



**POLITECNICO
DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in
Architettura per il progetto sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

***Materiali cementizi auto-riparanti:
Valutazione dell'efficienza di riparazione di capsule
cementizie e in PET riciclato***

Relatore: Jean-Marc Tulliani

Candidato: Wael Aamer

Correlatori: Paola Antonaci

Giovanni Anglani

a.a 2020/2021

INDICE DEI CONTENUTI

ABSTRACT	- 2 -
GLOSSARIO	- 4 -
LISTA DEI GRAFICI E TABELLE.....	- 5 -
LISTA DELLE FIGURE.....	- 6 -
1 INTRODUZIONE	- 7 -
1.1 PREMESSA	- 8 -
1.2 APPROCCIO.....	- 10 -
1.3 OBIETTIVI.....	- 11 -
2 ASPETTI TEORICI.....	- 14 -
2.1 MATERIALI CEMENTIZI.....	- 15 -
2.2 MATERIALI SELF HEALING	- 27 -
2.3 MANIFATTURA ADDITIVA	- 34 -
3 ATTIVITÀ SPERIMENTALE	- 38 -
3.1 OUTLINE.....	- 39 -
3.2 MACRO CAPSULE IN PET.....	- 41 -
3.3 MACRO CAPSULE CEMENTIZIE	- 43 -
3.4 IMPERMEABILIZZAZIONE CAPSULE	- 46 -
3.5 RIEMPIMENTO E SIGILLATURA.....	- 50 -
3.6 CONFENZIONAMENTO PROVINI	- 54 -
3.7 PROVE DI PREFESSURAZIONE	- 59 -
3.8 PROVA DI PERMEABILITÀ.....	- 72 -
3.9 PROVE MECCANICHE STATICHE.....	- 79 -
3.10 PROVE MECCANICHE DINAMICHE	- 84 -
4 CONCLUSIONE	- 92 -
4.1 ANALISI RISULTATI E POSSIBILI FUTURI SVILUPPI.....	- 93 -
5 RIFERIMENTI	- 97 -
5.1 BIBLIOGRAFIA.....	- 98 -
5.2 SITOGRAFIA	- 100 -
5.3 NORME DI RIFERIMENTO	- 100 -
5.4 SLIDE	- 100 -
6 ALLEGATI.....	- 101 -
6.1 SCHEDE TECNICHE MATERIALE	- 102 -

ABSTRACT

La crescente preoccupazione per la sicurezza e la sostenibilità delle strutture ha richiamato l'attenzione di professionisti e ricercatori verso la sperimentazione e lo sviluppo di materiali auto-riparanti e metodi di riparazione preventiva. Infatti, la comparsa di fenomeni fessurativi nel calcestruzzo è pressoché inevitabile a causa della sua bassa resistenza a trazione. Tale aspetto non rappresenta necessariamente un rischio di crollo per la struttura, ma ne compromette la funzionalità accelerandone il degrado e diminuendone la vita di servizio con conseguenze anche per la sostenibilità.

Al fine di rendere più affidabili e duraturi i materiali cementizi tramite aggiunte di tecnologie su misura, le attività di ricerca hanno fornito contributi illuminanti alla comprensione dei meccanismi di auto-riparazione e guarigione delle crepe, portando allo sviluppo di una serie di tecnologie, la cui efficacia è stata ampiamente dimostrata in laboratori e, in alcuni casi, anche con applicazioni sul campo con continuo monitoraggio delle prestazioni.

La tecnologia di auto-riparazione investigata sperimentalmente in questa tesi è l'incapsulamento di opportuni agenti riparanti all'interno di (macro)capsule inserite nella matrice cementizia. Il sistema di auto-riparazione si attiva al momento della rottura del guscio rigido della capsula, facendo in modo che il suo contenuto si riversi nella fessura riparandola. È necessario però che il guscio sia sufficientemente resistente per affrontare le fasi di betonaggio e getto, resistendo all'ambiente basico della matrice ed al degrado nel tempo, preservando intatte le caratteristiche dell'agente al suo interno.

Sono state studiate due tipologie di capsule tubolari: la prima è stata prodotta tramite un impasto cementizio modificato con l'aggiunta di polimeri; la seconda

è stata prodotta sfruttando tecniche di manifattura additiva utilizzando un filamento di polietilene tereftalato (PET) riciclato.

In entrambi i casi è stato incapsulato al loro interno un agente riparante poliuretano liquido. Il poliuretano è stato valutato come agente sigillante poiché in grado di diffondersi attraverso le fessure e di ripristinare parzialmente le proprietà meccaniche iniziali del materiale cementizio.

L'effetto di riparazione offerto dall'aggiunta delle capsule è stato valutato attraverso il loro inserimento all'interno di provini in malta cementizia.

Dopo una prima fase di danneggiamento e la successiva riparazione autonoma, le prestazioni del sistema di auto-riparazione sono state quantificate in termini di recupero di caratteristiche connesse alla durabilità del materiale (riduzione della permeabilità all'acqua) e recupero della capacità portante in condizioni statiche. Inoltre, è stata valutata la stabilità del sistema a fronte di cicli di carico dinamici, allo scopo di convalidare il loro possibile utilizzo in strutture reali.

Sono stati raggiunti risultati positivi, con un indice di recupero del carico superiore al 46%, riduzione della permeabilità del sistema fino alla completa sigillatura della fessura e una buona stabilità del sistema nei confronti del degrado ciclico, ottenuto applicando una forza di picco corrispondente al 75% della capacità di carico stimata dai campioni riparati portati a rottura in condizione statica e corrispondente a circa la metà della capacità portante dei provini ancora integri.

GLOSSARIO

h_{incavo} : Altezza incavo realizzato sul lato inferiore del provino.

h_{provino} : Altezza effettiva provino cementizio.

L_{max} : Carico massimo applicato durante la prova meccanica dinamica.

L_{min} : Carico minimo applicato durante la prova meccanica dinamica.

$L_{\text{peak},i}$: Carico di picco del provino contenente una capsula sottoposto a prova di prefessurazione.

$L_{\text{peak,REF}}$: Carico di picco del provino di riferimento sottoposto a prova di prefessurazione.

L_{peak} : Carico di picco del provino sottoposto a prova di prefessurazione.

L_{reload} : Carico di picco del provino in fase di ricarico.

L_{unload} : Carico residuo del provino sottoposto a prova di prefessurazione.

S: Percentuale del carico di picco del provino in fase di ricarico.

WF_{CAPS} : Flusso d'acqua medio dei provini in malta cementizia auto-riparante.

WF_{REF} : Flusso d'acqua medio dei provini di riferimento in malta cementizia senza capsule.

LISTA DEI GRAFICI E TABELLE

GRAFICO 1: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO DI RIFERIMENTO, REF_2.....	- 63 -
GRAFICO 2: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA CEMENTIZIA, CEM_7.....	- 64 -
GRAFICO 3: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA IN PET RICICLATO, PET_2.	- 64 -
GRAFICO 4: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO DI RIFERIMENTO, (A SINISTRA) REF_1; (A DESTRA) REF_3.....	- 66 -
GRAFICO 5: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO DI RIFERIMENTO, (A SINISTRA) REF_4; (A DESTRA) REF_5.....	- 66 -
GRAFICO 6: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO DI RIFERIMENTO, (A SINISTRA) REF_6; (A DESTRA) REF_7.....	- 66 -
GRAFICO 7: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO DI RIFERIMENTO, (A SINISTRA) REF_8.	- 67 -
GRAFICO 8: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA CEMENTIZIA, (A SINISTRA) CEM_1; (A DESTRA) CEM_2.	- 67 -
GRAFICO 9: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA CEMENTIZIA, (A SINISTRA) CEM_3; (A DESTRA) CEM_4.	- 67 -
GRAFICO 10: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA CEMENTIZIA, (A SINISTRA) CEM_5; (A DESTRA) CEM_6.	- 67 -
GRAFICO 11: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA CEMENTIZIA, (A SINISTRA) CEM_8; (A DESTRA) CEM_9.	- 68 -
GRAFICO 12: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA CEMENTIZIA, (A SINISTRA) CEM_10; (A DESTRA) CEM_11.	- 68 -
GRAFICO 13: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA CEMENTIZIA, (A SINISTRA) CEM_12; (A DESTRA) CEM_13.	- 68 -
GRAFICO 14: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA CEMENTIZIA, CEM_14.....	- 68 -
GRAFICO 15: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA IN PET RICICLATO, (A SINISTRA) PET_1; (A DESTRA) PET_3.	- 69 -
GRAFICO 16: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA IN PET RICICLATO, (A SINISTRA) PET_4; (A DESTRA) PET_5.	- 69 -
GRAFICO 17: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA IN PET RICICLATO, (A SINISTRA) PET_6; (A DESTRA) PET_7.	- 69 -
GRAFICO 18: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA IN PET RICICLATO, (A SINISTRA) PET_8; (A DESTRA) PET_9.	- 69 -
GRAFICO 19: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA IN PET RICICLATO, (A SINISTRA) PET_10; (A DESTRA) PET_11.	- 70 -
GRAFICO 20: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA IN PET RICICLATO, (A SINISTRA) PET_12; (A DESTRA) PET_13.	- 70 -
GRAFICO 21: PROVA DI PREFESSURAZIONE DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA IN PET RICICLATO, PET_14.	- 70 -
GRAFICO 22: PROVA DI RICARICO SUL PROVINO CONTENENTE CAPSULE IN PET, PET_8.....	- 81 -
GRAFICO 23: PROVA DI RICARICO SUL PROVINO CONTENENTE CAPSULE IN CEM, CEM_7.....	- 82 -
GRAFICO 24: PROVA DI RICARICO STATICO DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA CEMENTIZIA, (A SINISTRA) CEM_2; (A DESTRA) CEM_12.	- 83 -
GRAFICO 25: PROVA DI RICARICO STATICO DEL PROVINO CONTENENTE UNA CAPSULA IN PET, (A SINISTRA) PET_1; (A DESTRA) PET_2.....	- 83 -
GRAFICO 26: PROVA MECCANICA DINAMICA DI UN PROVINO CONTENETE UNA CAPSULA PET, PET_4.	- 88 -
GRAFICO 27: RISULTATO DALLA CORRISPONDENZA TRA NUMERO IL NUMERO CICLI SOSTENUTI ED IL FLUSSO D'ACQUA CHE LI ATTRAVERSA DOPO OGNI SERIE.....	- 89 -
GRAFICO 28: RIASSUNTO DEL NUMERO DI CICLI COMPLESSIVI SOSTENUTI DA CIASCUN PROVINO.	- 90 -
TABELLA 1: CALENDARIO CON LE DATE DI GETTO E DI AVVENUTA PREFESSURAZIONE DI CIASCUN PRIVINO.....	- 60 -
TABELLA 2: RIPORTA I VALORI MEDI DI LPEAK PER CIASCUNA SERIE CORRELATI CON LREDUCTION.....	- 65 -
TABELLA 3: INPUT E RISULTATI OTTENUTI DALLA PROVA DI PERMEABILITÀ.	- 75 -
TABELLA 4: CORRISPONDENZA TRA LA FUOR USCITA DEL PU ED IL SE;	- 76 -
TABELLA 5: INPUT E RISULTATI OTTENUTI DALLA PROVA DI RICARICO STATICO.	- 82 -

LISTA DELLE FIGURE

FIGURA 1: GLI ALBERI TENGONO GLI ORGANISMI NOCIVI LONTANI DALLE LORO FERITE ATTRAVERSO LA CREAZIONE DI UNO STRATO PROTETTIVO DI CELLULE CHE SUCCESSIVAMENTE SI INDURISCONO PRESERVANDO L'INTEGRITÀ INTERNA. (WIKIMEDIA COMMONS).....	- 10 -
FIGURA 2: ILLUSTRAZIONE 3D: (IN ALTO) SEZIONE ASSONOMETRICA PROVINO; (IN BASSO) ASSONOMETRIA PROVINO.....	- 13 -
FIGURA 3: PRODUZIONE MONDIALE DI CEMENTO NEL 2015. (USGS,1993-2016)	- 16 -
FIGURA 4: UNI EN 1504 - PARTE 9.....	- 26 -
FIGURA 5: POSSIBILI MECCANISMI DI SELF-HEALING AUTOGENO (A REVIEW OF SELF-HEALING CONCRETE RESEARCH DEVELOPMENT - SCIENTIFIC FIGURE ON RESEARCHGATE. HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/FIGURE/POSSIBLE-MECHANISMS-FOR-NATURAL-SELF-HEALING-IN-CEMENTATIONS-MATERIALS_FIG2_260988558 [14 FEB 2021]) .-	28
FIGURA 6: SCHEMATIZZAZIONE PROCESSO DI STAMPA 3D (SINTHESEIENG).....	- 36 -
FIGURA 7: RAPRESENTAZIONE GRAFICA 2D IN SCALA 1:2, PROSPETTO FRONTALE DEL PROVINO	- 40 -
FIGURA 8: RAPRESENTAZIONE GRAFICA 2D IN SCALA 1:2, PROSPETTO INFERIORE DEL PROVINO	- 40 -
FIGURA 9: : (A DESTRA) RAPRESENTAZIONE GRAFICA 2D IN SCALA 1:2,PROSPETTO LATERALE DEL PROVINO DEL PROVINO; .-	40
FIGURA 10: (A SINISTRA) RAPRESENTAZIONE GRAFICA 2D IN SCALA 1:2, SEZIONE TRASVERSALE DEL PROVINO.....	- 40 -
FIGURA 11: (AL CENTRO) STAMPANTE 3D ULTIMAKER 3; (AI LATI) FOTO DURANTE IL PROCESSO DI STAMPA DELLA CAPSULA IN PET.....	- 41 -
FIGURA 12: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA 3D CAPSULA IN PET RICICLATO CON NERVATURE (LUNGHEZZA 40 MM, DIAMETRO 4 MM, SPESSORE PARETE 0,3 MM).	- 42 -
FIGURA 13: CAPSULE IN PET.	- 42 -
FIGURA 14: CAPSULE CEMENTIZIE.	- 43 -
FIGURA 15: PROCESSO DI CONFEZIONAMENTO DELLE CAPSULE CEMENTIZIE	- 45 -
FIGURA 16: CAPSULE CEMENTIZIE IN FASE ASCIUGATURA DOPO IL PRIMO COATING.....	- 48 -
FIGURA 17: CAPSULA IN PET DOPO IL PRIMO COATING	- 49 -
FIGURA 18: CAPSULA CEMENTIZIA DOPO IL PRIMO COATING	- 49 -
FIGURA 19: (A SINISTRA) FASE DI SIGILLATURA DELLA PRIMA ESTREMITÀ DI UNA CAPSULA CEMENTIZIA; (A DESTRA) RISULTO DOPO IL SECONDO COATING DI UN CAPSULA IN PET.	- 49 -
FIGURA 20: FASE DI RIEMPIMENTO E SIGILLATURA DELLE CAPSULE CEMENTIZIE.	- 52 -
FIGURA 21: RISULTATO FINALE DELLE CAPSULE CEMENTIZIE.	- 53 -
FIGURA 22: RISULTATO FINALE DELLE CAPSULE IN PET.....	- 53 -
FIGURA 23: (A SINISTRA) CAPSULA CEMENTIZIA; (A DESTRA) CAPSULA IN PET.....	- 53 -
FIGURA 24: CASSEFORME IN ACCIAIO, CON CAPSULE CEMENTIZIE POSIZIONATE.....	- 58 -
FIGURA 25: (A SINISTRA) PROCEDIMENTO VIBRANTE; (A DESTRA) RISULTATO DOPO IL PRIMO CICLI DI VIBRAZIONE.....	- 58 -
FIGURA 26: RISULTATO PROVINO DOPO LA FASE GETTO.....	- 58 -
FIGURA 27: (AL CENTRO) FASE DI ADATTAMENTO DI UNA DELLE ESTREMITÀ DEL FORO PASSANTE; (AI LATI) RISULTO FINALE DELLE DUE ESTREMITÀ DEL FORO PASSANTE	- 58 -
FIGURA 28: RISULTATO PROVINO DOPO IL FISSAGGIO DEI DADI DISTANZIATI TRA LORO DI 2,5 CM.	- 71 -
FIGURA 29: PROVINO POSIZIONATO SULLA PRESSA SERVO-IDRAULICA MTS 810	- 71 -
FIGURA 30: (A SINISTRA) PROVINO SOTTOPOSTO A CARICO FLESSIONALE SU TRE PUNTI; (A DESTRA) FUORIUSCITA DEL POLIURETANO DURANTE LA PROVA DI PREFESSURAZIONE.....	- 71 -
FIGURA 31: RISULTATO PROVINO DOPO LA SIGILLATURA DEI BORDI DI FRATTURA.	- 77 -
FIGURA 32: (A SINISTRA) PROVINI IMMERSI NELL'ACQUA; (A DESTRA) SISTEMA UTILIZZATO PER SVOLGERE LA PROVA DI PERMEABILITÀ.....	- 77 -
FIGURA 33: PROVINO POSIZIONATO SUL TELAIO IN ACCIAIO.	- 78 -
FIGURA 34: FLUSSO D'ACQUA CHE ATTRAVERSA IL PRIVINO.....	- 78 -
FIGURA 35: TRASDUTTORE DI SPOSTAMENTO POSIZIONATO SUL PROVINO.	- 91 -
FIGURA 36: PROVINO FRATTURATO DURANTE IL TEST.	- 91 -
FIGURA 37: FUORIUSCITA E LA SEGUENTE REAZIONE DELLA RESINA POLIURETANICA DOPO LA FRATTURA DEL PROVINO. ...	- 91 -

1

INTRODUZIONE

1.1 PREMESSA

“Haec autem ita fieri debent, ut habeatur ratio firmitatis, utilitatis, venustatis.”

(Marco Vitruvio Pollione, De Architectura, liber 1, 2)

Già in tempi molto antichi era chiaro quali requisiti una costruzione dovesse rispettare, Vitruvio nel suo DE ARCHITECTURA ne aveva identificati tre.

- **Utilitatis:** le sue stanze devono avere scala e dimensione corretta per permettere il loro utilizzo a una o più persone, l'edificio deve permettere l'interazione sociale e rituale e deve essere in grado di adattarsi nel tempo modificandosi in base alle diverse funzioni ed esigenze.
- **Firmitatis:** gli edifici devono avere una durata di vita soddisfacente, devono essere resistenti e sopportare le sollecitazioni degli agenti esterni.
- **Venustatis:** non di meno devono essere eleganti, proporzionati e appropriati rispettando l'identità e al passato.

Il fulcro di questa tesi risiede nel requisito costruttivo della Firmitatis con particolare attenzione alla durabilità delle costruzioni. Infatti, molte infrastrutture la cui costruzione risale a metà del secolo scorso stanno andando in contro ad un grave problema, il degrado dei materiali con una conseguente riduzione delle loro funzionalità.

Per cui, l'innovazione edilizia diventa un aspetto indispensabile per poter rispondere alla necessità di ridurre l'impatto negativo sull'ambiente.

Come spesso capita ci troviamo a trarre esempio dalla natura e dalla storia, in grado di offrirci notevoli spunti e di darci linee guida da seguire e approfondire con approcci innovativi che contribuiscano alla sostenibilità.

Sostenibilità e innovazione sono quindi i punti cardine della nuova architettura che però non dimentica di guardare al passato e alla natura, al fine di salvaguardare l'ambiente e evitare gli sprechi.

1.2 APPROCCIO

LA NATURA COME ESEMPIO

Da sempre l'osservazione dei fenomeni naturali, della flora e della fauna sono stati un esempio e hanno fornito spunti di innovazione per la scelta e la progettazione di materiali da costruzione.

L'uso inizialmente semplice dei materiali che la natura ci mette a disposizione, differenti per ogni ambiente della terra, si è trasformato poi nella produzione di materiali con obiettivi e usi specifici.

I materiali nel mondo naturale hanno caratteristiche ineguagliabili, possono esserne un esempio: l'auto-generazione, l'auto-riparazione, l'adattamento al mutare delle condizioni ambientali, la durabilità e la biodegradazione.

Tutte queste caratteristiche devono essere prese ad esempio dall'industria edile per poter trovare la soluzione ai problemi a cui le costruzioni vanno in contro.



Figura 1: Gli alberi tengono gli organismi nocivi lontani dalle loro ferite attraverso la creazione di uno strato protettivo di cellule che successivamente si induriscono preservando l'integrità interna. (Wikimedia Commons)

1.3 OBIETTIVI

In particolar modo negli ultimi decenni la sperimentazione di nuovi materiali ha assunto grande importanza, soffermandosi soprattutto sui materiali cementizi auto-riparanti.

L'idea consiste nell'introdurre un materiale bio-ispirato, innovativo in grado di intervenire sul degrado della struttura, o di prevenirlo, evitando però azioni esterne e compromissioni delle caratteristiche del materiale, agendo quindi direttamente dall'interno.

Questa tesi ha un duplice obiettivo:

analizzare il comportamento di materiali cementizi auto-riparanti documentando le fasi di realizzazione degli stessi e la successiva analisi dei risultati prodotti attraverso specifiche prove di laboratorio, è stato possibile verificare e valutare il sistema riparante e la sua possibile applicazione in edilizia, agendo direttamente sui provini.

Il secondo obiettivo è più un atteggiamento sostenibile nella ricerca di materiali ausiliari di supporto allo studio aventi le medesime caratteristiche, analizzando il comportamento di due macro-capsule differenti nella loro matrice, ma aventi all'intero lo stesso materiale riparante (resina poliuretanica). Per avere dei dati confrontabili le due tipologie sono state soggette alle stesse prove.

Nello specifico, le capsule tubolari in PET riciclato prodotte mediante stampa 3D e quelle in materiale cementizio. Entrambi sono state inserite all'interno di parallelepipedi in matrice cementizia (Figura 2) e sottoposti a 4 prove:

PREFESSURAZIONE

una prima fessurazione controllata mediante flessione a tre punti per indagare sperimentalmente il loro legame con la matrice cementizia e la capacità di rilasciare il loro contenuto all'interno della fessura per promuovere l'auto-riparazione.

PERMEABILITÀ

La prova consiste nel far fluire all'interno del provino, lungo un percorso a sezione circolare che attraversa tutto il prisma di malta cementizia, un flusso dinamico e unidirezionale di acqua spinto nella cavità con pressione costante. Questo per verificare l'efficienza stagnante della schiuma generata dalla resina nelle capsule.

RICARICO MECCANICO STATICO

Una volta raggiunto lo stato limite ultimo, ovvero una condizione di deformazione irreversibile del provino, il campione è sottoposto ad un carico tale da raggiungere un'estensione della fessura pari a 800 μm . Lo scopo della prova consiste nel verificare che i provini di malta cementizia contenenti le capsule, abbiano mantenuto una resistenza alla fessurazione maggiore rispetto ai provini prefessurati non contenenti capsule, abbiano mantenuto una resistenza alla fessurazione maggiore rispetto ai provini prefessurati non contenuti capsule.

CARICO MECCANICO DINAMICO

I provini vengono sottoposti ad azioni dinamiche, ripetute ciclicamente su brevi periodi di tempo. La risposta al carico ciclico è particolarmente rilevante dal punto di vista meccanico soprattutto per il settore delle infrastrutture, da qui l'importanza di questa prova.

Sono stati ottenuti risultati positivi su entrambe le capsule, ma in particolare per le capsule in PET riciclato, mostra dei buoni potenziali per un'economia circolare

atta a ridurre gli sprechi, tramite il riciclaggio di bottiglie d'acqua per ottenere dei filamenti termoplastici utili alla stampante 3D per realizzare la capsula stessa. Inoltre, grazie al loro metodo di produzione, la stampa 3d potrebbe essere un passo avanti verso l'industrializzazione delle capsule.

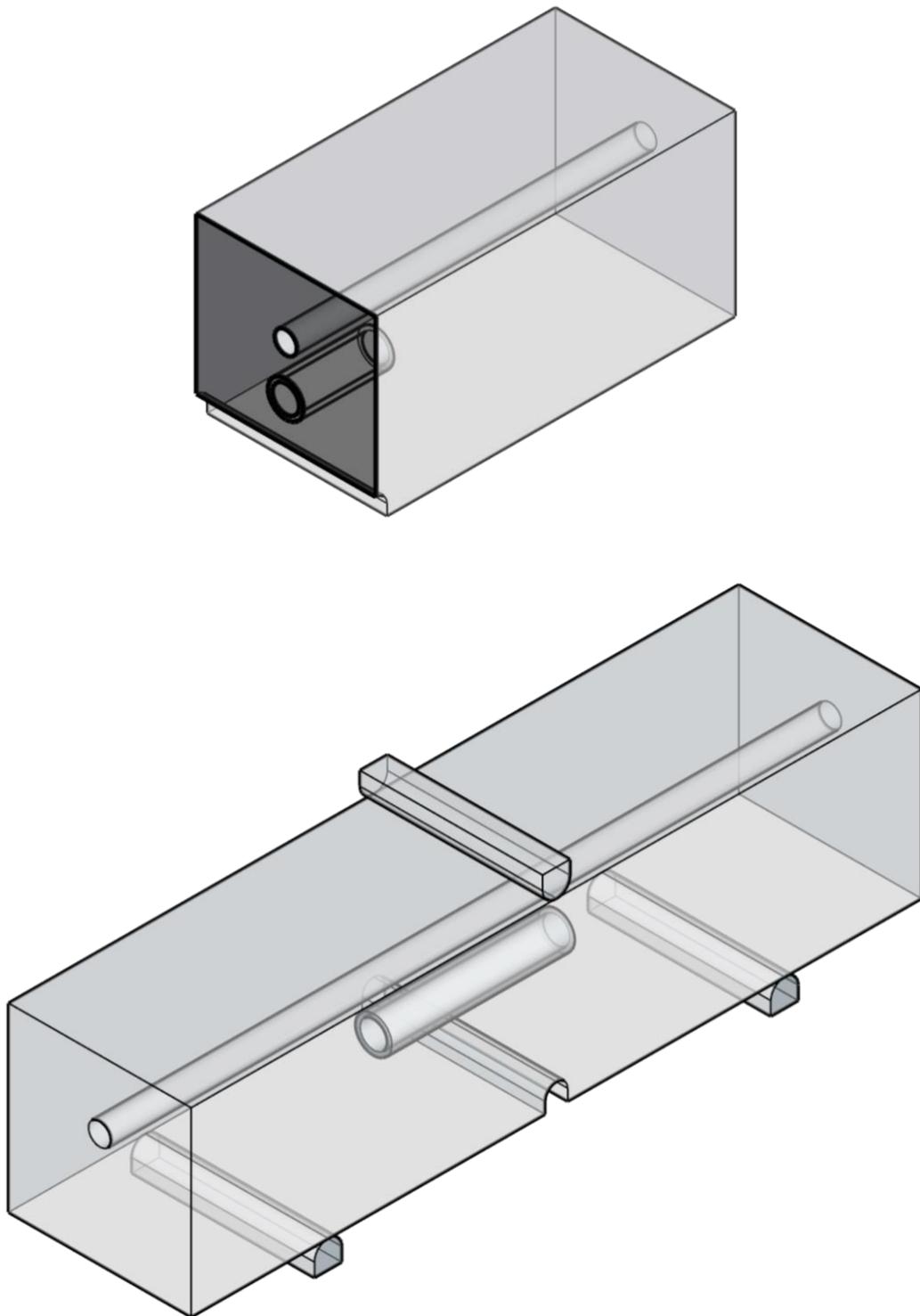


Figura 2: Illustrazione 3D: (In alto) sezione assonometrica provino; (In basso) assonometria provino

2 ASPETTI TEORICI

2.1 MATERIALI CEMENTIZI

2.1.1 GENERALITÀ

“Nei dintorni di Baja e nei dintorni de’ municipi che sono al Vesuvio” così Vitruvio in *“De Architectura”* annuncia l’esistenza di alcuni giacimenti vicino a Napoli di pozzolana, descrivendone poi le caratteristiche e le speciali proprietà idrauliche che riusciva a conferire alle malte costituendo una miscela di calce e pietrisco *“mescolata a calce e pietra fa gagliarda non solo ogni specie di costruzione, ma particolarmente quelle che si fanno in mare, divengono per esse solide sostanze”*.

Il testo risalente a duemila anni fa descrive come la scoperta della pozzolana, un materiale naturale di origine vulcanica, ha dato origine ad una serie di costruzioni imponenti e durature da parte dell’Impero Romano: acquedotti, strade, edifici. Dopo secoli di supremazia l’Impero crollò lasciandoci però in eredità esempi maestosi di edilizia ed urbanistica.

Dopo la caduta dell’Impero Romano, il calcestruzzo cadde in disuso per ricomparire poi gradualmente nel XIV secolo.

Nel 1824 l’inventore inglese Joseph Aspdin brevettò un metodo per produrre quello che chiamò cemento Portland e nel 1861 Joseph Monier scoprì come rinforzarlo, l’uso del cemento tornò così a diffondersi alimentato dalle esigenze dell’era industriale.

Attualmente l’industria del cemento è tra le più grandi al mondo, tra i maggiori produttori troviamo la Cina con il 57,3% della produzione totale globale, seguita da India con il 6,6% e Stati Uniti con il 2,0%, come illustrato nel grafico seguente (Figura 3). Raggiungendo nel 2019 una produzione totale a livello mondiale pari a 4,1 miliardi tonnellate.

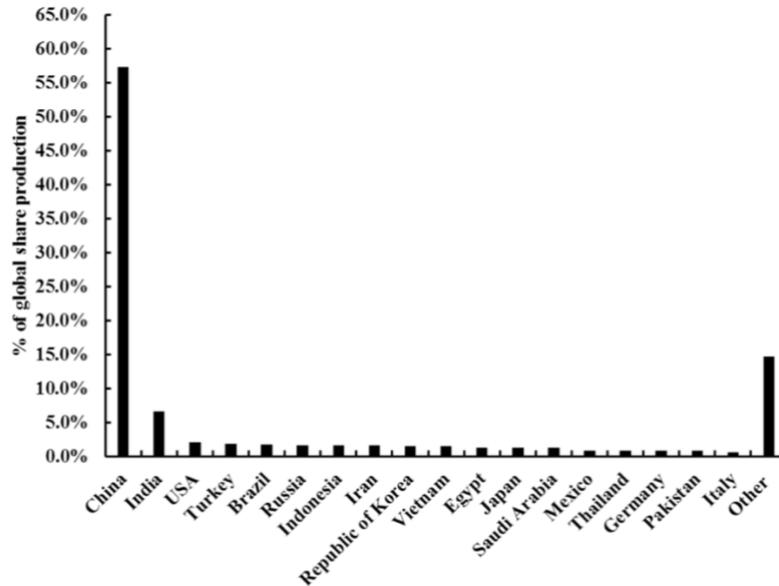


Figura 3: Produzione mondiale di cemento nel 2015. (USGS,1993-2016)

Un altro dato molto importante da prendere in considerazione è che la produzione del cemento richiede alte temperature e per questo motivo causa un'elevata emissione di CO₂, stimata tra 4 e 6% delle emissioni annue di origine antropica.

Infatti, nella produzione di cemento, il calcare è la principale materia prima utilizzata e viene bruciato a 1450 °C per produrre clinker. Il prodotto finito viene macinato finemente e miscelato con additivi per produrre diversi tipi di cemento. *“Si calcola che la produzione di 1 tonnellata di cemento Portland genera 0,55 tonnellate di CO₂ e necessita di altre 0,39 tonnellate di CO₂ dalla combustione di combustibili fossili per la cottura e la macinazione del clinker, per un totale di 0,94 tonnellate di CO₂” (Gartner 2004).*

Il grande successo di questo materiale può essere attribuito a molteplici motivi tra cui:

- materie prime facilmente reperibili;
- bassi costi dei materiali;
- processo produttivo che non richiede tecnologie particolari.

Tuttavia, il calcestruzzo non è immune al deterioramento che porta a conseguenti problemi strutturali, funzionali ed estetici. Il suo uso è diffuso in tutto il mondo, lo si utilizza per costruire ma anche riparare strutture come ponti autostradali, gallerie e grattacieli e in molteplici situazioni le cause di degrado hanno portato a problemi di durabilità che hanno ridotto il tempo di vita utile della struttura.

Un problema piuttosto grave nelle strutture in calcestruzzo armato è costituito dalla corrosione dell'acciaio facente parte dell'armatura che riduce l'efficacia delle armature stesse fino a mettere a repentaglio la funzionalità e la sicurezza delle stesse.

Le principali cause di deterioramento del calcestruzzo sono almeno quattro: la carbonatazione, la corrosione causata da cloruri, il gelo-disgelo e gli attacchi solfatici.

Nella maggior parte dei casi i costi di riparazione delle strutture danneggiate da corrosione costituisce una parte importante dei costi di manutenzione.

Inoltre, la mancanza di approcci sistemici per l'ispezione e la manutenzione delle strutture danneggiate dalla corrosione fa lievitare questi costi e riducendone il ciclo di vita e mettendo in discussione funzionalità e sicurezza delle stesse.

Tuttavia, oltre alla difficoltà di rilevare dei danni alla struttura nelle fasi di vita, è difficile valutare le prestazioni sul campo di strutture in calcestruzzo che hanno subito riparazioni.

2.1.2 DEGRADI DEL CALCESTRUZZO

Vista la grande varietà di contesti di applicazione, le strutture in calcestruzzo armato sono soggette a una serie di fenomeni di corrosione e usura, basti pensare al loro utilizzo in ambienti marini o industriali.

Le cause del deterioramento possono essere molteplici e spesso i danni sono il risultato di più cause combinate.

Le fessure costituiscono una via preferenziale per l'ingresso all'interno della matrice cementizia di sostanze potenzialmente dannose, in particolare per i ferri di armatura. Acqua e umidità immettendosi nelle fessure possono trasportare sali, gas disciolti e componenti chimici aggressivi di diverso tipo, procurando una delle principali cause del deterioramento del calcestruzzo, la corrosione delle barre in acciaio.

Acqua e umidità fungono da catalizzatori e portano l'acciaio ad arrugginire, la ruggine occupa un volume maggiore rispetto a quello occupato in precedenza dall'acciaio il che innesca tensioni nel calcestruzzo che in alcuni casi portano ulteriori fessurazioni.

La fessurazione e il deterioramento del calcestruzzo e del cemento armato possono essere causati da fattori: **chimici**, **meccanici** e **fisici**.

DEGRADI CHIMICI:

L'acciaio contenuto nel calcestruzzo è protetto dai fenomeni di corrosione dall'elevata alcalinità della soluzione dei pori nel calcestruzzo. In altre parole, l'elevato livello del pH del calcestruzzo porta alla formazione sulla superficie delle barre di acciaio una pellicola di ossido ferrico che le protegge da ulteriori corrosioni (l'acciaio si trova allora in uno stato passivato). Esistono però due

fattori che possono intaccare lo strato di ossido ferrico uno è la carbonatazione che porta alla riduzione del pH del calcestruzzo, l'altro è dovuto alla presenza di ioni cloruri.

1- Corrosione indotta dalla carbonatazione:

È il principale fattore di deterioramento delle strutture in cemento armato, con il trascorrere del tempo raggiunge strati sempre più in profondità. In particolare, ne colpisce i telai in acciaio attraverso l'anidride carbonica atmosferica che penetra in forma gassosa nel calcestruzzo e a contatto con l'acqua interstiziale provoca una reazione chimica chiamata carbonatazione.

Conseguentemente a questo fenomeno il pH della soluzione nei pori si abbassa da 12,6 a circa 8 nella regione colpita dalla carbonatazione, se ciò avviene in prossimità delle barre in acciaio c'è un'alta possibilità che ne causi la depassivazione.

È difficile prevedere la velocità di carbonatazione perché si deve a diversi fattori:

- Rapporto A/C (acqua/cemento): a rapporto minore corrisponde una minore velocità di carbonatazione.
- Tipo di cemento: i calcestruzzi cementizi confezionati con cemento Portland si carbonatano più lentamente rispetto a calcestruzzi cementizi confezionati con cementi di miscela e contenenti elementi secondari come pozzolane, scorie o ceneri.
- Dosaggio del cemento: l'aumento del dosaggio ne riduce la possibilità di carbonatazione.
- Umidità: valori di umidità relativa compresa tra il 40% e l'80% corrispondono ad una velocità massima di carbonatazione.
- Aumento di temperatura: favorisce la carbonatazione.

Per cui possiamo trarre la conclusione che la vita del calcestruzzo armato dipenda (ma non esclusivamente) dal tasso di carbonatazione.

2- Corrosione indotta da cloruri:

È un tipo di degrado ricorrente nelle strutture in calcestruzzo armato realizzate in ambienti marittimi, i cloruri aggrediscono le parti in ferro che costituiscono l'armatura del calcestruzzo corrodendolo, di seguito la ruggine occupando un volume maggiore del ferro coinvolto nella reazione, si creano tensioni di trazione nel copriferro che si fessura e dopo si distacca. Talvolta i cloruri agiscono direttamente sullo strato esterno del calcestruzzo corrodendolo e portando allo scoperto l'armatura. Il problema è facilmente riscontrabile anche nei manti autostradali per l'uso di sali antigelo.

3- Reazione alcali-aggregato:

Si tratta di una reazione chimica tra gli alcali contenuti nel cemento e gli aggregati reattivi, questa reazione causa un'espansione all'interno del calcestruzzo con conseguenti tensioni, rigonfiamenti e crepe.

Le reazioni possibili sono tre:

- Reazione alcali-carbonato: questa reazione è innescata tra aggregati di argilla dolomitica e calcare a grana fine;
- La reazione alcali-silice: è il tipo più comune di reazione e di solito si verifica entro i primi anni di vita dell'elemento in calcestruzzo;
- La reazione alcali-silicato: è simile alla precedente ma più lenta e piuttosto rara, si potrebbe verificare generalmente ad alcuni decenni dalla fabbricazione dell'elemento in calcestruzzo.

In questo caso l'approccio preventivo consiste nell'evitare che ci sia la coesistenza dei tre fattori innescanti: acqua (condizione di umidità relativa maggiore dell'80-

85%), quantità di alcali nel calcestruzzo e silice reattiva (presenza di aggregati reattivi).

4- Reazioni solfatica:

È una reazione molto complessa che prevede l'aggressione fisica del sale dovuto alla sua cristallizzazione e l'aggressione chimica da parte dei solfati dal suolo, dalle acque sotterranee o dall'acqua di mare. L'attacco solfatico può causare espansione, fessurazione, perdita di resistenza e disintegrazione del calcestruzzo. Questo tipo di degrado costituisce un grosso problema per la durabilità del calcestruzzo, infatti lo distrugge intaccandone le proprietà meccaniche, facendogli perdere resistenza e coesione.

DEGRADI MECCANICI:

1- Abrasione:

Per abrasione del calcestruzzo si intende la progressiva perdita di massa dovuta ad attrito, impatto, sovraccarico e frantumazione che ne causano un degrado di tipo meccanico. Traffico pedonale, movimento di veicoli o nel caso specifico degli edifici industriali carichi d'urto e graffi ne sono le cause.

La resistenza del calcestruzzo dipende da più fattori: durezza della pasta, durezza dell'aggregato e adesione tra pasta e aggregato.

Tendenzialmente maggiore è la resistenza alla compressione del calcestruzzo, maggiore sarà la sua resistenza all'abrasione.

Questo tipo di degrado colpisce la parte superficiale del calcestruzzo e solo in casi estremi può portare all'asportazione di grosse sezioni in modo da richiedere un ripristino dell'integrità strutturale.

2- Erosione

Con erosione si definisce il deterioramento della superficie del calcestruzzo causata da sabbia e ghiaia contenuta nelle particelle di acqua che sfregano contro le superfici. Anche le particelle del ghiaccio che scorrono lungo le superfici in calcestruzzo possono essere causa di erosione.

3- Carichi ciclici:

Il calcestruzzo ha molteplici impieghi, in base al tipo di impiego è sottoposto a stress differenti, per esempio nel caso di strutture come ponti e torri oltre alle dannose influenze ambientali, le strutture sono sottoposte anche a scenari di carico meccanico ciclico. In questo caso l'affidabilità di tali strutture dipende anche dal grado di danno strutturale subito a causa della fatica.

4- Sovraccarico:

Le sezioni trasversali di calcestruzzo sono progettate rispettando carichi calcolati e stimati, determinati da codici di costruzione. I fattori di progettazione presi in considerazione sono: resistenza del calcestruzzo, caratteristiche e numero delle barre che costituiscono l'armatura e dimensione forma della sezione trasversale. Nel momento in cui la struttura subisce un carico superiore alla misura stimata dai fattori di sicurezza, il calcestruzzo può essere danneggiato o addirittura può cedere.

Le cause del sovraccarico possono essere taglio, flessione o tensione; in alcuni casi invece le cause sono da ricercare nella fatica e nel carico ciclico.

DEGRADI FISICI:

1- Attacco gelo-disgelo

Dopo la corrosione indotta da cloruri il degrado da gelo-disgelo è nell'emisfero settentrionale la causa più comune del deterioramento del calcestruzzo.

Tre tipi di deterioramento sono causati dall'attacco gelo-disgelo:

- Crepe interne, scheggiature e espansione
- Shock termico causato dall'applicazione di sale
- Pop-out causati dall'uso di particelle di aggregati grossolani sensibili al gelo.

Scendendo maggiormente nel dettaglio, il deterioramento associato all'espansione può comportare importanti riduzioni della resistenza alla compressione e alla trazione. Quando l'acqua si congela, si espande di circa il 9 %, per cui quando ciò avviene all'acqua contenuta nel calcestruzzo umido produce pressione nei pori del calcestruzzo stesso. Se la pressione sviluppata supera la resistenza alla trazione del calcestruzzo, la cavità si dilata e si rompe. Questo processo ripetuto per più cicli di gelo-disgelo e la rottura della pasta e dell'aggregato possono eventualmente causare espansione e fessurazione, di conseguenza lo sgretolamento.

Nel caso dei sali antigelo, vengono applicati su un sottile strato di ghiaccio formatosi sulla superficie in calcestruzzo, di conseguenza la temperatura della superficie diminuisce in maniera repentina provocando uno shock termico che può portare a screpolature della superficie.

Per quanto riguarda gli aggregati, alcuni sono in grado di assorbire tanta acqua da non poter sopportare l'espansione e la pressione idraulica che si verificano durante il suo congelamento. Il risultato è l'espansione dell'aggregato e la possibile disintegrazione del calcestruzzo. Se ciò avviene alla superficie del calcestruzzo, può causare un pop-out.

2- Ritiro da essiccamento

Quando il calcestruzzo si asciuga, la perdita di umidità dai suoi pori fini provoca un restringimento, tale restringimento è ridotto perché gli aggregati occupano il 65-75% del suo volume.

Questo fenomeno è causato dalla perdita di acqua capillare e provoca un aumento della tensione di trazione, con conseguenti possibili fessurazioni, deformazioni interne e flessioni esterne, ancor prima che il calcestruzzo sia sottoposto a qualsiasi tipo di carico. In genere, le fessurazioni legate al ritiro da essiccamento compaiono già entro pochi giorni o settimane dalla costruzione.

Tutto il calcestruzzo in cemento Portland subisce un ritiro per essiccazione o una variazione di volume con l'invecchiamento del calcestruzzo, questo dato è molto importante e fondamentale da considerare nella progettazione di una struttura.

3- Ritiro plastico:

Con “crepe da ritiro plastico” si fa riferimento alle crepe che si formano mentre il calcestruzzo è ancora plastico, cioè non ancora solidificato.

L'essiccazione della superficie di calcestruzzo plastico ne provoca il ritiro e la fessurazione, ma le crepe non sono sempre evidenti durante le operazioni di finitura e talvolta potrebbero non essere scoperte fino al giorno successivo.

Le crepe da ritiro plastico possono formarsi in modo casuale o possono essere parallele tra loro, la loro larghezza può raggiungere i 3 mm.

Rappresentano una debolezza e un rischio poiché potrebbero allargarsi o estendersi successivamente.

2.1.3 PREVENZIONE

Le tipologie di degrado delle strutture in calcestruzzo, le cause che le innescano e le modalità di protezione e riparazione sono contenute e regolate dalla norma UNI EN 1504 "PRODOTTI E SISTEMI PER LA PROTEZIONE E LA RIPARAZIONE DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO". Tale norma definisce le procedure e le caratteristiche dei prodotti da utilizzare per la riparazione, manutenzione e protezione delle strutture in calcestruzzo.

UNI EN 1504 è composta da 10 parti:

- UNI EN 1504-1:2005: "Definizioni";
- UNI EN 1504-2:2005: "Sistemi di protezione della superficie di calcestruzzo";
- UNI EN 1504-3:2006: "Riparazione strutturale e non strutturale";
- UNI EN 1504-4:2005: "Incollaggio strutturale";
- UNI EN 1504-5:2005: "Iniezione del calcestruzzo";
- UNI EN 1504-6:2007: "Ancoraggio dell'armatura di acciaio";
- UNI EN 1504-7:2007: "Protezione contro la corrosione delle armature";
- UNI EN 1504-8:2005: "Controllo delle qualità e valutazione delle conformità";
- UNI EN 1504-9:2008: "Principi generali per l'uso dei prodotti e dei sistemi";
- UNI EN 1504-10:2005: "Applicazione in opera di prodotti, sistemi e controllo di qualità dei lavori".

La UNI 1504-9 definisce sostanzialmente:

- Gli obiettivi per proteggere e riparare;
- I requisiti minimi per la protezione e la riparazione;
- Indicazioni per la scelta dei materiali.

Di seguito è riportata la tabella con gli undici principi:

Principio N°	Principio e sua definizione	Metodi basati sul principio
Principio 1 [PI]	Protezione contro l'ingresso Riduzione o prevenzione dell'ingresso di agenti aggressivi, per esempio acqua, altri liquidi, vapore, gas, agenti chimici e biologici.	1.1 Impregnazione Applicazione di prodotti liquidi che penetrano nel calcestruzzo e chiudono il sistema di pori. 1.2 Rivestimento superficiale con la capacità o meno di fare da ponte sulle fessure 1.3 Fasciatura locale delle fessure¹⁾ 1.4 Riempimento delle fessure 1.5 Trasformare le fessure in giunti¹⁾ 1.6 Costruzione di pannelli esterni¹⁾²⁾ 1.7 Applicazione di membrane¹⁾
Principio 2 [MC]	Controllo dell'umidità Regolazione e mantenimento del contenuto dell'umidità del calcestruzzo entro un campo di valori specificato.	2.1 Impregnazione idrofobica 2.2 Rivestimento della superficie 2.3 Protezione o rivestimento¹⁾²⁾ 2.4 Trattamento elettrochimico¹⁾²⁾ Applicazione di una differenza di potenziale tra le parti del calcestruzzo per favorire oppure ostacolare il passaggio di acqua attraverso il calcestruzzo (non per il calcestruzzo armato senza valutazione del rischio di corrosione indotta).
Principio 3 [CR]	Ripristino del calcestruzzo Ripristino del calcestruzzo originale di un elemento della struttura nella forma ed alla funzione specificate originariamente. Ripristino della struttura di calcestruzzo mediante sostituzione di una parte.	3.1 Applicazione della malta a mano 3.2 Nuovo getto di calcestruzzo 3.3 Spruzzo di calcestruzzo o malta 3.4 Sostituzione degli elementi
Principio 4 [SS]	Rafforzamento strutturale Aumento o ripristino della capacità di carico strutturale di un elemento della struttura di calcestruzzo.	4.1 Aggiunta o sostituzione delle barre di armatura di acciaio interne o esterne 4.2 Installazione di barre annegate in fori preformati o realizzati al trapano nel calcestruzzo 4.3 Collegamento mediante piastre 4.4 Aggiunta di malta o calcestruzzo 4.5 Iniezione nelle fessure, nei vuoti o negli interstizi 4.6 Riempimento delle fessure, dei vuoti o degli interstizi 4.7 Precompressione (post-tensionamento)¹⁾
Principio 5 [PR]	Resistenza fisica Aumento della resistenza agli attacchi fisici o meccanici.	5.1 Strati esterni o rivestimenti 5.2 Impregnazione
Principio 6 [RC]	Resistenza ai prodotti chimici Aumento della resistenza della superficie di calcestruzzo nei confronti del deterioramento da attacco chimico.	6.1 Strati esterni 6.2 Impregnazione
Principio 7 [RP]	Conservazione e ripristino della passività Creazione delle condizioni chimiche in cui la superficie dell'armatura viene mantenuta o riportata ad una condizione di passività.	7.1 Aumento del copriferro con aggiunta di malta di cemento o calcestruzzo 7.2 Sostituzione del calcestruzzo contaminato o carbonato 7.3 Rialcalinizzazione elettrochimica del calcestruzzo carbonatato¹⁾ 7.4 Rialcalinizzazione del calcestruzzo o carbonatato mediante diffusione 7.5 Estrazione elettrochimica dei cloruri¹⁾
Principio 8 [IR]	Aumento della resistività Aumento della resistività elettrica del calcestruzzo.	8.1 Limitazione del contenuto di umidità mediante trattamenti di superficie, rivestimenti o ripari
Principio 9 [CC]	Controllo catodico Creazione delle condizioni in cui le aree potenzialmente anodiche dell'armatura sono impossibilitate ad una reazione anodica.	9.1 Limitazione del contenuto di ossigeno (al catodo) mediante saturazione o rivestimento della superficie²⁾
Principio 10 [CP]	Protezione catodica	10.1 Applicazione di un potenziale elettrico¹⁾
Principio 11 [CA]	Controllo delle aree anodiche Creazione delle condizioni in cui le aree potenzialmente anodiche dell'armatura sono impossibilitate a prendere parte alla reazione di corrosione.	11.1 Verniciatura dell'armatura con rivestimenti contenenti pigmenti attivi 11.2 Verniciatura dell'armatura con rivestimenti di barriera 11.3 Applicazione di inibitori al calcestruzzo¹⁾²⁾

1) Questi metodi possono far uso di prodotti e sistemi non coperti dalle norme della serie EN 1504.

2) L'inclusione dei metodi della presente norma europea sperimentale non implica la loro approvazione.

Figura 4: UNI EN 1504 - parte 9

2.2 MATERIALI SELF HEALING

2.2.1 GENERALITÀ

Differentemente dai classici materiali artificiali, i materiali auto-riparanti sono in grado di ripristinare le loro funzionalità e caratteristiche originali dopo aver subito un danno. I graffi superficiali possono essere richiusi, le proprietà meccaniche ripristinate.

Questo tipo di comportamento è comune nei materiali naturali, infatti molte strategie di progettazione di materiali auto-riparanti sono ispirate a processi naturali.

Negli ultimi anni sono stati studiati diversi meccanismi di auto-guarigione e nonostante i materiali auto-rigeneranti più comuni siano polimeri e elastomeri ci sono studi anche riguardanti le altre classi di materiali inclusi metalli, ceramiche e materiali cementizi.

Attualmente esistono due tipi di processi di auto-guarigione nei composti a base di cemento: **autogeni** cioè che coinvolgono solo componenti originali del calcestruzzo per la riparazione e **autonomi** che si avvalgono di componenti esterni come micro-capsule e macro-capsule, reti vascolari e sistemi che prevedono l'uso attivo di micro-organismi.

2.2.2 IL SELF HEALING NEI MATERIALI CEMENTIZI

SELF-HEALING AUTOGENO:

La guarigione autogena nel calcestruzzo è possibile grazie alla sua composizione costituita da una miscela di vari componenti cementizi, questo approccio è determinato dalle proprietà che compongono la miscela stessa.

Esistono diversi tipi di processi naturali in grado di riparare parzialmente e bloccare le crepe nel calcestruzzo:

- La formazione di carbonato di calcio derivante dall'idrossido di calcio e dall'anidride carbonica disciolta nell'acqua;
- La presenza di impurità nell'acqua con frammenti di cemento;
- L'idratazione del cemento o del materiale cementizio non reagito;
- Rigonfiamento del silicato di calcio idratato (CSH).

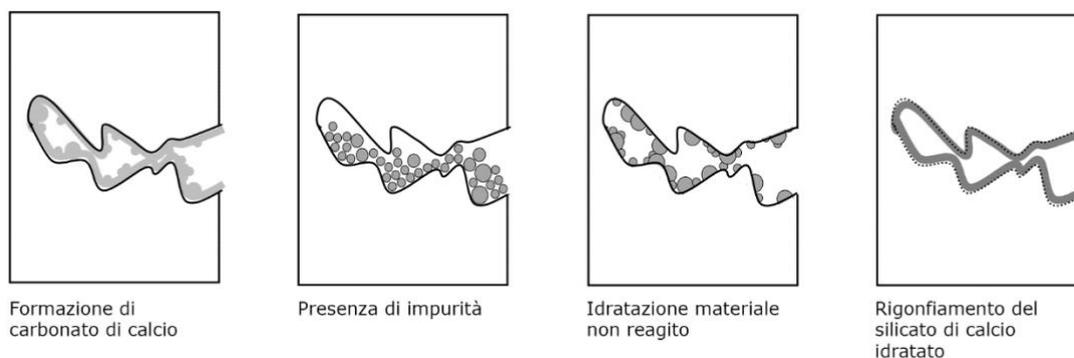


Figura 5: Possibili meccanismi di self-healing autogeno (A Review of Self-healing Concrete Research Development - Scientific Figure on ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Possible-mechanisms-for-natural-self-healing-in-cementations-materials_fig2_260988558 [14 Feb 2021])

Nella maggior parte dei casi i processi innescati contemporaneamente sono più di uno e difficilmente riescono a riempire completamente le fessure, anche perché richiedono lunghi periodi di tempo.

Oltre alla presenza di acqua e di anidride carbonica in essa disciolta, è possibile identificare diversi fattori che rendono efficace o meno la guarigione autogena:

- Composizione della miscela (più efficace con maggiori quantità di cemento);
- Stato tensionale lungo le fessure e stabilità stadi fessurativi;
- Temperatura dell'acqua (maggiore autoriparazione con temperature elevate);
- Alternanza tra condizioni di saturazione con acqua e esposizione all'aria con diversi tassi di umidità.

SELF-HEALING AUTONOMO:

Per auto-guarigione autonoma si intende il metodo per migliorare l'efficacia dei meccanismi di auto-riparazione autogena del calcestruzzo attraverso l'incorporazione di aggiunte incapsulate o non incapsulate.

Attualmente l'aggiunta di agenti tramite capsule è il metodo più utilizzato, le capsule possono contenere minerali, batteri, polimeri; anche le aggiunte non incapsulate possono contenere questi agenti ma vengono inserite direttamente nella miscela e diventano attive subito dopo la miscelazione del calcestruzzo.

1- Utilizzo di additivi minerali:

Gli additivi minerali sono materiali che miscelati in un calcestruzzo reagiscono a contatto con l'acqua dando vita a prodotti di reazione con un volume espanso con lo scopo di riparare le crepe in un calcestruzzo già indurito. Attraverso questa tecnica è possibile riparare larghezze di fessure fino a 120 μm .

Esistono diversi tipi di additivi minerali ed è possibile suddividerli in tre categorie:

- Additivi espansivi: danno vita a prodotti di reazione con un volume maggiore per cui in grado di riempire le fessure;

- Additivi basati su geopolimeri: costituiti da biossido di silicio, idrossido di silicato di sodio alluminio e argilla bentonitica, che hanno la capacità di rigonfiarsi. Quando questo tipo di geopolimero viene esposto all'acqua il suo volume può aumentare di 15-18 volte il suo volume iniziale;
- Additivi cristallini (agenti chimici): il più basilico è costituito dal silicato tricalcico (C_3S), che è il componente principale del clinker nel cemento e reagisce con l'acqua per formare il C-S-H (silicato di calcio idratato).

2- Utilizzo di batteri:

Anche certe categorie di batteri possono essere utilizzate allo scopo di guarire le crepe nel calcestruzzo però rispetto ad altri sistemi la larghezza massima di guarigione della fessura che può essere risanata con questo sistema è di circa 150 μm .

Inoltre, questo sistema permette che la fessura venga chiusa a tenuta stagna, tali agenti autorigeneranti sopravvivono nel calcestruzzo fino a 200 anni, ma ripristina solo limitatamente la resistenza meccanica del calcestruzzo.

In pratica il processo si innesca nel momento in cui, formatasi una crepa nella struttura cementizia, l'acqua sotto forma di umidità entra in contatto con le spore batteriche portandole a germogliare. Una volta attive, le spore, sopravvivono nutrendosi di lattato di calcio e consumando ossigeno per poi produrre carbonato di calcio insolubile. La formazione di calcare una volta solidificata sigilla la superficie danneggiata e i batteri tornano allo stato di ibernazione.

È necessario evitare che le spore si attivino involontariamente, per cui il lattato di calcio viene rinchiuso in capsule e separato dai batteri; un'alternativa è offerta dall'argilla espansa sottoforma di palline nelle quali vengono inseriti i batteri

stessi, tali palline si rompono una volta intercettata la fessura lasciando così germogliare i batteri.

Questa soluzione inoltre previene la corrosione dell'acciaio incorporato perché l'ossigeno viene consumato dai batteri, aumentando la durabilità della struttura.

3- Riscaldamento selettivo:

Nel 2006 Nishiwaki ha studiato un metodo di autoriparazione costituito da un sistema di autodiagnosi, un agente guarente e un tubo di pellicola organica con resistenza termica. Tale sistema è in grado di individuare la presenza di crepe e aumentare in loro presenza la resistenza elettrica in modo da riscaldare selettivamente le parti danneggiate tramite il passaggio di corrente. Successivamente viene fuso il film termoplastico del tubo che rilascia l'agente di guarigione che va a riempire le fessure per poi solidificarsi.

4- Sistemi incapsulati:

Sono i sistemi di riparazione più versatili, e sono stati scelti come oggetto di sperimentazione di questa tesi, entrano in azione solo quando avviene la rottura dello shell esterno della capsula, facendo in modo che il suo contenuto, generalmente in forma fluida, si riversi nella fessura.

I principi di attivazione del liquido all'interno della capsula possono essere molteplici: la matrice cementizia, l'aria o l'umidità; una volta attivato inizia la sua opera di riparazione sigillando la fessura e restituendo parte delle proprietà meccaniche all'elemento.

Per essere funzionale il sistema deve rispondere ad alcune esigenze:

- Deve essere sufficientemente resistente per resistere alle fasi di betonaggio e getto;
- Deve resistere all'ambiente basico della matrice;

- Non deve degradarsi nel tempo e deve preservare le caratteristiche di healing dell'agente al suo interno.

Esistono due tipi di incapsulamento:

- Concentrato: che include macro e micro-incapsulamento;
- Continuo: costituito dai sistemi vascolari.

1- Macro-incapsulamento:

In particolare, la tesi fa riferimento a questo tipo di capsule poiché rendono possibile immettere una quantità maggiore di agente riparatore e potenzialmente offrono un numero maggiore di riparazioni.

2- Micro-incapsulamento

Le microcapsule hanno una capienza inferiore avendo un diametro ≤ 1 mm, per cui tutto il loro contenuto si esaurisce in un'unica riparazione rendendo quindi quasi impossibile la riparazione ripetuta a lungo termine.

3- Sistemi Vascolari

In questo caso non si parla di capsule inserite nel calcestruzzo ma di un serbatoio esterno che contiene un agente curativo iniettato in un sistema vascolare nel calcestruzzo, nel momento in cui si innesca una frattura l'agente defluisce attraverso i canali vascolari e va a sigillarla.

Questa soluzione permette di offrire riparazioni continue poiché sarà sempre possibile rifornire i serbatoi esterni con agenti curativi, nonostante ciò, è la tecnica meno utilizzata perché molto costosa e richiede uno spazio adatto per il serbatoio che sia in loco che in fase di stoccaggio necessita condizioni specifiche per fare in modo che gli agenti curativi resistano prima dell'uso.

2.2.3 PRO E CONTRO

Analizziamo ora i vantaggi e gli svantaggi dell'utilizzo del cemento auto-riparante.

Elementi a favore:

- Durata di vita molto lunga: si stima che possa arrivare a 200 anni, non sarà necessario sostituire la superficie in calcestruzzo durante il suo ciclo di vita;
- Manutenzione ridotta: con il cemento standard si rende necessario e indispensabile riempire e sigillare le crepe per evitare che le crepe crescano e si espandano, in questo caso il lavoro è svolto direttamente dall'agente curante.

Elementi a sfavore:

- Costi relativamente elevati: il calcestruzzo solitamente viene scelto perché è un materiale da costruzione economico, nel caso di quello auto-riparante si tratta di un materiale raro e di origine recente per cui costoso;
- Ancora sconosciuto agli appaltatori: molti professionisti non lo conoscono o lo conoscono poco per cui non sanno come utilizzarlo.

2.3 MANIFATTURA ADDITIVA

2.3.1 GENERALITÀ

Principio base della tecnologia di produzione additiva è che un modello 3D generato da CAD che viene utilizzato direttamente per fabbricare un oggetto tridimensionale aggiungendo strato su strato il materiale e fondendoli insieme. Attraverso questo tipo di produzione si è pensato di produrre nuovi tipi di macrocapsule adatte per essere riempite con diversi agenti curativi e successivamente incorporate in materiali cementizi per introdurre proprietà autorigeneranti e risolvere il problema della formazione di fessurazioni.

Nel 2010, il gruppo della American Society for Testing and Materials (ASTM) "ASTM F42 - Additive Manufacturing", ha stilato una serie di caratteri che classificano la gamma dei processi di produzione additiva in **7 categorie**:

1- VAT Photopolymerisation:

Polimerizzazione, primo tipo di manifattura additiva ad essere stato praticato, è un processo attraverso cui un liquido viene polimerizzato da una sorgente di luce e trasformato in un solido.

2- Binder jetting:

Questo processo non utilizza il calore per fondere il materiale a differenza degli altri, infatti, utilizza un liquido legante per unire il materiale in polvere insieme in modo da formare una struttura 3D.

3- Directed energy deposition:

È un processo di stampa più complesso comunemente utilizzato per riparare o aggiungere del materiale a componenti già esistenti attraverso la fusione.

4- Powder bed fusion:

Utilizza il laser o un fascio di elettroni per fondere il materiale insieme e formare una parte geometrica in 3D.

5- Sheet lamination:

Utilizza come tecnica la saldatura chimica e gli ultrasuoni per intagliare da una serie di fogli di materiale impilati una figura 3D. Una volta che l'oggetto è stato costruito, le sezioni indesiderate vengono quindi tagliate strato per strato.

6- Material jetting:

É il processo attraverso cui le goccioline di materiale da costruzione vengono depositate e polimerizzate selettivamente per formare una struttura 3D.

7- Material extrusion:

Questa tecnica utilizza un filamento continuo di materiale termoplastico o composito per costruire parti geometriche tridimensionali.

Un comune processo di estrusione di materiali è, FDM (Fused Deposition Modeling). A cui è dedicato un ampliamento nel paragrafo successivo poiché è la tecnica attraverso la quale sono state prodotte le capsule in PET riciclato per la sperimentazione.

2.3.2 FDM (Fused Deposition Modeling)

La modellazione a deposizione fusa ha avuto origine nel 1991 ed è la seconda tecnologia di produzione additiva a raggiungere il mercato.

Sinteticamente gli oggetti creati nascono come file CAD e successivamente convertiti in file compatibili al software della stampante 3D attraverso lo slicing, un processo che consente di passare da un modello tridimensionale di un oggetto alla sua versione "affettata", porzionandolo in sezioni di circa 1mm e individuandone i contorni, i vuoti e i pieni.

Completata la parte di progettazione, una bobina di filamento termoplastico viene caricata nella stampante. Una volta che l'ugello ha raggiunto la temperatura desiderata, il materiale fuso passa attraverso un estrusore che ne riduce le dimensioni a circa 1 mm.

La testa dell'estrusore è collegata a un sistema a 3 assi che le consente di muoversi nelle direzioni X, Y e Z; il materiale viene depositato strato su strato in posizioni determinate dove si raffredda e solidifica (talvolta il raffreddamento è accelerato tramite ventole). Gli strati si sovrappongono fino all'ottenimento della figura geometrica desiderata. (Figura 6)

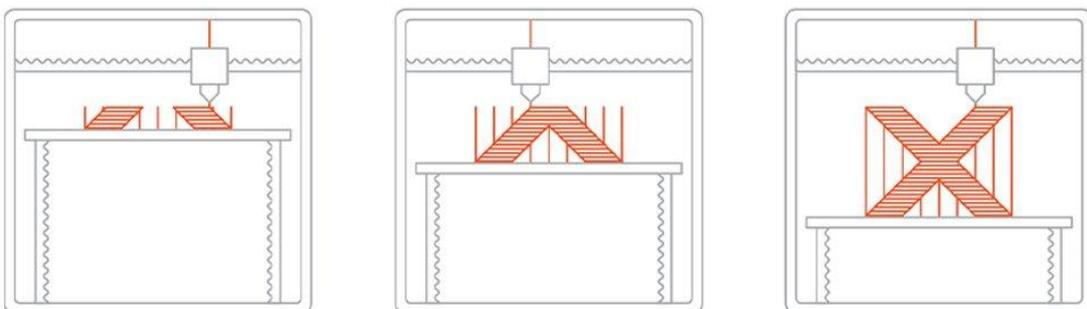


Figura 6: Schematizzazione processo di stampa 3D (Synthesieng)

Questo processo offre molti vantaggi rispetto ai metodi di produzione tradizionali:

- Possibilità di realizzare forme geometriche complesse;
- Tempi di produzione ridotti;
- Scarto minimo;
- Costi accessibili;
- Ampio spettro di materiali accessibili.

3 ATTIVITÀ SPERIMENTALE

3.1 OUTLINE

Come brevemente anticipato nell'introduzione, questa tesi ha lo scopo di analizzare e comprendere i processi di auto-riparazione dei materiali cementizi, facendo riferimento a ricerche svolte in precedenza.

Nello specifico il lavoro consiste nella comparazione di due diverse tipologie di capsule, in cui il materiale dell'involucro esterno è costituito nel primo caso da PET riciclato e nel secondo da una pasta cementizia additivata con polimeri. La comparazione vera e propria viene effettuata introducendo tali capsule all'interno di provini prismatici in malta normale di cemento e analizzandone il comportamento meccanico e fisico a seguito di prefessurazione e auto-riparazione.

La prima fase del lavoro consiste nel confezionamento delle capsule (in PET riciclato e in pasta di cemento) e nella realizzazione dei provini, successivamente i provini vengono sottoposti, nel seguente ordine, a prove di prefessurazione, permeabilità, ricarico meccanico statico e dinamico.

Queste ultime assumono grande importanza in questo lavoro poiché ancora scarsamente approfondite nella letteratura scientifica, nonostante la loro importanza ai fini della comprensione del comportamento nel lungo termine dei materiali cementizi auto-riparanti e della loro possibile applicazione nel settore delle infrastrutture.

I provini presi in analisi sono trentasei, realizzati in malta cementizia di forma prismatica con dimensioni $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ dotati di un foro passante nella direzione longitudinale e un intaglio sulla superficie inferiore (Figura 7, Figura 8, Figura 9 e Figura 10). Quattordici di questi sono stati segnati con la sigla "CEM" poiché contenevano al loro interno una capsula in materiale cementizio, altri quattordici

con la sigla “PET” perché contenevano una capsula in PET. I provini restanti sono stati segnati con la sigla “REF” realizzati senza alcuna capsula e utilizzati come riferimento per comparazione.

Durante la sperimentazione che in seguito viene descritta in maniera dettagliata sono stati raggiunti risultati positivi su entrambe le tipologie di capsule. In particolare, le capsule in PET, prodotte tramite FDM (modellazione a deposizione fusa) offrono la possibilità di una produzione in serie rendendo possibile la realizzazione di un composto cementizio auto-riparante con la proprietà di durare nel tempo.

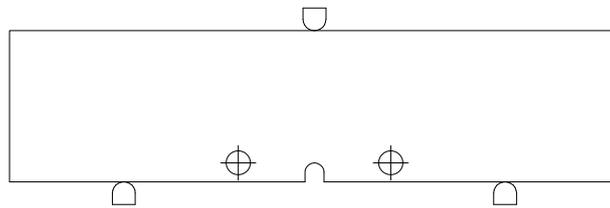


Figura 7: Rappresentazione grafica 2D in scala 1:2, prospetto frontale del provino

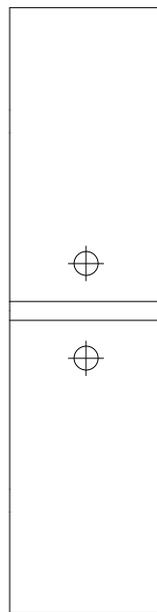


Figura 8: Rappresentazione grafica 2D in scala 1:2, prospetto inferiore del provino



Figura 9: : (a destra) Rappresentazione grafica 2D in scala 1:2,prospetto laterale del provino del provino;

Figura 10: : (a sinistra) Rappresentazione grafica 2D in scala 1:2, sezione trasversale del provino.

3.2 MACRO CAPSULE IN PET

3.2.1 CONFEZIONAMENTO CAPSULE

Le capsule utilizzate per la sperimentazione (Figura 12Figura 13) sono state prodotte dall'Università di Salerno tramite manifattura additiva, precisamente attraverso la modellazione a deposizione fusa (FDM).

La stampante utilizzata è la Ultimaker 3 (Figura 11) con una risoluzione massima di stampa di 20 μm e una velocità massima di 300 mm/s. sono stato seguiti i seguenti parametri di stampa: Temperatura ugello 220 °C, piatto di stampa 60 °C, altezza del layer 0,1 mm.

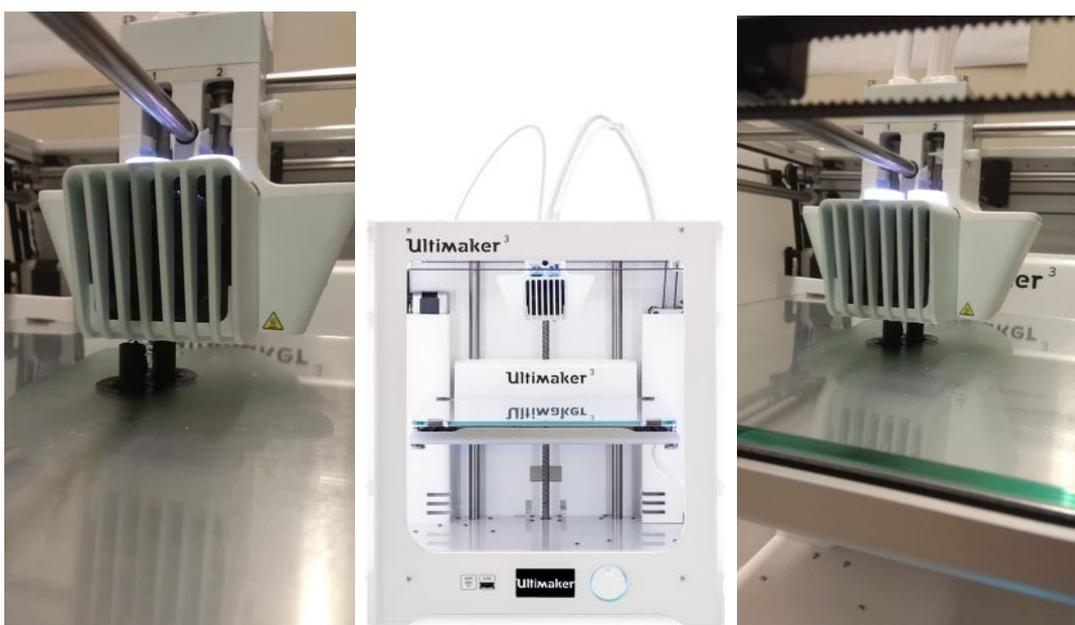


Figura 11: (al centro) stampante 3D Ultimaker 3; (ai lati) foto durante il processo di stampa della capsula in PET.

Attualmente esistono in commercio filamenti in bobine per la stampa FDM di molteplici materiali, ma per poter produrre una capsula che possa contenere un materiale auto-riparante sono richieste delle caratteristiche specifiche. Si rende necessario prendere in considerazione la temperatura di fusione, la temperatura di transizione vetrosa e la resistenza chimica alle sostanze del rivestimento, all'

agente di guarigione e all'ambiente alcalino del calcestruzzo.

Inoltre, l'adesione corretta tra i vari layers di stampa del materiale è fondamentale poiché è necessario un comportamento relativamente fragile per innescare il rilascio dell'agente guarente contenuto nella capsula.

Oltre ad essere preferibili materiali a basso costo, in modo da creare un sistema auto-riparante economico ci si pone anche il problema della sostenibilità ambientale, infatti l'Università di Salerno ha ideato una bobina di filamenti in PET riciclato, dal recupero di bottiglie d'acqua.

Nonostante le differenze di colore delle bottiglie raccolte il filamento appare uniforme, poiché in fase di preparazione delle scaglie polimeriche è stato aggiunto un colorante. Questo utilizzo alternativo propone una soluzione di smaltimento all'annoso problema dei rifiuti in PET.

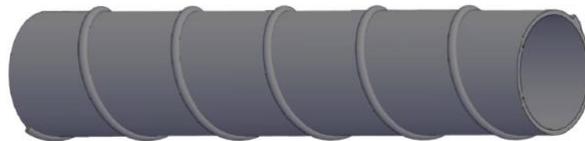


Figura 12: rappresentazione grafica 3D capsula in PET riciclato con nervature (lunghezza 40 mm, diametro 4 mm, spessore parete 0,3 mm).



Figura 13: Capsule in PET.

3.3 MACRO CAPSULE CEMENTIZIE

3.3.1 CONFEZIONAMENTO CAPSULE

Le capsule CEM utilizzate per la sperimentazione (Figura 14), invece sono state prodotte presso il laboratorio materiali ceramici del Politecnico di Torino.

Lo scheletro della capsula ha una base cementizia a cui sono stati aggiunti materiali di composizioni varie al fine di migliorarne le caratteristiche coesive e plastiche.

Il processo di produzione è di tipo artigianale e prevede il susseguirsi di numerose lavorazioni che in seguito saranno descritte in maniera più dettagliata.



Figura 14: Capsule cementizie.

I materiali utilizzati nella produzione sono:

- Cemento Portland “CEM I 52,5 R”, costituisce la base cementizia della miscela, è necessario per conferire plasticità iniziale e indurimento in fase finale.
 - *Quantità:* 217 g;
- Acqua demineralizzata, utilizzata con lo scopo di ridurre le impurità contenute nella miscela.
 - *Quantità:* 60 g;
- Carbonato di calcio, il calcare è un aggregato fine che ha funzione di riempitivo, rende la struttura compatta andando ad occupare i vuoti presenti nel cemento idrato.

- Quantità: 100 g;
- Metacaolino, composto che reagisce alcalinamente con la calce allo scopo di modificare la viscosità dell'impasto.
 - *Quantità: 1,6 g;*
- Idrossipropilmetilcellulosa "HPMC", ha funzione plastificante, è una sostanza organica molto fine che quando si lega all'acqua conferisce un aspetto plastico all'impasto.
 - *Quantità: 3,4 g;*
- Etilacrilato-metilmetacrilato "Primal B60A", resina alcalina in dispersione acquosa, conferisce densità e coesione al composto.
 - *Quantità: 80 g;*
- Polietilene glicole "PEG", polimero con funzione di antiritiro della miscela.
 - *Quantità: 8 g.*

La procedura di realizzazione delle capsule segue nove fasi:

- Pesatura dei materiali nelle dosi sopra descritte, suddividendo i materiali solidi da quelli liquidi;
- Unione delle componenti solide in un recipiente e di quelle liquide in un secondo recipiente;
- Unione delle due miscele (solida, liquida) in un unico contenitore attraverso l'uso di un miscelatore a colonna a diverse velocità regolabili manualmente;
- Manipolazione dell'impasto ottenuto su pareti di neoprene che offrono un supporto liscio ma adesivo;
- Lavorazione dell'impasto attorno a una cannuccia in plastica del tipo comunemente usato per le bevande. Inizialmente si riveste la parte centrale della cannuccia con una porzione di impasto poi aiutandosi con entrambe le mani lo si distribuisce uniformemente lungo la superficie esterna;

- Stagionatura, deve avvenire in un ambiente umido all'interno di vaschette di plastica chiuse, richiede 2/3 giorni;
- Sformatura della capsula;
- Rifinitura, taglio e adeguamento della dimensione che deve essere di 5 cm;
- Stagionatura, 3/4 giorni.



Figura 15: Processo di confezionamento delle capsule cementizie

3.4 IMPERMEABILIZZAZIONE CAPSULE

3.4.1 INTRODUZIONE

Il passaggio successivo è quello di rendere isolate e impermeabili all'acqua le capsule sia cementizie che in PET, infatti l'agente riparante prescelto è una resina poliuretana che reagisce in presenza di umidità formando una schiuma espansiva che si irrigidisce e solidifica nel giro di pochi minuti.

La lavorazione si divide in tre fasi: i primi due coating servono a impermeabilizzare completamente i gusci, in modo da proteggere l'agente riparante dall'umidità e impedire che il processo riparante s'innesci prima della rottura della capsula, infatti durante le operazioni di getto il conglomerato cementizio ha un elevato contenuto d'acqua. La terza fase è differente ma ha lo scopo di raggiungere lo stesso obiettivo, le capsule cementizie presentano due fori alle estremità, invece quelle in PET solo uno. In questa fase uno dei fori delle capsule cementizie viene sigillato. È una delle fasi più importanti perché permette il funzionamento corretto della capsula impedendo che nel momento in cui il liquido viene versato al suo interno si formi schiuma che potrebbe impedire la rottura della capsula a seguito della frattura dell'elemento in calcestruzzo. In tal caso la capsula oltre che essere inutile si trasformerebbe in un aggregato alleggerito all'interno della miscela cementizia.

3.4.2 MATERIALI UTILIZZATI E RELATIVE QUANTITÀ

Sono state effettuate tre differenti lavorazioni, ognuna contraddistinta da un diverso materiale tecnico:

- Resina epossidica bicomponente diluibile in acqua "Primer AQ" di API SpA, si presenta come un fluido biancastro, è una sostanza bicomponente quindi prima di applicarla è necessario miscelare i due reagenti per formare la resina e aggiungere dell'acqua per renderla più fluida. Viene utilizzata per la prima fase di coating delle capsule.

- *Quantità*: acqua demineralizzata 22,03 g, indurente 52,55 g, Base 22,84 g;
- Resina epossidica bicomponente non diluita “Plastigel” di API SpA, ha l’aspetto di un fluido grigio scuro, non necessita di diluizione acquosa per cui risulta molto denso, si utilizza per la seconda fase di coating.
 - *Quantità*: base 35,09 g, indurente 15,10 g;
- Stucco epossidico bicomponente a presa rapida “Stucco K” di API SpA, come nel caso della resina utilizzata nella prima fase di coating si tratta di un prodotto bicomponente, si presenta come una pasta bianca opaca e il tempo utile per applicarlo è limitato poiché tende ad indurirsi in tempi piuttosto brevi. Si usa nella terza fase, per sigillare uno dei due fori della capsula cementizia.
 - *Quantità*: indurente 15,58 g, Base 15,94 g.

3.4.3 STRUMENTI

Tutte le preparazioni si sono svolte in laboratorio, i principali strumenti utilizzati sono stati:

- Bilancia: utilizzata per misurare la quantità di resine e catalizzatori da miscelare;
- Griglie di scolo: necessarie per far colare il materiale in eccesso dalle capsule;
- Filo da pesca: alla quale vengono appese le capsule per far colare la resina in eccesso;
- Mollette: per permettere al filo da pesca di tenere sospese le capsule.

3.4.4 PROCEDURA

La procedura consiste in tre fasi operative due di coating e una di stuccatura:

- Prima fase di coating: le capsule vengono immerse all’interno di un contenitore riempito con il materiale impermeabilizzante “Primer AQ” e

successivamente appese, attraverso un filo fissato in precedenza alla sommità, all'interno di un contenitore allo scopo di far colare la resina in eccesso e creare uno strato sottile e uniforme (Figura 17 Figura 18);

- Sigillatura delle capsule cementizie: terminata l'asciugatura che segue la fase precedente, si procede con l'applicazione dello stucco epossidico su uno dei fori della capsula cementizia, per permettere allo stucco di aderire perfettamente e per far sì che funga da tappo è necessario plasmare prima una piccola sfera di materiale semi-indurito con l'ausilio di guanti oleati e posizionarla sul foro in modo che la natura plastica che precede l'asciugatura dello stucco non influisca sulla sigillatura del foro (Figura 19);
- Seconda fase di coating: a differenza della prima fase di coating, si ricopre con la resina solo la parte esterna dello shell, la metodologia di applicazione è analoga alla precedente solo che in questo caso la resina viene stesa con il dito in maniera uniforme, segue sempre l'asciugatura nel contenitore appese tramite filo.

3.4.5 RISULTATI

Dopo un'attenta analisi visiva non sono apparse capsule con assenza parziale o totale di rivestimento, lo spessore del coating risulta inoltre omogeneo per cui le capsule risultano completamente impermeabilizzate e di conseguenza idonee ad affrontare la fase successiva di sperimentazione (Figura 19).

3.4.6 FOTO



Figura 16: Capsule cementizie in fase asciugatura dopo il primo coating.



Figura 17: Capsula in PET dopo il primo coating



Figura 18: Capsula cementizia dopo il primo coating

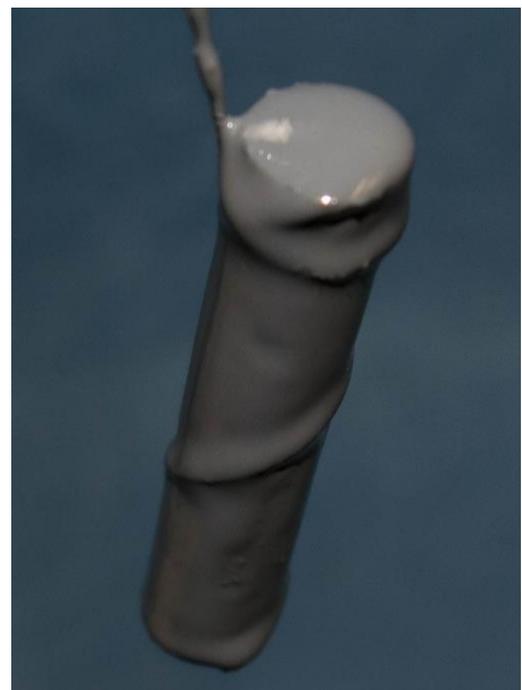
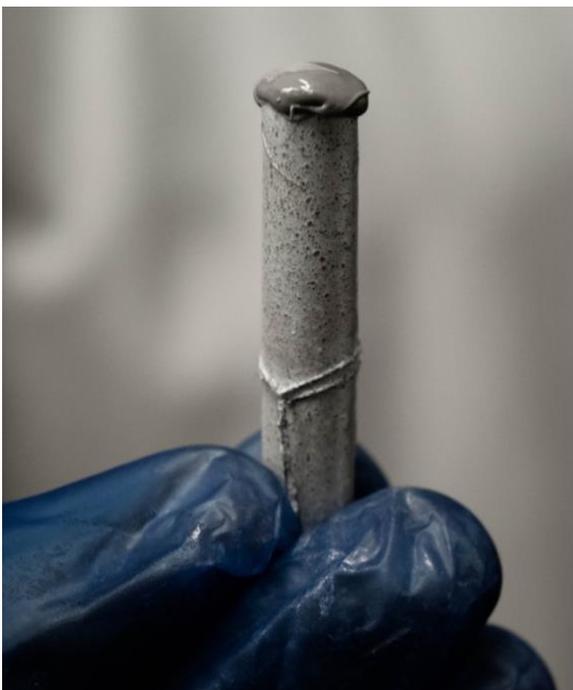


Figura 19: (a sinistra) Fase di sigillatura della prima estremità di una capsula cementizia; (a destra) Risultato dopo il secondo coating di un capsula in PET.

3.5 RIEMPIMENTO E SIGILLATURA

3.5.1 INTRODUZIONE

Questa operazione può avere luogo solo quando l'asciugatura che segue le fasi di coating è completata poiché la capsula deve essere completamente asciutta. Si tratta di una procedura che richiede precisione e velocità, infatti consiste nel riempimento delle capsule con il liquido di healing che deve avere un contatto limitato con l'umidità dell'aria altrimenti inizierebbe a gonfiarsi e a reagire. Segue poi la sigillatura definitiva tramite stucco epossidico utilizzando la medesima procedura della fase di impermeabilizzazione.

Una volta sigillata la capsula non sarà più possibile sapere con certezza lo stato del liquido all'interno, infatti in fase di asciugatura o durante il trasferimento del liquido di self-healing al suo interno potrebbe essere entrato in contatto con acqua o umidità ciò renderebbe la capsula inutilizzabile, non risponderebbe più alle caratteristiche richieste dal progetto e diventerebbe un aggregato di alleggerimento nel calcestruzzo.

3.5.2 MATERIALI UTILIZZATI E RELATIVE QUANTITÀ

Alcuni dei materiali utilizzati in questa fase sono i medesi delle fasi precedenti:

- Precursore poliuretano "CarboStop-U" di Orica SpA, è una resina poliuretano monocomponente di colore giallastro utilizzata come agente self-healing, quindi inserito all'interno delle capsule prima della sigillatura definitiva.
 - *Quantità*: il necessario per riempire le capsule;
- Stucco epossidico bicomponente a presa rapida "Stucco K" di API SpA, si presenta come una pasta bianca opaca e viene utilizzato per sigillare il secondo foro delle capsule.
 - *Quantità*: indurente 16,4 g, base 16,4 g;

- Resina epossidica bicomponente non diluita “Plastigel” di API SpA, si presenta come un fluido grigio scuro, non essendo diluita con acqua appare densa, viene utilizzata per il rivestimento delle teste delle capsule.
 - *Quantità*: indurente 7,5 g, base 17,5 g.

3.5.3 STRUMENTI

Tutte le preparazioni si sono svolte in laboratorio, i principali strumenti utilizzati sono stati:

- Bilancia: utilizzata per misurare la quantità di resine e catalizzatori da miscelare;
- Siringa: utilizzata per inserire l’agente riparante allo stato liquido all’interno delle capsule.

3.5.4 PROCEDURA

La procedura è costituita da tre fasi interdipendenti tra di loro che seguono un preciso ordine cronologico.

- Riempimento delle capsule: terminata la fase di polimerizzazione del sigillo posto nel foro inferiore della capsula si procede al riempimento della stessa, viste le dimensioni è stato necessario l’ausilio di una siringa per immettere al suo interno il liquido con capacità riparanti. Vista la densità del prodotto è necessario utilizzare la siringa senza ago, quindi una volta rimosso l’ago e caricata la siringa con qualche ml di prodotto è stato possibile riempire le capsule facendo però molta attenzione a non eccedere e a non incorporare troppa aria all’interno della capsula durante il processo. In alcuni casi a seguito del riempimento è stato necessario eliminare delle bolle d’aria formatesi durante il travaso (Figura 20);
- Sigillatura della seconda estremità: successivamente all’immissione dell’agente riparante è stato necessario tappare il foro d’entrata, le modalità sono le stesse utilizzate per sigillare il primo foro nella fase di impermeabilizzazione, ma in questo caso è richiesta ancora maggiore

attenzione per evitare di danneggiare l'agente contenuto all'interno della capsula (Figura 20);

- Coating delle estremità: terminata la fase di asciugatura dell'agente sigillante si è proceduto con un ulteriore rinforzo attraverso la resina "Plastigel" utilizzata per bagnare l'estremità recentemente otturata e ripristinare l'isolamento (Figura 21 e Figura 22).

3.5.5 RISULTATO

Al termine delle ultime lavorazioni si ottiene un prodotto finito da poter inserire all'interno dell'impasto cementizio, le capsule infatti a seguito dei vari passaggi si presentano con una struttura monolitica contenente un liquido e perfettamente impermeabilizzata (Figura 23). Presentano resistenza meccanica e ciò le permette di non subire fessurazioni durante le opere di miscela e betonaggio. Esternamente non presentano anomalie o fuoriuscite di schiuma, le eventuali difformità potranno poi essere riscontrate solo durante le prove successive in cui il guscio verrà fratturato.

3.5.6 FOTO



Figura 20: Fase di riempimento e sigillatura delle capsule cementizie.



Figura 21: Risultato finale delle capsule cementizie.



Figura 22: Risultato finale delle capsule in PET.



Figura 23: (a sinistra) Capsula cementizia; (a destra) Capsula in PET.

3.6 CONFENZIONAMENTO PROVINI

3.6.1 INTRODUZIONE

Per la realizzazione dei provini in malta cementizia si eseguono una serie di passaggi attraverso i quali si ottiene un prodotto artigianale con all'interno una capsula. Il procedimento ha inizio proprio con il posizionamento delle capsule nelle casseforme a cui segue il getto della malta cementizia che le va ad inglobare. Le capsule sono posizionate all'interno del provino in modo che alla formazione di fessure la capsula si rompa, il liquido reagisca chimicamente a contatto con le particelle di acqua contenute nell'aria espandendosi e trasformarsi in una sostanza schiumosa.

3.6.2 MATERIALI UTILIZZATI E RELATIVE QUANTITÀ

I materiali utilizzati per la realizzazione dei provini in malta cementizia sono i seguenti:

- CEM I 42,5 N: Cemento Portland ad alta resistenza normalizzato con una piccola quantità di calcio al fine di regolarizzarne la presa, questo tipo di miscela è studiata per resistere anche in condizioni di moderata aggressività. La composizione è conforme alla UNI EN 197-1 (Clinker 95-100%, costituenti secondari 5-0 %), presenta resistenza meccanica a compressione a 28 giorni è pari a 42,5 N/mm².
 - *Quantità:* 900 g;
- Acqua: prelevata direttamente dalla condotta idrica, non sono richieste infatti particolari caratteristiche fisiche e meccaniche.
 - *Quantità:* 450 g;
- Sabbia normalizzata: sabbia silice naturale con un contenuto di silicio del 98% almeno, con granulometria compresa tra 0,08 e 2 mm. Formata solitamente da particelle arrotondate.
 - *Quantità:* 2700 g;

- Olio disarmante: per semplificare la scasseratura dei provini.
 - *Quantità*: Il necessario per ricoprire la superficie della cassaforma;
- Colla epossidica bicomponente “X60” di HBM: costituita da due componenti che ne rendono facile pratica l’applicazione, il primo componente è costituito da una polvere, il secondo è liquido e si misura in gocce. La miscela si effettua in un apposito contenitore che facilita il raggiungimento della consistenza desiderata.

3.6.3 STRUMENTI

Gli strumenti impiegati nella realizzazione dei provini sono:

- Casseforme in acciaio con dimensione standardizzate secondo la UNI-EN 12390-1: utilizzate però con dei piccoli accorgimenti per il posizionamento delle capsule e lo svolgimento delle prove;
- Impastatrice “Model N-50” della Hobart: per miscelare la malta cementizia;
- Filo da pesca: supporto utilizzato per posizionare adeguatamente le capsule nelle casseforme;
- Tubicini in materiale plastico: per effettuare i test di durabilità;
- Trapano a colonna: usato per aumentare il diametro del foro passante in corrispondenza di una delle due estremità;
- Silicone bianco da bagno: per sigillare una delle due estremità del foro passante.

3.6.4 PROCEDURA

Il confezionamento dei provini ha inizio con la spolveratura tramite pennelli delle casseforme, ne segue l’operazione tramite la quale le casseforme vengono unte internamente ed esternamente per facilitarne l’estrazione una volta induriti i provi. In direzione longitudinale sono state inserite delle aste cilindriche, anch’esse unte in modo da realizzare un foro nel provino. Sono stati sfruttati dei fori presenti nelle casseforme per far passare i fili da pesca (tesissimi) per poter

posizionare le capsule, le stesse sono state incollate ai fili tramite colla bicomponente "X60". Nella superficie inferiore delle casseforme è presente un rialzo (in direzione trasversale) a metà in modo tale da creare un intaglio nei provini. Questo intaglio facilita la fase di fessurazione durante le prove di carico (Figura 24).

Contemporaneamente si è proceduto alla realizzazione della malta cementizia, come da procedura UNI EN 196-1:

- Si versano acqua e cemento all'interno della mescolatrice ma a macchina spenta;
- Si avvia la macchina per 30 secondi e nei 30 secondi successivi sempre con la macchina in moto si aggiunge la sabbia;
- Si arresta la macchina e poi si fa ripartire ad alta velocità per altri 30 secondi;
- Si arresta di nuovo la macchina per un minuto e 30 secondi, nei primi 15 secondi si raschiano le pareti, nei successivi 75 si pone una copertura sulla bacinella;
- La macchina viene avviata ad alta velocità per un minuto.

Una volta ottenuta la malta della consistenza desiderata si procede con il versarla nelle casseforme in due step, al termine di ogni step la cassaforma è sottoposta ad un procedimento vibrante costituito da due cicli di 60 scosse (Figura 25).

In questo modo la malta viene livellata e le capsule vengono avvolte dalla malta cementizia, l'idea è di ottenere un provino di forma prismatica il più regolare possibile (Figura 26).

Una volta induriti, i provini sono stati tirati fuori dalle casseforme e lasciati maturare per qualche giorno, dopodiché si è proceduto alla preparazione per la prova di durabilità attraverso due step:

- preparazione prima estremità del foro passante: viene adattato la prima estremità del foro passante del provino, passando da un diametro di 5 mm a 6 mm in modo da poter inserire il tubo da cui entrerà l'acqua nel provino. Il tubo plastico con diametro simile al nuovo foro del provino una volta inserito viene sigillato al provino con del silicone (Figura 27);
- Sigillatura seconda estremità del foro passante: l'altra estremità del foro del provino viene sigillata al fine di forzare l'uscita dell'acqua dalla discontinuità creata dalla fessurazione (Figura 27).

3.6.5 RISULTATO

Il risultato ottenuto è stato quello atteso, una serie di provini in malta autoriparante di forma parallelepipedica con le seguenti caratteristiche:

- 14 provini contenenti capsule PET;
- 14 provini contenenti capsule cementizie;
- 8 provini senza capsule usati come riferimento.

I provini sono stati nominati rispettivamente "PET", "CEM" e "REF" su ognuno è stata segnata la data di realizzazione e il numero del provino.

I prodotti ottenuti sono risultati molto simili tra loro al punto da essere considerati uguali in termini di caratteristiche fisiche, meccaniche e di scabrezza delle superfici per le successive prove.

3.6.6 FOTO

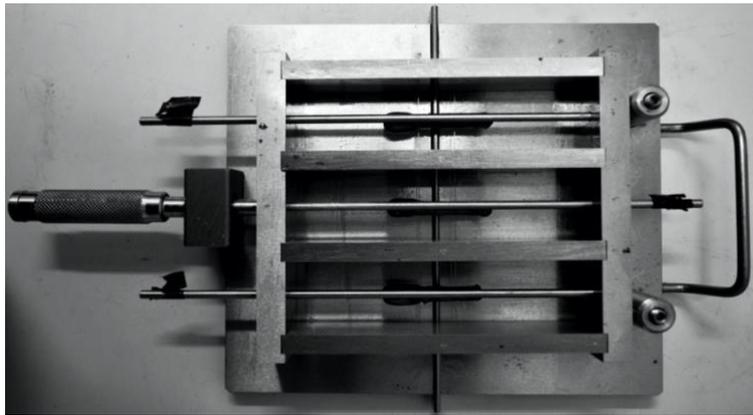


Figura 24: Casseforme in acciaio, con capsule cementizie posizionate.



Figura 25: (a sinistra) Procedimento vibrante; (a destra) risultato dopo il primo ciclo di vibrazione.



Figura 26: Risultato provino dopo la fase getto.

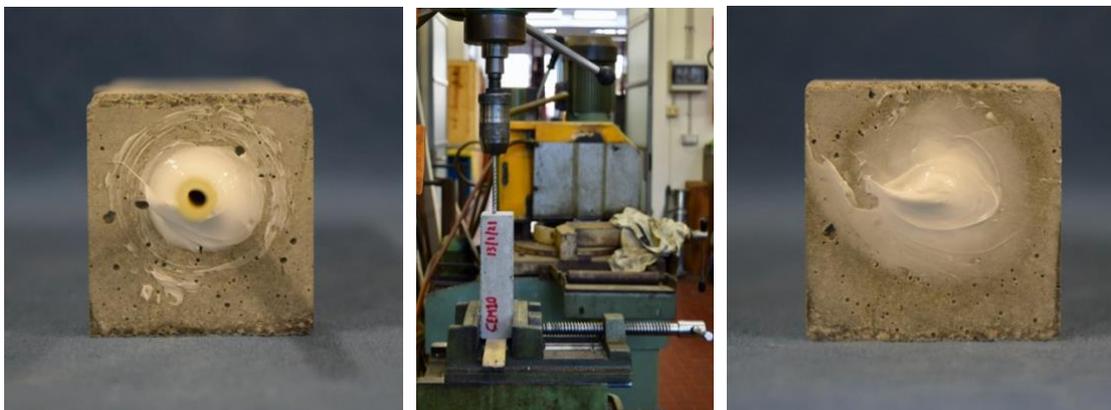


Figura 27: (al centro) fase di adattamento di una delle estremità del foro passante; (ai lati) risultato finale delle due estremità del foro passante

3.7 PROVE DI PREFESSURAZIONE

3.7.1 INTRODUZIONE

Le prove di flessione su tre punti sono le prove più comuni impiegate per valutare le capacità di auto-riparazione dei compositi cementizi e il recupero delle proprietà meccaniche. Nel nostro caso, si è scelto di generare una fessura nei provini con un'apertura massima di 800 μm , per causare un danno controllato nel campione, contestualmente, innescare la rottura delle capsule, la fuoriuscita del liquido e la seguente reazione. Il contatto con l'umidità nell'aria fa sì che il liquido si trasformi in una schiuma che riporta continuità nel materiale, successivamente la resistenza del provino auto-riparato sarà valutata con delle ulteriori prove.

Inoltre, il confronto tra i tre tipi di provini sottoposti a questa prova ci darà informazioni in merito all'influenza che hanno le capsule sul materiale, se si differenziano tra PET e cementizie o se influenzano positivamente o negativamente la struttura della matrice cementizia.

È noto che per effetto della sollecitazione imposta nasce un momento flettente M e uno sforzo sulla sezione di altezza utile $h = h_{\text{provino}} - h_{\text{incavo}}$ che tende le fibre inferiori. Ad un incremento di carico corrisponde un aumento della sollecitazione in mezzeria: superata la resistenza a trazione, il materiale si fessura.

La prova è stata eseguita sette giorni dopo la preparazione dei provini (Tabella 1).

Serie	Data getto	Data prefessurazione	Serie	Data getto	Data prefessurazione	Serie	Data getto	Data prefessurazione
CEM_1	12/01/21	19/01/21	PET_1	12/01/21	19/01/21	REF_1	14/01/21	21/01/21
CEM_2	12/01/21	19/01/21	PET_2	12/01/21	19/01/21	REF_2	14/01/21	21/01/21
CEM_3	12/01/21	19/01/21	PET_3	12/01/21	19/01/21	REF_3	14/01/21	21/01/21
CEM_4	12/01/21	19/01/21	PET_4	12/01/21	19/01/21	REF_4	14/01/21	21/01/21
CEM_5	12/01/21	19/01/21	PET_5	12/01/21	19/01/21	REF_5	14/01/21	21/01/21
CEM_6	12/01/21	19/01/21	PET_6	12/01/21	19/01/21	REF_6	14/01/21	21/01/21
CEM_7	13/01/21	20/01/21	PET_7	13/01/21	20/01/21	REF_7	14/01/21	21/01/21
CEM_8	13/01/21	20/01/21	PET_8	13/01/21	20/01/21	REF_8	14/01/21	21/01/21
CEM_9	13/01/21	20/01/21	PET_9	13/01/21	20/01/21			
CEM_10	13/01/21	20/01/21	PET_10	13/01/21	20/01/21			
CEM_11	13/01/21	20/01/21	PET_11	13/01/21	20/01/21			
CEM_12	13/01/21	20/01/21	PET_12	13/01/21	20/01/21			
CEM_13	14/01/21	21/01/21	PET_13	14/01/21	21/01/21			
CEM_14	14/01/21	21/01/21	PET_14	14/01/21	21/01/21			

Tabella 1: Calendario con le date di getto e di avvenuta prefessurazione di ciascun provino.

3.7.2 MATERIALI

I materiali utilizzati per la preparazione dei provini in malta cementizia sono i seguenti:

- Colla epossidica bicomponente: utilizzata per fissare il sistema di ancoraggio del trasduttore di spostamento;
- Dadi, viti, lamelle: necessari ad assemblare il sistema di ancoraggio del trasduttore di spostamento al provino.

3.7.3 STRUMENTI

- Pressa servo-idraulica MTS 810: programmabile via software, necessaria per prove di carico e prove di fatica, configurabile per soddisfare le diverse esigenze di collaudo di materiali o componenti;
- Estensometro “DD1, range $\pm 2,5$ mm”, della HBM;
- Personal computer con software dedicati.

3.7.4 PROCEDURA

La prefessurazione è stata condotta controllando velocità di fessurazione: in pratica, l’attuatore della macchina viene azionato in modo tale da garantire la velocità con cui si allontanano i bordi della fessura (controllata dall’estensometro)

segua una legge prefissata. Nel caso specifico delle prove di prefessurazione eseguite per questa tesi si è adottata una velocità costante di 1,5 $\mu\text{m/s}$ fino a raggiungere un'apertura di fessura 800 μm .

La procedura avviene secondo i seguenti passaggi:

- Si fissa il sistema di ancoraggio dell'estensometro alla superficie inferiore del provino attraverso la colla bicomponente epossidica e l'utilizzo di dadi distanziati tra loro di 2,5 cm (Figura 28 Risultato provino dopo il fissaggio dei dadi distanziati tra loro di 2,5 cm.);
- Si ancora l'estensometro al provino e lo si collega al pc in modo da poter visualizzare i dati, dopodiché si posiziona il provino sui supporti della macchina di carico (Figura 29);
- Si effettua un pre-avvicinamento del pistone al provino, in questo caso il controllo è manuale e si evita il contatto con la superficie;
- Si porta il pistone a contatto e si inizia la fase di carico, da questo punto in poi si iniziano a rilevare gli spostamenti;
- Si procede con la fase di carico a controllo di velocità costante fino al raggiungimento di 800 μm di spostamento relativo tra le due lamelle ai lati opposti della fessura. In questa fase il movimento provocato dall'aumentare dell'apertura viene rilevato dal trasduttore e quantificato in μm (Figura 30);
- Una volta raggiunto il limite della fessura vi è lo scarico della forza del pistone che inverte la direzione dell'andamento in modo da creare una lieve richiusura della fessura, il processo termina con l'annullamento del carico applicato;
- Si acquisiscono i file contenenti i dati riguardanti tempo di avanzamento della prova, forza, spostamento e estensimetro riferiti a ciascun provino.

Successivamente a questa prova, i provini sono stati conservati in un armadio a umidità controllata ($T = 20\text{ °C}$ e $UR = 60\%$) per una settimana, in questo modo c'è la sicurezza che l'agente rilasciato dalle capsule si sia indurito per poter poi accedere alle prove successive.

3.7.5 RISULTATI

Per rendere più semplice l'interpretazione dei dati ricavati dalle letture dell'estensimetro, sono stati rappresentati attraverso grafici, relazionando il carico [kN] e lo spostamento rilevato dall'estensimetro [mm] al fine di evidenziare graficamente il comportamento.

Il primo grafico preso in analisi (Grafico 1) è di un provino di riferimento (REF) per poter comprendere il comportamento e la resistenza di una malta cementizia se testata a flessione.

La curva analizzata è caratterizzata da tre fasi:

- Fase 1: inizialmente l'andamento della curva è rettilineo descrivendo un comportamento elastico del materiale, in seguito inizia a curvare a causa dei primi fenomeni di microfessurazione, fino a raggiungere un picco che indica la resistenza meccanica massima a flessione del provino. Infine, il crollo della curva indica la fessurazione definitiva del provino, seguito dalla fase di softening;
- Fase 2: grazie al controllo costante dell'apertura è possibile osservare la decrescita graduale della resistenza del provino, attraverso la curva di softening. L'aumento dell'apertura della fessura porta a una diminuzione della sezione resistente;
- Fase 3: nel tratto finale la curva inverte l'andamento, ciò avviene in seguito al raggiungimento dell'apertura ricercata di $800\text{ }\mu\text{m}$ e al successivo scarico della forza applicata dal pistone, per questo motivo i lembi tendono in minima parte a riavvicinarsi.

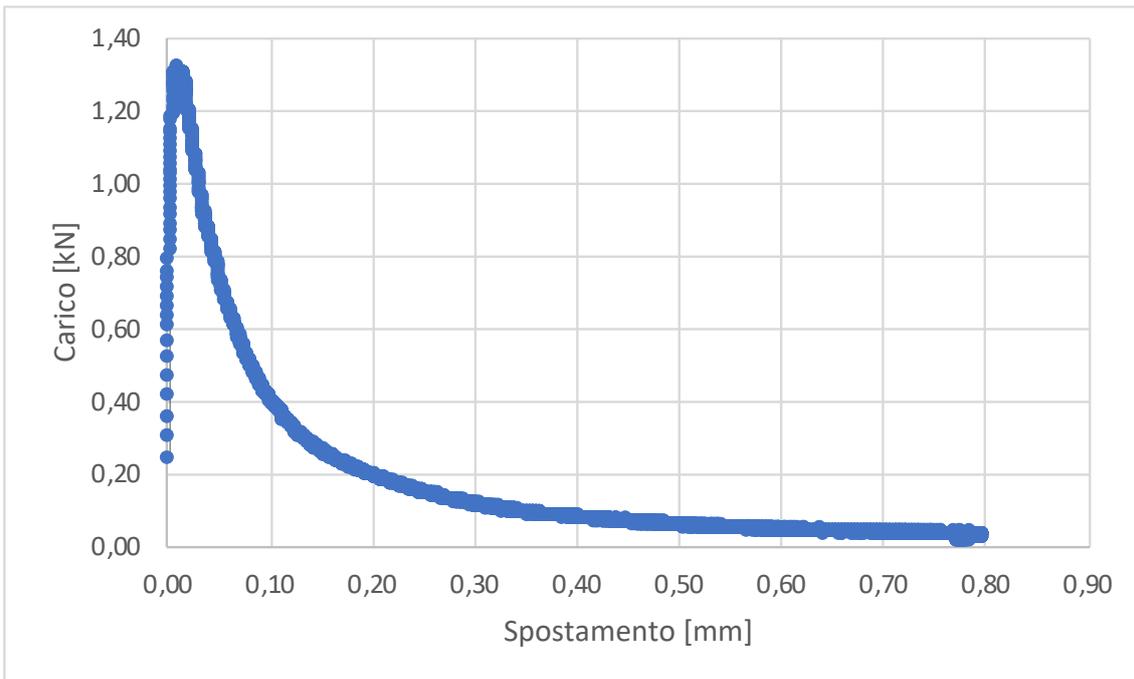


Grafico 1: Prova di prefessurazione del provino di riferimento, REF_2.

I due grafici successivi sono invece in riferimento al comportamento delle due provini con capsule CEM e PET nella prova a flessione su tre punti (Grafico 2 Grafico 3). Anche in questo caso è possibile dedurre la resistenza del provino attraverso l'osservazione della curva carico-spostamento del provino.

Analizziamo le diverse fasi:

- Fase 1: entrambi i provini contenti le due capsule differenti manifestano un comportamento elastico lineare, infatti la curva ha un andamento lineare;
- Fase 2: i provini CEM presentano un primo picco e variazioni del carico, ciò può essere imputato a disomogeneità del materiale o alla formazione di prime microfessurazioni;
- Fase 3: Raggiungimento del carico di picco e successiva rottura del provino.
- Fase 4: Ramo di softening legato alla graduale diminuzione della sezione resistente nel provino causata dall'estendersi della fessura;
- Fase 5: Le capsule costituiscono un elemento di forte discontinuità rispetto alla matrice cementizia di cui è composto il provino. Nel caso delle capsule

CEM la rottura della capsula avviene prima cioè entro i 0,2 mm, mentre nel caso delle capsule in PET un po' più in ritardo entro i 0,4 mm. Questo può essere motivato dal fatto che le capsule cementizie sono più fragili e meno plastiche in confronto a quelle in PET;

- Fase 6: Ramo di scarico.

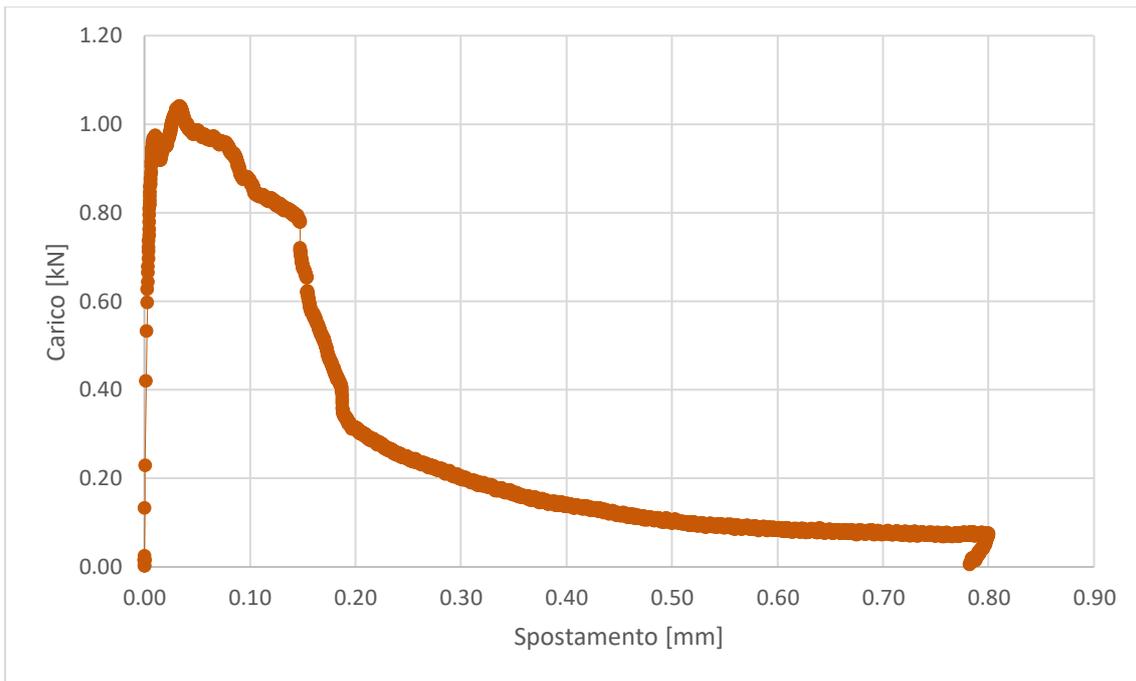


Grafico 2: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula cementizia, CEM_7.

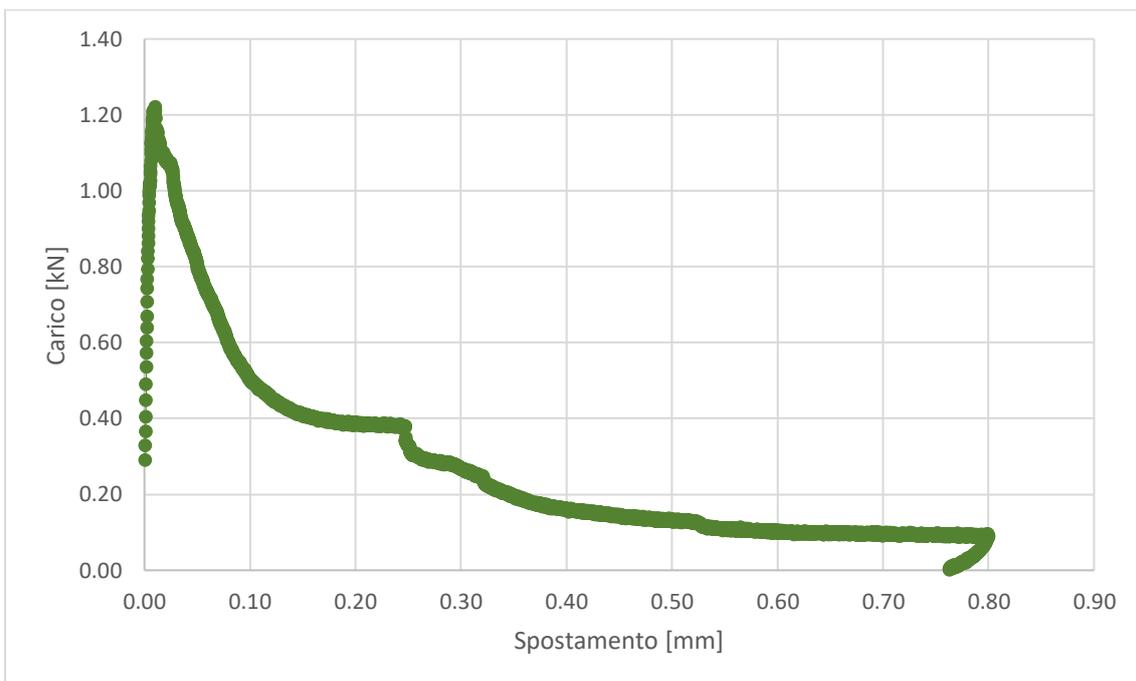


Grafico 3: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula in PET riciclato, PET_2.

Un dato importante da considerare è che la presenza delle capsule non ha inficiato significativamente la capacità portante dei provini. Tale fenomeno si può valutare attraverso una formula che confronta le capacità portante dei sistemi auto-riparanti e il campione di riferimento:

$$L_{reduction} = \frac{L_{peak,REF} - L_{peak,i}}{L_{peak,REF}} \quad [\%]$$

Dove:

- $L_{peak,REF}$: carico di picco del provino sottoposto a prova di prefessurazione, senza capsula;
- $L_{peak,i}$: carico di picco del provino sottoposto a prova di prefessurazione, con la capsula.

$L_{peak,REF}$ è la capacità portante media L_{peak} calcolata sui 8 esemplari delle serie REF e $L_{peak,i}$, è la capacità portante media L_{peak} calcolata sui 14 campioni di ciascuna serie di autoriparazione. Rispettivamente le riduzioni percentuali sono state pari al 4% per la serie PET e al 11% per la serie CEM. Il risultato ha evidenziato come l'influenza delle capsule sulla resistenza meccanica iniziale sia complessivamente accettabile: la lieve diminuzione delle performance iniziali dovrebbe infatti essere controbilanciata da una superiore capacità di recupero meccanico post-fessurazione e da un migliore comportamento in termini di durabilità, per effetto dell'azione auto-riparante introdotta dalle capsule.

La tabella riportata qui sotto riassume i risultati della fase di prefessurazione, con i valori medi di L_{peak} e L_{unload} per ciascuna serie e la percentuale di riduzione del carico $L_{reduction}$ di ciascuna serie autorigenerante rispetto alle serie di riferimento.

Series	Media L_{peak} (N)	$L_{reduction}$ (%)
PET	1332,84	4%
CEM	1228,95	11%
REF	1382,65	-

Tabella 2: Riporta i valori medi di L_{peak} per ciascuna serie correlati con $L_{reduction}$.

Inoltre è opportuno segnalare che durante l'esecuzione della prova sui provini CEM_(13,14) e REF_(3,10,11,12,13,14), l'agente riparante non ha dato segni visivi di fuoriuscita. Questo può essere indizio di non avvenuta rottura delle capsule, con conseguente mancato rilascio dell'agente riparante. Il fatto che il fenomeno si sia verificato più frequente nei provini contenenti capsule PET può essere dovuto al fatto che le capsule cementizie sono più fragili e meno plastiche in confronto a quelle in PET, e dunque più facilmente soggette a rompersi in continuità con la matrice di malta cementizia in cui sono collocate.

3.7.6 GRAFICI

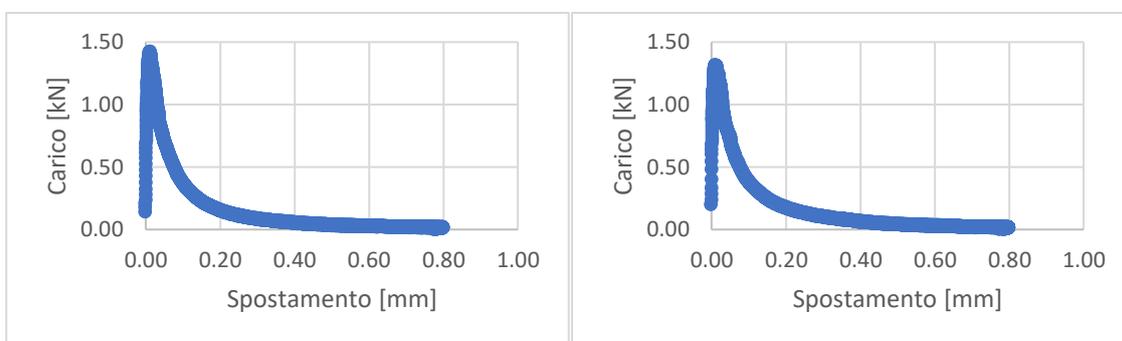


Grafico 4: Prova di prefessurazione del provino di riferimento, (a sinistra) REF_1; (a destra) REF_3.

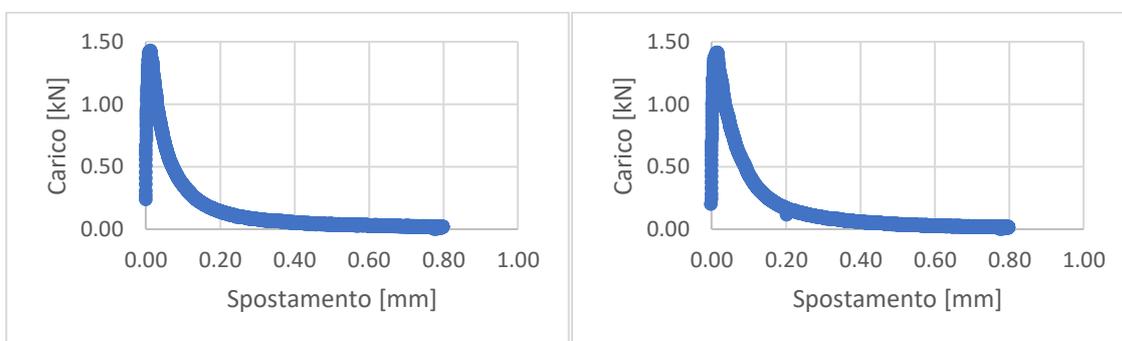


Grafico 5: Prova di prefessurazione del provino di riferimento, (a sinistra) REF_4; (a destra) REF_5.

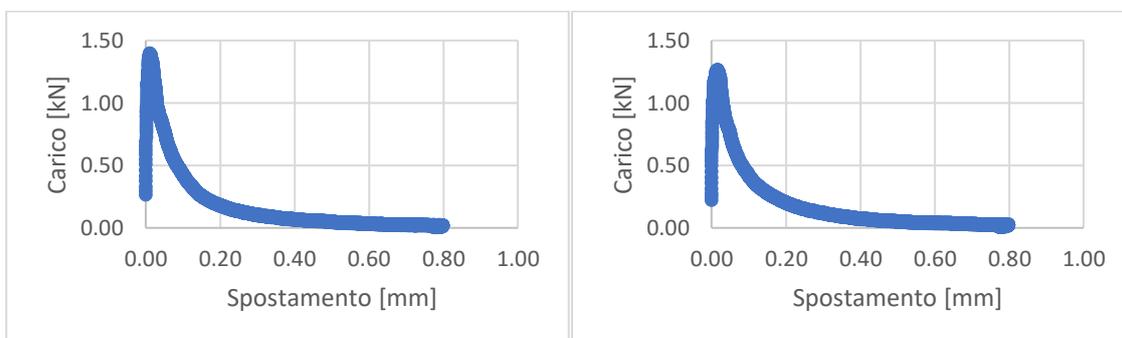


Grafico 6: Prova di prefessurazione del provino di riferimento, (a sinistra) REF_6; (a destra) REF_7.

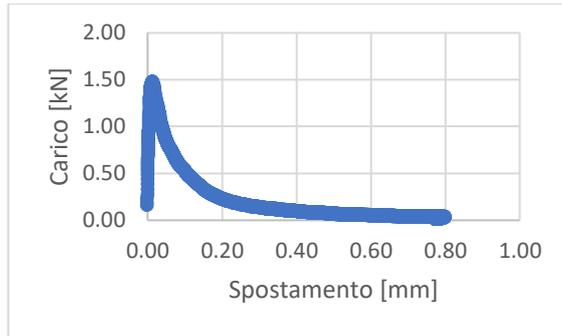


Grafico 7: Prova di prefessurazione del provino di riferimento, (a sinistra) REF_8.

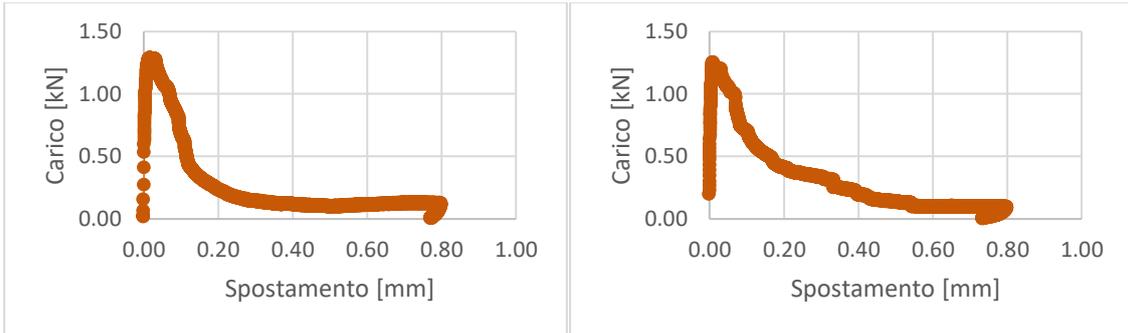


Grafico 8: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula cementizia, (a sinistra) CEM_1; (a destra) CEM_2.

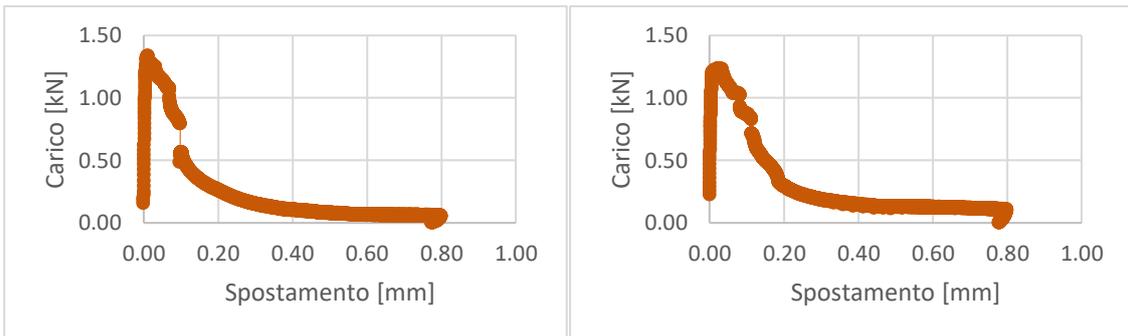


Grafico 9: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula cementizia, (a sinistra) CEM_3; (a destra) CEM_4.

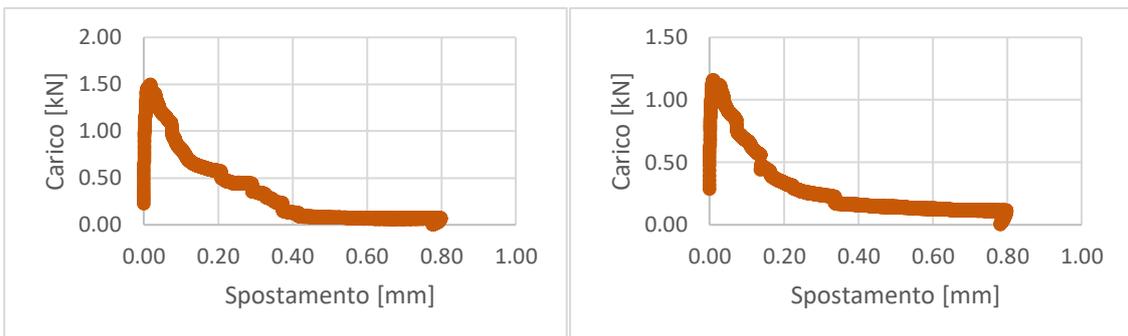


Grafico 10: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula cementizia, (a sinistra) CEM_5; (a destra) CEM_6.

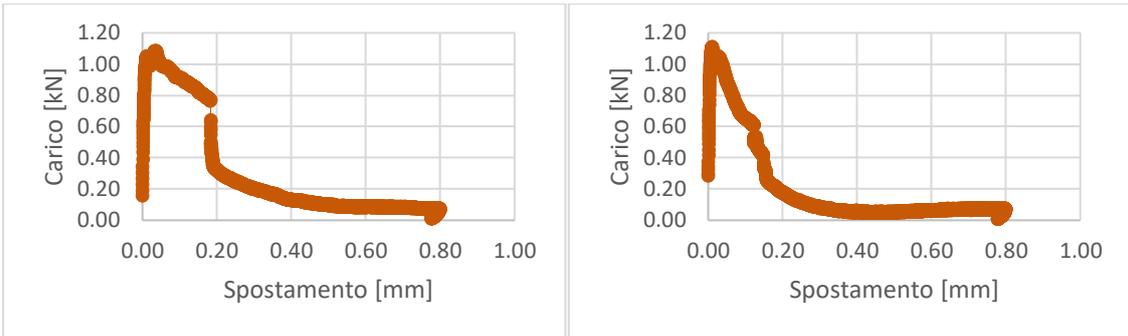


Grafico 11: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula cementizia, (a sinistra) CEM_8; (a destra) CEM_9.

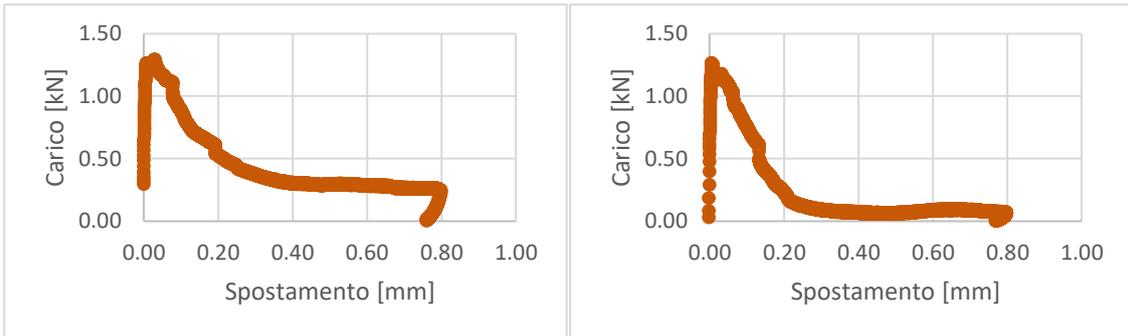


Grafico 12: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula cementizia, (a sinistra) CEM_10; (a destra) CEM_11.

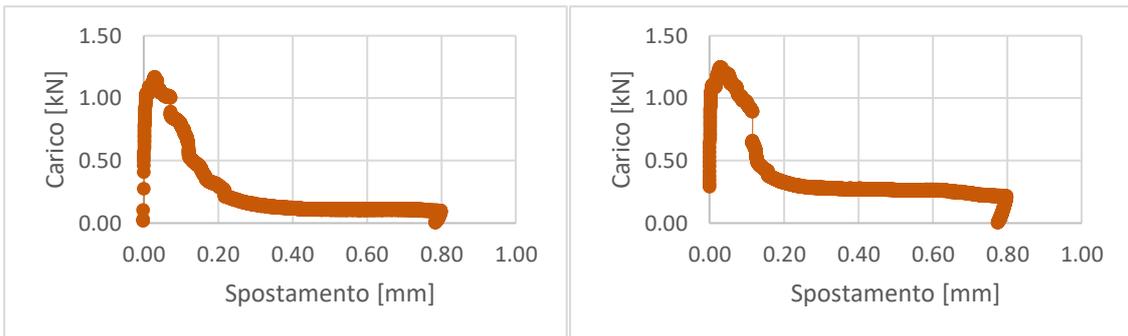


Grafico 13: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula cementizia, (a sinistra) CEM_12; (a destra) CEM_13.

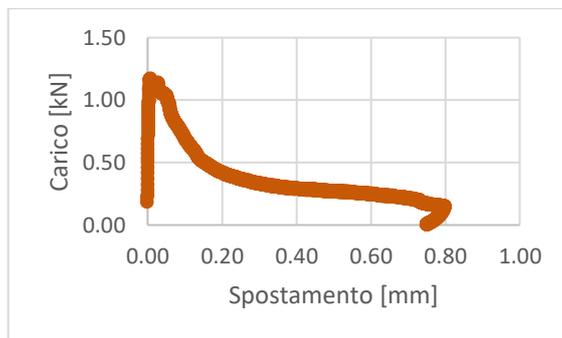


Grafico 14: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula cementizia, CEM_14.

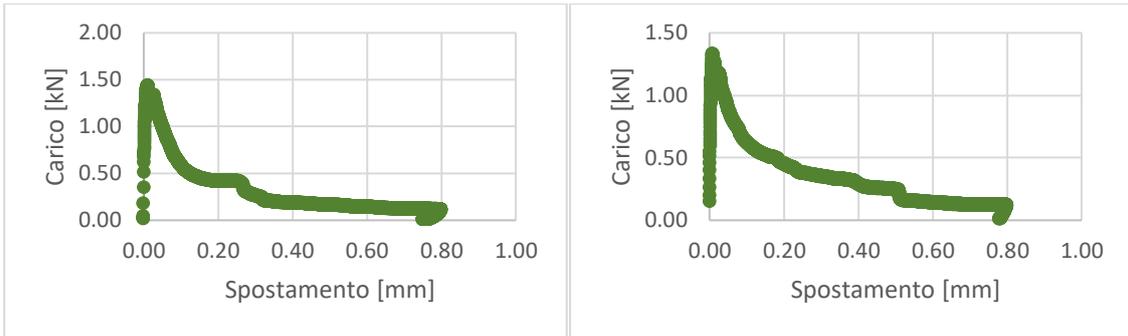


Grafico 15: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula in PET riciclato, (a sinistra) PET_1; (a destra) PET_3.

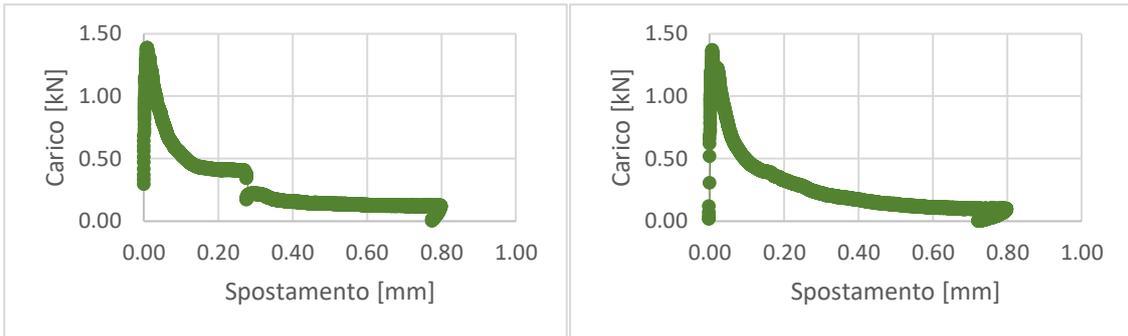


Grafico 16: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula in PET riciclato, (a sinistra) PET_4; (a destra) PET_5.

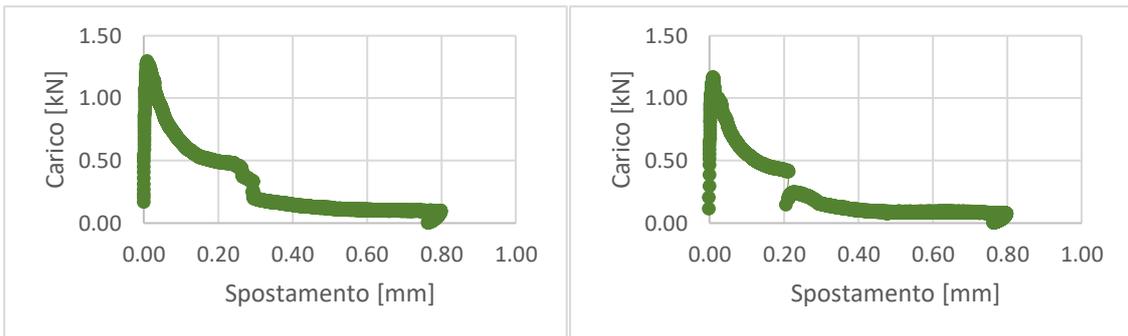


Grafico 17: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula in PET riciclato, (a sinistra) PET_6; (a destra) PET_7.

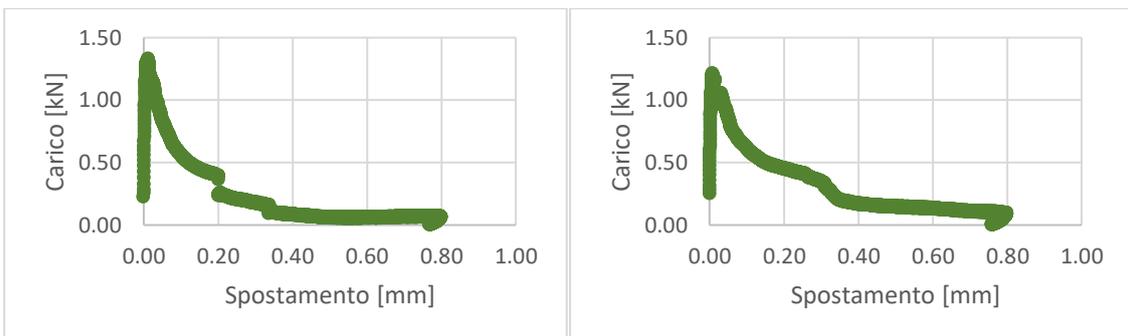


Grafico 18: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula in PET riciclato, (a sinistra) PET_8; (a destra) PET_9.

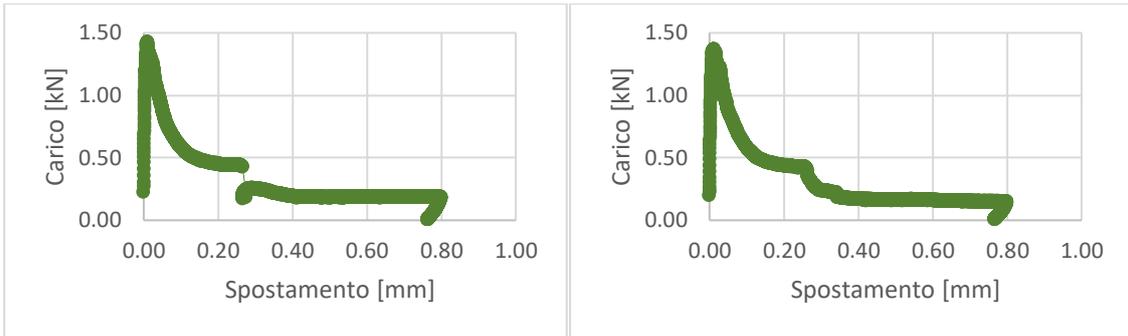


Grafico 19: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula in PET riciclato, (a sinistra) PET_10; (a destra) PET_11.

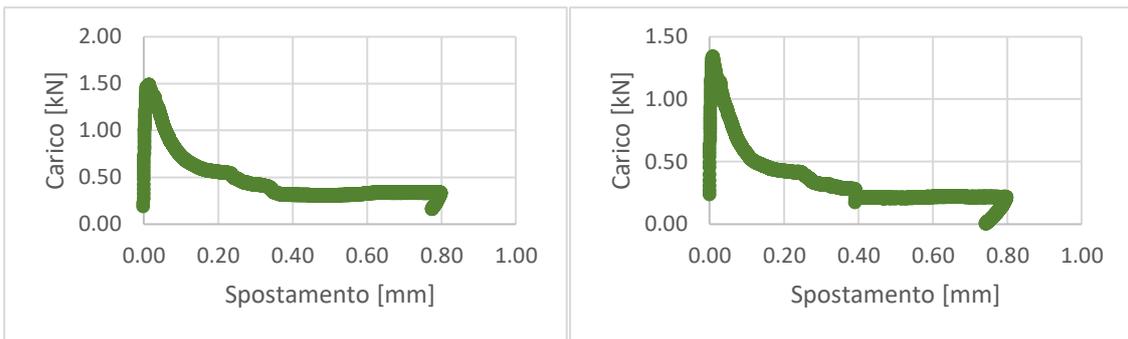


Grafico 20: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula in PET riciclato, (a sinistra) PET_12; (a destra) PET_13.

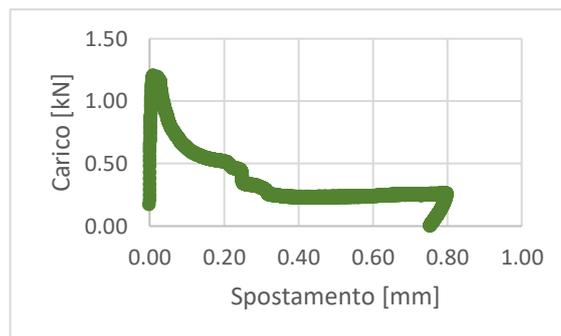


Grafico 21: Prova di prefessurazione del provino contenente una capsula in PET riciclato, PET_14.

3.7.7 FOTO

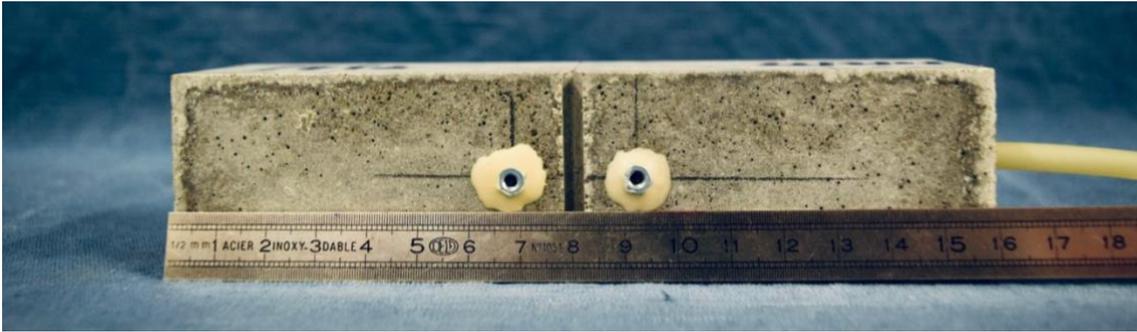


Figura 28: Risultato provino dopo il fissaggio dei dadi distanziati tra loro di 2,5 cm.

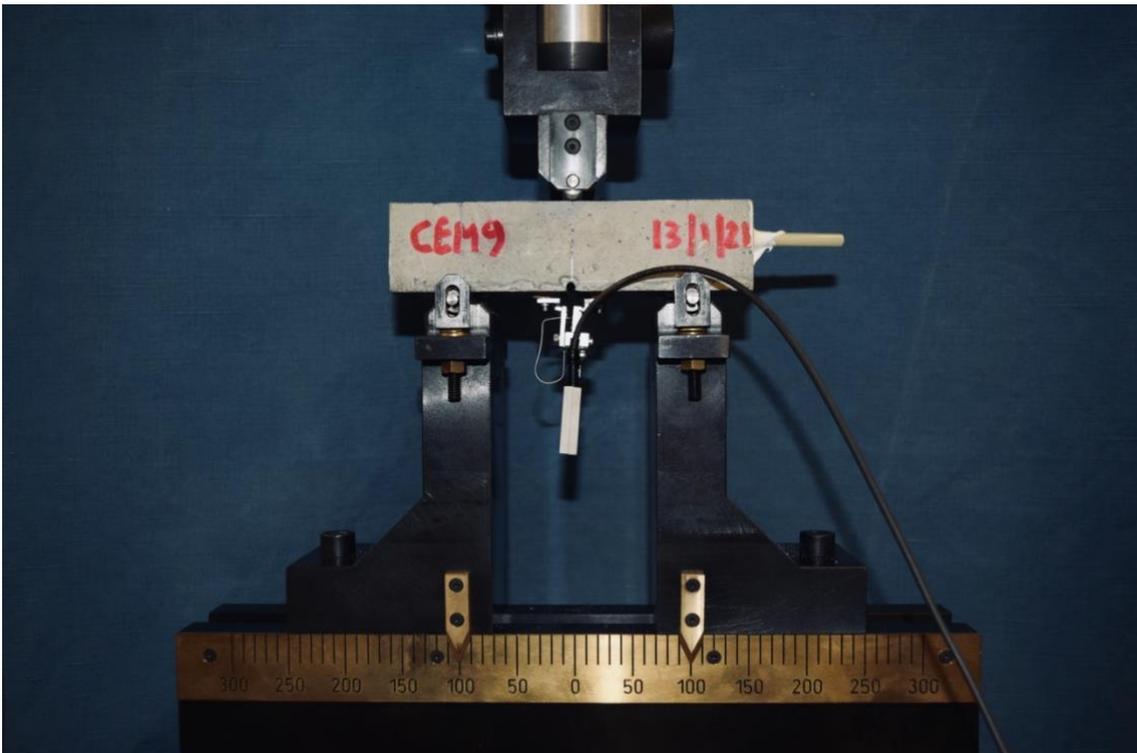


Figura 29: Provino posizionato sulla pressa servo-idraulica MTS 810



Figura 30: (a sinistra) provino sottoposto a carico flessionale su tre punti; (a destra) Fuoriuscita del poliuretano durante la prova di prefessurazione.

3.8 PROVA DI PERMEABILITÀ

3.8.1 INTRODUZIONE

A seguito della frattura indotta e della verifica che i reagenti abbiano avuto il giusto comportamento all'interno dei provini è possibile procedere con le prove di durabilità.

Questo tipo di test è volto a verificare il grado di permeabilità raggiunto dai provini a seguito della frattura e della successiva auto-riparazione. La dinamica consiste nel far scorrere dell'acqua nel provino attraverso il foro longitudinale, in base a quanta acqua fuoriesce dalla fessura nell'unità di tempo è possibile comprendere il livello di guarigione. Per questo il provino viene posto su un piano sotto al quale è disposto un contenitore con una bilancia collegata ad un software che misura la massa in grammi dell'acqua passante (Figura 32). Il provino durante il test è collegato tramite un tubicino di plastica, con rubinetto, ad un cilindro graduato contenente acqua (con livello costante a 50 cm).

Se l'autoriparazione si è svolta correttamente, il flusso d'acqua dovrebbe essere trascurabile rispetto a quello misurato nei provini fessurati senza capsule, adottati come riferimento.

3.8.2 MATERIALI UTILIZZATI

I materiali utilizzati in questa fase sono:

- Silicone bianco da bagni e cucine.

3.8.3 STRUMENTI

Tutte le preparazioni si sono svolte in laboratorio, gli strumenti utilizzati sono:

- Bilancia: utilizzata per misurare la quantità di acqua uscita dalla fessura dei provini;
- Serbatoio: contenitore plastico trasparente contenente acqua, posto più in alto rispetto al piano di appoggio del provino;

- Tubo plastico: è in plastica biancastra, uno uscente dal provino l'altro dal serbatoio;
- Sistema di aggancio: blocco metallico utilizzato per collegare il tubo del provino al tubo del serbatoio;
- Supporto provino: piccola struttura intelaiata che funge da sostegno per il provino;
- Piatto di raccolta acque: piatto in plastica posto tra il provino e la bilancia con lo scopo di raccogliere l'acqua uscita dal provino.

3.8.4 PROCEDURA

Prima di essere sottoposti al test, i campioni affrontano una fase preparatoria che consiste in:

- Sigillatura dei bordi di frattura: si sigillano con del silicone le facce laterali della superficie di frattura in modo che la direzione di uscita per l'acqua sia una sola, consentendo quindi un flusso dinamico unidirezionale (Figura 31);
- Immersione in acqua: i provini vengono immersi per almeno 24 h acqua affinché la matrice sia satura e non si verificano fenomeni di ritenuta d'acqua causati dall'assorbimento (Figura 32).

È stato inoltre necessario allestire l'apposito spazio per il serbatoio sopra il provino e posizionare il provino stesso su un piccolo telaio in acciaio (Figura 33). La struttura a supporto del provino dà la possibilità all'acqua in eccesso di colare attraverso la frattura, sotto il telaio è posizionato il contenitore di raccolta delle acque, appoggiato direttamente sulla bilancia collegata al computer. La bilancia è in grado di misurare gli incrementi di carico dovuti alla perdita di acqua dal provino, in funzione del tempo.

Completati i preparativi è sufficiente collegare il serbatoio al provino e collegare la bilancia al pc, avviare il flusso d'acqua tramite il controllo del rubinetto, inoltre

per evitare che la pressione diminuisca è sufficiente continuare a rabboccare il serbatoio fino a mantenere il livello costante nel tempo di prova.

Il tempo di prova è impostato a 7 minuti, comprensivo di una fase iniziale della durata di 1 minuto atto ad eliminare possibili bolle di aria che potrebbero ostacolare il flusso d'acqua. In fase di misurazione viene escluso il primo minuto, che potrebbe quindi contenere informazioni relative ad un flusso non costante, la durata della prova risulta quindi essere di 6 minuti effettivi (Figura 34).

Nella seguente tabella sono sintetizzati i dati raccolti durante la fase sperimentale dove troviamo i valori di water flow (WF) e il coefficiente di sealing effectiveness (SE) relativi al flusso di acqua attraversante il provino e all'efficacia della sigillatura del provino, rispettivamente.

$$WF = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad [g/min]$$

$$SE = \frac{WF_{ref} - WF_{caps}}{WF_{ref}} \quad [\%]$$

Dove:

- WF_{REF} : water flow medio dei provini di riferimento in malta normale senza capsule;
- WF_{CAPS} : water flow medio dei provini in malta cementizia auto-riparante;
- Δm : differenza tra la massa d'acqua al settimo minuto e la massa d'acqua al primo minuto (considerando che il primo minuto effettivo è stato scartato);
- Δt : differenza tra il tempo di fine prova ed inizio prova (considerando che il primo minuto effettivo è stato scartato).

Si riassumono in tabella tutti i dati di input e i risultati ottenuti dalle operazioni di calcolo effettuate.

Serie	N°	Tempo iniziale [s]	Massa iniziale [g]	tempo finale [s]	Massa finale [g]	ΔT [s]	ΔM [g]	WF [g/min]	SE [%]
PET	5	15:29:00	0	15:35:00	0	360	0	0,0	100%
PET	2	13:51:00	0,1	13:57:00	0,2	360	0,1	0,0	100%
PET	4	14:11:00	0,1	14:17:00	0,3	360	0,2	0,0	100%
PET	6	15:39:00	8,3	15:45:00	47,4	360	39,1	6,5	86%
PET	7	15:50:00	8,9	15:56:00	73,8	360	64,9	10,8	77%
PET	9	16:10:00	11,5	16:16:00	78,5	360	67	11,2	76%
PET	8	16:00:00	15,8	16:06:00	127,7	360	111,9	18,7	59%
PET	1	13:41:00	37,6	13:47:00	276,7	360	239,1	39,9	13%
PET	11	16:29:00	65,3	16:35:00	512,7	360	447,4	74,6	-62%
PET	12	16:41:00	91,3	16:47:00	727,1	360	635,8	106,0	-130%
PET	10	16:20:00	91,7	16:26:00	793,5	360	701,8	117,0	-154%
PET	13	14:45:00	108,4	14:51:00	819,1	360	710,7	118,5	-157%
PET	3	14:00:00	76,7	14:06:00	858,1	360	781,4	130,2	-183%
PET	14	17:08:00	61,2	17:14:00	875,3	360	814,1	135,7	-195%
CEM	1	17:18:56	0	17:24:56	0,1	360	0,1	0,02	100%
CEM	9	18:37:00	0	18:43:00	0,1	360	0,1	0,02	100%
CEM	11	18:56:00	0,1	19:02:00	0,2	360	0,1	0,02	100%
CEM	7	18:17:00	0,6	18:23:00	1,1	360	0,5	0,08	100%
CEM	4	17:51:01	6,4	17:57:01	69,9	360	63,5	10,58	77%
CEM	8	18:25:00	12,4	18:31:00	110,3	360	97,9	16,32	65%
CEM	5	18:00:00	28	18:06:00	145,2	360	117,2	19,53	58%
CEM	3	17:43:01	21,5	17:49:01	179,3	360	157,8	26,30	43%
CEM	6	18:09:00	27,8	18:15:00	218,5	360	190,7	31,78	31%
CEM	2	17:34:36	21,6	17:40:36	236,9	360	215,3	35,88	22%
CEM	12	19:04:00	32,2	19:10:00	282,9	360	250,7	41,78	9%
CEM	10	18:46:00	36,3	18:52:00	288,9	360	252,6	42,10	9%
CEM	13	19:12:00	68,8	19:18:00	837,5	360	768,7	128,12	-178%
CEM	14	19:20:00	26,6	19:26:00	875,3	360	848,7	141,45	-207%
REF	1	11:42:00	32,4	11:48:00	329,4	360	297	49,5	[-]
REF	2	13:29:00	436,2	13:35:00	3457,1	360	3020,9	503,5	[-]
REF	3	12:01:00	74,8	12:07:00	411,4	360	336,6	56,1	[-]
REF	4	12:17:30	33,3	12:23:31	306,5	361	273,2	45,4	[-]
REF	5	12:29:00	63,5	12:35:00	283,1	360	219,6	36,6	[-]
REF	6	12:54:00	1019,4	13:00:00	4346,2	360	3326,8	554,5	[-]
REF	7	13:06:00	39,1	13:12:00	245,7	360	206,6	34,4	[-]
REF	8	13:17:00	68,6	13:23:00	393,9	360	325,3	54,2	[-]

Tabella 3: Input e risultati ottenuti dalla prova di permeabilità.

3.8.5 RISULTATI

Durante il test sui provini di riferimento è stato possibile vedere come non avessero alcuna possibilità di trattenere o rallentare l'acqua. Era necessario rabboccare costantemente il serbatoio per mantenere costante la pressione dell'acqua.

Nei provini di riferimento realizzati senza alcun agente riparante sono stati raggiunti in media risultati di WF pari a 166,80 [g/min].

Dal lato completamente opposto troviamo i risultati dei provini con agente riparante CEM o PET: analizzando i migliori sedici risultati raggiunti possiamo trarre la conclusione che i provini CEM hanno raggiunto un WF equivalente a 10,9 [g/min] mentre i PET 9,1 [g/min] che tradotti in SE hanno riportato rispettivamente le seguenti percentuali PET 76% e i CEM 80%.

In alcuni casi i provini hanno raggiunto l'efficienza del 100% cioè non hanno riportato alcuna perdita di acqua lungo la fessura, risultando così perfettamente sigillati dall'agente riparante.

Questo risultato rientra nelle aspettative progettuali in quanto ci si aspettava un parziale risanamento della frattura con una tenuta all'acqua migliore rispetto ai provini senza agenti riparanti, ma difficilmente ci si aspettava un ripristino totale delle caratteristiche iniziali del campione.

Nei casi in cui si è ottenuto come valore SE una cifra inferiore al 60%, stava ad indicare che nella fase precedente di prefessurazione la capsula non si è rotta impedendo l'azione del materiale auto-riparante, oppure nella fase di riempimento delle capsule il poliuretano è entrato in contatto con l'umidità finendo per indurirsi all'interno della capsula.

La seguente tabella illustra la corrispondenza tra la fuoriuscita del poliuretano (PU), risultato dell'osservazione visiva circa la fuoriuscita di poliuretano in fase di prefessurazione e il sealing effectiveness (SE).

Serie CEM	CEM1	CEM2	CEM3	CEM4	CEM5	CEM6	CEM7	CEM8	CEM9	CEM10	CEM11	CEM12	CEM13	CEM14
ΔM	0,1	215,3	157,8	63,5	117,2	190,7	0,5	97,9	0,1	252,6	0,1	250,7	768,7	848,7
PU	si+	si	si	si	si	si	si+	si	si	si	si	si	no	no

Serie CEM	PET1	PET2	PET3	PET4	PET5	PET6	PET7	PET8	PET9	PET10	PET11	PET12	PET13	PET14
ΔM [g]	239,1	0,1	781,4	0,2	0	39,1	64,9	111,9	67	701,8	447,4	635,8	710,7	814,1
PU	si	si	no	si-	si	si	si+	si	si	si (post)	no	no	no	no

Tabella 4: corrispondenza tra la fuor uscita del PU ed il SE;

Dove: si = fuoriuscita dalla faccia inferiore della superficie di frattura, Si+ = fuoriuscita dalle facce inferiore e dalle facce laterali, No = apparente assenza di fuoriuscita in fase di prefessurazione).

È opportuno segnalare che durante l'esecuzione della prova sui provini REF_2 e REF_6, l'acqua è fuoriuscita anche dalla faccia superiore, sintomo che erano completamente fessurati.

3.8.6 FOTO



Figura 31: Risultato provino dopo la sigillatura dei bordi di frattura.



Figura 32: (a sinistra) provini immersi nell'acqua; (a destra) sistema utilizzato per svolgere la prova di permeabilità.



Figura 33: Provino posizionato sul telaio in acciaio.



Figura 34: Flusso d'acqua che attraversa il provino.

3.9 PROVE MECCANICHE STATICHE

3.9.1 INTRODUZIONE

La prova di ricarico consiste nel fatto che una volta raggiunto lo stato di prefessurazione desiderato (con apertura di fessura pari a 800 μm sotto carico e apertura di fessura residua allo scarico di poco inferiore), ovvero una condizione di deformazione irreversibile, il provino viene sottoposto ad una ulteriore fase di ricarico tale da sollecitare nuovamente la fessura precedentemente creata e valutare la nuova capacità portante.

Lo scopo della prova consente di verificare se le due differenti tipologie di capsule contenute all'interno dei provini di malta cementizia, a seguito di una fase di prefessurazione in cui la capsula è stata rotta e il poliuretano ha reagito chimicamente espandendosi e indurendosi, abbiano generato un recupero meccanico simile.

La prova è stata effettuata solo sui provini contenenti le capsule, dei quali ne sono stati selezionati tre per tipologia (3 PET e 3 CEM) sulla base di un'ispezione visiva. I restanti sono stati conservati in modo da avere sempre un altro campione comparabile da testare successivamente in condizioni dinamiche.

I provini di riferimento REF sono stati esclusi in quanto l'elevata apertura di fessura raggiunta in fase di prefessurazione li aveva danneggiati estesamente, rendendoli difficili da maneggiare e certamente non in grado di manifestare un recupero autogeno sufficiente a sostenere una nuova fase di carico.

3.9.2 STRUMENTI

Tutte le preparazioni si sono svolte in laboratorio, gli strumenti utilizzati sono:

- Pressa servo-idraulica MTS 810, ha portata massima di 250 kN;
- Estensometro "DD1, range $\pm 2,5$ mm", della HBM;

- Personal computer con software appositi.

3.9.3 PROCEDURA

La prova viene condotta in maniera analoga alla prova di flessione su tre punti impiegata per la fase di prefessurazione.

Lo scopo della prova di flessione su tre punti in controllo di apertura di fessura è di verificare il recupero meccanico dei provini in malta cementizia auto-riparante danneggiati. L'effetto dell'agente riparante si può, infatti, osservare solamente in fase di ricarico: se la curva di carico ha un valore di picco uguale a quello precedente, significa che è riuscito a ricostruire le stesse caratteristiche meccaniche iniziali.

Attraverso un indice di recupero del carico (LRI) si può valutare il recupero meccanico, espresso in funzione della massima capacità portante dei provini durante la prefessurazione (L_{peak}) e il ricaricamento (L_{reload}) e in funzione della capacità portante residua a fine della prefessurazione (L_{unload}). Definito come:

$$LRI = \frac{L_{reload} - L_{unload}}{L_{peak} - L_{unload}} \quad [\%]$$

Dove:

- L_{peak} : carico di picco del provino sottoposto a prova di prefessurazione;
- L_{reload} : carico di picco del provino in fase di ricarico;
- L_{unload} : carico residuo del provino sottoposto a prova di prefessurazione.

3.9.4 RISULTATI

I provini di riferimento senza capsule potevano raggiungere al massimo la capacità di carico residua dopo la prefessurazione, in alcuni casi addirittura rischiavano di rompersi nelle nostre mani durante gli spostamenti. Al contrario, i

campioni riparati autonomamente hanno mostrato in alcuni casi un carico massimo più elevato rispetto alla capacità portante residua prima della riparazione.

Il particolare, sui provini PET_8 e CEM_7 sono stati rispettivamente raggiunti rispettivamente valori di picco in fase di ricarico pari a 913,52 N e 1072,87 N nel raggiungimento di una apertura di fessura uguale a 800 μm . Mediante l'indice di LRI si ottengono le percentuali in termine di recupero meccanico, rispettivamente i provini hanno raggiunto il 67% e 103%.

Di seguito sono riportati i diagrammi relativi alle fasi di carico e di ricarico dei provini PET_8 e CEM_7.

Analizzando il grafico del provino PET_8 (Grafico 22) si può notare che c'è stato un parziale recupero meccanico, in ogni caso i risultati sopra il 60% sono da considerarsi assolutamente positivi.

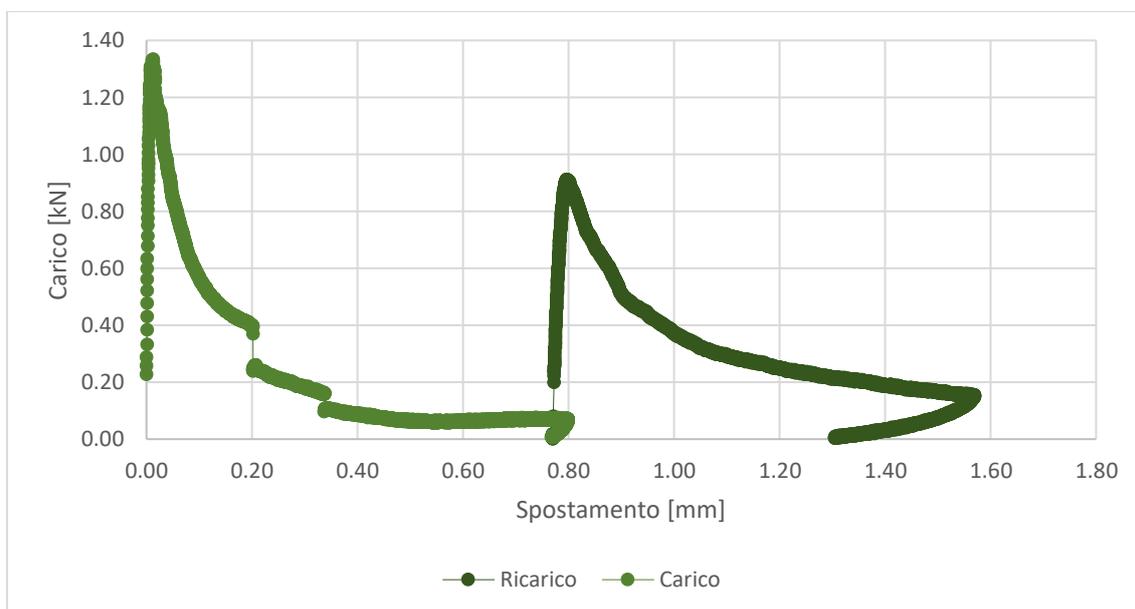


Grafico 22: Prova di ricarico sul provino contenente capsule in PET, PET_8.

Appare evidente che nel seguente caso, evidenziato dal Grafico 23, il recupero meccanico è stato completo, dal momento che il carico di picco è addirittura maggiore di quando il provino era integro.

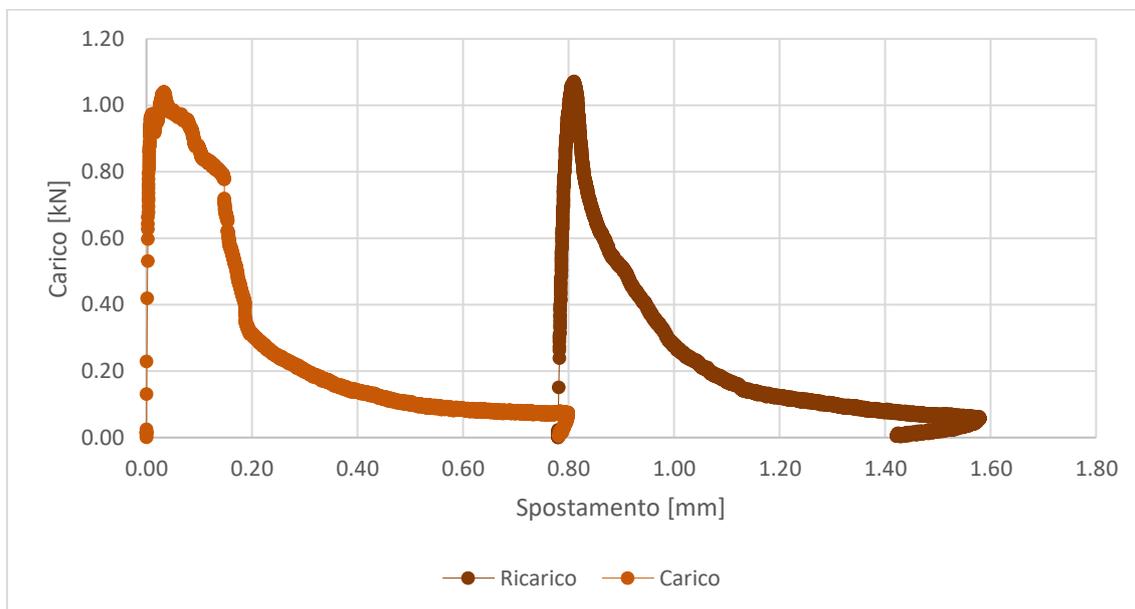


Grafico 23: Prova di ricarico sul provino contenente capsule in CEM, CEM_7.

I sistemi incapsulati analizzati presentano una percentuale di recupero meccanico superiore all'50%. Solo in due casi l'indice LRI si attesta al 46%, ma l'esito finale è decisamente positivo con LRI medio di circa il 68% per la serie CEM e di circa il 55% per la serie PET.

Quindi la procedura di fabbricazione delle capsule non sembra influenzare il risultato complessivo in termini di recupero meccanico.

Si riassumono in tabella tutti i dati di input e i risultati ottenuti dalle operazioni di calcolo effettuate.

Series	L_{peak} (N)	L_{unload} (N)	L_{reload} (N)	LRI (-)
CEM_2	1254,28	89,80	731,96	55%
CEM_7	1046,03	64,50	1072,87	103%
CEM_12	1173,33	97,60	595,73	46%
PET_1	1439,16	112,40	794,22	51%
PET_2	1221,91	92,30	617,23	46%
PET_8	1339,63	65,80	913,52	67%

Tabella 5: Input e risultati ottenuti dalla prova di ricarico statico.

Si possono esprimere anche delle considerazioni positive nei confronti del poliuretano contenuto nelle capsule, in quanto, espandendosi, ha quasi completamente ricoperto le superfici interne della fessura dei provini.

3.9.5 GRAFICI

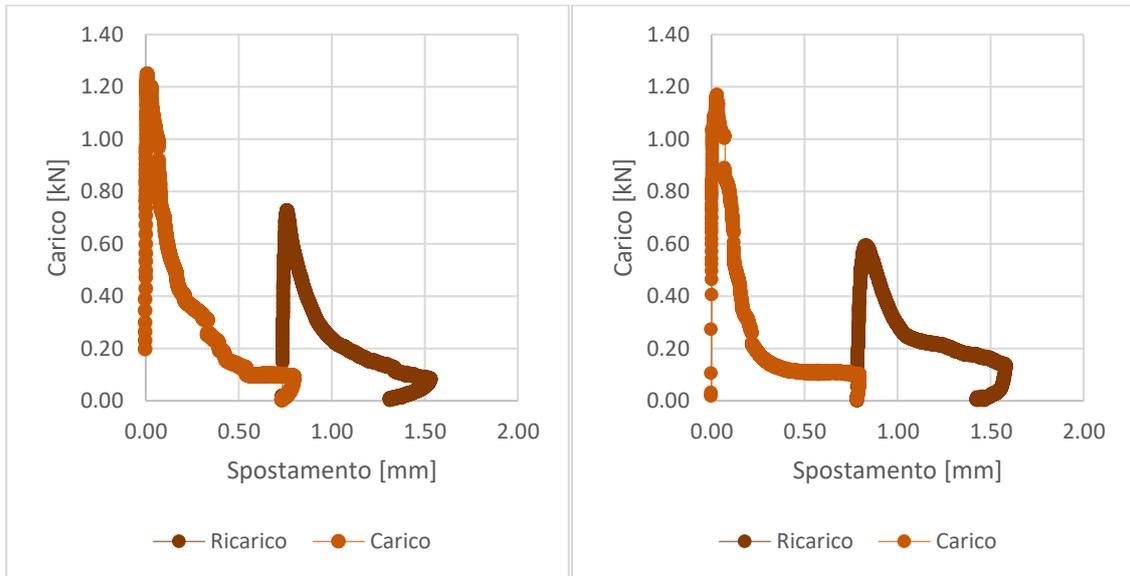


Gráfico 24: Prova di ricarico statico del provino contenente una capsula cementizia, (a sinistra) CEM_2; (a destra) CEM_12.

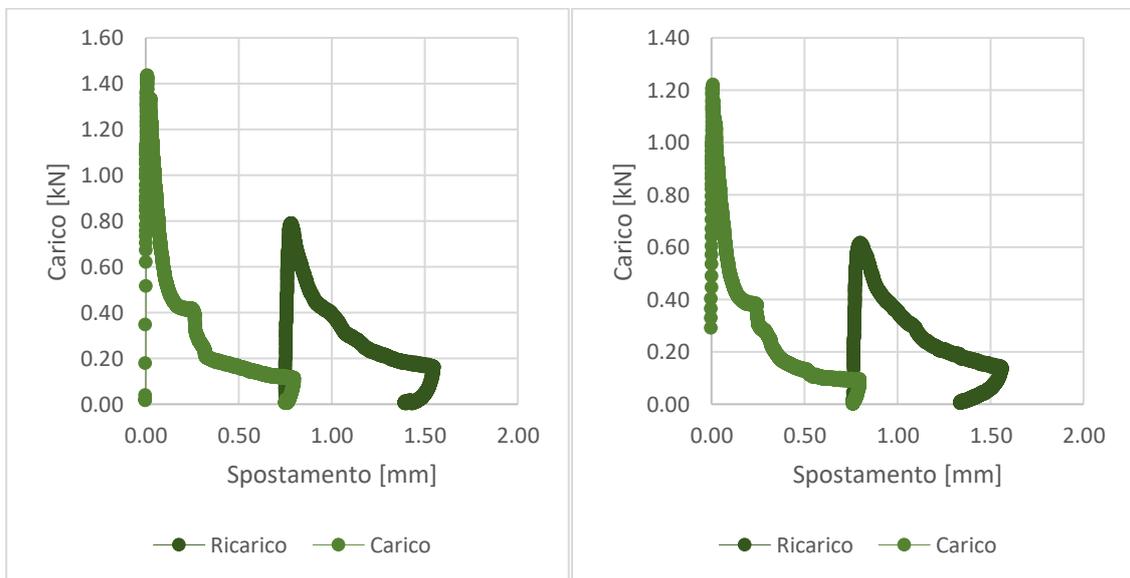


Gráfico 25: Prova di ricarico statico del provino contenente una capsula in PET, (a sinistra) PET_1; (a destra) PET_2.

3.10 PROVE MECCANICHE DINAMICHE

3.10.1 INTRODUZIONE

Le principali fonti di stress sulle infrastrutture possono essere ascritte ad azioni dinamiche, ripetute quasi ciclicamente su brevi periodi di tempo o che si verificano con intensità crescente su periodi di tempo più lunghi. Inoltre, i carichi ciclici possono causare ulteriori effetti dannosi sui materiali cementizi autorigeneranti. Nello specifico, le azioni cicliche portano alla continua apertura e chiusura di fessure riparate o parzialmente riparate. Nel caso di fessure riparate, i materiali compositi formati dalla matrice cementizia e dall'agente riparatore sono soggetti a deformazioni che potrebbero causare danni alla matrice o al materiale di riparazione, portando il distacco tra questi due diversi materiali.

Per questa ragione in questa tesi si è deciso di dare grande importanza allo studio del comportamento dei materiali cementizi autorigeneranti rispetto al carico dinamico e alla fatica. Si tratta di una questione di fondamentale importanza per comprendere e caratterizzare il comportamento di questi materiali nelle reali condizioni di campo, e di conseguenza consentirne l'utilizzo garantendo la sicurezza strutturale.

Lo scopo di questa prova è di valutare, tramite la flessione su tre punti controllata dalla forza condotta utilizzando un carico sinusoidale, il comportamento meccanico fino alla rottura del sistema pre-fessurato e successivamente riparato. Ciò ha consentito di ottenere informazioni utili sulle prestazioni a fatica raramente studiate sui sistemi cementizi auto-riparanti, aspetto di fondamentale importanza per sviluppare un sistema di riparazione preventiva affidabile che possa essere utilizzato in condizioni reali.

Dopo il ricaricamento statico di sei dei provini pre-fessurati, è stato valutato il comportamento meccanico sotto carico dinamico con numero di cicli

progressivamente più alto, dei rimanenti 13 provini, di cui 5 contenenti capsule PET e 8 contenenti capsule cementizie, per poter decidere quale carico applicare si è fatta una media sui carichi di picco in fase di ricarica dei 6 provini (L_{reload}).

3.10.2 MATERIALI UTILIZZATI

I materiali utilizzati per la preparazione dei provini in malta cementizia sono i seguenti:

- Colla epossidica bicomponente, utilizzata per il fissaggio del sistema di ancoraggio del trasduttore di spostamento;
- Dadi, viti, lamelle, necessari alla creazione del sistema di ancoraggio del trasduttore di spostamento al provino.

3.10.3 STRUMENTI

- Pressa servo-idraulica MTS 810: programmabile via software, necessaria per prove di carico e prove di fatica, configurabile per soddisfare le diverse esigenze di collaudo di materiali o componenti;
- Trasduttore di spostamento induttivo “WI, range 0–5 mm”, della HBM;
- Personal computer con software dedicati.

3.10.4 PROCEDURA

La prova si svolge misurando l'evoluzione del danno durante il carico ciclico in termini di incremento di apertura della fessura, tramite un trasduttore di spostamento induttivo, che sua volta collegato al personal computer tramite un amplificatore di misura, ci ha permesso di monitorarne il comportamento. È quindi necessario preparare preliminarmente i provini fissando sul lato frontale i sistemi di supporto.

La procedura è articolata nei seguenti step:

- Si prepara il provino di malta fissando sulla superficie laterale il sistema di ancoraggio per il trasduttore mediante la colla bicomponente epossidica e l'utilizzo di dadi che saranno tra loro distanti 4 cm (Figura 35);
- Si ancora il trasduttore di movimento al provino e lo si collega a sua volta al pc in modo che siano visualizzabili i dati ricercati, in seguito il provino viene spostato sui supporti della macchina di carico;
- Si effettua un pre-avvicinamento del pistone al provino controllandolo manualmente, senza però portarlo a contatto con la superficie;
- Si inizia la fase di carico portando il pistone a contatto con la superficie del provino e da qui in poi si inizieranno a rilevare gli spostamenti;
- Si procede la fase di carico portando prima i provini fino a un valore di carico massimo L_{max} con una velocità di carico di 10 N/s. Al raggiungimento di L_{max} , è stato applicato un carico sinusoidale con una frequenza di 3 Hz, dove i picchi sono stati impostati a L_{max} e le valli a un valore di carico inferiore L_{min} ;
- Una volta giunti al numero di cicli ricercato si procede scaricando il pistone invertendo la sua direzione;
- Acquisizione dati, su un file sono salvati tutti i dati relativi al tempo di avanzamento della prova, forza, spostamento e estensometro riferiti a ciascun provino.

Inoltre, alla fine di ogni ciclo, è stata effettuata una prova di durabilità, con lo scopo di controllare se il grado di tenuta all'acqua dei provini si è mantenuto o è stato influenzato negativamente dallo stress meccanico ciclico a cui sono stati sottoposti.

I limiti L_{min} e L_{max} della ricarica ciclica sono stati definiti come frazione della capacità portante media L_{reload} ottenuta durante la ricarica statica per ciascuna serie. Nello specifico, L_{min} e L_{max} sono stati impostati secondo l'equazione:

$$L_{min} = 0,1 \cdot L_{reload} \quad [N]$$

$$L_{max} = S \cdot L_{reload} \quad [N]$$

Dove:

L_{min} : carico minimo applicato

L_{max} : Carico massimo applicato

S: percentuale del carico di picco del provino in fase di ricarica

L_{reload} : carico di picco del provino in fase di ricarica

Il valore di S è impostato a 0,75, Tali regolazioni sono state adottate al fine di imporre una sollecitazione elevata, pari o superiore al 75% della resistenza prevista dai 6 provini messi sotto ricarica.

I valori di L_{min} e L_{max} ritenuti utili per lo svolgimento della prova sono pari a 80 N e 600 N, rispettivamente corrispondono al 10% e al 75% della capacità portante stimata per i provini auto-riparati.

Testare ciclicamente i provini con un valore di picco ciclico vicino a L_{reload} ha lo scopo di verificarne le prestazioni in condizioni severe, in modo tale da fornire un primo feedback su come questo tipo di materiali auto-riparanti potrebbe comportarsi in una possibile applicazione.

3.10.5 Risultato

L'azione riparatrice autonoma fornita dal poliuretano nelle due serie di provini ha consentito nella maggior parte dei casi di eseguire il ricarica ciclico. Tuttavia, alcuni di questi provini hanno fallito nella parte iniziale della procedura, prima di raggiungere la fine del primo ciclo di carico prescritto (Figura 36). In questi casi la nuova capacità portante a seguito dell'autoriparazione è stata evidentemente sovrastimata.

Mettendo in relazione l'apertura della fessura con il numero di cicli tramite un grafico a linea è evidente una curva a tre stadi riportata nel diagramma sottostante, dove per il provino PET_4 riporta l'evoluzione dell'apertura della fessura al picco per ogni ciclo (cioè al carico massimo L_{max})



Grafico 26: Prova meccanica dinamica di un provino contenente una capsula PET, PET_4.

Mettendo in luce il comportamento del provino sottoposto a carico ciclico, la curva presa in esame è caratterizzata da tre fasi distinte:

- Fase 1: si è verificato un primo sviluppo indicato come creazione del difetto (microfessurazione) seguito da un aumento quasi istantaneo dell'apertura della fessura al momento del carico.
- Fase 2: è uno stadio di sviluppo stabile che comporta una crescita lenta e progressiva del danno.
- Fase 3: il danno si sviluppa in modo instabile fino a quando non si verifica il cedimento per fatica, con un completo distacco delle facce della fessura.

Inoltre, il seguente grafico mostra le curve che rappresentano la relazione tra i risultati ottenuti dalle prove di permeabilità con l'aumento del numero di cicli fino a 18500.

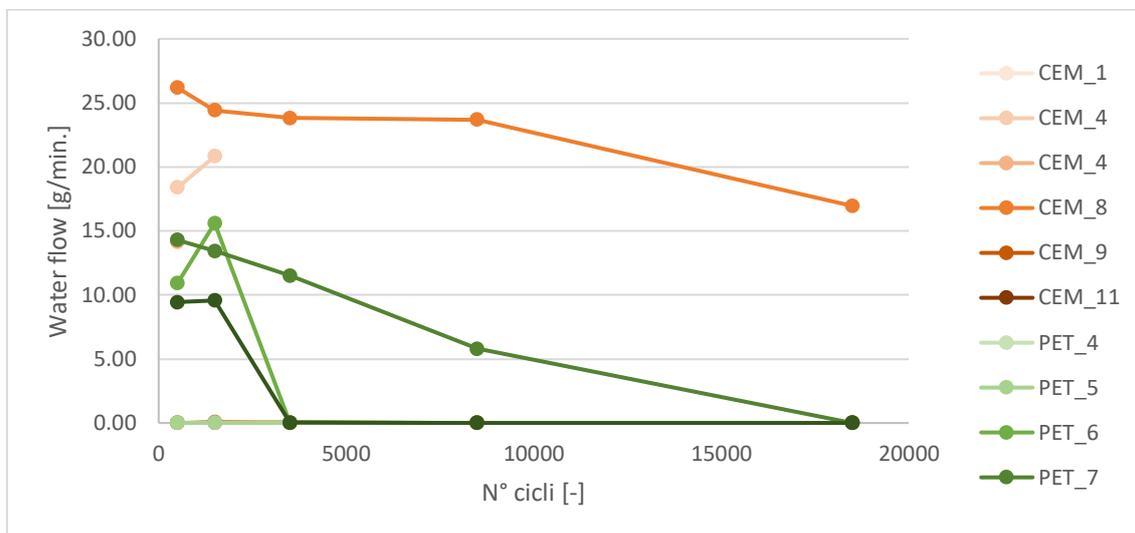


Grafico 27: risultato dalla corrispondenza tra numero il numero cicli sostenuti ed il flusso d'acqua che li attraversa dopo ogni serie.

In alcuni casi si può notare come il flusso d'acqua diminuisce con il progressivo aumento del numero di cicli a carico costante. È un risultato inatteso dovuto al fatto che ci si aspettava che la sollecitazione meccanica ciclica potesse ridurre l'aderenza del poliuretano alle pareti della fessura, o creare dei nuovi percorsi di frattura continui all'interno della schiuma poliuretana indurita, e in definitiva che la tenuta all'acqua fosse ridotta per effetto dei cicli (Figura 37).

In particolare, i provini contenenti capsule in PET che sono arrivati a raggiungere tutti un water flow pari 0,00 g/min. Lo stesso non si può dire per i provini contenenti capsule CEM poiché la maggior parte avevano già raggiunto un ES pari al 100% e solo in un caso si è potuto osservare il miglioramento.

Probabilmente l'azione dinamica ha contribuito a far penetrare all'interno del provino ulteriore aria umida e dunque a far reagire parte del poliuretano ancora liquido contenuto nella capsula.

Infine, questo grafico a colonne riassume il numero di cicli complessivi sostenuti da ciascun provino.

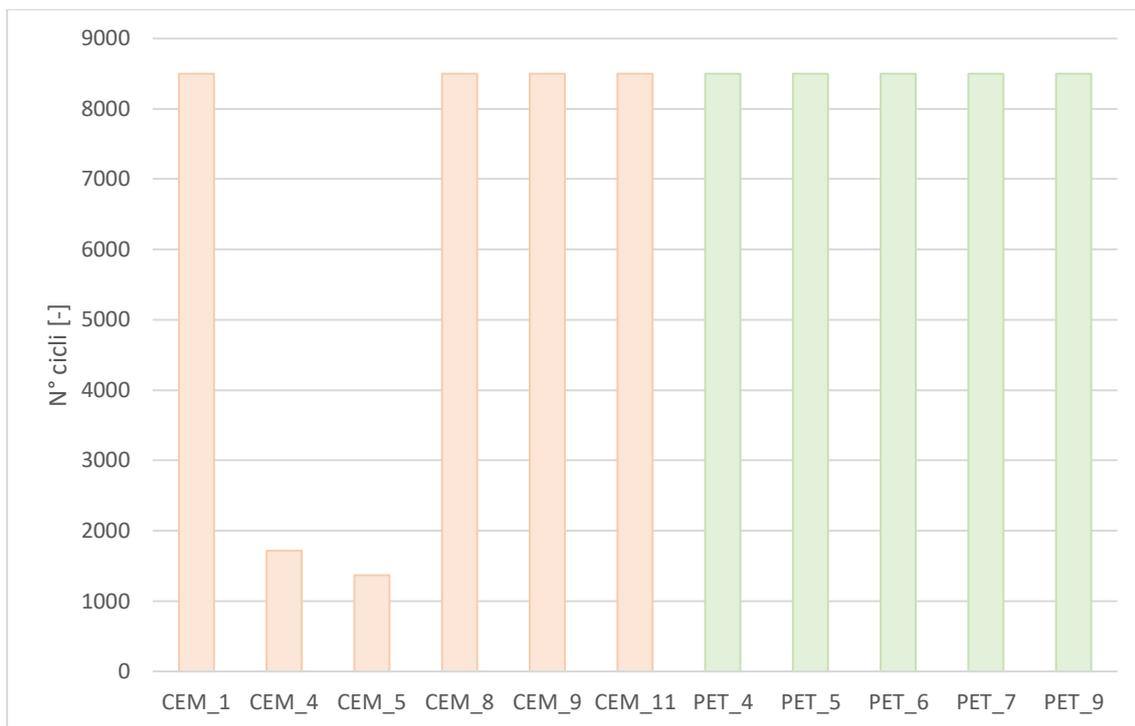


Grafico 28: Riassunto del numero di cicli complessivi sostenuti da ciascun provino.

Dai risultati ottenuti possiamo trarre che i campioni auto-riparanti sono stati in grado di sostenere un numero soddisfacente di cicli prima del cedimento.

Questo risultato sottolinea fortemente il contributo del sistema di autoriparazione autonomo nel ripristino delle proprietà meccaniche dei materiali cementizi danneggiati, soprattutto in condizioni di grave danneggiamento ed anche quando sono coinvolti carichi ciclici, aumentando in maniera significativa la vita utile.

3.10.6 FOTO



Figura 35: Trasduttore di spostamento posizionato sul provino.

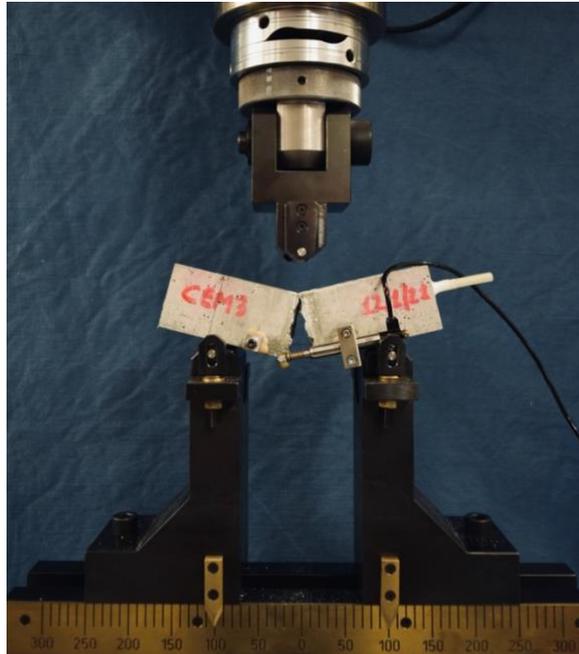


Figura 36: Provino fratturato durante il test.



Figura 37: Fuoriuscita e la seguente reazione della resina poliuretanicca dopo la frattura del provino.

4 CONCLUSIONE

4.1 ANALISI RISULTATI E POSSIBILI FUTURI SVILUPPI

La sperimentazione condotta in questa tesi è volta a valutare l'efficacia di due differenti sistemi di auto-riparazione sui materiali cementizi, con lo scopo di comprenderne differenze, affinità e vantaggi di utilizzo. Nei test condotti in laboratorio, sono stati prodotti una serie di provini cementizi autorigeneranti incorporando alla matrice cementizia macro-capsule tubolari sia di tipo cementizio che in PET, in entrambi i casi le capsule sono state riempite con un agente riparante poliuretano.

Il mio lavoro effettivo ha avuto inizio con la fase di riempimento e sigillatura delle capsule. Le capsule utilizzate sono state prodotte precedentemente attraverso due differenti procedure: le prime per laminazione di una pasta cementizia modificata con polimero, le seconde tramite modellazione a deposizione fusa (FDM) utilizzando un filamento in PET ricavato dal riciclo di bottiglie di plastica. Nonostante la differente fabbricazione le capsule avevano simile configurazione, dimensione e distribuzione del rivestimento impermeabilizzante esterno.

Il loro effetto auto-riparante è stato valutato in termini di: recupero meccanico sotto carico statico e dinamico aumentando progressivamente il numero di cicli ed in termini di durabilità attraverso test di permeabilità all'acqua.

I risultati sono stati influenzati in modo significativo dalla procedura di fabbricazione delle capsule utilizzate, infatti si ritiene che le loro diverse matrici possano aver influenzato i tempi in cui è avvenuto il rilascio dell'agente riparante poliuretano a seguito della prefessurazione dei provini.

Infatti, mediamente la fuoriuscita del poliuretano si è innescata con aperture dell'estensimetro intorno 0,4 mm per le capsule in PET, rispetto ad un 0,2 mm per le capsule CEM.

Anche se entrambi i tipi di capsule, in termini di prestazioni meccaniche, non hanno avuto un impatto negativo sulla capacità portante che i provini potevano sopportare rispetto ai REF, le capsule in PET hanno conferito maggior plasticità ai provini rispetto alle CEM.

In tutti i casi il recupero meccanico è stato molto soddisfacente rispetto al comportamento dei provini di riferimento, sia sotto carico statico che ciclico. Si è osservato un indice massimo di recupero dei provini in condizioni statiche superiore al 40% e un numero di cicli superiore a 18.500, confermando le potenzialità del sistema di autoguarigione a capsula proposto ai fini del miglioramento delle prestazioni meccaniche della struttura.

Inoltre, combinare la prova di permeabilità che valuta il flusso d'acqua (WF) che attraversa il campione durante un certo periodo con le due prove meccaniche statiche (prefessurazione) e dinamiche, ci ha permesso di valutare l'effetto riparante sui provini. La combinazione **prefessurazione/permeabilità** ha dato risultati positivi in termini di **efficienza**, invece la combinazione **dinamica/permeabilità** in termini di **durabilità** della riparazione.

La prima prova combinata volta a confrontare il flusso d'acqua (WF) di tutti i campioni PET e CEM con i campioni REF dopo la prefessurazione, ha evidenziato un grado di permeabilità inferiore rispetto ai provini REF. Questo risultato era atteso poiché esiste un fattore in più che contribuisce alla variabilità, vale a dire la diffusione dell'agente riparante poliuretano.

Tuttavia, le due tipologie di capsula PET e CEM hanno registrato mediamente due flussi d'acqua diversi, rispettivamente 54,9 g/min e 35,28g/min, questo risultato è dato dal fatto che in alcuni provini contenenti capsule in PET l'agente riparante non è fuoriuscito correttamente nel momento della prefessurazione a 800 µm.

La seconda prova combinata è stata finalizzata ad analizzare il flusso d'acqua dei 13 provini (5 PET e 8 CEM) dopo ogni serie di cicli. Fuori da ogni aspettativa le prove cicliche hanno avuto un effetto positivo sulle capsule, infatti i provini man mano che subivano un aumento del numero di cicli presentavano una riduzione della quantità di acqua dalla quale venivano attraversati. Tuttavia, solo i provini contenenti capsule PET hanno raggiunto a seguito dei cicli un flusso d'acqua pari a zero (ES = 100%), questo risultato è dovuto al fatto che sottoporre i provini ad ulteriore stress abbia portato ad una successiva fuoriuscita del poliuretano. Quindi le capsule PET che inizialmente non avevano dato i risultati sperati sono riuscite a recuperare in percentuale di permeabilità, lo stesso non si può dire delle capsule CEM poiché la maggior parte avevano già raggiunto un SE pari al 100% e solo in un caso si è potuto osservare il miglioramento per cui non è un dato rilevante.

A seguito della sperimentazione è necessario e doveroso fare delle considerazioni riguardo le condizioni di produzione e i test effettuati sui provini:

- la dimensione delle capsule: queste hanno funzionato in relazione a provini con dimensioni poco maggiori rispetto a quelle delle capsule, un importante step nella futura sperimentazione di tale tecnologia potrebbe essere l'applicazione delle stesse capsule su strutture in scala reale;
- la mancata fuoriuscita del poliuretano: durante la prefessurazione in alcuni provini il liquido non è uscito dalla capsula condizione necessaria per innescare il meccanismo di auto-riparazione a causa dall'indurimento dello stesso, per questa ragione si potrebbe pensare di utilizzare 2 capsule affiancate per avere maggiore possibilità di riuscita.

Si può concludere affermando che le capsule in PET riciclato oltre a favorire l'economia circolare atta a ridurre gli sprechi, hanno anche un grande potenziale nei sistemi cementizi auto-riparanti. Confrontando i due sistemi, infatti, le

capsule in PET hanno presentato comportamenti simili a quelle di tipo cementizio sviluppate da più tempo, tuttavia il metodo di produzione delle capsule in PET, la stampa 3D, potrebbe assumere un ruolo importante verso l'industrializzazione delle capsule permettendo una produzione più rapida e su vasta scala.

5 RIFERIMENTI

5.1 BIBLIOGRAFIA

5.1.1 ARTICOLI

Tim Van Mullem , Giovanni Anglani , Marta Dudek , Hanne Vanoutrive , Girts Bumanis , Chrysoula Litina , Arkadiusz Kwiecień , Abir Al-Tabbaa , Diana Bajare , Teresa Stryszewska , Robby Caspeeel , Kim Van Tittelboom , Tulliani Jean-Marc , Elke Gruyaert , Paola Antonaci, Nele De Belie *Addressing the need for standardization of test methods for self-healing concrete: an interlaboratory study on concrete with macrocapsules* in “Science and Technology of Advanced Materials” 2020, VOL. 21, NO. 1, 661–682

Pubblicazione online: 22 settembre 2020.

Giovanni Anglani, Jean-Marc Tulliani, Paola Antonaci, *Behaviour of Pre-Cracked Self-Healing Cementitious Materials under Static and Cyclic Loading* in “Materials” 2020, 13, 1149

Pubblicazione: 5 marzo 2020.

Giovanni Anglani, Paola Antonaci, Jean-Marc Tulliani, *3D printed capsules for self-healing concrete applications* in “ResearchGate” Conference Paper 2019

Pubblicazione: giugno 2019.

Liberato Ferrara, Tim Van Mullem , Maria Cruz Alonso, Paola Antonaci , Ruben Paul Borg, Estefania Cuenca, Anthony Jefferson, Pui-Lam Ng, Alva Peled , Marta Roig-Flores, Mercedes Sanchez , Christof Schroefl , Pedro Serna , Didier Snoeck , Jean Marc Tulliani , Nele De Belie, *Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2* in “Construction and Building Materials” 167 (2018) 115–142

Pubblicazione online: 9 febbraio 2018.

Alessandra Formia, Sara Irico, Federica Bertola, Fulvio Canonico, Paola Antonaci, Nicola Maria Pugno, Jean-Marc Tulliani, *Experimental analysis of self-healing cement-based materials incorporating extruded cementitious hollow tubes* in “Journal of Intelligent Material Systems and Structures” 2016, Vol. 27(19) 2633–2652

Pubblicazione: 7 novembre 2016.

Alessandra Formia, Salvatore Terranova, Paola Antonaci, Nicola Maria Pugno, Jean Marc Tulliani, *Setup of Extruded Cementitious Hollow Tubes as Containing/Releasing Devices in Self-Healing Systems* in “Materials” 2015, 8, 1897-1923

Pubblicazione: 21 aprile 2015.

Nele De Belie, Elke Gruyaert, Abir Al-Tabbaa, Paola Antonaci, Cornelia Baera, Diana Bajare, Aveline Darquennes, Robert Davies, Liberato Ferrara, Tony Jefferson, Chrysoula Litina, Bojan Miljevic, Anna Otlewska, Jonjaua Ranogajec, Marta Roig-Flores, Kevin

Paine, Pawel Lukowski, Pedro Serna, Jean-Marc Tulliani, Snezana Vucetic, Jianyun Wang, and Henk M. Jonkers, *A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures* in "Advanced materials interfaces" 2018, 5
Pubblicazione online: 16 maggio 2018.

5.1.2 LIBRI

Bartolini Salimbeni L., *Lineamenti di Storia dell'Architettura: per i corsi di Storia dell'Architettura*, Roma, Carucci, 1988.

J.M. Illiston, P. L. Domone, 2001, *Construction materials: their nature and behaviour*; First published 2001 by Spon Press 11 New Fetter Lane, London.

Pietro Pedefferri, Luca Bertolini, 1996, *La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali*, McGraw-Hill Libri Italia srl, Milano.

Enzo Siviero, 1992, *Durabilità delle strutture in calcestruzzo*, Centro editoriale Veneto, Padova.

Vito Alunno Rossetti, 1995, *Il calcestruzzo, materiali e tecnologia*, McGraw-Hill Libri Italia srl, Milano.

Matteo Gastaldi, Luca Bertolini, 2011, *Introduzione ai materiali per l'architettura*, CittàStudi edizioni, Novara.

Mario Collepari, Silvia Collepari, Roberto Troli, 2009, *Il nuovo calcestruzzo*, Grafiche Tintoretto s.r.l., Villorba.

M. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2005, *Il calcestruzzo vulnerabile, prevenzione, diagnosi del degrado e restauro*, Grafiche Tintoretto, Villorba.

Pipat Termkhajornkit, Toyoharu Nawa, Yoichi Yamashiro, Toshiki Saito, *Self-healing ability of fly ash-cement systems*, Cement and Concrete composites, 2009, Vol 31, pag 195-203.

5.1.3 TESI

Idone G., *Conglomerati cementizi auto-riparanti*, Relatore Jean Marc Tulliani, Torino 2017

Robella R., *Produzione di capsule estruse per materiali cementizi autoriparanti*, Relatore Jean Marc Tulliani, Torino 2015

Carrillo Gonzalez S. I. e Paganelli G., *Sviluppo di nuove capsule polimeriche per materiali cementizi autoriparanti*, Relatore Jean Marc Tulliani, Paola Antonaci, Maria del Socorro Escalona, Torino 2017

Scozzi S., *Aggiunta di microcapsule in vetro per sviluppare il self-healing del calcestruzzo*, Relatore Giuseppe Andrea Ferro, Luciana Restuccia, Torino 2017

5.2 SITOGRAFIA

<http://www.astm.org>

<http://www.vitruvio.ch>

<http://www.enco-journal.com>

<http://www.lavoripubblici.net>

<http://sra.it>

<http://www.britannica.com>

5.3 NORME DI RIFERIMENTO

UNI EN 197-1:2011

UNI EN 196-1:2016

UNI EN 1504

UNI-EN 12390-1

ISO 679:2009

5.4 SLIDE

Lezione 12: cementi e calcestruzzi, Prof. Jean-Marc Tulliani, Politecnico di Torino
Facoltà di architettura

6 ALLEGATI

CarboStop U

Monocomponente!
Pronto all'uso senza miscelazione

Descrizione

Resina poliuretana monocomponente, reattiva all'acqua, esente da CFC e plastificanti. Pronta all'uso senza miscelazione. Viene utilizzato per:

- blocco di trasudamenti d'acqua, anche marina, in fessure
- sigillatura in galleria
- consolidamento di sabbia ghiaiosa
- sigillatura di fori

Applicabile a temperature ambiente comprese tra 0 e 40 °C.

CarboStop U è approvato sulla base della normativa tedesca ZTV-RISS come presigillante per la sigillatura di strutture in calcestruzzo.

Caratteristiche Tecniche

I dati di seguito elencati sono relativi a valori ottenuti in laboratorio in reazione non contrastata. Nella messa in opera in cantiere essi possono subire variazioni dovute a scambi di calore fra la resina e l'ambiente circostante, in funzione delle caratteristiche della roccia o del terreno, dell'umidità, della pressione e di altri fattori.

Dati dei Componenti

		CarboStop U
Densità a 25 °C	kg/m ³	1100 - 1140
Colore		marrone
Punto di Infiammabilità	°C	> 100
Viscosità a 5 °C	mPa*s	2500 - 6000
Viscosità a 10 °C	mPa*s	1900 - 4500
Viscosità a 15 °C	mPa*s	1100 - 2500
Viscosità a 25 °C	mPa*s	270 - 1000

Dati della miscela

Temperatura	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	
Inizio	27"	26"	24"	22"	20"	± 5"
Fine	4'20"	3'20"	2'50"	2'20"	2'00"	± 15"
Fattore di schiumatura	30 - 60				30 - 50	

La reazione avviene con l'aggiunta del 10% di acqua alla miscela appena preparata.
 Se necessario la reazione può essere accelerata con CarboAdd X.

CarboStop U

Composizione e Caratteristiche

Componenti

CarboStop U è composto da isocianati modificati con plastificanti e additivi.

Sistema

CarboStop U reagisce a contatto con l'acqua creando una schiuma poliuretana/poliurea. Il tasso di espansione della schiuma dipende in primo luogo dalla pressione di ritorno provocata dalla propagazione della resina nella struttura da sigillare, perciò fessure ampie o ghiaia daranno luogo a un elevato fattore di schiumatura, mentre fessure strette o sabbia fine daranno luogo a un basso fattore di espansione e ad un'elevata resistenza meccanica.

Prodotto Finale

CarboStop U ferma venute d'acqua e fornisce una sigillatura temporanea, che spesso è sufficiente per la sigillatura di scavi durante i lavori di costruzione. CarboStop U è usato anche come presigillante secondo la normativa tedesca ZTV-ING (sigillatura e giuntura estendibile di fessure in cemento armato). Dopo l'iniezione di CarboStop U, iniettare CarboCrackSeal H nella schiuma non ancora completamente indurita. 2,3

Il CarboStop U indurito non si restringe né si gonfia a contatto con l'acqua.

CarboStop U è stato testato in merito alla compatibilità con acqua di falda secondo le direttive ufficiali dell'Istituto Tedesco per la Tecnologia di Costruzione (DIBt); è stata rilevata solo una minima alterazione della qualità dell'acqua.¹

Messa in opera

CarboStop U reagisce a contatto con l'acqua. È quindi possibile che si formi una pellicola sulla superficie del liquido a causa della reazione con l'umidità presente nell'aria; questo, tuttavia, non ha nessuna influenza negativa sulla pompabilità della miscela stessa.

La miscela CarboStop/CarboAdd viene convogliata analogamente a un materiale monocomponente, con pompa a mano o meccanica, e iniettata tramite packer all'interno della zona da trattare. La miscela aumenta di volume (schiumatura) al contatto con l'acqua e indurisce.

Nel caso all'interno della zona iniettata non esistesse acqua in quantità sufficiente, questa può essere immessa posteriormente all'iniezione del CarboStop/CarboAdd. Contrariamente ai sistemi bicomponenti, CarboStop U non indurisce all'interno dei tubi di caricamento una volta che la sua reazione dipende dal contatto con l'acqua nella zona iniettata.

Subito dopo il termine dell'attività di iniezione sciacquare la pompa con CarboSolv D, per prevenire la formazione di ostruzioni. In seguito a periodi di pausa della durata superiore a un giorno, riempire la pompa con CarboSolv S.

Avvertenze

Prima della messa in opera si raccomanda di conservare i prodotti per almeno 12 ore ad una temperatura minima di 15°C, in modo da ottenere la temperatura di lavorazione ideale (fra 15 e 30 °C). Nel riscaldare evitare assolutamente l'impiego di fiamma diretta sui contenitori.

Indicazioni di Sicurezza e Manipolazione per l'Impiego di CarboStop U

Osservare le regole generali di sicurezza mentre si manipolano i prodotti chimici.

CarboStop U

CarboStop U

Simbolo: Xn (nocivo).

R20 Nocivo per inalazione. R36/37/38 Irritante per gli occhi, le vie respiratorie e la pelle. R42/43 Può provocare sensibilizzazione per inalazione e contatto con la pelle. R48/20 Nocivo: pericolo di gravi danni alla salute in caso di esposizione prolungata per inalazione.

S9 Conservare il recipiente in luogo ben ventilato. S23 Non respirare i fumi/aerosol. S26 In caso di contatto con gli occhi, lavare immediatamente e abbondantemente con acqua e consultare il medico. S36/37 Usare indumenti protettivi e guanti adatti. S45 In caso di incidente o di malessere consultare immediatamente il medico. S60 Questo materiale e il suo contenitore devono essere smaltiti come rifiuti pericolosi.

Z1 Contiene isocianati: vedi informazioni fornite dal produttore

Ulteriori informazioni sulle schede di sicurezza fornite dal produttore.

Imballi

5,5 kg in latte metalliche

22 kg in latte metalliche

Altri imballi su richiesta.

Stoccaggio e Conservazione

Almeno 6 mesi dalla data di consegna o 12 mesi dalla data di produzione se conservati in ambiente asciutto fra 10 °C e 30 °C. In questo periodo è possibile che la viscosità aumenti di circa 100%; questo non influisce sulla messa in funzione del prodotto. Le condizioni legali di stoccaggio devono essere osservate. Nell'impiego di prodotti stoccati a lungo, prima della messa in opera, si consiglia di verificare presso la Minova CarboTech le effettive caratteristiche del prodotto come da specifica.

Smaltimento

Vedere le normative locali. I prodotti liquidi possono essere smaltiti presso un impianto inceneritore (codice UE 080501).

Il CarboStop U indurito può essere smaltito come rifiuto urbano (codice UE 200139).

Certificazioni Disponibili

1. Valutazione d'igiene nel rispetto dell'acqua di falda (Istituto di Igiene, Gelsenkirchen, 2006)
2. Relazione su iniezioni di CarboCrackSeal H / CarboStop U in base alla normativa ZTV-RISS (Institut für Massivbau, Essen, 2003)
3. Certificato di conformità Ü-399 (ibac Aachen, 2011)
4. Numero di registrazione KR07-887 (Registro dei prodotti, Svezia 2008)
5. Certificato conforme alle direttive KTW (LADR GmbH, 2010)

Disconoscimento

© 2014 Orica Group. Tutti i diritti riservati. Le informazioni contenute nel presente documento hanno unicamente uno scopo informativo e sono soggette a modifica senza preavviso. Poiché Orica Group non è in grado di controllare o anticipare le condizioni nelle quali queste informazioni e i suoi prodotti saranno utilizzati, ciascun utente è tenuto a valutare le informazioni nel contesto specifico dell'applicazione prefissata. Nei limiti entro i quali la legge lo consente, Orica Group esclude ogni garanzia esplicita o implicita, ivi comprese le garanzie di accuratezza e non violazione delle condizioni, come pure le garanzie implicite di commerciabilità o idoneità a un particolare scopo. Orica Group esclude specificamente, e non è da ritenersi

CarboStop U

responsabile di, eventuali danni risultanti dall'aver utilizzato o prestato fede alle informazioni contenute nel presente documento.

La parola Orica e il simbolo dell'anello sono marchi di proprietà di Orica Group.

Per ulteriori informazioni visitate il nostro sito web: www.orica.com

Orica
1 Nicholson Street
Melbourne, VIC 3000

Fabbricante

Minova CarboTech GmbH
Am Technologiepark 1
45307 Essen
Tel. +49 (0)201/8 09 83-500
Fax +49 (0)201/8 09 83-9500
Email info.de@orica.com



Distribuzione

Italy Branch
Via Giudice Donadoni 10
20158 Milano, Italy
Tel. +30 02 39326262
Fax +39 02 39320667
Email info.it@orica.com



PLASTIGEL3220SIGILLANTE

Sigillante impermeabile a base di thiokol

descrizione prodotto

Prodotto elastomerico a due componenti predosati.
Disponibile nella versione **fluido** per superfici orizzontali o **tixo** per superfici verticali.
Perfetta adesione a tutti i materiali: legno, ferro, lega leggera, vetro, tutti i tipi di plastica, ecc. opportunamente puliti e trattati.
Facile applicabilità, indurimento (vulcanizzazione) senza variazione apprezzabile di volume (ritiro).
Elasticità inalterabile nel tempo in quanto inattaccabile dall'ossigeno e dall'ozono.
Dopo l'indurimento si presenta come una gomma elastica, tenace, dotata di straordinarie caratteristiche che praticamente non variano tra i -30 e +80°C.

Campi principali di impiego:

Per sigillare opere in calcestruzzo e per sigillare e impermeabilizzare vetrate, finestre, strutture in legno, parquet all'esterno, ed inoltre per impedire corrosioni dovute a formazione di micropile che si realizzano in presenza di acqua, per contatto di metalli di natura diversa (es. leghe leggere, rame, bronzo, ecc. con acciaio).

ciclo applicativo

Preparazione delle superfici

Le superfici da sigillare devono essere accuratamente pulite e perfettamente asciutte. Pece, grassi, ruggine, residui di vecchie vernici devono essere completamente asportati.
Applicare a pennello una mano di PRIMER ETO, per superfici di calcestruzzo, legno e acciaio. Applicare una mano di PRIMER CINQUE, per superfici di vetro o leghe leggere.
Dopo i tempi previsti di sovrapposizione dei primers (v. Schede Tecniche relative) applicare il PLASTIGEL 3220 SIGILLANTE. Se trascorressero più di 24 ore, dall'applicazione del PRIMER ETO o più di 5 ore dall'applicazione del PRIMER CINQUE, riapplicare i primers, prima di applicare il PLASTIGEL 3220 SIGILLANTE.

Modalità di applicazione

Versare il contenuto della latta di indurente nella latta di base avendo cura di rimuovere tutto il prodotto dalle pareti e fondo della latta.
Procedere ad una accurata miscelazione (circa 5 minuti) con un'opportuna girante (chiedere uff. tecnico API).
L'applicazione viene fatta mediante una pistola ad estrusione a mano, su superficie trattata con i primers, nel rispetto dei tempi previsti (vedi Schede Tecniche relative).

Temperatura di applicazione

Temperature e umidità elevate accelerano l'indurimento. In condizioni normali (ca. 23°C e 50% UR) il tempo a disposizione per l'applicazione è di circa 1 ora. Dopo 24 ore dall'applicazione, in condizioni normali, le superfici sono pedonabili (assenza di appiccicosità). L'indurimento si completa entro 10-12 giorni. Dopodiché si possono tagliare eventuali sbavature e/o effettuare la carteggiatura.
Non è consigliabile applicare il materiale con temperature inferiori a 10°C e superiori a 35°C. In nessun caso si deve applicare al di sotto dei 5°C. La temperatura del supporto deve essere almeno 3°C al di sopra del punto di rugiada.

norme generali

Confezionamento

latte da kg 1 e kg 5 peso netto
(base + indurente)

Solventi per pulizia attrezzi
SOLVENTE N.1076

Norme di immagazzinaggio

Il materiale può essere conservato per 12 mesi se mantenuto in recipienti chiusi ed originali, in ambiente asciutto ed a temperatura compresa tra i 5°C e i 20°C.

Attrezzature

La ns. Società può fornire a richiesta le seguenti attrezzature:

- 1) Pistola a mano
- 2) Girante per sigillante
- 3) Pistole a mano per cartucce in plastica
- 4) Cartucce vuote in plastica
- 5) Controcoperchi per caricamento cartucce in plastica

Norme di igiene e Sicurezza

Materiali nocivi per ingestione, inalazione e prolungato contatto con la pelle.

Per ulteriori informazioni contattare l'Ufficio Tecnico Divisione Edilizia.
L'azienda si assume la responsabilità per i danni causati dall'uso improprio del prodotto, sia attraverso propri personale e appalti, sia attraverso terzi. Si riserva il diritto di non essere ritenuta responsabile per danni causati dall'uso improprio del prodotto, sia attraverso propri personale e appalti, sia attraverso terzi. Si riserva il diritto di non essere ritenuta responsabile per danni causati dall'uso improprio del prodotto, sia attraverso propri personale e appalti, sia attraverso terzi.

api
protective coatings
and resin flooring

via trieste 13
16018 mignanego
genova, italia

t +39 010 7720751
f +39 010 7720248
api@api-spa.com
www.api-spa.com

primer aq

Prodotto a due componenti, a base di resine epossidiche in veicolo acquoso, compatibile con leganti idraulici (cemento)

Dati tecnici

Natura del veicolo epossidico
Contenuto in solidi in volume 60%
Punto di infiammabilità non infiammabile
Peso specifico 1,16 kg/dm³
Colore neutro
Rapporti di impiego in peso base 30 - indurente 70
Pot-life a 23°C 60 minuti
Spessore film secco dell'impasto con cemento 0,180 mm (rapporto resina-cemento 1:1)
Consumo d'impasto 0,400 kg/m²
Tempo aperto a 23°C, 60% U.R. min. 5 minuti, max. 1 ora
Tempo di copertura con rivestimenti resinosi a 23°C, 60% U.R. min. 20 ore, max. 48 ore
Adesione al calcestruzzo > 3 N/mm²
Indurimento completo a 23°C 7 giorni
Solvente per pulizia attrezzi acqua

Campi principali di impiego

Viene impiegato quale promotore di adesione per rivestimenti resinosi, malte cementizie, calcestruzzi freschi su superfici cementizie invecchiate anche lisce. È impiegato anche quale promotore di adesione per cicli epossidici su fondi umidi. Il prodotto può essere applicato tal quale o mescolato con cemento Ptl 325 o Ptl 425 e/o quarzo. Il prodotto si applica sempre su superfici compatte e pulite, prive di boiacche, parti friabili, oli disamanti.

Preparazione delle superfici

L'individuazione della metodologia di preparazione del supporto deve essere fatta tenendo conto della natura e consistenza del supporto e delle successive fasi lavorative. La superficie, in ogni caso, dopo la preparazione non dovrà presentare parti incoerenti o distaccate, vecchie vernici e/o sostanze che potrebbero compromettere l'adesione. Sistemi di preparazione sono: idrosabbatura, pallinatura, fresatura.

Modalità di applicazione

a) Applicazione a rullo: il prodotto può essere applicato tal quale, dopo miscelazione dei due componenti (base + indurente), oppure con aggiunta di cemento Ptl 325 o 425 in rapporto 1:1 in peso. Quando l'applicazione, oltre alla funzione di promuovere l'adesione degli strati successivi, ha anche la funzione di barriera vapore, il prodotto va utilizzato sempre addizionato con cemento e si consiglia l'applicazione con spazzolone.
b) Applicazione a spatola: il prodotto può essere applicato per la realizzazione di strati con spessori variabili compresi tra 1-2 mm, in relazione alla granulometria di quarzo impiegata nella miscelazione. Si consiglia di non eccedere con gli spessori oltre quelli indicati in quanto potrebbero aversi fessurazioni per evaporazione dell'acqua. Quando viene applicato a spatola, il *Primer aq* deve essere miscelato con cemento Ptl 325 o 425 e quarzo nei rapporti in peso 1:1:1 resina, inerte, cemento. Per migliorare la scorrevolezza dell'impasto e la sua applicabilità, aggiungere fino a un massimo del 30% di acqua pulita.

Two-component product, based on epoxy resins in aqueous vehicle and hydraulic binders (concrete) compatible

Technical data

Vehicle type epoxy
Solids content in volume 60%
Flash point not flammable
Specific gravity 1,16 kg/dm³
Colour neutral
Mixing ratio by weight base 30 - hardener 70
Pot-life at 23°C 60 minutes
Dry film thickness of the mixture with concrete 0,180 mm (ratio resin-concrete 1:1)
Coverage of mixture 0,400 kg/m²
Open time at 23°C, 60% R.H. 5 minutes min., 1 hour max.
Overcoating time with resin coatings at 23°C, 60% R.H. min. 20 hours, max. 48 hours
Adhesion to concrete > 3 N/mm²
Full cure at 23°C 7 days
Tool cleaner water

Main use

It is used as adhesion promoter for resin coatings, cement mortars, wet concretes on aged, also smooth, cement surfaces. It is also used as adhesion promoter for epoxy systems on damp substrates. This product can be applied as it is, or mixed with cement Ptl 325 or Ptl 425 and/or quartz. Always apply the product on surfaces that are compact and clean, without cement puddles, loose parts, disbonding oils.

Surface preparation

The choice of the surface preparation method must be done checking the nature and consistency of the substrate and the subsequent working phases. In any case, after preparation the surface must not have loose parts, old paints and/or materials which can compromise adhesion. Sand blasting, shot blasting, milling are some of methods used to prepare surface before application of *Primer aq*.

Application method

a) Application by roller: the product can be applied either as is, after mixing the two components (base + hardener), or with the addition of Ptl 325 or 425 cement in a ratio of 1:1 by weight. When the product is applied not only to promote the adhesion of subsequent layers, but also as a steam barrier, cement should be always added to the product and we recommend application by brush.
b) Application by spatula: the product can be applied by spatula in layers 1-2 mm thick, depending on the quartz particle size used in mixture. We do not advise applying thicker layers because water evaporation may cause cracking. When applied by spatula, the *Primer aq* must be mixed with Ptl 325 or 425 cement and quartz sand in a resin, sand, cement ratio of 1:1:1. To improve the fluidity of the paste and ease of application, add up to 30% clean water.

primer aq 1/2

08/12

L'eventuale comunicazione da parte della Api, sia mediante stampati, sia attraverso proprio personale appositamente delegato, di nozioni tecniche riguardanti l'applicazione e l'uso corretto dei prodotti venduti, pur rappresentando lo stato più aggiornato delle proprie esperienze non significa, sotto nessun profilo, assunzione da parte della Api di responsabilità per l'uso e l'applicazione dei prodotti stessi, in quanto, tra l'altro, effettuati da Personale al di fuori del proprio potere contrattuale e potere di controllo. A causa della imprevedibile variabilità delle condizioni di impiego, l'acquirente è tenuto a verificare con prove dirette l'impiegabilità del prodotto nelle proprie condizioni. / Any information given either through data sheets or by Api's personnel appointed to the task on the application and the correct use of our products, is in fact the result of our most up-to-date experience, but in no case means that our Company accepts any liability for the performance and the application of our products, since application is carried out by personnel out of Api's contractual ties and control. Owing to the unforeseeable working conditions, it is up to the Customer to verify directly, through his own means, the possibility of using the product in the existing conditions.

Quando il *Primer aq* viene impiegato come promotore di adesione nelle riprese di getto e/o malte cementizie, l'applicazione del nuovo getto o della malta deve avvenire entro il "tempo aperto", ovvero il tempo massimo decorrente tra l'applicazione e la ricopertura con l'impasto cementizio. Dipende dalle condizioni ambientali: un'alta temperatura del supporto, una atmosfera molto secca e una forte ventilazione, tendono a ridurre il tempo aperto. Un criterio empirico di valutazione consiste nel toccare, con leggera pressione del dito, l'adesivo applicato: quando il dito non viene più sporcato il tempo aperto è terminato. A 20°C e 60% U.R., in assenza di ventilazione, il tempo aperto è di circa 1 ora.

Temperatura di applicazione

Non è consigliabile applicare il materiale sotto i 10°C ed al di sopra dei 35°C. In nessun caso si deve applicare al di sotto dei 5°C.

Confezionamento

Latte da kg 10 peso netto (base + indurente).

Norme di igiene e sicurezza

Materiali nocivi per ingestione e prolungato contatto con la pelle. Evitare pertanto questi contatti, utilizzando indumenti protettivi durante l'uso.

When *Primer aq* is used as adhesion promoter for construction joints and/or cement mortars, application of the new casting or of the mortar have to be done within the "open time", that is maximum time from the application to the overcoating with the cement mixture. It depends on the environmental conditions: high surface temperature, very dry atmosphere and strong ventilation, tends to decrease the open time. An empirical criterion of evaluation is to touch, with a slight pressure of the finger, the adhesive applied: when the finger does not get dirty any more, the open time has finished. At 20°C and 60% R.H., with no ventilation, the open time is approx. 1 hour.

Application temperature

Application when temperature is below 10° C and above 35° C is not advisable. In no cases it should be applied when temperature is below 5° C.

Pack size

Kg 10 cans net weight (base + hardener).

Safety precautions

Harmful for ingestion and prolonged contact with skin. Avoid this kind of contacts, wearing protective garments during use.