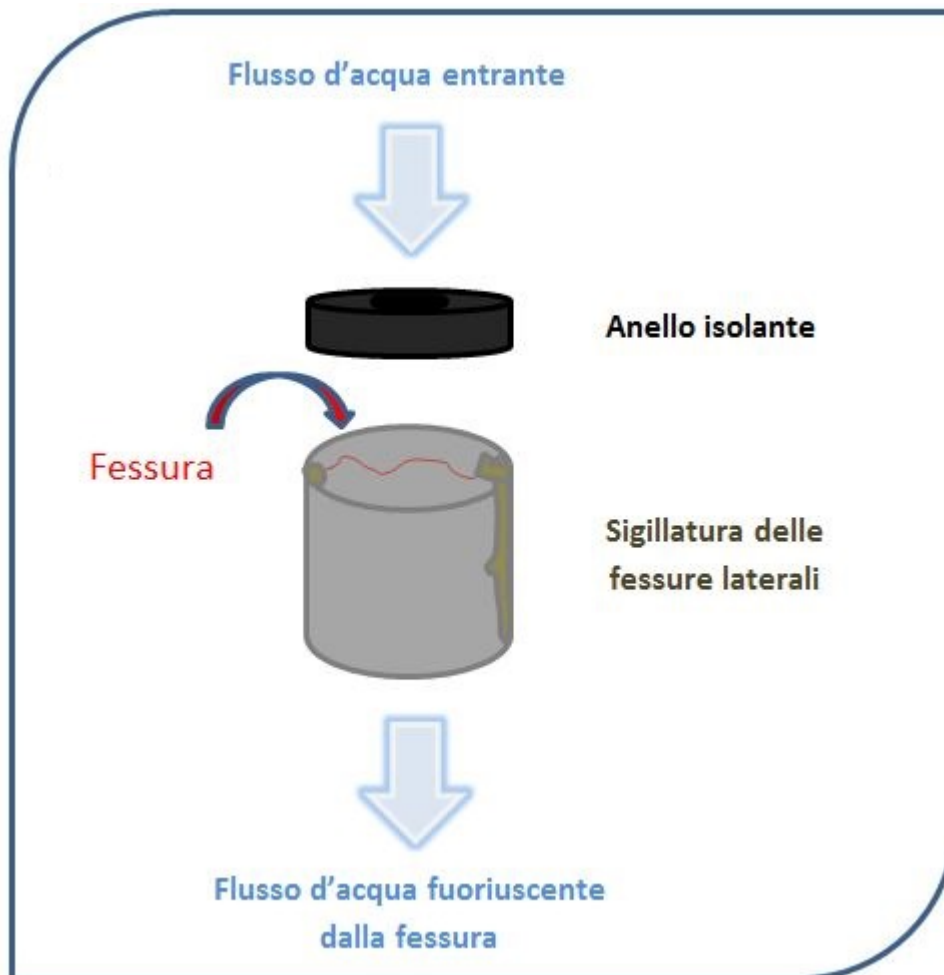


Figura 3.16 Prova di permeabilità modificata

Il concetto della prova di permeabilità modificata è mostrato in figura 3.16.

Detto ciò si è ottenuto un sistema mediante il quale l'acqua permea dentro il campione esclusivamente attraverso la fessura interna, fenomeno apprezzabile visivamente in ogni prova effettuata. In figura 3.17 vengono mostrate le parti principali del permeabilmetro e lo stato del provino al momento della prova.

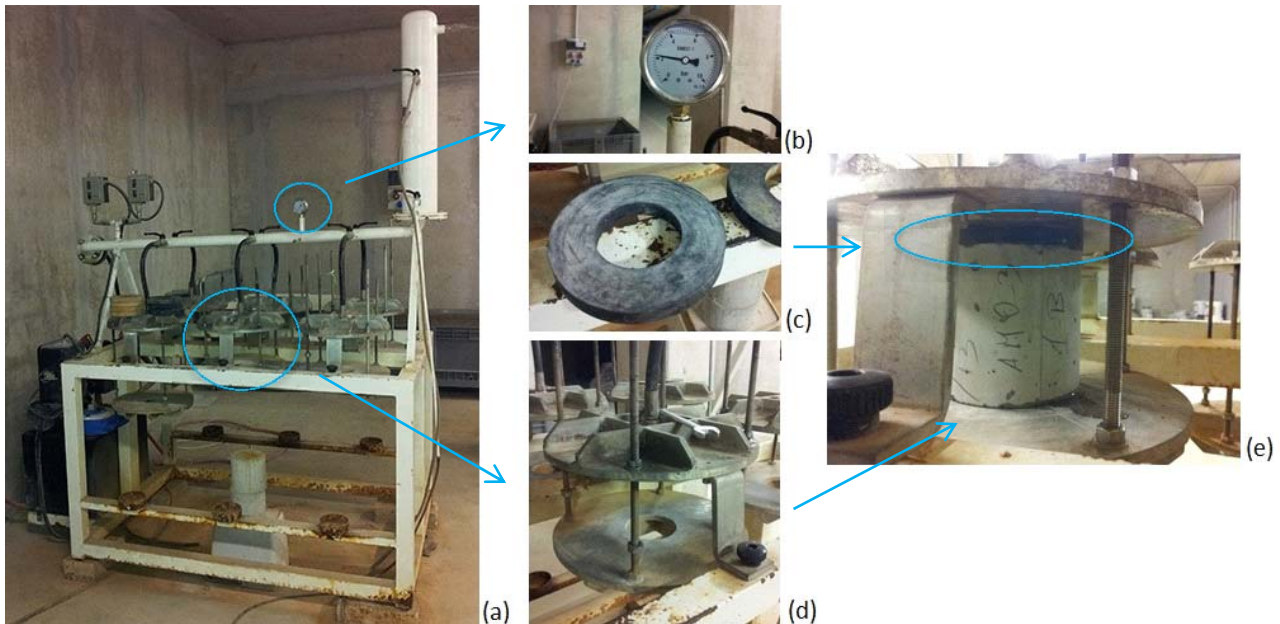


Figura 3.17 Permeabilmetro utilizzato per effettuare la prova (a), barometro (b), anello di gomma per l'impermeabilizzazione della connessione tra il macchinario e il campione (c), parte del permeabilmetro utilizzata durante la prova (d), stato del campione al momento della prova (e).

Riassumendo, i parametri usati in questa prova sono i seguenti:

- Pressione dell'acqua tra 1,9 e 2,1 bar. Attivata la macchina, viene controllato che il compressore fornisca sempre la stessa pressione al flusso d'acqua prima di cominciare la prova.
- Tempo della prova pari a 5 minuti.

Una volta terminata la prova, la quantità dell'acqua viene pesata mediante una bilancia standard.

3.5.4 Ambienti di cura

Gli ambienti di cura studiati in questa ricerca sono quattro:

- Immersione in acqua, all'intero di apposite vasche;
- 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 è costantemente bagnata ed è presente uno strato di 2 cm di acqua sopra una delle due facce.

Per i primi tre tipi non state necessarie particolari lavorazioni. Per i campioni immersi, è stata utilizzata acqua potabile prelevata direttamente dall'acquedotto e al momento dell'immersione, è stato controllato che il livello dell'acqua arrivasse ad almeno 5 cm sopra i campioni. Le due tipologie di provini, con e senza additivo, sono stati posti in due differenti vasche (figura 3.18 (a)). In figura 3.18 (b) sono mostrati i campioni dell'impasto AM0-7, di controllo, durante il periodo di immersione.



Figura 3.18 Immersione dei campioni con e senza additivo in due diverse vasche (a), stato dei campioni all'interno delle vasche (b).

Per quanto riguarda la camera umida e l'esposizione all'aria, i campioni sono stati sistemati nei rispettivi ambienti e lasciati a riposo per il tempo stabilito. In figura 3.19 sono mostrati i campioni esposti rispettivamente alle condizioni della camera umida (a) e all'aria non trattata (b), come si può notare non sono stati utilizzati particolari accorgimenti.

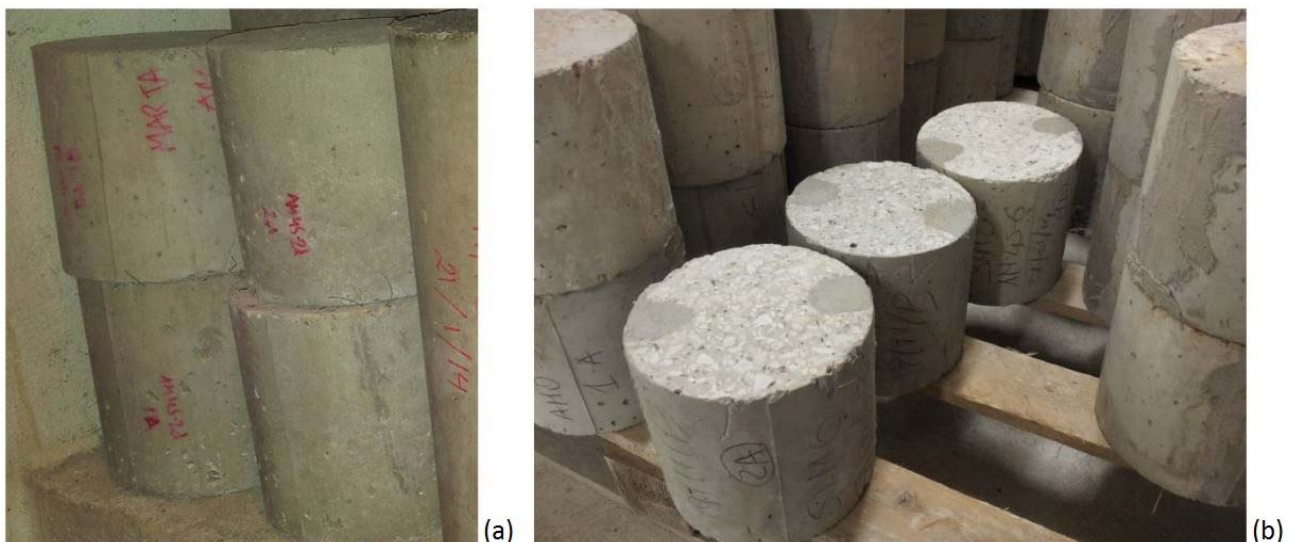


Figura 3.19 Campioni immagazzinati in camera umida a 20°C e 95-100% U.R. (a), campioni esposti a aria non trattata (b).

L'ultimo ambiente, invece, ha richiesto una lavorazione più complessa. L'obiettivo è quello di simulare la condizione in cui si trovano pareti interrate completamente al di sotto del livello di falda o solo in parte. In seguito alla formazione di una fessura, l'acqua vi penetra all'interno e si mantiene a pressione bassa e costante ($1,96 \cdot 10^{-3}$ bar o 0,2 kPa) sulla sola superficie esterna della parete.

Il meccanismo in grado di sottomettere i campioni cilindrici a questo tipo di esposizione deve possedere le seguenti caratteristiche:

- Superficie inferiore impermeabilizzata;
- Superficie superiore facilmente ispezionabile;

- Elemento, posto sopra la superficie superiore, in grado di contenere lo strato d'acqua spesso 2 cm e che ne permetta il controllo del livello;
- Struttura rigida in grado di permettere il mantenimento, per tutta la durata della cura, della posizione degli strati e consenta la movimentazione del campione;
- Sistema non permanente, facilmente smontabile;
- Sistema che non danneggi ulteriormente il campione e non cambi le caratteristiche della fessura.

Il sistema progettato per questo tipo di esposizione e avente tutte le caratteristiche sopra elencate è mostrato in figura 3.20. È composto da:

- due elementi in legno compensato, di forma quadrata (circa 20x20 cm), spessi 2 cm, uno dei quali presenta un foro di forma circolare di diametro 7 cm;
- due elementi di materiale plastico impermeabile, di forma quadrata (circa 20x20 cm), spessi 1 cm, uno dei quali presenta un foro di forma circolare di diametro 7 cm;
- cilindro in PVC, di diametro interno pari a circa 10 cm;
- cavo d'acciaio di spessore 1,25 mm;
- campione cilindrico di calcestruzzo.

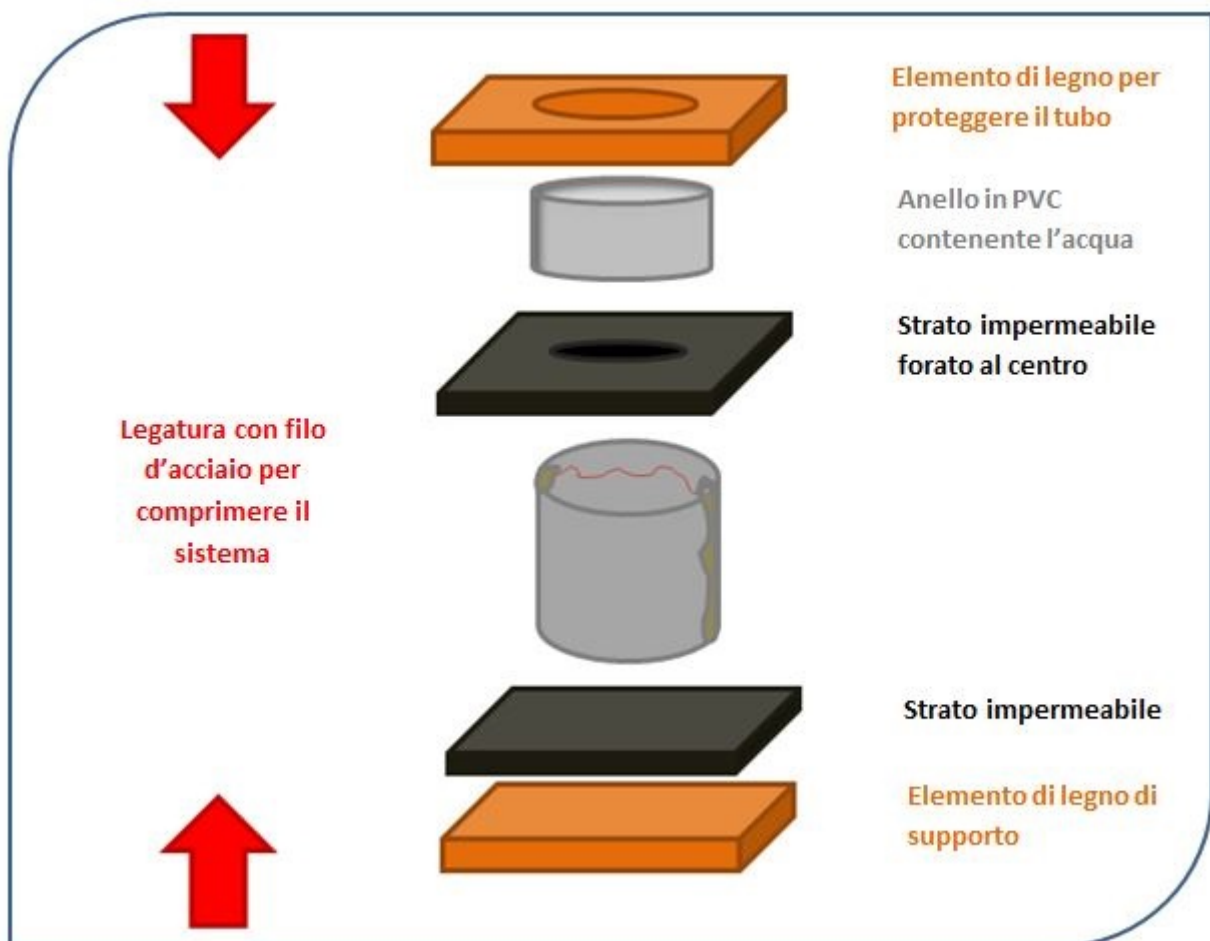


Figura 3.20 Schema del sistema progettato per l'ambiente di cura in cui la fessura è mantenuta sempre bagnata e uno strato di 2 cm di acqua viene mantenuto sopra la superficie superiore.

Sono, inoltre, necessari una base d'appoggio per l'elemento di legno posto inferiormente, morse e pinze.

Preparati tutti gli elementi del sistema, si procede al montaggio come descritto di seguito:

1. Disposizione dell'elemento di legno sopra i supporti, in questo due mattoni forati di laterizio. Figura 3.21 (a);
2. Posizionamento del cuscinetto impermeabile sopra l'elemento in legno. Figura 3.21 (b);
3. Sistemazione del campione di calcestruzzo al centro del cuscinetto. Figura 3.21 (c);
4. Posizionamento cuscinetto impermeabile forato. Figura 3.21 (d);
5. Posizionamento del cilindro in PVC e dell'elemento di legno forato, controllando che il foro coincida con quello del cuscinetto. Figura 3.21 (e) e (f);
6. Compressione del sistema mediante l'utilizzo di morse metalliche. Figura 3.21 (g);
7. Legatura con cavo d'acciaio, adattandone la forma e tendendolo il più possibile;
8. Controllo della tensione del cavo;
9. Rilascio delle morse e messa in trazione del cavo. Figura 3.21 (h).

In figura 3.21 sono mostrate le fasi principali della procedura di montaggio.

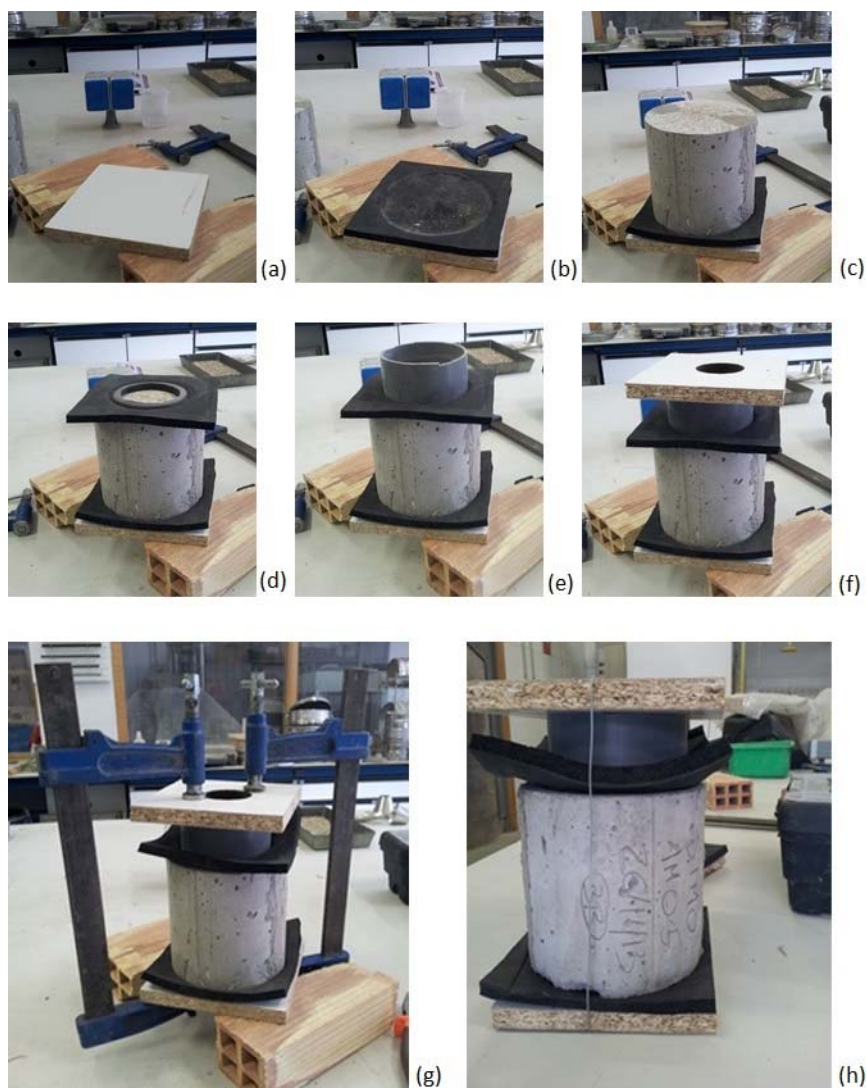


Figura 3.21 Fasi principali montaggio sistema per la sottomissione all'ambiente di cura desiderato.

Completata la procedura, viene aggiunta l'acqua attraverso il foro superiore fino al livello desiderato e si attendono 24 ore per verificare eventuali perdite dall'impermeabilizzante. Una volta che l'acqua riempie completamente la fessura, ne viene aggiunta dell'altra in modo da raggiungere nuovamente il livello desiderato. I campioni vengono, quindi, immagazzinati all'interno della camera umida in condizioni di saturazione e temperatura pari a 20°C, come mostrato in figura 3.22.



Figura 3.22 Campioni con sistema per il mantenimento della fessura sempre bagnata e di uno strato di 2 cm di acqua sulla superficie superiore immagazzinati all'interno della camera umida a 20°C e 95-100% U.R..

3.6 Valutazione della fessura

Lo studio della variazione del flusso d'acqua all'interno della fessura per via dell'autoguarigione, è stato affiancato a quello riguardante l'evoluzione delle fessure superficiali. Sono state studiate più metodologie di misurazione, con lo scopo di trovare quelle che più si relazionano con il flusso d'acqua attraversante la fessura.

La prima metodologia utilizzata è stata quella della misurazione dell'ampiezza massima della fessura tramite il posizionamento di un fessurimetro trasparente sulla superficie e la sua sovrapposizione lungo tutta la fessura. In questo viene registrata l'ampiezza massima della fessura presente sulla faccia superiore e su quella inferiore del campione. Per ogni provino sono state studiate diverse relazioni, considerando ad esempio il valore maggiore o minore tra i due misurati, o la loro somma e confrontandoli con il flusso d'acqua misurato durante la prova di permeabilità.

Gli altri metodi approntati per questo tipo di studio hanno riguardato l'utilizzo di foto scattate tramite un microscopio ottico con due diversi zoom: 60x e 200x. La superficie resa liscia dai tagli eseguiti con la sega circolare per calcestruzzi prima della prefessurazione, ha permesso di scattare foto ad alta risoluzione senza mai cambiare la messa a fuoco del microscopio. In questo modo la distanza focale tra l'obiettivo e la superficie sono rimaste sempre le stesse, permettendo di rendere le foto confrontabili con una tipo, riprendente la fessura e una dimensione nota, in questo

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

caso 5 mm. Con l'ausilio di software grafici è stato possibile tradurre le misurazioni in pixel nei valori corrispondenti in millimetri. In seguito verranno spiegate più nel dettaglio le procedure che hanno permesso questo tipo di misurazioni.

Prima della prova di permeabilità ed eseguite, quindi, la prefessurazione e la sigillatura delle fessure laterali, si procede con la pulitura delle fessure principali riempitesi di polvere durante il processo di taglio. Si utilizza un compressore ad aria, impostato a una pressione di 2 bar. La scelta di una pressione così bassa è dipesa dal fatto che questo tipo di pulitura viene eseguito nuovamente prima dell'esecuzione della prova di permeabilità dopo la cura. In questo caso, infatti, il rischio maggiore è quello di rompere i cristalli possibilmente formatisi sulla fessura superficiale dei campioni.

Fatto ciò, si procede con lo scatto di una serie di foto lungo tutta la fessura, seguendone ogni diramazione, come viene mostrato in figura 3.23. In questo modo sono state scattate un numero di foto che varia da circa 50 a circa 100, in base alla fessura fotografata. Le fessure della superficie superiore, infatti, sono lunghe quasi la metà di quelle dell'inferiore, e questo è dovuto alla pasta sigillante posta su metà della fessura superiore per aumentare l'aderenza con l'anello di gomma e così evitare perdite di acqua durante la prova di permeabilità. Le foto sono state scattate anche dopo il periodo di cura, prima di eseguire nuovamente la prova di permeabilità. In questo caso i campioni, sono stati lasciati ad asciugare, nel caso di ambienti a contatto con acqua, e in seguito puliti con un getto di aria in pressione pari a 2 bar.



Figura 3.23 Utilizzo microscopio ottico per scattare foto ad alta risoluzione della fessura (sinistra), visualizzazione fessura e elaborazione immagini mediante software.

Con queste foto è stata possibile la composizione di panorami mediante l'utilizzo del software commerciale Adobe Photoshop CS6. È stato possibile confrontare lo stato delle fessure prima e dopo la cura, studiandone i cambiamenti ed effettuando diverse serie di misurazioni. In figura 3.24 viene rappresentato un esempio di fessura sigillatasi durante il periodo di cura in immersione. Il campione in esame è l'1-A dell'impasto con additivo cristallino AM 4S-2, e la fessura è quella presente sulla superficie inferiore. Si può notare come l'aspetto finale della fessura sia molto differente rispetto quello iniziale, in particolare la fessura risulta completamente sigillata.

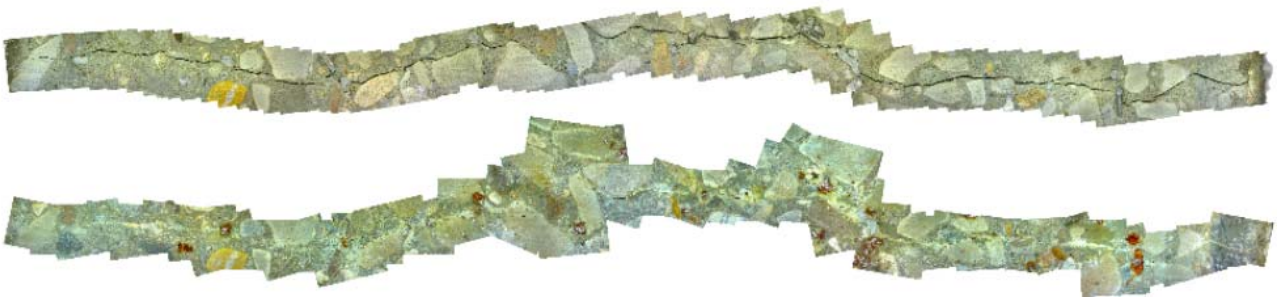


Figura 3.24 Comparazione stato della fessura prima (in alto) e dopo (in basso) il periodo di cura. Campione in esame 1—A dell'impasto con additivo cristallino AM 4S-2, fessura inferiore.

Di seguito vengono ora esposte tutte le metodologie di studio improntate per la misurazione della fessura, escludendo l'utilizzo del fessurimetro, spiegato in precedenza.

3.6.1 Misurazione ampiezza massima

Questo sistema consiste nella ripetizione di più misurazioni lungo la fessura, eseguite sui panorami composti dalle foto scattate con il microscopio ottico, fino all'individuazione del valore maggiore. Il problema principale di questo metodo riguarda la natura stessa della misurazione. Il software, infatti, fornisce una lunghezza misurata in pixel, in altre parole dei punti monocromatici di cui è composta un'immagine digitale e, quindi, dipendente solamente dalla sua proporzione e risoluzione.

È stata ideata una procedura che ha permesso di tradurre tale valore di ampiezza in millimetri, così da ottenere una corrispondenza con la misura reale. Per ogni campione è stata scattata una foto al microscopio del fessurimetro sovrapposto a una parte della fessura, o del campione, facilmente riconoscibile. Come si può osservare in figura 3.25, al momento della foto si è avuta cura di inquadrare le tacche corrispondenti ai millimetri. I numeri visibili in figura identificano una distanza pari a 5 mm.



Figura 3.25 Esempio foto di riferimento per la determinazione della relazione tra pixel e millimetri.

In questo modo è stato possibile trovare la relazione tra millimetri e i pixel contati dal software. Più precisamente si riesce a individuare quanti pixel sono necessari per raggiungere una lunghezza pari a 1 mm utilizzando uno strumento proprio del software in grado di contare il numero dei pixel

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

presenti nella linea che unisce due punti distinti dell'immagine. Trovata questa relazione, basta misurare una distanza sul panorama, raffigurante la fessura sulla stessa superficie della foto di riferimento, e applicare la formula alla base di questa corrispondenza:

$$\frac{Dp_{px}}{Dr_{px}} = \frac{Dp_{mm}}{Dr_{mm}} \rightarrow Dp_{mm} = Dr_{mm} * \frac{Dp_{px}}{Dr_{px}}$$

dove:

Dp_{mm} distanza tra due punti del panorama, misurata in millimetri

Dr_{mm} distanza tra due punti dell'immagine di riferimento, misurata in millimetri

Dp_{px} distanza tra due punti del panorama, misurata in pixel

Dr_{px} distanza tra due punti dell'immagine di riferimento, misurata in pixel

Questo sistema, però, presuppone che l'immagine di riferimento sia alla stessa scala del panorama. Sovrapponendo le due immagini e utilizzando gli aggregati o la fessura come riferimento (figura 3.26), ci si è accorti che questa condizione non è sempre verificata. Questo è dipeso dal fatto che piccole modifiche della messa a fuoco del microscopio causano proprio la variazione della distanza focale, provocando un cambiamento delle dimensioni effettive delle foto.

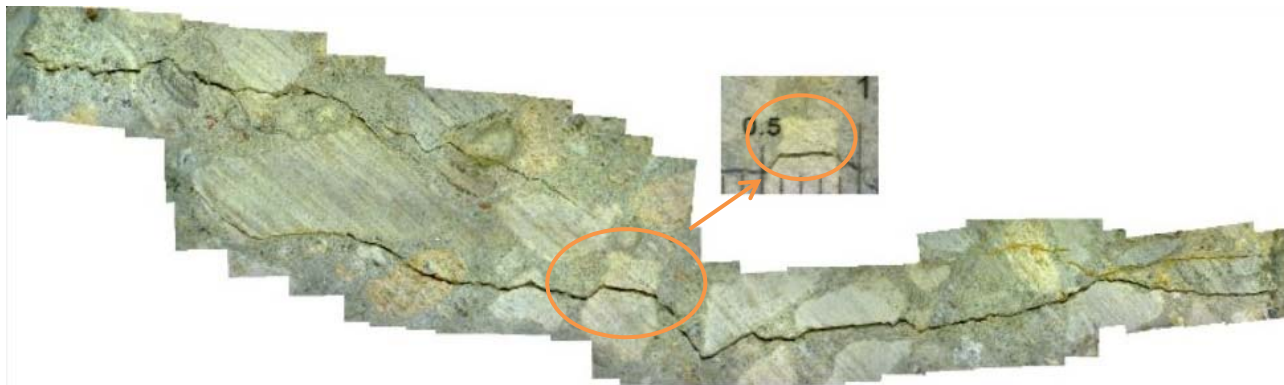


Figura 3.26 Utilizzo dell'aggregato evidenziato come punto di riferimento al momento della sovrapposizione.

Si è cercato, quindi, di calcolare un coefficiente K in grado di correggere tal errore e rendere i valori ricavati più affidabili. Per fare ciò, sono stati scelti due punti di riferimento facilmente riconoscibili all'interno del panorama e della foto di riferimento e ne sono state misurate le distanze, come mostrato in figura 3.27.

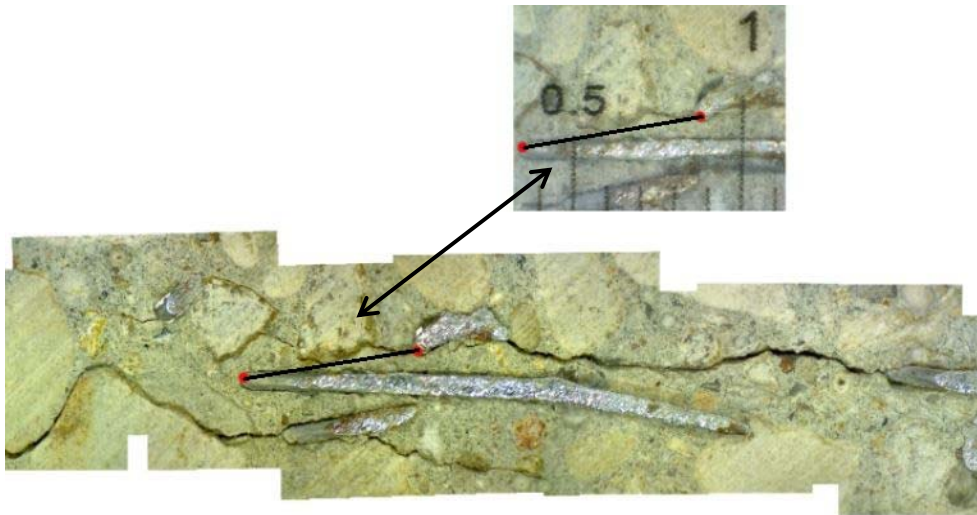


Figura 3.27 Misurazione distanza tra due punti di riferimento equivalenti tra il panorama e l'immagine di riferimento

Il coefficiente K è stato, quindi, calcolato come rapporto tra le due:

$$K = \frac{Dr}{Dp}$$

dove:

Dr distanza tra i due punti di riferimento, misurata sull'immagine di riferimento

Dp distanza tra i due punti di riferimento, misurata sul panorama

In questo modo, la relazione tra la misurazione in pixel e il valore reale in millimetri è stata modificata nella seguente:

$$Dp_{mm} = Dr_{mm} * \frac{Dp_{px}}{Dr_{px}} * K$$

Una volta determinata questa corrispondenza e calcolato il valore di K per ogni singolo panorama, tutti i valori ottenuti tramite la digitalizzazione delle fessure sono stati portati alla medesima scala. Le misurazioni in millimetri sono più affidabili e i valori confrontabili, nell'ordine di grandezza, con quelli ottenuti dalla misurazione mediante il fessurimetro.

Per la determinazione dell'ampiezza massima, sono state ripetute diverse misurazioni fino all'ottenimento del valore massimo. Questo sistema è più preciso di quello basato sull'utilizzo del fessurimetro, poiché permette di osservare globalmente la fessura e di sfruttare l'alta risoluzione del panorama.

3.6.2 Calcolo approssimato della fessura media e della sua area

L'idea di base di questa metodologia è di creare reticoli definiti e proporzionati al diametro dei campioni cilindrici, sui quali sono riportate cinque tacche equidistanti. I reticoli in questione sono due, rispettivamente per le fessure sulle superfici superiori, lunghe circa 7,5 cm, e per quelle sulle superfici inferiori, lunghe circa 15 cm, come mostrato in figura 3.28. L'uso di un reticolo con

dimensioni definite e sempre costanti ha permesso la diminuzione dell'aleatorietà della misurazione proposta in questa parte dello studio.

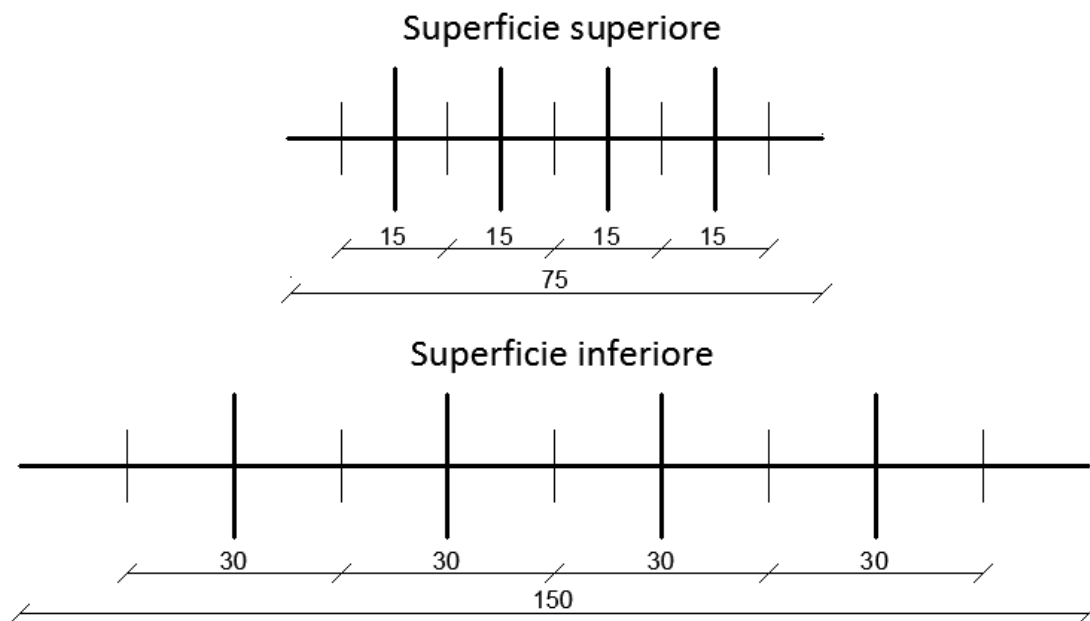


Figura 3.28 Reticoli sovrapposti alle fessure per la misurazione di cinque ampiezze a distanze definite e quotate in millimetri.

Utilizzando un sistema simile a quello spiegato nel paragrafo 3.6.1, il reticolo viene portato alla stessa scala del panorama sul quale verrà applicato. Una volta sovrapposto (figura 3.29), vengono misurate le ampiezze delle fessure sopra le quali passano le cinque tacche. Con lo stesso sistema spiegato nel paragrafo 3.6.1, le misurazioni in pixel vengono convertite in millimetri. In questo modo è stato possibile calcolare la fessura media.

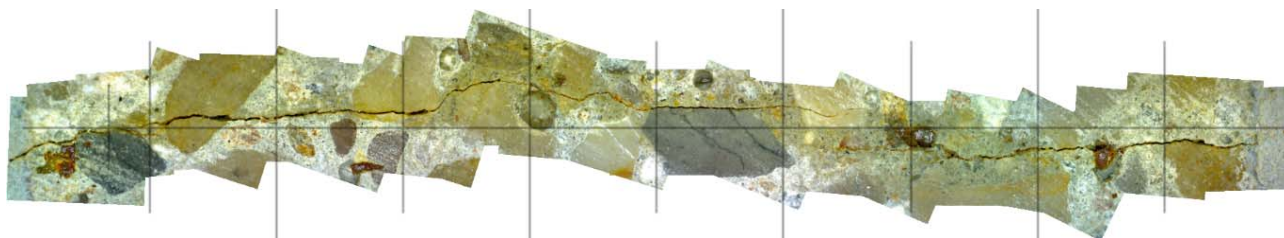


Figura 3.29 Sovrapposizione del reticolo sulla fessura.

Utilizzando le cinque ampiezze ricavate da questo sistema, è stato possibile calcolare approssimativamente l'area della fessura. Il reticolo, infatti, è composto da altre cinque tacche che suddividono la fessura in altrettante zone nelle cui mezzerie ricadono le cinque tacche usate in precedenza. Per le fessure della superficie inferiore ogni zona possiede una lunghezza pari a 3 cm, mentre per quelle della superficie superiore pari a 1,5 cm. Moltiplicando l'ampiezza misurata nella mezzeria di ogni zona per la rispettiva larghezza, si può ottenere un valore approssimato dell'area come somma delle superfici dei cinque rettangoli così descritti e dei quali è mostrato un esempio in figura 3.30. Tale area è espressa in mm².

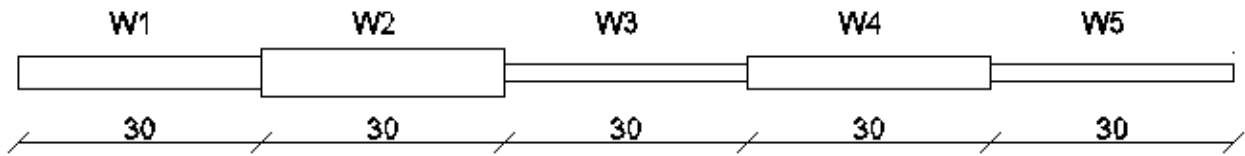


Figura 3.30 Calcolo approssimato dell'area come somma delle superfici di cinque rettangoli.

3.6.3 Calcolo approssimato dell'area, secondo metodo

Questa metodologia approntata per lo studio della fessura si basa sull'utilizzo di un software grafico che permette il conteggio automatico dei pixel rientranti in un determinato intervallo cromatico o più semplicemente aventi un determinato colore. Una volta composti i panorami, si nota facilmente come le fessure si presentino come un'area prettamente nera.

Prima di eseguire il conteggio, le foto sono state "pulite" eliminando le zone nere dovute a ombre o pori particolarmente grossi, così da non sovrastimare l'area misurata. Il numero di pixel neri così ottenuto, viene tabulato e confrontato al termine del periodo di cura con il valore calcolato con il nuovo panorama composto.

Nelle figure 3.31 e 3.32 sono rappresentate le fessure, prima e dopo la cura per immersione in acqua, della superficie superiore del campione 1-B fabbricato con l'impasto AM 0-7.

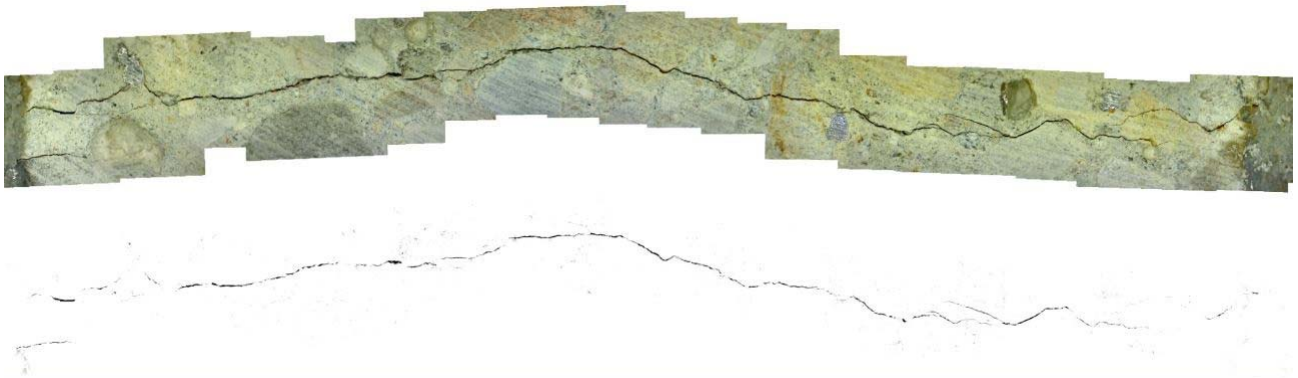


Figura 3.31 Fessura sulla superficie superiore del campione AM 0-7 1-B prima della cura (in alto), pixel neri evidenziati dopo il conteggio (in basso).

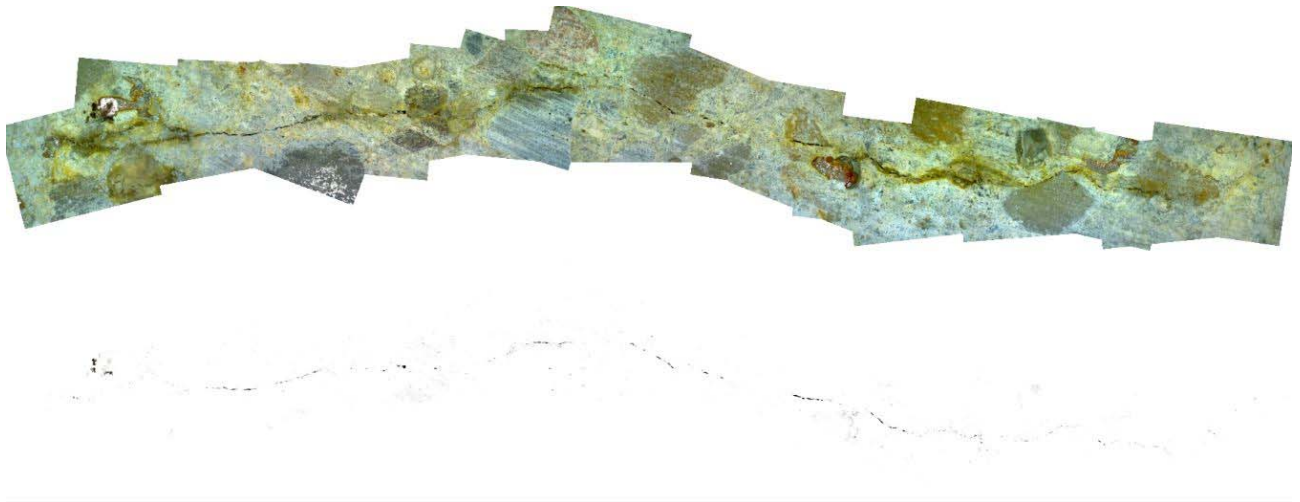


Figura 3.32 Fessura sulla superficie superiore del campione AM 0-7 1-B dopo la cura (in alto), pixel neri evidenziati dopo il conteggio (in basso).

Capitolo 4 – ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI

In questo capitolo vengono analizzati i dati relativi alle prove effettuate in questa ricerca. In particolare sono rappresentati solo i grafici ritenuti più rilevanti e che hanno permesso di trarre le conclusioni finali esposte nel capitolo 5.

4.1 Generale andamento del flusso

I grafici rappresentati in questo paragrafo mostrano un primo studio della variazione del flusso d'acqua prima e dopo la cura nei rispettivi ambienti. In entrambi gli assi vengono riportate le quantità d'acqua rilevate al termine della prova di permeabilità e misurate in millilitri. La bisettrice rappresenta, invece, il flusso d'acqua iniziale e permette la facile individuazione dei campioni per i quali il flusso è diminuito e quelli per i quali è aumentato.

Con l'analisi di questi primi dati si vuole fornire una preliminare valutazione del fenomeno. Questo tipo di studio, sebbene permetta una prima serie di osservazioni sulla quantità di acqua in grado di attraversare i campioni, non consente di valutare pienamente l'efficacia del self-healing. Inoltre è possibile dare uno sguardo generale sulla variazione dei flussi relativi ai singoli ambienti di cura.

I grafici sono, idealmente, divisi in due gruppi, il primo riguardante gli ambienti nei quali i campioni sono stati a contatto con acqua liquida e il secondo riguardante quelli nei quali i campioni sono stati esposti ad aria con differenti percentuali di umidità relativa. Per rendere più chiara l'individuazione dei dati, vengono mostrati i soli campioni che hanno manifestato un flusso iniziale inferiore a 1500 ml. Ciò è stato ritenuto accettabile poiché solo un numero esiguo di campioni è stato caratterizzato da un flusso maggiore di tale entità.

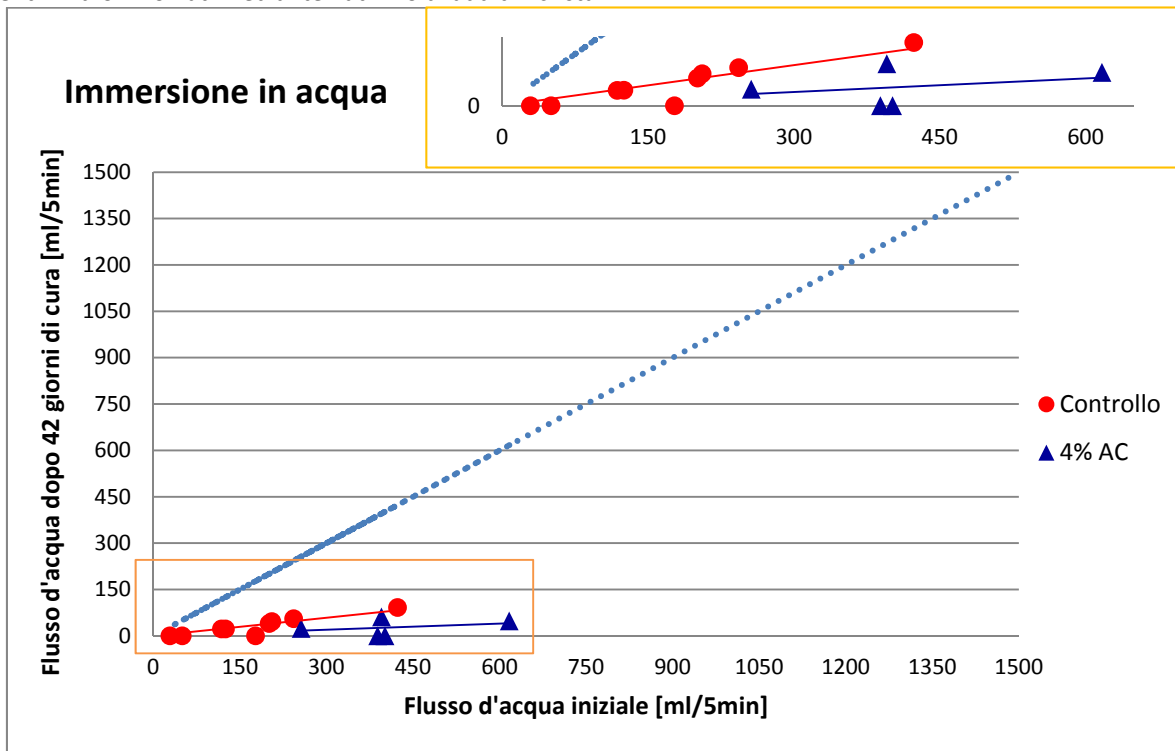


Figura 4.1 Confronto tra flusso d'acqua iniziale e finale. Ambiente di cura: immersione in acqua.

Il grafico in figura 4.1 rappresenta la variazione del flusso per i campioni immersi in acqua per 42 giorni. La sua diminuzione risulta evidente per tutti i provini esaminati, in particolare non si nota grande differenza tra i campioni contenenti l'additivo cristallino e quelli di controllo. Le specie con additivo, però, hanno mostrato una tendenza stabile nella diminuzione del flusso. È possibile osservare, infatti, che, nonostante il flusso iniziale sia maggiore di quello della maggior parte dei campioni di controllo, quello finale risulti sempre quasi nullo.

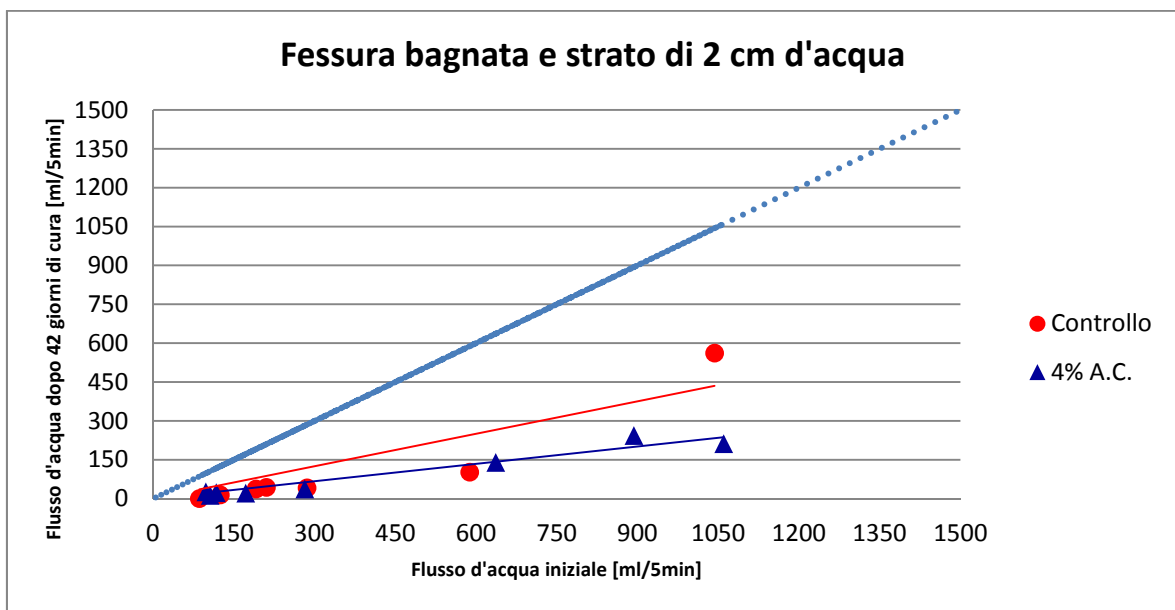


Figura 4.2 Confronto tra flusso d'acqua iniziale e finale. Ambiente di cura: fessura bagnata e strato di 2 cm d'acqua sulla superficie superiore.

In figura 4.2 si nota come anche per i campioni per i quali la fessura è stata sempre mantenuta bagnata, la riduzione del flusso risulti essere evidente per entrambe le tipologie. I campioni con additivo presentano una diminuzione del flusso maggiore, come si può facilmente dedurre dalle linee di tendenza rappresentate in figura. Sono pochi, comunque, i provini che mostrano un completo azzeramento del flusso.

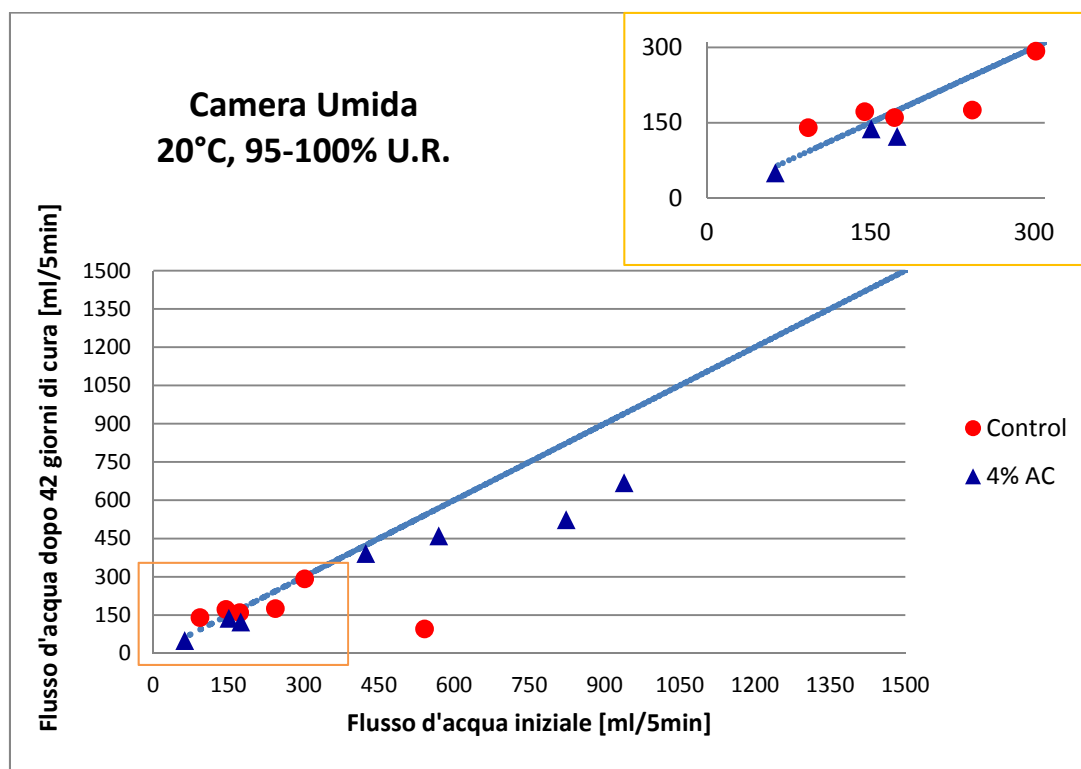


Figura 4.3 Confronto tra flusso d'acqua iniziale e finale. Ambiente di cura: camera umida.

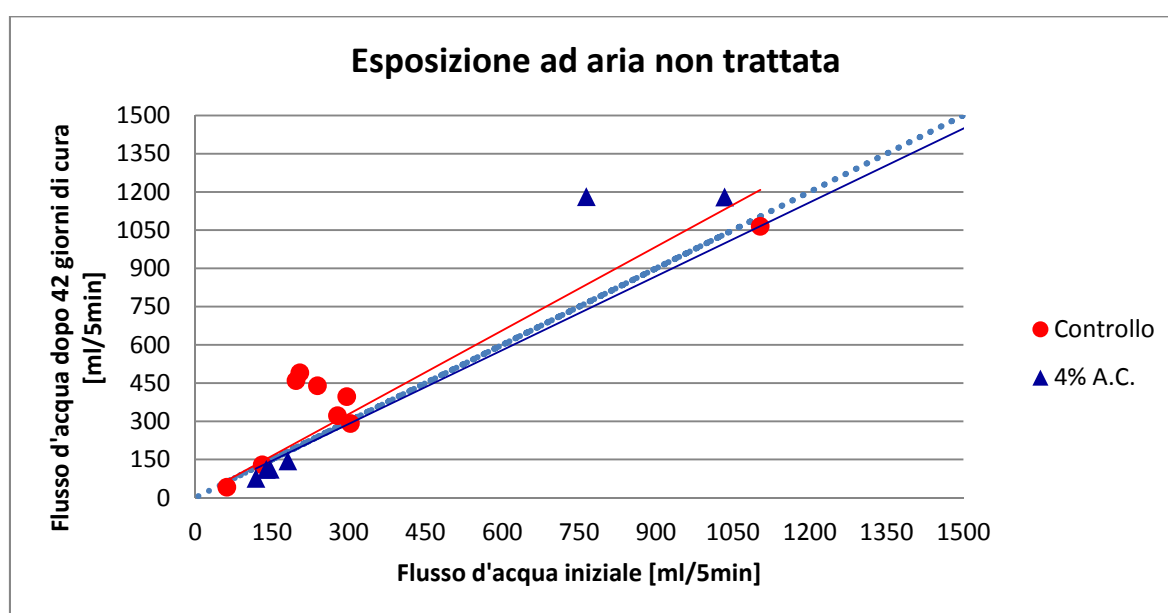


Figura 4.4 Confronto tra flusso d'acqua iniziale e finale. Ambiente di cura: esposizione all'aria non trattata del laboratorio.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

I grafici in figura 4.3 e 4.4 mostrano rispettivamente i campioni immagazzinati in camera umida e quelli esposti all'aria non trattata del laboratorio. In entrambi i casi, la riduzione del flusso è stata moderata soprattutto se paragonata a quella mostrata dagli altri campioni. In alcuni casi, soprattutto per i provini esposti all'aria, è stato osservato un aumento del flusso. La possibile spiegazione di tale fenomeno verrà esplicitata in seguito, dopo un'analisi più ampia dei dati ottenuti. Il comportamento dei diversi tipi di campioni non è stato molto diverso e non permette di affermare con certezza quale dei due abbia manifestato una maggiore diminuzione.

4.2 Healing Rate

Per studiare meglio gli effetti del self-healing sulla permeabilità sono stati utilizzati indici in grado di mostrare la percentuale di guarigione dei campioni. Tali indici sono della forma:

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

Dove:

X_{finale} è il valore della parametro analizzato dopo la cura di 42 giorni

$X_{iniziale}$ è il valore della parametro analizzato prima del periodo di cura

I parametri studiati verranno illustrati di volta in volta nei rispettivi paragrafi.

4.3 Analisi delle metodologie di misurazione della fessura

Durante la valutazione della metodologia migliore per studiare la permeabilità degli elementi fessurati, si è deciso di studiare parallelamente quale sistema consenta di avere un'informazione più affidabile circa l'apertura di fessura. Come mostrato nel capitolo 3, sono stati improntati cinque diversi metodi, di seguito codificati come:

- FM misurazione standard mediante sovrapposizione di un fessurimetro sopra la fessura, determinazione dell'ampiezza massima in millimetri;
- W_{max} misurazione, mediante software di grafica, dell'ampiezza della fessura, determinazione dell'ampiezza massima in millimetri;
- W_{media} misurazione, mediante software di grafica, di cinque ampiezze a distanza definita, determinazione dell'ampiezza media in millimetri;
- $Area_{mm}$ calcolo, mediante software di grafica, dell'area approssimata utilizzando le cinque misurazioni effettuate a distanza definita, determinazione area della fessura in millimetri quadrati;
- $Area_{px}$ calcolo, mediante software di grafica, del numero dei pixel neri contenuti nel panorama ad alta risoluzione della fessura, determinazione area della fessura in pixel.

Una volta ottenute tutte le misurazioni, si è proceduto con il mettere in relazione l'apertura di fessura misurata con il flusso d'acqua dei campioni. L'obiettivo è stato, quindi, quello di valutare il metodo più affidabile in grado di fornire le correlazioni migliori, così da poter avere un'idea del passaggio d'acqua che una determinata fessura possa permettere. Per fare ciò, sono stati utilizzati grafici a dispersione nei quali l'ascissa ha rappresentato la quantità misurata, riferita alla fessura, mentre sull'ordinata sono stati riportati i flussi d'acqua.

I grafici sono stati suddivisi in due gruppi per poter valutare separatamente le condizioni iniziali e quelle successive alla cura. Questo tipo di distinzione è stata ritenuta attendibile in quanto questa parte della ricerca ha solo cercato di relazionare l'apertura di fessura con il flusso senza, quindi, concentrarsi sull'avvenuta cura o no dei campioni.

Ogni cilindro presenta due superfici circolari sulle quali è presente una fessura. Ci si è trovati, quindi, a dover scegliere quale dei due valori confrontare con il flusso. È stato deciso, infine, di dividere i due gruppi principali di grafici in altri tre in ognuno dei quali è stato scelto rispettivamente il valore massimo, il minimo o il medio tra le dimensioni delle due fessure. In questo modo è stato possibile anche osservare se il flusso d'acqua all'interno di un cilindro fessurato dipenda dalla fessura massima o dalla minima.

Osservati gli andamenti delle curve e valutati gli R quadrati, è stata scelta la metodologia con i valori più alti e, quindi, utilizzata come base per le successive relazioni. In questo tipo di ricerca l'aspettativa più ottimistica è quella dell'ottenimento di R quadrati che vanno da 0,80 a 0,90, che verranno ritenuti sufficienti per la scelta della metodologia che più permetta di fornire valori attendibili.

4.3.1 Confronto flusso e metodologia di misurazione

In questo paragrafo vengono mostrati due grafici per ogni metodologia di misurazione studiata. La coppia di grafici scelta mostrerà rispettivamente la relazione con R quadrato più alta e quella con R quadrato medio, entrambe ottenute con la tipologia di misurazione presa in analisi. Verranno, inoltre, fatte considerazioni generali sulla disposizione dei dati e su come la curva si approcci ad essi. Con ciò è possibile ottenere una visione generale che permetta di scegliere la metodologia più idonea.

Nelle figura 4.5 e 4.6 viene analizzata la metodologia codificata come Areamm che si basa sulla definizione di un'area approssimata come somma di cinque rettangoli, come spiegato nel paragrafo 3.6.2.

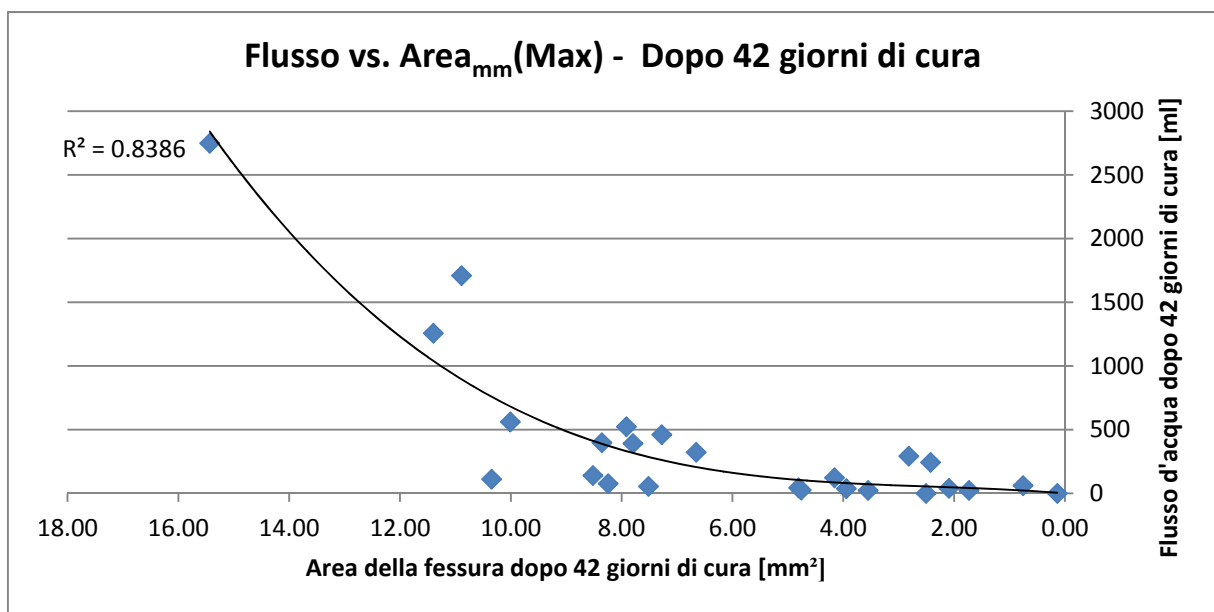


Figura 4.5 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura, massima tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.

La relazione migliore ottenuta, mostrata in figura 4.5, è stata ottenuta dal confronto tra i dati a 42 giorni del flusso e dell'area massima tra le due del campione. I dati mostrano una disposizione particolarmente regolare e la linea di tendenza ottenuta si adatta bene ai valori.

Messa da parte la relazione con l'R quadrato più alto, in figura 4.6 viene mostrato un caso tipo di relazione per questa metodologia. Viene sempre rilevata grande dispersione dei dati e le linee di tendenza calcolate hanno mostrato livelli di approssimazione elevati. In questo esempio, superato il valore di area pari a 15 mm², il numero esiguo di dati non permette di definire un andamento chiaro.

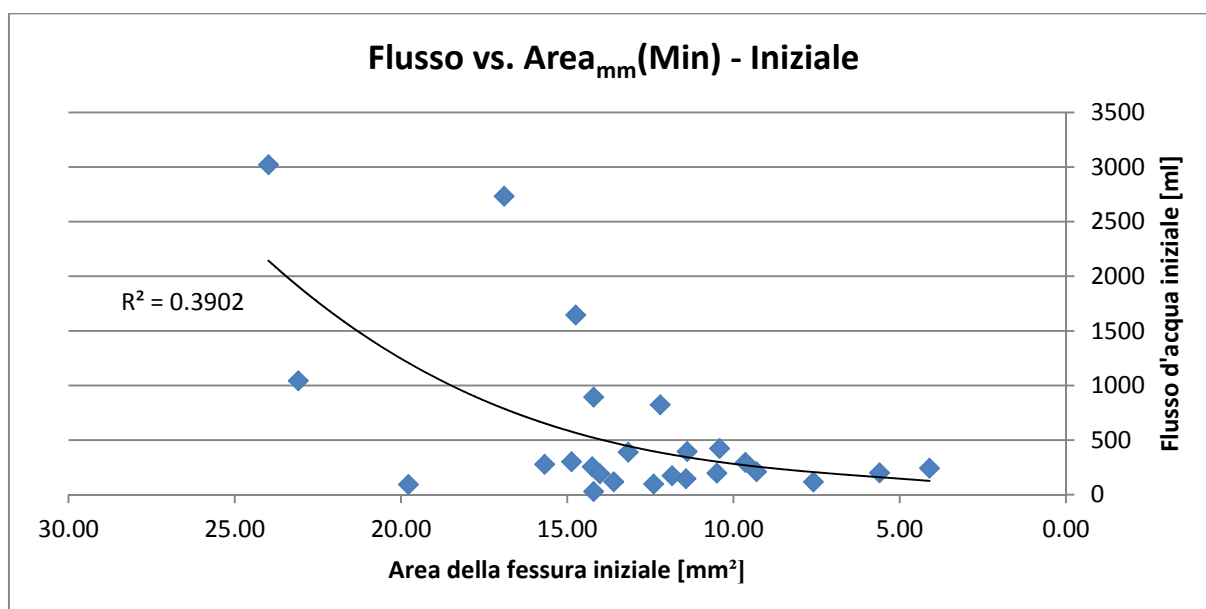


Figura 4.6 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura, minima tra le due del campione, in condizioni iniziali.

I grafici delle figure 4.7 e 4.8 mostrano le relazioni riguardanti la misurazione dell'ampiezza massima della fessura, come spiegato nel paragrafo 3.6.1.

In figura 4.7 viene rappresentata la relazione con R quadrato maggiore. Il valore si attesta a 0,60 e i dati si concentrano principalmente nella zona evidenziata in figura. Per ampiezze di fessura maggiori di 0,2 mm la dispersione aumenta rendendo meno visibile una relazione tra le due quantità.

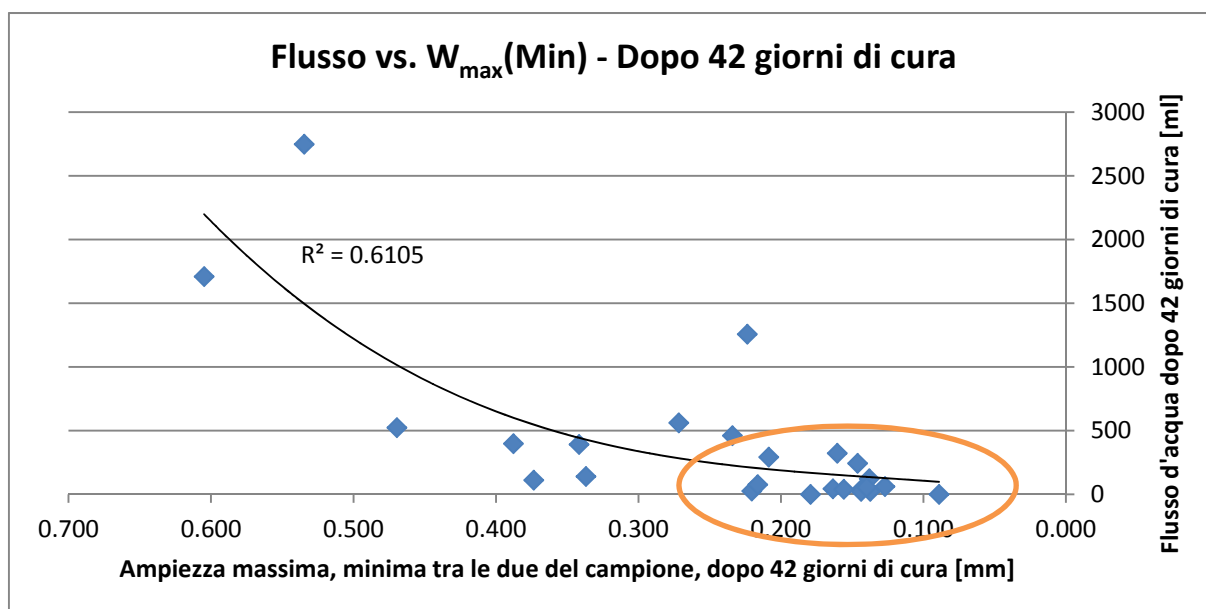


Figura 4.7 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza massima della fessura, minima tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.

Le altre relazioni studiate si presentano analogamente a quella rappresentata in figura 4.8. La curva polinomiale calcolata è poco rappresentativa del problema. Anche in questo caso, la maggior parte dei dati si concentra in una zona, evidenziata in figura, mentre la restante parte si mostra dispersa e in numero esiguo.

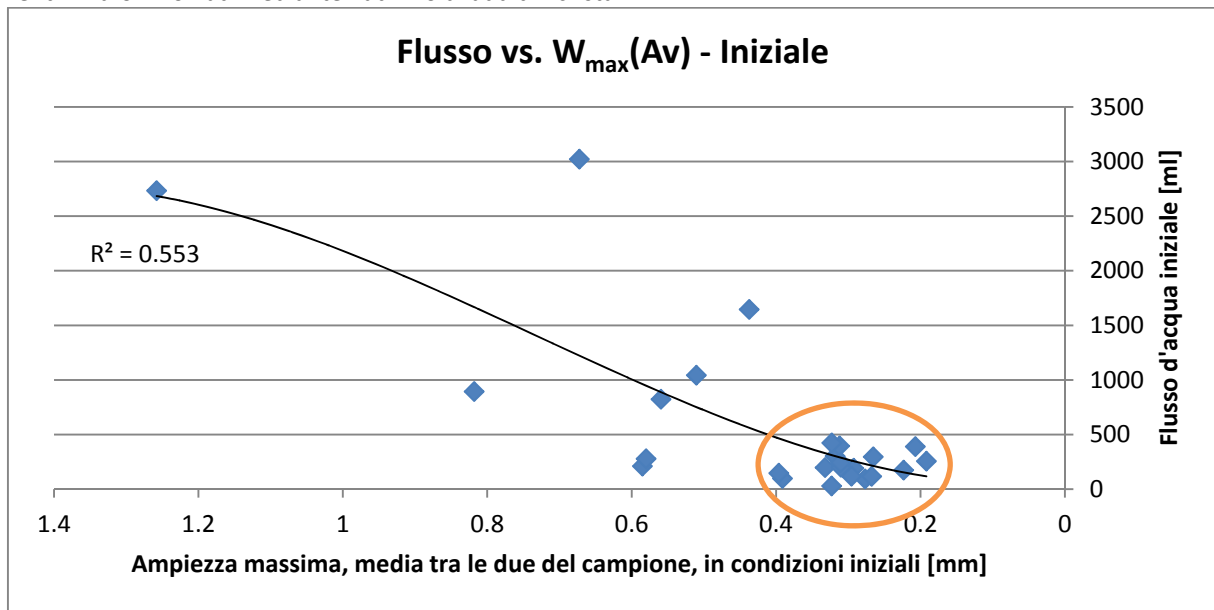


Figura 4.8 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza massima della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali.

Nelle figure 4.9 e 4.10 sono rappresentati i grafici riguardanti la metodologia di misurazione dell'ampiezza media, come spiegato nel paragrafo 3.6.2.

Il grafico che ha dato una relazione con R quadrato più vicino a 1 è stato quello mostrato in figura 4.9 dove è stato ottenuto un valore pari a circa 0,84. La curva ottenuta è la stessa mostrata in figura 4.5, come sono gli stessi il valore di R quadrato e la disposizione generale dei dati. Il medesimo andamento delle due curve è stato rilevato solo in questo particolare caso e dovuto principalmente all'intrinseca proporzione tra le due metodologie di misurazione stesse. Non viene osservata un'eccessiva dispersione dei dati e l'andamento è intuibile anche solo osservando generalmente il grafico.

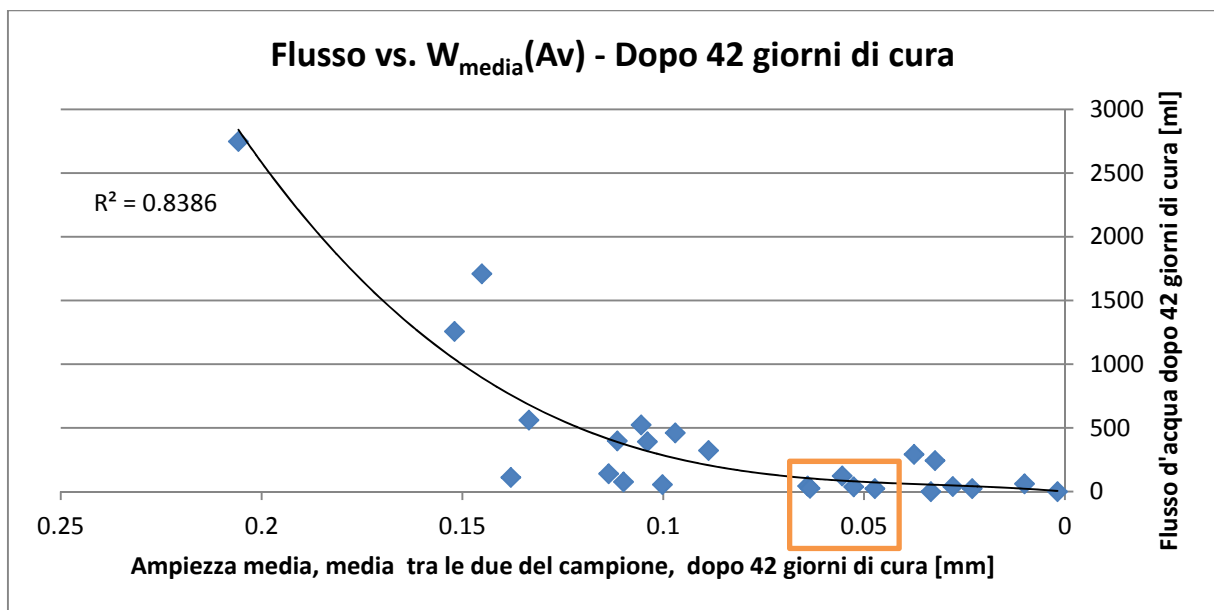


Figura 4.9 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.

A differenza delle altre metodologie studiate, questa è quella che presenta i grafici che descrivono meglio gli andamenti dei dati. Più precisamente la media degli R quadrati calcolati per le curve di tendenza si attesta intorno allo 0,70. In figura 4.10 viene mostrato un altro grafico rappresentativo di tale metodo nel quale i dati risultano concentrati nella parte sinistra del quadrante. Questo è dovuto alla natura stessa della scelta del valore massimo tra le due fessure dello stesso campione. In nessun caso, infatti, sono stati rilevati valori massimi inferiori a 0,08 mm. L'andamento della cubica è, comunque, regolare e la dispersione dei dati non eccessiva.

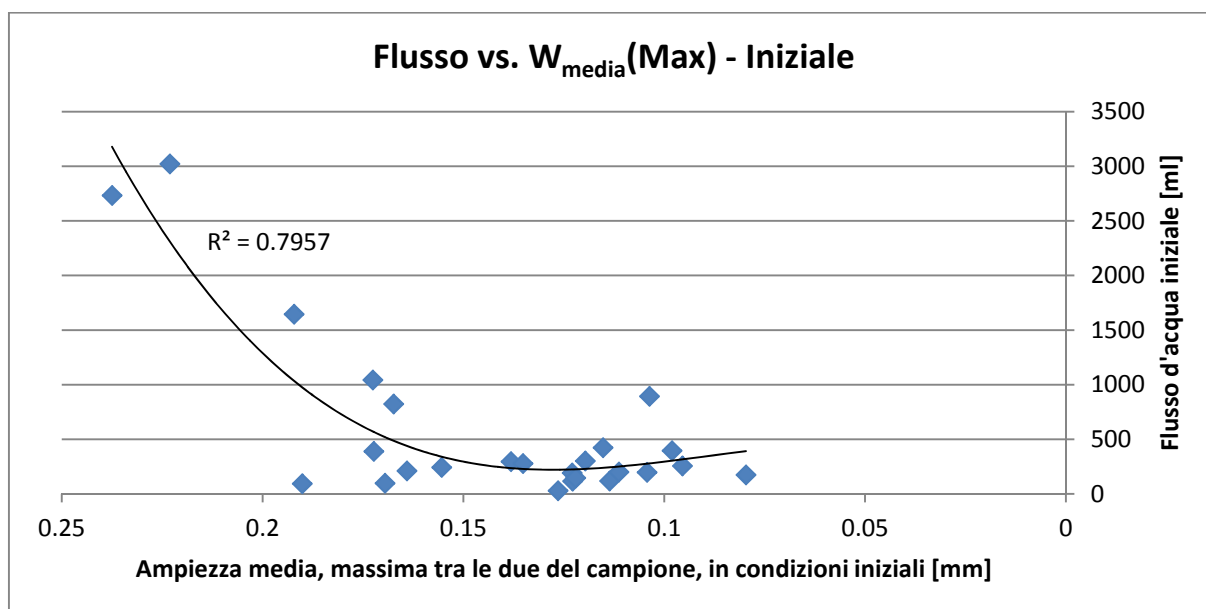


Figura 4.10 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, massima tra le due del campione, in condizioni iniziali.

Nelle figura 4.11 e 4.12 vengono mostrati i grafici concernenti la metodologia della misurazione dell'area intesa come somma dei pixel neri presenti nel panorama composto dalle foto ad alta risoluzione scattate con microscopio digitale, come spiegato nel paragrafo 3.6.3.

Questa metodologia è quella che ha dato meno corrispondenza con il flusso d'acqua misurato durante la prova di permeabilità. In figura 4.11 viene mostrato il caso che ha ottenuto il valore di R quadrato maggiore e pari a circa 0,60. Le altre relazioni calcolate si sono mostrate molto meno fedeli alla dispersa collocazione dei dati. In questo caso, comunque, la dispersione non è eccessiva e si può osservare solo una volta superata un'area pari a 2000 pixel.

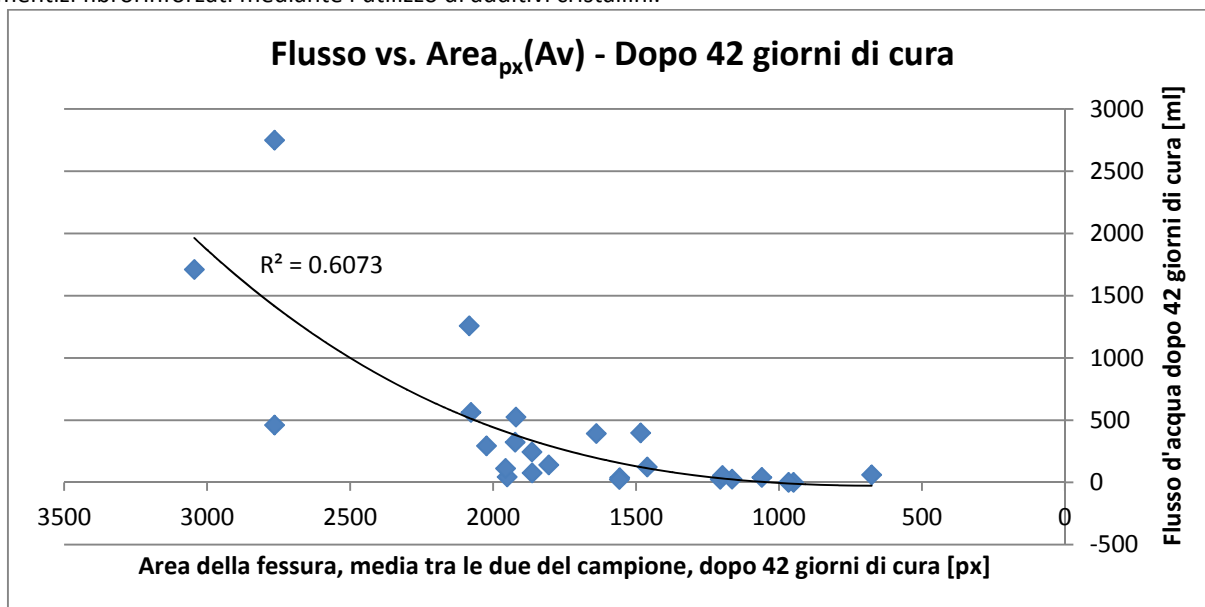


Figura 4.11 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura, media tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.

Questo sistema di misurazione delle fessure è stato il più impreciso poiché, in tutti i casi studiati, la dispersione dei dati è stata eccessiva e le relazioni trovate presentano approssimazioni elevate e poco affidabili. L'R quadrato medio calcolato sulle curve di tendenza è pari a 0,25 e lo scarto varia da 0,09 a 0,44. In figura 4.12 viene illustrato il caso tipo in cui la dispersione dei dati non permette di definire una relazione tra la fessura e il flusso d'acqua.

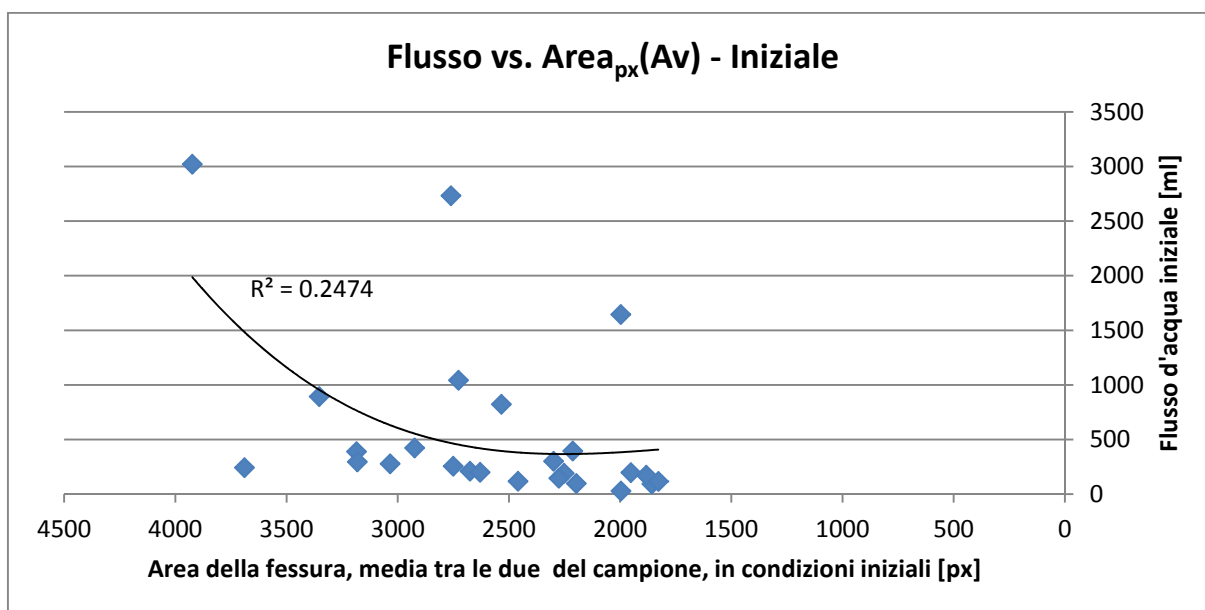


Figura 4.12 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali.

Infine, viene proposta la metodologia di misurazione utilizzata normalmente per la definizione dell'ampiezza massima della fessura e utilizzata di solito al momento della prefessurazione. Il grafico in figura 4.13 propone la stessa relazione mostrata in precedenza per gli altri metodi.

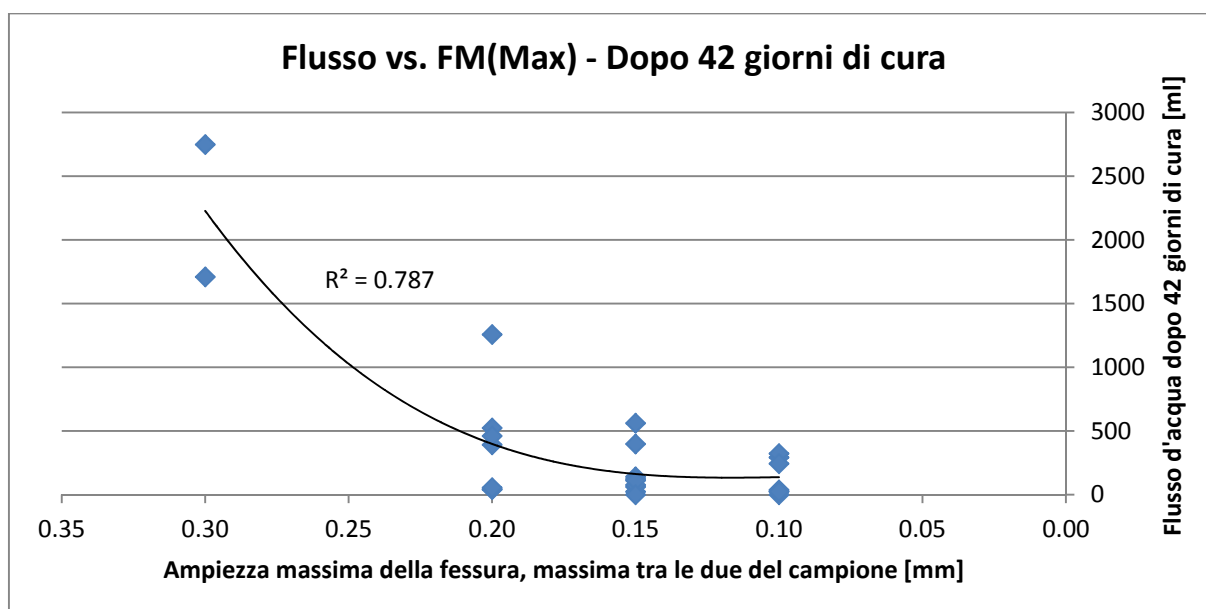


Figura 4.13 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza massima della fessura, massima tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura.

Il fessurimetro utilizzato durante la misurazione permette di osservare delle ampiezze definite. In particolare i valori possibili sono 0,076 mm, 0,1 mm, 0,15 mm, 0,20 mm. Superata l'ultima, le ampiezze misurabili crescono con incremento pari a 0,1 mm. Questo fa sì che i dati si dividano in gruppi che identificano campioni con la stessa ampiezza massima di fessura e spiega la disposizione dei valori su linee verticali. Le relazioni ottenute, comunque, hanno una buona approssimazione.

Riassumendo, avendo proposto e osservato le relazioni e le disposizioni dei dati, si può affermare che, in prima analisi, la misurazione dell'ampiezza media tramite cinque valori presi a distanza definita, sia il sistema più affidabile e che offre una buona approssimazione per lo studio combinato dell'evoluzione della fessura e del flusso. Il calcolo dell'area mediante il conteggio dei pixel neri contenuti all'interno dei panorami ad alta risoluzione si è rivelato il metodo meno preciso.

Nei seguenti paragrafi verranno fatte altre considerazioni che confrontano le metodologie, arrivando in fine a definire la migliore.

4.3.2 Rapporto valori finali su iniziali: confronto tra variazione del flusso e variazione della fessura

Sempre per scegliere la metodologia migliore, si è provato a confrontare il rapporto tra i valori iniziali e finali del flusso con quello delle quantità riferite alle fessure. Nonostante la presenza di valori maggiori di 1, indicanti un aumento rispettivamente del flusso o della quantità analizzata per la fessura, la maggior parte dei campioni ha registrato un valore che va da 0,0 a 0,8.

L'idea proposta in prima analisi è stata quella di pensare ai due rapporti come corrispondenti linearmente. Si è cercato di osservare se fosse possibile che a una determinata percentuale di chiusura della fessura potesse corrispondere una determinata percentuale di riduzione del flusso. La linea di tendenza calcolata, quindi, è stata una retta cui è stato imposto di passare per l'origine

degli assi poiché a un flusso nullo si vuole far corrispondere una fessura chiusa. Nel grafico, inoltre, viene mostrata la bisettrice del quadrante così da rendere facilmente osservabile la possibile somiglianza tra le due rette.

In figura 4.14 viene presentata la relazione con l'ampiezza massima. Si può osservare che la maggior parte dei dati sono disposti al di sotto della bisettrice, mentre la linea di tendenza possiede un coefficiente angolare molto vicino a 1. Anche visivamente si nota un andamento somigliante a quello ideale.

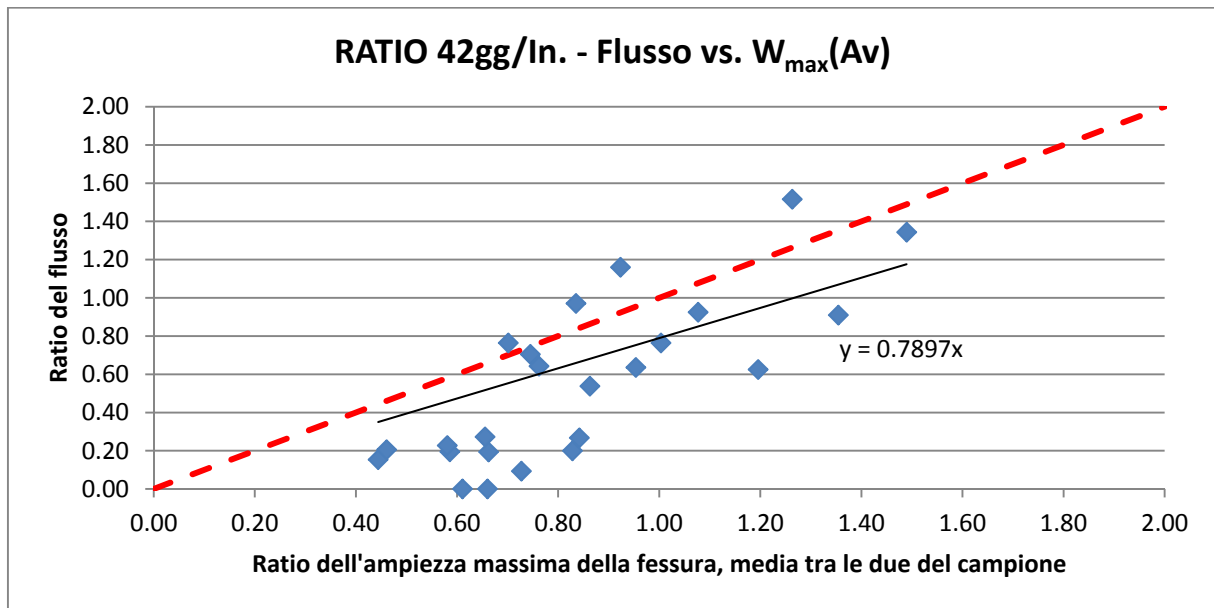


Figura 4.14 Relazione tra i ratio del flusso e dell'ampiezza massima della fessura, media tra le due del campione.

Nel caso dell'area misurata in mm², la differenza è molto più evidente. Come mostrato in figura 4.15, l'equazione della retta ha un coefficiente angolare quasi doppio rispetto quello della bisettrice. Generalmente si può, comunque, osservare che la maggior parte dei dati sono disposti in zone prossime alla bisettrice stessa. La dispersione dei dati relativi ai campioni che hanno mostrato un aumento del flusso finale sembra incidere molto sull'andamento della linea stessa. Misurando l'area, infatti, sembra che anche a valori bassi di quest'ultima il flusso possa resta elevato.

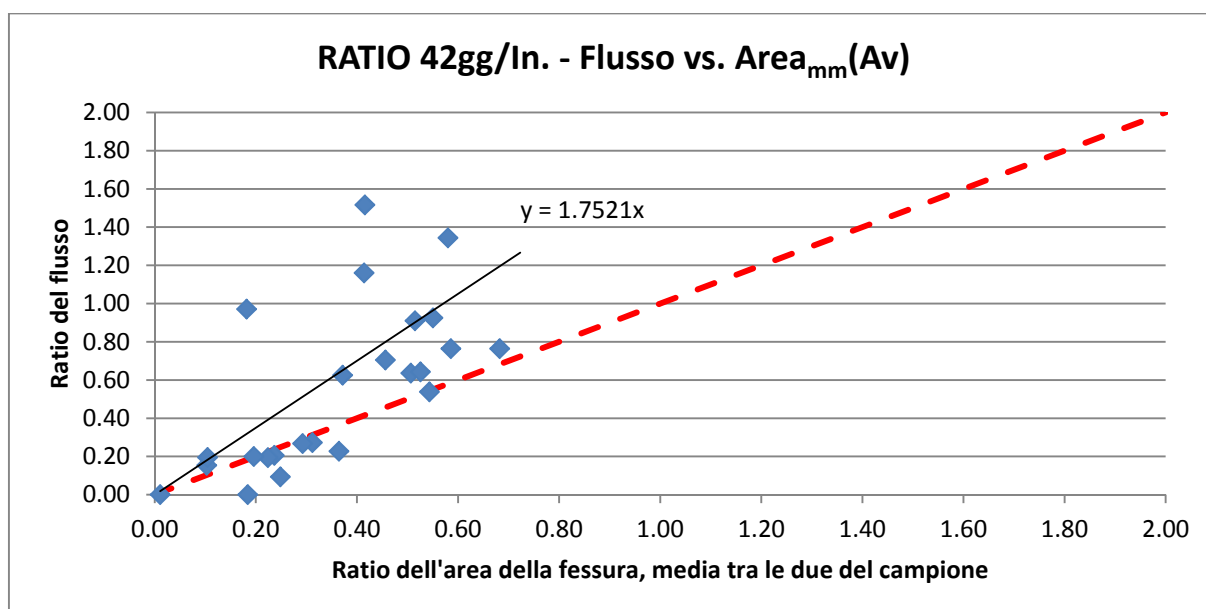


Figura 4.15 Relazione tra i ratio del flusso e dell'area in millimetri della fessura, media tra le due del campione.

Un buon risultato è stato ottenuto con la metodologia della fessura media (W_{media}) mostrata in figura 4.16. Analizzando l'equazione della retta, però, si può notare come il coefficiente angolare sia quasi pari a 1.

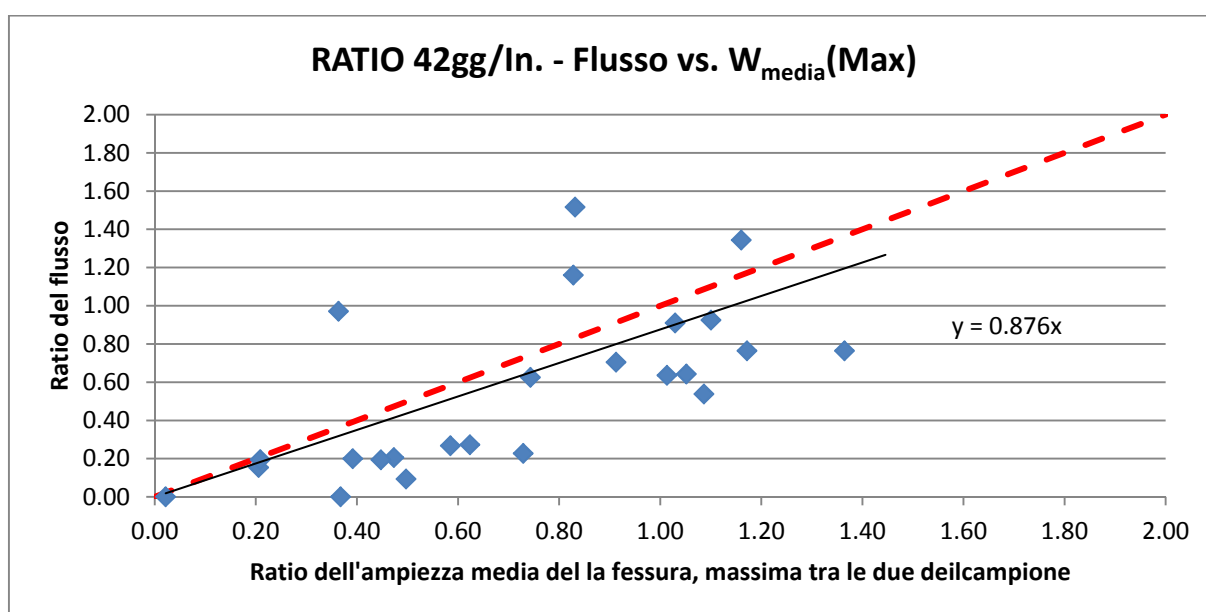


Figura 4.16 Relazione tra i ratio del flusso e dell'ampiezza media della fessura, massima tra le due del campione.

Infine, viene rappresentato in figura 4.17 il grafico che mette in relazione i ratio del flusso e dell'area misurata in pixel. Nonostante l'evidente dispersione dei dati, la linea di tendenza calcolata risulta essere approssimabile alla bisettrice del quadrante, mostrando quindi l'andamento più vicino a quanto ipotizzato.

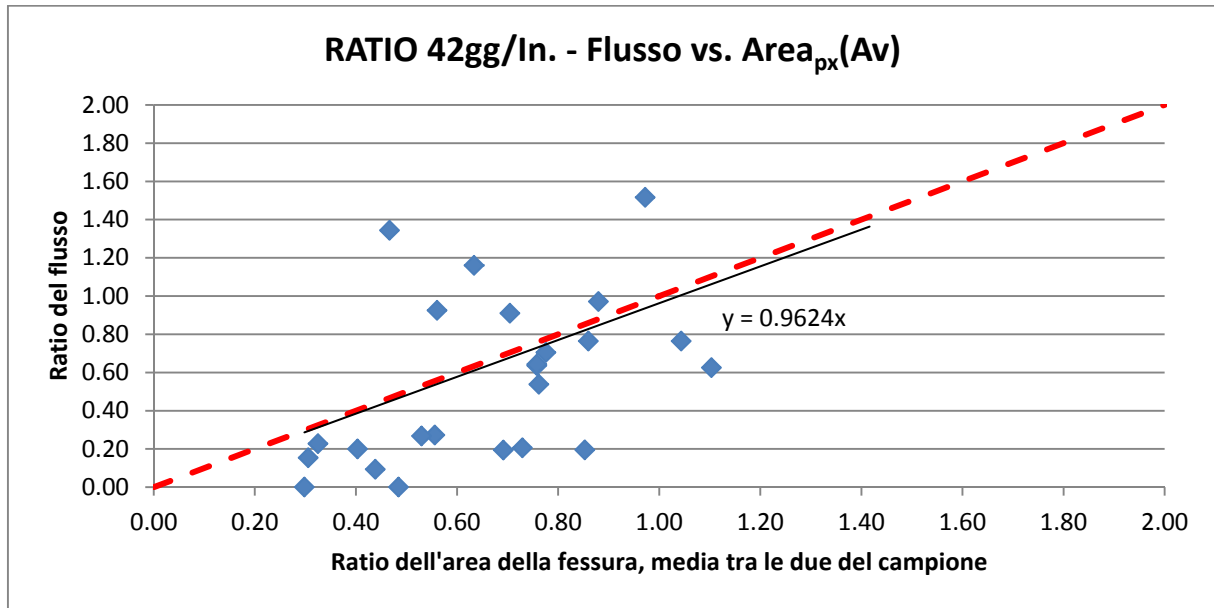


Figura 4.17 Relazione tra i ratio del flusso e dell'area in pixel della fessura, media tra le due del campione.

Le misurazioni della fessura media e dell'area in pixel hanno permesso di ottenere le correlazioni più affidabili.

4.3.3 Influenza dimensione superficie superiore sulla variazione del flusso

Un interessante modo per valutare le diverse metodologie è stato quello studiare i dati riguardanti le sole fessure poste nella superficie superiore. L'idea si basa sul fatto che, essendo la prima fessura che subisce l'attraversamento del flusso, possa limitarlo o condizionarlo in modo più incisivo rispetto quella presente sulla superficie inferiore che ha il solo compito di permettere all'acqua di fuoriuscire dal campione.

In realtà i grafici ottenuti non hanno mostrato nessuna relazione particolarmente evidente. L'esempio mostrato in figura 4.18 mostra un grafico tipo ottenuto per questo tipo di studio.

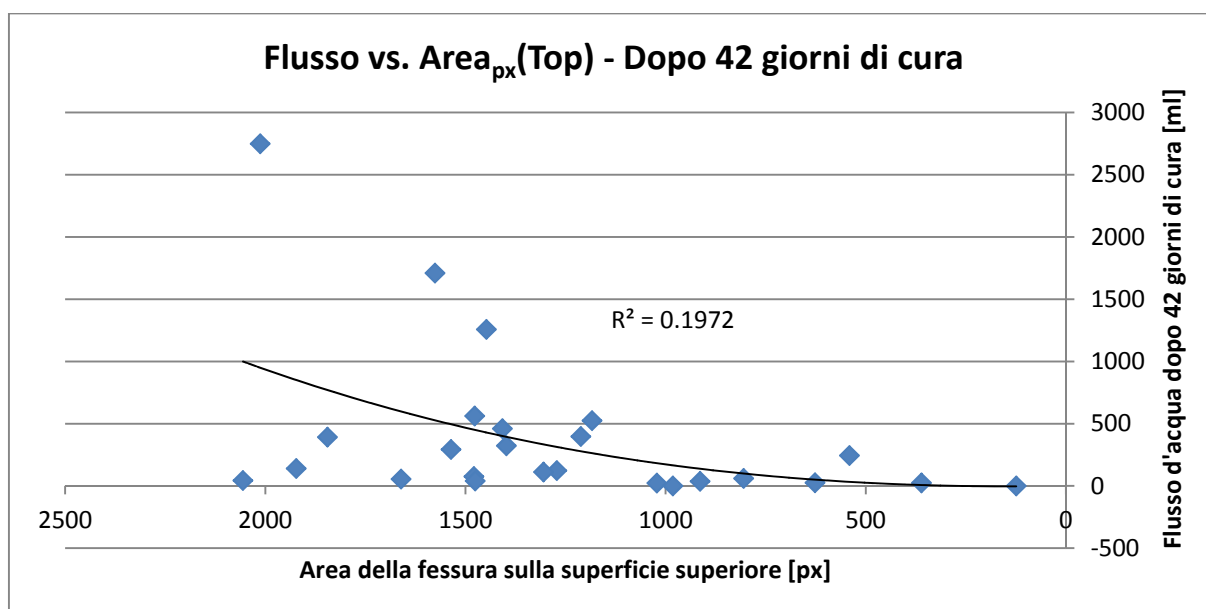


Figura 4.18 Relazione tra il flusso d'acqua e l'area della fessura sulla superficie del campione dopo 42 giorni di cura.

I dati risultano sempre molto dispersi e le relazioni ottenute sono sempre poco affidabili. L'unico caso in cui si è potuto osservare qualcosa è mostrato in figura 4.19, dove una fortuita disposizione di valori isolati ha permesso il calcolo di una linea di tendenza con una buona approssimazione. Si può affermare ciò osservando la disposizione dei valori nel grafico proposto. Si ha, infatti, una concentrazione elevata di dati nell'intervallo che va dall'ampiezza nulla a una pari a 0,4 mm, mentre alcuni valori molto dispersi, evidenziati in figura. Procedendo con l'esclusione di tali dati è stato notato un drastico dimezzamento dell'R quadrato.

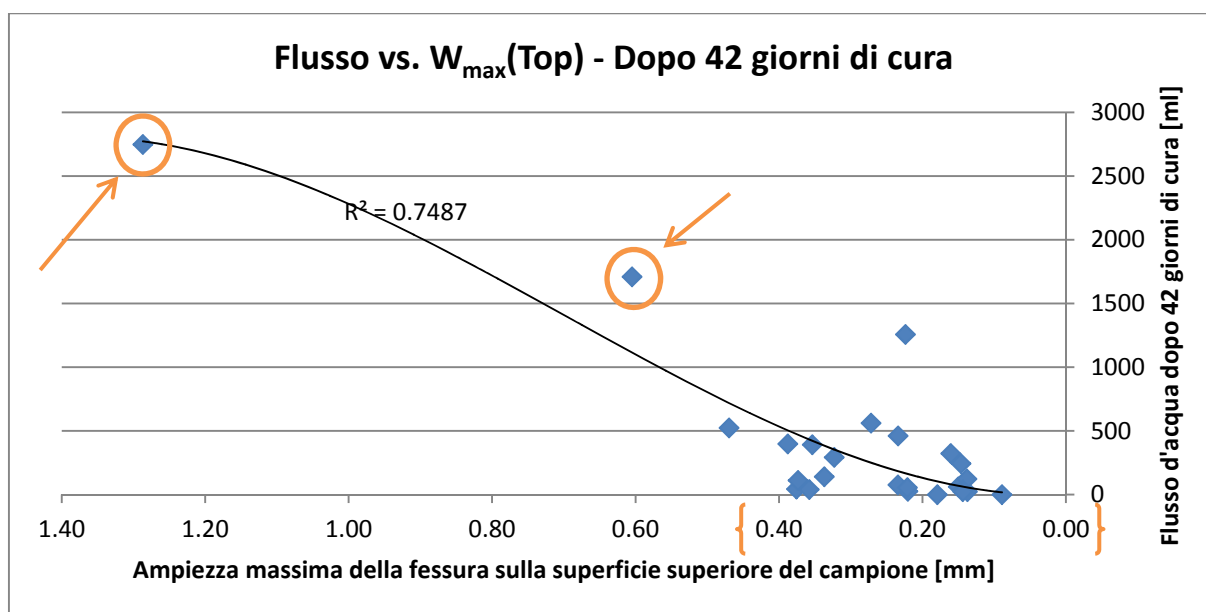


Figura 4.19 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza massima della fessura sulla superficie del campione dopo 42 giorni di cura.

Nel grafico mostrato in figura 4.20, infine, viene mostrata un'altra relazione tra il ratio del flusso e della fessura media misurata mediante la metodologia Wmedia. Utilizzando la sola superficie superiore, la retta calcolata si avvicina molto alla bisettrice del quadrante, arrivando, questa volta,

quasi a sovrapporsi. La nuova conferma di tale relazione non fa che rafforzare l'ipotesi secondo la quale questa metodologia sia la più indicata per questo tipo di studio.

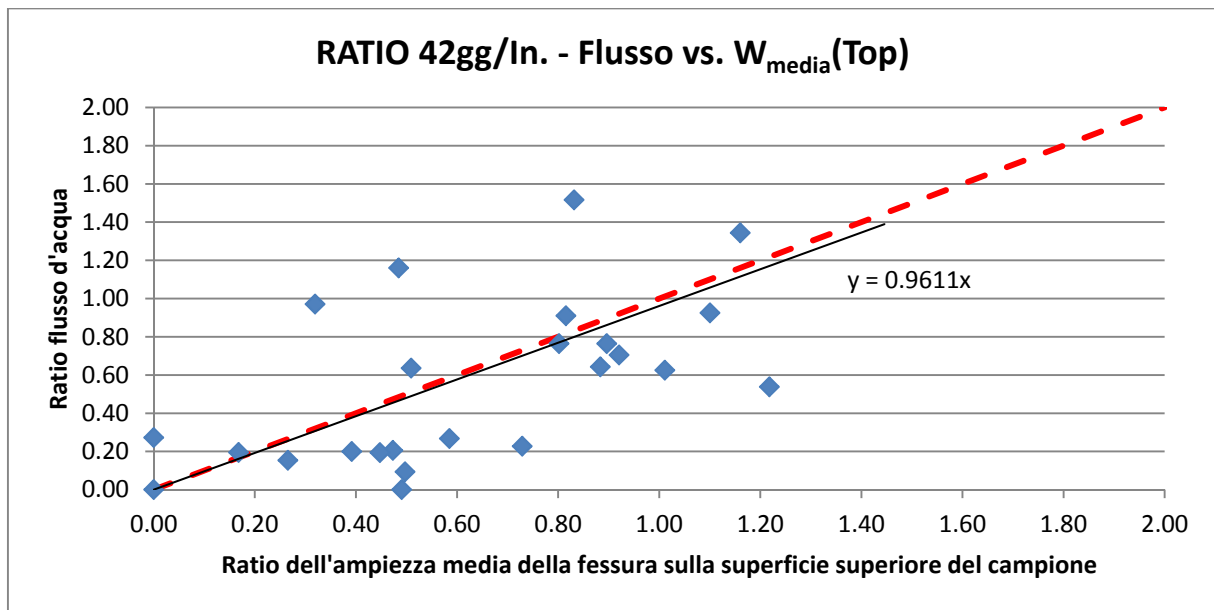


Figura 4.20 Relazione tra i ratio del flusso e dell'ampiezza media della fessura sulla superficie superiore del campione.

4.3.4 Metodologia scelta, studio separato dei campioni di controllo e con additivo

I numerosi grafici ottenuti permettono di osservare e definire un grado di affidabilità delle metodologie utilizzate in questa ricerca. In particolare è stato rilevato come la misurazione dei pixel neri ($Area_{px}$) sia quella che fornisce la peggiore correlazione con il flusso. Una possibile spiegazione di questo fatto è che spesso nelle parti della fessura in cui l'aggregato si spezza, la rottura non avviene perpendicolare al piano e assume un'inclinazione che non appare, nell'immagine, come una parte nera ma solo come grigia o dello stesso colore dell'aggregato. In questo caso, quindi, il software non rileva quella zona come facente parte della fessura e non conta i relativi pixel. In fase iniziale questo problema era stato già osservato ma è stato ritenuto trascurabile, almeno fino al momento dell'ottenimento di un numero di dati sufficiente a caratterizzarlo.

Il miglior grado di affidabilità fra le vari metodologie proposte è stato raggiunto con la misurazione dell'ampiezza massima mediante software grafico (W_{max}), la misurazione dell'aria approssimata come somma di cinque rettangoli ($Area_{mm}$) e la misurazione dell'ampiezza massima con il fessurimetro (FM). Con questi metodi il problema può essere caratterizzato con una buona approssimazione ma solo in alcuni dei casi studiati.

Dalle osservazioni fatte in precedenza, si evince come la metodologia che meglio riesce a fornire la più affidabile relazione fra il flusso di acqua e l'apertura di fessura è quella che permette di calcolare un'ampiezza media da cinque diverse misurazioni della stessa. In questo modo sembra sia possibile diminuire l'aleatorietà legata alla valutazione di un'entità poco uniforme come può essere una fessura. Il problema principale quando si cerca di "stimare" una fessura è legato al fatto che le ordinarie misurazioni si basano sull'aspetto in superficie e visibile, nella maggior parte dei casi, a occhio nudo. Questa metodologia in tutti i grafici proposti, e presenti in forma integrale in

appendice F, mostra l'affidabilità più elevata tra quelle studiate ed è stata, quindi, scelta come principale per le valutazioni dei dati ottenuti in questa ricerca.

Avendo scelto il metodo dell'ampiezza media, sono stati confrontati i tre gruppi di grafici nei quali si è scelto di valutare, di volta in volta, l'ampiezza massima, minima e la media tra le due di ogni campione o solo quella sulla superficie superiore. La fessura minore ha dato in generale relazioni peggiori delle altre. Tra le tre, comunque, la fessura maggiore e quella sulla parte superiore sembrano essere quelle più determinanti nel passaggio del fluido all'interno del campione. Questo è visibile molto chiaramente nelle figure 4.16 e 4.20, già proposte nei paragrafi precedenti e mostranti le analogie tra i ratio delle fessure e dei flussi.

Di seguito vengono mostrati alcuni grafici che mostrano come dividendo i dati ottenuti in due gruppi distinti in funzione del tipo di calcestruzzo utilizzato per la fabbricazione dei campioni, si ottengano andamenti delle curve molto differenti. In particolare i dati riguardanti l'additivo cristallino risultano sempre meno dispersi e forniscono relazioni più accettabili.

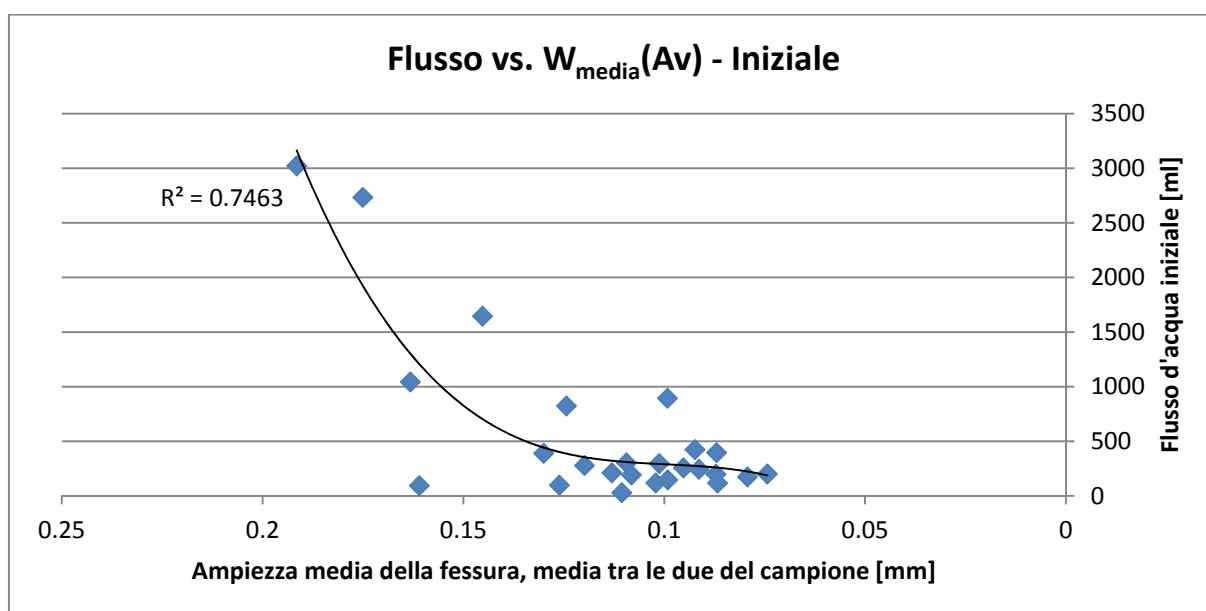


Figura 4.21 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali.

Nelle figura 4.21 e 4.22 si è voluto evidenziare come l'andamento della curva di tendenza cambi una volta divisi i campioni. I due grafici si riferiscono alla stessa relazione di dati misurati nello stesso periodo. In questo modo è possibile osservare come quelli relativi ai campioni di controllo risultano più dispersi e forniscono relazioni meno affidabili. Osservato lo stesso andamento in tutti i grafici studiati, e presenti in versione integrale in appendice F, si può affermare che uno degli effetti dell'utilizzo dell'additivo cristallino è di fornire dati meno dispersi e più regolari. Quest'affermazione può essere estesa anche allo studio dell'healing rate, proposto in seguito nel paragrafo 4.4.5, dove il grafico dei soli campioni con additivo curati in differenti ambienti ha fornito informazioni chiare sia visivamente che numericamente.

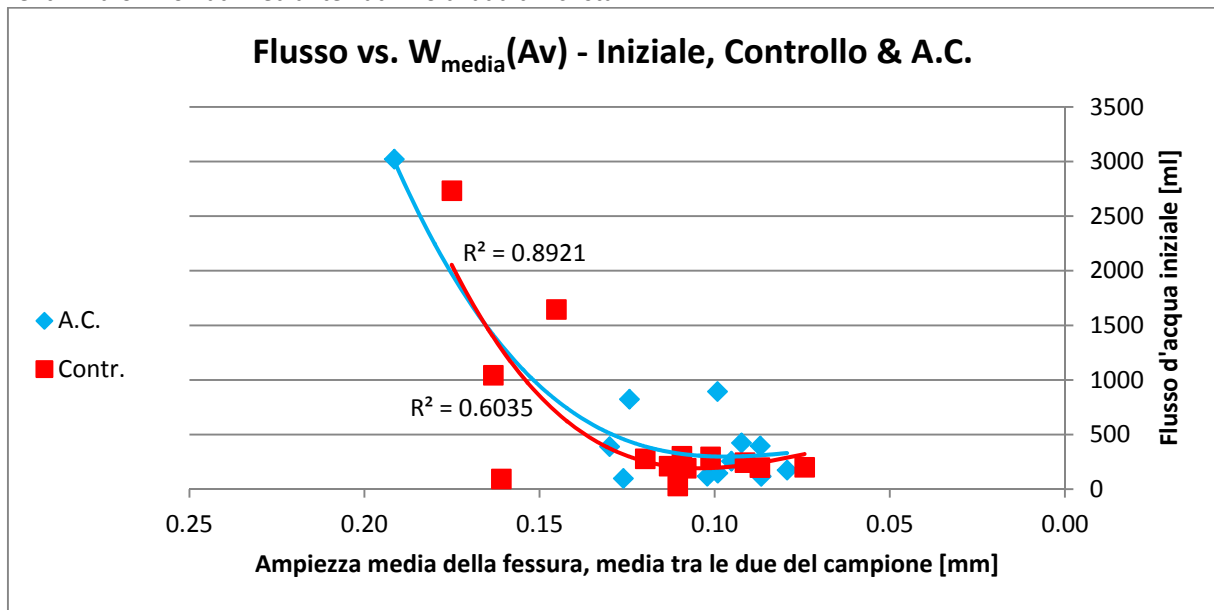


Figura 4.22 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali. Particolare confronto tra i valori relativi ai campioni di controllo e quelli con additivo.

Infine in figura 4.23, viene proposto un grafico che mette insieme i dati iniziali e finali, rapportati ai rispettivi flussi. Nonostante il numero dei dati sia raddoppiato la differenza tra gli R quadrati resta molto evidente, confermando ancora quanto affermato in precedenza.

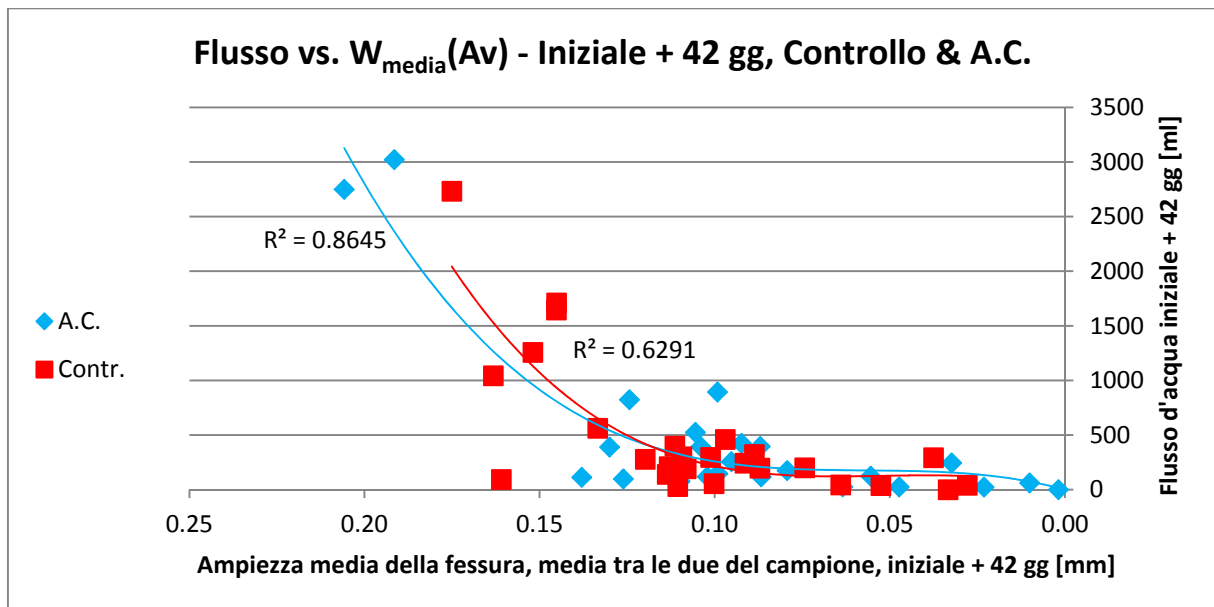


Figura 4.23 Relazione tra il flusso d'acqua e l'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, in condizioni iniziali e dopo 42 giorni di cura. Particolare confronto tra i valori relativi ai campioni di controllo e quelli con additivo.

4.4 Riduzione del flusso

Lo studio della variazione della permeabilità è la parte fondamentale della ricerca, poiché permette di analizzare e quantificare il fenomeno del self-healing nel calcestruzzo. La valutazione principale di tale fenomeno è stata eseguita mediante l'osservazione e la misurazione della chiusura della fessura, chiusura che può interessare sia la parte interna del campione sia quella superficiale. L'effetto principale è la riduzione parziale o l'azzeramento del flusso d'acqua. In questo paragrafo vengono mostrati i grafici relativi alla sola variazione del flusso che, mediante la definizione di un indice, ha permesso di valutare come le condizioni presenti in ogni ambiente di cura abbiano influito positivamente o negativamente sui fenomeni legati al self healing.

L'indice utilizzato per la variazione del flusso è il seguente:

$$I_{V.F.} = 1 - \frac{WF_{fin}}{WF_{in}}$$

dove:

WF_{fin} quantità d'acqua attraversante il campione al termine della cura, espresso in millilitri

WF_{in} quantità d'acqua attraversante il campione prima della cura, espresso in millilitri

Di seguito vengono analizzati separatamente i risultati relativi ad ogni singolo ambiente di cura, confrontando di volta in volta i campioni con additivo e non. I grafici riportati rappresentano i campioni che hanno manifestato un flusso d'acqua inferiore a 2000 ml, mentre quelli completi sono allegati in appendice H. Si vuole evidenziare che il 97% dei campioni ha manifestato un flusso minore di tale valore.

I dati verranno rappresentati tramite un grafico a dispersione nel quale il flusso iniziale d'acqua è messo in relazione con l'indice di guarigione (HR - Healing Rate). I campioni per i quali la sigillatura della fessura è avvenuta completamente e il flusso è stato, quindi, bloccato presentano un valore di tale indice pari a 1.

4.4.1 Immersione in acqua

In generale tutti i campioni lasciati in acqua per il periodo di cura, sono stati caratterizzati da un'elevata diminuzione del flusso. Questo fenomeno ha riguardato sia i provini di controllo sia quelli con additivo. Nella figura 4.24 viene rappresentato il grafico che mette in relazione l'healing rate sul flusso con il flusso d'acqua iniziale.

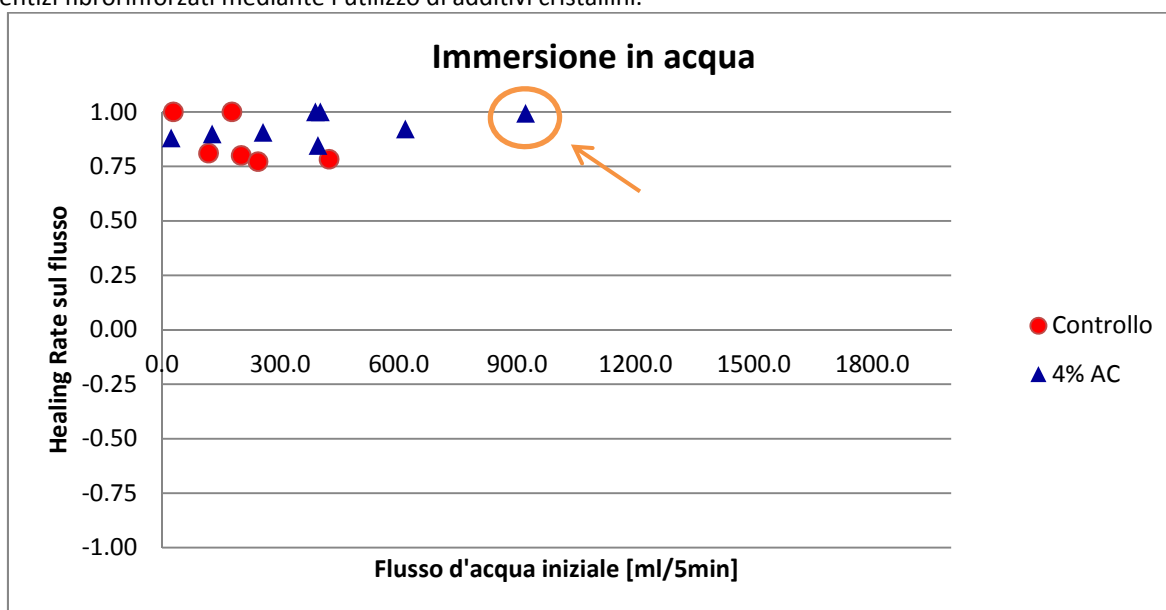


Figura 4.24 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Ambiente di cura: immersione in acqua.

La relazione tra l'ampiezza delle fessure e il flusso d'acqua che le attraversa, verrà mostrata in seguito. In prima analisi si può, però, affermare che per fessure molto piccole i flussi sono anch'essi di piccola entità. Detto ciò, si può notare dal grafico come i campioni di controllo abbiano sigillato completamente le fessure più piccole mentre i provini con additivo hanno raggiunto una diminuzione del flusso pari a circa il 90% ma mai la completa chiusura.

Queste affermazioni valgono per tutti i campioni con flusso iniziale minore di 300 ml, la situazione cambia per flussi di maggiore entità. I provini con additivo cristallino, infatti, presentano percentuali di guarigione sempre maggiori di quelli di controllo, arrivando spesso alla completa chiusura della fessura. Per l'unico campione con flusso iniziale pari a circa 920 ml viene attestato un healing rate pari a 1. Questo risultato può essere spiegato dal fatto che per fessure di ampiezza maggiore, una maggiore quantità di acqua riesce a penetrare internamente alla fessura avviando la reazione di cristallizzazione in misura più ampia all'interno del campione.

4.4.2 Fessura costantemente bagnata e strato di due centimetri di acqua sulla superficie superiore

Questa tipologia di ambiente ha permesso di fornire una piccola quantità di acqua all'interno della fessura e di sottomettere il campione a una leggera pressione di acqua sulla superficie superiore. La presenza di acqua all'interno della fessura rende possibile la reazione di cristallizzazione. Nuove conferme di questa teoria vengono dal fatto che tutti i campioni hanno presentato un'alta riduzione del flusso, raggiungendo anche in questo caso valori di healing rate molto alti.

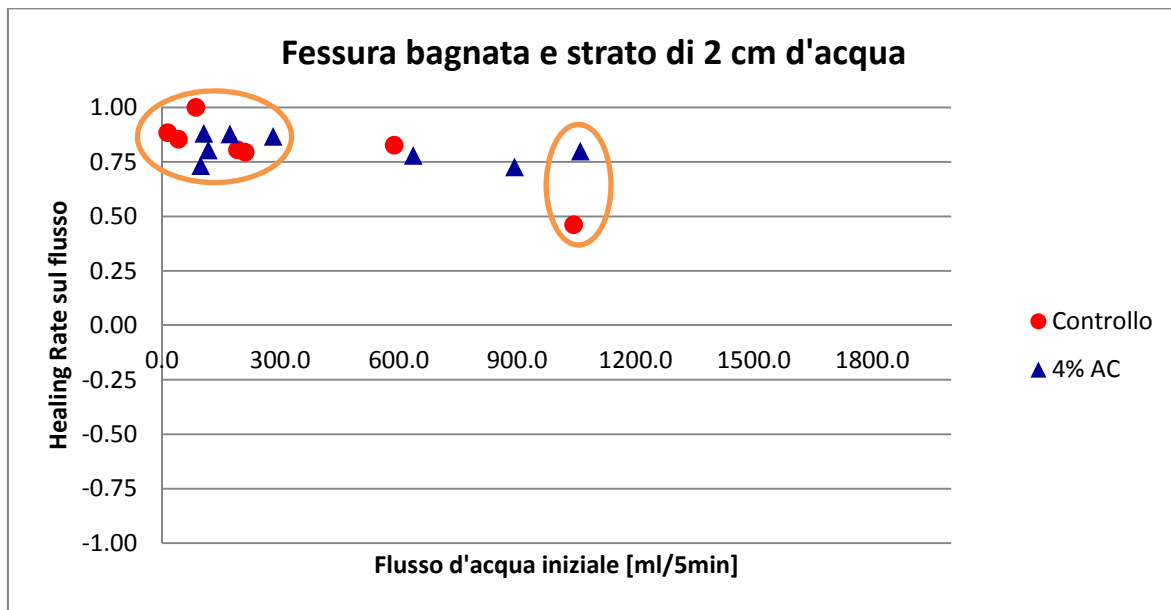


Figura 4.25 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Ambiente di cura: fessura bagnata e strato di 2 cm d'acqua sulla superficie superiore.

Come mostrato in figura 4.25, per fessure piccole e caratterizzate da flussi iniziali inferiori a 300 ml (area evidenziata a sinistra), non si nota particolare differenza tra le due tipologie di campioni. L'healing rate si attesta sempre intorno all'85% e solo un campione di controllo raggiunge il completo blocco del flusso.

La differenza tra i due diversi calcestruzzi si osserva superato il valore di flusso iniziale di 300 ml. Infatti, mentre i campioni con additivo mantengono valori costanti di healing rate sempre intorno al 70%, i campioni di controllo manifestano un abbassamento di tale indice. La differenza è evidente per i campioni evidenziati a destra. I due campioni appartengono a due tipologie differenti di calcestruzzo e presentano un flusso iniziale molto simile, intorno a 1050 ml. L'indice di guarigione del campione con additivo, però, è maggiore di 45 punti percentuali rispetto quello del provino di controllo.

Infine, si può osservare come in generale tutti i campioni presentati healing rate costante, ma che non raggiunge mai il valore relativo alla completa chiusura della fessura, ovvero 1.

4.4.3 Camera umida

Gli ambienti che non hanno coinvolto l'utilizzo di acqua liquida a diretto contatto con i campioni hanno mostrato un aspetto finale e valori di guarigione molto diversi rispetto ai due casi mostrati in precedenza. Nel caso della camera umida l'alta percentuale di vapore acqueo ha permesso il mantenimento generale dello stato della fessura. I dati ottenuti, mostrati in figura 4.26, seppur in parte dispersi, mostrano una guarigione che va dallo 0% fino al 25%.

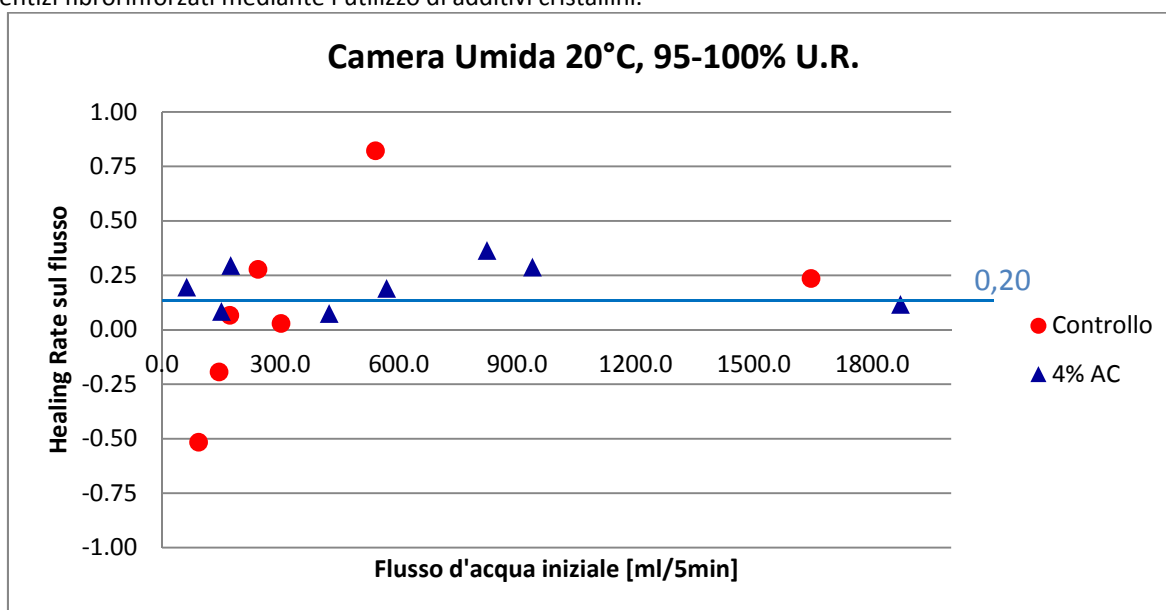


Figura 4.26 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Ambiente di cura: camera umida.

In particolare i campioni con additivo hanno presentato un valore medio pari a 20%, quasi costante per tutti i flussi iniziali rilevati al momento della prima prova di permeabilità. Questo può essere dovuto principalmente al fatto che gli additivi cristallini utilizzati per migliorare la sigillatura delle fessure sono prodotti idrofili. Tale proprietà permette di catturare una maggiore quantità di acqua, vapore in questo caso, necessaria per avviare le successive reazioni di cristallizzazione. Quest'andamento costante suggerisce che con ulteriori studi si potrà definire meglio tale comportamento, cambiando alcuni parametri o studiando una nuova metodologia per la valutazione della guarigione.

Il calcestruzzo di controllo, invece, non riesce ad ottenere un andamento definito e costante. Presenta, infatti, maggiore dispersione e non permette di evidenziare una tendenza in particolare.

4.4.4 Esposizione all'aria non trattata

Anche in questo caso i valori di healing rate sono risultati molto bassi. In figura 4.27 si può notare un'elevata dispersione dei dati ottenuti. In particolare si vuole evidenziare come i campioni di controllo siano stati caratterizzati nella maggior parte dei casi da un aumento del flusso d'acqua che ha quindi portato a valori negativi dell'healing rate, come evidenziato in figura. Questo può essere dovuto solo ad un allargamento della fessura durante il periodo di cura e a un degrado maggiore del calcestruzzo, effetto opposto a quello desiderato. La spiegazione di tale fenomeno può essere trovata nel ritiro proprio del periodo d'indurimento del calcestruzzo che, vista l'età giovane dei campioni al momento della prefessurazione, si è manifestato in misura maggiore, comportando il restringimento dell'area superficiale del provino e causando l'allargamento della fessura.

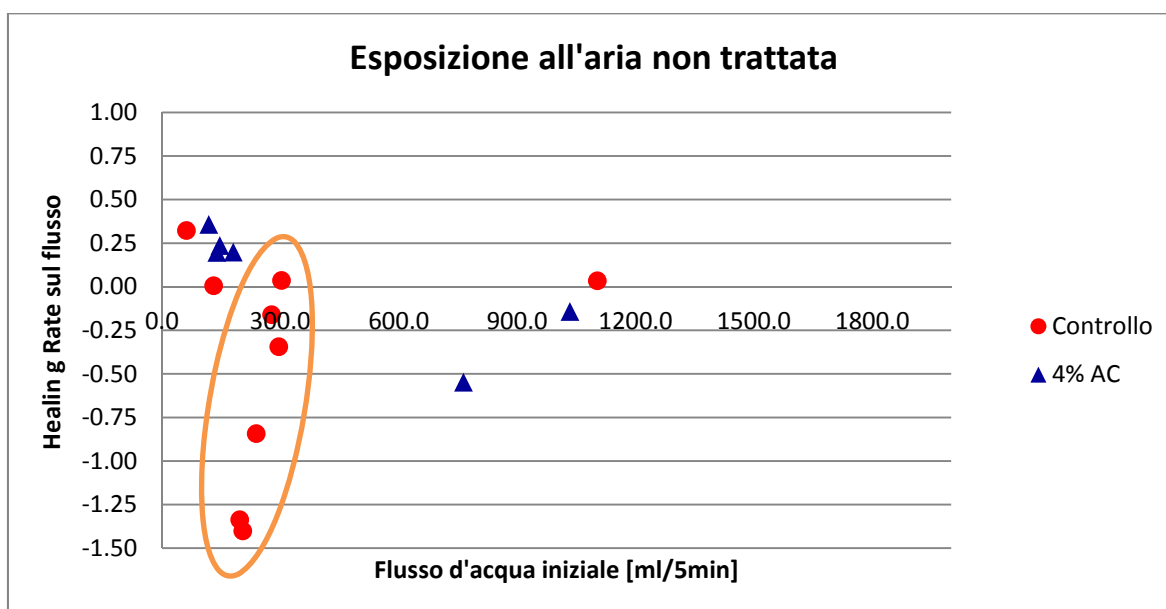


Figura 4.27 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Ambiente di cura: esposizione all'aria non trattata.

I campioni con additivo sembrano aver contrastato questo ritiro. Catturando un maggiore contenuto di acqua dall'aria sono state evitate eccessive variazioni del volume. In quasi tutti i provini studiati, infatti, è stata rilevata una diminuzione del flusso, seppur modesta.

4.4.5 Calcestruzzo di controllo e con additivo

Sovrapponendo i dati dei diversi ambienti di cura e dividendoli in due gruppi, in funzione della tipologia di calcestruzzo, è possibile osservare in quale misura i singoli ambienti influiscano sulla variazione del flusso.

In figura 4.28 sono stati analizzati i soli campioni di controllo. Si nota una discreta dispersione dei dati, in particolare quelli concernenti l'esposizione all'aria, trattata e non. I campioni che hanno trascorso il periodo di cura a contatto con acqua mostrano valori di healing rate molto alti e occupano la stessa parte del grafico. Si vuole evidenziare, però, che non è possibile distinguere una particolare differenza tra i due diversi ambienti di cura. I dati caratterizzati da flusso iniziale modesto sono molto mescolati, mentre quelli con flusso iniziale maggiore di 600 ml presentano valori dell'indice di guarigione inferiori a 0,50, in entrambi i casi.

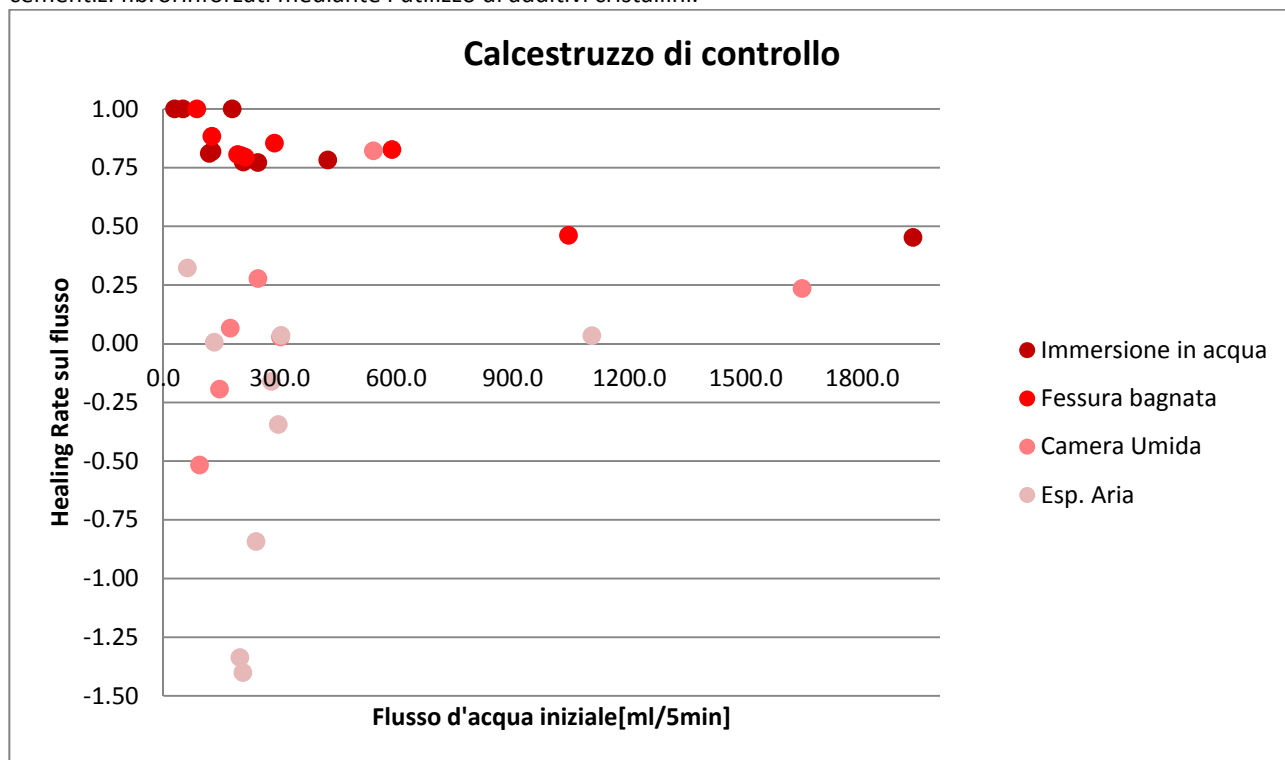


Figura 4.28 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Sovrapposizione dati differenti ambienti di cura rispetto il solo calcestruzzo di controllo.

Per i campioni con additivo la situazione è ben diversa. Come si può osservare in figura 4.29, in un grafico che mette in relazione l'healing rate con il flusso d'acqua iniziale i campioni si dispongono in due macro aree ben distinte. I provini a contatto con acqua hanno ottenuto valori di healing rate sempre superiori a 0,70. In questo particolare gruppo di dati si possono individuare due zone: una superiore in cui si trovano solo i campioni immersi in acqua, che hanno ottenuto un healing rate medio pari a 0,93, e una inferiore composta dai campioni in cui la fessura è stata mantenuta a contatto con acqua e che hanno mostrato un healing rate medio di 0,81.

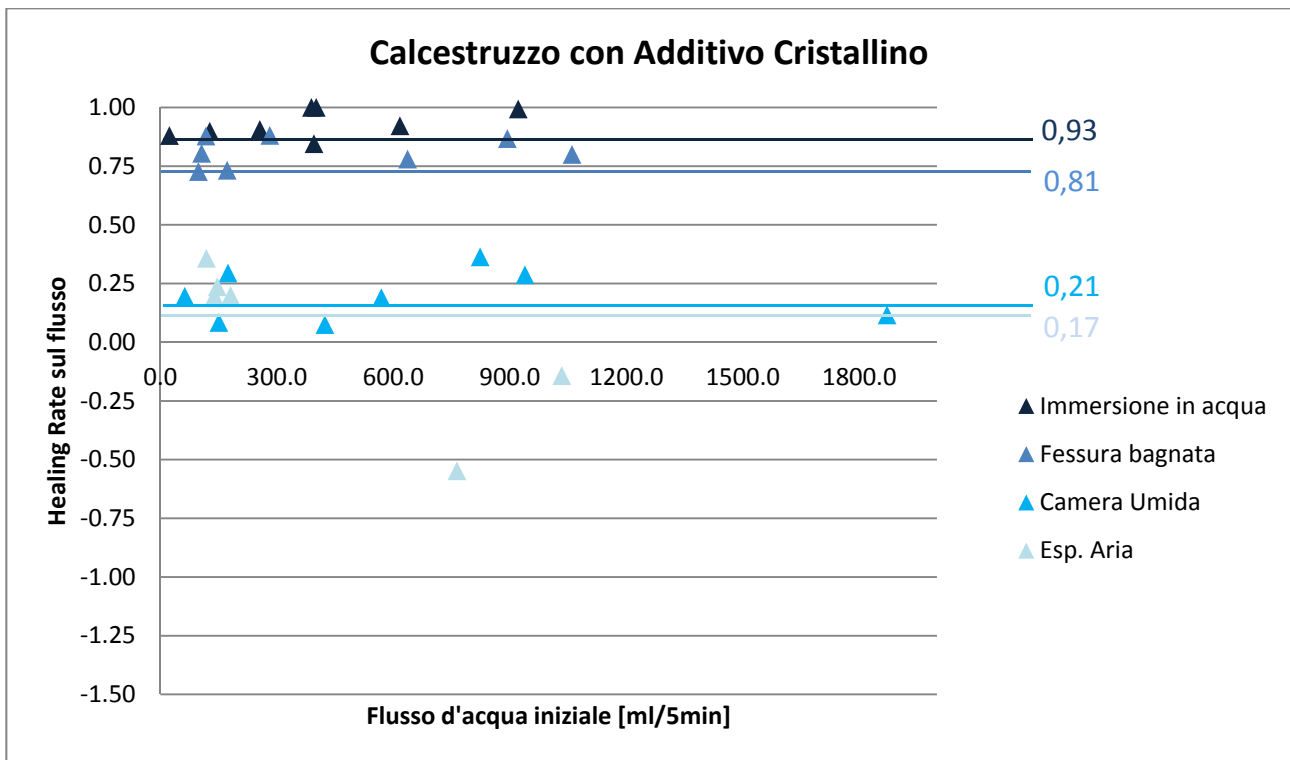


Figura 4.29 Healing Rate in relazione con il flusso d'acqua iniziale. Sovrapposizione dati differenti ambienti di cura rispetto il solo calcestruzzo con additivo cristallino.

Nella parte bassa del grafico, invece, si possono osservare i campioni posti nei rimanenti ambienti di cura. In questo caso però si nota una leggera dispersione dei dati che non permette la definizione di zone distinte come successo per l'altro gruppo.

Questo grafico mostra chiaramente l'influenza della presenza di acqua liquida sui campioni contenenti l'additivo cristallino. La quantità stessa d'acqua fornita incide sulla guarigione. Non basta, infatti, mantenere la fessura bagnata o a contatto con una determinata quantità di acqua poiché solo i campioni immersi hanno mostrato valori di healing rate superiori allo 0,90 e in alcuni casi pari a 1.

Per dare un'idea più chiara dell'influenza dell'additivo cristallino sulla guarigione del calcestruzzo, in figura 4.30 vengono confrontati, in un grafico a istogrammi, i valori medi di healing rate relativi a ogni singolo ambiente di cura e alle due diverse tipologie di calcestruzzo. Dal calcolo dei valori medi sono stati esclusi i campioni con flusso iniziale maggiore di 1000 ml a causa del numero esiguo e poco rilevante ai fini dell'analisi.

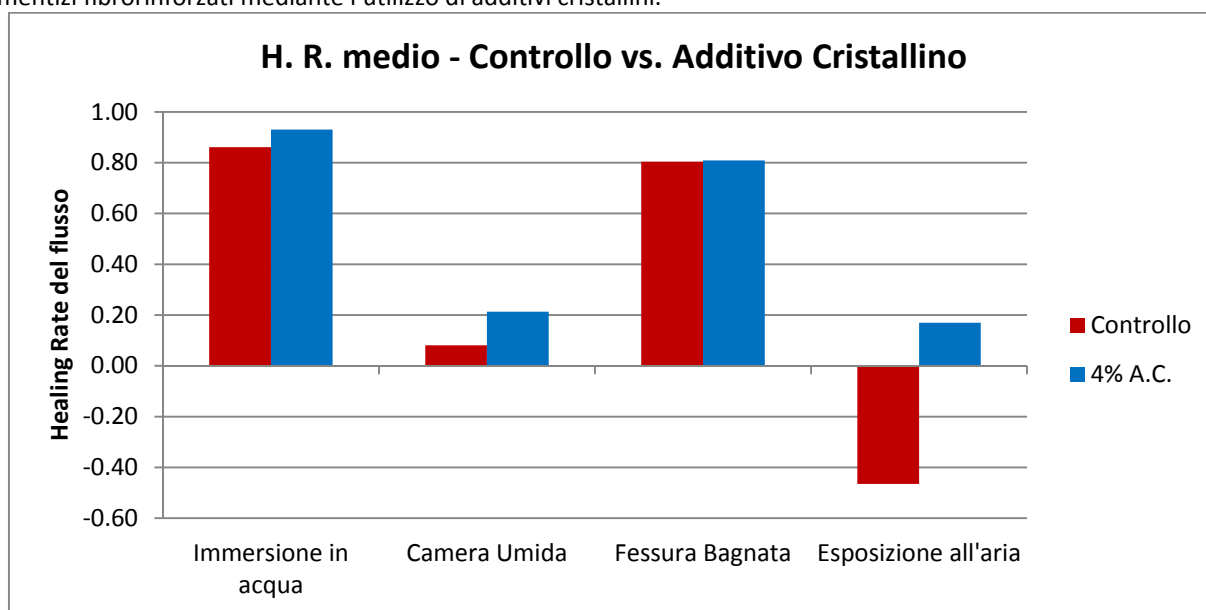


Figura 4.30 Rappresentazione healing rate medio per ogni ambiente di cura e tipologia di calcestruzzo. Le abbreviazioni corrispondono a: I.A. immersione in acqua, C.U. camera umida, F.B. fessura costantemente bagnata, E.A. esposizione ad aria non trattata.

Osservando gli ambienti che hanno ottenuto valori medi più alti, l'immersione in acqua e il sistema in cui la fessura è stata mantenuta bagnata, si può affermare che, nonostante l'alto quantitativo di additivo cristallino utilizzato (4% nel peso di volume del cemento), la differenza con il calcestruzzo di controllo non è stata elevata. Nei campioni con additivo cristallino immersi in acqua per 42 giorni, è stata rilevata una guarigione media, valutata con l'indice esposto nel paragrafo 4.4, superiore di circa il 10% rispetto quelli di controllo. Mentre quando è stata fornita la quantità necessaria al mantenimento della fessura costantemente bagnata, la differenza non è stata apprezzabile. L'additivo, quindi, solo in presenza di una grande quantità di acqua permette la formazione di un numero maggiore di prodotti in grado di sigillare la fessura. Quando la quantità d'acqua è modesta la differenza con il calcestruzzo ordinario è irrisoria.

Le cose cambiano quando i campioni sono esposti all'aria e all'umidità in essa contenuta. Come spiegato nei paragrafi precedenti, l'idrofilia dell'additivo permette di catturare una maggiore quantità di acqua dall'aria rispetto il calcestruzzo di controllo. Sempre in figura 4.30, si può osservare come i campioni con additivo lasciati in camera umida abbiano raggiunto, anche in questo caso, un indice di guarigione maggiore di circa il 13% rispetto quelli di controllo.

Il risultato migliore è stato ottenuto per l'esposizione all'aria non trattata del laboratorio. Come illustrato in precedenza, l'additivo sembra aver contrastato il fenomeno del ritiro. La differenza tra la media degli healing rate è molto elevata, e pari a circa 0,60 punti. L'additivo, infatti, oltre all'effetto appena citato, permette il conseguimento di una guarigione pari al 20% rispetto le condizioni iniziali.

4.5 Variazione dell'ampiezza media della fessura

In questa sezione dell'elaborato verranno presentati i risultati relativi al self-healing valutato mediante l'evoluzione delle fessure durante il periodo di cura. Una volta confrontati tutti i metodi proposti e scelto il più affidabile, è stata studiata la guarigione nei diversi ambienti confrontando i dati tra i campioni con additivo e quelli di controllo. Per fare ciò sono stati utilizzati i grafici relativi alla fessura massima e a quella posta sulla superficie superiore, essendo ritenute le più affidabili e capaci di mostrare i reali effetti delle condizioni esterne sulla cura della fessura. Sono stati definiti, quindi, due indici di cura, healing rate, in funzione delle ampiezze medie iniziali e finali delle fessure.

L'indice utilizzato per la variazione dell'ampiezza della fessura massima tra le due del campione è il seguente:

$$I_{A.W.Max} = 1 - \frac{AWM_{fin}}{AWM_{in}}$$

dove:

AWM_{fin} Ampiezza media della fessura, massima tra le due del campione, al termine della cura, espressa in millimetri

AWM_{in} Ampiezza media della fessura, massima tra le due del campione, prima della cura, espressa in millimetri

Mentre l'indice utilizzato per la variazione dell'ampiezza della fessura sulla superficie superiore è il seguente:

$$I_{A.W.Top} = 1 - \frac{AWT_{fin}}{AWT_{in}}$$

dove:

AWT_{fin} Ampiezza media della fessura sulla superficie superiore del campione, al termine della cura, espressa in millimetri

AWT_{in} Ampiezza media della fessura sulla superficie superiore del campione, prima della cura, espressa in millimetri

I dati studiati in questo tipo di analisi sono in numero inferiore rispetto a quelli utilizzati per le altre. Questo è dovuto al fatto che per ogni impasto sono stati scelti solo tre campioni per i quali è stata eseguita l'analisi al microscopio e il successivo ottenimento dei panorami ad alta risoluzione su cui calcolare le ampiezze medie. Di conseguenza i grafici possiedono circa 6-7 dati suddivisi in due gruppi in base al tipo di calcestruzzo. Per sopperire all'esiguo numero di dati sono stati inseriti contemporaneamente due serie di valori, quelli provenienti dalla scelta della fessura massima tra

le due del campione e quelli delle sole fessure superiori. Ciò è stato reso possibile dalla definizione di due indici di guarigione dello stesso tipo. Data la natura della selezione però, quando l'ampiezza media della fessura sulla superficie superiore è la maggiore tra le due del campione, il dato inserito è lo stesso. Questa scelta ha permesso, comunque, di fornire dei grafici più completi.

Di seguito vengono studiati gli ambienti singolarmente.

4.5.1 Immersione in acqua

Per i campioni immersi in acqua durante il periodo di cura, l'aspetto finale delle fessure mostra un'ampiezza media molto ridotta. Come mostrato in figura 4.31, per entrambe le tipologie di calcestruzzo le fessure mostrano valori di healing rate molto elevati, paragonabili a quelli del flusso mostrati nel paragrafo 4.4.1. La differenza non è molto marcata, poiché, sia per i campioni di controllo che per quelli con additivo, solo due fessure si sono chiuse completamente, anche se per i secondi viene rilevata la chiusura completa di una fessura relativamente grande, con ampiezza media iniziale pari a 0,17 mm.

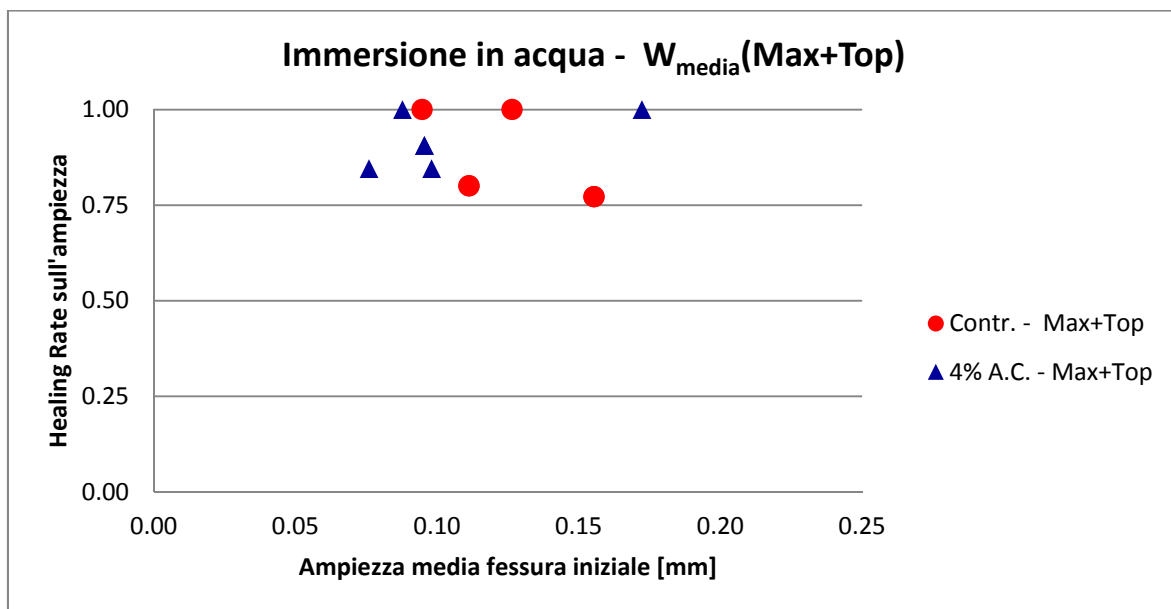


Figura 4.31 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Ambiente di cura: immersione in acqua.

I campioni con additivo mostrano valori di healing rate mediamente più alti, si attestano, infatti, mediamente intorno lo 0,9, mentre quelli di controllo intorno 0,8. Nonostante questa sostanziale differenza, si può notare nel grafico come la maggior parte dei campioni con additivo abbia presentato, in fase iniziale, fessure con ampiezza media inferiore. La presenza o meno dell'additivo, quindi, non sembra aver influito complessivamente in misura molto marcata sulla guarigione delle fessure.

4.5.2 Fessura bagnata costantemente e strato di due centimetri di acqua sulla superficie superiore

Rispetto alla completa immersione in acqua, in questo tipo di ambiente la differenza tra i campioni di controllo e quelli con additivo è più evidente. I primi mostrano maggiore dispersione poiché si ripartiscono in due gruppi, uno con I_{AW} pari a circa 0,78 e l'altro con I_{AW} pari a 0,46. I provini con

additivo, invece, mostrano un indice di guarigione medio pari a circa 0,75 con uno scarto medio di 0,04.

In figura 4.32, viene mostrato il grafico relativo a questo ambiente di cura.

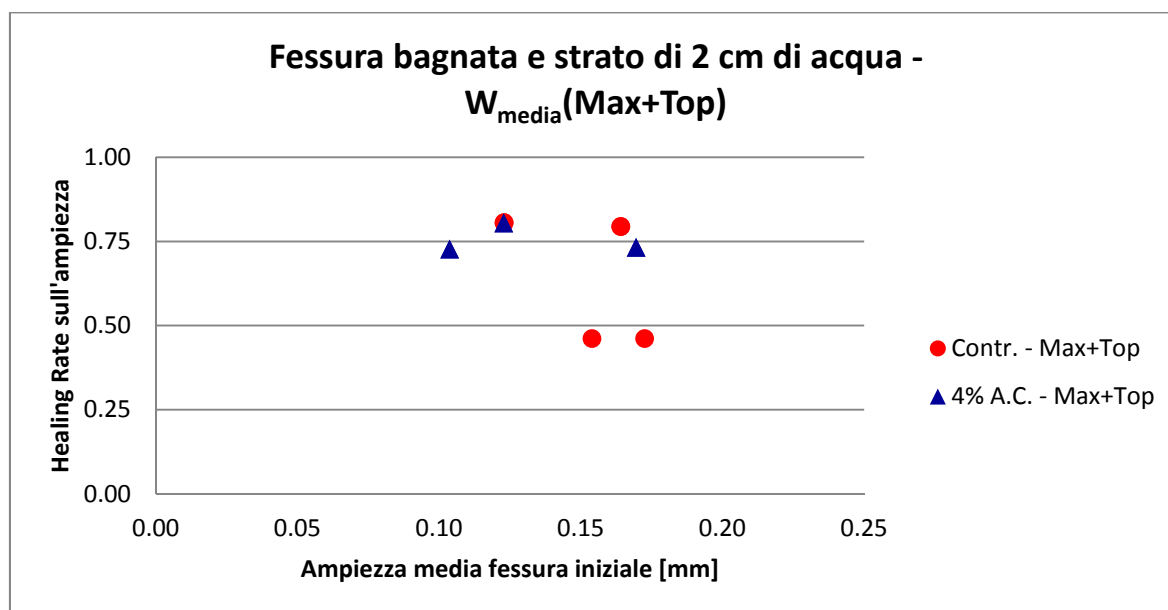


Figura 4.32 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Ambiente di cura: fessura bagnata e strato di 2 cm d'acqua sulla superficie superiore.

Come accennato in precedenza, l'esiguo numero di dati è dovuto al fatto che in questo particolare caso le fessure sulla superficie superiore dei campioni è risultata essere quasi sempre la maggiore. In questo modo, l'artificio utilizzato per aumentare il numero di dati non si è rivelato utile.

4.5.3 Camera umida

Dopo il periodo trascorso in camera umida, l'aspetto delle fessure si mostra leggermente alterato, anche se in linea di massima il cambiamento non è stato apprezzabile. Il grafico in figura 4.33 mostra come i dati riguardanti l'healing rate risultino molto dispersi. Non si nota nessuna particolare differenza tra i campioni di diversa tipologia. Normalmente l'additivo cristallino permette di ottenere dati più uniformi, in questo caso, invece, la disposizione è stata piuttosto caotica.

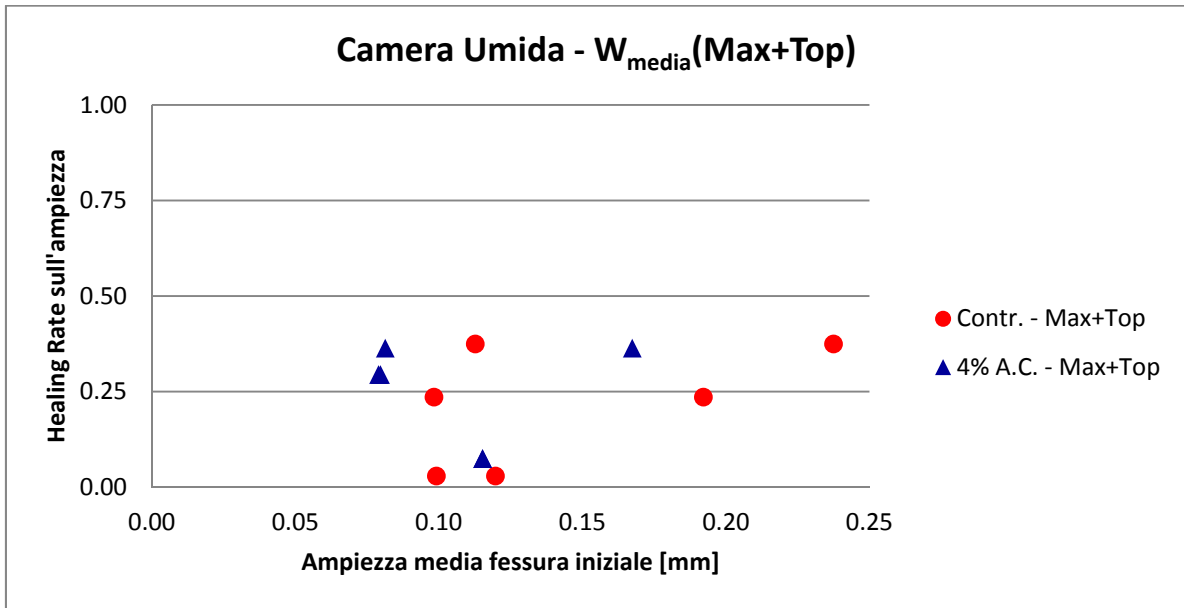


Figura 4.33 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Ambiente di cura: camera umida.

4.5.4 Esposizione ad aria non trattata

La variazione del flusso per i campioni esposti all'aria non trattata del laboratorio, studiata nel paragrafo 4.4.4, ha mostrato che in quasi tutti i campioni di controllo si sia verificato un aumento di tale flusso. Questo è stato spiegato inizialmente come conseguenza del fenomeno del ritiro che, a causa dell'età giovane del calcestruzzo al momento della prefessurazione, svolge un ruolo molto importante nella variazione delle dimensioni della fessura nei casi in cui non sia a contatto con acqua liquida o l'aria non sia satura di vapore.

Al momento dello studio della fessura, ci si aspetta un indice di guarigione negativo, proprio per l'allargamento della fessura stessa, che comporta la misurazione di un'ampiezza media maggiore di quella iniziale.

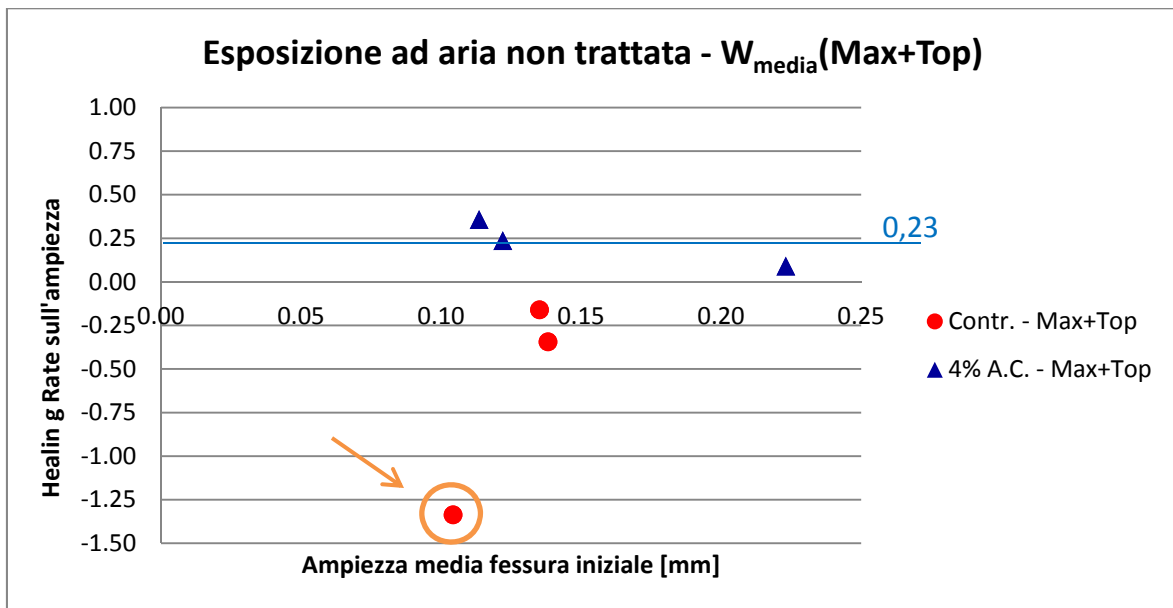


Figura 4.34 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Ambiente di cura: esposizione all'aria non trattata.

In figura 4.34 viene confermato nuovamente che l'additivo cristallino contrasti gli effetti dovuti al ritiro. La spiegazione più ovvia è quella già mostrata in precedenza ed è legata all'idrofilia dell'additivo stesso. Mentre, però, non si nota particolare differenza in camera umida, esposta ad aria non trattata e con valori di umidità relativa pari a circa 50-60%, questa proprietà sembra permettere la cattura della quantità di acqua necessaria sia a continuare l'idratazione del calcestruzzo sia a permettere la formazione di prodotti interni alla fessura in grado di chiuderla parzialmente. Questo fatto è dimostrato dal valore medio di healing rate pari a circa 0,23 per i soli campioni con additivo.

I provini di controllo invece hanno mostrato valori dell'indice di guarigione sempre negativi, in particolare per il dato evidenziato in figura che ha raggiunto un valore pari a -1,34. Un indice così basso potrebbe essere spiegato dal fatto che per fessure più piccole, l'effetto del ritiro sia, in proporzione proprio all'ampiezza, maggiore.

4.5.5 Calcestruzzo di controllo e con additivo

Infine, viene dato uno sguardo generale ai diversi ambienti di cura e a come hanno influenzato il self healing delle due tipologie di calcestruzzo, in modo analogo a quanto effettuato nel paragrafo 4.4.5.

Il calcestruzzo di controllo ha fornito dati molto dispersi. Come mostrato in figura 4.35 i dati sono disposti in modo caotico e non è possibile rilevare un particolare andamento o delle zone ben definite. Si può notare, comunque, una disposizione caratteristica dei dati: quelli che hanno passato il periodo di cura a contatto con acqua liquida occupano, anche in questo caso, la parte superiore del grafico, mentre gli altri la parte inferiore.

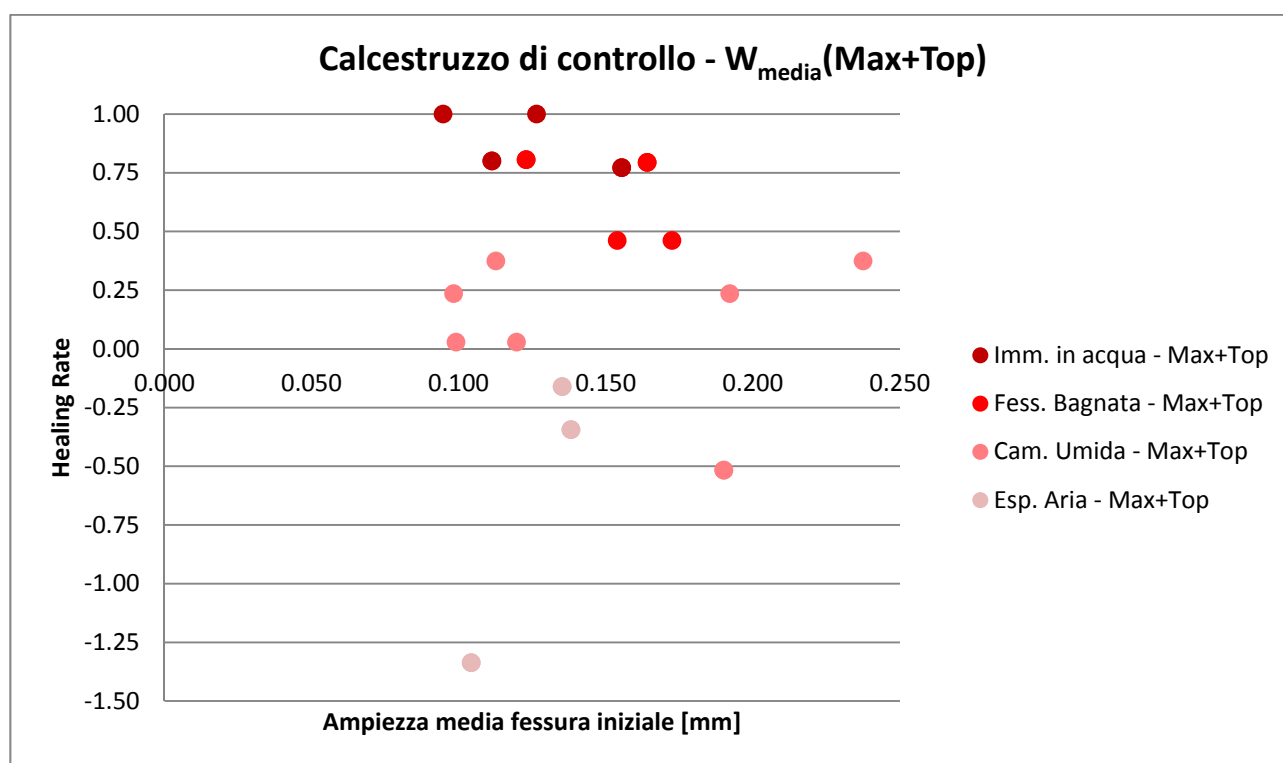


Figura 4.35 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Sovrapposizione dati differenti ambienti di cura rispetto il solo calcestruzzo di controllo.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

Il panorama è differente se si osserva la disposizione dei dati del calcestruzzo con additivo, mostrati in figura 4.36. La variazione del flusso ha permesso di individuare due zone ben definite e la cui differenza di healing rate si aggira a circa 0,40 (paragrafo 4.4.5, figura 4.29). Per quanto riguarda l'evoluzione della fessura si propone una situazione simile anche se non ben definita come nel caso precedente. Si osservano due gruppi distinti di dati divisi da una zona di separazione netta, anche se inferiore a quella vista nell'healing rate del flusso. Nella parte superiore del grafico si può osservare una differenza marcata tra i campioni in immersione e quelli con la fessura solo bagnata. Mentre i primi ottengono valori di healing rate sempre superiori a 0,85 e, in alcuni casi, pari a 1, i secondi hanno raggiunto un valore medio di 0,75. Per quanto riguarda gli altri ambienti, invece, la divisione non è molto marcata e i dati si presentano particolarmente mescolati.

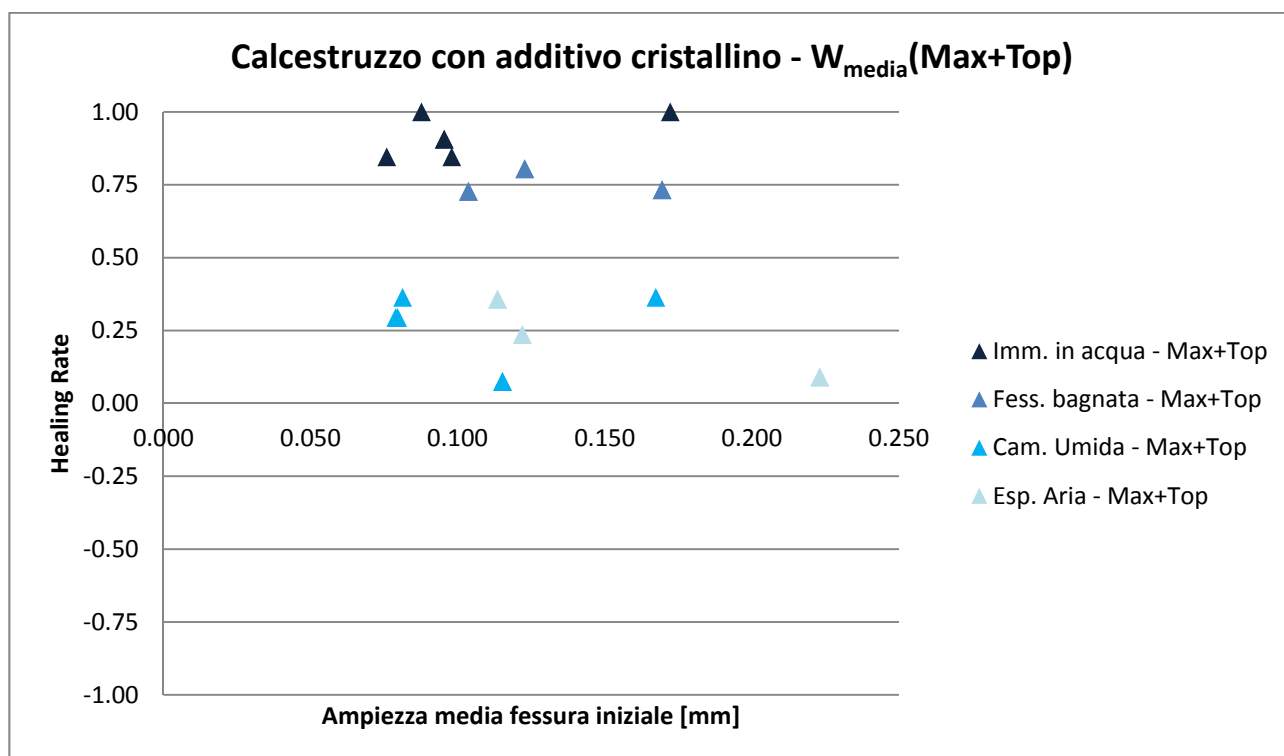


Figura 4.36 Healing Rate in relazione all'ampiezza media della fessura iniziale. Sovrapposizione dati differenti ambienti di cura rispetto il solo calcestruzzo con additivo cristallino.

4.6 Considerazioni generali sulla relazione tra flusso e fessura

Parte dello studio svolto si è incentrata sulla determinazione di una relazione, o di un andamento ben definito, tra il flusso d'acqua e la fessura visibile sulla superficie del campione. Riassumendo sinteticamente, ciò che è stato osservato in tutte le misure effettuate con la metodologia scelta, è che, al diminuire dell'ampiezza media della fessura, si registra sempre una diminuzione del flusso d'acqua. Altre ricerche [44] hanno ottenuto risultati simili, conseguendo linee di tendenza approssimabili a curve di secondo o terzo ordine.

In figura 4.37, viene presentato un andamento tipo delle curve di tendenza. Come già mostrano in precedenza i campioni di controllo mostrano sempre maggiore dispersione e le curve approssimate sono sempre meno affidabili di quelle calcolate per l'additivo cristallino.

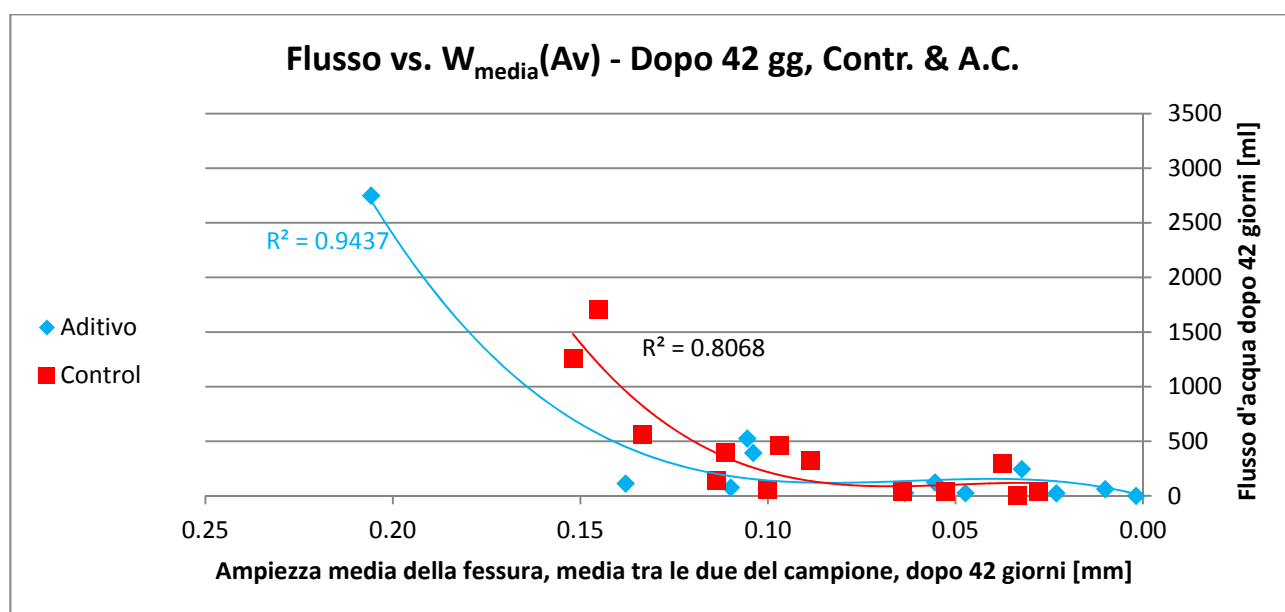


Figura 4.37 Relazione tra flusso d'acqua e ampiezza media della fessura, media tra le due del campione, dopo 42 giorni di cura. Particolare studio separato dei dati relativi ai campioni di controllo e con additivo.

Questo tipo di andamento è osservabile anche nell'intervallo, relativamente piccolo, delle ampiezze medie delle fessure studiate in questa ricerca. Precedenti studi hanno eseguito queste misure su fessure di dimensioni molto variabili che vanno da pochi micrometri a valori di ampiezza massima pari a 0,6 mm. In questo studio è stato osservato tale andamento quando le fessure sono molto piccole e raggiungono un'ampiezza media massima pari a circa 0,19 mm.

Confrontando i dati mostrati nei capitoli 4.4 e 4.5, si osserva che il solo studio della fessura superficiale non è sufficiente per descrivere in modo univoco il flusso d'acqua in grado di penetrare all'interno del campione. Nonostante i dati riconducano spesso alle stesse conclusioni, vi è una differenza sostanziale non trascurabile. A evidenziare questo fatto viene mostrato, in figura 4.38 il confronto tra gli healing rate del flusso e dell'ampiezza media della fessura. I dati sono molto dispersi e la linea di tendenza calcolata, sebbene quasi si sovrapponga alla bisettrice del quadrante, è poco affidabile. La sua sovrapposizione si è, infatti, ottenuta imponendo il

passaggio della retta dall'origine degli assi. Visivamente si nota, comunque, che tale retta si allontana molto dai dati alla quale si riferisce, e l'R quadrato stesso è risultato molto basso.

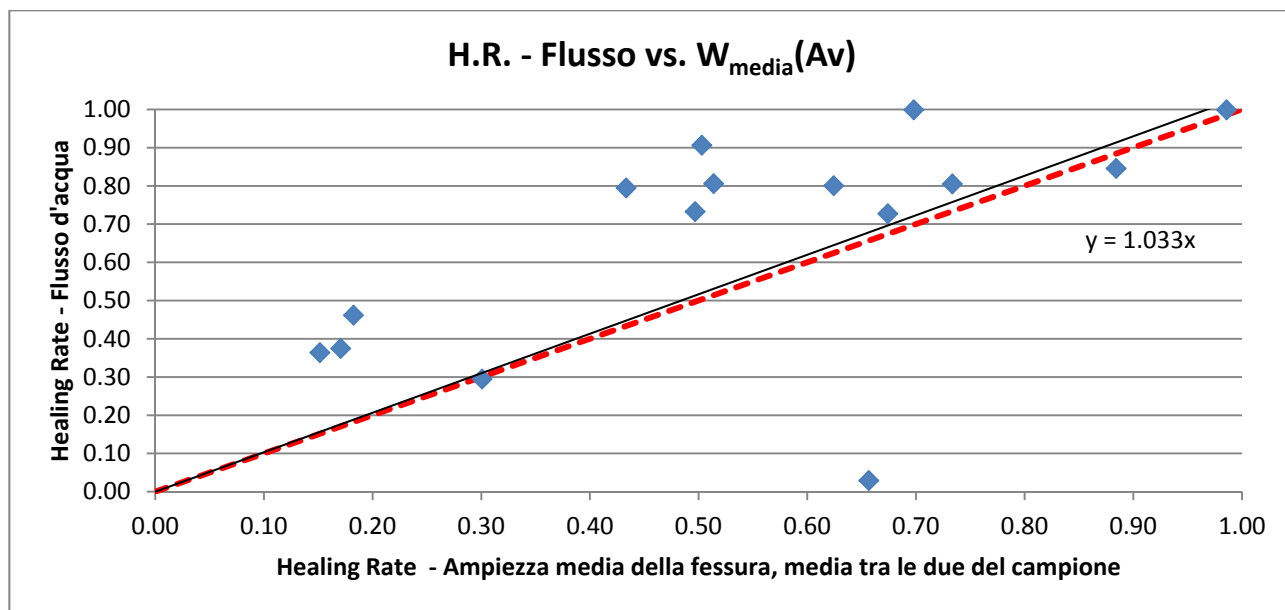


Figura 4.38 Confronto tra gli healing rate del flusso e dell'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione.

Nel grafico, inoltre, si può osservare che anche per valori di healing rate dell'ampiezza media della fessura che vanno da 0,50 a 0,80, sono stati rilevati dei flussi d'acqua molto ridotti e che hanno comportato indici di guarigione del flusso pari a 1 o, comunque, maggiori di 0,80. Ciò è spiegabile dal fatto che le fessure interne dei campioni cilindrici sono mediamente più piccole, e spesso meno ampie, di quelle presenti in superficie. Pertanto la loro chiusura avverrà prima e condiziona maggiormente il passaggio d'acqua all'interno del campione. Il calcolo dell'healing rate, così come elaborato in questa ricerca, risente di quanto appena affermato e non riesce, quindi, a definire una buona relazione tra flusso e ampiezza media della fessura.

Questo fatto dimostra che, quando si parla di permeabilità, non è sufficiente studiare solo la fessura esterna. La guarigione dei campioni, intesa come riduzione della permeabilità, non è sufficientemente caratterizzata se non si ha la possibilità di osservare i cambiamenti interni alla fessura. Lo studio della fessura proposto, comunque, garantisce un buon livello di approssimazione e permette di osservare il fenomeno in modo generale.

4.7 Studio visivo della fessura, formazione di cristalli e sigillatura completa

In questo paragrafo viene proposto lo studio dell'aspetto delle fessure, focalizzando l'attenzione sulla formazione, forma e diffusione dei cristalli in funzione degli ambienti di cura.

La precipitazione dei cristalli è stata molto evidente nei campioni lasciati a contatto con acqua durante il periodo di cura e che hanno mostrato riduzione del flusso e dell'ampiezza della fessura maggiori.

In figura 4.39 viene rappresentato lo stato della fessura del campione 2B relativo all'impasto AM4S-2, contenente additivo cristallino, dopo 42 giorni di cura in immersione in acqua. Il campione è stato caratterizzato da un healing rate pari a 0,91. Come si può vedere in figura, la fessura si mostra quasi completamente sigillata dalla formazione di una serie di cristalli bianchi su tutta la sua lunghezza. Nonostante ciò, al termine della cura è stato misurato del flusso d'acqua, seppur di bassa entità.

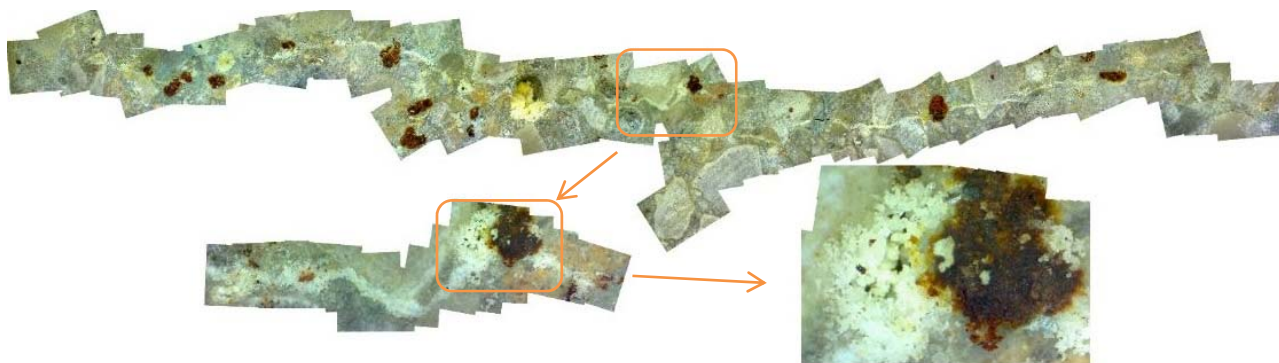


Figura 4.39 Impasto AM4S-2, campione 2B, superficie inferiore, immersione in acqua. Stato della fessura dopo la cura, evidente formazione di cristalli.

In figura 4.40, invece, viene mostrato lo stato della fessura del campione 1B, relativo all'impasto di controllo AM0-7. Confrontandolo con l'immagine presentata poco prima, si può notare la chiusura generale della fessura per merito della formazione, anche in questo caso, di cristalli bianchi, come mostrato negli ingrandimenti evidenziati. Nonostante la fessura si mostri più aperta, sono ancora presenti, infatti, delle parti non sigillate, al termine della cura non è stato rilevato flusso d'acqua. Riprendendo le affermazioni del paragrafo precedente, in questo caso l'aspetto della fessura non permette di prevedere il passaggio o meno del fluido all'interno del campione. Per quanto preciso possa essere lo studio dell'aspetto della fessura in superficie, è necessario studiare come si modifica la parte interna al campione.

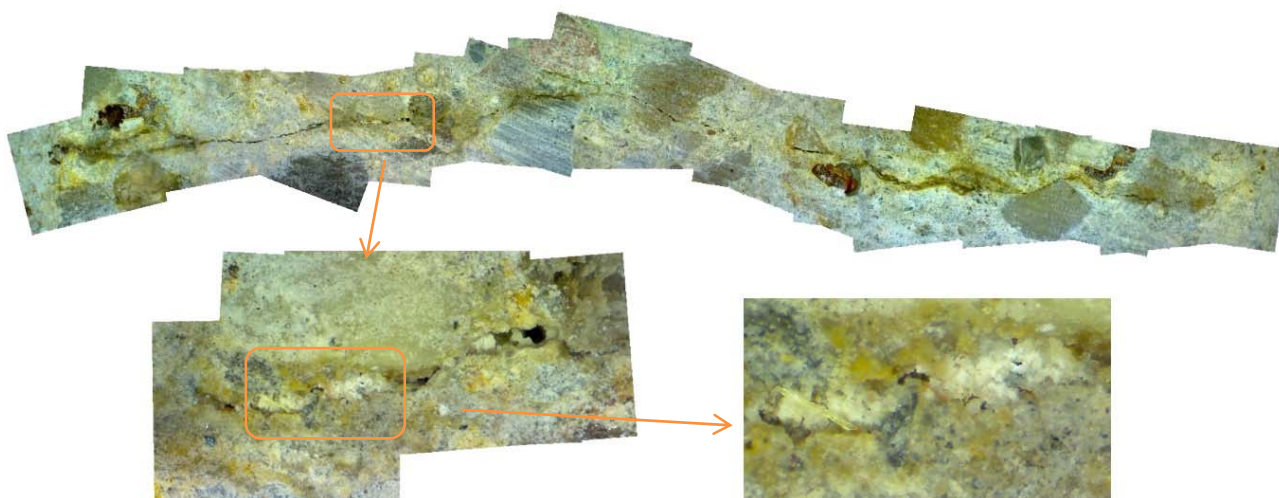


Figura 4.40 Impasto AM0-7, campione 1B, superficie superiore, immersione in acqua. Stato della fessura dopo la cura, evidente formazione di cristalli.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

Al termine del periodo di cura, i campioni sono stati puliti con l'ausilio di un getto d'aria con pressione di 4 bar, ad una distanza di circa 15 cm, in modo da eliminare del possibile materiale depositatosi sulle superfici e permettere, quindi, uno studio più accurato delle fessure al microscopio. Durante questa fase, si è provato a verificare la resistenza dei cristalli presenti visibili in superficie. In linea di massima, i cristalli presenti all'interno delle fessure completamente sigillate possiedono una buona resistenza, dovuta principalmente al poco spazio tra le pareti delle fessure stesse che permette il crearsi di un fitto reticolo cristallino.

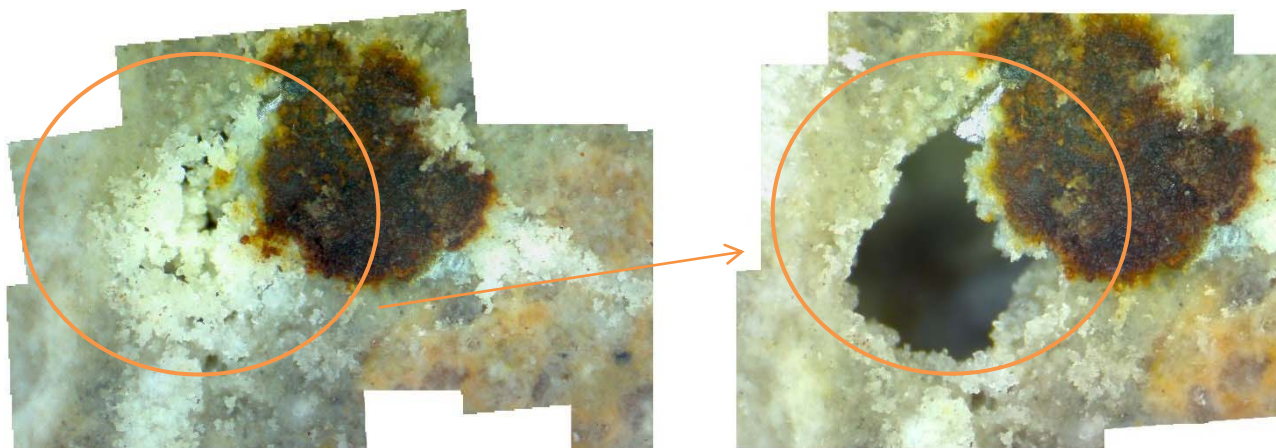


Figura 4.41 Impasto AM4S-2, campione 2B, superficie inferiore, immersione in acqua. cristalli prima e dopo la pulitura con aria compressa.

In figura 4.41 è presente, invece, il caso caratteristico di un poro di grandi dimensioni riempitosi di cristalli. Il campione in esame è sempre il 2B dell'impasto AM4S-2 contenente additivo cristallino. Le foto in questo caso sono state scattate prima e dopo la pulitura con aria compressa. Come risulta evidente, durante la puliture sono stati rimossi i cristalli formatisi all'interno del poro, manifestando, quindi, una resistenza relativamente bassa.

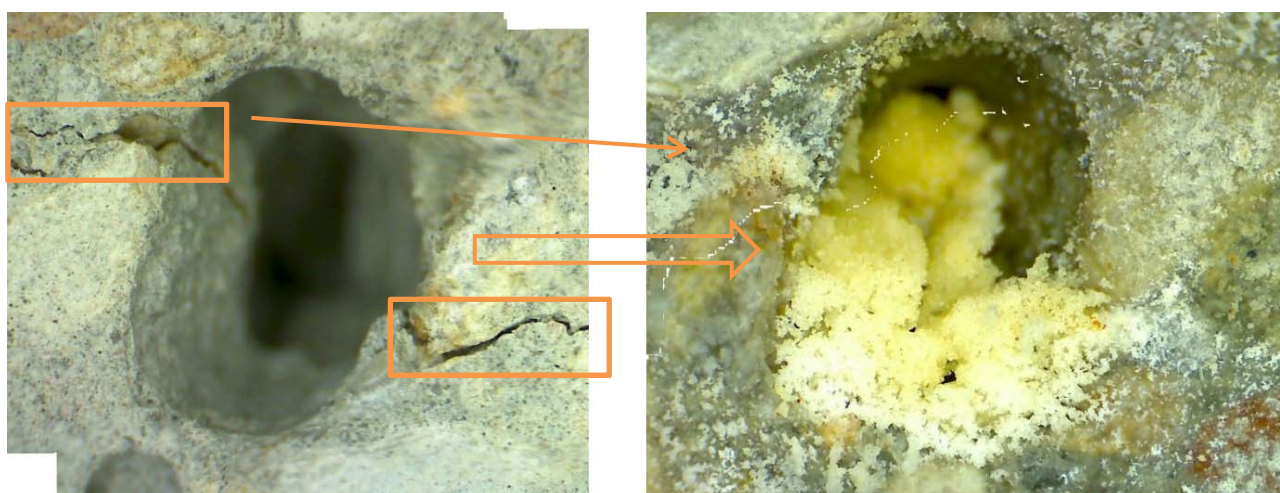


Figura 4.42 Impasto AM4S-2, campione 2B, superficie inferiore, immersione in acqua. Particolare formazione di cristalli all'interno di un poro di grosse dimensioni.

In figura 4.42 viene mostrato un altro esempio di formazione dei cristalli all'interno di un poro di grosse dimensioni. Il confronto tra le condizioni iniziali e dopo la cura mostra l'evidente

riempimento, seppur non completo, del poro in esame. Si può osservare, inoltre, come non siano più apprezzabili le fessure presenti ai lati. Come evidenziato in figura, tali fessure sono completamente riempite dai cristalli di colore e forma simili a quelli presenti all'interno del poro.

Le immagini mostrate fino adesso hanno permesso di illustrare come una grande quantità d'acqua consenta la formazione di cristalli, anche in quantità elevata, visibili ad occhio nudo. Di seguito vengono presentati un paio di casi in grado di caratterizzare l'aspetto generale presentato dai campioni posti negli altri ambienti di cura.

Partendo dal caso in cui la fessura è stata mantenuta bagnata, vengono mostrate, nelle figura 4.43 e 4.44, le immagini rappresentative delle fessure visibili, rispettivamente, sulla faccia inferiore e superiore dello stesso campione.

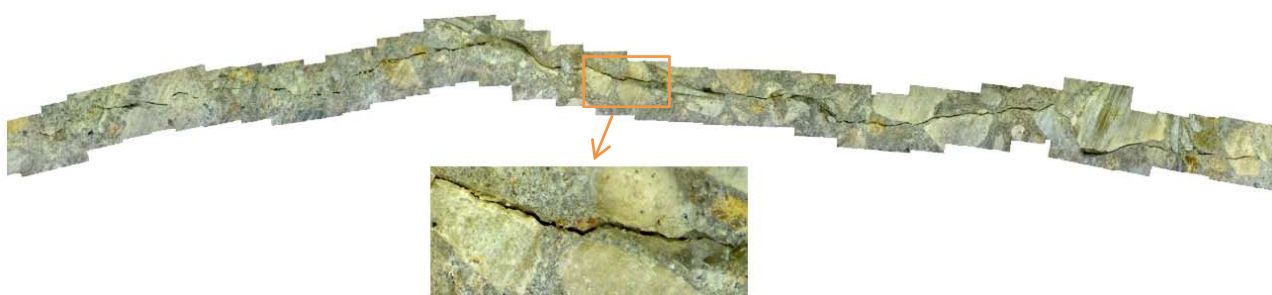


Figura 4.43 Impasto AM4S-4, campione 2A, superficie inferiore, fessura costantemente bagnata e strato spesso 2 cm di acqua liquida sulla superficie superiore. Stato della fessura dopo 42 giorni di cura.

Il campione in esame è il 2A dell'impasto AM4S-5 contenente l'additivo cristallino. Come si può facilmente osservare, mentre la fessura posta sulla faccia superiore (figura 4.44) si mostra quasi completamente sigillata, quella posta sull'altra faccia (figura 4.43) si presenta come una normale fessura in condizioni iniziali. Lo strato di 2 cm di acqua ha permesso la precipitazione di un numero maggiore di cristalli, sigillando completamente la fessura. Tale precipitazione è visibile anche nel poro ingrandito in figura, dove una serie di cristalli bianchi si sono formati a partire dalle pareti laterali del poro stesso. Il campione in esame ha raggiunto un healing rate pari a 0,73. La fessura, infatti, non si è sigillata completamente e in alcune zone in cui sono presenti degli aggregati spaccatisi al momento della prefessurazione. In queste zone raramente è stata apprezzabile la chiusura della fessura, a causa dell'assenza, sulle pareti di queste fessure, di particelle di cemento o di additivo cristallino.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.



Figura 4.44 Impasto AM4S-4, campione 2A, superficie superiore, fessura costantemente bagnata e strato spesso 2 cm di acqua liquida sulla superficie superiore. Stato della fessura dopo 42 giorni di cura.

In figura 4.45 viene mostrato un caso relativo sempre allo stesso ambiente di cura, ma riguardante un campione di controllo. L'aspetto finale della fessura è alterato ed è possibile osservare la presenza di cristalli formatisi sulle superfici laterali. L'ampiezza media della fessura non è diminuita molto, raggiungendo valori di healing rate del flusso e della stessa ampiezza media pari a 0,46. In figura vengono mostrati i singoli cristalli visibili chiaramente al microscopio.

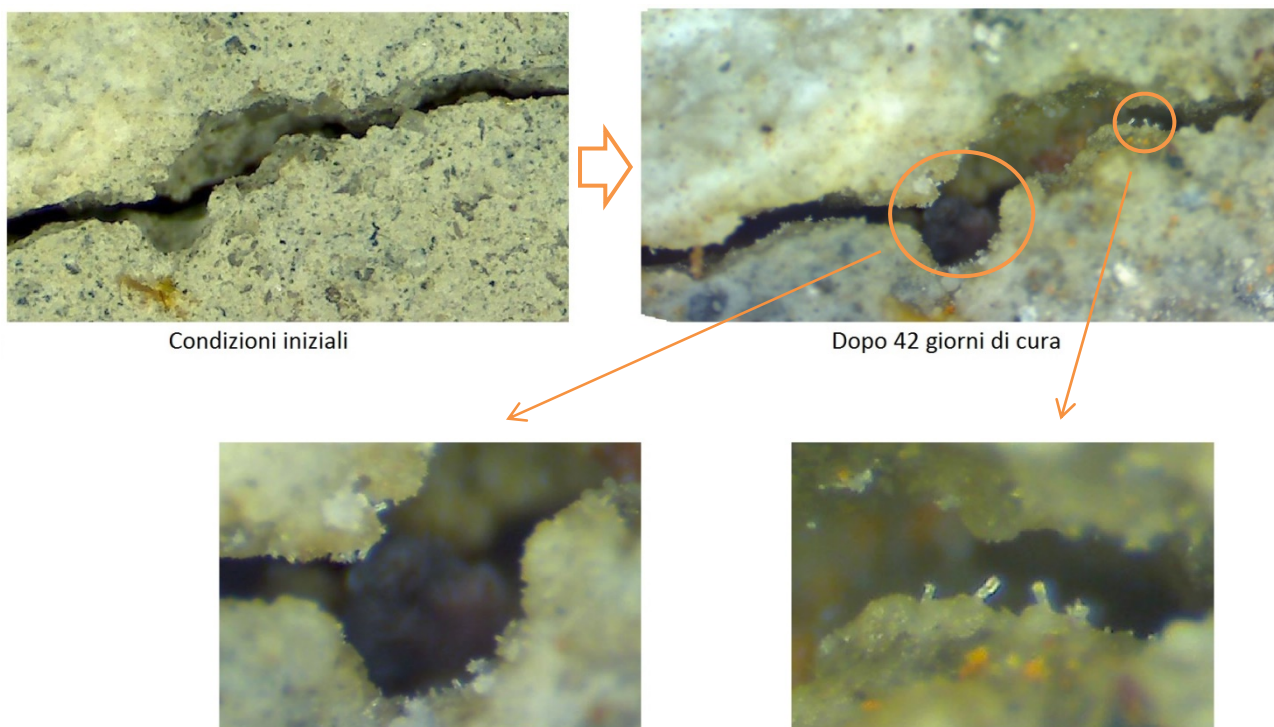


Figura 4.45 Impasto AM0-5, campione 1°, superficie superiore, fessura costantemente bagnata e strato spesso 2 cm di acqua liquida sulla superficie superiore. Stato della fessura prima e dopo la cura, particolare zoom sulla formazione di cristalli.

Meno interessante risulta, invece, lo studio delle fessure dei campioni esposti all'aria trattata della camera umida e a quella non trattata del laboratorio. Anche se in alcuni campioni è stata registrata una diminuzione del flusso di circa il 20-30%, l'aspetto finale delle fessure è apparso invariato rispetto quello iniziale.

Camera Umida
AM4S-3, campione 1A, sup. inferiore



Condizioni iniziali



Dopo 42 giorni di cura

Esposizione ad aria non trattata
AM0-6, campione 1A, sup. superiore



Condizioni iniziali



Dopo 42 giorni di cura

Figura 4.46 Evoluzione delle fessure dei campioni esposti all'aria trattata della camera umida e all'aria non trattata del laboratorio. Particolare zoom della stessa sezione di fessura, prima e dopo la cura.

In figura 4.46 vengono mostrati due esempi di fessure, prima e dopo la cura, per i campioni curati in questi due ambienti. Come risulta evidente in nessuno dei due casi si osservano differenze rilevanti dell'ampiezza o dell'aspetto generale della fessura.

4.8 Confronto con studi precedenti

Nel seguente paragrafo verranno confrontati i risultati ottenuti con quelli di studi precedenti e aventi obiettivi simili a quelli di questa ricerca. Parte di queste informazioni sono già state esposte nel capitolo 2, nel paragrafo relativo al self healing mediante l'utilizzo di additivi cristallini e delle aggiunte espansive (paragrafo 2.4.4).

La già citata ricerca di Sisomphon e Capuroglu del 2011 [33], ha studiato visivamente la sigillatura delle fessure su malte di diverso tipo: controllo, con contenuto di additivo cristallino pari all'1,5% nel peso di cemento, con contenuto di aggiunta espansiva pari al 10% nel peso di cemento, combinazione dell'1,5% dell'additivo cristallino e del 10% dell'aggiunta espansiva. L'unico ambiente di cura analizzato è l'immersione in acqua. In figura 4.47 vengono mostrati i risultati ottenuti da questi autori.

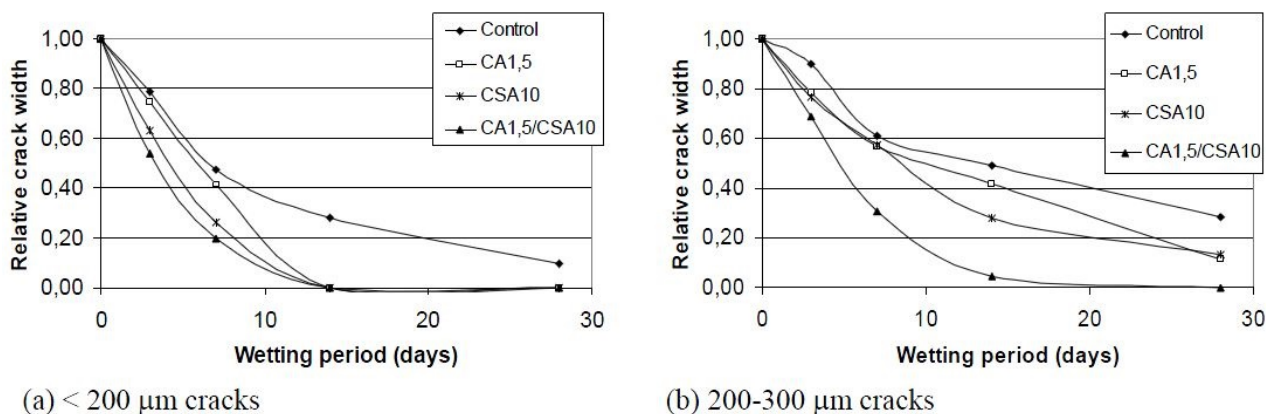


Figura 4.47 Effetto dell'ampiezza iniziale della fessura sulla sua riduzione. [33]

I grafici presentati esaminano l'evoluzione dell'ampiezza della fessura durante un periodo di cura della durata di 28 giorni. I campioni con additivo e aggiunte espansive mostrano la completa chiusura delle fessure in circa 14 giorni per ampiezze iniziali inferiori a 0,2 mm. Per ampiezze maggiori gli unici campioni a raggiungere la completa chiusura, in circa 20 giorni, sono quelli contenenti la contemporanea miscela di additivo cristallino e aggiunte espansive. Gli altri campioni raggiungono, comunque, ampiezze finali pari a circa il 15% di quelle iniziali.

Confrontando i risultati con quelli ottenuti in questa ricerca e relativi ai soli dati immersi in acqua, si può osservare una differenza sostanziale tra le ampiezze finali rilevate. Nonostante l'utilizzo di una percentuale molto elevata di additivo cristallino, di una durata maggiore del periodo di cura e di fessure mediamente meno ampie, il numero di campioni completamente sigillati è stato esiguo. Sembra, quindi, che l'aumento del contenuto di additivo non abbia giovato particolarmente ai processi del self healing. Le fessure meno ampie potrebbero essere state caratterizzate da una minore quantità d'acqua penetrata all'interno durante la cura. Per verificare ciò sarebbe opportuno eseguire delle prove con la stessa percentuale di additivo e verificare se la differenza dei risultati sia dipesa dalla diversa metodologia o da particolari accorgimenti nel mix design.

Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol [28] hanno studiato diversi tipi di additivi utilizzati come agenti curativi in un unico ambiente di cura, ovvero l'immersione in acqua. I risultati ottenuti da questi autori indicano una maggiore efficienza per le malte con additivo cristallino (1% nel peso di volume del cemento) nel caso di fessure con ampiezza massima inferiore a 0,1 mm, mentre per fessure maggiori gli altri prodotti hanno mostrato comportamenti migliori sigillando le fessure più rapidamente.

In figura 4.48 sono stati riportati i risultati in cui il grado di guarigione, espresso mediante un indice $\mathcal{R}(t)$, viene messo in relazione con il tempo di cura. I grafici mostrati si riferiscono, comunque, ai soli campioni prefessurati a tre giorni e, quindi, in condizioni molto simili a quelle dei campioni di questa ricerca. Come si può osservare, per fessure con ampiezza media man mano più grandi l'efficacia dell'additivo decresce. Per fessure inferiori a 0,1 mm risulta essere il più rapido nella sigillatura della fessura, raggiungendo valori di $\mathcal{R}(t)$ superiori all'0,8 nei primi giorni di cura. I campioni raggiungono, comunque, la completa sigillatura in 44 giorni.

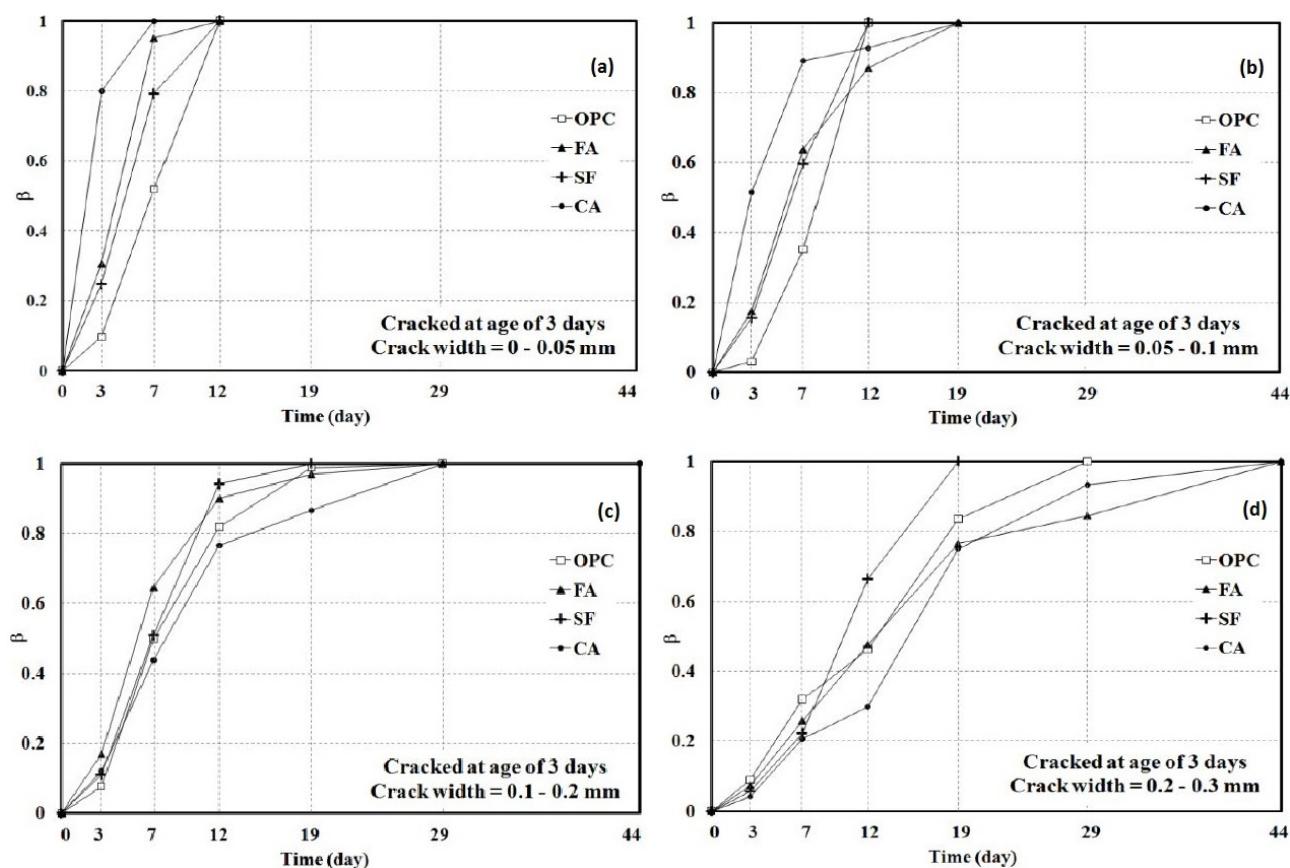


Figura 4.48 Evoluzione del self-healing ratio durante il periodo di cura per fessure di diversa ampiezza e campioni prefessurati a tre giorni. [28].

È stato usato un contenuto di additivo cristallino pari all'1%, molto inferiore a quello usato in questa ricerca. Anche in questo caso nel confronto tra i dati risulta che con una percentuale maggiore di additivo non si notano miglioramenti del self healing, i risultati, invece, risultano inferiori. Future linee di ricerca potrebbero interessare l'uso congiunto di additivo cristallino e filler reattivi come fumo di silice o ceneri volanti, visti gli ottimi risultati ottenuti anche da altri ricercatori.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

Capitolo 5 – CONCLUSIONI

5.1 Conclusioni

L'obiettivo di questa ricerca è stato quello di studiare come l'aggiunta di un additivo cristallino, commercializzato principalmente come riduttore di permeabilità, possa migliorare la capacità di autoguarigione del calcestruzzo. Il self-healing autogeno è stato già oggetto di studi precedenti, ed è stato descritto all'interno del capitolo 2 del presente elaborato. Riassumendo un calcestruzzo di controllo e uno con l'aggiunta di additivo cristallino sono stati confrontati di volta in volta i risultati ottenuti. Gli aspetti osservati sono stati la permeabilità e l'aspetto della fessura, il secondo con l'obiettivo di determinare la metodologia migliore per la valutazione dell'apertura della fessura in relazione alla permeabilità conseguente alla sua apertura. Per permettere di trovare sotto quali condizioni il self healing possa essere ritenuto valido ai fini del miglioramento delle proprietà del calcestruzzo, sono stati studiati e analizzati quattro diversi ambienti di cura ai quali i campioni sono stati sottoposti per un periodo della durata di 42 giorni. I parametri della ricerca, quindi, sono stati stabiliti in funzione della tipologia del calcestruzzo e dell'ambiente cui sono stati soggetti i campioni durante la cura.

Per la valutazione della permeabilità è stata utilizzata la prova di permeabilità modificata, mostrata nel capitolo 3, mentre per la valutazione dell'apertura della fessura è stata eseguita un'attenta indagine che ha avuto come principale strumento il microscopio ottico. La prova di permeabilità modificata ha permesso di valutare egregiamente la variazione del flusso d'acqua all'interno dei campioni studiati, così come le lavorazioni antecedenti a tale prova hanno permesso, dopo le modifiche effettuate in fase iniziale, di eseguire la prova nel modo più attendibile possibile. La definizione di un intervallo più ristretto della pressione fornita all'acqua durante la prova ha, infatti, permesso l'ottenimento di dati più affidabili. Lo studio delle diverse metodologie di misurazione della fessura ha, invece, consentito di trovare la metodologia migliore per la valutazione della fessura stessa.

La conclusione principale tratta dalla prova di permeabilità è che l'utilizzo dell'additivo cristallino influisce positivamente sulla variazione della permeabilità. In tutti i casi è stata osservata la diminuzione di tale proprietà in misura maggiore per i campioni con additivo. Si va da comportamenti molto simili delle due tipologie di calcestruzzo, fino a differenze dei valori degli indici di guarigione, opportunamente definiti, superiori al 60%. In presenza di acqua il calcestruzzo ordinario, anche se non fornisce valori superiori a quelli dell'additivo, è caratterizzato da specifiche percentuali di guarigione. La differenza maggiore è stata rilevata per gli ambienti in cui i campioni sono stati a contatto con aria contenente diverse quantità di vapore e temperature differenti. L'additivo, in questi casi, ha mostrato la capacità di avviare la reazione di precipitazione dei cristalli in grado di chiudere, in misura minore, le fessure e contrastando, nel caso dell'esposizione all'aria non trattata, gli effetti del ritiro dovuti all'età giovane del calcestruzzo al momento della prefessurazione. Tale capacità è dovuta principalmente alle proprietà idrofile di

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

tali additivi, che garantiscono l'utilizzo di una quantità maggiore di acqua contenuta nell'aria durante i processi d'idratazione.

Lo studio delle metodologie per la misurazione delle fessure è stato ritenuto necessario per fornire un metodo, utilizzabile in futuro, che permetta di fornire dati correlabili con la permeabilità di campioni di calcestruzzo danneggiati dalla presenza di fessure. I dati ottenuti sono stati sempre confrontati con quelli acquisiti dalla prova di permeabilità. La metodologia che ha fornito relazioni migliori e una minore dispersione dei dati è stata quella che permette di determinare un'ampiezza media tramite la misurazione di cinque diverse ampiezze a distanza definita l'una dall'altra, codificata in questo elaborato come W_{media} . Questo sistema ha permesso di ottenere relazioni, che mostrano l'andamento del flusso in funzione dell'apertura della fessura, definendo un andamento decrescente man mano che diminuisce l'ampiezza media della fessura.

È stato possibile, quindi, osservare come l'aspetto della fessura è variato durante la cura e come i differenti ambienti abbiano inciso sulla riduzione dell'ampiezza media. I risultati sono molto simili a quelli ottenuti nello studio sulla permeabilità, mostrando andamenti e dispersioni dei dati analoghi. Tutto ciò ha confermato come la metodologia scelta permetta di studiare il self-healing e la variazione della permeabilità con una buona approssimazione.

A conclusione della ricerca, sono stati analizzati i panorami ad alta risoluzione composti con le foto scattate al microscopio. Lo scopo principale è stato quello di valutare visivamente l'evoluzione dell'aspetto generale delle fessure in base all'ambiente studiato. Le osservazioni hanno permesso di rilevare formazioni ingenti di cristalli per i campioni esposti al contatto con acqua liquida. È stata, inoltre, testata la resistenza di tali cristalli mediante la sottomissione dei campioni a un getto d'aria a pressione. È stato constatato che per i cristalli formati in ambienti ristretti, come ad esempio l'interno della fessura, la resistenza raggiunta permette di bloccare il passaggio di un fluido in pressione senza alterazioni della struttura. Per ambienti più ampi, come ad esempio l'interno di un poro o di fessure che attraversano pori, i cristalli, non possedendo un reticolo sufficientemente fitto, non raggiungono livelli di resistenza adeguati e non sono in grado di resistere al passaggio di un fluido a pressione.

Per le ragioni sopra esposte, si conclude che l'additivo cristallino risulti vantaggioso in tutti gli ambienti studiati, in particolare per ambienti completamente immersi in acqua o esposti all'aria. Il prezzo di tale prodotto risulta, però, ancora troppo elevato per un largo utilizzo. Ritenendo le strutture immerse quelle più soggette al degrado in caso di fessurazione, un aumento anche parziale delle proprietà di autoguarigione del calcestruzzo che le compone può sempre risultare vantaggioso. In questi casi, quindi, l'uso degli additivi cristallini porta ad un aumento della vita utile e ad una riduzione delle manutenzioni richieste nel tempo per tali strutture, con riduzione dei costi totali che possono compensare il maggior costo iniziale.

5.2 Future linee di studio

Visti i risultati ottenuti, è stato possibile pensare quali parametri o condizioni sarebbe utile cambiare o semplicemente variare per caratterizzare meglio il problema legato al self healing. Lo

scopo principale della ricerca è stato quello di valutare il recupero della permeabilità iniziale del calcestruzzo fessurato.

Avendo prefessurato i campioni all'età di due giorni, la percentuale di particelle di cemento reattive è molto elevata. In questo modo si è cercato di favorire il più possibile il processo di chiusura delle fessure. Potrebbe essere molto interessante studiare campioni prefessurati dopo i 28 giorni necessari al raggiungimento della quasi massima resistenza a compressione. In questo modo a reagire durante il periodo di cura sarebbero solo le particelle dell'additivo cristallino, note per la reazione tardiva nel calcestruzzo, e sarebbe, quindi, possibile osservare con più chiarezza se con una percentuale così alta di additivo (4% nel peso di volume del cemento) si migliori o meno le reazioni alla base del self healing.

Altri aspetti che si propone di studiare per caratterizzare meglio il fenomeno dipendono dai seguenti parametri:

- Tipo di acqua: acqua non trattata, distillata o marina;
- Influenza della presenza di particolari filler, come fumo di silice o cenere volante;
- Tipo di cemento: in funzione della classe resistente, in funzione della composizione, utilizzo di additivi particolari, ecc...;
- Studiare un ambiente di cura che prevede cicli bagnato/secco per i campioni.

A tutto ciò si potrebbero aggiungere studi preliminari sul recupero delle proprietà meccaniche del calcestruzzo per merito della presenza dell'additivo cristallino.

Riguardo il fenomeno generale del self healing, le metodologie approntate da altri ricercatori sono ancora in fase molto acerba e aprono il campo a un numero elevato di ricerche in grado di approfondire meglio gli aspetti di ogni singola metodologia e sistema.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

Bibliografia

1. **Toniolo, G. e Prisco, M. Di.** *Cemento Armato. Calcolo agli stati limite - Vol. 2A.* s.l. : Zanichelli, 2011.
2. *Is there a market for self-healing cement-based materials?* **Bruegel, K. Van.** Noordwijk aan Zee : s.n., 2007. First International Conference on Self-Healing Materials.
3. *Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self-Healing Mechanisms - Recent Advances in Self-Healing Concrete and Asphalt.* **Schlangen, E. e Sangadji, S.** s.l. : Sciverse ScienceDirect, 2013. The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering.
4. *Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete.* **Mihashi, H. e Nishiwaki, T.** 2012, Journal of Advanced Concrete Technology, p. 170-184.
5. **Ramm, W. e Biscopig, M.** Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete. *Nuclear Engineering and Design* 179. 1998, p. 191-200.
6. **Heide, Nynke ter.** *Crack healing in hydrating concrete.* Delft : Delft University of Technology, 2005.
7. *Contribution to study of the self-healing effect activated by crystalline catalysts in concrete structures.* **Takagi, E. M., Lima, M. G. e Helene, P. R. L.** 2012.
8. *Self-Healing in Cementitious Materials - A Review.* **Tittelboom, K. Van e Belie, N. De.** 2013, Materials, p. 2182-2217.
9. *Autogenous healing of cement paste.* **Lauer e Slate.** 1956.
10. *Influence of damage degree on self-healing of concrete.* **Zhong, W. e Yao, W.** 2008, Construction and Building Materials - Vol. 22, p. 1137-1142.
11. *Influence of mix composition on the extent of autogenous crack-healing by continued hydration or calcium carbonate formation.* **Tittelboom, K. Van, et al.** 2012, Construction and Building Materials - Vol. 37, p. 340-359.
12. *Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash.* **Sahmaran, M., et al.** 2008, Cement & Concrete Composites - Vol. 30, p. 872-879.
13. *Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites.* **Homma, D., Mihashi, H. e Nishiwaki, T.** 2009, Journal of Advanced Concrete Technology - Vol. 7, p. 217-228.
14. *Self-healing of Engineered Cementitious Composites in the Natural Environment.* **Herbert, E. N. e Li, V. C.** 2011.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

15. **Yang, Y., Yang, E. e Li, V. C.** Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. *Cement and Concrete Research* - 41. 2011, p. 176-183.

16. *Experimental Study on Self-Healing Capability of FRCC Using Different Types of Synthetic Fibers.* **Nishiwaki, T., et al.** 2012, *Journal of Advanced Concrete Technology* - Vol. 10, p. 195-206.

17. **London, Imperial College.** Self Healing cracks with superabsorbent polymers. *Imperial College London*. [Online] 2012.

<http://www3.imperial.ac.uk/concretedurability/researchprojects/selfsealingconcrete>.

18. *Self-healing in ECC stimulated by SAP under flexural cyclic load.* **Kim, J. S. e Schlangen, E.** Bath, United Kingdom : s.n., 2011. 3rd International Conference on Self-Healing Materials.

19. *Visualization of water penetration in cementitious materials with superabsorbent polymers by means of neutron radiography.* **Snoeck, D., et al.** 2012, *Cement and Concrete Research* - Vol. 42, p. 1113-1121.

20. *Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage cured concrete without compromising the strength.* **Hasholt, M. T., et al.** 2012, *Construction and Building Materials* - Vol. 31, p. 226-230.

21. *Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire.* **Sakai, Y., et al.** 2003.

22. *Passive smart self-repairing concrete beams by using shape memory alloy wires and fibers containing adhesives.* **Kuang, Y. e Ou, J.** 2008, *J. Cent. South Univ. Technol.* - Vol. 15, p. 411-417.

23. *Self Healing Concrete: A Biological Approach.* **Jonkers, H. M.** 2007.

24. *Use of bacteria to repair cracks in concrete.* **Tittelboom, K. Van, et al.** 2010, *Cement and Concrete Research* - 40, p. 157-166.

25. *Bacteria-based self-healing concrete.* **Jonkers, H. M.** 2011.

26. *Use of bacterial cell walls to improve the mechanical performance of concrete.* **Pei, R., et al.** 2013, *Cement & Concrete Composites* - 39, p. 122-130.

27. *Self-Sealing Crystalline Coating and Self-Cleaning Nanocoating for the Concrete Substrate for a Sustainable Development.* **Pattanaik, S. C.** Hyderabad, India : s.n., 2011. International Conference ICTACE.

28. *Effects of Different Mineral Additives and Cracking Ages on Self-Healing Performance of Mortar.* **Jaroenratanapirom, D. e Sahamitmongkol, R.** 2010. Annual Concrete Conference 6.

29. *A fracture testing based approach to assess the self-healing capacity of cementitious composites.* **Ferrara, L. e Krelani, V.** 2013. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures.

30. *Use of expansive admixtures to minimize thermal shrinkage cracking.* **Rossetti, V., et al.**
31. *Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures.* **Ahn, T. e Kishi, T.** 2010, *Journal of Advanced Concrete Technology* - Vol. 8, p. 171-186.
32. *Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive.* **Sisomphon, K., Copuroglu, O. e Koenders, E. A. B.** 2012, *Cement & Concrete Composites* - Vol. 34, p. 566-574.
33. *Self healing mortars by using different cementitious materials.* **Sisomphon, K. e Copuroglu, O.** 2011.
34. **Dry, C. M.** Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. *Cement and Concrete Research.* 2000, Vol. 30, p. 1969-1977.
35. *Application of sodium silicate solution as self-healing agent in cementitious materials.* **Huang, H. e Ye, G.** Hong Kong, Cina : s.n., 2011. International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering.
36. *Methyl methacrylate as healing agent for self-healing cementitious materials.* **Tittelboom, K. Van, et al.** 2011, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20.
37. **Wang, J., et al.** Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials.* 2012, Vol. 26, p. 532-540.
38. **Joseph, C., et al.** Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. *Magazine of Concrete Research.* 2010, Vol. 11, p. 831-843.
39. **Sun, L., Yu, W. e Ge, Q.** Experimental research on the self-healing performance of micro-crack in concrete bridge. *Advanced Materials Research.* 2011, Vol. 250-253, p. 28-32.
40. **Dry, C. M. e McMillan, W.** Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete. *Smart Mater. Struct.* 1996, Vol. 5, p. 297-300.
41. *Development of Self-Healing System for Concrete with Selective Heating around Crack.* **Nishiwaki, T., et al.** 2006, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, p. 267-275.
42. *Porous network concrete - A new approach to make concrete structures self-healing using prefabricated porous layer.* **Sangadji, S. e Schlangen, E.** Bath, U. K. : s.n., 2011. 3rd International Conference on Self-Healing Materials.
43. *Self healing of Concrete Structures - Novel Approach using porous network concrete.* **Sangadji, S. e Schlangen, E.** 2012, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 10, p. 185-194.
44. **Flores, M. Roig e Ros, P. Serna.** *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.* Valencia : s.n., 2013. Tesi di laurea.

Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

APPENDICE A - Prove standard

A.1 Prova di abbassamento del cono

Sono state seguite le indicazioni fornite dalla normativa UNI EN 12350-2 “Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 2: Prova di abbassamento al cono”. Il principio è di compattare il calcestruzzo fresco in uno stampo a forma di cono e, una volta sfilato verso l’alto, misurare l’abbassamento del campione.

Il cono utilizzato è di metallo e possiede le seguenti caratteristiche:

- Spessore 2 mm;
- Diametro della base: 200 ± 2 mm;
- Diametro della parte superiore: 100 ± 2 mm;
- Altezza: 300 ± 2 mm.

Una volta inumidito lo stampo e la piastra di base, viene sistemato il cono sulla piastra posta orizzontalmente. Durante il riempimento, viene mantenuto fermo bloccandolo con le mani nella parte superiore, munita di appositi ganci, o nella parte inferiore con i piedi posizionati al di sopra delle staffe di base (figura A.1 (a)). Lo stampo viene riempito in tre strati successivi pari a circa un terzo della sua altezza. Per ogni strato viene effettuata l’assestamento mediante 25 colpi di barra di costipazione (figura A.1 (b)). Una volta riempito il cono, viene sfilato verso l’alto lentamente, in un tempo compreso tra 2 s e 5 s, tramite i ganci posti in sommità (figura A.1 (c)). Immediatamente dopo averlo rimosso, lo stampo viene posizionato vicino al cono di calcestruzzo così da poter misurare la differenza tra le due altezze, come mostrato in figura A.1 (d).

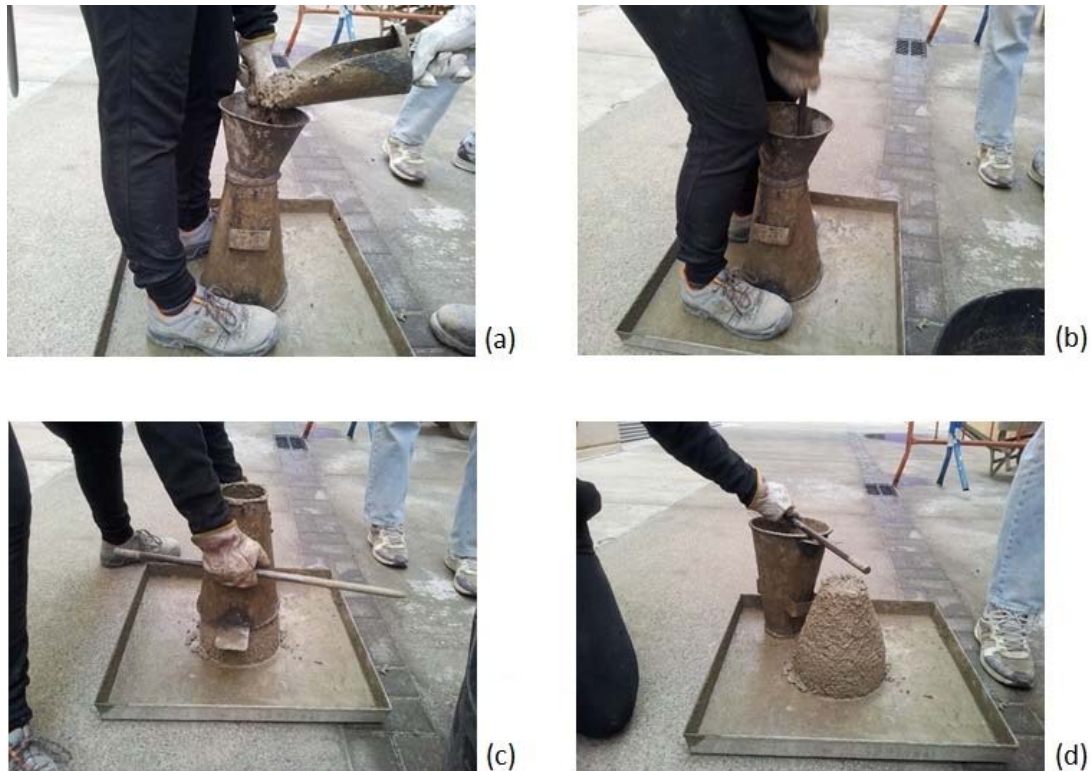


Figura A.1 Prova di abbassamento del cono: riempimento del cono (a), costipazione dell'impasto tramite barra d'acciaio con punta arrotondata (b), sfilamento del cono in un tempo compreso tra 2 e 5 secondi (c), misurazione differenza delle altezze tra la forma e il cono di calcestruzzo.

In figura A.2 è mostrato lo schema suggerito dalla normativa per l'esecuzione della misurazione, comparabile con quanto mostrato in figura A.1 (d).

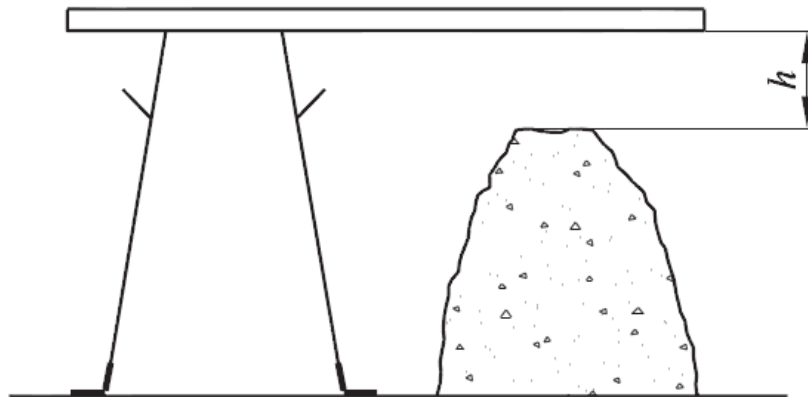


Figura A.2 Misurazione dell'abbassamento. UNI EN 12350-2.

La consistenza viene definita in base a intervalli di abbassamento definiti dalla norma UNI EN 206-1 " Calcestruzzo – Parte 1: Specificazioni, prestazione, produzione e conformità". In [figura A.3](#) viene rappresentata la tabella contenente le classi di consistenza riferite all'abbassamento del cono, nella quale è stato evidenziato il valore obiettivo del mix design.

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 ¹⁾	≥220

Figura A.3 Classi di abbassamento al cono (slump). UNI EN 206-1:2006.

In figura A.4 viene riportato un grafico contenente gli abbassamenti relativi ad ogni impasto miscelato.

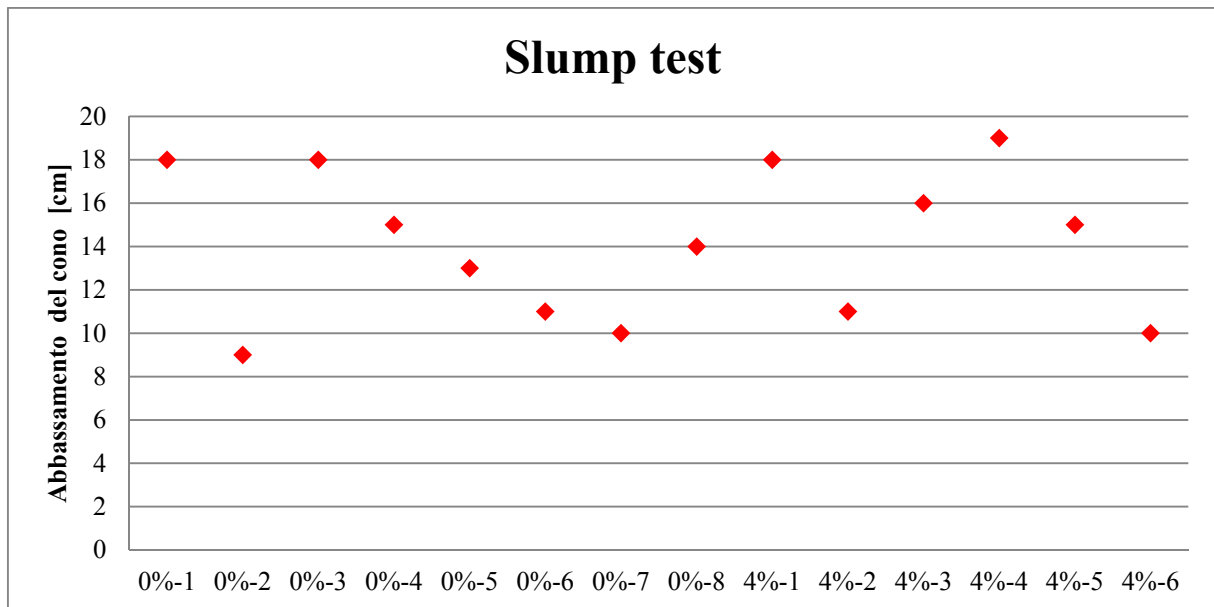


Figura A.4 Slump test, abbassamento del cono. Codificazione impasti: 0%, campioni di controllo, 4% campioni con additivo cristallino.

Impasto	Data miscelazione	Abbassamento del cono
[-]	[-]	[cm]
0%-1	28/10/2013	18
0%-2	28/10/2013	9
0%-3	05/11/2013	18
0%-4	12/11/2013	15
0%-5	26/11/2013	13
0%-6	26/11/2013	11
0%-7	09/12/2013	10
0%-8	21/01/2014	14
4%-1	12/11/2013	18
4%-2	19/11/2013	11
4%-3	19/11/2013	16
4%-4	02/12/2013	19
4%-5	02/12/2013	15
4%-6	27/01/2014	10

Tabella A.1 Abbassamento del cono relativo ad ogni impasto miscelato

A.2 Resistenza alla compressione dei provini

Per ogni impasto di calcestruzzo miscelato, con o senza additivo, sono stati scelti tre campioni da immagazzinare in camera umida per 28 giorni. I provini sono stati confezionati e stagionati come descritto dalla norma UNI EN 12390-2 "Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 2: Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza".

I campioni vengono lasciati nella cassaforma per 24 ore, posti su un piano liscio orizzontale e in un ambiente con temperatura di $20\pm 5^{\circ}\text{C}$. Rimossi dalla cassaforma, vengono conservati in una camera umida con temperatura pari a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa che va tra i $95\div 100\%$.

Per valutare la resistenza a compressione sono state seguite le indicazioni della norma UNI EN 12390-3 "Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini". I campioni sono stati asciugati dell'eccesso di umidità e, una volta puliti, sono state rimosse eventuali fibre fuoriuscenti dalla superficie superiore. Inoltre, per regolarizzare detta superficie, è stata necessaria la cappatura con una miscela di zolfo di spessore inferiore a 5 mm. La miscela è stata scaldata a una temperatura di 150°C e una volta constatato a vista la completa fusione dei componenti solidi, si è proceduto alla cappatura.

Le fasi principali sono riassunte di seguito:

1. Posizionamento del campione con la superficie da cappare rivolta verso il basso;
2. Utilizzo del disarmante sul piatto di supporto;
3. Versamento della miscela liquida sul piatto di supporto;
4. Posizionamento del campione sopra il piatto di supporto a velocità ridotta, così da evitare schizzi e una conseguente diminuzione della quantità di miscela che formerà la nuova superficie del cilindro;
5. Battitura della superficie libera con un martello di gomma, così da far fuoriuscire eventuali bolle d'aria inglobate al momento del posizionamento del cilindro;
6. Riempimento del bordo del piatto di supporto con altra miscela, così da uniformare la superficie finale del cilindro;
7. Una volta constatato l'indurimento della miscela, procedere con la battitura del piatto e parte della struttura di sostegno con un martello di gomma, così da facilitare il distacco del campione;
8. Prelevamento del campione e verifica dell'uniformità della nuova superficie.

Prima di eseguire la prova di compressione è necessario aspettare un minimo di 45 minuti per consentire alla miscela di solidificarsi completamente. Dopodiché, si procede con il posizionamento del campione sul piatto inferiore della pressa, in posizione centrale. Si avvita il piatto superiore fino al raggiungimento della completa aderenza con il campione. Si attiva la pressa idraulica selezionando una velocità di carico costante compresa tra i $0,6\pm 0,2$ MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2/\text{s}$) e aspettando il raggiungimento del carico massimo, avvertito al momento della rottura del campione. Viene registrato il valore in kN e convertito in MPa, con approssimazione allo 0,1 MPa, mediante la formula:

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

dove:

f_c è la resistenza alla compressione, espressa in MPa (N/mm²);

F È il carico massimo a rottura, espresso in N;

A_c È l'area della sezione trasversale del provino su cui agisce la forza di compressione, calcolata dalla dimensione nominale del provino (diametro di 15 cm)

Tra le rotture definite dalla norma soddisfacenti, è stata sempre ottenuta quella evidenziata in figura A.5. Questo tipo di rottura si manifesta nella maggior parte dei casi per via della presenza delle fibre, che ripartiscono il carico in tutto il volume del campione.

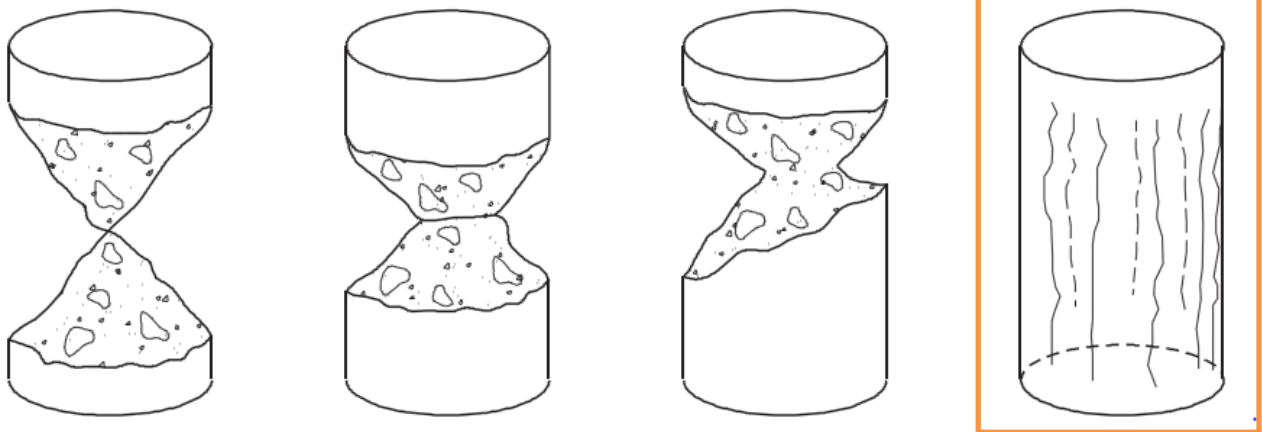


Figura A.5 Tipi di rotture ritenute soddisfacenti dalla norma UNI EN 12390-3.

In figura A.6 vengono mostrati i valori di resistenza a compressione relativi agli impasto miscelati.

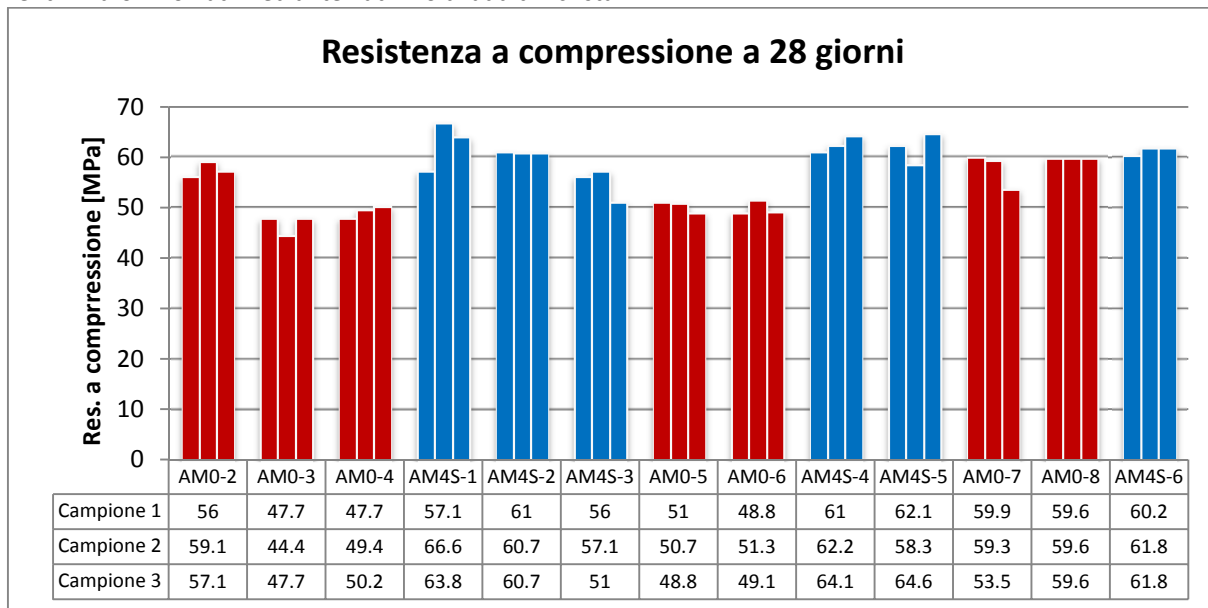
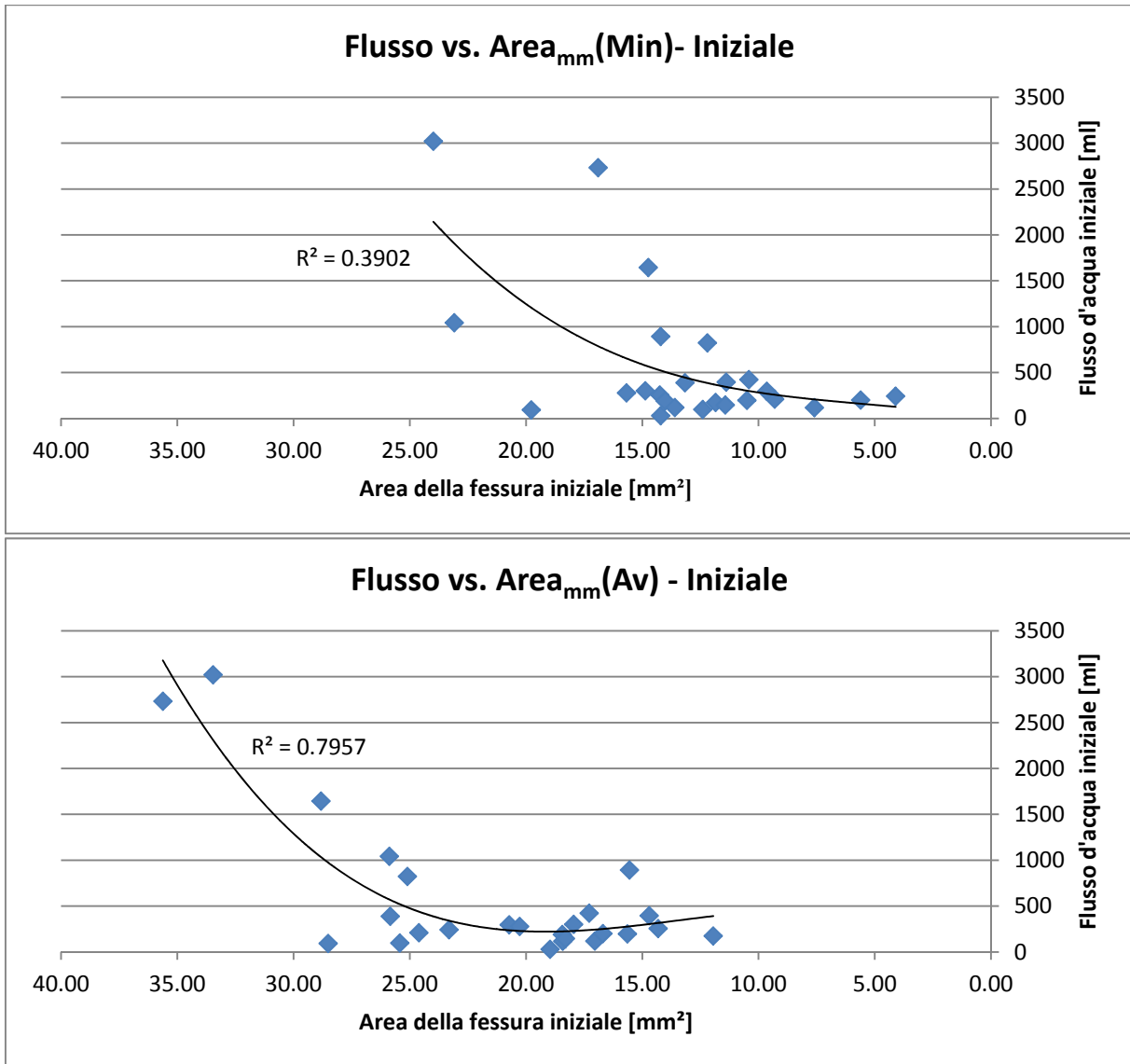
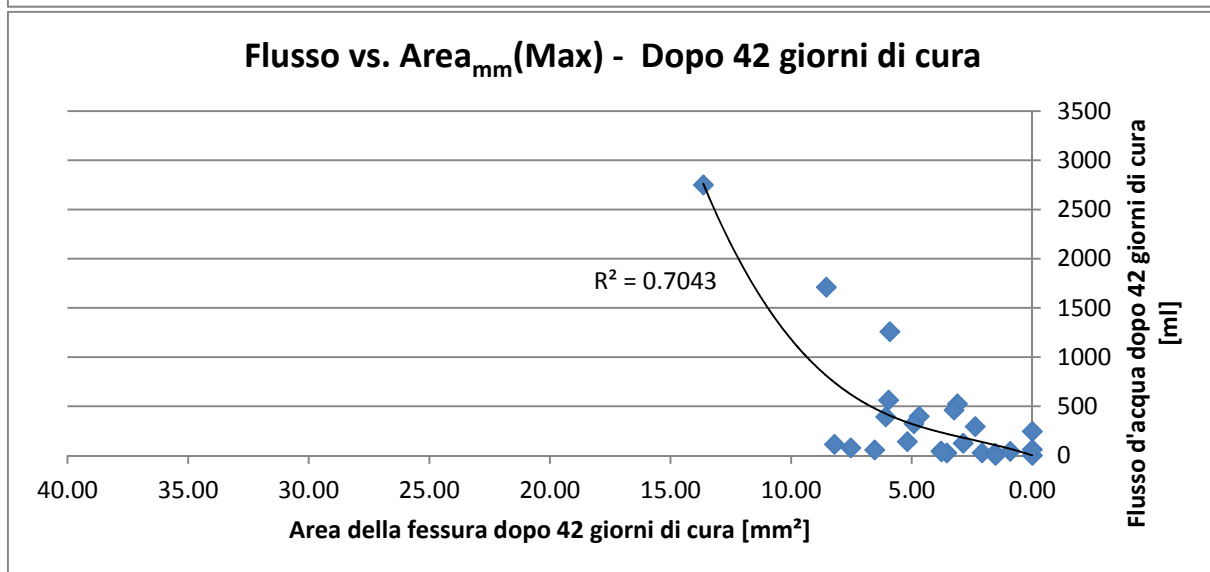
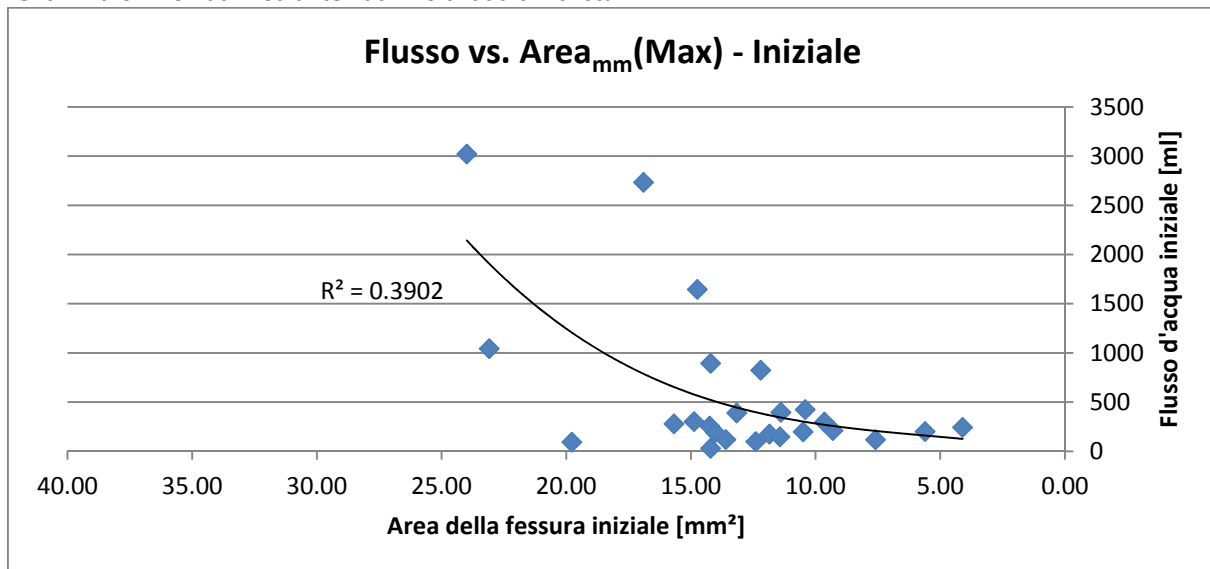


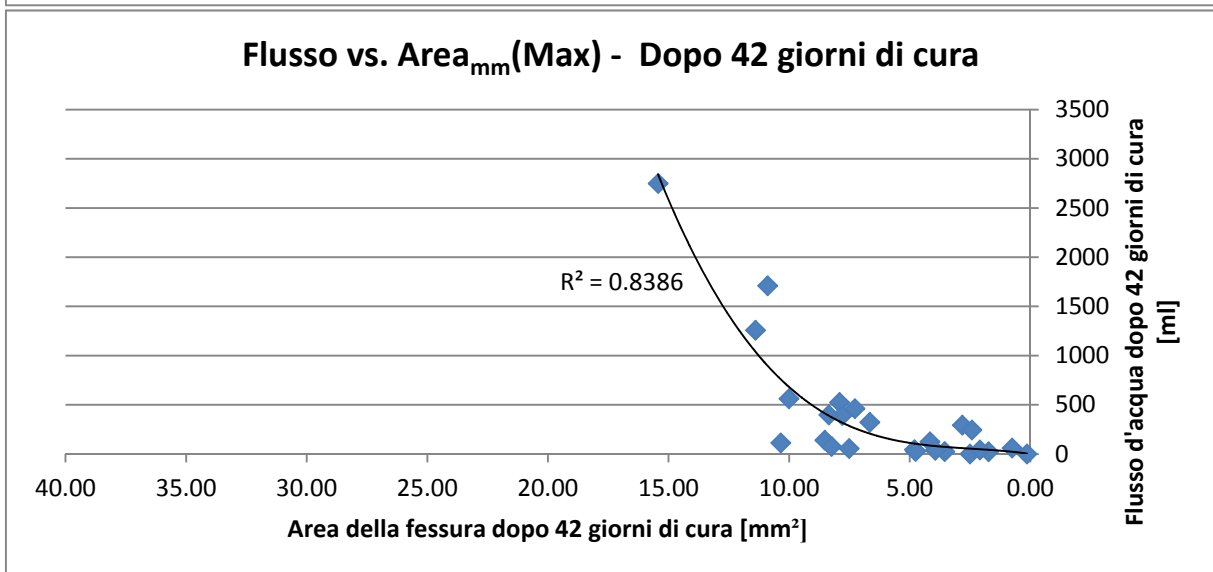
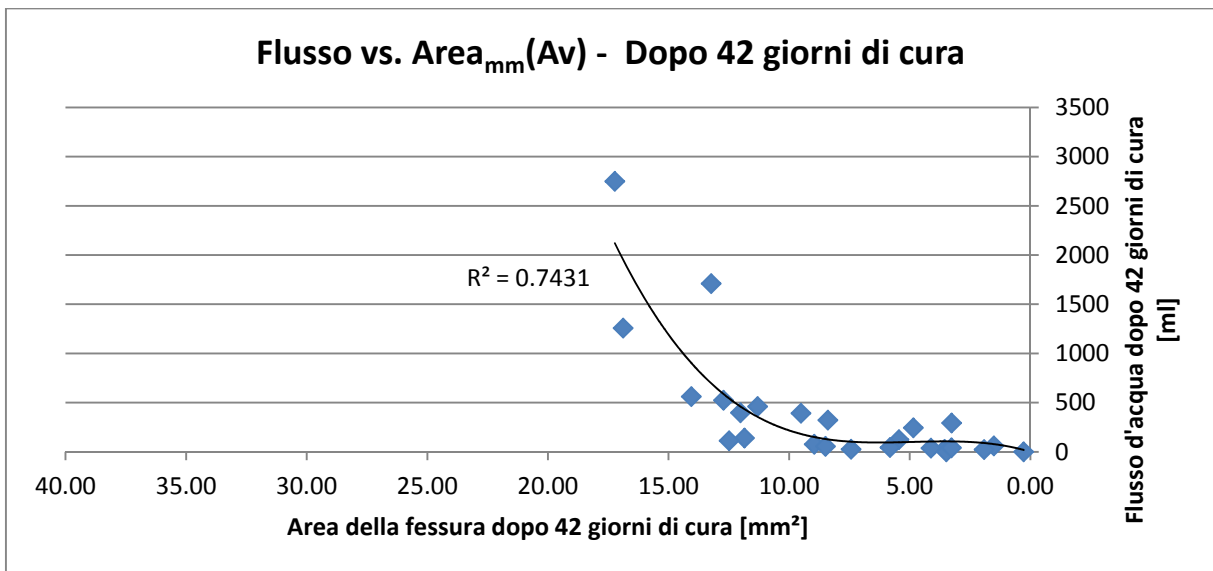
Figura A.6 Resistenza a compressione a 28 giorni degli impasti miscelati. In rosso sono rappresentati i campioni di controllo, mentre in blu quelli con contenuto di additivo cristallino pari al 4% nel peso di volume del cemento.

APPENDICE B - Relazione tra flusso e metodologia di misurazione della fessura

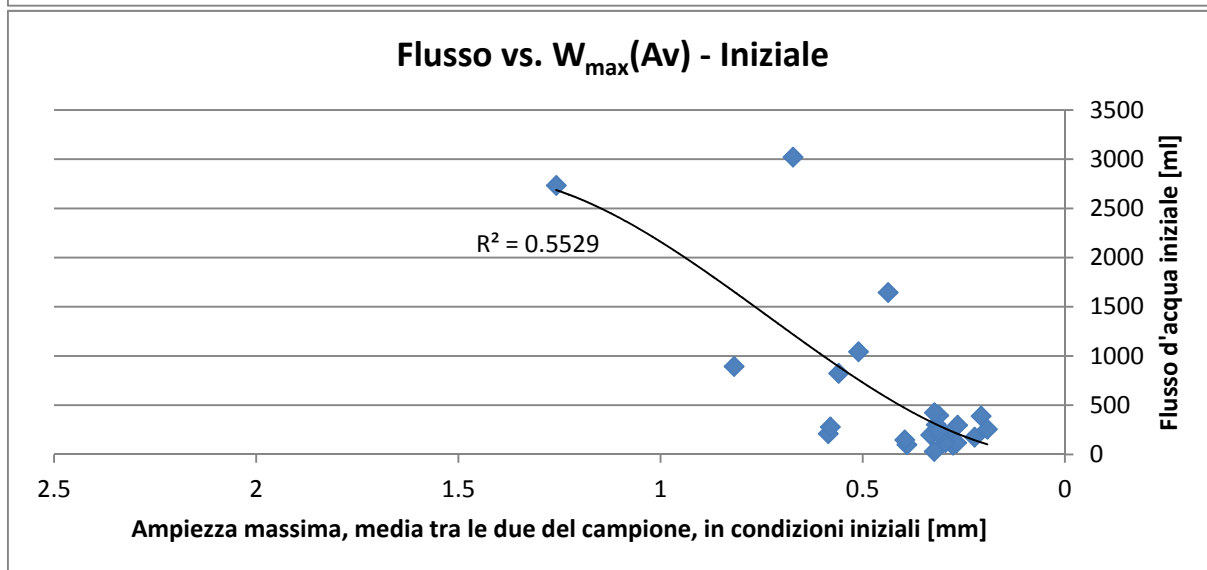
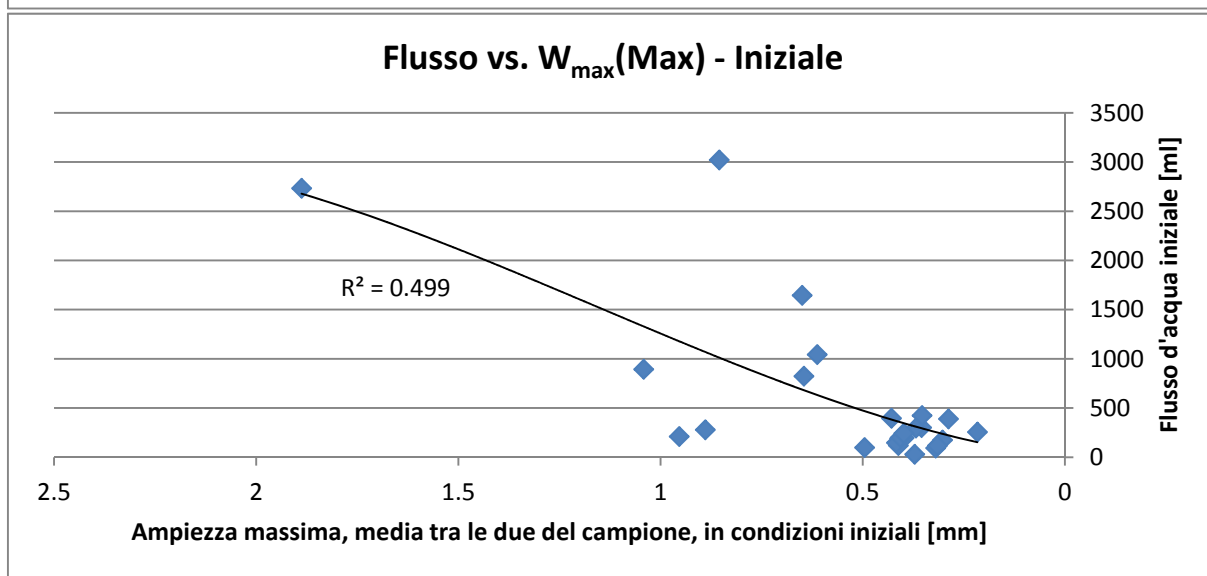
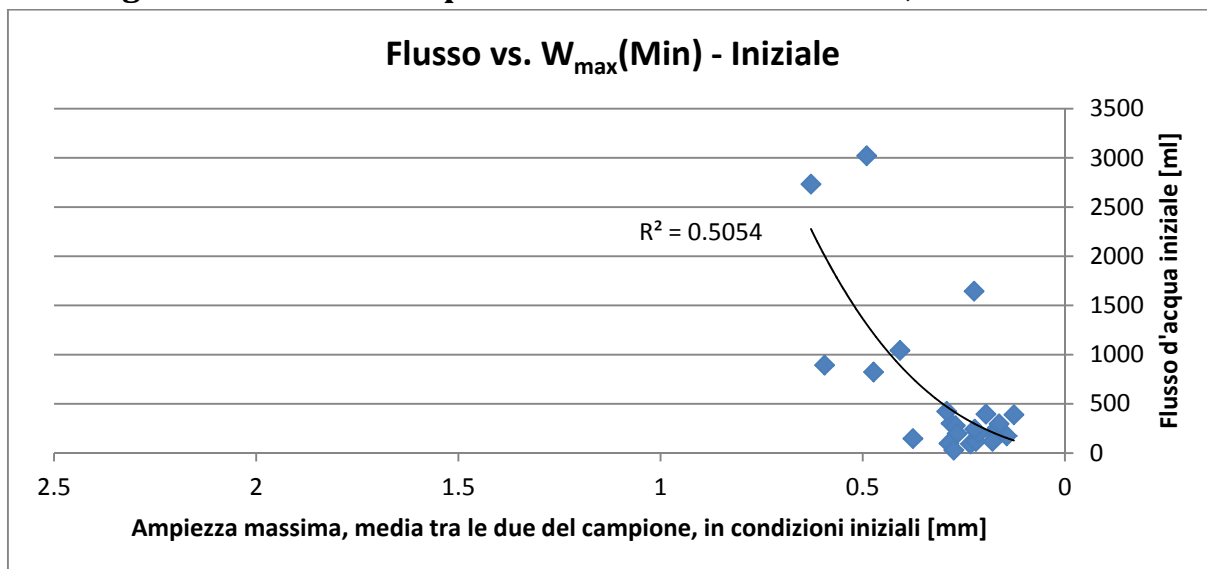
Metodologia: misurazione area della fessura, approssimazione come somma di cinque rettangoli definiti, $Area_{mm}$.

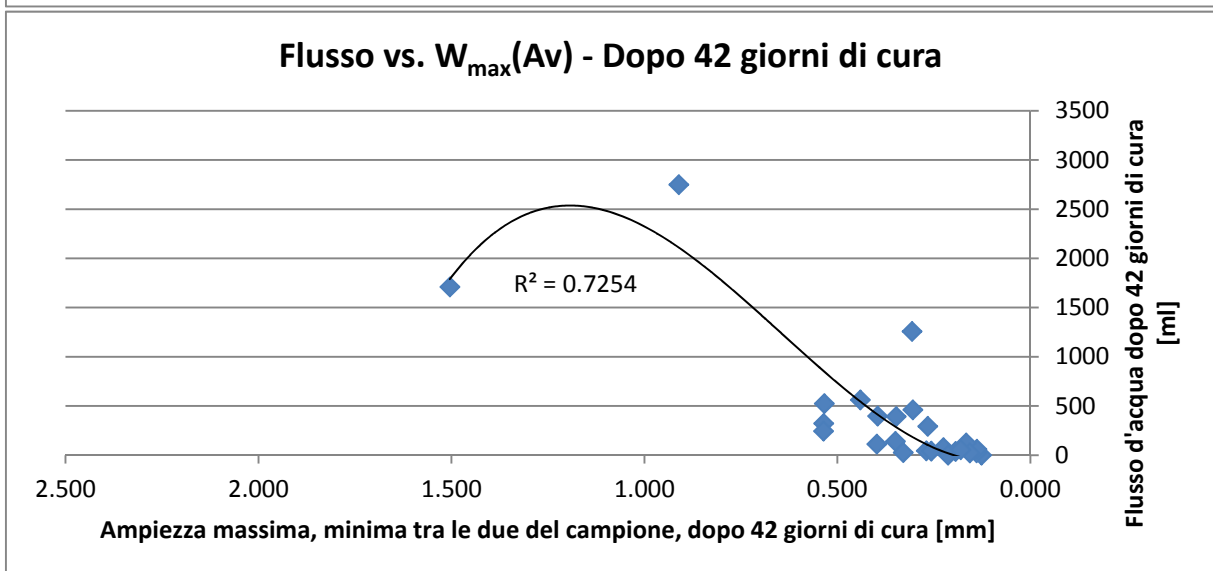
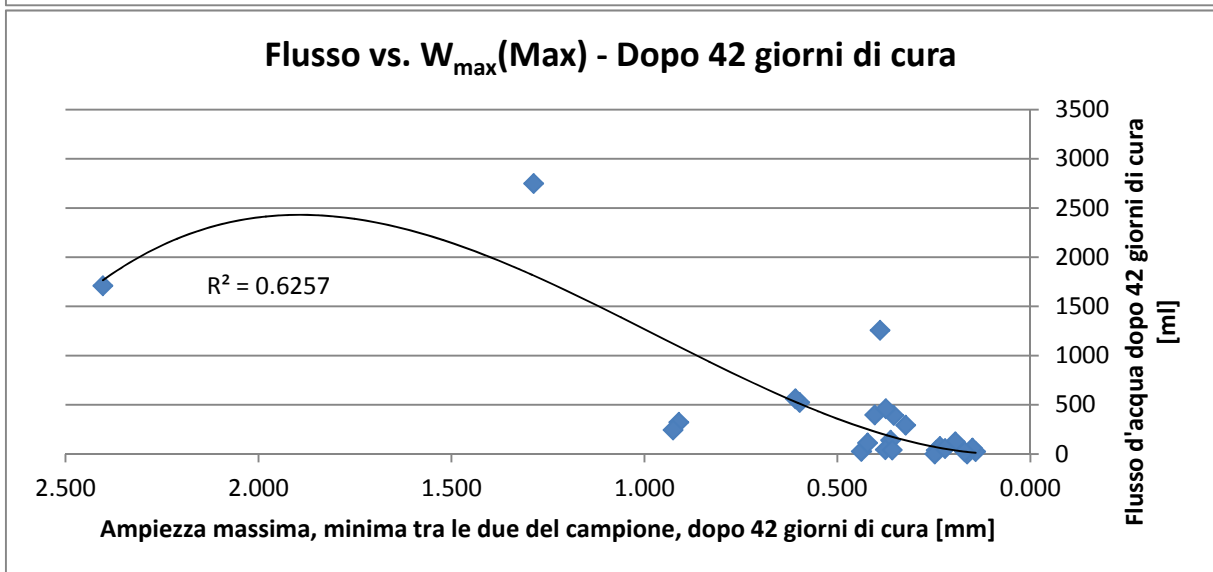
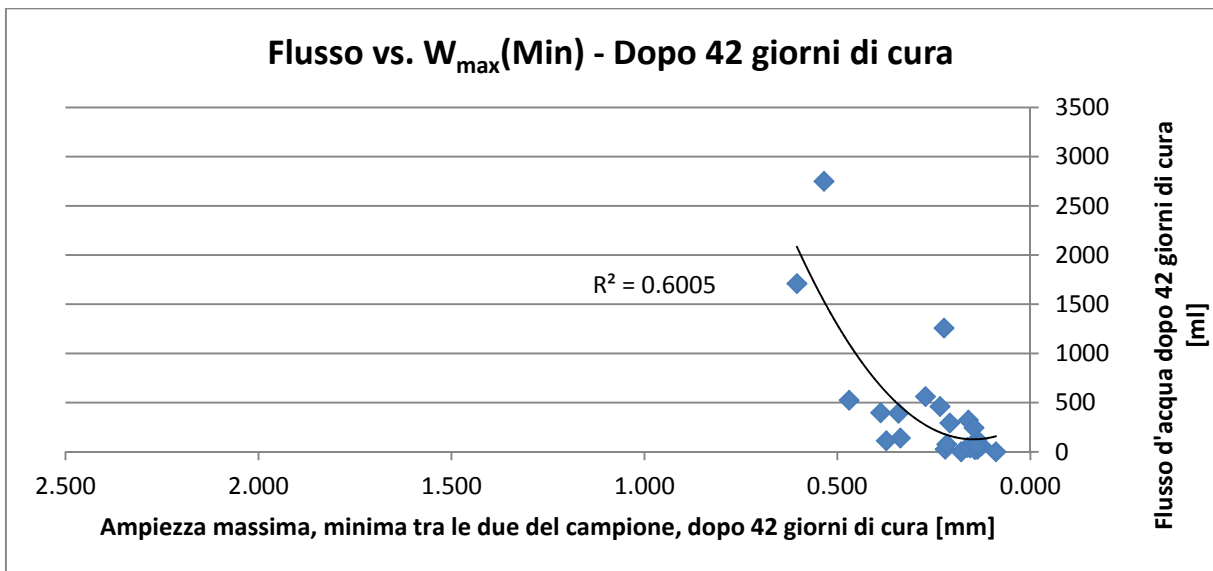




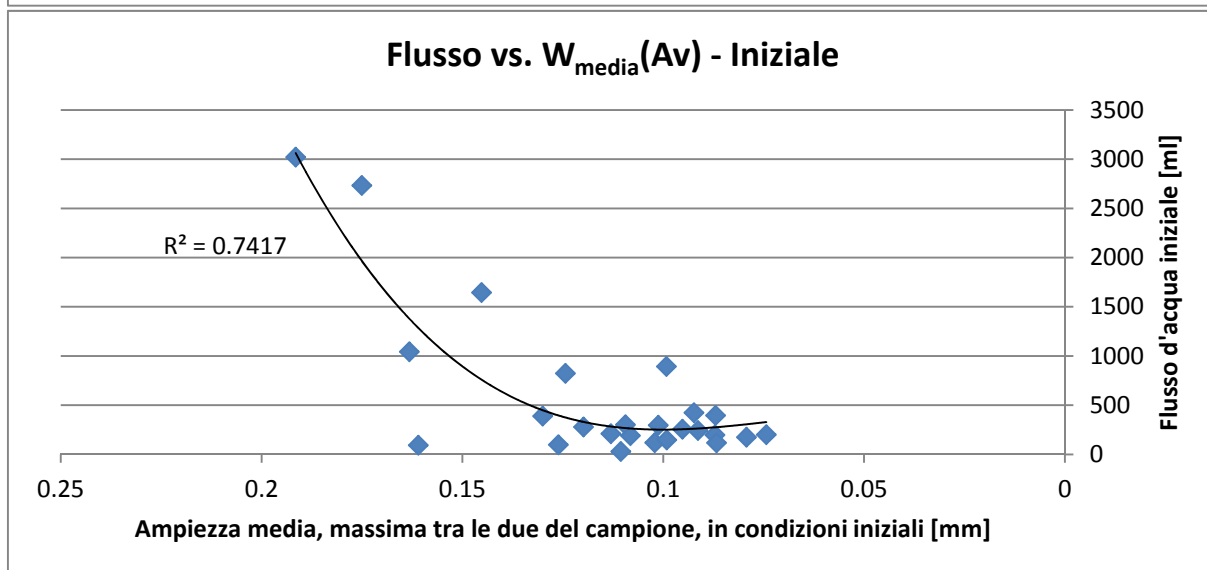
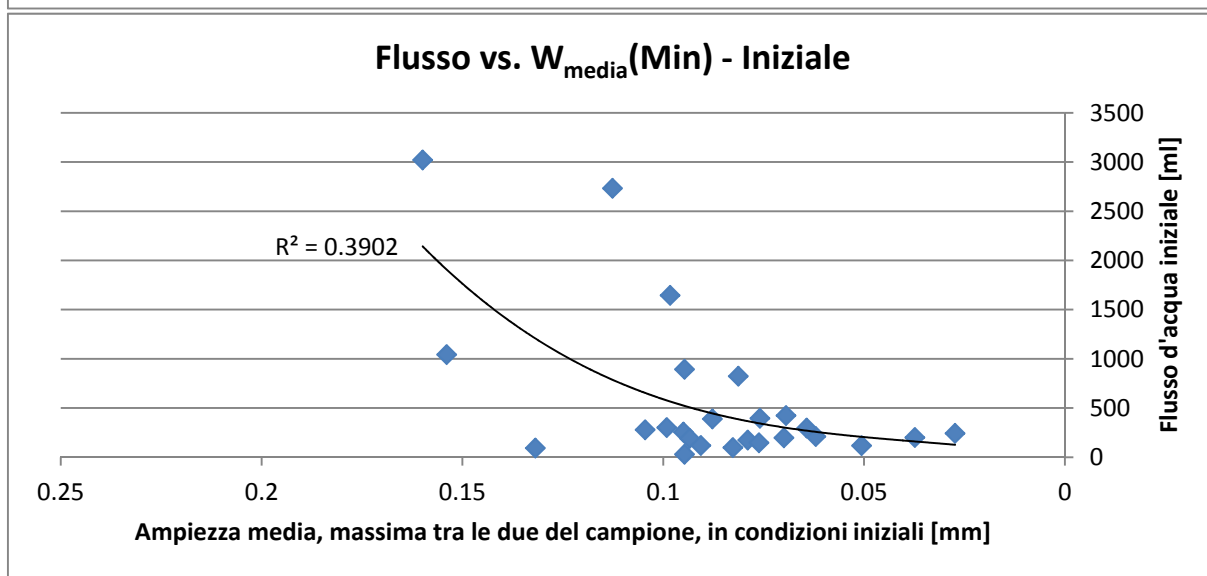
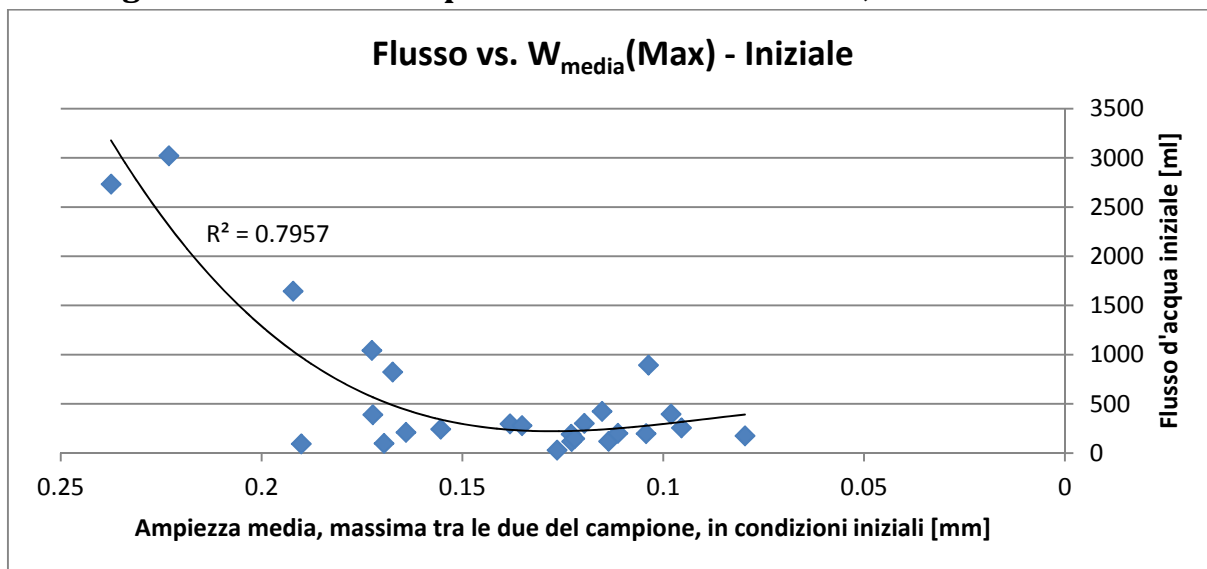


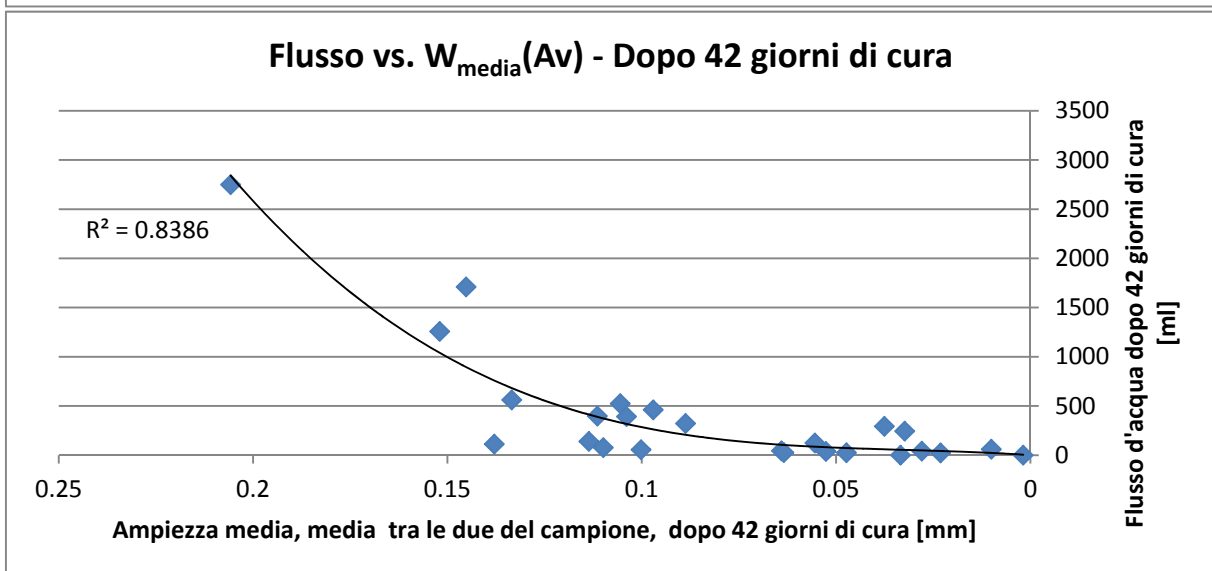
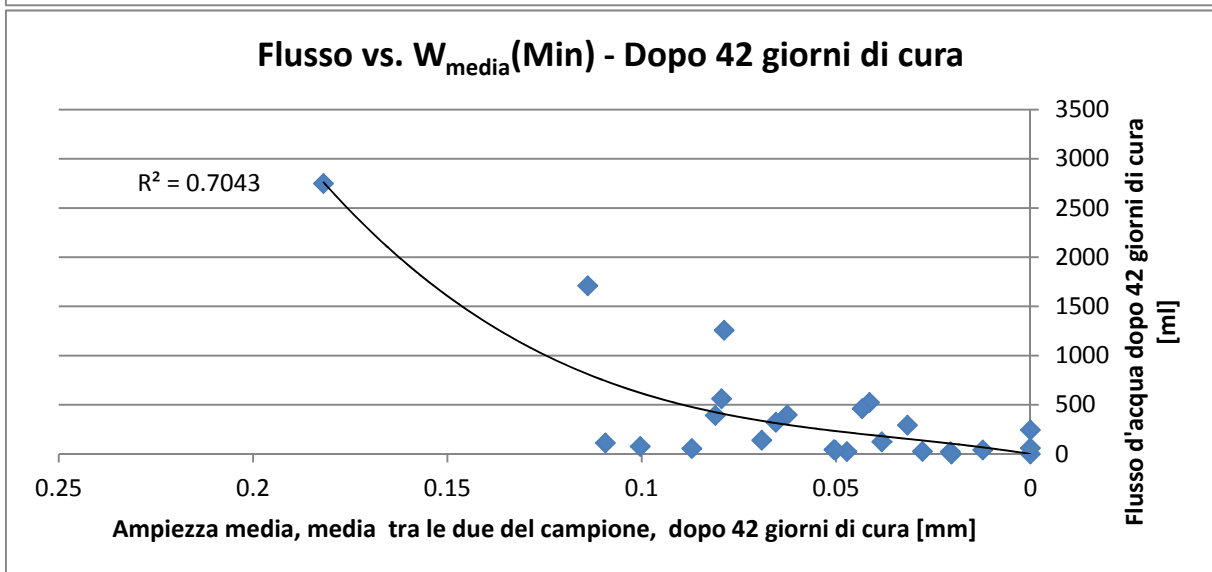
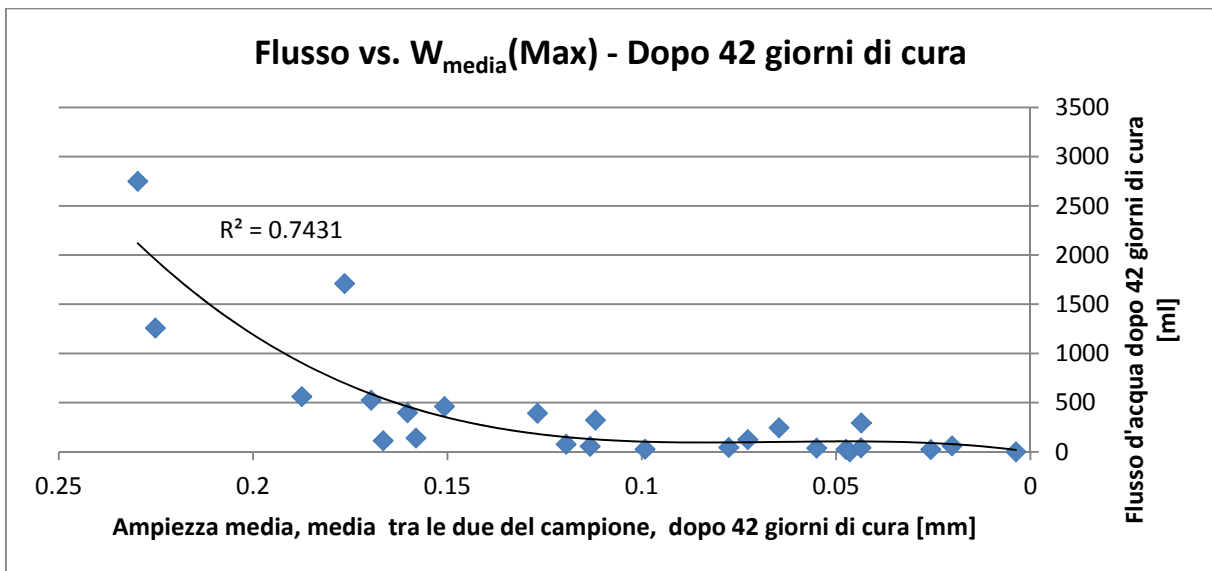
Metodologia: misurazione ampiezza massima della fessura, W_{max} .



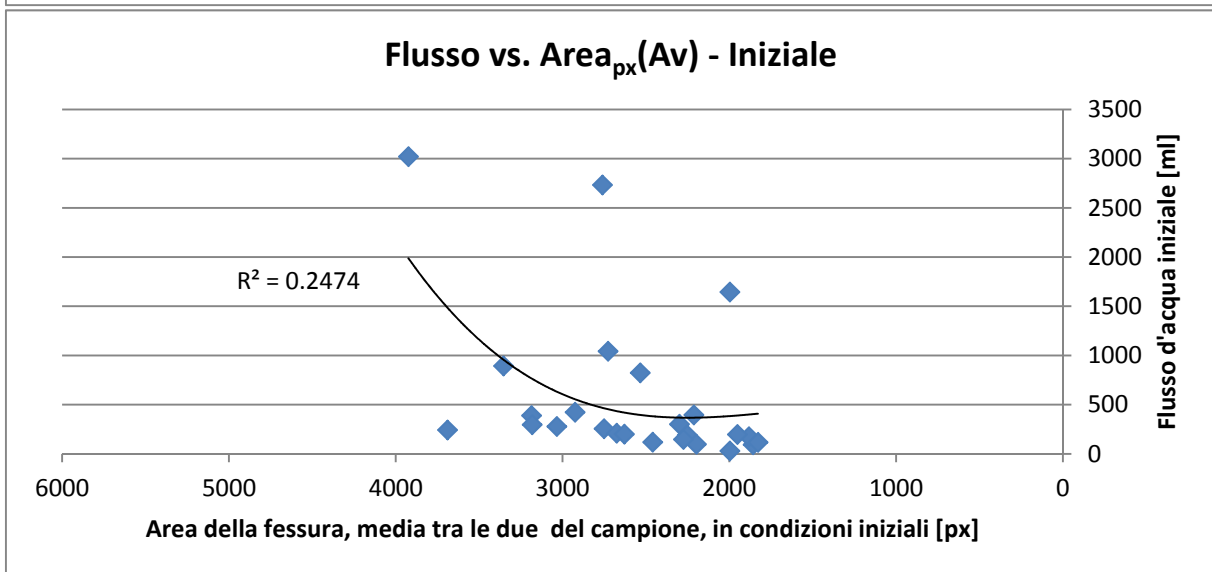
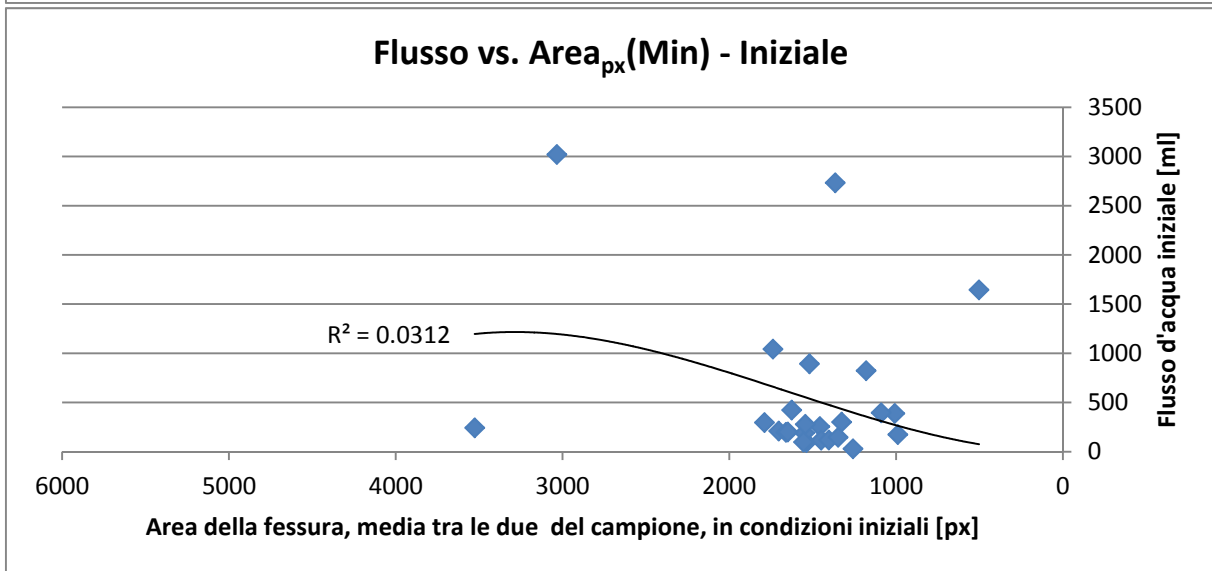
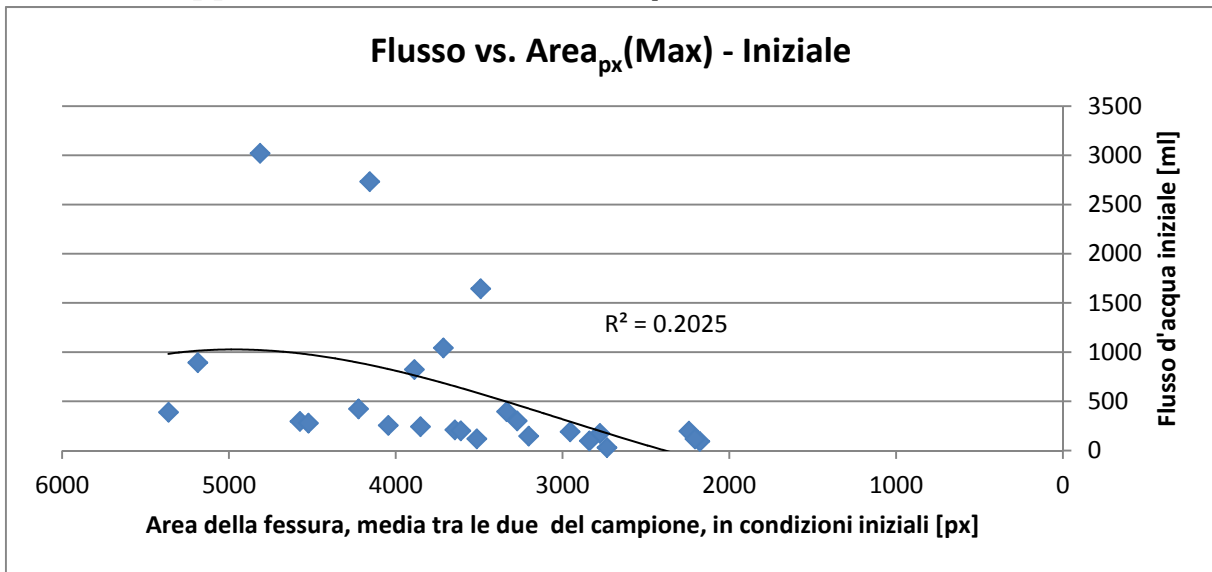


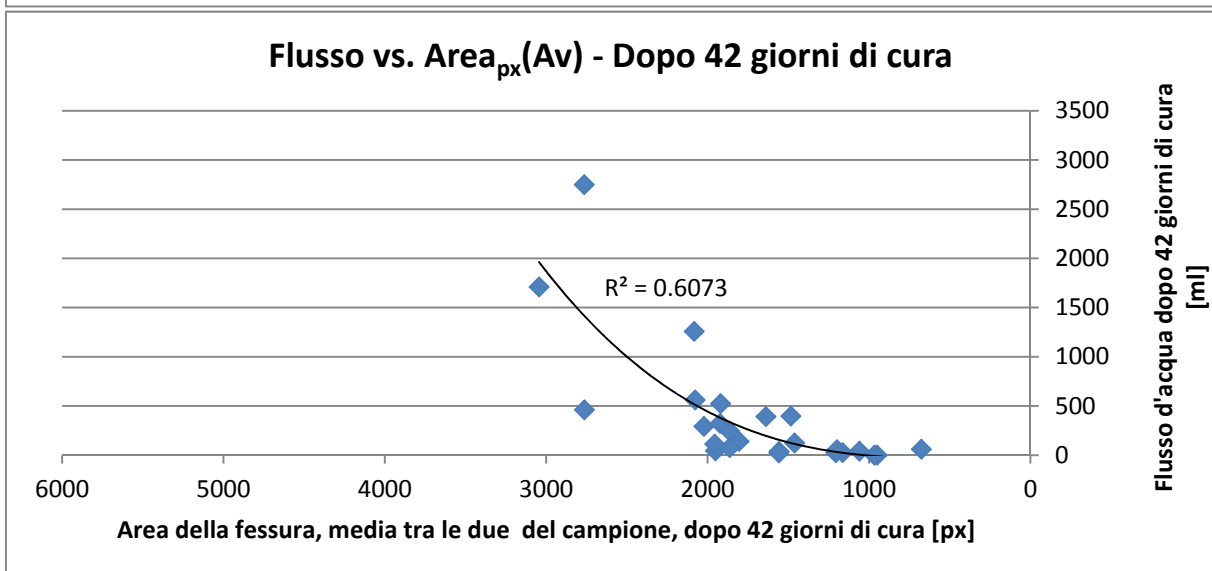
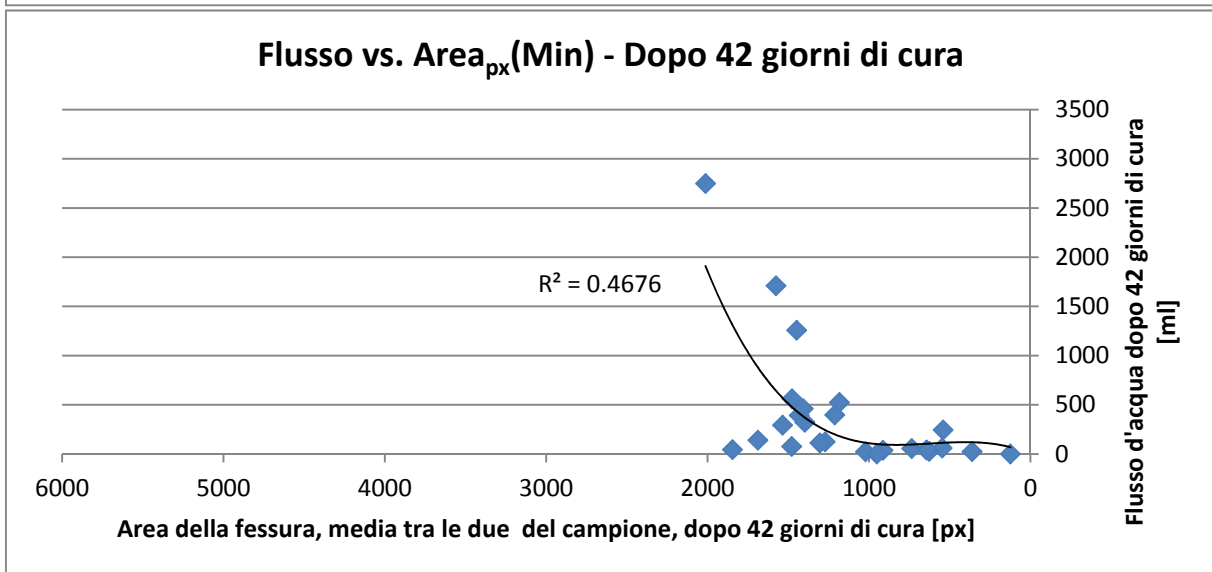
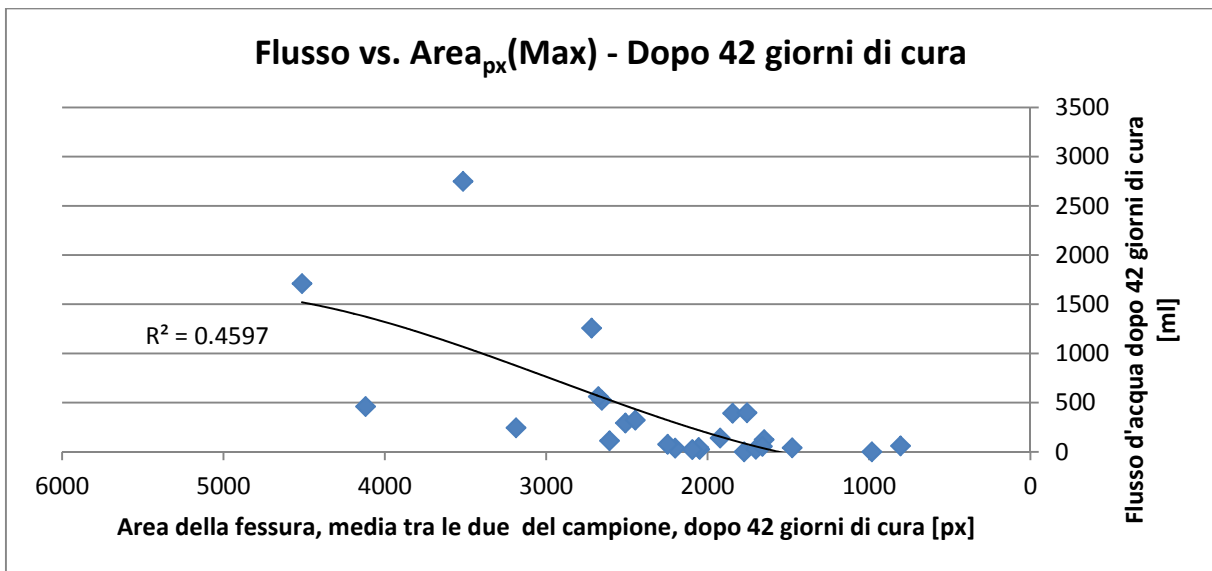
Metodologia: misurazione ampiezza media della fessura, W_{media} .



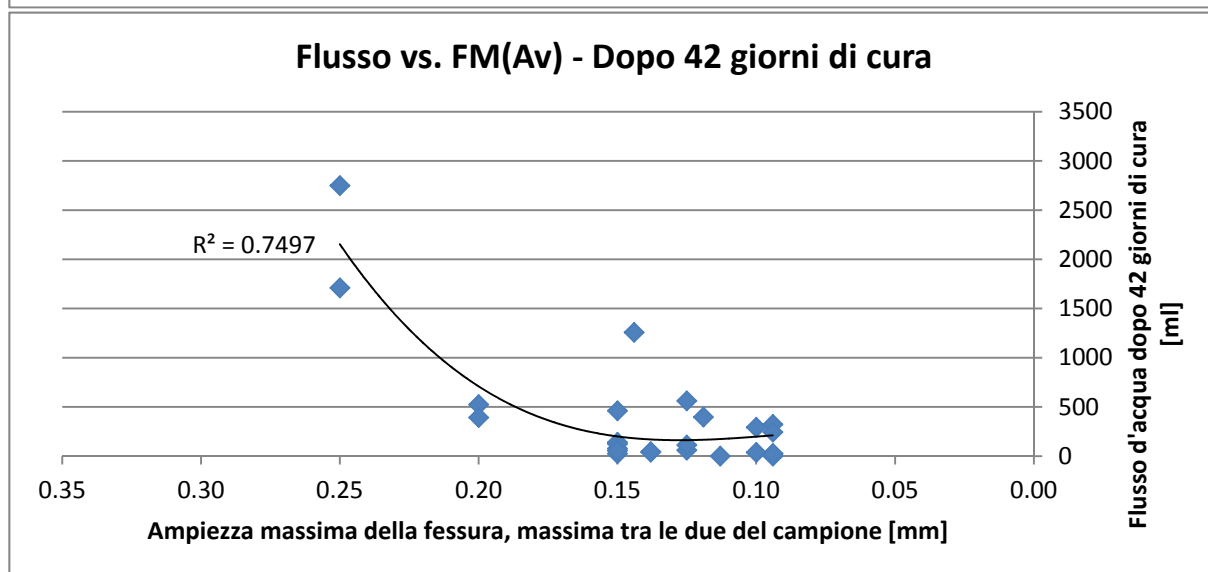
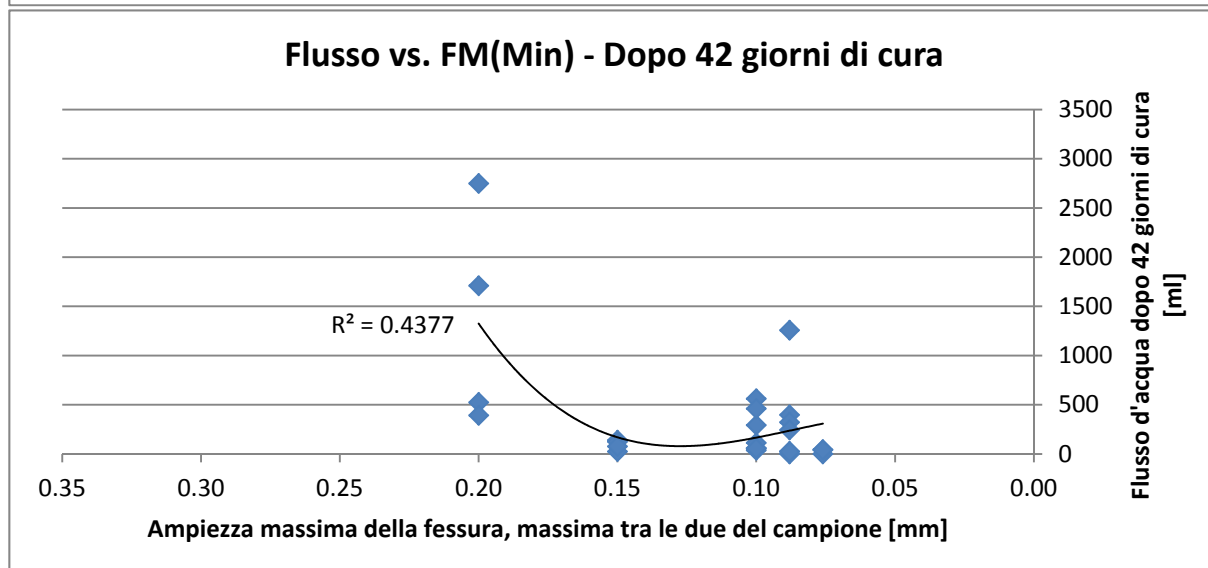
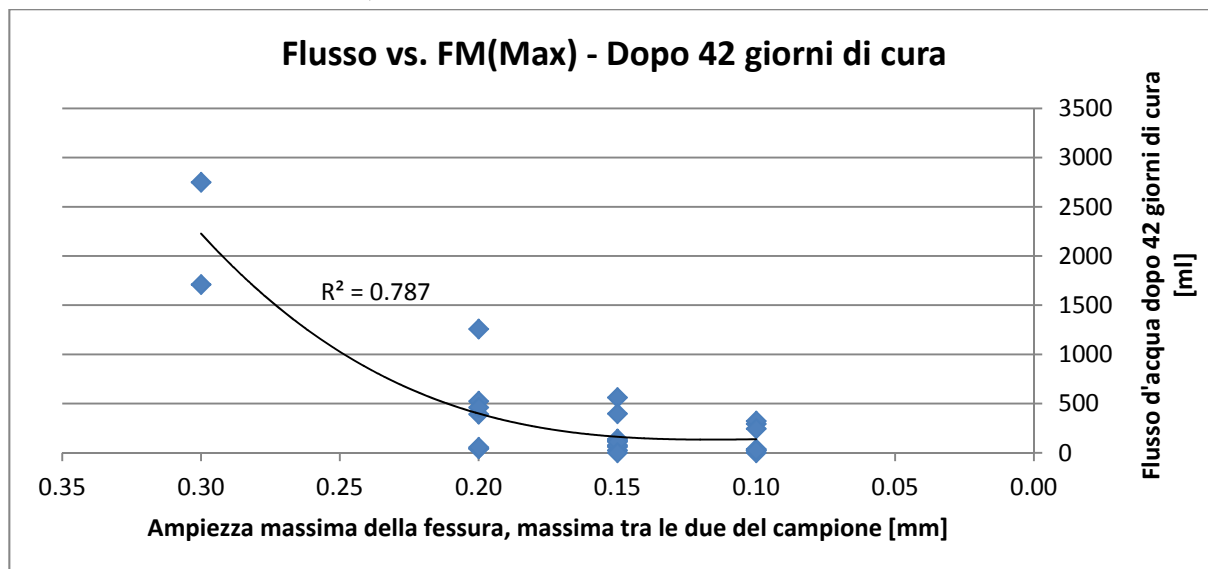


Metodologia: misurazione dell'area della fessura, mediante software di grafica in grado di fornire il numero dei pixel neri contenuti all'interno di immagini ad alta risoluzione rappresentanti la fessura, Area_{px}.



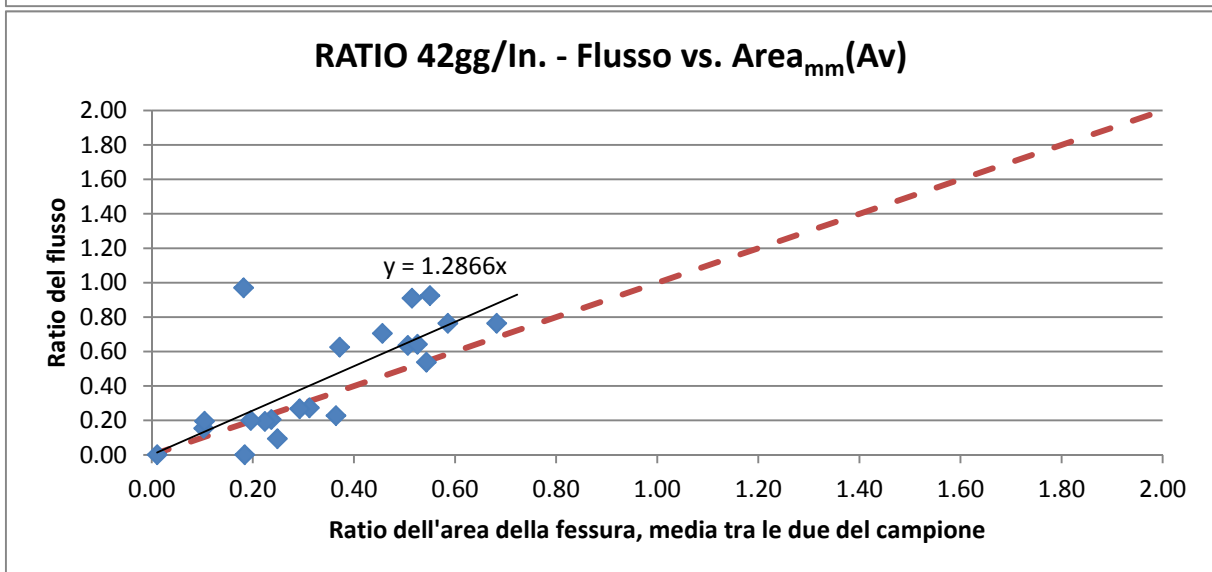
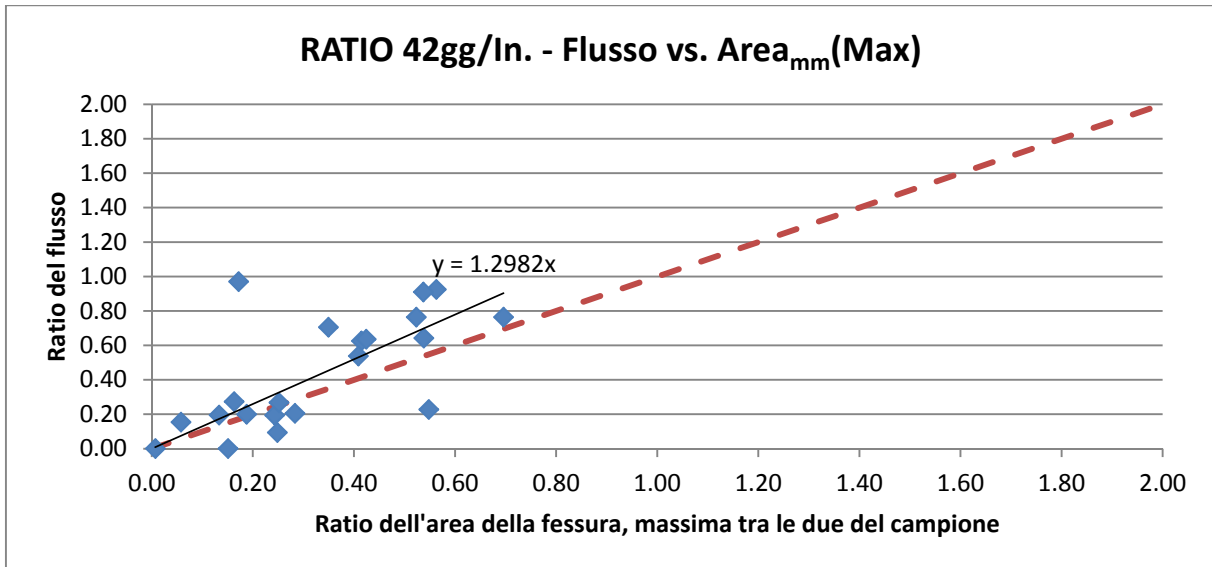


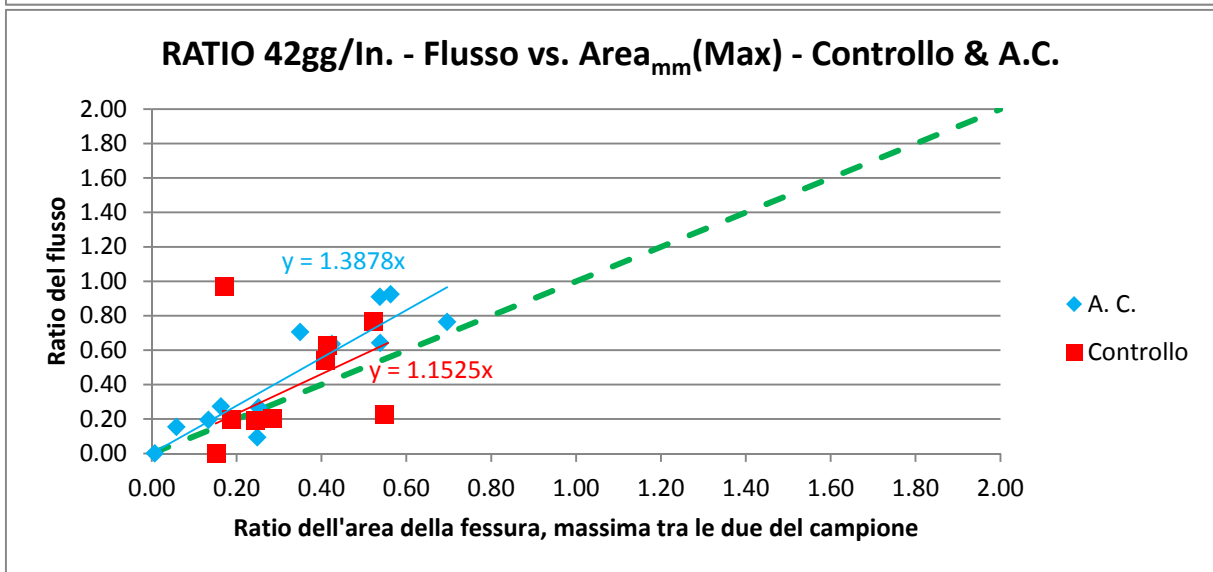
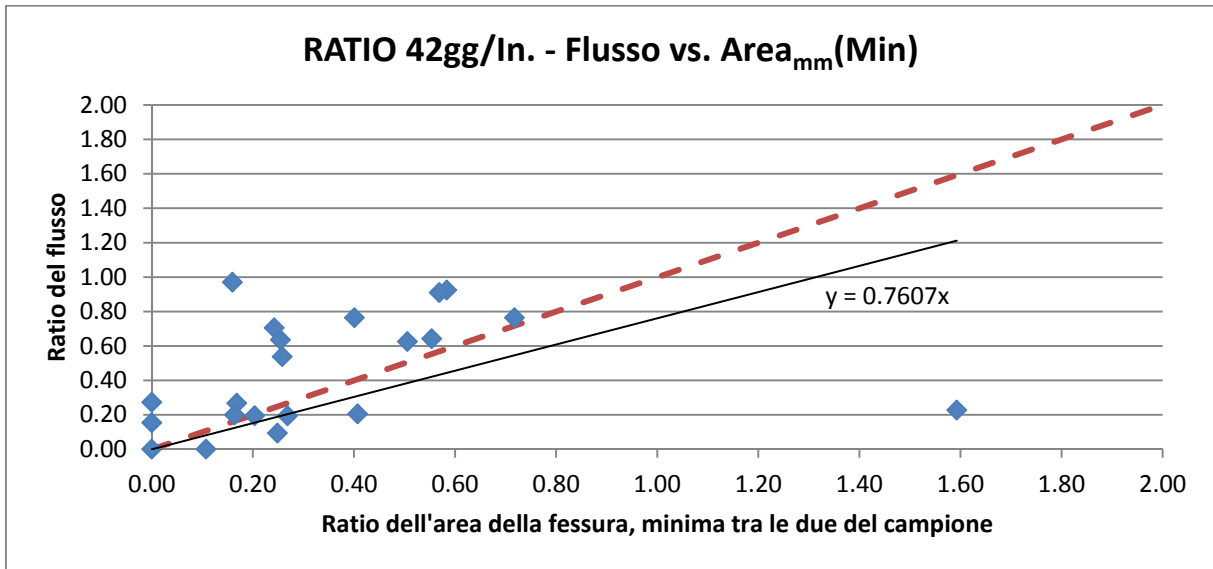
Metodologia: misurazione dell'ampiezza della fessura, mediante l'utilizzo di un fessurimetro standard, FM.

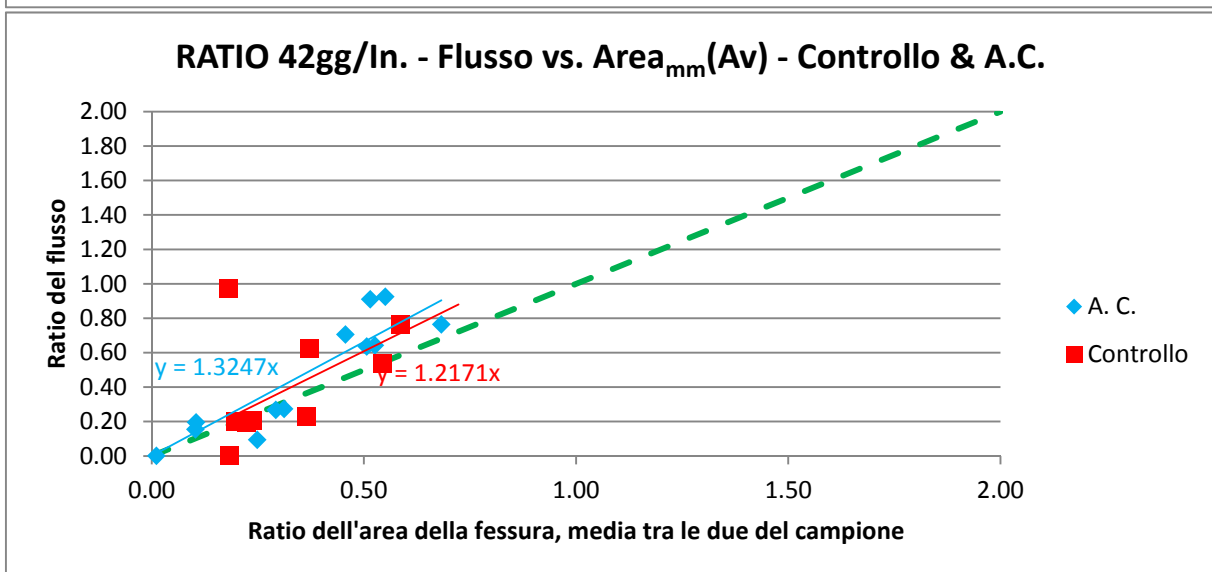
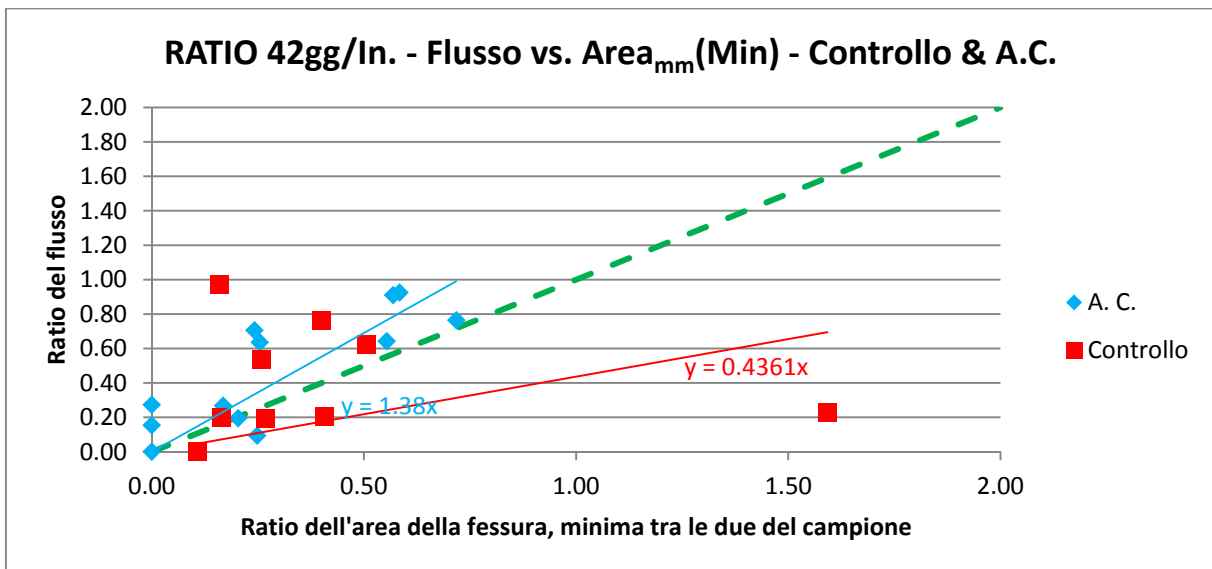


APPENDICE C - Confronto RATIO dei flussi e della fessura misurata con le metodologie studiate

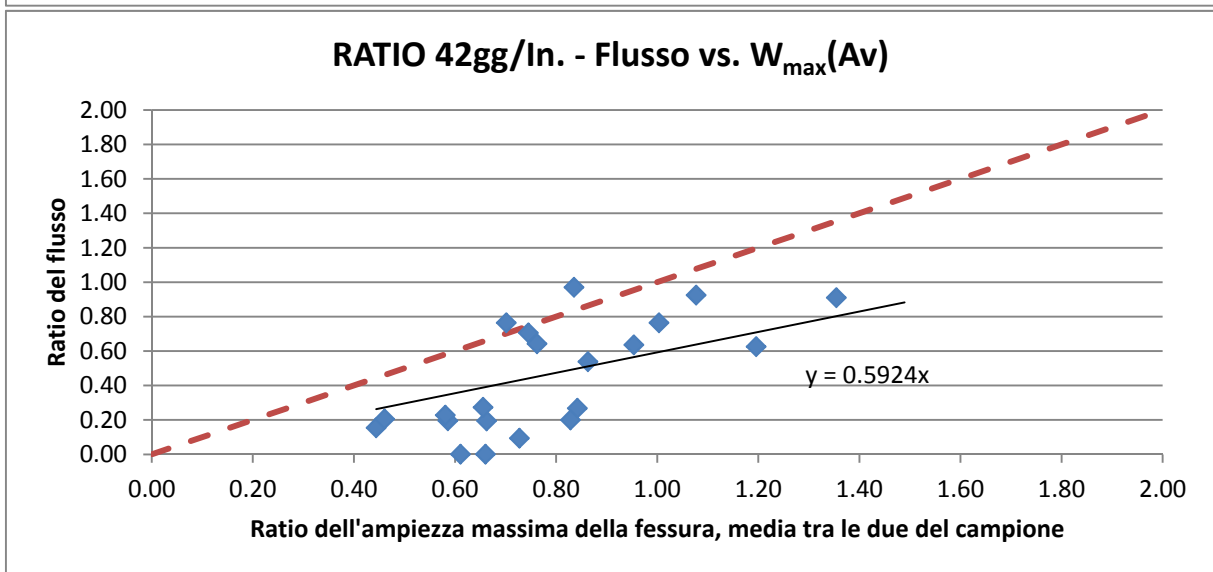
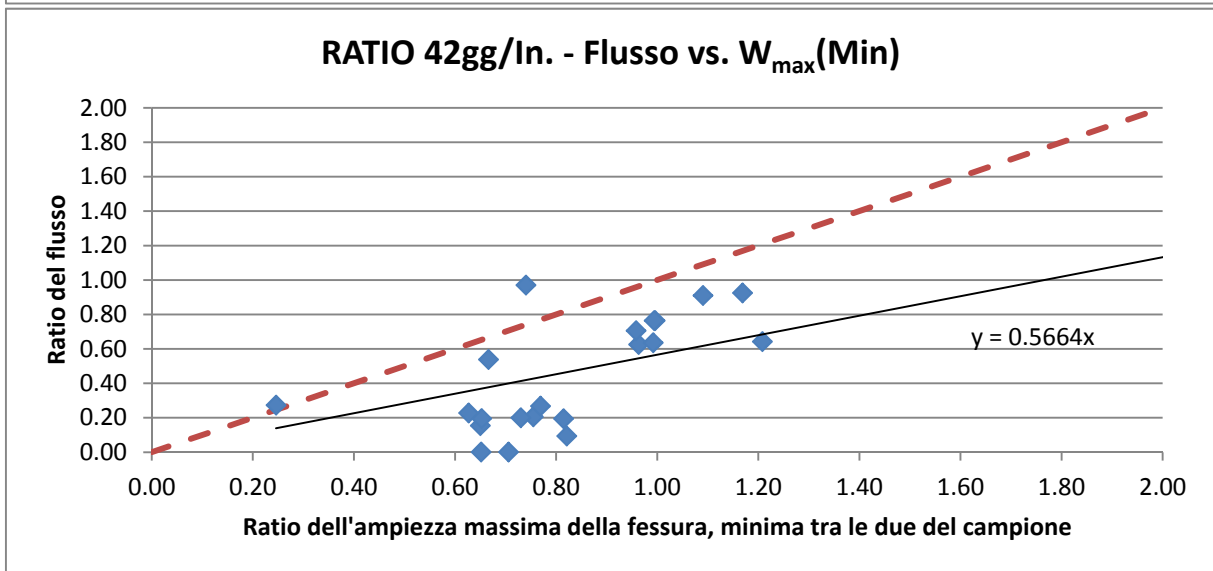
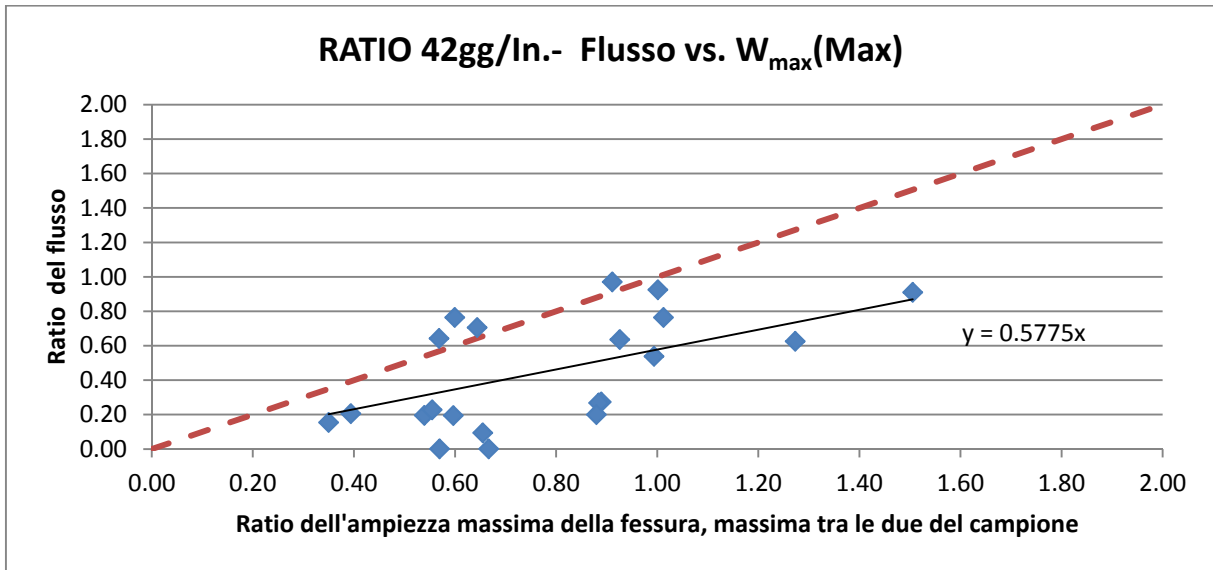
Metodologia: misurazione area della fessura, approssimazione come somma di cinque rettangoli definiti, Area_{mm}.

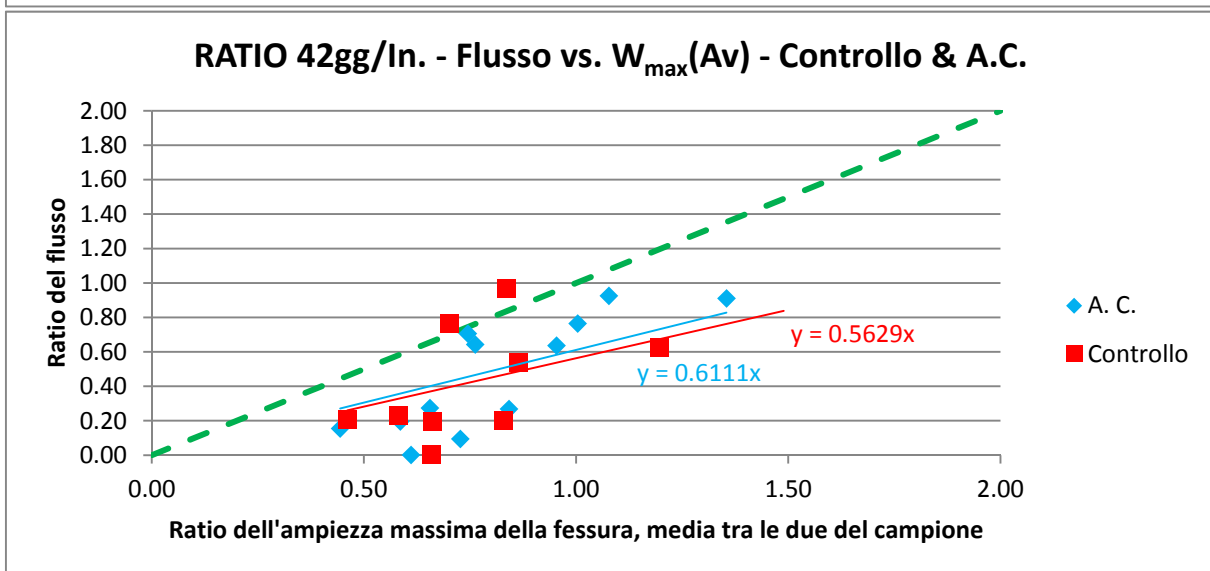
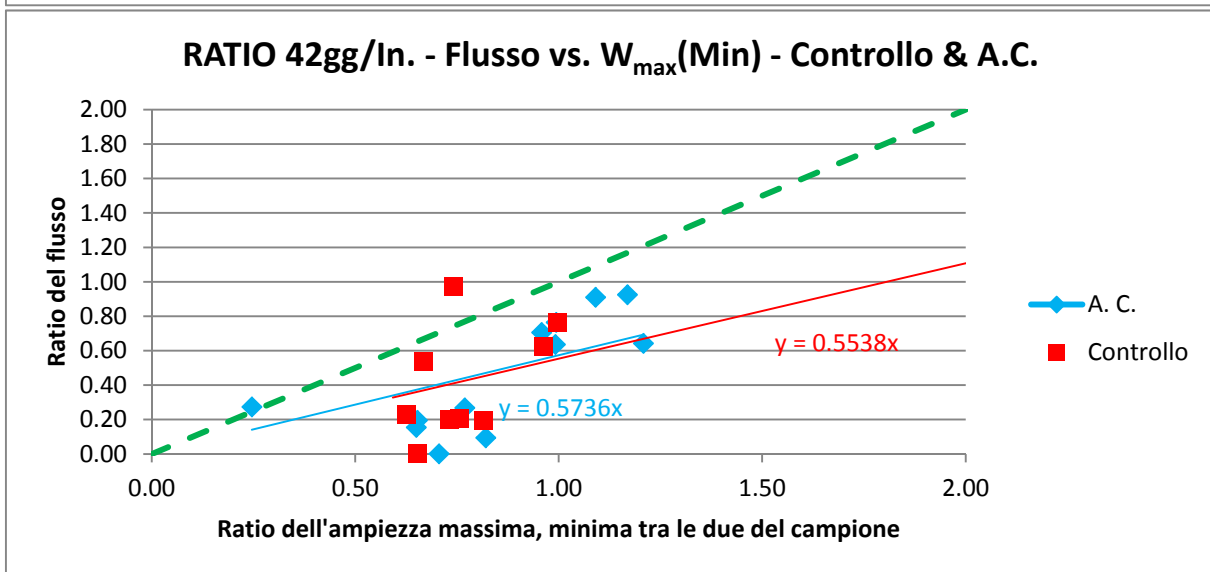
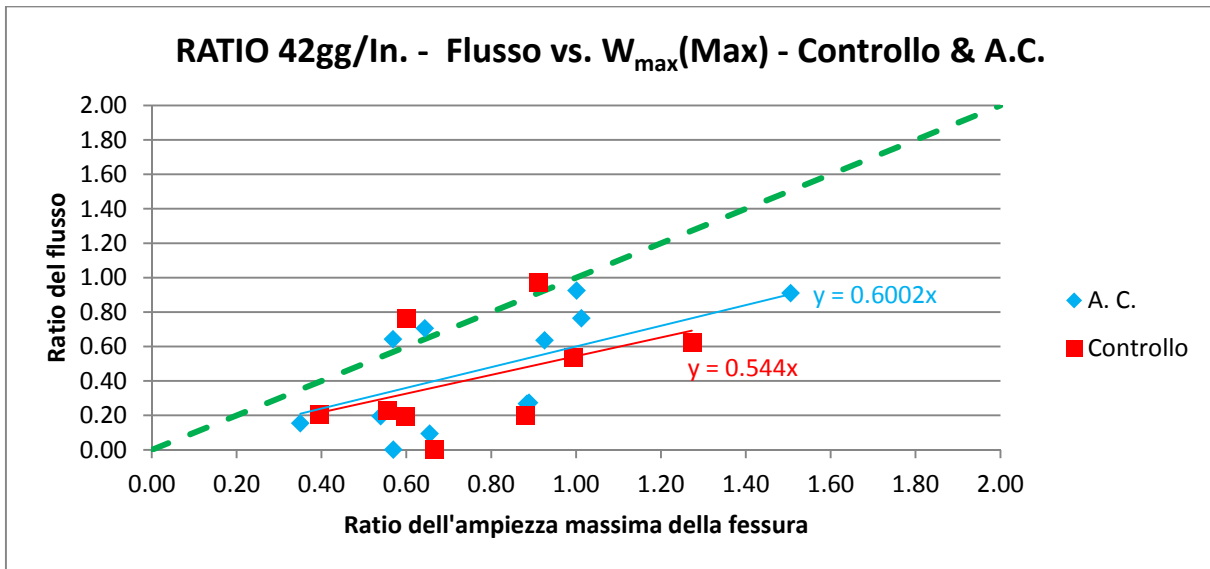




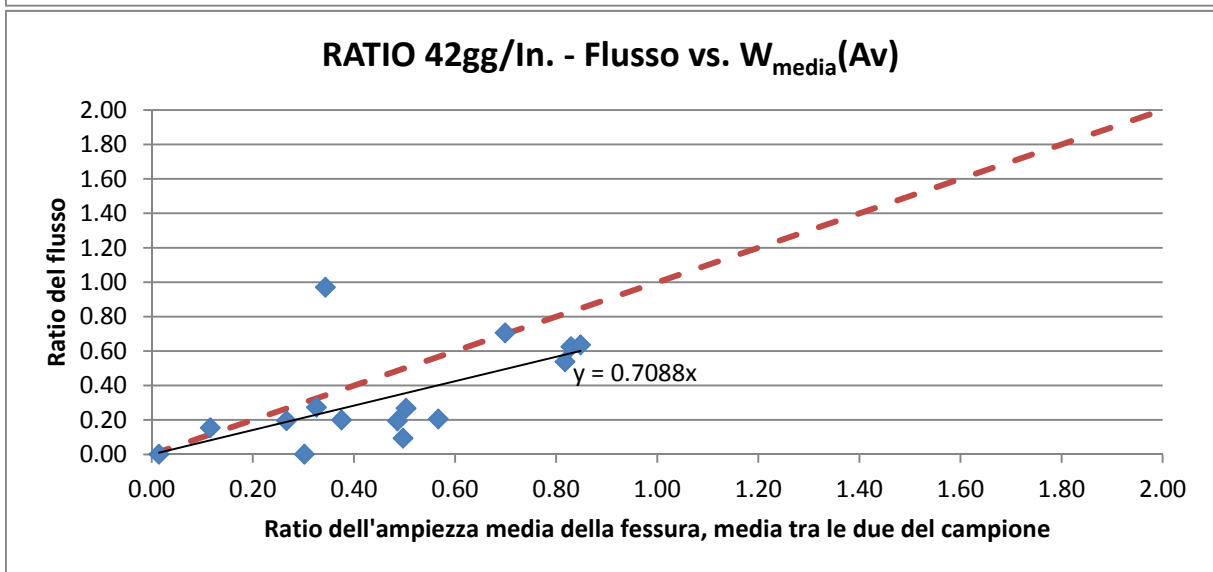
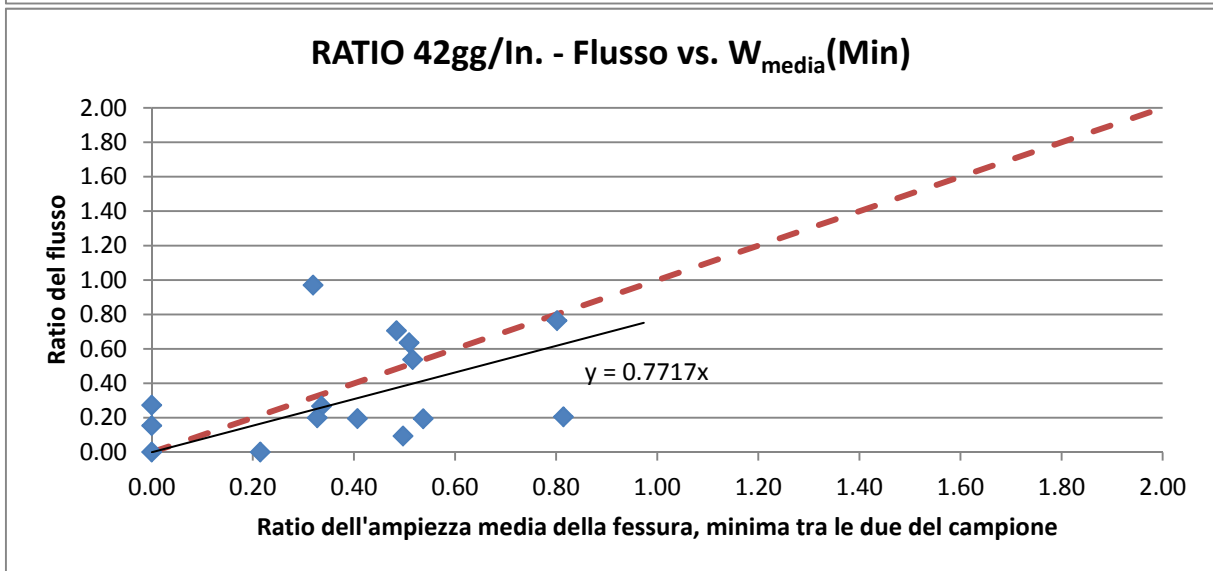
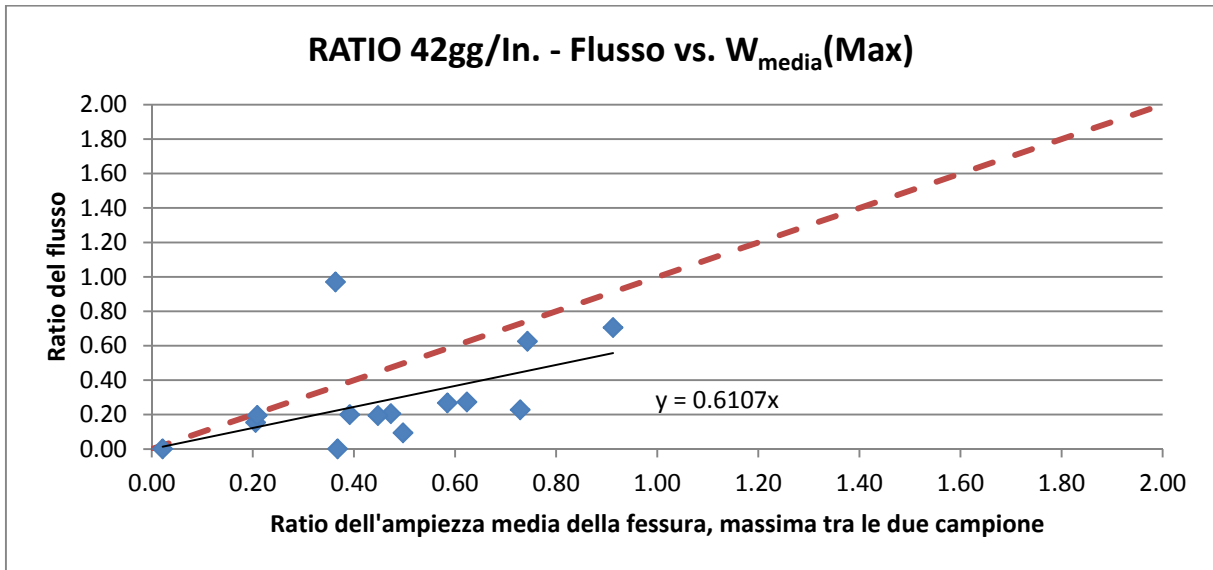


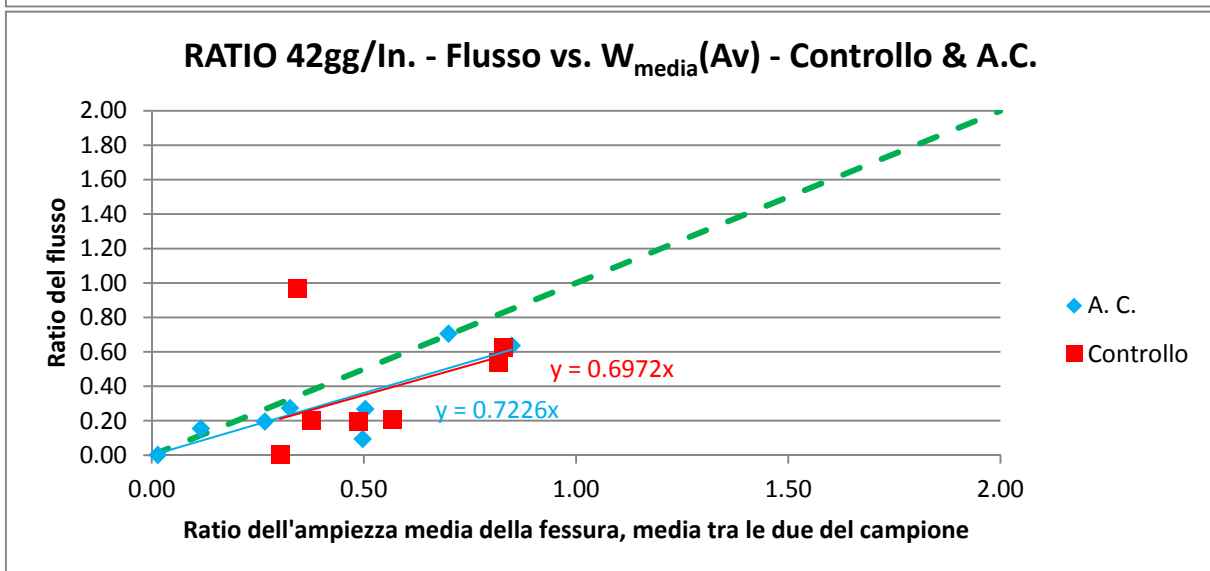
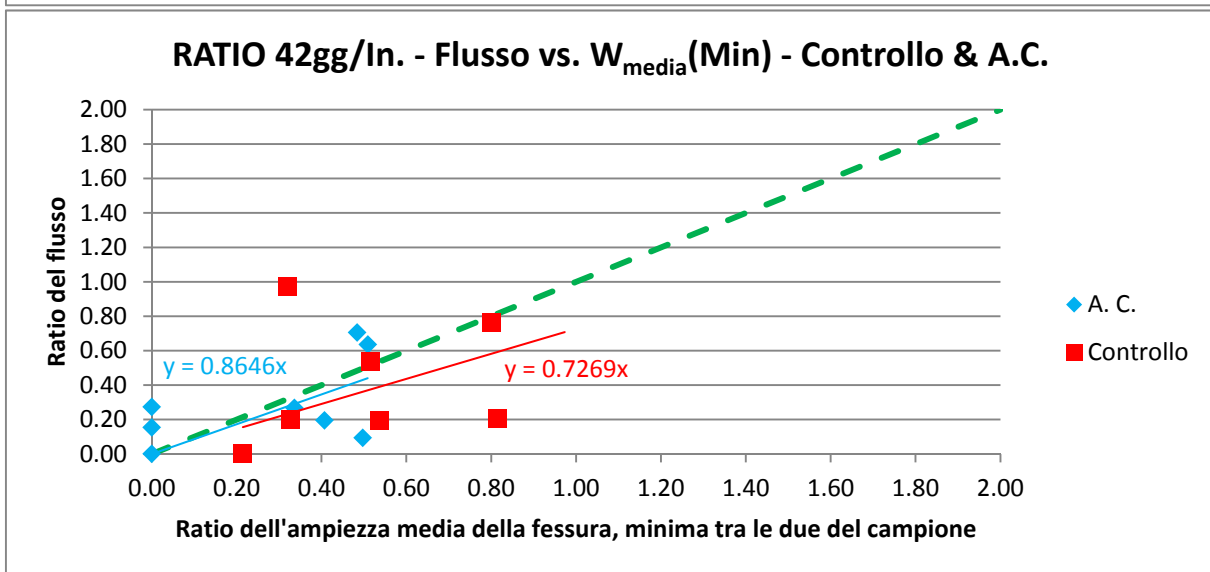
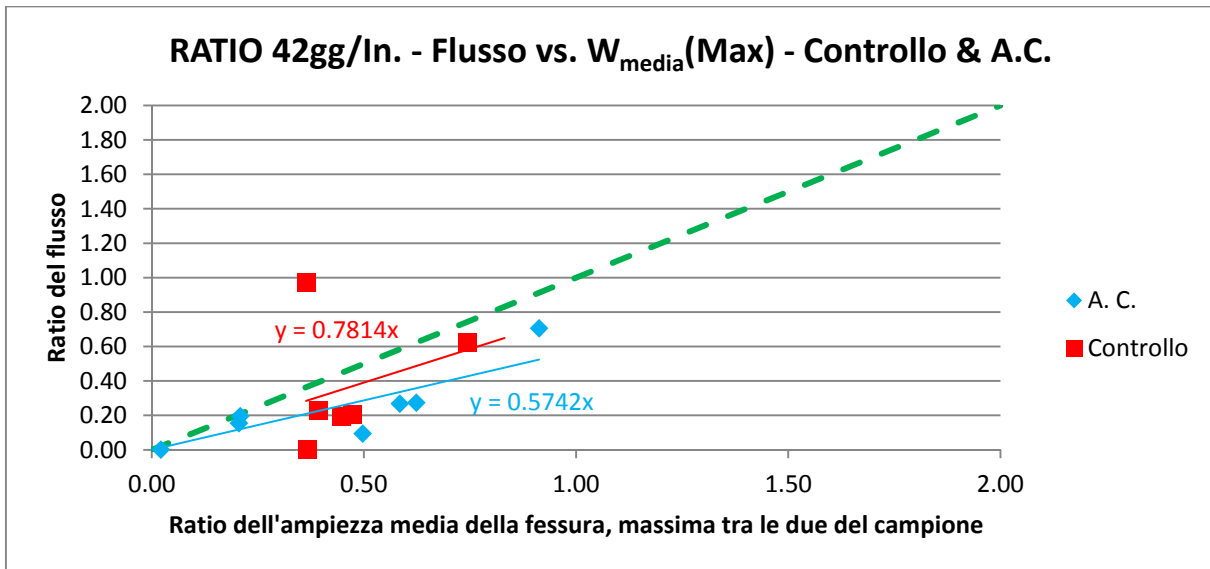
Metodologia: misurazione ampiezza massima della fessura, W_{max} .



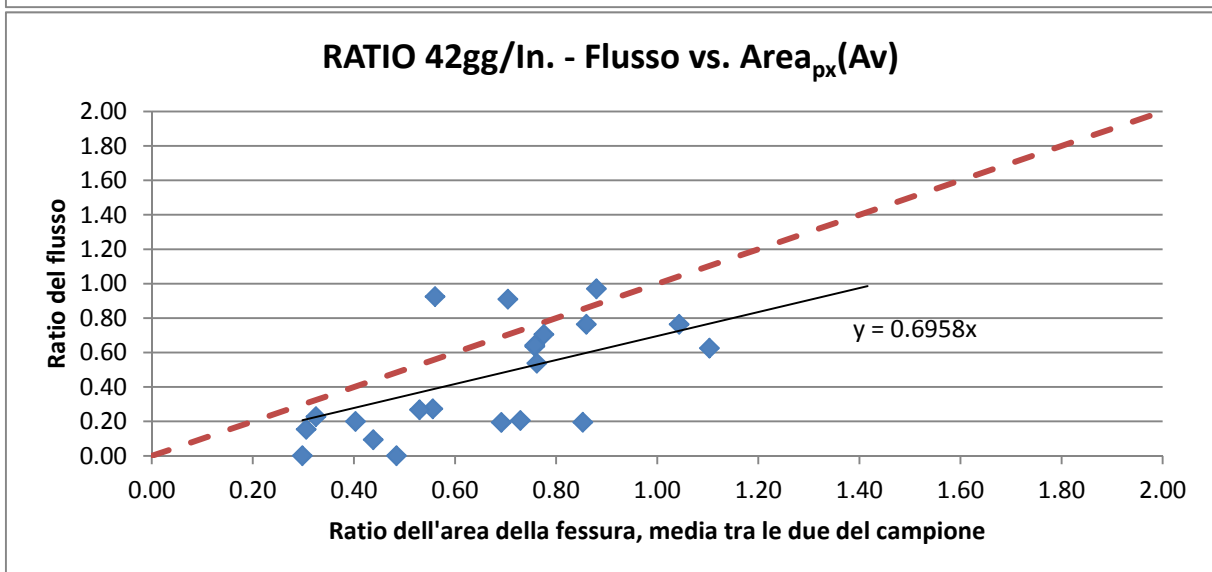
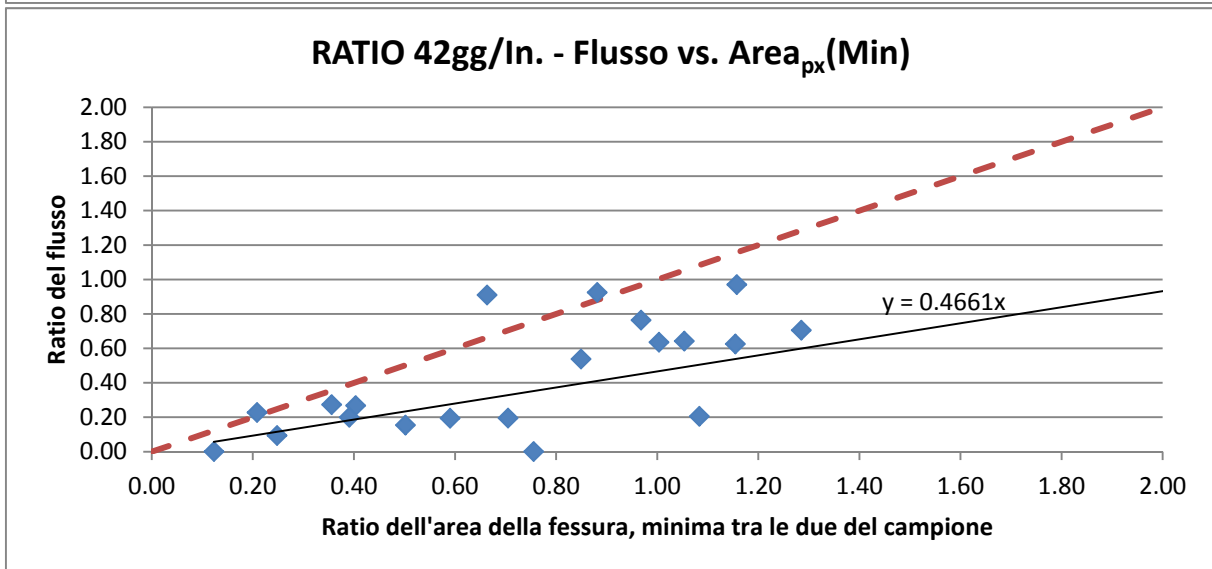
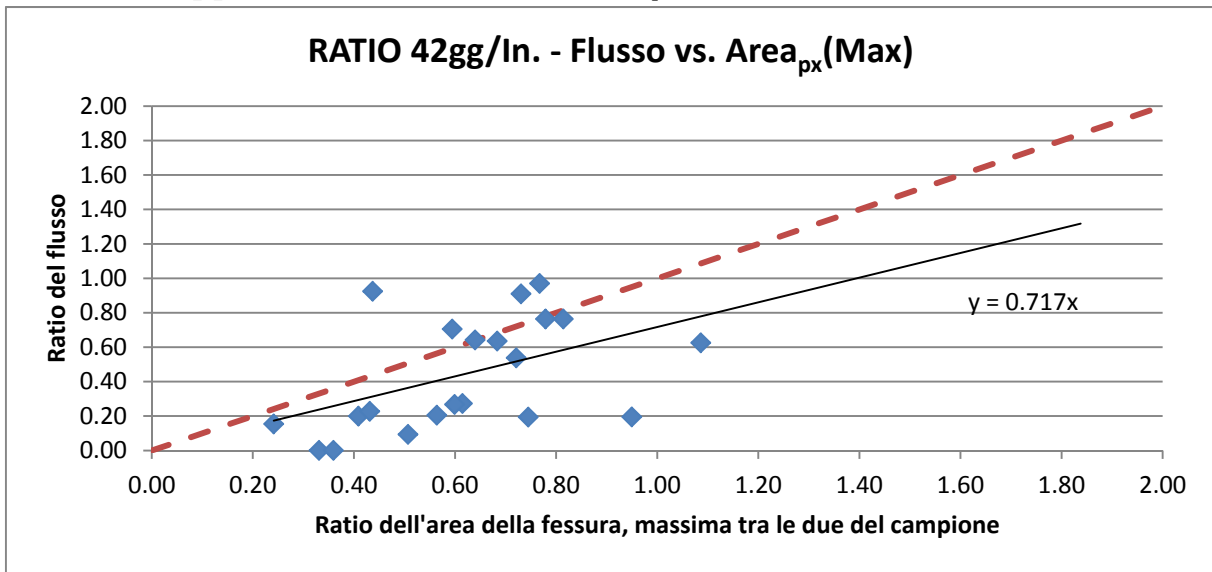


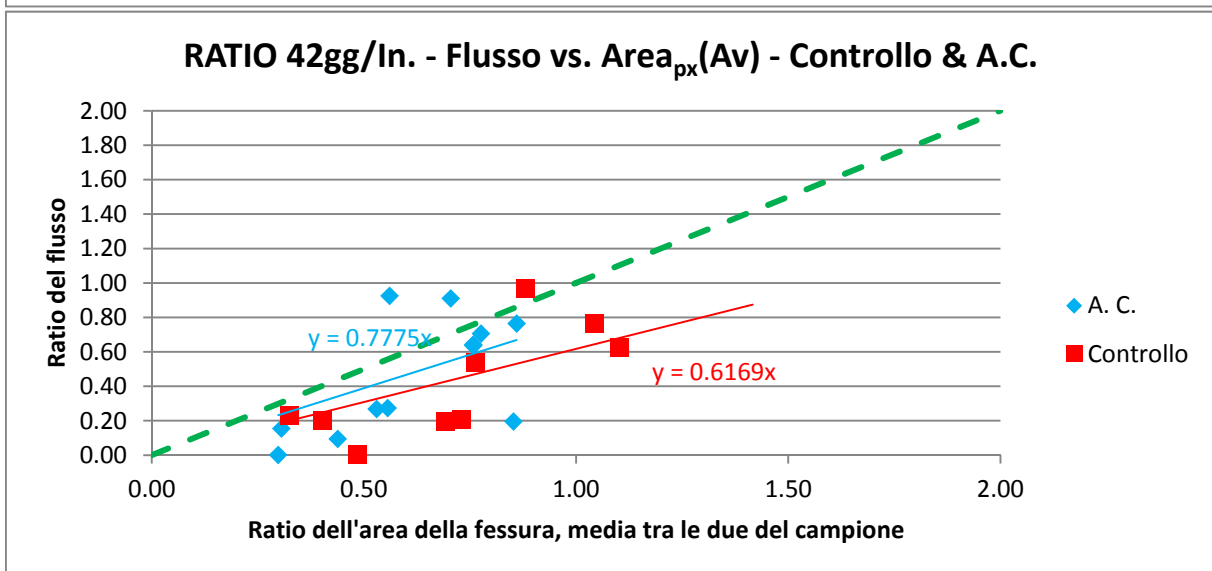
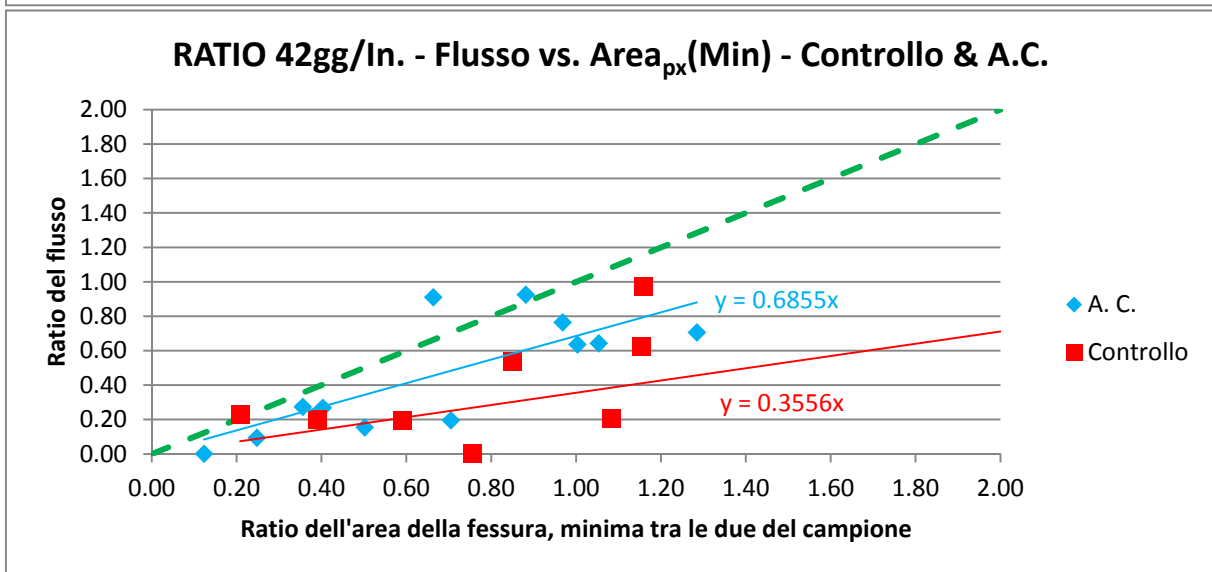
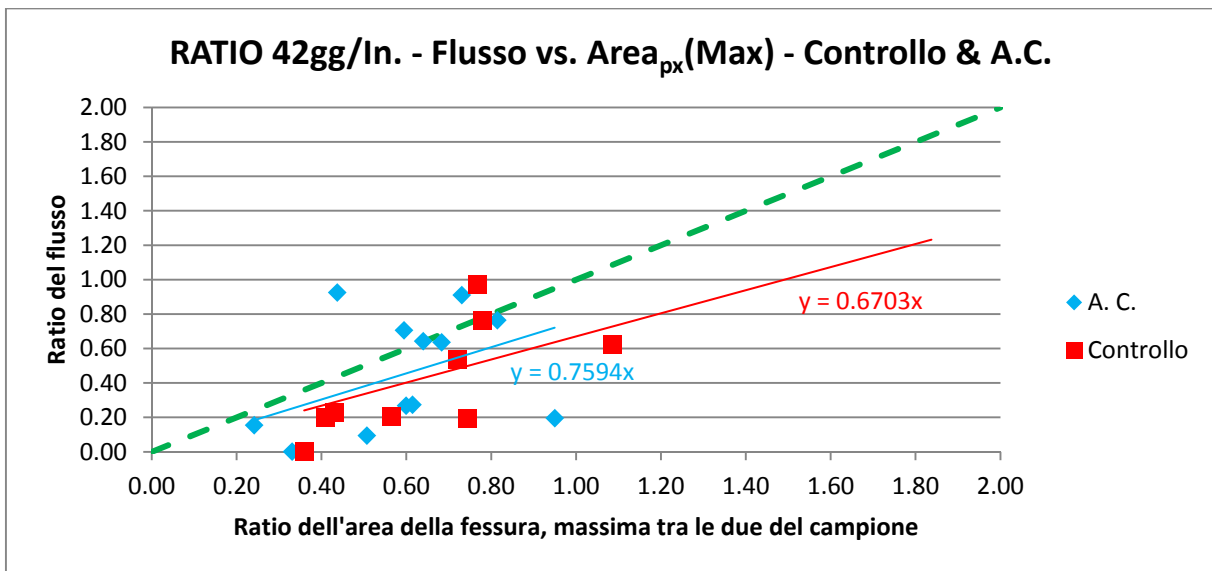
Metodologia: misurazione ampiezza media della fessura, W_{media} .





Metodologia: misurazione dell'area della fessura, mediante software di grafica in grado di fornire il numero dei pixel neri contenuti all'interno di immagini ad alta risoluzione rappresentanti la fessura, $Area_{px}$.

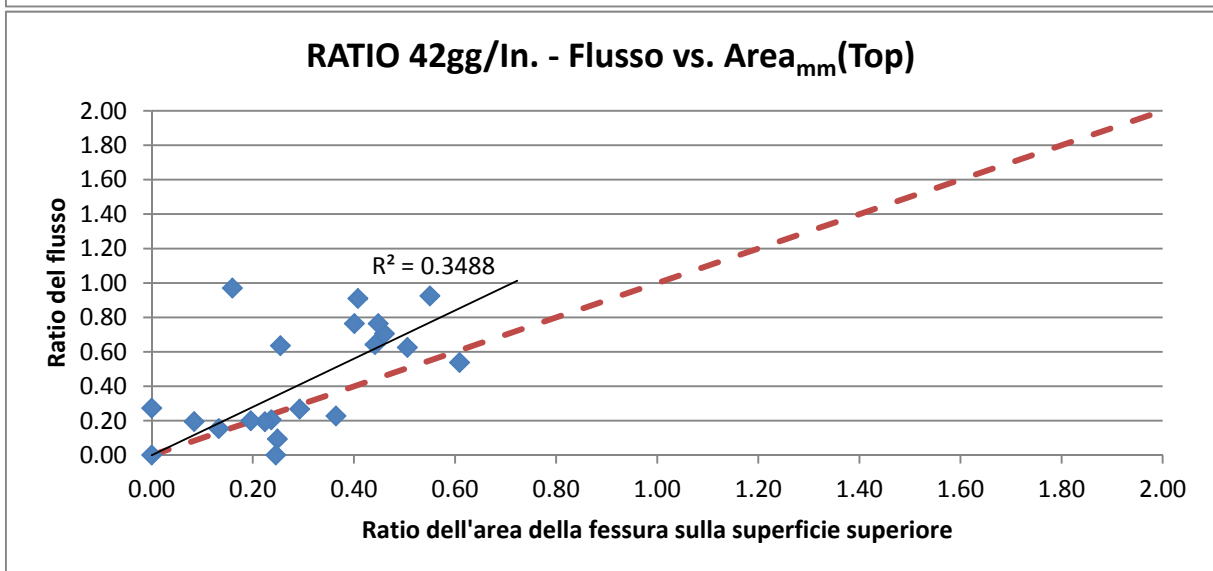
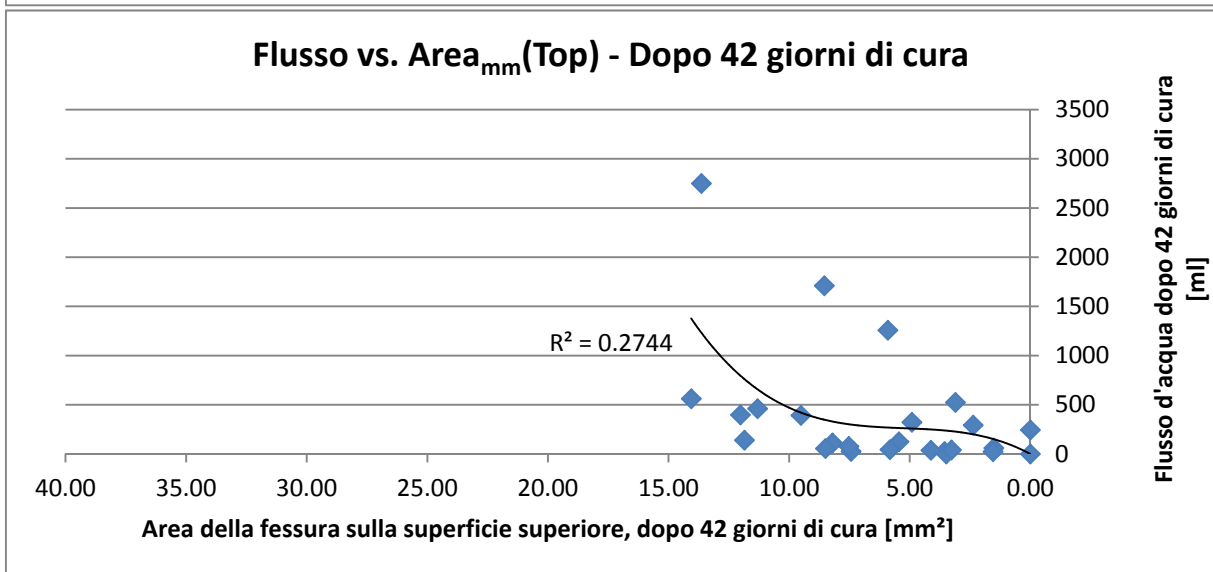
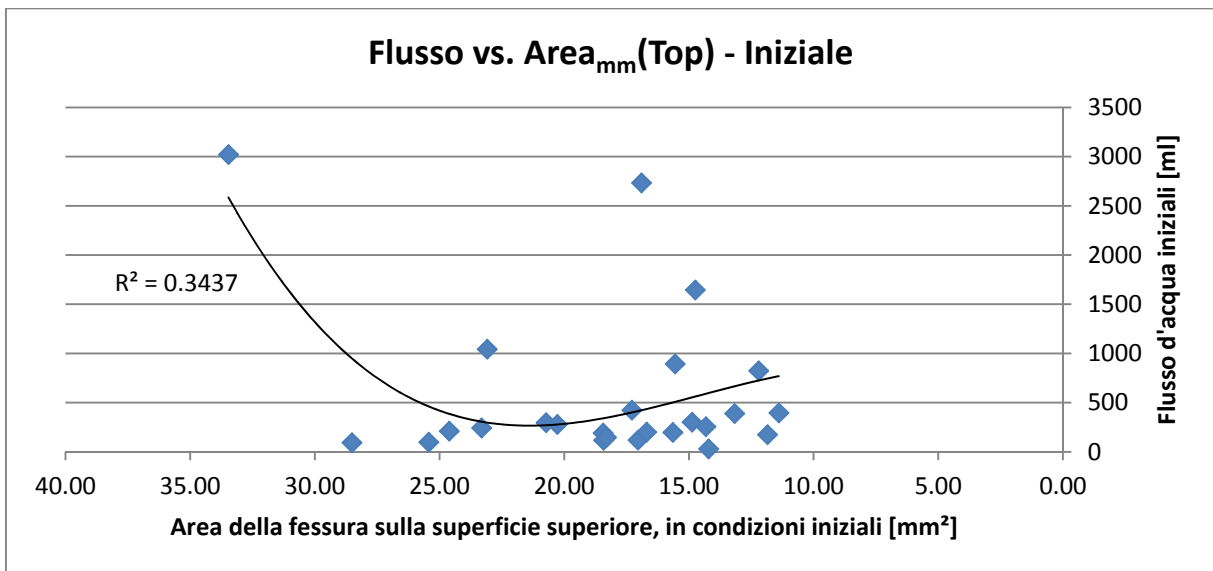




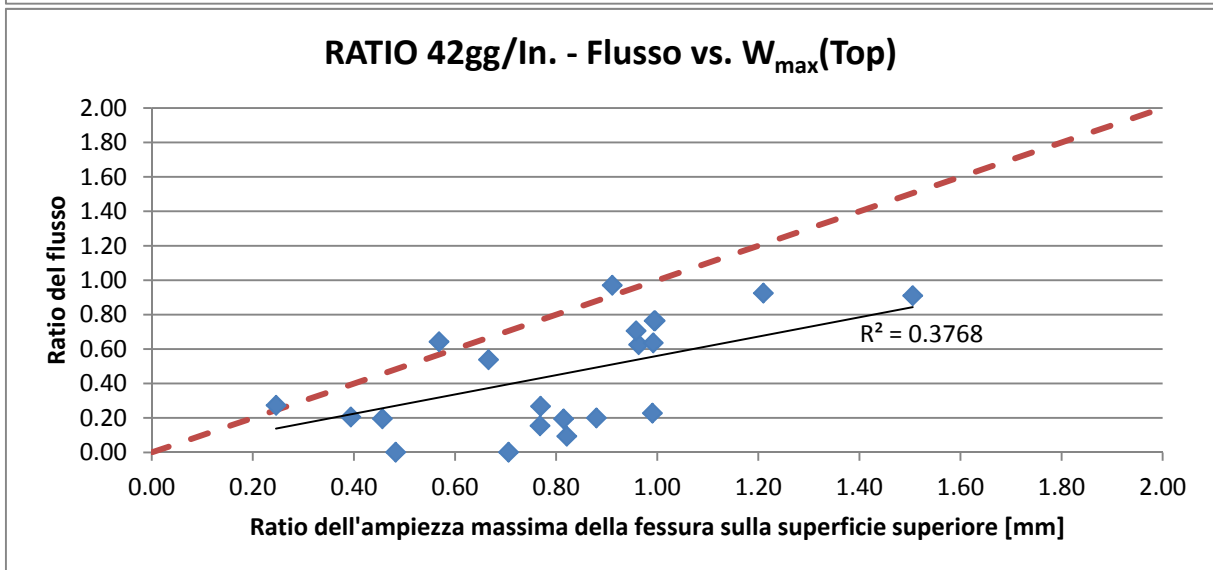
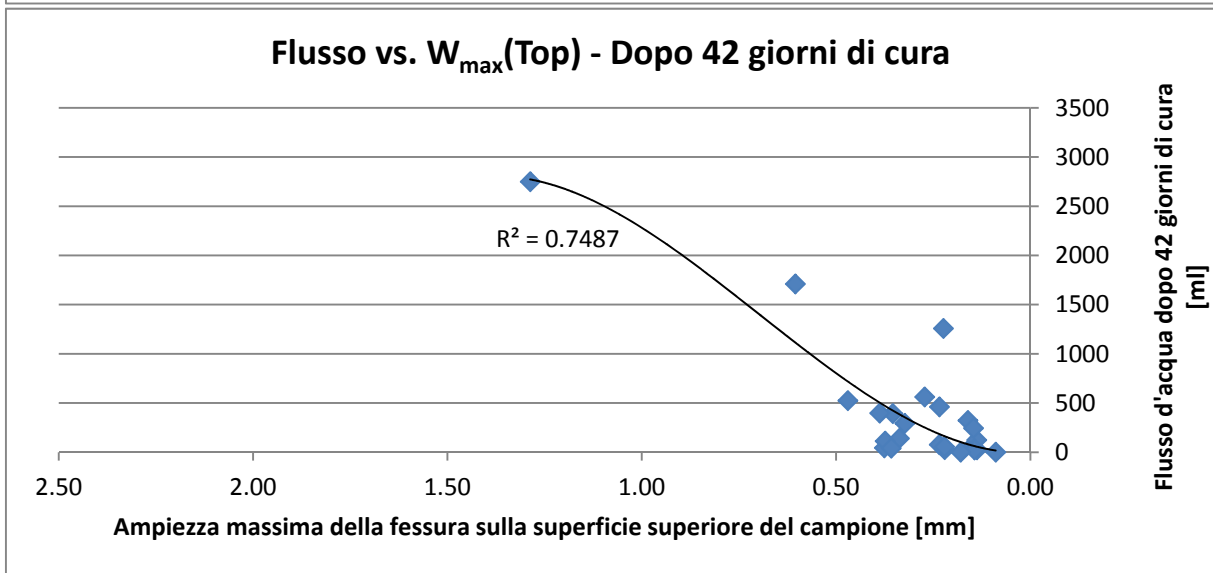
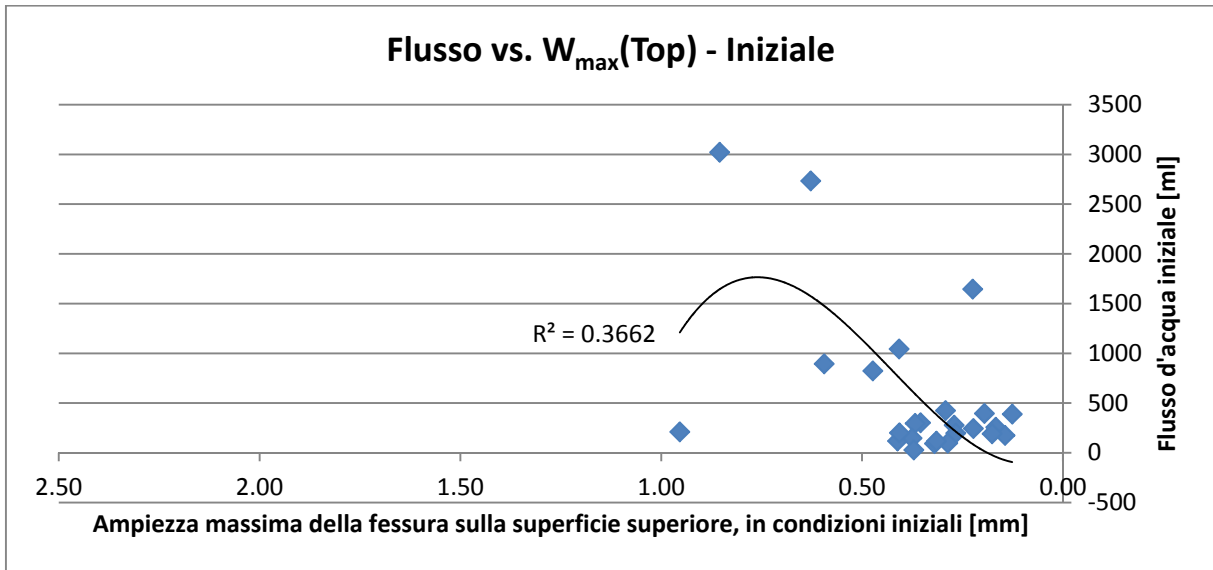
Tesi di Laurea Magistrale: Capacità di autoriparazione di compositi cementizi fibrorinforzati mediante l'utilizzo di additivi cristallini.

APPENDICE D – Relazione tra il flusso e la sola superficie superiore, misurata con le metodologie studiate

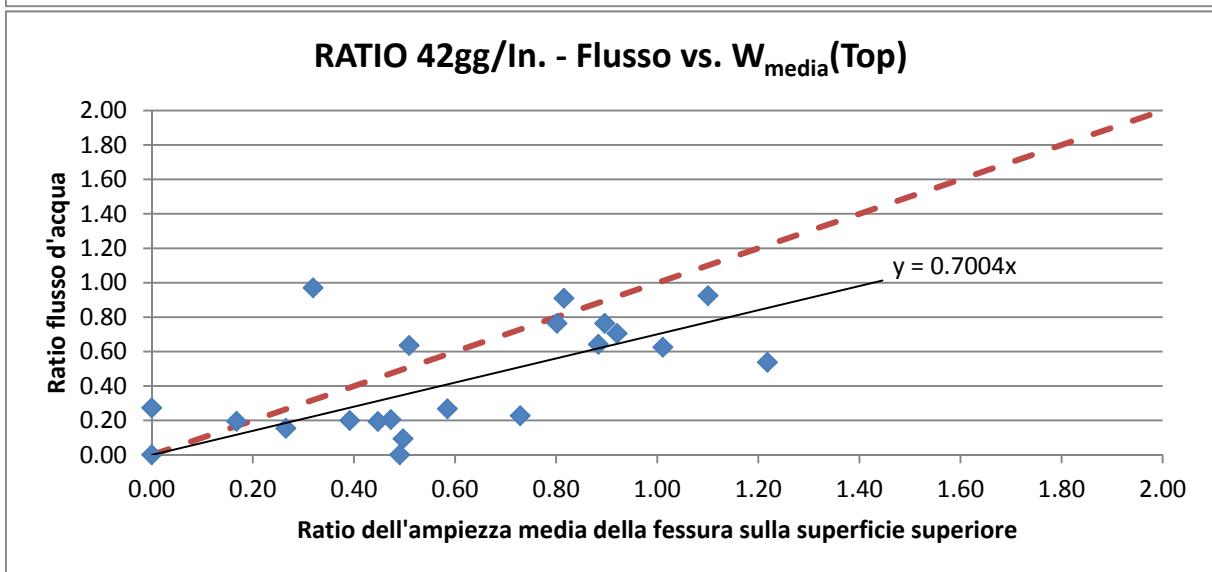
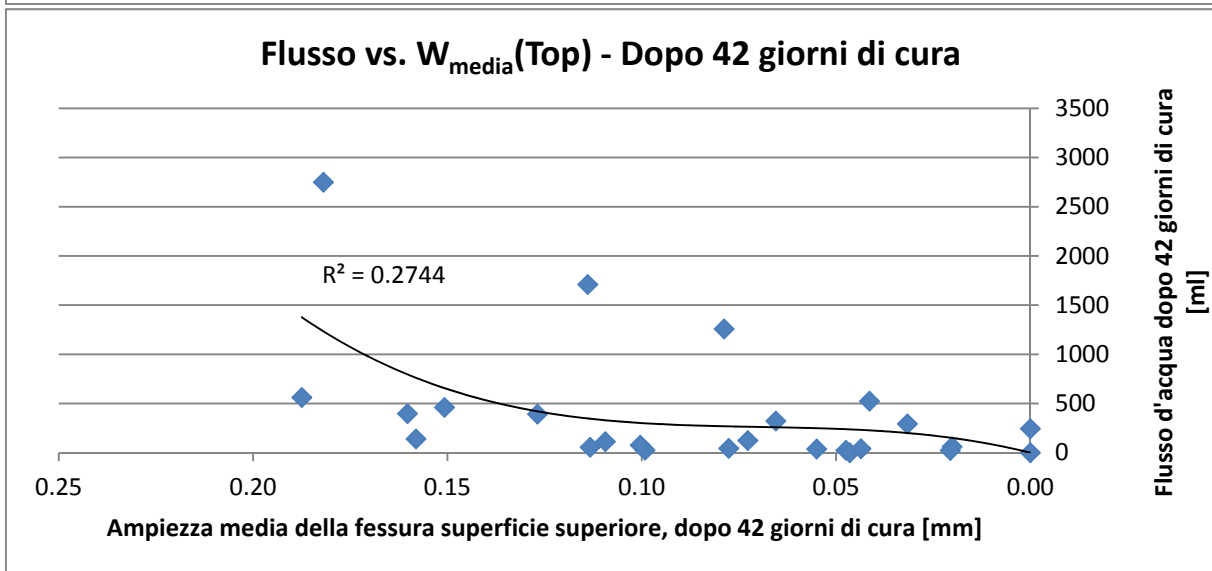
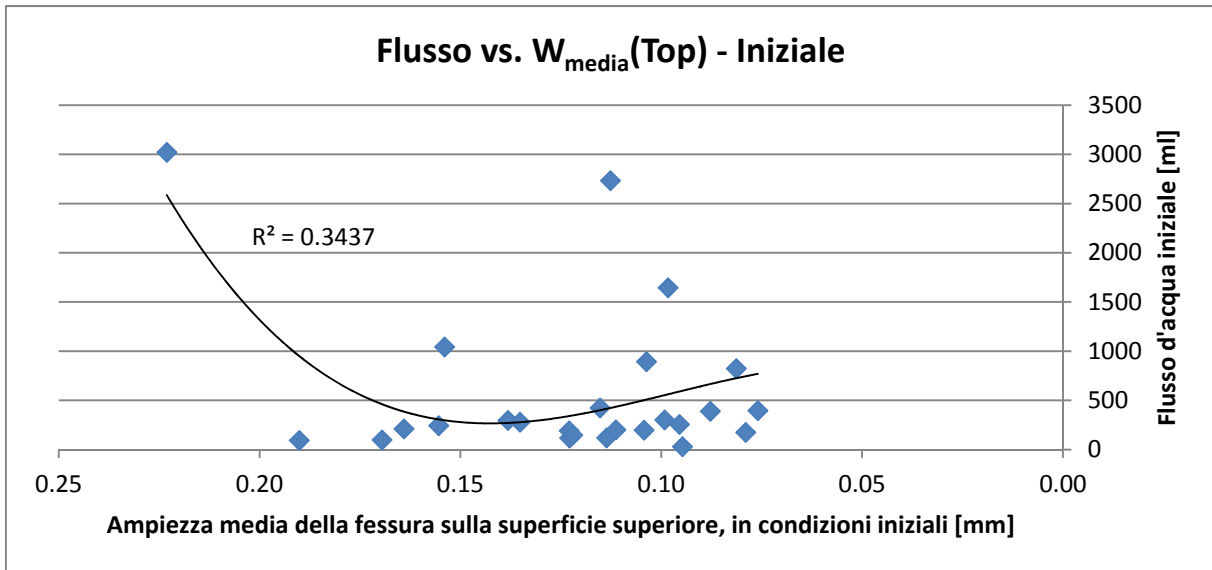
Metodologia: misurazione area della fessura, approssimazione come somma di cinque rettangoli definiti, Area_{mm}.



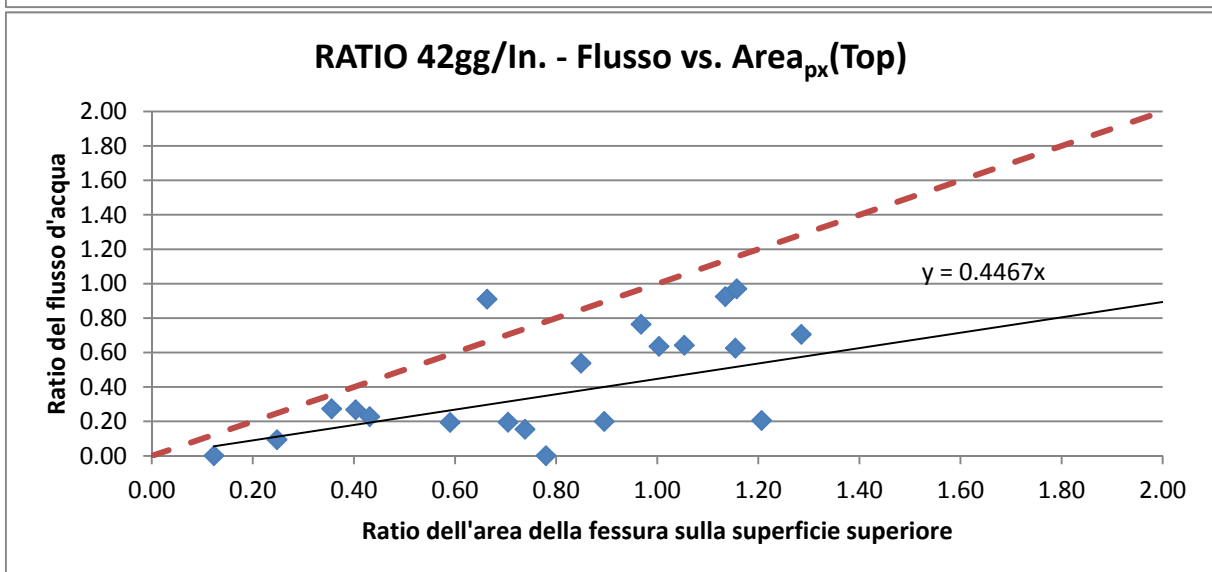
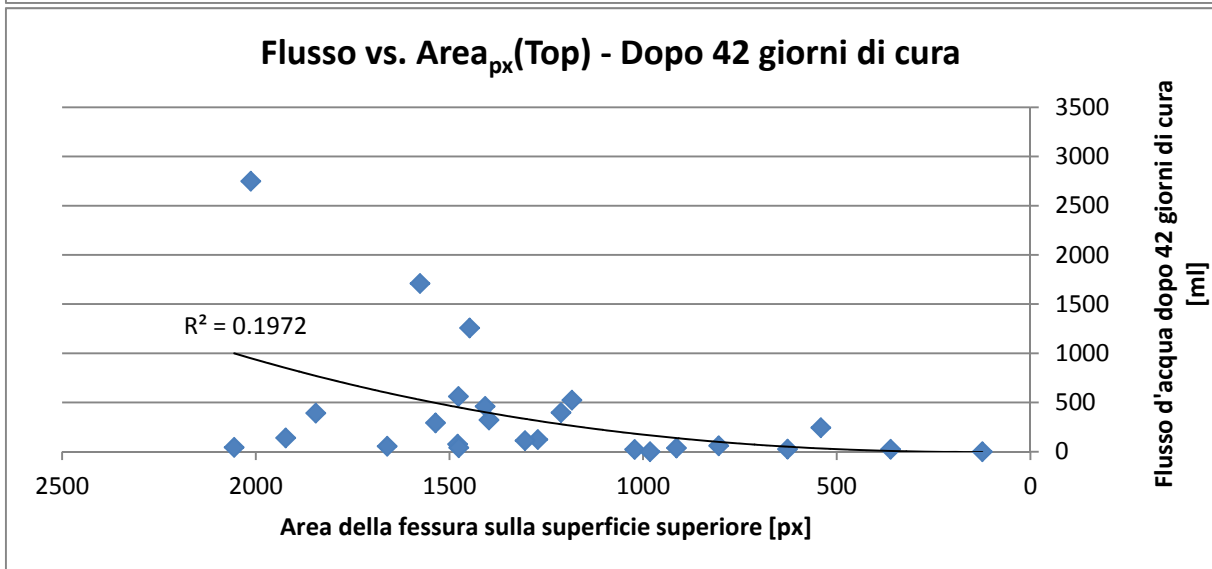
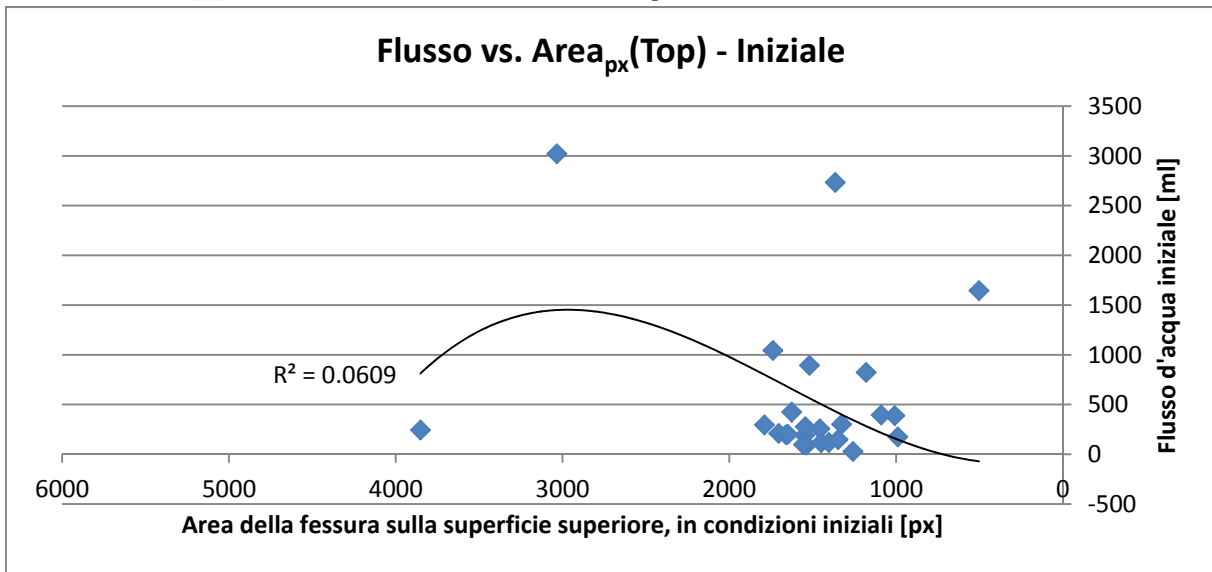
Metodologia: misurazione ampiezza massima della fessura, W_{max} .



Metodologia: misurazione ampiezza media della fessura, W_{media} .

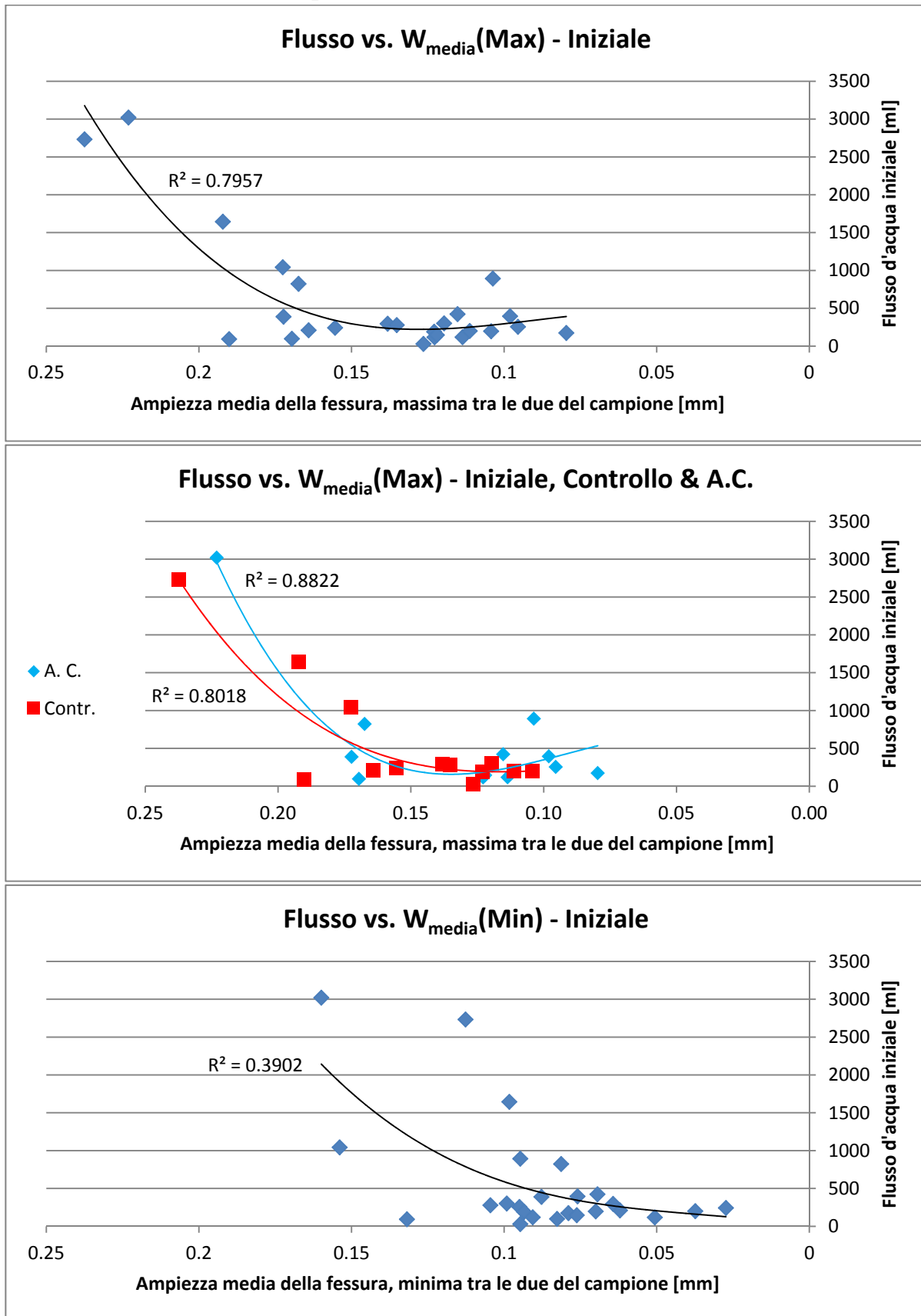


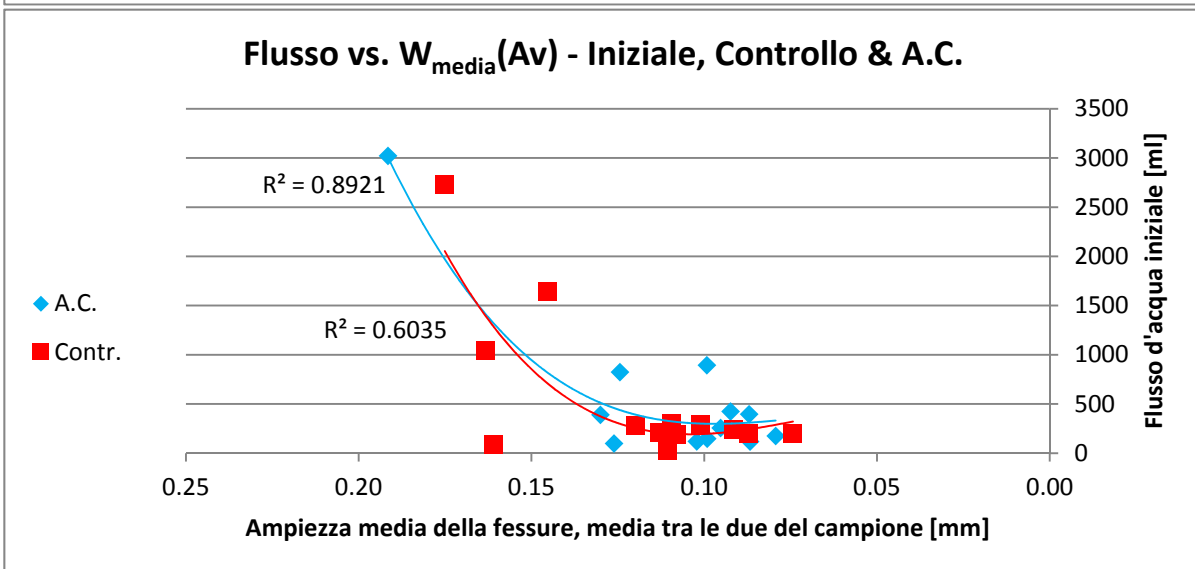
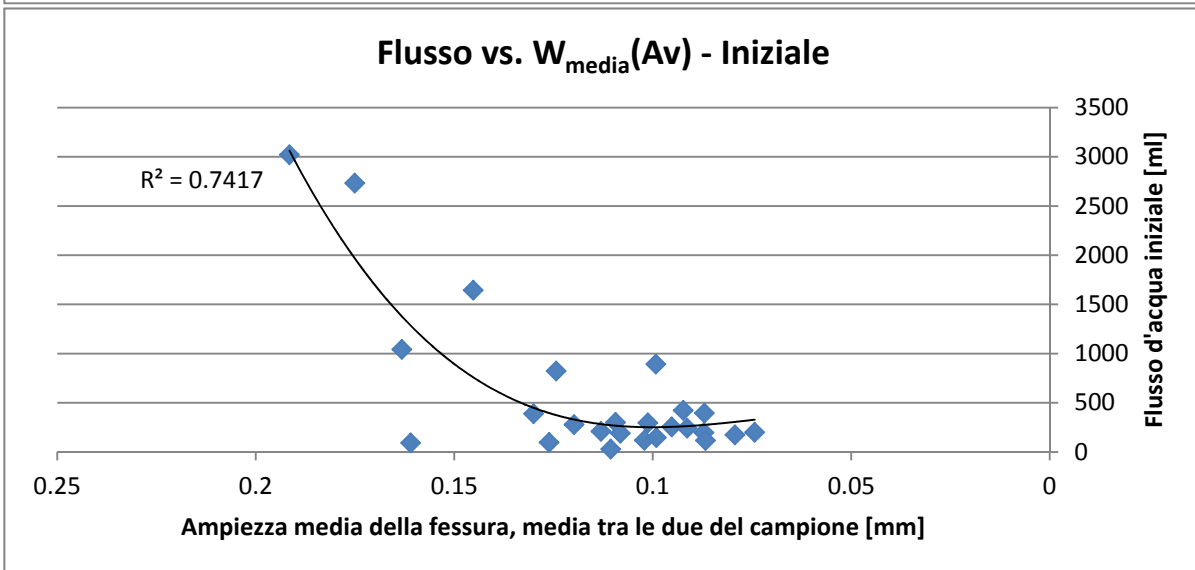
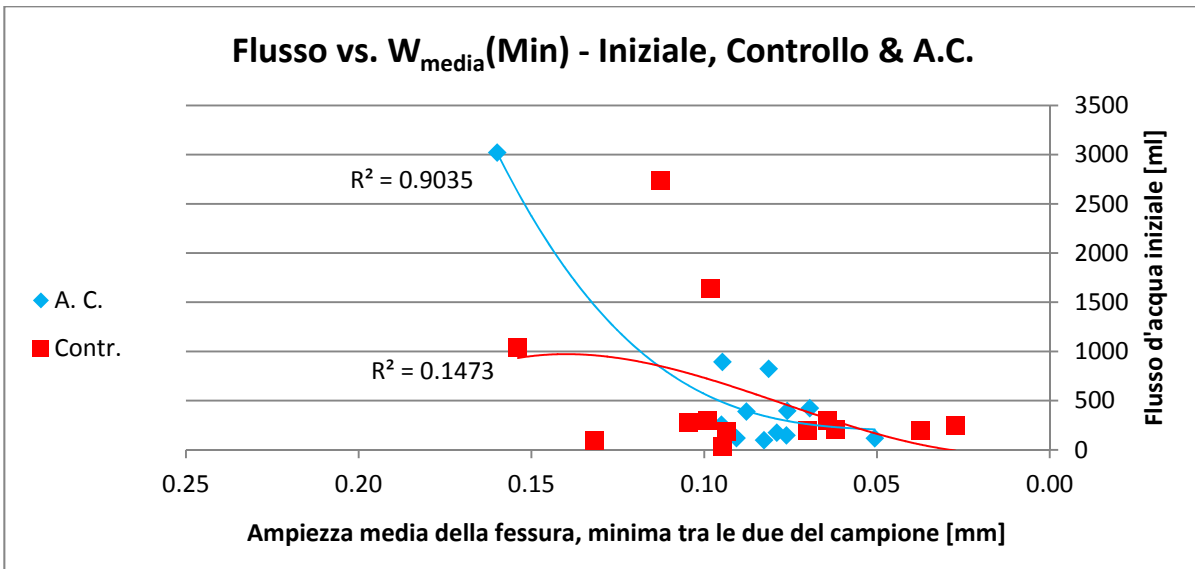
Metodologia: misurazione dell'area della fessura, mediante software di grafica in grado di fornire il numero dei pixel neri contenuti all'interno di immagini ad alta risoluzione rappresentanti la fessura, $Area_{px}$.



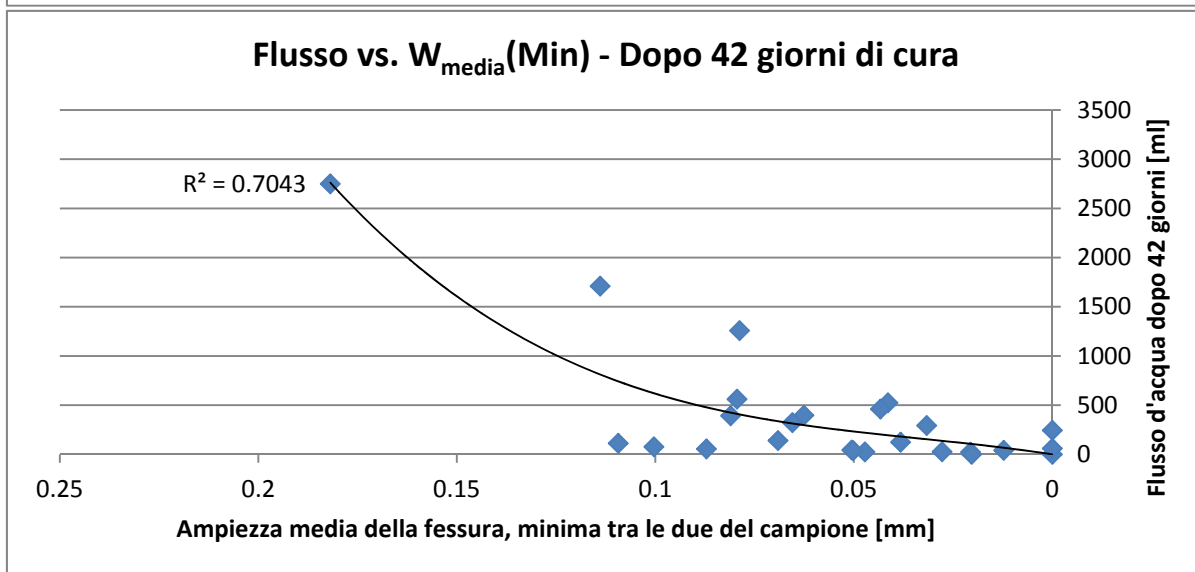
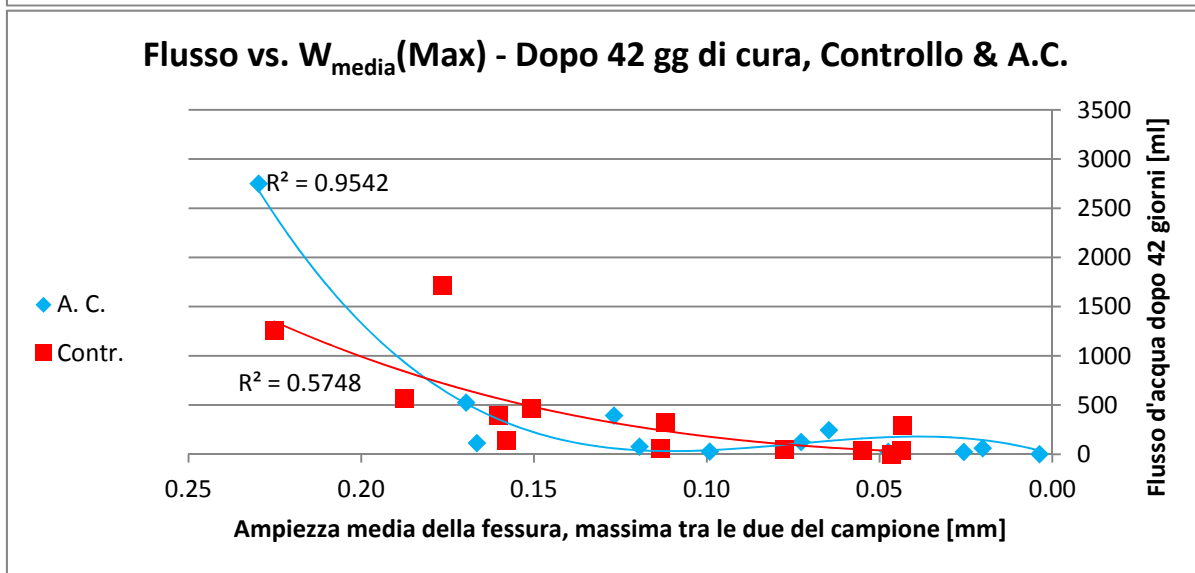
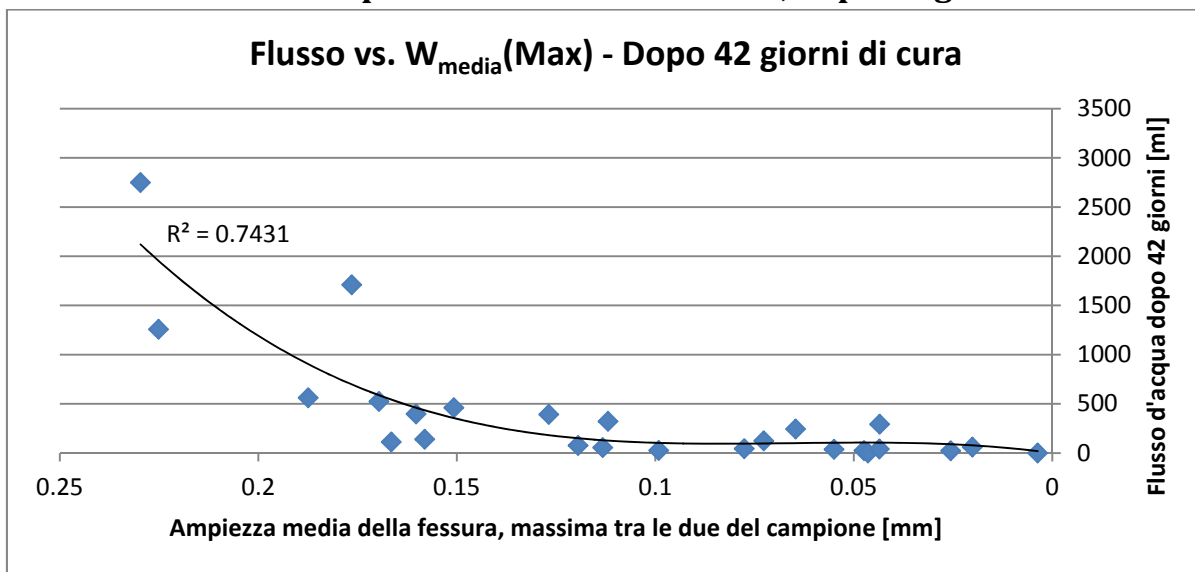
APPENDICE E - Metodologia scelta W_{media} : grafici completi

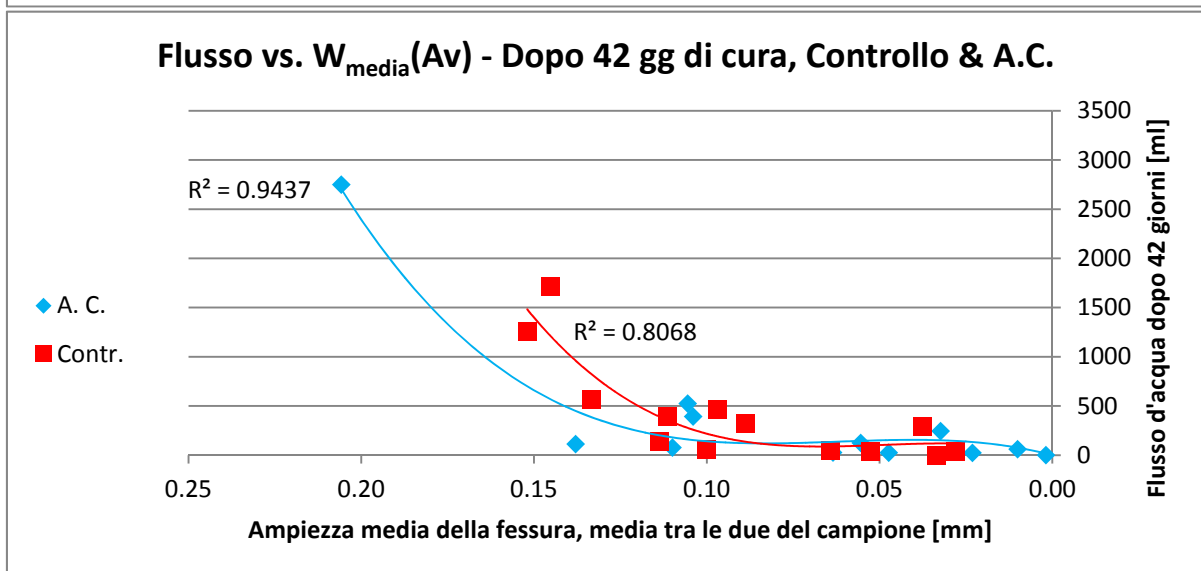
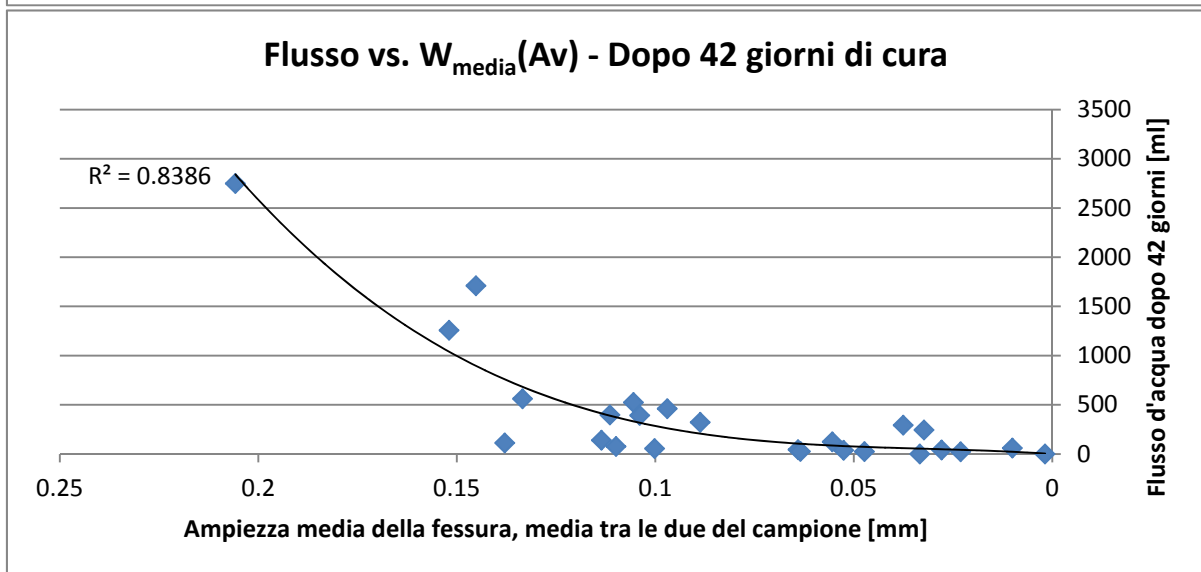
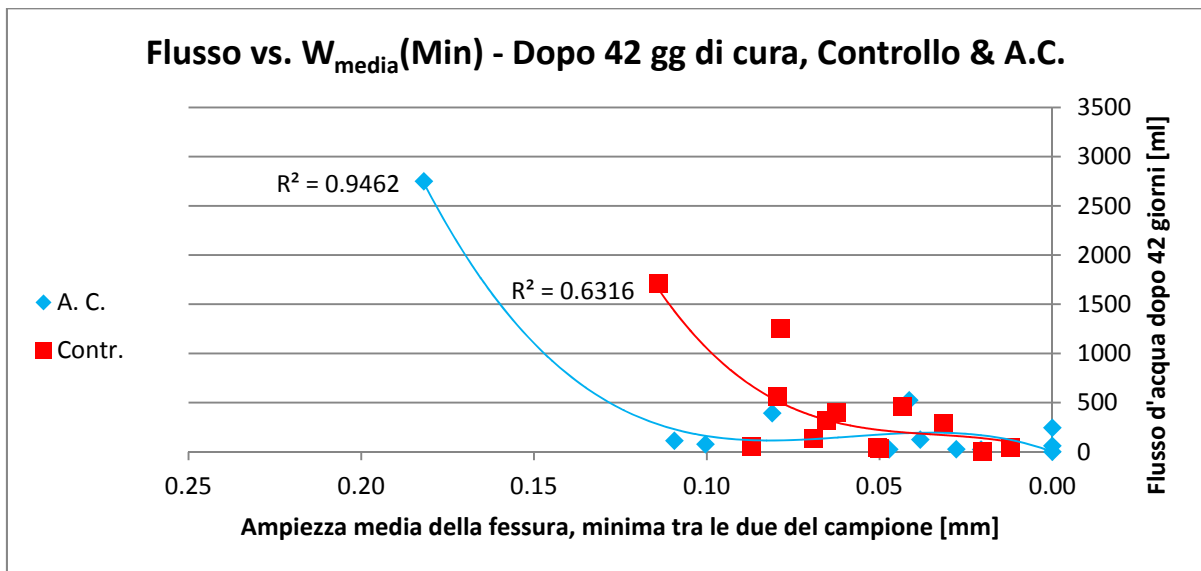
Relazione tra flusso e ampiezza media della fessura, in condizioni iniziali



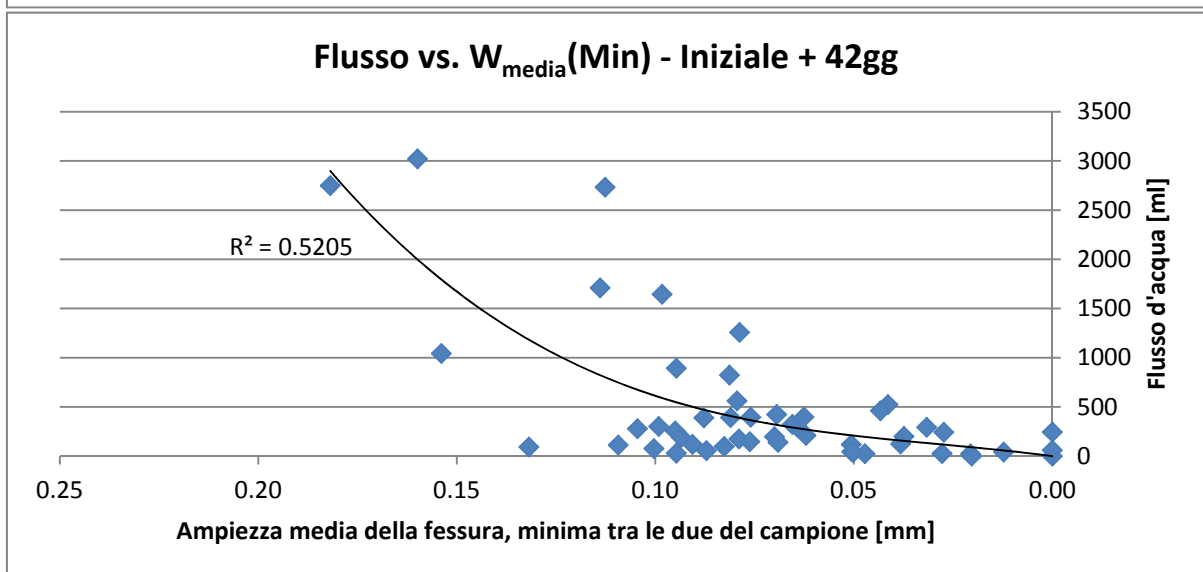
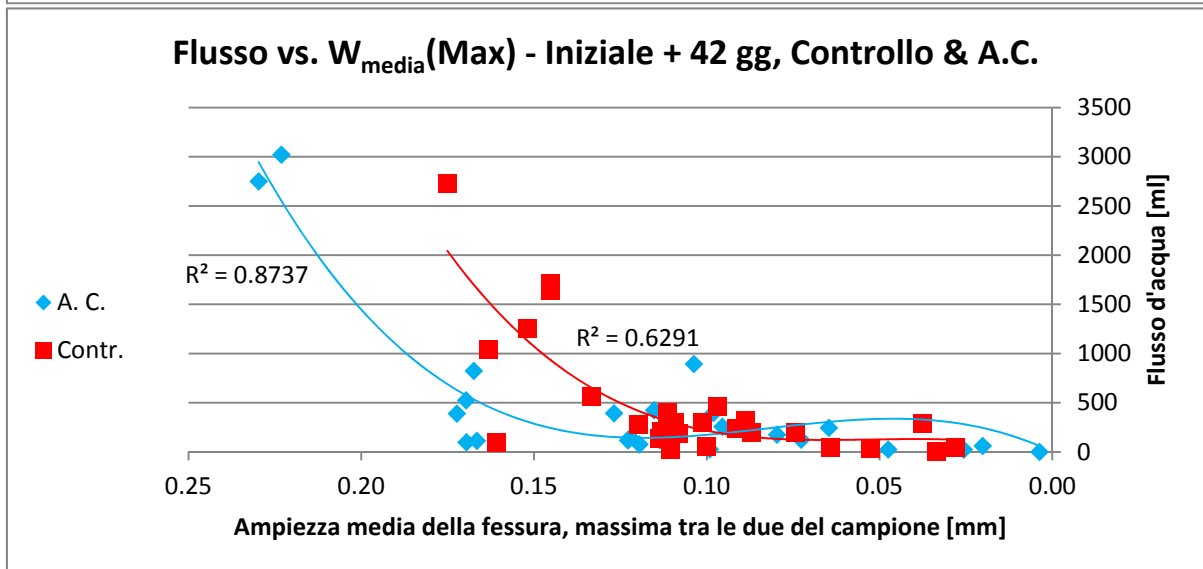
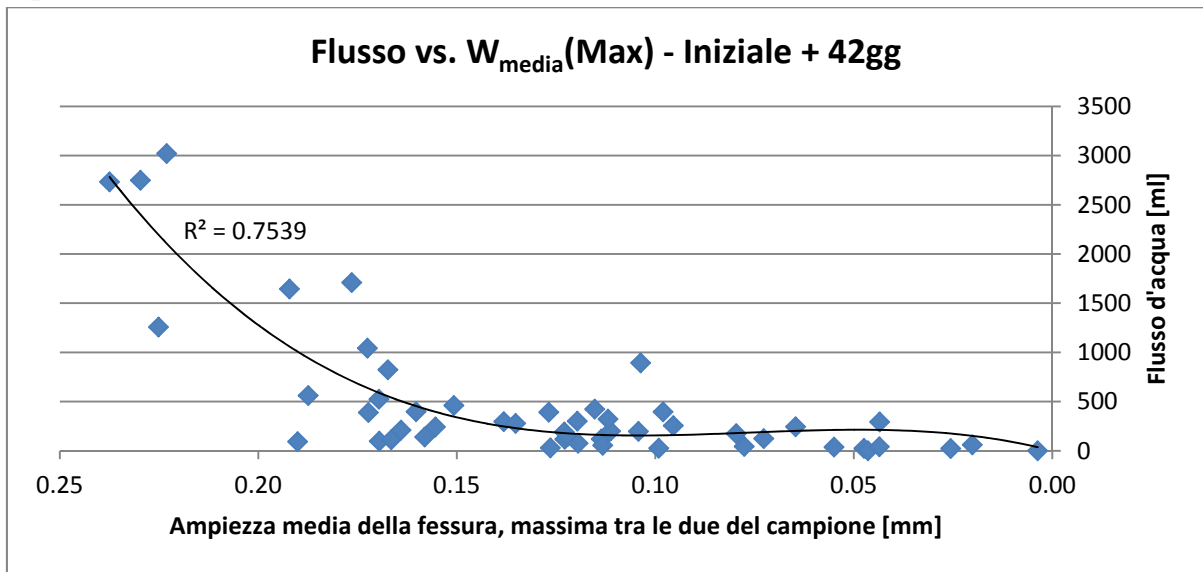


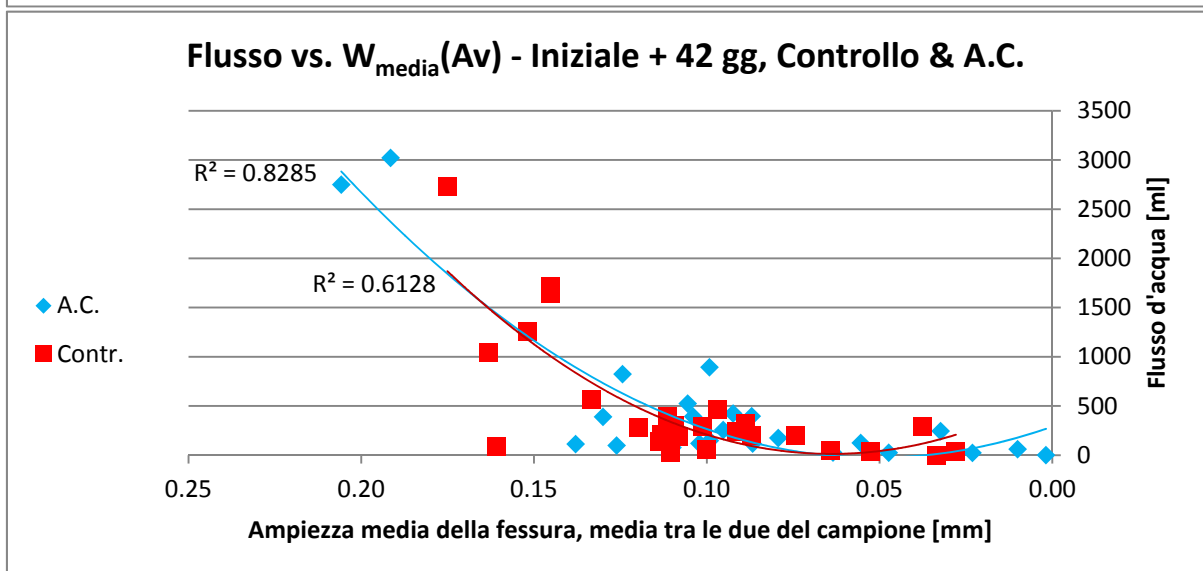
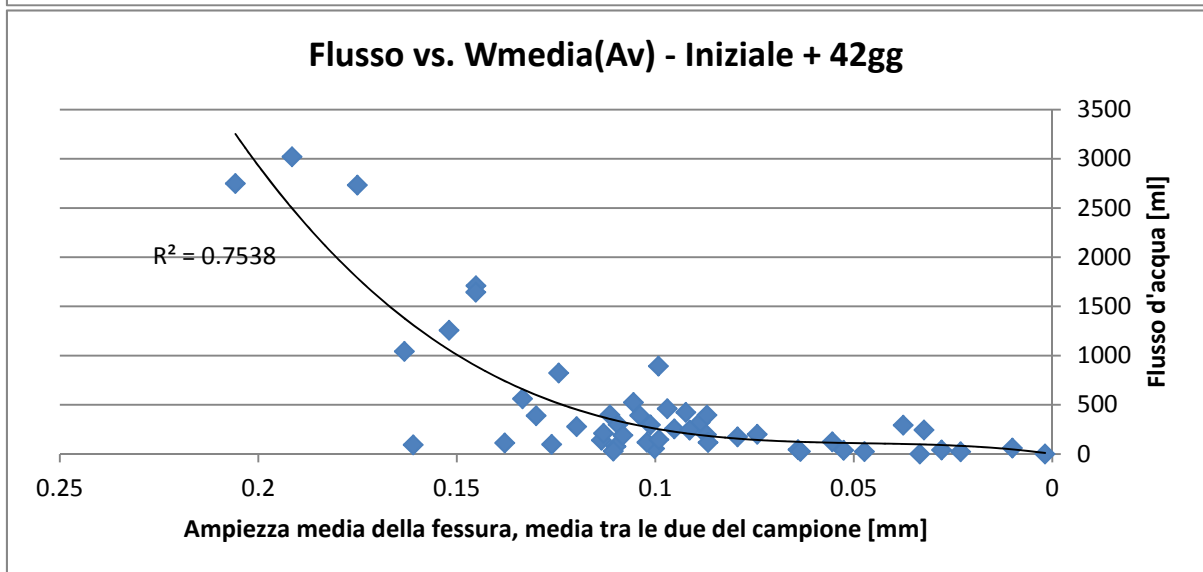
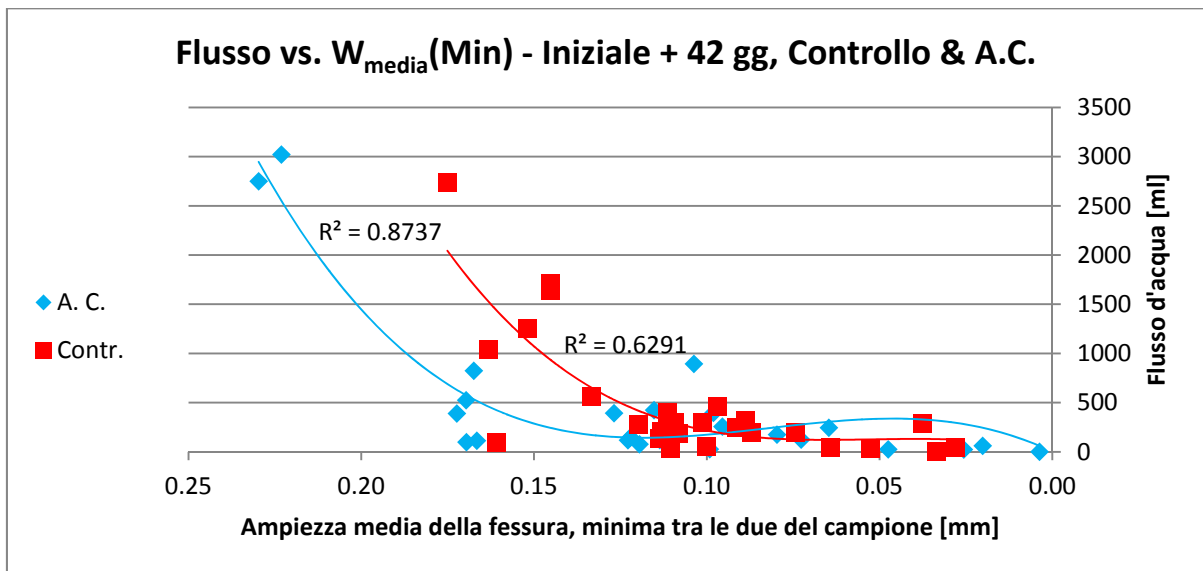
Relazione tra flusso e ampiezza media della fessura, dopo 42 giorni di cura





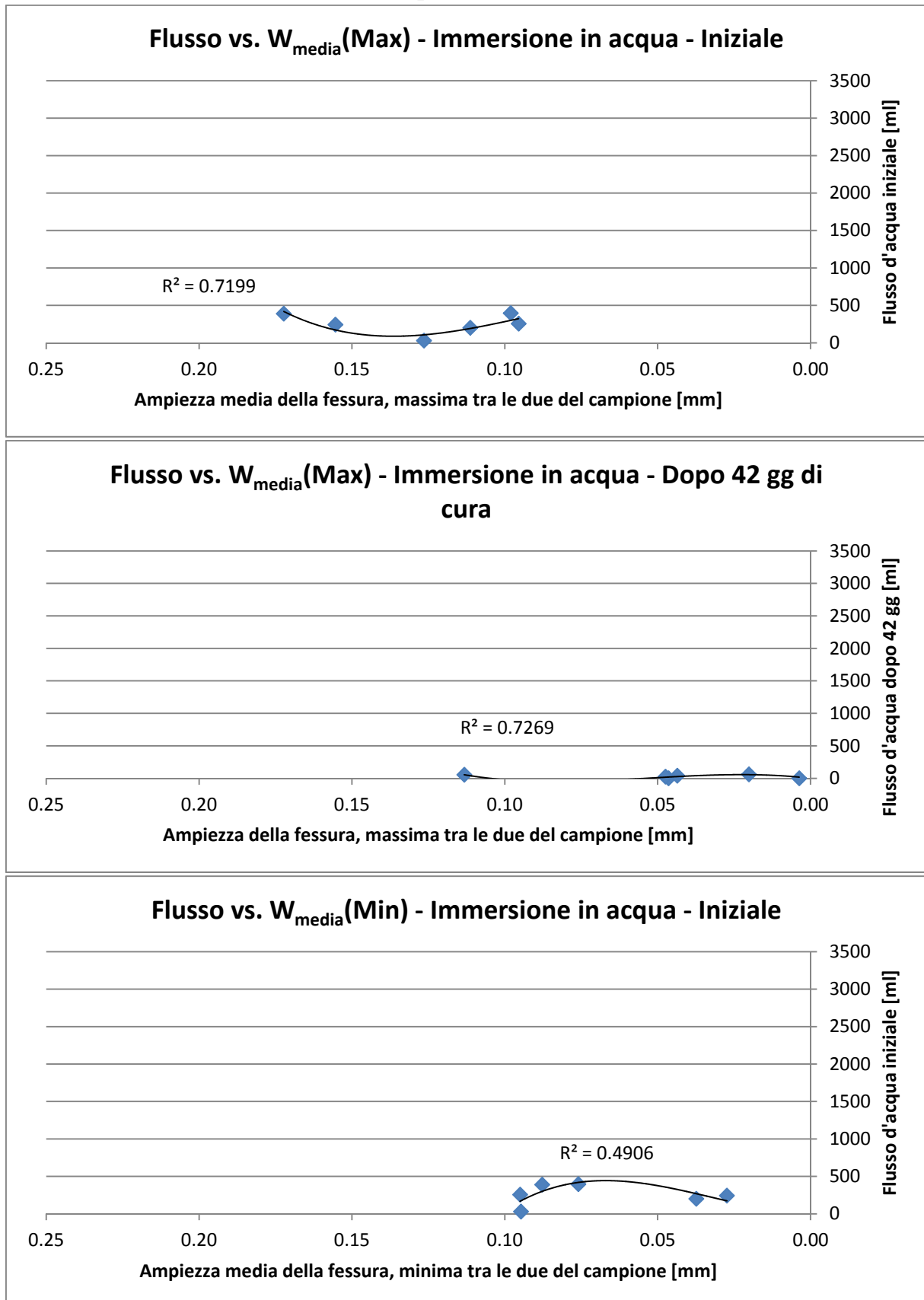
Relazione tra flusso e ampiezza media della fessura, rappresentazione globale campioni

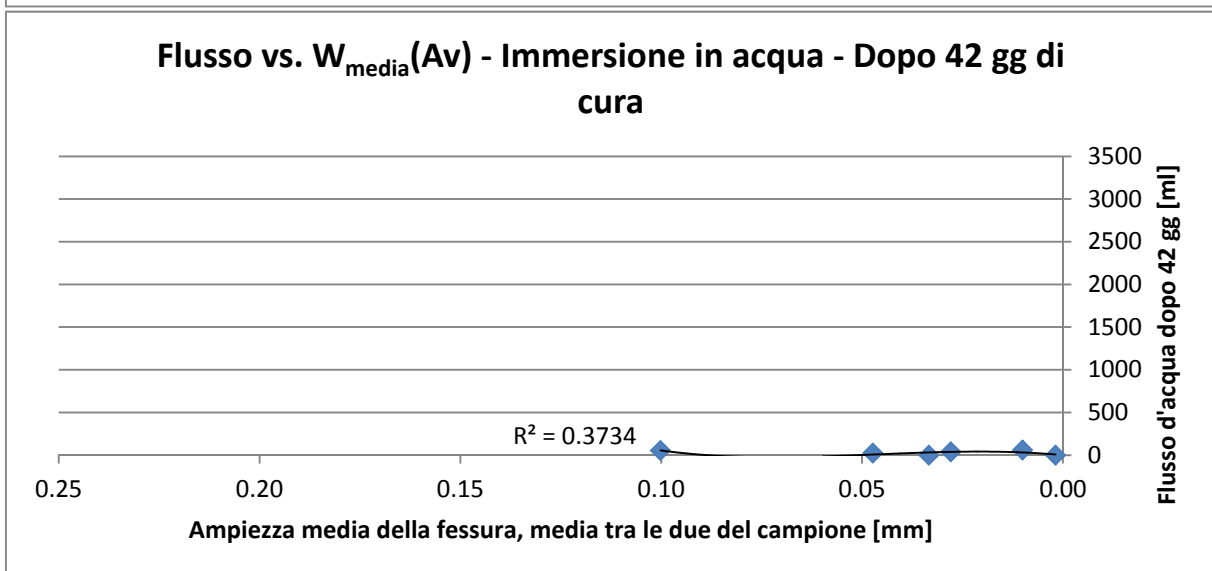
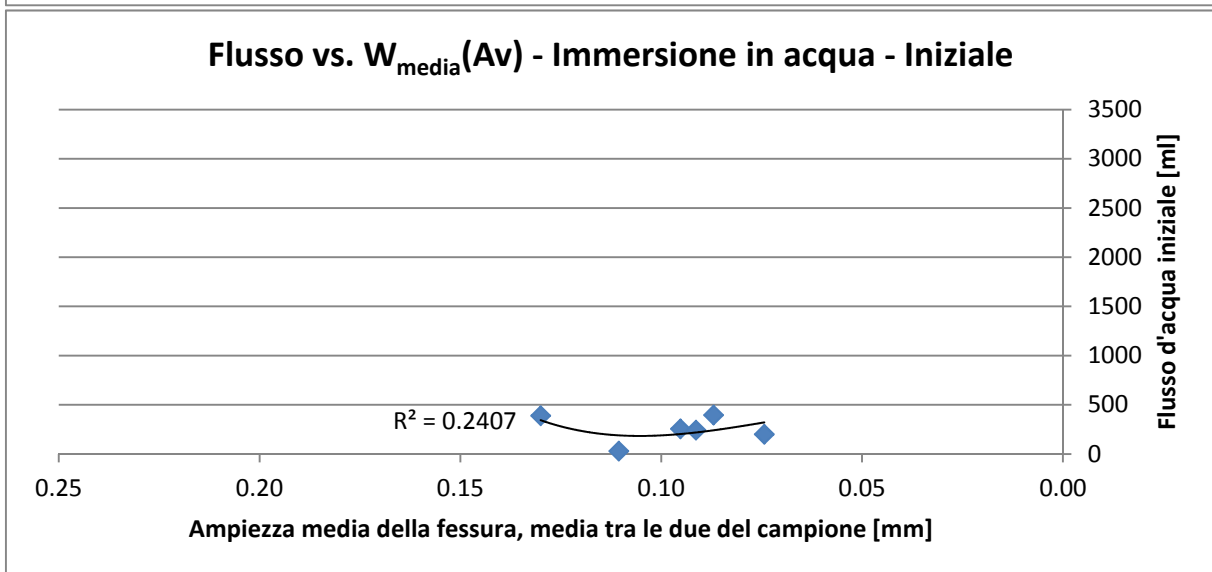
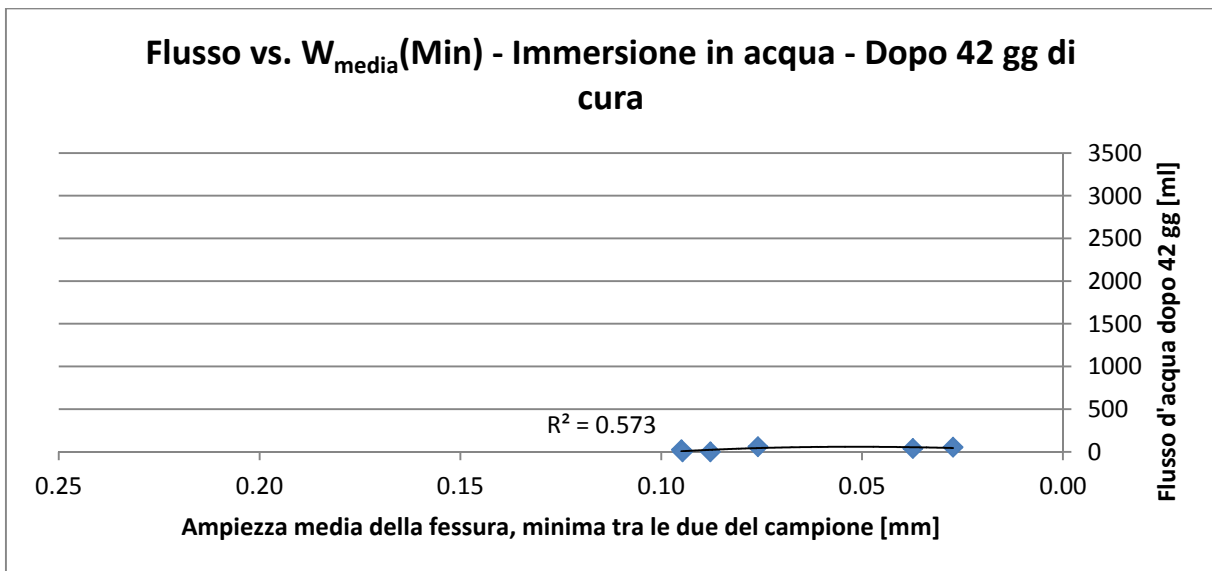




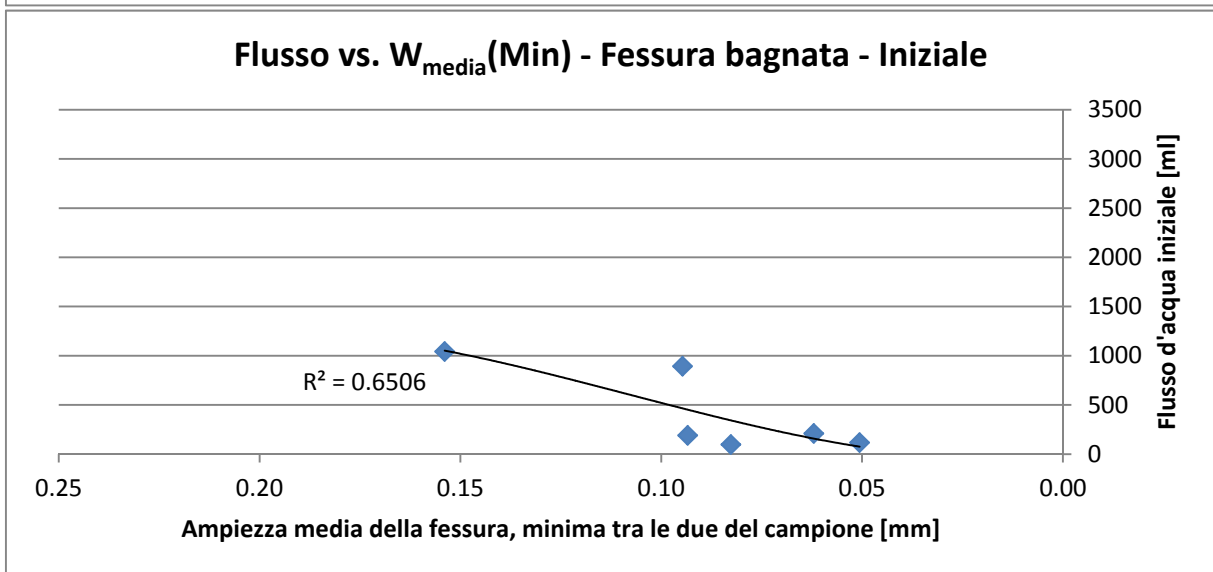
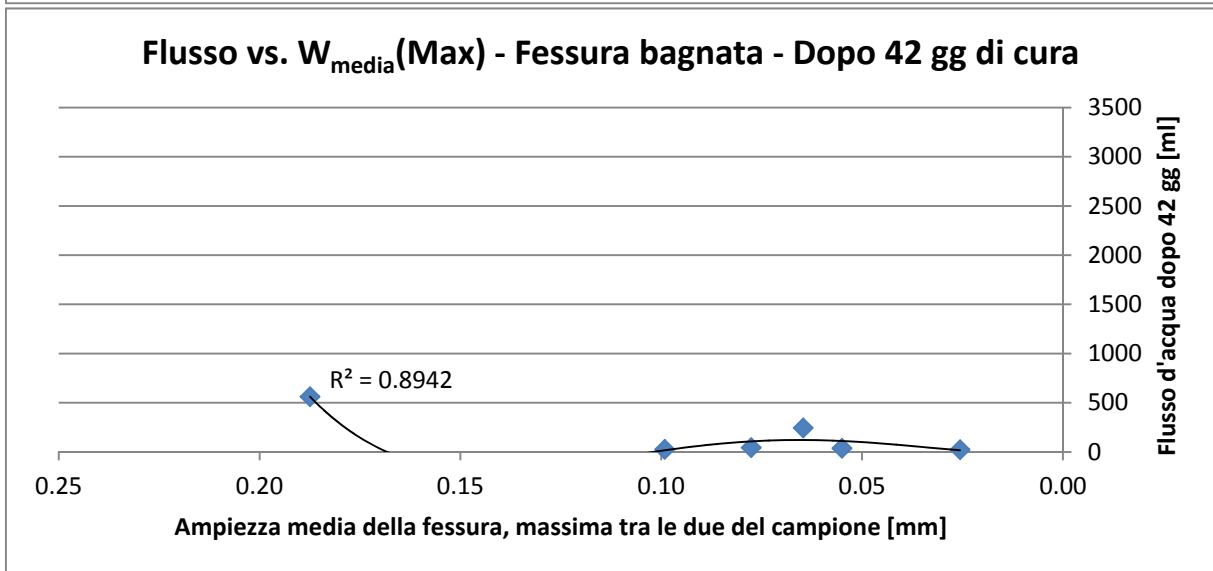
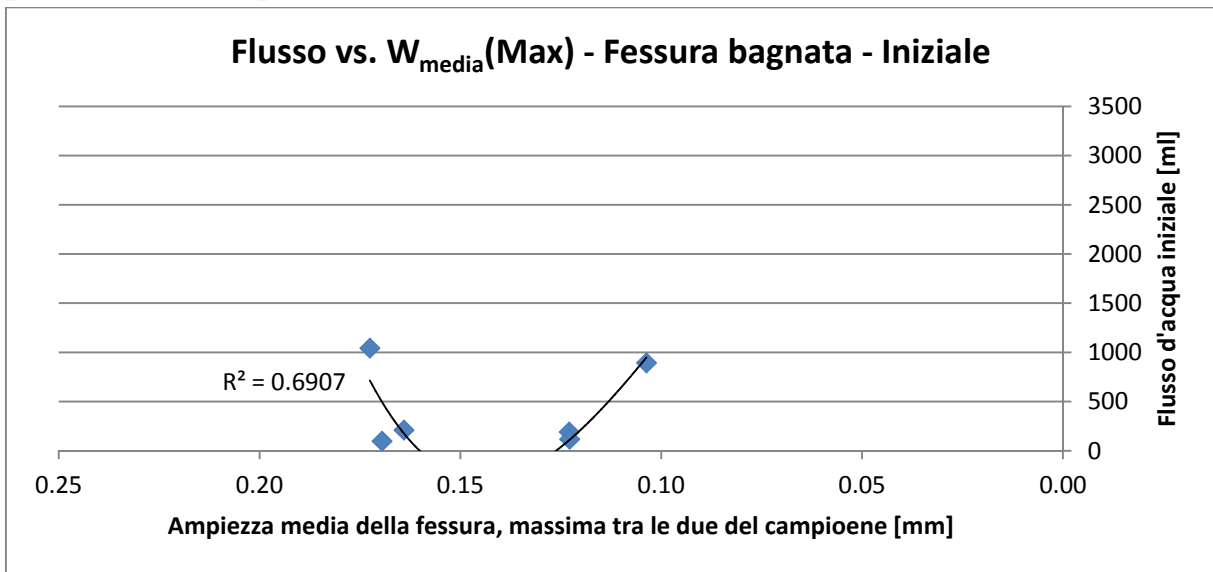
APPENDICE F - Relazione tra il flusso e l'ampiezza media della fessura nei differenti ambienti di cura

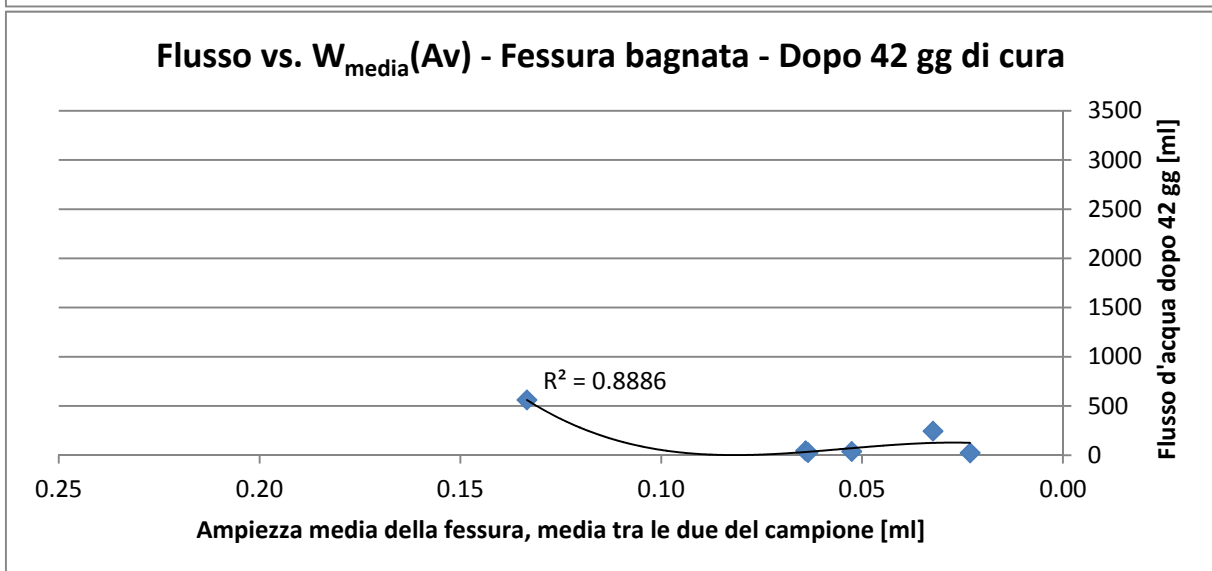
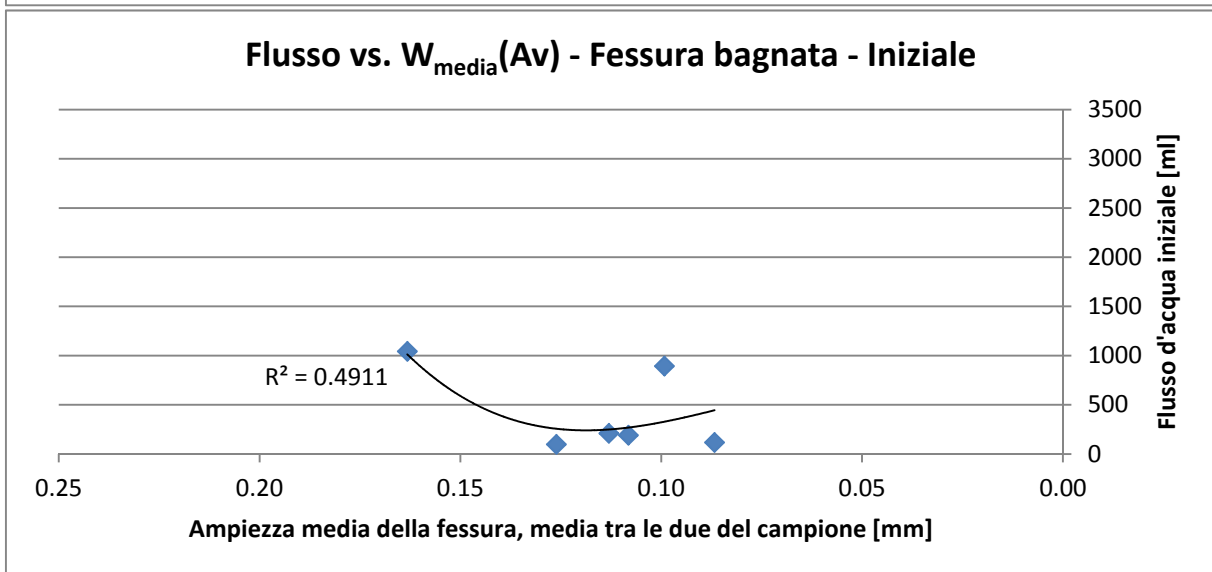
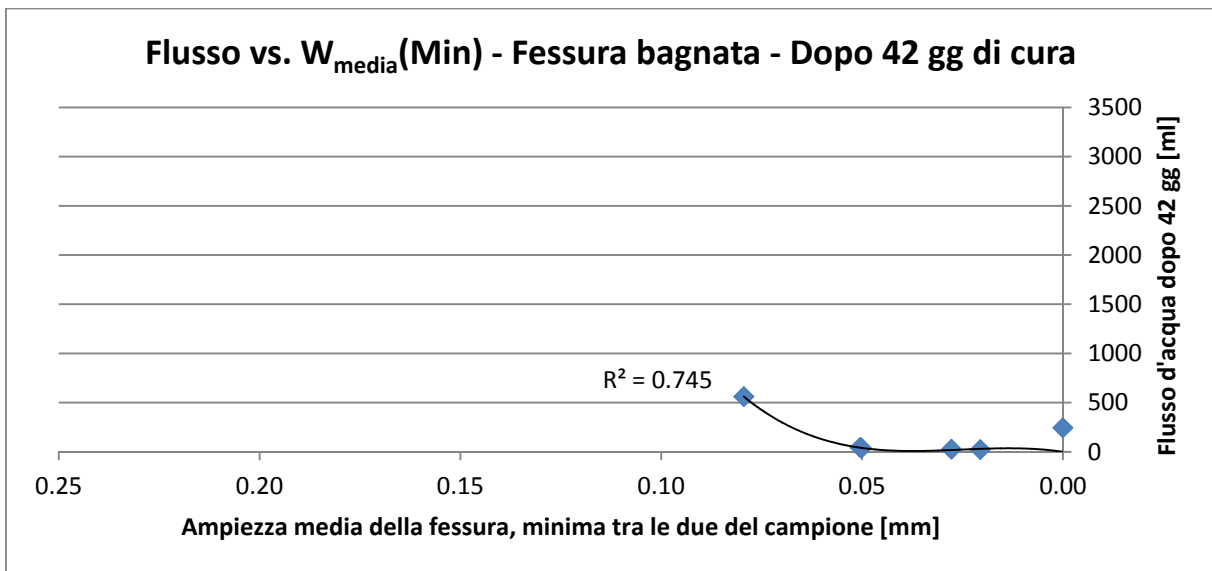
Ambiente di cura: immersione in acqua



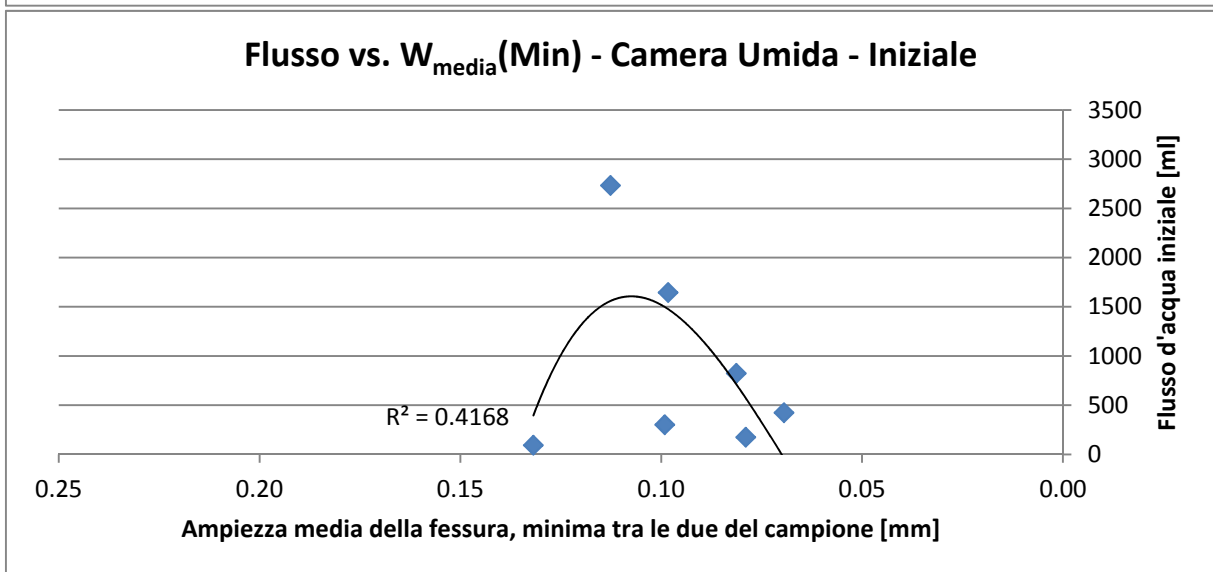
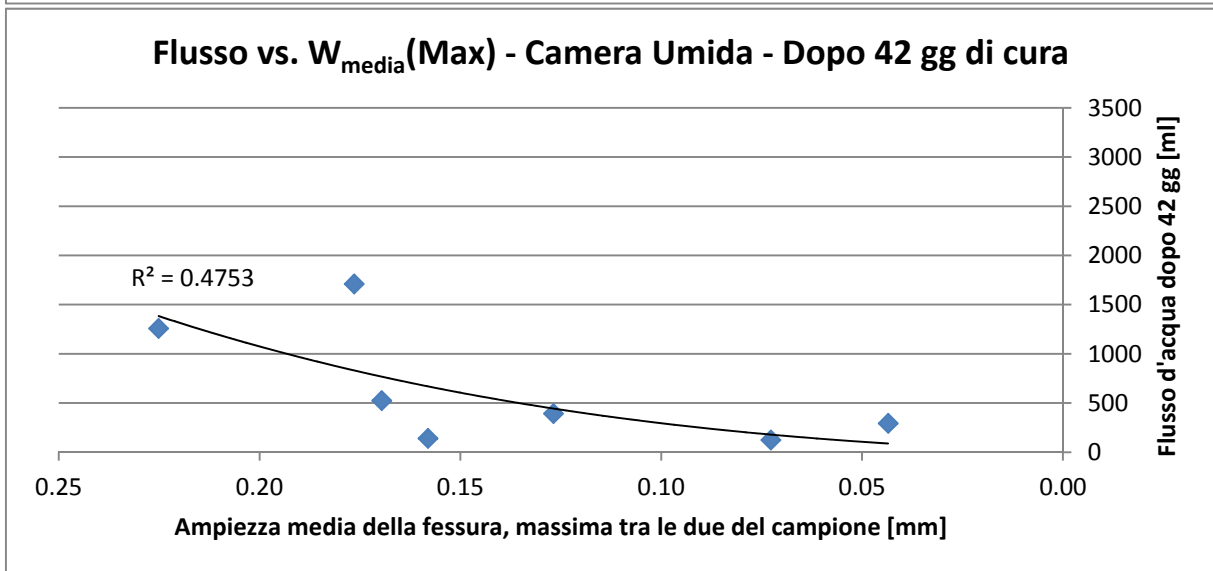
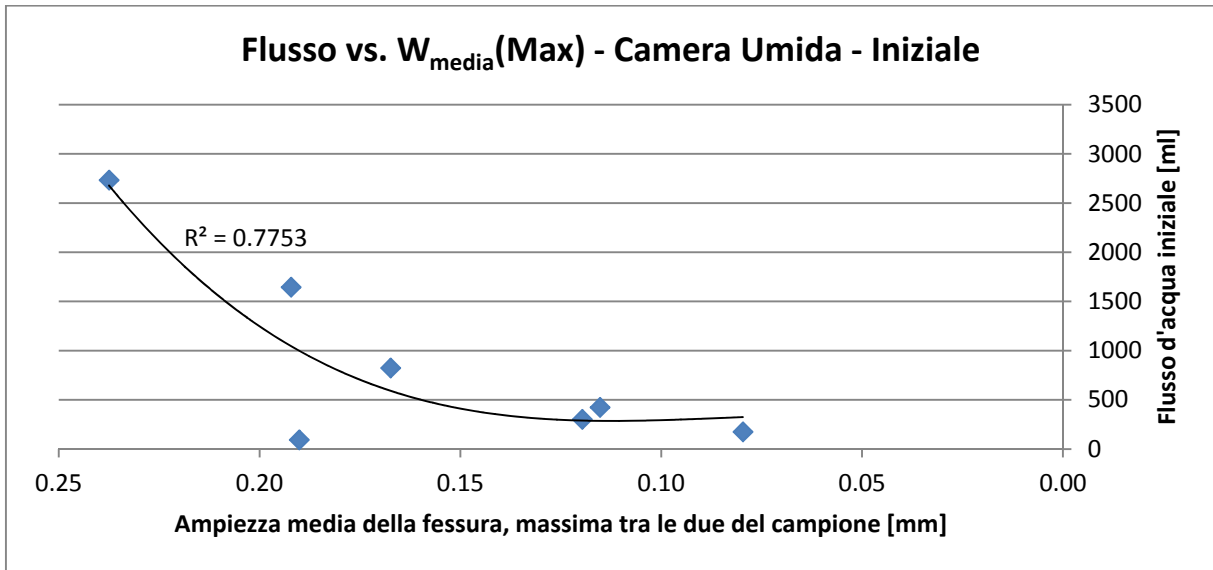


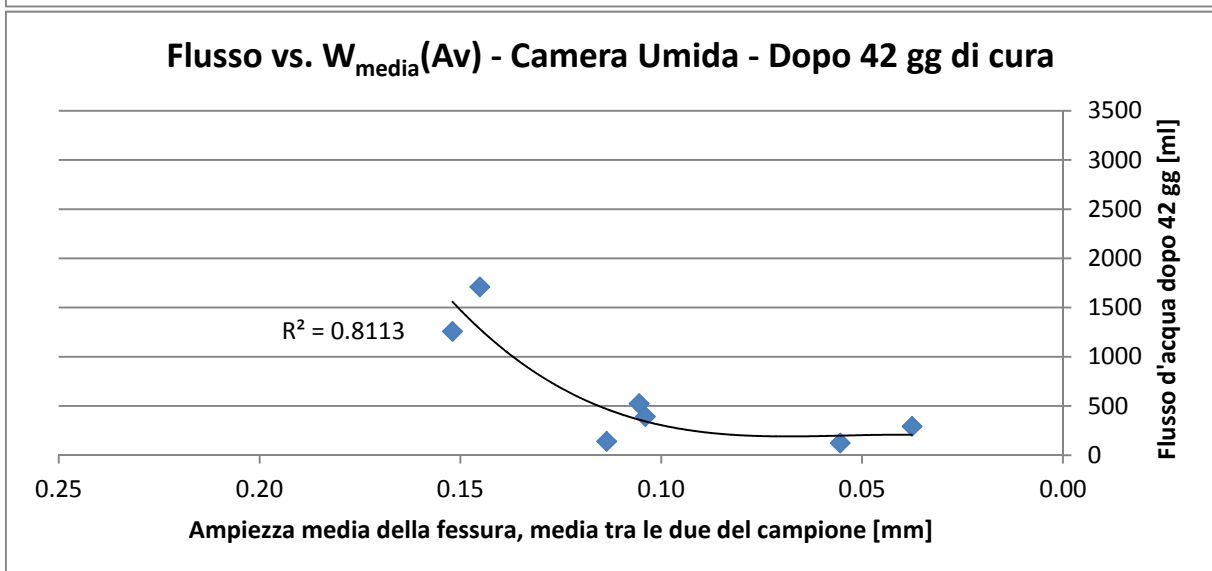
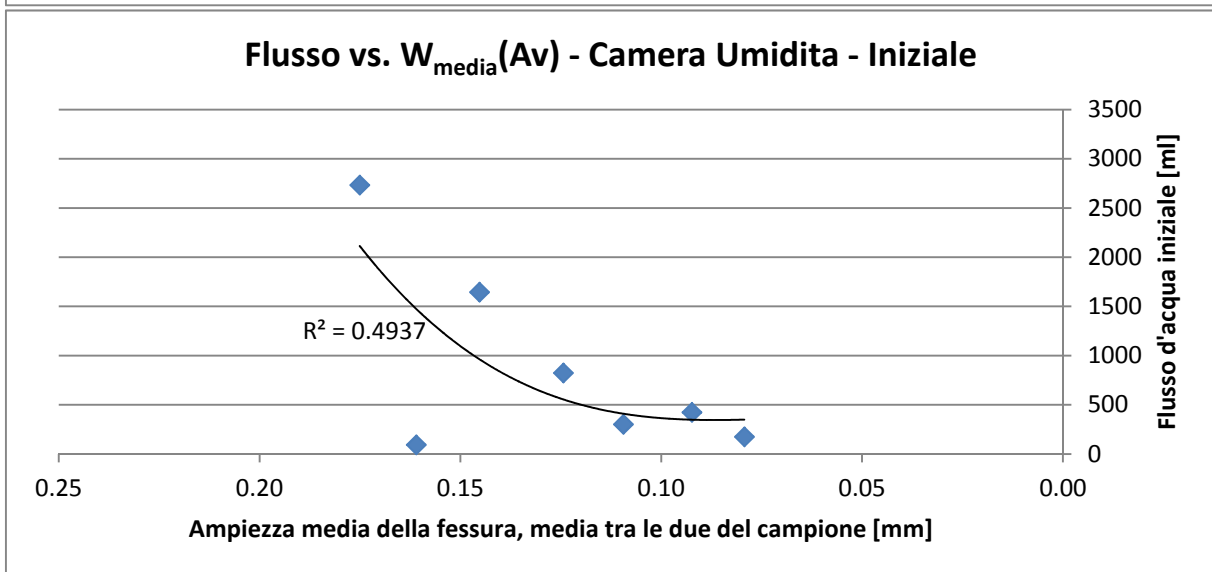
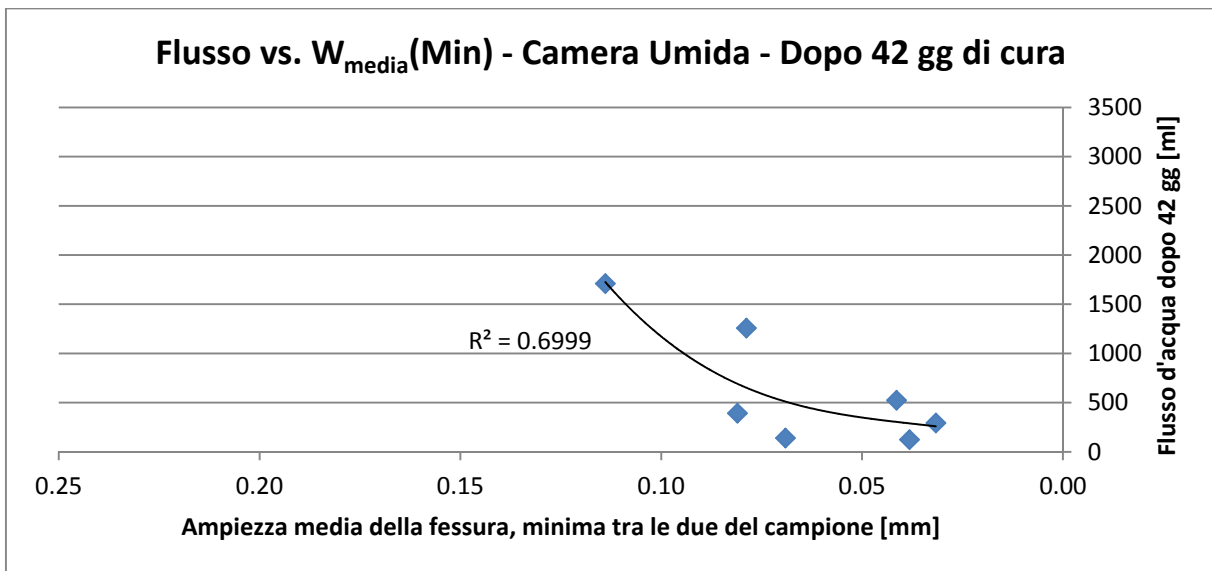
Ambiente di cura: fessura bagnata e strato di 2 cm di acqua sulla superficie superiore del campione



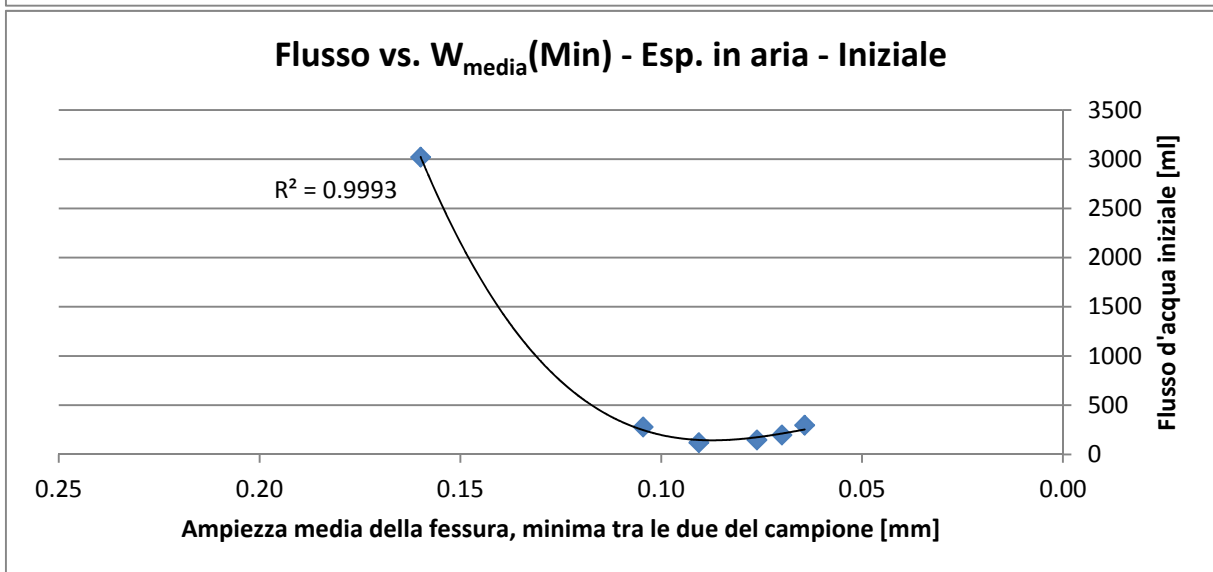
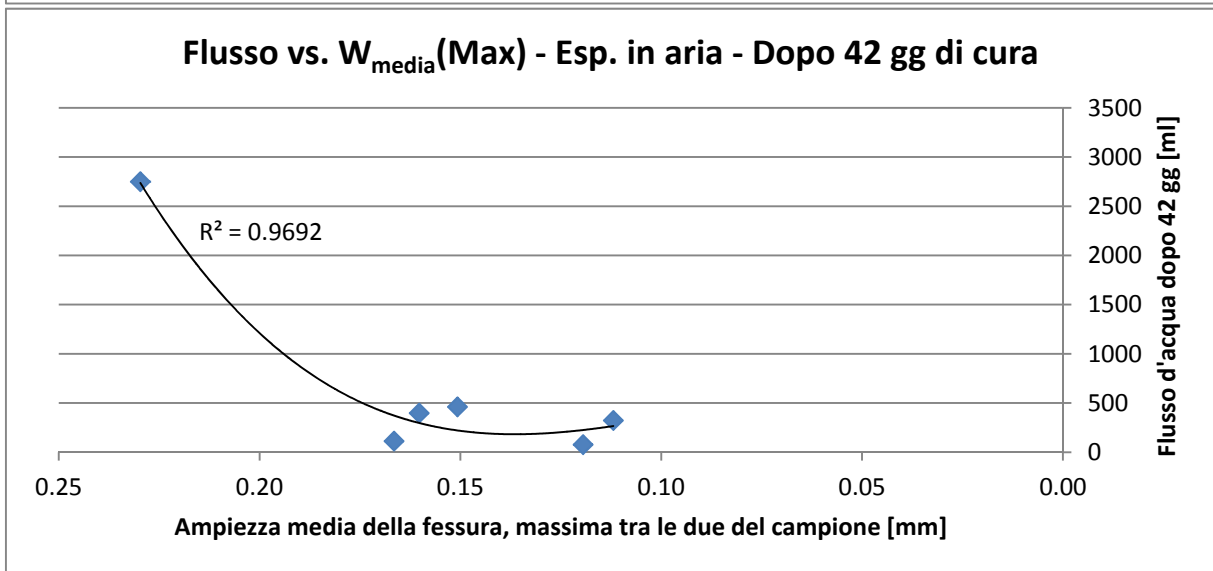
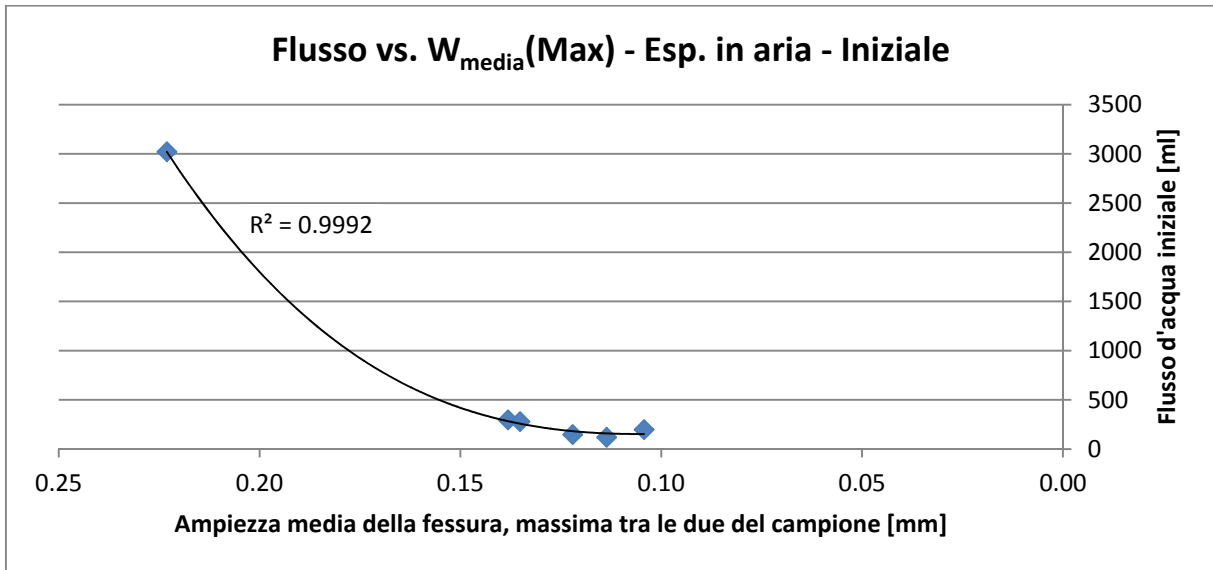


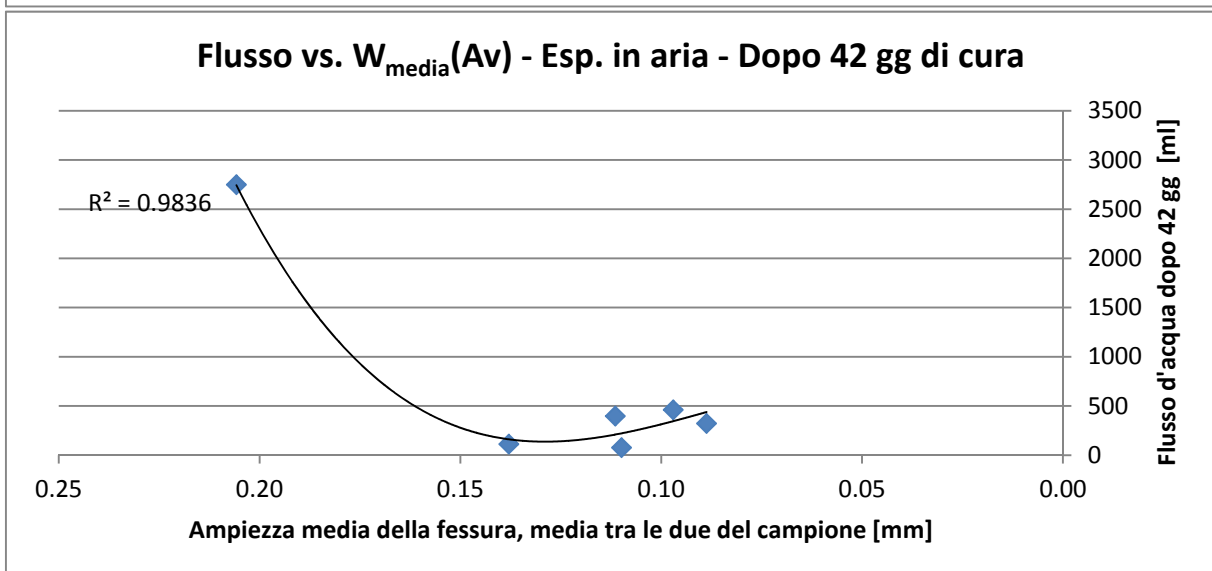
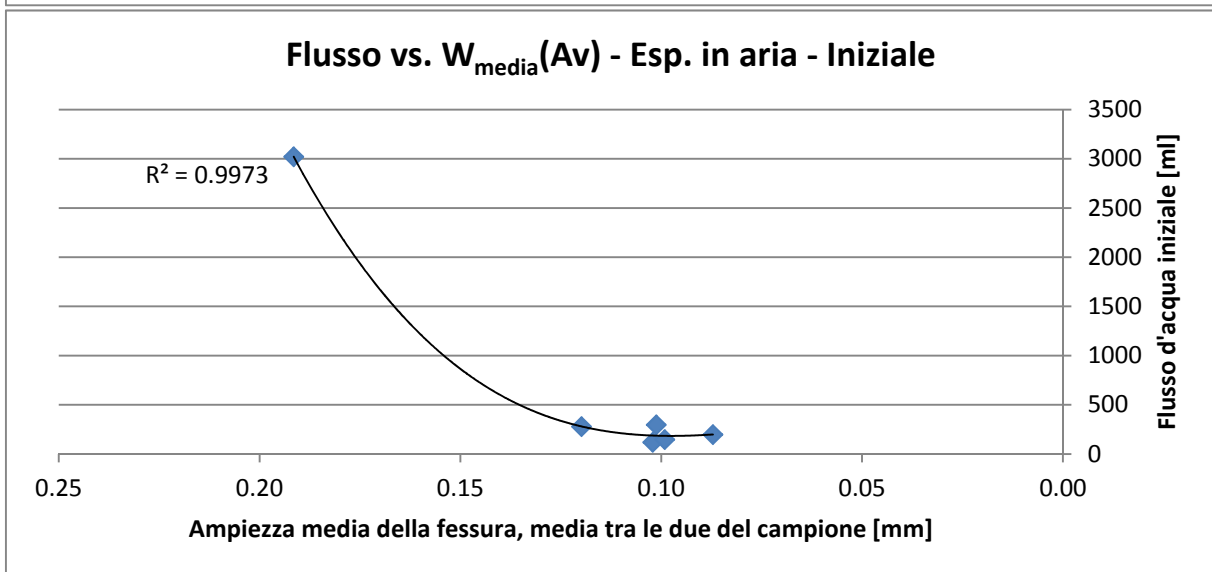
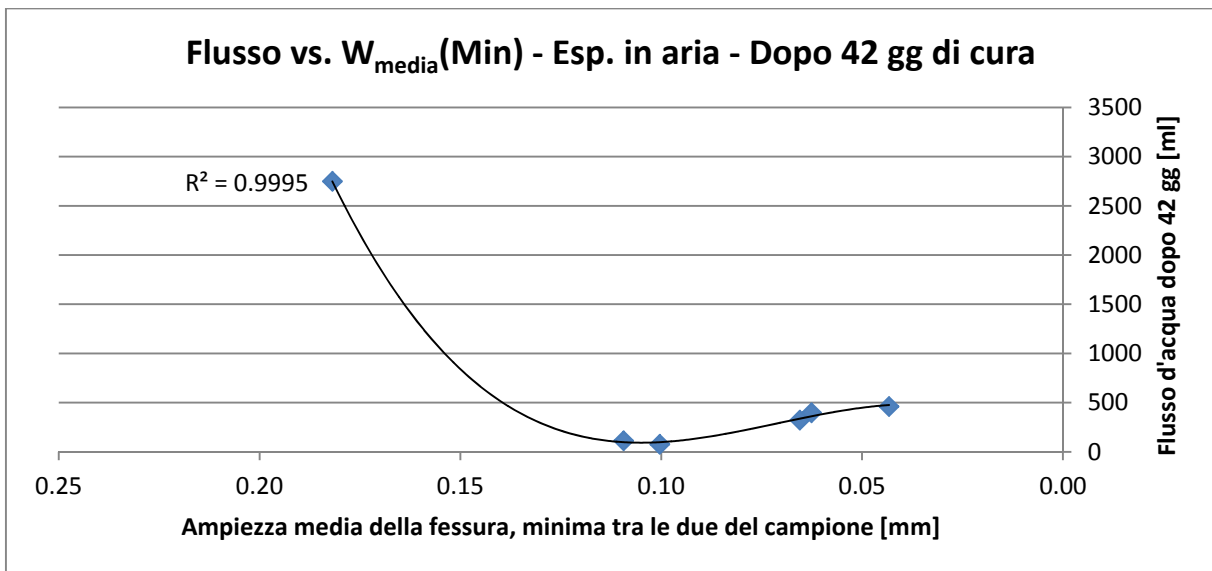
Ambiente di cura: camera umida a 20°C e 100% U.R.

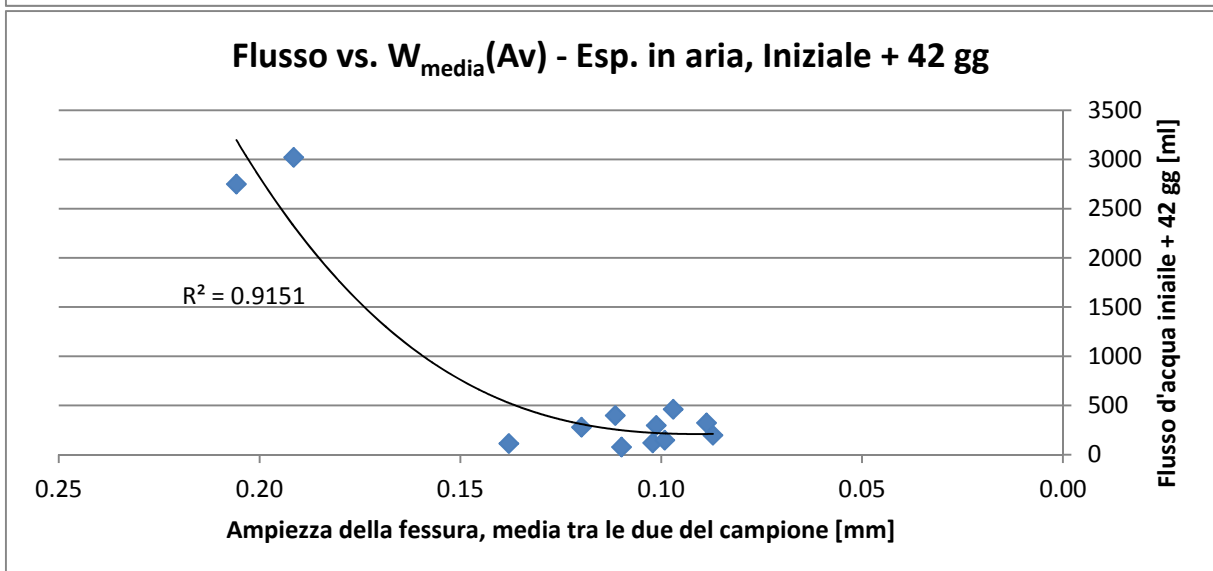
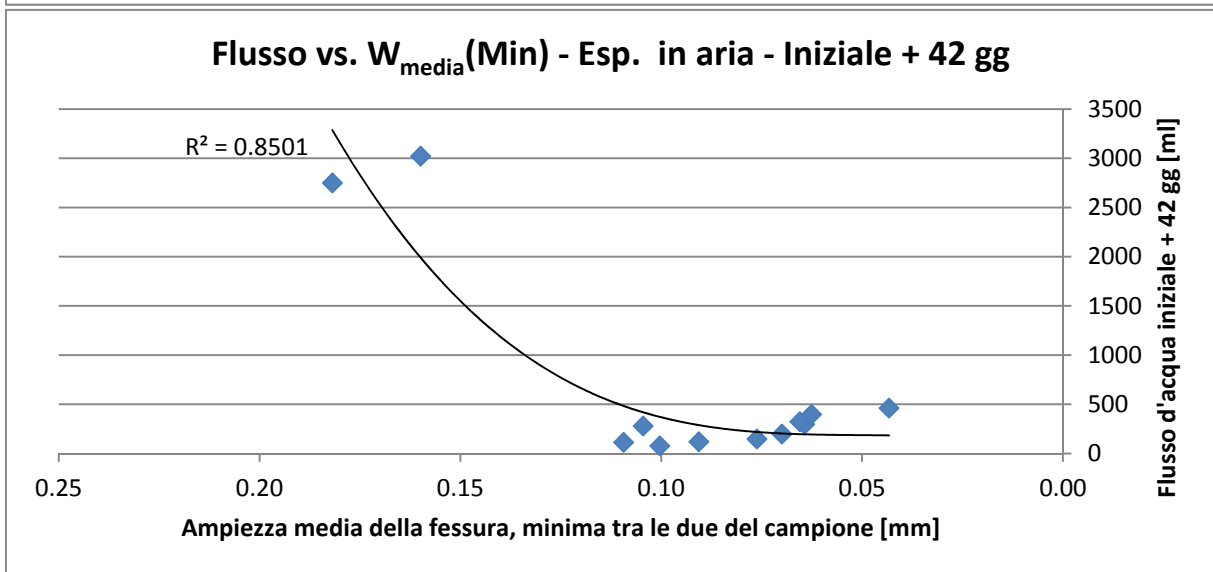
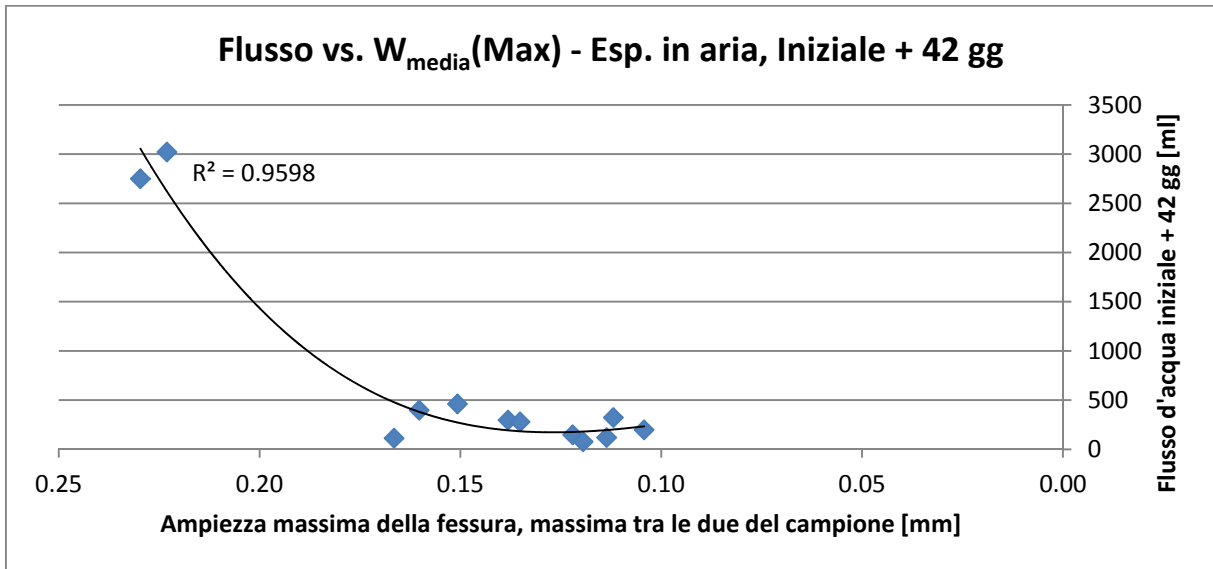




Ambiente di cura: esposizione ad aria non trattata

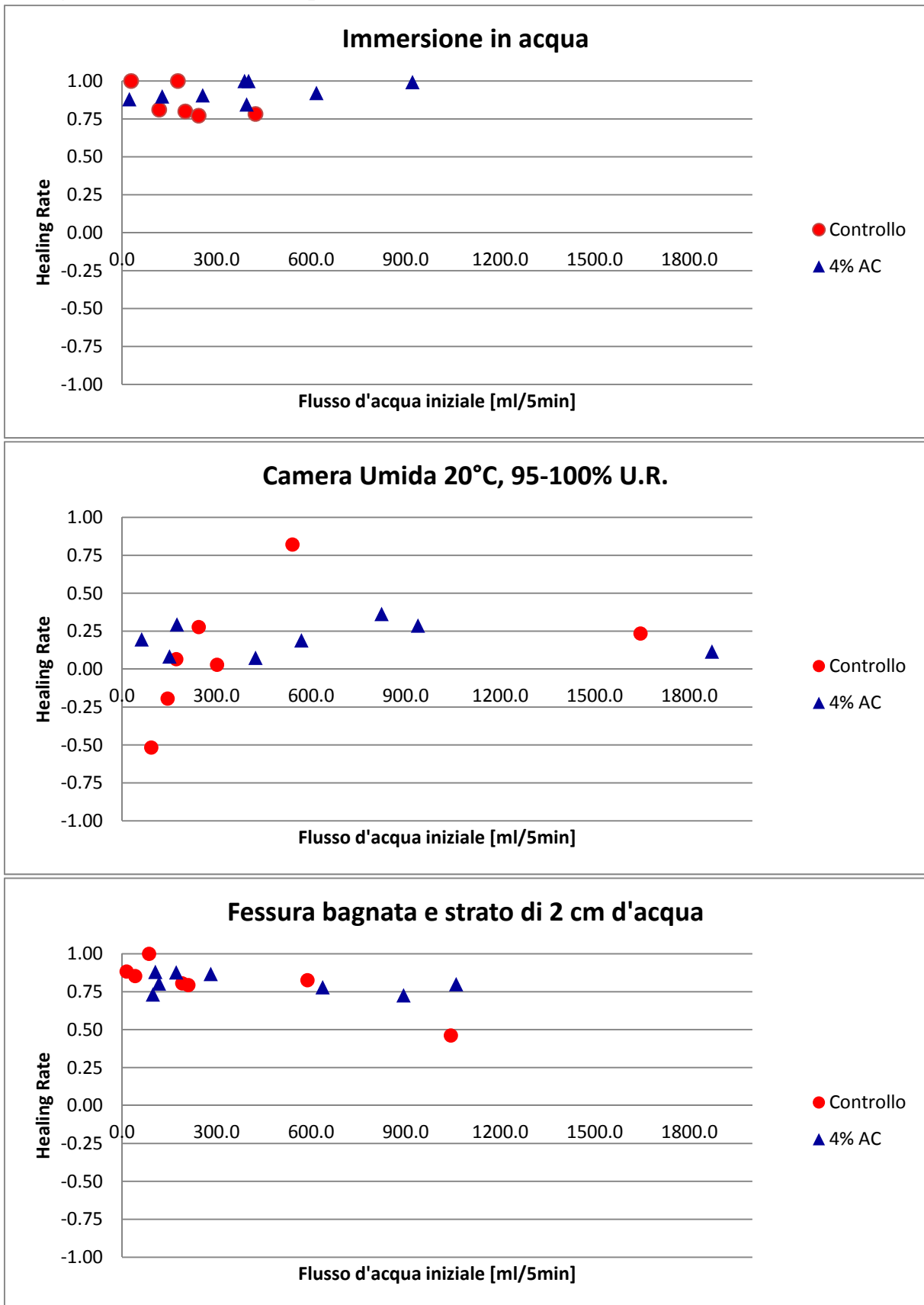


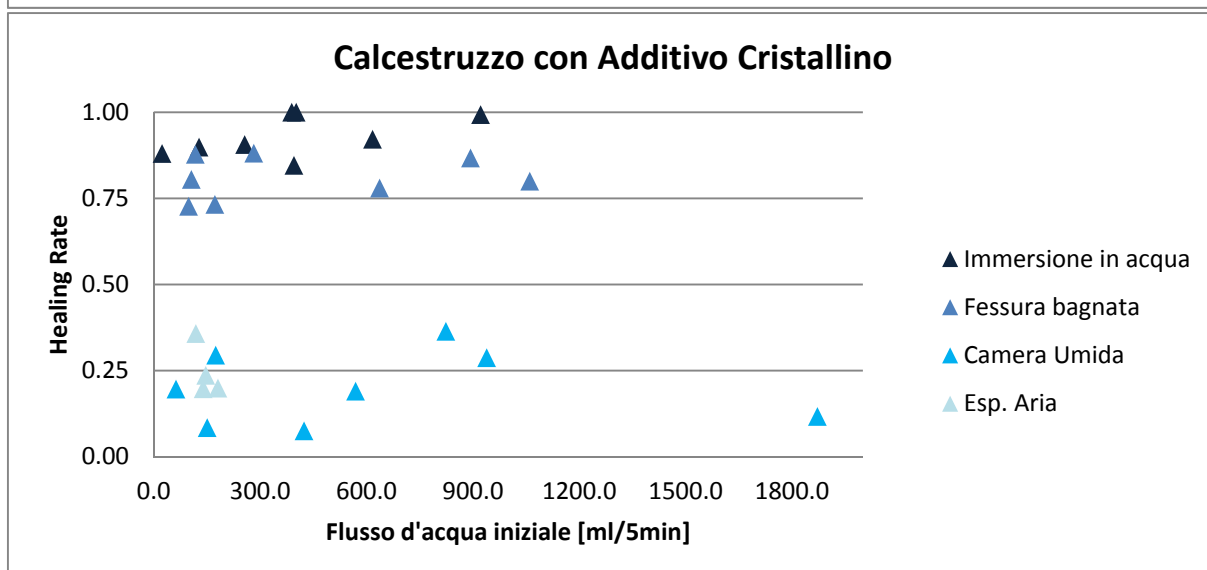
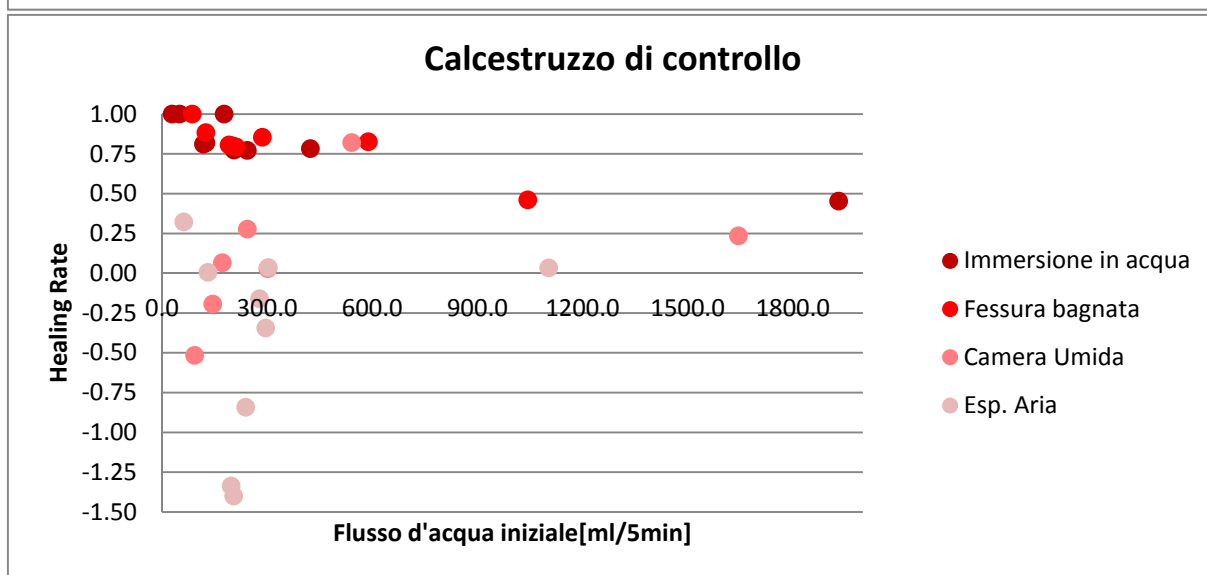
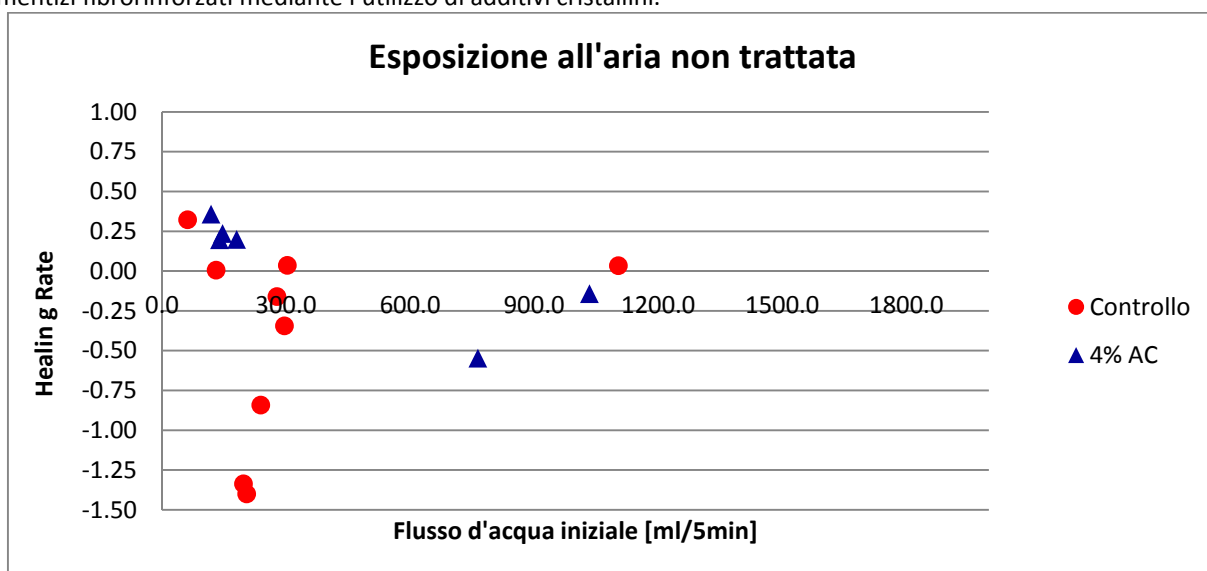




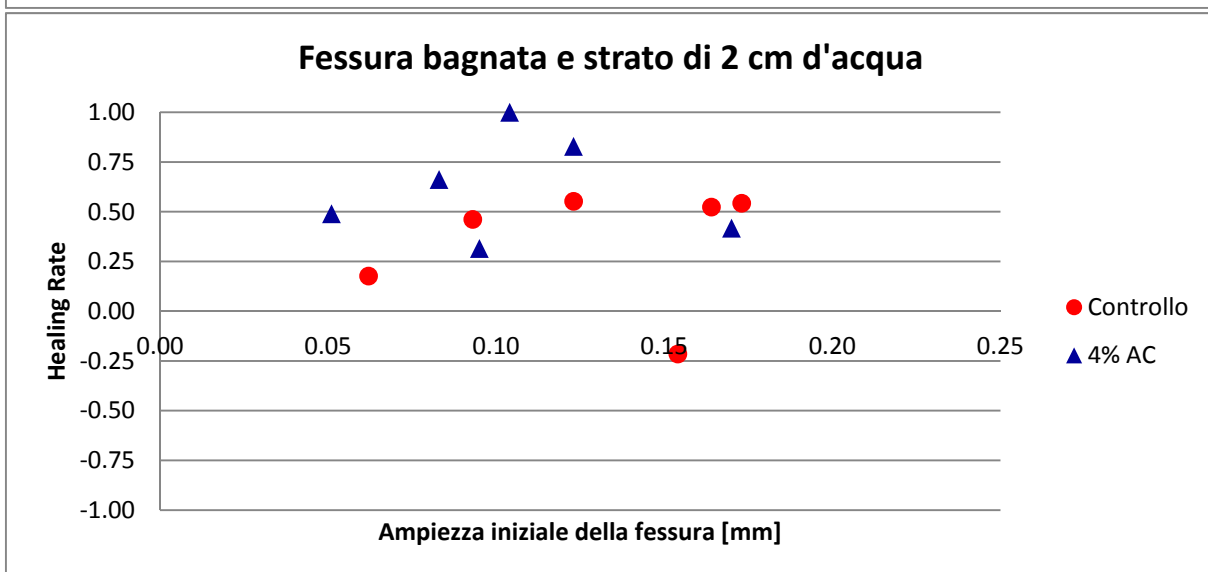
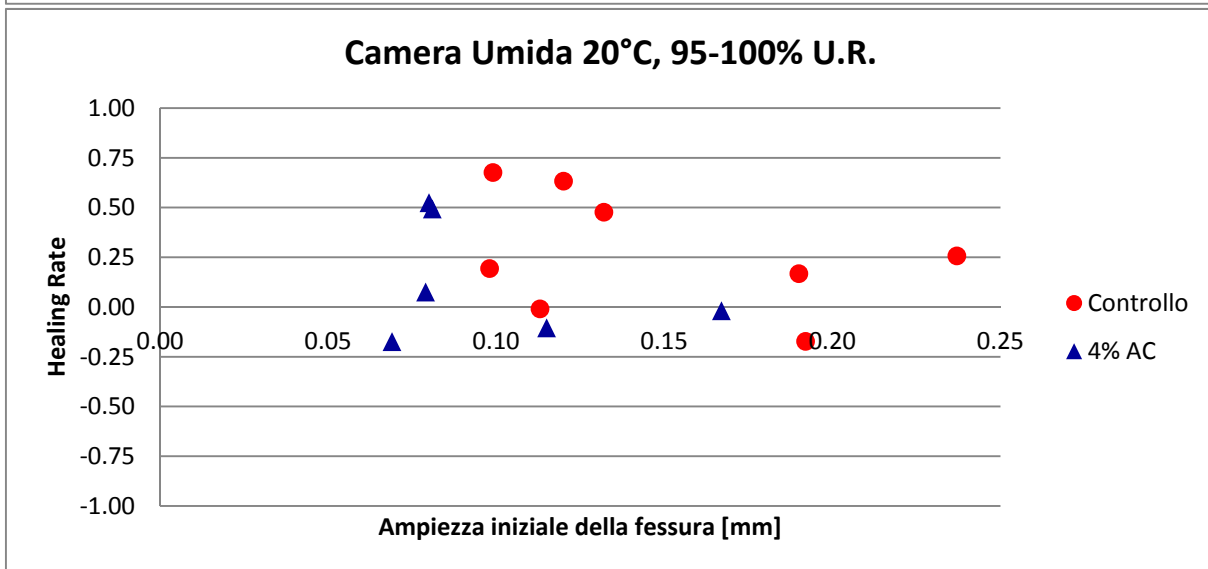
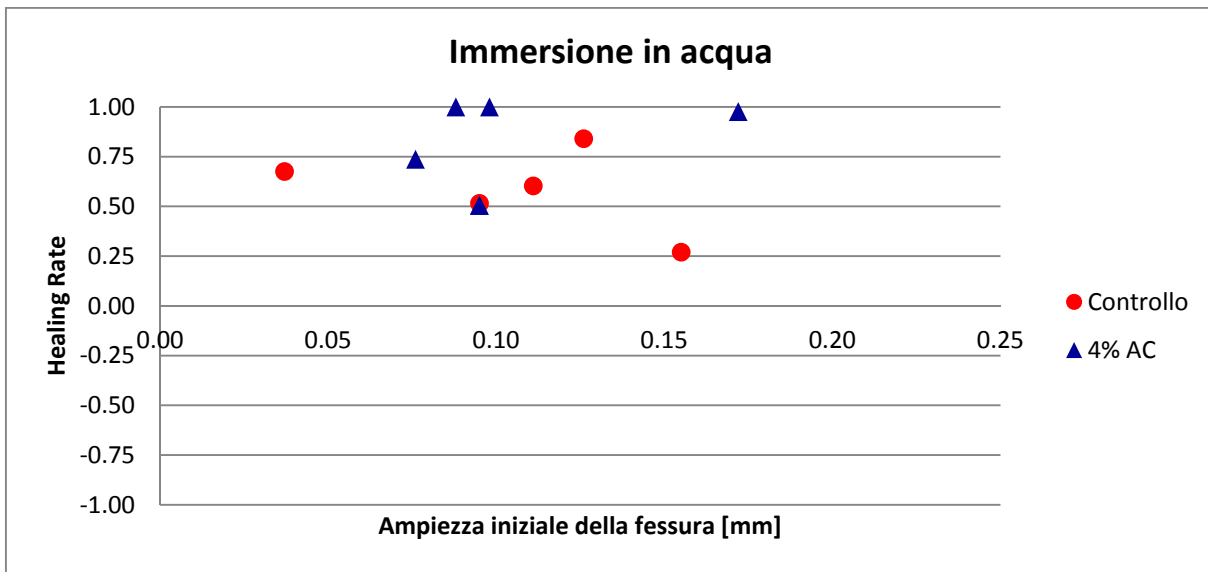
APPENDICE G - Healing rate

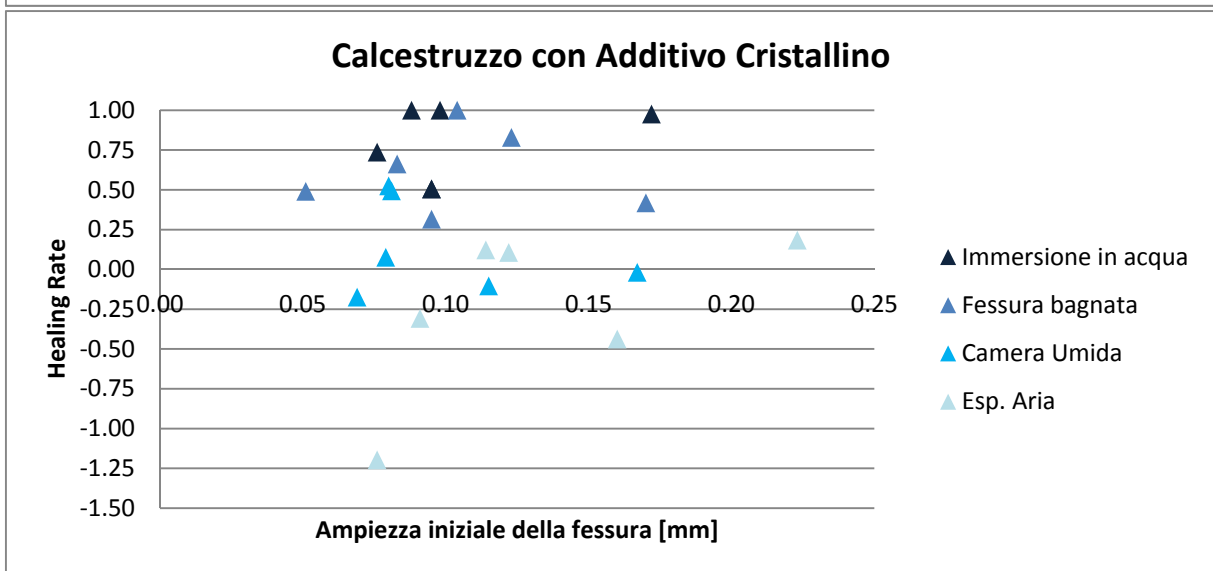
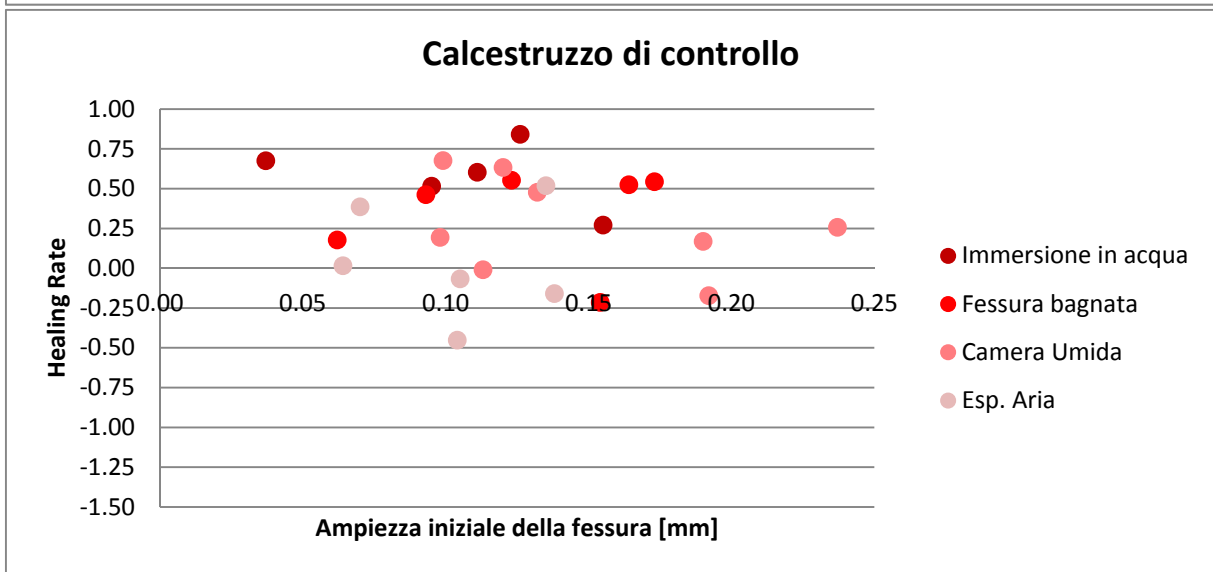
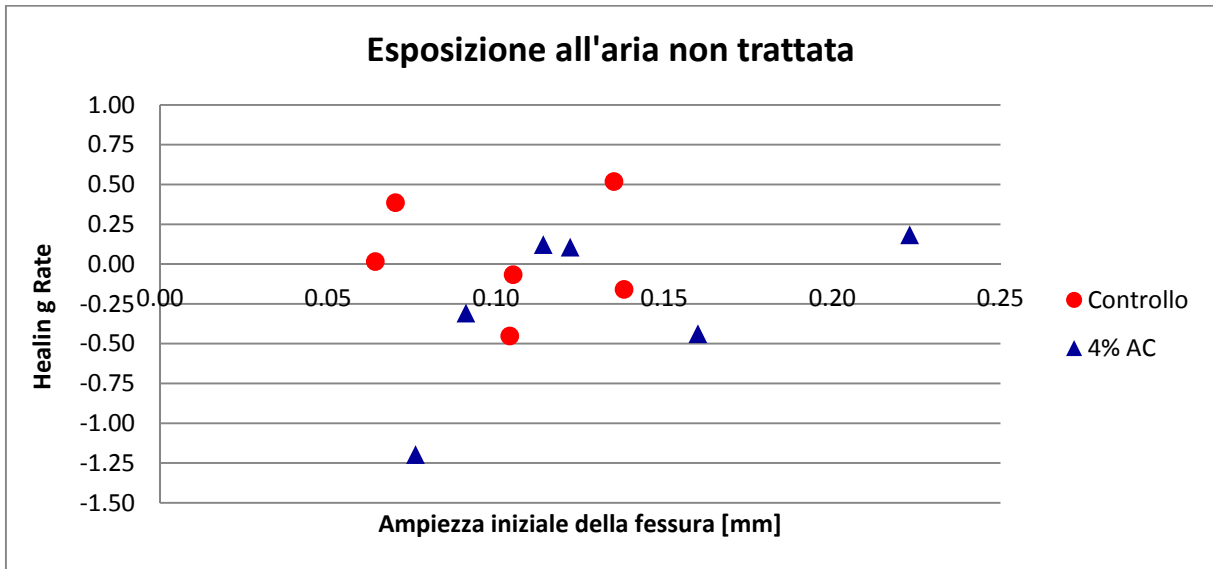
Healing rate sul flusso d'acqua nei differenti ambienti di cura



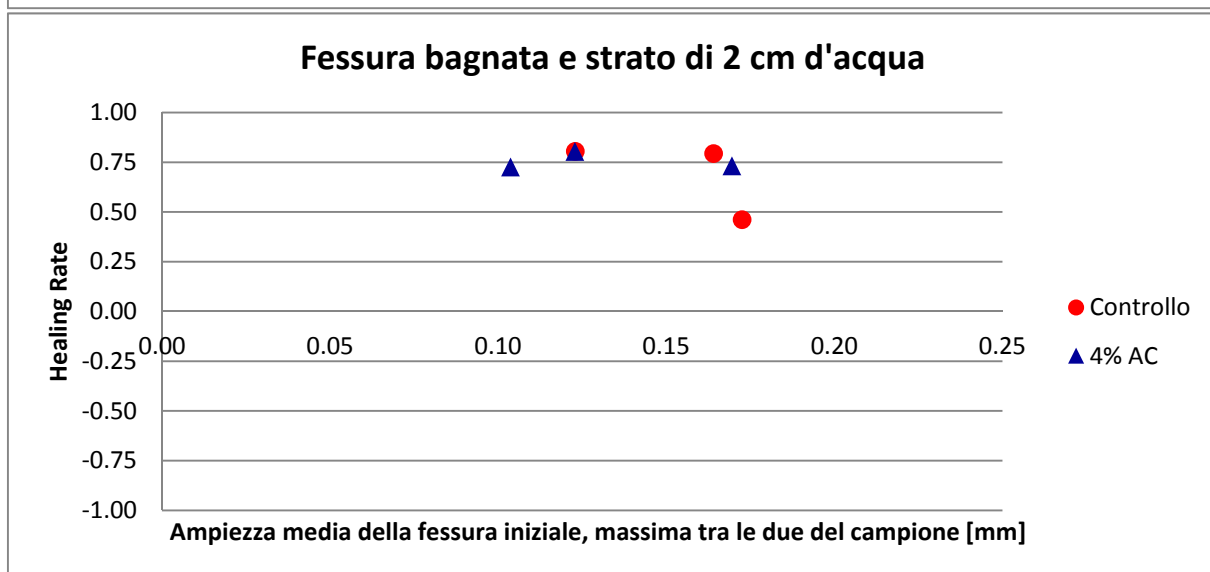
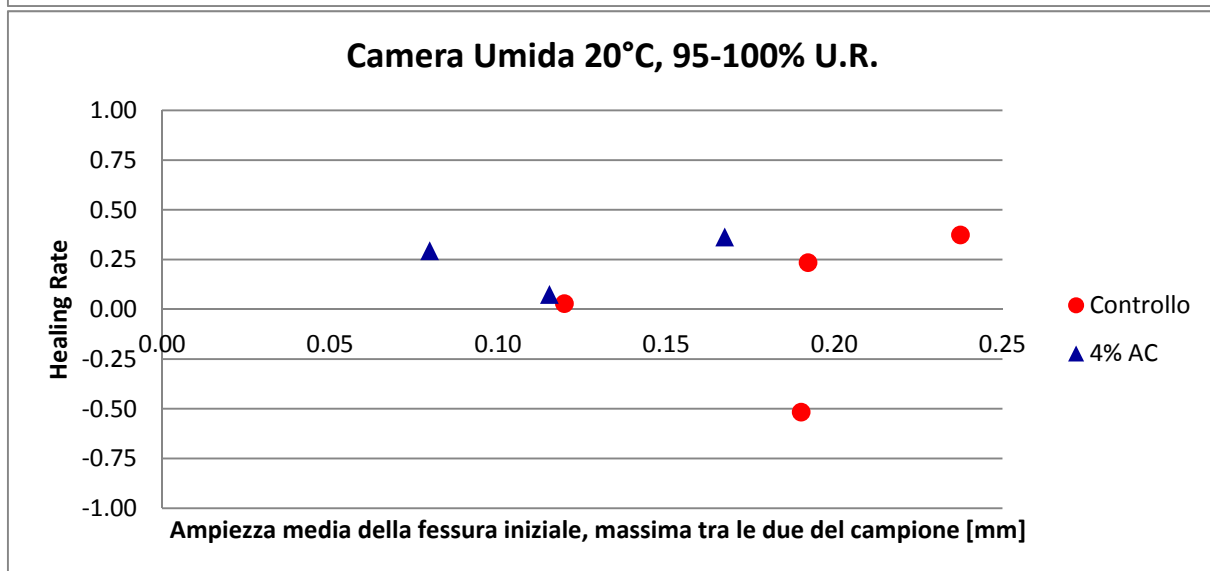
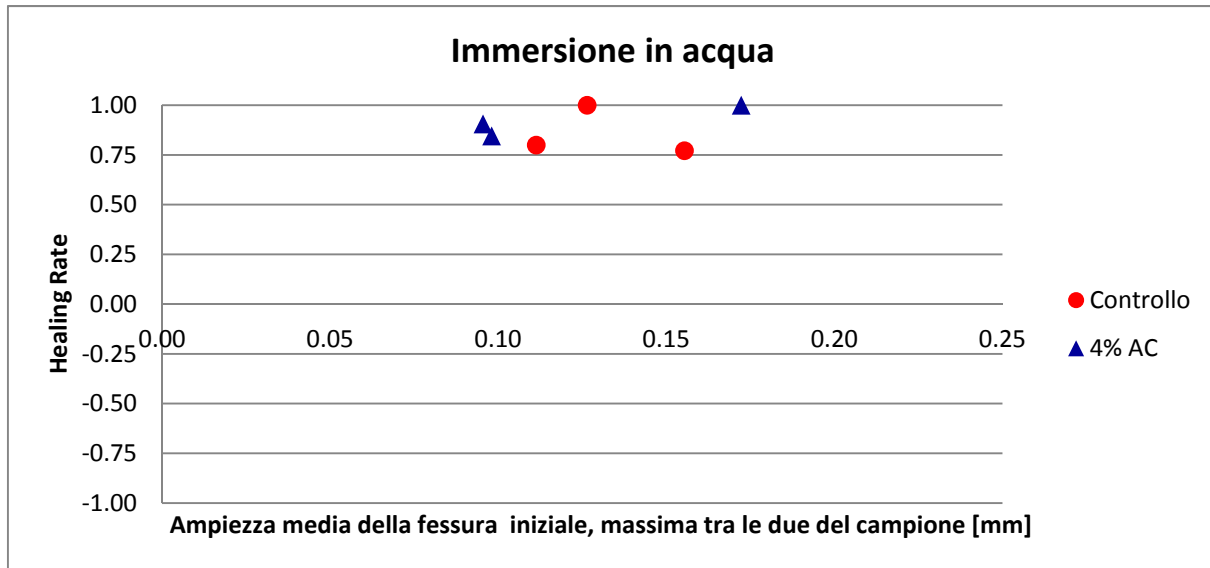


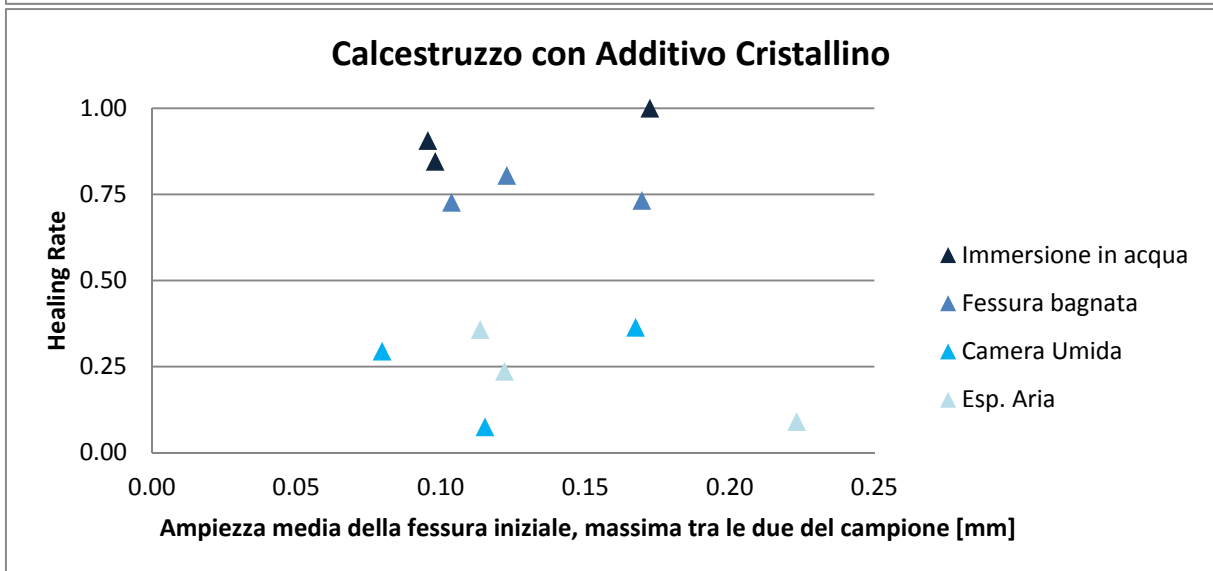
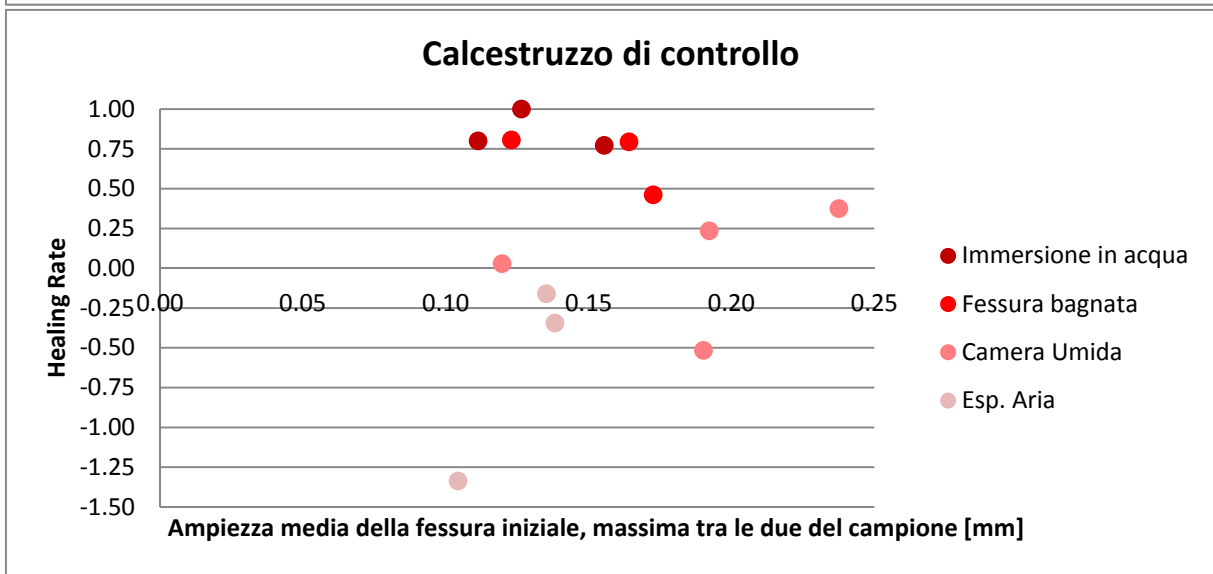
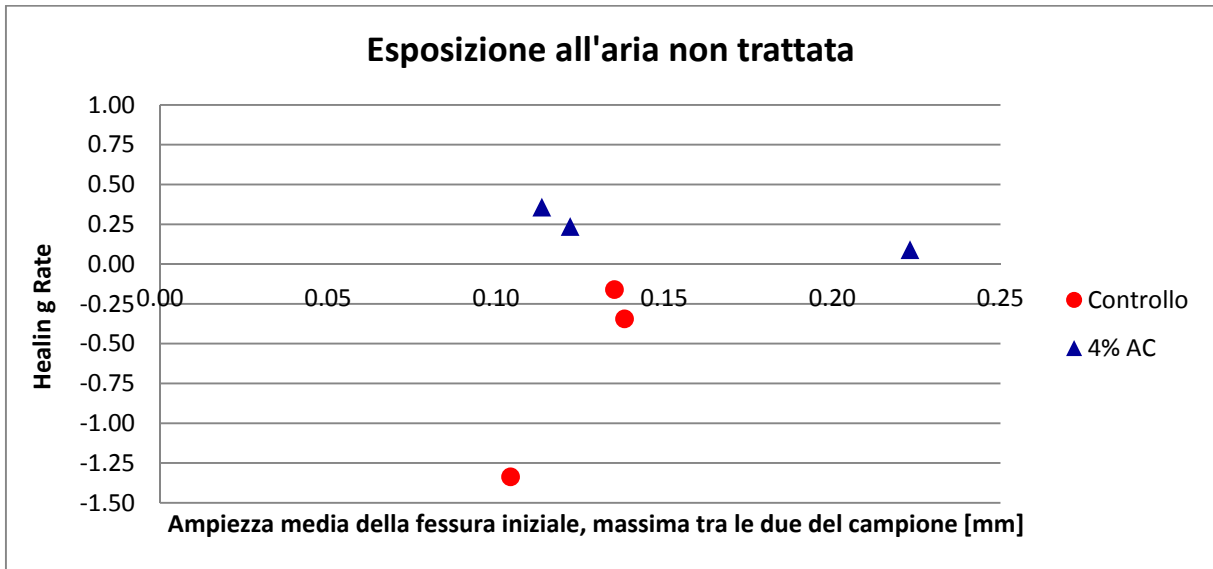
Healing rate sull'ampiezza media della fessura, studio contemporaneo di tutte le fessure



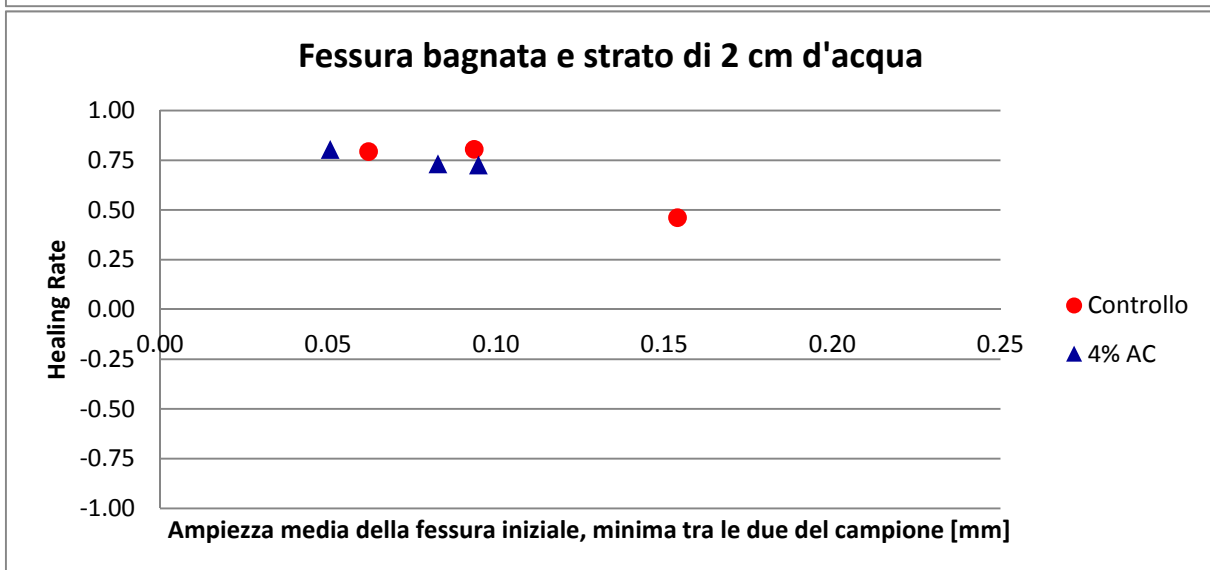
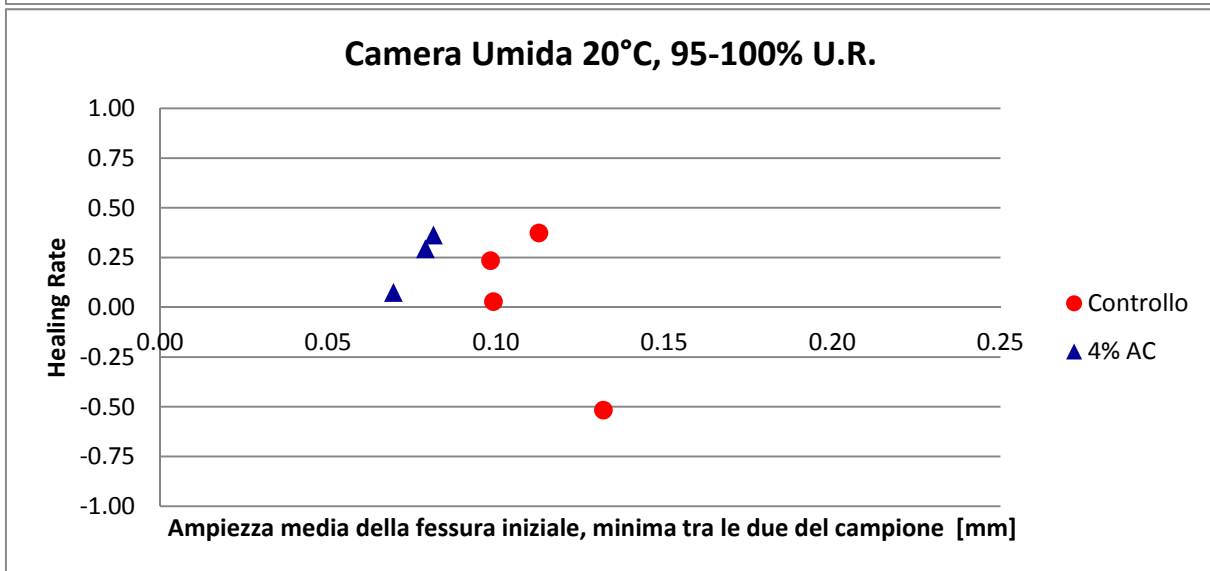
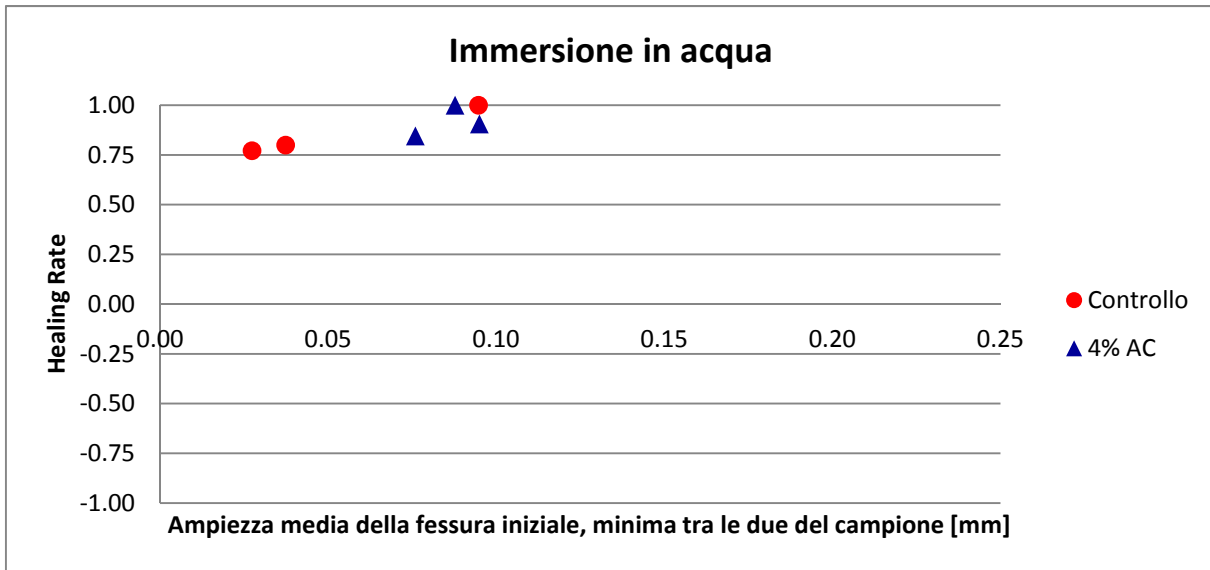


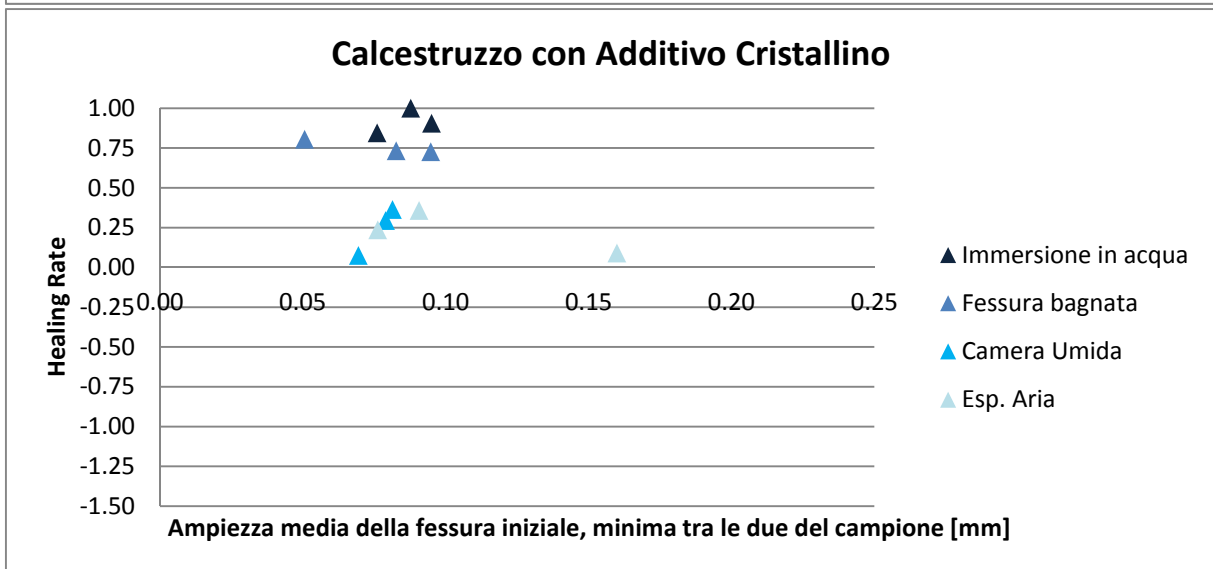
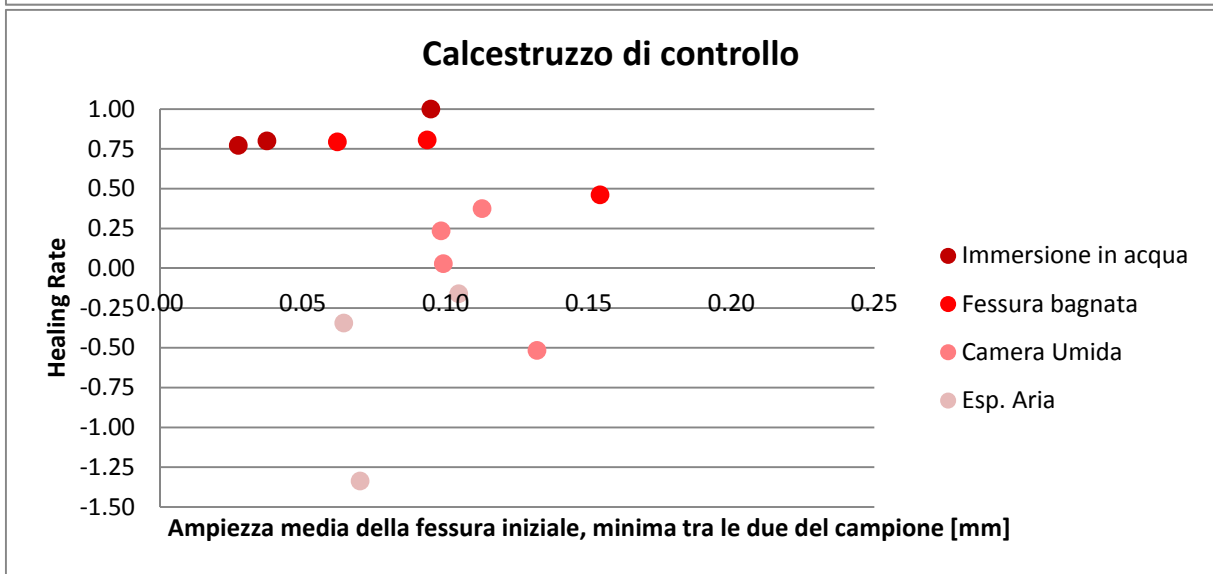
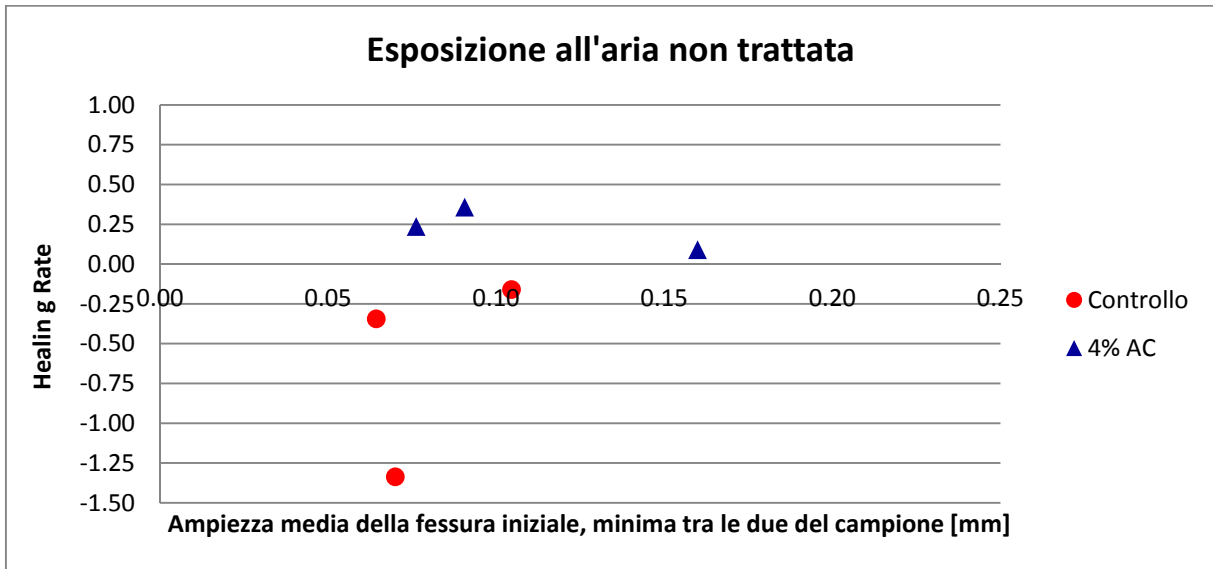
Healing rate sull'ampiezza media della fessura, massima tra le due del campione



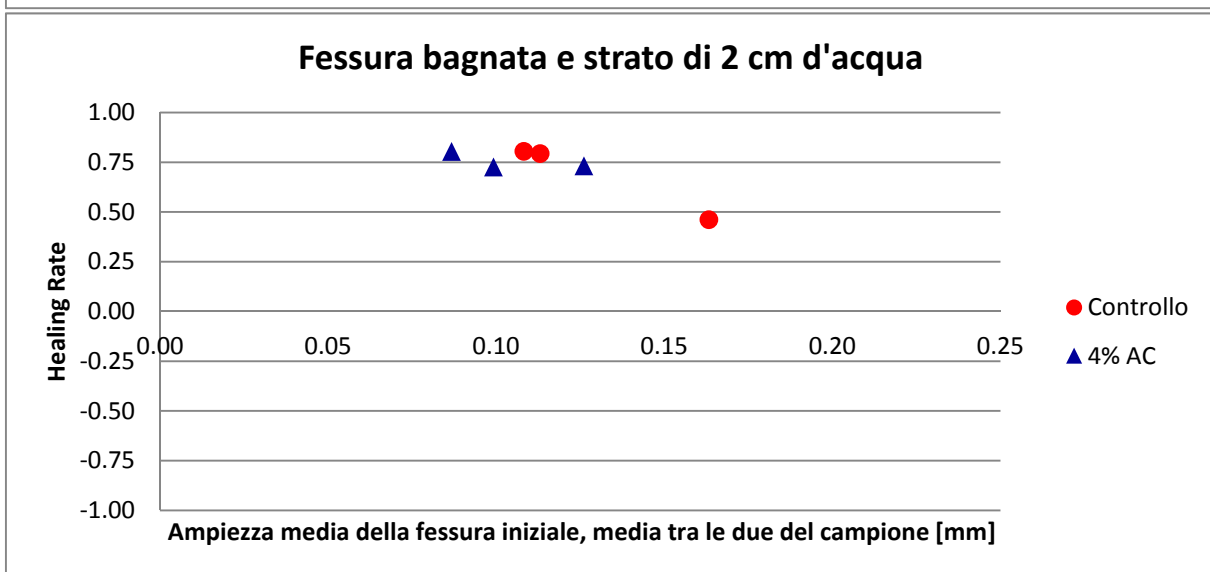
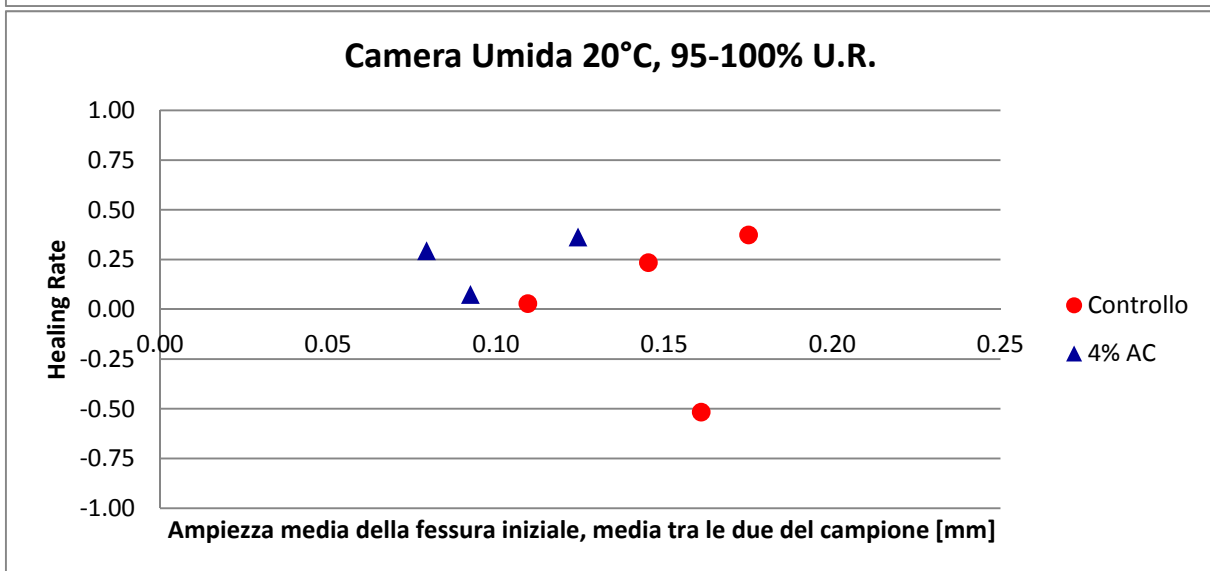
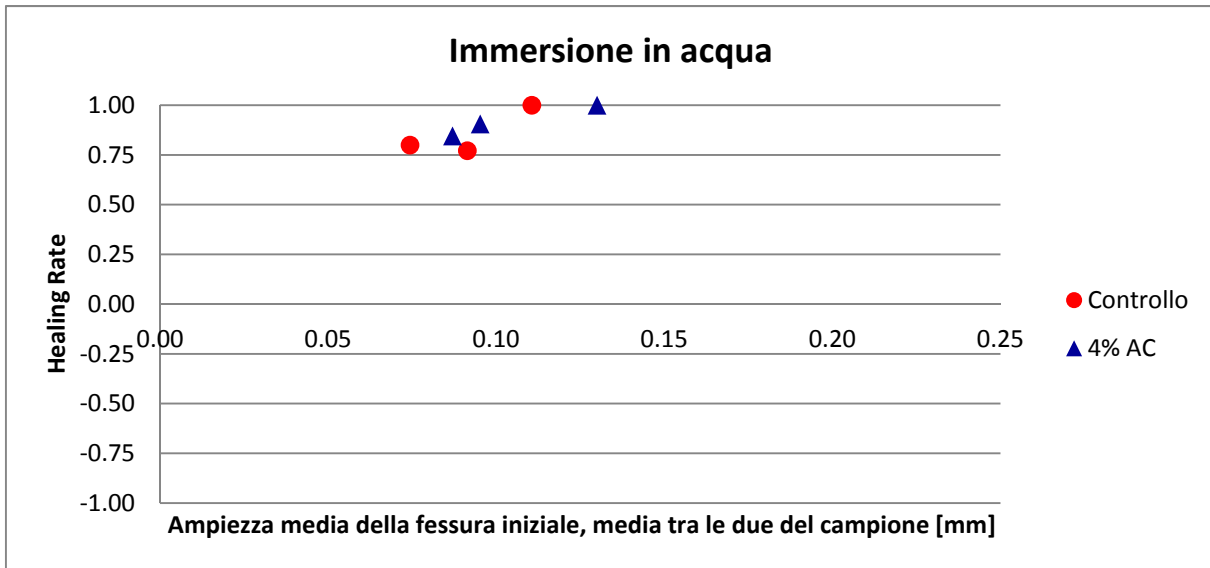


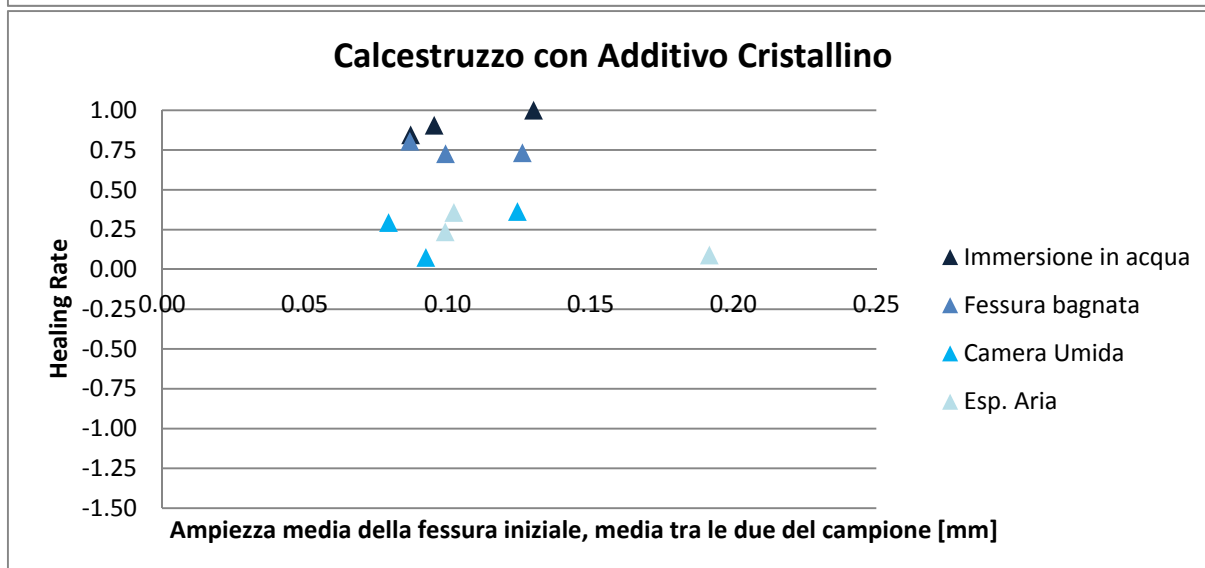
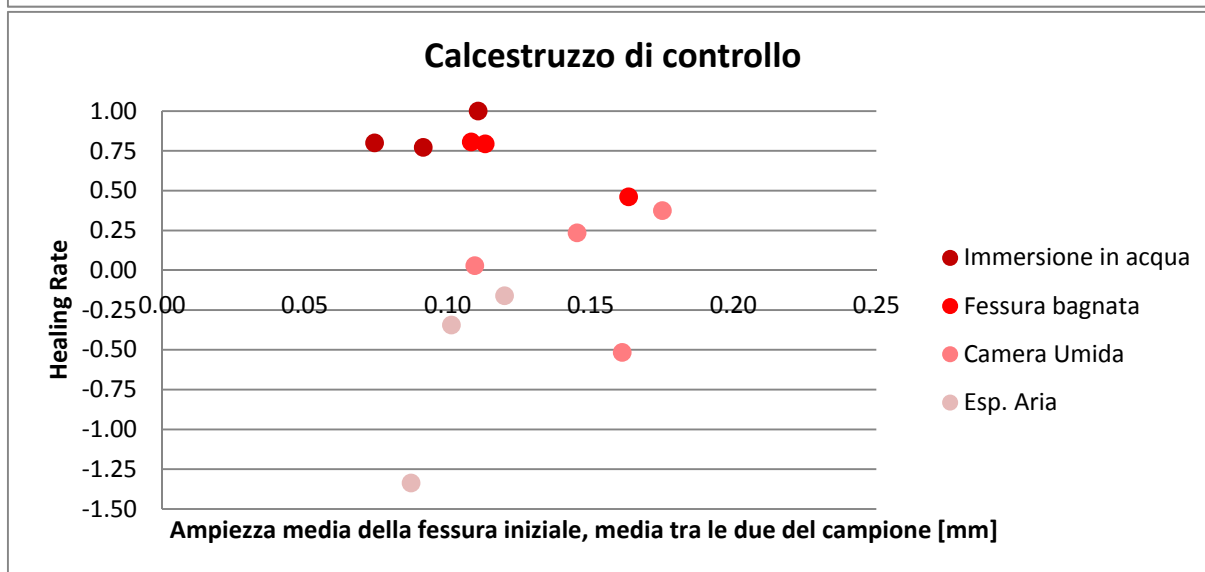
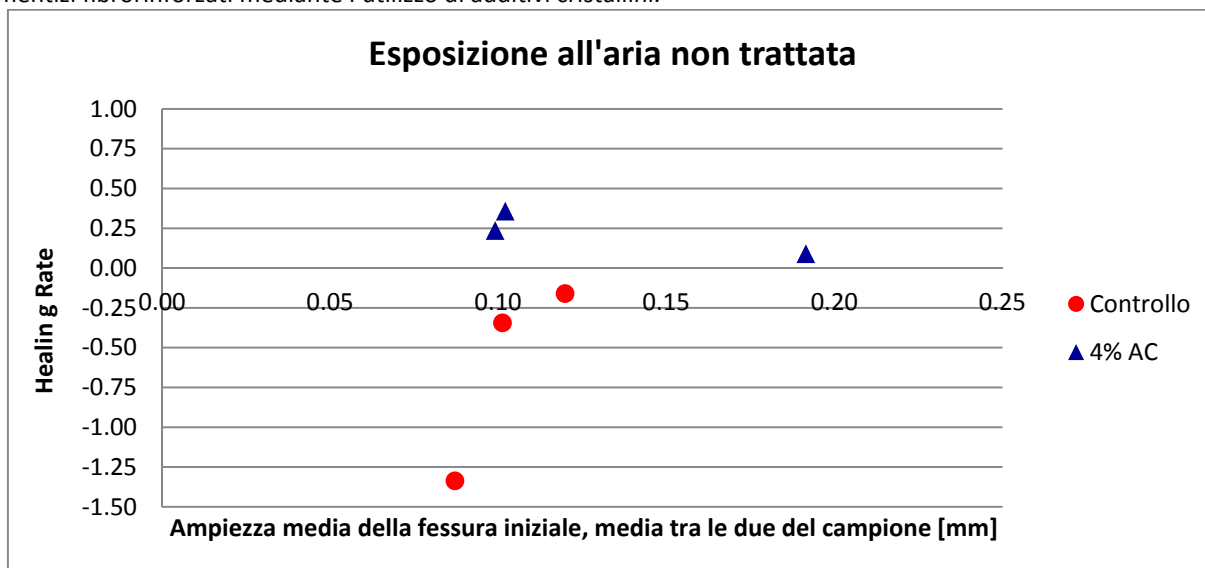
Healing rate sull'ampiezza media della fessura, minima tra le due del campione



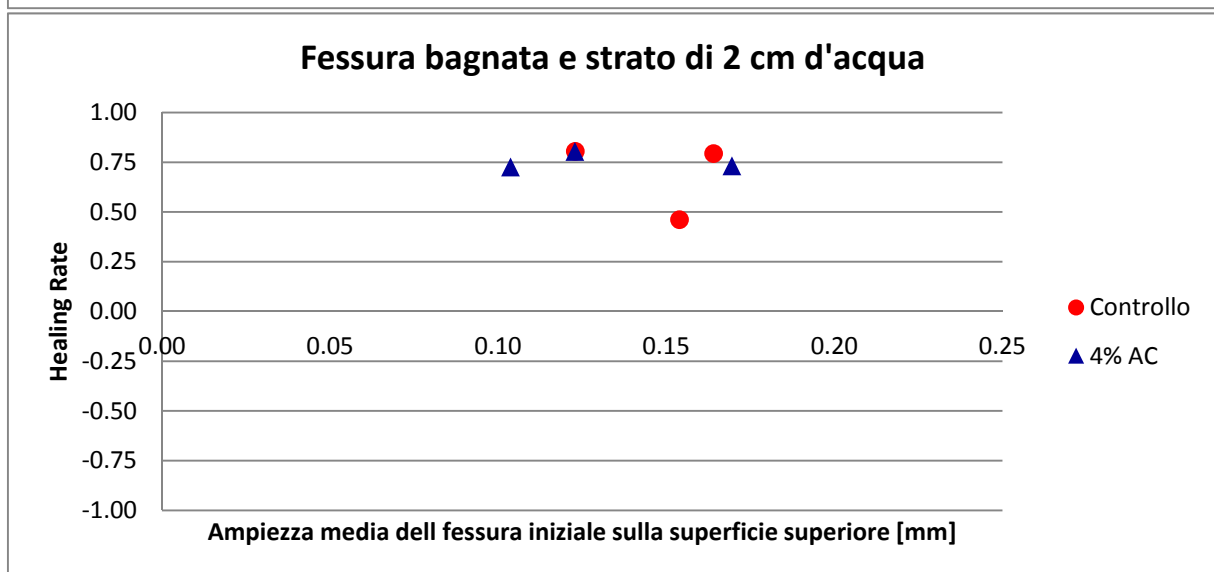
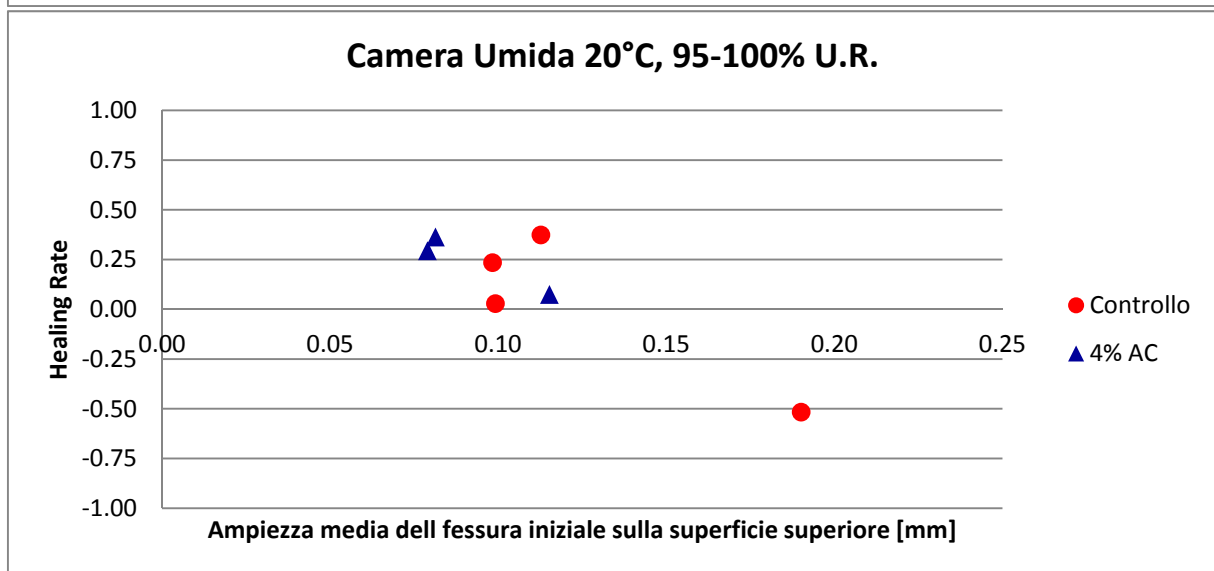
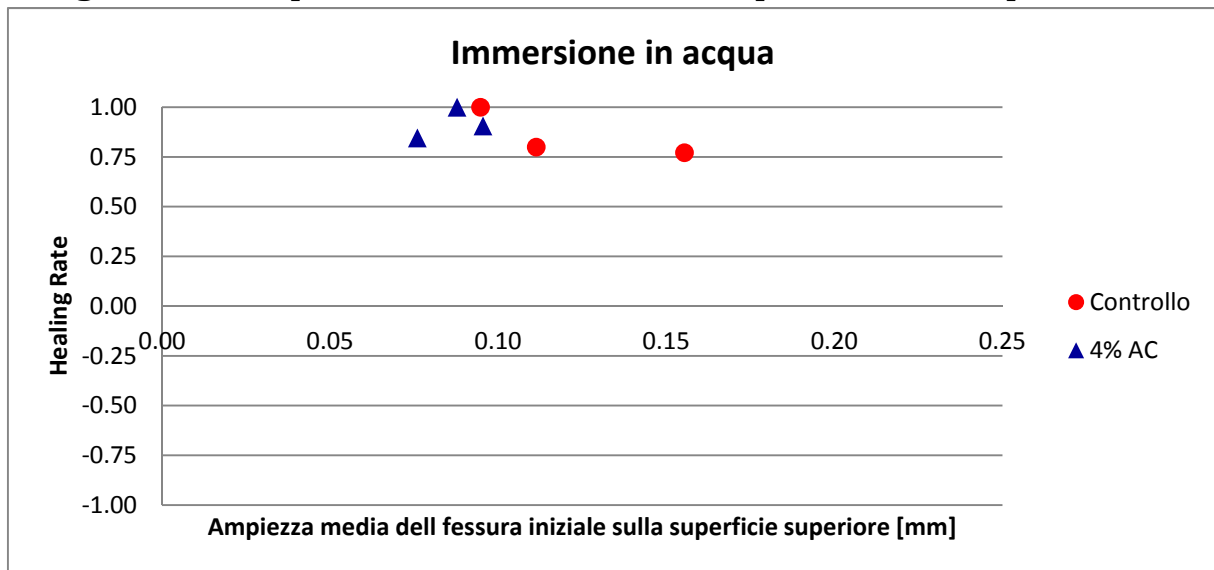


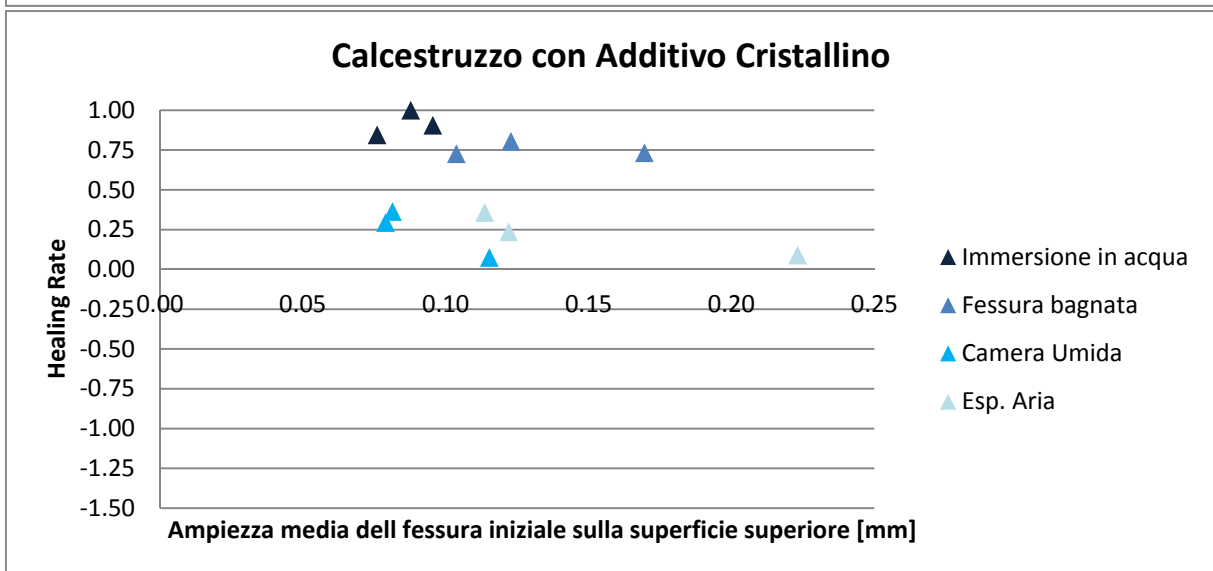
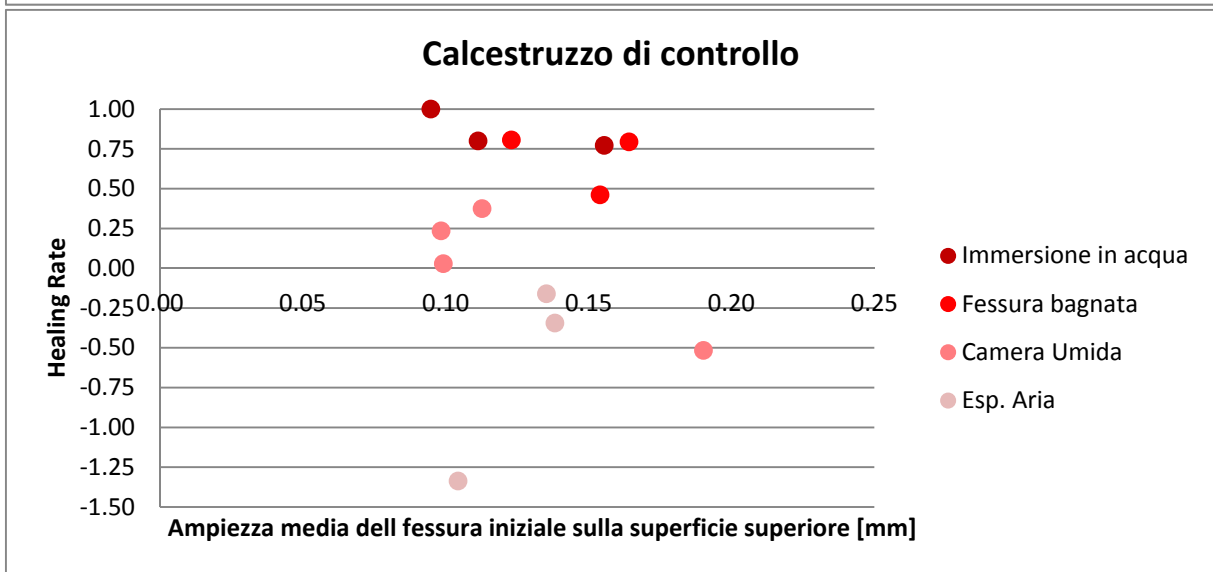
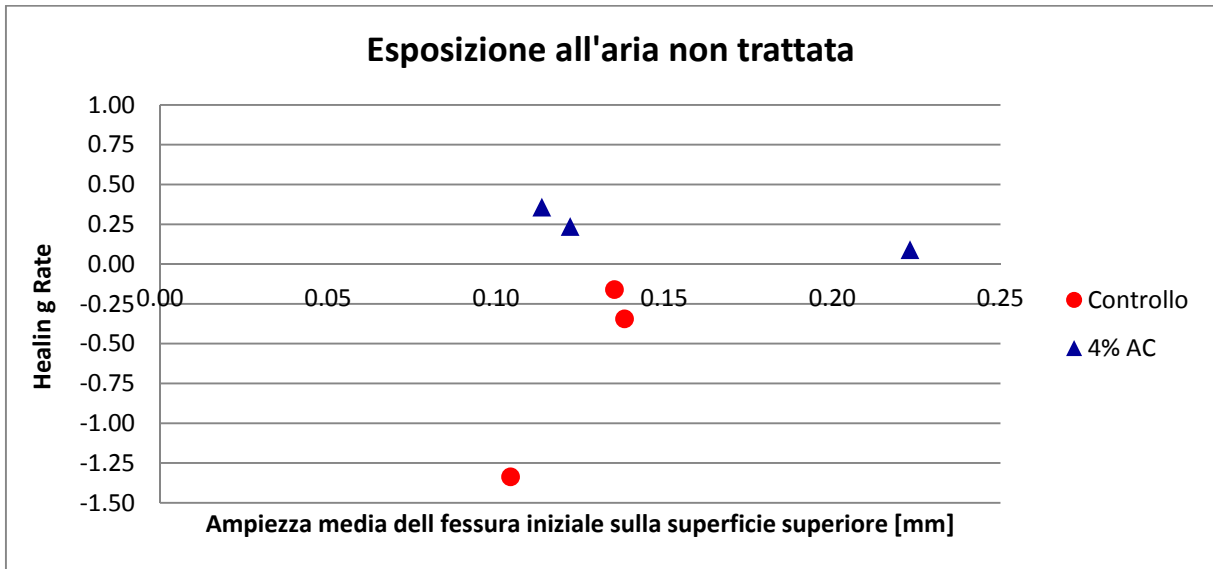
Healing rate sull'ampiezza media della fessura, media tra le due del campione





Healing rate sull'ampiezza media della fessura superiore del campione





APPENDICE H - Relazione tra gli healing rate rispettivamente del flusso d'acqua e dell'ampiezza della fessura

