

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Architettura Urbanistica Ingegneria delle Costruzioni
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi



**UNA METODOLOGIA SPERIMENTALE DI VERIFICA
DELLE CAPACITÀ DI AUTORIPARAZIONE
AUTOGENA E STIMOLATA DI CALCESTRUZZI
FIBRORINFORZATI AD ALTE PRESTAZIONI**

Relatore:

Prof. Liberato Ferrara

Correlatori:

Prof. Estefania Cuenca

Prof. Francesco Lo Monte

Candidato:

Marina Moro

Matricola 899285

Anno Accademico 2018-2019

Ringraziamenti

Prima di lasciare spazio alla trattazione vorrei ringraziare chi mi ha sostenuto e accompagnato durante questo percorso di ricerca.

Un immenso grazie al Professor Liberato Ferrara, relatore della tesi, che mi ha permesso di intraprendere questo percorso di ricerca. La professionalità e la dedizione con cui svolge il suo lavoro mi hanno ispirato sin dal primo giorno di lezione.

Un sentito ringraziamento ai miei correlatori, la Professoressa Estefania Cuenca e il Professor Francesco Lo Monte, che mi hanno guidato in questi mesi e si sono resi disponibili in ogni momento con consigli preziosi ed efficaci.

Ringrazio anche tutto il personale del Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano, in particolare Antonio Cocco e Paolo Broglia, che mi hanno assistito durante l'attività di laboratorio.

Ringrazio infinitamente i miei genitori e mia sorella, che mi hanno sostenuto nei tanti impegni e che "mi hanno sempre lasciato fare" senza alcuna pressione; li ringrazio per avermi insegnato ad affrontare ogni cosa con determinazione ed entusiasmo.

Grazie a tutti i compagni di corso con cui ho condiviso le lunghe giornate al Politecnico, tra lezioni, studio e progetti. Un ringraziamento speciale a Margherita e Sarah con cui ho trascorso tutti i giorni dal primo al quinto anno: questi anni non sarebbero stati gli stessi senza di voi.

Grazie a Francesco, che ha saputo tranquillizzarmi e rassicurarmi, che mi ha aiutato con il suo ingegno in tante questioni pratiche e soprattutto, che mai ha dubitato di me.

Semplicemente, grazie.

Sommario

Tra i principi su cui si basa la progettazione di strutture e infrastrutture vi sono durabilità e sostenibilità, fattori che risultano essere fortemente correlati e che stanno assumendo un ruolo di rilevanza crescente negli ultimi anni.

Una delle sfide prioritarie da affrontare è il cambiamento climatico, di cui le emissioni di CO₂ sono le principali responsabili. A tal proposito l'industria delle costruzioni si trova in una posizione critica, in particolare a motivo della produzione del cemento, che provoca l'immissione in atmosfera di circa il 5-8% di anidride carbonica di origine antropogenica.

L'aumento della concentrazione di CO₂ provoca l'accelerazione dei processi di degrado delle strutture in calcestruzzo armato, che richiedono interventi di ripristino il cui risultato è l'aumento dei costi di esercizio e di gestione delle opere.

A loro volta, gli interventi richiedono l'utilizzo di grandi quantità di materiali, che devono essere estratti trasformati e trasportati, sfruttando le risorse del pianeta e con ulteriore produzione di inquinanti ed energia.

A partire dagli anni 2000 è emersa l'idea di progettare infrastrutture in calcestruzzo capaci di ripararsi senza intervento umano come possibile rimedio al dilagante degrado e per estendere la vita utile delle opere di ingegneria civile, realizzando strutture più sostenibili.

In questo contesto si colloca la COST-Action SARCOS (Self-healing As preventive Repair of CONcrete Structures), finanziata dalla Commissione Europea nell'ambito del programma H2020, e che nasce dalla volontà di sviluppare tecnologie innovative e sostenibili al fine di estendere la vita utile delle strutture in calcestruzzo. I calcestruzzi in grado di ripararsi autonomamente una volta che si verifica un danno, rappresentano una risorsa preziosa.

In questo elaborato vengono studiate le capacità di autoriparazione (self-healing) autogena e stimolata di calcestruzzi fibrorinforzati ad alte prestazioni. La sinergia

con le fibre consente di limitare l'ampiezza delle fessure che si formano fisiologicamente durante la vita utile della struttura. Riducendo le dimensioni delle fessure si limitano gli accessi degli agenti aggressivi e si favorisce il processo di autoguarigione, molto efficace in fessure dalle dimensioni ridotte.

La metodologia sperimentale prevede di studiare le capacità di self-healing e di recupero delle proprietà meccaniche di campioni sottoposti a cicli di fessurazioni, alternati a periodi di immersione continua in acqua. A tale scopo sono stati introdotti parametri come l'indice di richiusura (IR), l'indice di recupero della resistenza meccanica (ISR) e due indici di recupero della rigidità (IDaR0 e IDaR*).

Le miscele studiate (P ed NP) sono costituite da cemento Portland, loppa d'altoforno, aggregati fini, acqua e additivo superfluidificante. In uno dei due impasti (P) è stato aggiunto un additivo cristallino (Penetron Admix) al fine di stimolare le proprietà di autoriparazione.

Dai dati sperimentali emerge un ridotto effetto dell'additivo cristallino dopo il primo ciclo di prove, laddove i vantaggi della sua azione si manifestano in maniera chiara su tempi più lunghi, sia sugli indici di recupero meccanico sia sugli indicatori di richiusura delle fessure.

Abstract

Durability and sustainability are two principles on which the design of building structures and infrastructures is based. These factors are closely related and are becoming increasingly relevant nowadays.

Climate change is one of the primary challenges to deal with, for which CO₂ emissions are the main responsible. The construction industry is in a critical position: Portland cement production is responsible for 5-8% of CO₂ emissions.

The increasing CO₂ concentration causes an acceleration of the deterioration of concrete structures. Repairing interventions are henceforth necessary, leading to the increase of operating costs and maintenance.

The interventions require the use of large amounts of materials, that need to be extracted, processed and transported, consequently producing pollution, using Earth's resources and energy.

Since the beginning of 2000s, the idea of designing concrete structures which are able to self-repair themselves without human intervention emerged as a possible solution to the aforementioned issue, allowing to extend the service life of concrete structures, in an as eco-friendly as possible fashion.

In this context the COST-Action SARCOS (Self-healing As preventive Repair of COncrete Structures), funded by the European Commission in the framework of the Horizon 2020 programme, provides its contribution, arising from the desire to develop innovative and sustainable technologies with the purpose to extend the service life of concrete structures. Self-healing of cement-based construction materials represents a valuable and cutting edge asset because of their inborn capacity to repair damages once they occur.

This work deals with the autogenous and stimulated self-repairing capabilities of high-performance fiber-reinforced concrete. The synergy with the fibers allows to limit the width of the cracks that physiologically form during the service life of the structure. By reducing the width of the cracks, the access of aggressive agents is

limited and the self-healing process is promoted, which is more effective in small-width cracks.

Experimental methodology aims at studying the self-healing abilities and the recovering of the mechanical properties of samples subjected to cracking, alternated with periods of continuous immersion in water. For this purpose, parameters such as the crack-closure index (IR), the index of recovery of mechanical strength (ISR) and two indexes of recovery of stiffness (IDaR0 and IDaR *) have been introduced.

The investigated mixtures (P and NP) consist of Portland cement, blast furnace slag, fine aggregates, water and superplasticizer additive. In one of the two mixtures (P) a crystalline additive (Penetron Admix) was added in order to stimulate the self-healing.

Experimental data show a reduced effect of the crystalline additive after the first test cycle; the advantages of its action become manifested in the long term both on the mechanical recovery indices and on the crack-sealing indicators.

Indice dei contenuti

Ringraziamenti

Sommario	I
Abstract	III
Indice delle figure	IX
Indice delle tabelle	XVII
Indice delle equazioni.....	XIX
1 Introduzione	1
1.1 COST Action SARCOS	3
1.2 Obiettivi.....	4
1.3 Struttura del documento	5
2 Stato dell'arte	7
2.1 Calcestruzzo.....	10
2.1.1 Cemento.....	10
2.1.2 Aggregati.....	14
2.1.3 Acqua d'impasto	15
2.1.4 Additivi.....	16
2.1.5 Proprietà dei calcestruzzi allo stato fresco	16
2.1.6 Proprietà dei calcestruzzi allo stato indurito	17
2.2 Calcestruzzi ad elevate prestazioni	20
2.3 Calcestruzzo fibrorinforzato.....	21
2.3.1 Caratteristiche delle fibre.....	21
2.3.2 Caratteristiche della matrice	25

2.3.3	Proprietà del calcestruzzo fresco e indurito	25
2.3.4	Comportamento meccanico del calcestruzzo fibrorinforzato	26
2.3.5	Classificazione dei calcestruzzi fibrorinforzati	30
2.3.6	Influenza dell'orientamento delle fibre	34
2.4	Degrado delle opere in calcestruzzo armato	36
2.4.1	Degrado del calcestruzzo	37
2.4.2	Degrado delle armature.....	39
2.5	Fenomeno del self-healing	49
2.5.1	Classificazione	49
2.5.2	Tecnologie.....	52
3	Descrizione dell'attività sperimentale.....	71
3.1	Realizzazione dei provini.....	71
3.1.1	Progetto della miscela.....	71
3.2	Fase operativa di preparazione dei provini.....	77
3.2.1	Costruzione dei casseri	77
3.2.2	Preparazione dei materiali componenti e miscelatura.....	78
3.2.3	Getto	79
3.2.4	Taglio dei provini	81
3.3	Nomenclatura dei provini.....	83
3.4	Piano prove	84
3.5	Prova di flessione su quattro punti.....	88
3.5.1	Configurazione della prova	89
3.5.2	Strumentazione di prova.....	89
3.5.3	Preparazione dei provini.....	93

3.5.4	Allestimento della prova.....	95
3.5.5	Esecuzione della prova.....	96
3.5.6	Dati acquisiti	97
3.6	Prove di caratterizzazione meccanica	98
3.7	Pre-fessurazione e ri-fessurazione	99
3.7.1	Stima cedevolezza	99
3.7.2	Stima deformazione residua.....	100
3.8	Valutazione del self-healing	103
3.8.1	Mappatura delle fessure.....	103
3.8.2	Elaborazione delle immagini.....	105
4	Elaborazione ed analisi dei dati sperimentali	111
4.1	Elaborazione dati prove a flessione su quattro punti	111
4.2	Prove monotone a rottura	114
4.3	Prove di fessurazione	117
4.4	Indici di recupero meccanico.....	120
4.4.1	Indice di recupero della resistenza (ISR)	120
4.4.2	Indice di recupero della rigidezza 1 (IdaR0)	125
4.4.3	Indice di recupero della rigidezza 2 (IdaR*).....	130
4.5	Indici di self-healing	134
4.5.1	Apertura media di fessura	134
4.5.2	Indice di richiusura	136
4.6	Analisi del panorama fessurativo	139
4.7	Analisi e discussione del self-healing.....	143
4.8	Correlazione indici meccanici e self-healing	146

4.9	Confronto metodi per la mappatura delle fessure	153
5	Conclusioni.....	157
	Riferimenti bibliografici	161
	Allegato A	
	Allegato B	
	Allegato C	
	Allegato D	
	Allegato E	
	Allegato F	
	Allegato G	
	Allegato H	

Indice delle figure

Figura 2.1: Modello di costo del ciclo di vita per strutture in calcestruzzo ordinario (linea continua) e ad elevate prestazioni (linea tratteggiata), che sottolinea l'incremento dei costi dovuto agli interventi di riparazione (a) e (b). Costo del ciclo di vita e performance di un calcestruzzo autoriparante. [9]	8
Figura 2.2: Schema semplificato di produzione del cemento Portland [12]	12
Figura 2.3: Microstruttura del calcestruzzo durante il processo di idratazione del cemento portland	14
Figura 2.4: Tipologie di fibre [22].....	24
Figura 2.5: Comportamento dei calcestruzzi fibrorinforzati [25].....	27
Figura 2.6: Curva carico P - spostamento δ per conglomerati fibrorinforzati caratterizzati da: basse percentuali di fibre (a) e alte percentuali di fibre (b). [21]28	
Figura 2.7: Propagazione della fessura [27].....	29
Figura 2.8: Classificazione FRC [24]	32
Figura 2.9: Comportamento FRC indagato con prove di trazione uniassiale o di flessione [31]	33
Figura 2.10: Meccanismo elettrochimico di corrosione.....	41
Figura 2.11: Esempio di diagrammi di Evans per lo studio delle condizioni di corrosione [1]	43
Figura 2.12: Curva di polarizzazione di un materiale a comportamento attivo-passivo [1]	44
Figura 2.13: Diagramma Pourbaix semplificato [1].....	44
Figura 2.14: Velocità di avanzamento del fronte di carbonatazione. Raggiungimento del fronte di carbonatazione a livello delle armature (in rosa in calcestruzzo ancora alcalino).....	45

Figura 2.15: Evoluzione nel tempo del degrado di una struttura in calcestruzzo armato dovuto a corrosione da carbonatazione [1]	46
Figura 2.16: Curva di polarizzazione di un materiale attivo-passivo in un ambiente con cloruri.....	47
Figura 2.17: Raggiungimento del tenore critico di cloruri in corrispondenza delle barre d'armatura; Profilo del contenuto di cloruri.	48
Figura 2.18: Definizione di self-healing/repairing [40]	50
Figura 2.19: Classificazione di self-healing concrete in base al report del RILEM Technical Committee 221 [41].....	51
Figura 2.20: Definizione di self-healing e self-repairing [41]	52
Figura 2.21: Cause che possono portare al self-healing autogeno [35]	53
Figura 2.22: Andamento nel tempo dell'Idratazione del cemento [44]	54
Figura 2.23: Fasi di richiusura della fessura a causa della presenza di batteri: il fenomeno si attiva con l'ingresso dell'acqua, a seguito di una continua idratazione si ha la precipitazione di carbonato di calcio sulle pareti della fessura fino alla sua completa [54].....	59
Figura 2.24: Meccanismo di self-healing promosso dalla presenza di prodotti incapsulati [57].....	60
Figura 2.25: Meccanismo di self-healing promosso da sistemi vascolari (a) connessi a serbatoi esterni [58] e (b) non connessi a serbatoi esterni [45]	61
Figura 2.26: Meccanismo di self-healing promosso da polimeri SAP [38].....	62
Figura 2.27: Illustrazione schematica delle tecnologie di self-healing: (a) prodotti incapsulati; (b) additivi biologici; (c) additivi cristallini; (d) sistemi vascolari; (e) controllo dell'apertura di fessura con FRC. [6]	65
Figura 3.1: Curva granulometrica aggregati	75
Figura 3.2: Additivo cristallino.....	76

Figura 3.3: Casseforme per lastre.....	78
Figura 3.4: Fenomeno del fiber-balling.....	78
Figura 3.5: Getto delle lastre.....	79
Figura 3.6: Direzione del getto e allineamento delle fibre.....	80
Figura 3.7: Avanzamento del flusso.....	80
Figura 3.8: Taglio della lastra.....	82
Figura 3.9: Panorama provini NP.....	83
Figura 3.10: Panorama provini P.....	83
Figura 3.11: Configurazione prova di flessione su quattro punti.....	89
Figura 3.12: Pressa elettromeccanica Instron 8562.....	90
Figura 3.13: Pressa Instron munita di lame di carico e di appoggio per l'esecuzione della prova di flessione su quattro punti.....	91
Figura 3.14: Pannello di comando pressa Instron.....	92
Figura 3.15: Centralina di acquisizione. Computer per la registrazione dei dati.....	92
Figura 3.16: LVDT posizionati secondo la configurazione di prova.....	93
Figura 3.17: Preparazione dei provini.....	94
Figura 3.18: Basette metalliche.....	94
Figura 3.19: Telaio metallico "Gondola" per il supporto degli LVDT verticali.....	95
Figura 3.20: Allestimento della prova. Posizionamento telaio metallico. Inserimento del provino tra le lame di carico e appoggio.....	96
Figura 3.21: Dati acquisiti.....	97
Figura 3.22: Stima del valore di cedevolezza. Procedimento grafico. [22].....	100
Figura 3.23: Schema per la definizione di COD_{LVDT}	101
Figura 3.24: Microscopio Dino Lite.....	103

Figura 3.25: Mappatura fessure.....	104
Figura 3.26: Risultato unione immagini.....	106
Figura 3.27: Calibrazione scala di conversione	107
Figura 3.28: Punto di misura P1_2_2a: a) unione delle immagini; b) ritaglio con strumento lazo; c) conversione in bitmap.....	108
Figura 3.29: Dati estratti con Adobe Photoshop	109
Figura 4.1: Prova di flessione su quattro punti. a) Schema statico per il calcolo del momento agente; b) Diagramma del momento flettente.....	112
Figura 4.2: Curve prove monotone a rottura - Miscela NP	115
Figura 4.3: Curve di riferimento-Prove monotone a rottura miscela NP	115
Figura 4.4: Curve prove monotone a rottura - Miscela P.....	116
Figura 4.5: Curve di riferimento-Prove monotone a rottura miscela P	116
Figura 4.6: Procedura di esempio per il tracciamento delle curve di fessurazione traslate.....	118
Figura 4.7: Esempio individuazione valori di σ_s^i e σ_s^{RiFi} per il calcolo di ISR, provino NP1_3.....	121
Figura 4.8: Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR a 30 giorni - Miscela NP.....	122
Figura 4.9: Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR a 90 giorni - Miscela NP.....	122
Figura 4.10 Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR a 30 giorni - Miscela P.....	123
Figura 4.11: Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR a 90 giorni - Miscela P.....	123
Figura 4.12: Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR - Valori medi	124

Figura 4.13: Esempio per l'individuazione dei valori di rigidità K_{c0} , K_{s0} e K_{ci} , per il calcolo dell'indice $IdaR0$	125
Figura 4.14: Andamento dell'indice $IdaR0$ a 30 giorni, miscela P	127
Figura 4.15: Andamento dell'indice $IdaR0$ a 90 giorni, miscela P	127
Figura 4.16: Andamento indice $IdaR0$ a 30 giorni, miscela NP	128
Figura 4.17: Andamento indice $IdaR0$ a 90 giorni, miscela NP	128
Figura 4.18: Andamento dell'indice $IdaR0$ - Valori medi	129
Figura 4.19: Esempio per l'individuazione dei valori di rigidità K_{ci} , K_{si} e K_{ci-1} , per il calcolo dell'indice $IdaR^*$	130
Figura 4.20: Andamento indice $IdaR^*$ tra secondo e terzo ciclo di prova (30-90 giorni), miscela P	132
Figura 4.21: Andamento indice $IdaR^*$ tra secondo e terzo ciclo di prova (30-90 giorni), miscela NP	132
Figura 4.22: Andamento dell'indice $IdaR^*$ - Valori medi	133
Figura 4.23: Esempio di immagini relative allo stesso punto di misura nei successivi periodi di osservazione	138
Figura 4.24: Distribuzione delle fessure negli intervalli di apertura all'inizio del primo periodo di osservazione (t_0)	140
Figura 4.25: Distribuzione delle fessure negli intervalli di apertura alla fine del primo periodo di osservazione	141
Figura 4.26: Distribuzione delle fessure negli intervalli di apertura all'inizio del secondo periodo di osservazione	142
Figura 4.27: Distribuzione delle fessure negli intervalli di apertura alla fine del secondo periodo di osservazione	142
Figura 4.28: Andamento indice di richiusura al termine del primo periodo di osservazione a 30 giorni in funzione dell'apertura media di fessura iniziale.	143

Figura 4.29: Andamento indice di richiusura al termine del secondo periodo di osservazione a 90 giorni in funzione dell'apertura media di fessura iniziale.	143
Figura 4.30: Andamento globale dell'indice di recupero per miscele NP e P.....	144
Figura 4.31: Correlazione indice di recupero della resistenza ISR con indice di richiusura IR, a t30 e t90, per le miscele NP e P – Valori medi	147
Figura 4.32: Correlazione ISR con IR, a t30 e t90 - Miscela NP	148
Figura 4.33: Correlazione ISR con IR, a t30 e t90 - Miscela P	148
Figura 4.34: Correlazione indice di recupero della rigidezza IDaR0 con indice di richiusura IR, a t30 e t90, per le miscele NP e P – Valori medi	149
Figura 4.35: Correlazione IDaR0 con IR, a t30 e t90 - Miscela NP	150
Figura 4.36: Correlazione IDaR0 con IR, a t30 e t90 - Miscela P	150
Figura 4.37: Correlazione indice di recupero della rigidezza IDaR* con indice di richiusura IR, a t30 e t90, per le miscele NP e P- Valori medi.....	151
Figura 4.38: Correlazione IDaR* con IR, a t30 e t90 - Miscela NP.....	152
Figura 4.39: Correlazione IDaR* con IR, a t30 e t90 - Miscela NP.....	152
Figura 4.40: Indice di recupero al termine del primo periodo di osservazione (tra tempo zero e un mese), valutato con dati estratti da mappatura completa della fessura e per punti, provini NP	154
Figura 4.41: Indice di recupero al termine del primo periodo di osservazione (tra tempo zero e un mese), valutato con dati estratti da mappatura completa della fessura e per punti, provini P	154
Figura 4.42: Indice di recupero al termine del secondo periodo di osservazione (tra un mese e tre mesi), valutato con dati estratti da mappatura completa della fessura e per punti, provini NP	155

Figura 4.43: Indice di recupero al termine del secondo periodo di osservazione (tra un mese e tre mesi), valutato con dati estratti da mappatura completa della fessura e per punti, provini P..... 155

Indice delle tabelle

Tabella 2-1: Classi di resistenza delle fibre di acciaio. R_m e $R_{p0.2}$ rappresentano, rispettivamente, la resistenza a trazione (corrispondente al carico massimo) e la resistenza di scostamento dalla proporzionalità con un'estensione non proporzionale pari allo 0.2% della lunghezza di base dell'estensimetro [21]	23
Tabella 2-2: Caratteristiche fibre in commercio [21].....	24
Tabella 3-1: Componenti delle miscele	72
Tabella 3-2: Parametri rappresentativi delle miscele	72
Tabella 3-3: Componenti CEM 52,5 R.....	73
Tabella 3-4: Composizione loppa d'altoforno	74
Tabella 3-5: Caratteristiche dimensionali dei casseri utilizzati e volume teorico di calcestruzzo che possono contenere	77
Tabella 3-6: Ordine e tempi di miscelazione dell'impasto.....	79
Tabella 3-7: Piano prove. Suddivisione dei provini nei periodi temporali di prova.	85
Tabella 3-8: Piano prove	87
Tabella 3-9: Determinazione del COD residuo a livello degli LVDT poiché sia imposta una deformazione dell'1%.....	101
Tabella 4-1: Esempio di calcolo dei valori dei COD reali a partire dai COD indipendenti, provino NP1_10.....	117
Tabella 4-2: Valori di Crack Opening Displacement reali e indipendenti, miscela NP.....	118
Tabella 4-3: Valori di Crack Opening Displacement reali e indipendenti, miscela P	119
Tabella 4-4: Schema riassuntivo prove.....	137

Tabella 4-5: Schema periodi di osservazione.....	138
Tabella 4-6: Panorama fessurativo per provini soggetti a prove di flessione su quattro punti, miscele NP e P	139

Indice delle equazioni

Equazione 1: Relazione per il calcolo della forza di estrazione specifica delle fibre	30
Equazione 2: Condizione necessaria per l'innescò della corrosione	42
Equazione 3: Reazione di carbonatazione	45
Equazione 4: Produzione di ioni calcio dall'idrossido di calcio formato con il processo di idratazione del cemento	54
Equazione 5: Formazione di ioni carbonato dall'anidride carbonica e acqua disciolte in atmosfera.....	55
Equazione 6: Razione di produzione del carbonato di calcio	55
Equazione 7: Relazione di equilibrio per il calcolo di COD_{LVDT}	100
Equazione 8: COD residuo all'intradosso del provino	101
Equazione 9: Relazione per determinare COD residuo all'altezza degli LVDT .	101
Equazione 10: Valore di COD_{LVDT} atteso a fine prova, dopo la fase di scarico del provino	102
Equazione 11: Formula di Navier	111
Equazione 12: Valore del massimo momento	113
Equazione 13: Espressione per il calcolo dello sforzo nominale in provini soggetti a prova di flessione su quattro punti	113
Equazione 14: Definizione indice di recupero della resistenza ISR.....	120
Equazione 15: Definizione indice di recupero della rigidezza $IDaR_0$	125
Equazione 16: Definizione indice di recupero della rigidezza $IDaR^*$	130
Equazione 17: Definizione apertura media di fessura W	134
Equazione 18: Relazione alternativa per il calcolo dell'apertura media di fessura	134

Equazione 19: Definizione indice di richiusura IR	136
---	-----

1 Introduzione

Oggi, come mai in precedenza, il cambiamento climatico è un tema di fondamentale rilevanza. Sulla riduzione delle emissioni di gas serra e sugli effetti nefasti che esse hanno sul clima è stata posta attenzione crescente tanto da considerare il riscaldamento globale una delle principali sfide che l'uomo deve affrontare.

In questo contesto le emissioni di CO₂ che costituiscono i tre quarti del totale di gas serra emessi, sembra che siano le principali responsabili del cambiamento climatico.

A tal proposito l'industria delle costruzioni si trova in una posizione critica: la produzione di un metro cubo di calcestruzzo provoca l'immissione in atmosfera di circa 0.2 tonnellate di anidride carbonica. Inoltre, per calcestruzzi che utilizzano come legante solo cemento Portland, il valore delle emissioni è compreso tra 0.29 e 0.32 tonnellate per metro cubo. Infatti, la produzione di 1000 Kg di cemento Portland comporta la generazione di 840-1150 Kg di CO₂. [1] Si può affermare che, delle emissioni prodotte dal comparto edile, quelle relative alla produzione del cemento Portland ammontano a circa l'80%. [2] Questi valori rendono l'industria del cemento responsabile tra il 5 e l'8% delle emissioni globali di CO₂ di origine antropogenica. [3]

Oltre agli effetti sia sull'ambiente sia sulla salute, l'aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera compromette la stabilità chimica del calcestruzzo in opera, in quanto responsabile del processo di carbonatazione. Viene così accelerato il degrado delle strutture in calcestruzzo armato che vedono una diminuzione della vita utile di circa 15-20 anni.

A fronte del peggioramento delle condizioni di degrado delle opere in calcestruzzo armato si rendono necessari interventi che alimentano il ciclo di produzione con

conseguente incremento delle emissioni. Oltre alla produzione di gas serra è bene considerare anche il continuo sfruttamento delle risorse minerarie e delle riserve di acqua, i consumi energetici e la generazione di rifiuti solidi quando la demolizione delle opere si rivela l'ultima soluzione. [4]

Per alleviare l'enorme impronta che l'industria del calcestruzzo lascia sul nostro pianeta, la ricerca studia da qualche decennio calcestruzzi che presentano migliori caratteristiche di durabilità e che siano in grado di auto-ripararsi. Si vogliono in tal modo ottenere strutture con una vita utile più lunga e per le quali siano ridotti al minimo gli interventi di manutenzione.

È il caso dei calcestruzzi auto-riparanti che mantengono le eccellenti proprietà, meccaniche e di resistenza, del calcestruzzo "genitore" e che presentano capacità di auto-guarigione delle fessure che normalmente si formano in condizioni di esercizio, via preferenziale per l'ingresso degli agenti aggressivi responsabili del degrado del calcestruzzo e delle armature.

1.1 COST Action SARCOS

La campagna sperimentale descritta in questo elaborato di tesi si colloca nell'ambito della COST Action SARCOS (Self-healing As preventive Repair of Concrete Structures).

L'azione SARCOS, che ha inizio il 30 settembre 2016 e sarà attiva fino al 29 settembre 2020, nasce dalla volontà di sviluppare delle tecnologie innovative e sostenibili al fine di estendere la vita utile delle strutture in calcestruzzo.

La formazione di fessure nel calcestruzzo è del tutto fisiologica, non compromette nell'immediato la sicurezza o la stabilità dell'opera ma accelera i meccanismi di degrado, diminuendo la vita utile delle strutture. Al procedere del degrado sono legate anche la perdita di prestazioni e funzionalità, per cui si rendono necessari interventi di riparazione. Tali interventi incidono su aspetti economici e ambientali.

I materiali come i *self-healing concrete*, calcestruzzi intelligenti in grado di ripararsi autonomamente una volta che si verifica un danno, rappresentano una risorsa preziosa e all'avanguardia.

Il consorzio coinvolto nell'azione SARCOS si sta occupando dunque di trovare le migliori soluzioni in questo ambito, dalla progettazione di additivi promotori di self-healing alla definizione degli standard di valutazione delle prestazioni ottenute.

Tra gli obiettivi di SARCOS vi è il confronto tra le capacità di guarigione intrinseche del materiale e l'uso di metodi di riparazione esterni da applicare a edifici esistenti. Un'altra priorità per SARCOS è rendere queste tecnologie competitive, in modo che possano essere effettivamente utilizzate e diffondersi su larga scala. Un altro fine è la modellazione dei meccanismi di guarigione per le differenti strategie progettate e la previsione dell'aumento di vita utile raggiunta dalle opere con questi metodi.

L'azione di SARCOS è promossa da COST (European COoperation in Science e Tecnhnology), associazione intergovernativa inquadrata nel contesto paneuropeo di cui fanno parte 36 stati, la cui missione è quella di incrementare, sostenere la ricerca e consentire lo sviluppo scientifico-tecnologico, promuovendo l'approccio interdisciplinare integrato tra ricercatori, ingegneri e studiosi.

1.2 Obiettivi

L'attività sperimentale descritta in questo elaborato ha come obiettivo lo studio di due miscele differenti di materiali cementizi.

Si tratta di compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni di cui si vuole comprendere il comportamento meccanico e le proprietà di auto-riparazione.

Le miscele sono composte da cemento portland, aggregato fine, acqua, fibre metalliche, aggiunte di loppa d'altoforno e additivo supefluidificante. Si differenziano per l'inserimento in una di esse di additivo cristallino Penetron Admix, che stimola l'auto-rigenerazione del materiale.

Con questi materiali sono state realizzate delle piastre di dimensioni 1000x500x30mm successivamente tagliate per ottenere, da ciascuna di esse, dieci provini prismatici. Alcuni campioni, suddivisi in base al programma sperimentale, sono stati sottoposti a caratterizzazione meccanica mediante prova di flessione su quattro punti monotona a rottura; altri sono stati sottoposti a cicli di fessurazione, sempre mediante prove di flessione su quattro punti, a tempo iniziale e successivamente a un mese e tre mesi dalla prima fessurazione. Nel periodo di tempo tra i cicli di prova sono stati immersi in acqua potabile al fine di stimolare l'auto-riparazione della matrice.

L'elaborazione dei dati acquisiti con i le prove sperimentali prevede la valutazione degli indici di recupero meccanico, tra cui l'indice di recupero della resistenza e due indici relativi alle rigidzze, e gli indici di valutazione del self-healing, tra cui l'apertura media di fessura e l'indice di richiusura. Infine, sono stati correlati gli

indici di recupero meccanico e gli indici riguardanti la capacità di rigenerazione autogena.

1.3 Struttura del documento

Il presente elaborato di tesi è articolato in cinque capitoli:

- Nel primo capitolo si illustrano le motivazioni che hanno spinto la ricerca nella direzione dei compositi cementizi auto-riparanti, il progetto di ricerca in cui questa campagna sperimentale si inserisce, gli obiettivi di tale campagna e la struttura del documento.
- Il secondo capitolo è dedicato allo stato dell'arte. Vengono riportate le principali nozioni sui calcestruzzi ordinari, ad elevate prestazioni e fibrorinforzati. Si espongono le maggiori cause che producono il degrado del calcestruzzo armato e si introduce il fenomeno del self-healing, descrivendone le tecnologie sviluppate ad oggi e le prospettive future della ricerca.
- Il terzo capitolo è volto a descrivere tutte le fasi della campagna sperimentale, dalla realizzazione dei campioni all'estrazione dei dati delle prove sperimentali effettuate, specificando le modalità, la configurazione di prova e l'attrezzatura utilizzata.
- Il quarto capitolo riporta l'elaborazione effettuata sui dati ottenuti durante la campagna sperimentale. Vengono analizzati i dati delle prove di caratterizzazione meccanica, le fessurazioni e le successive indagini al microscopio, spiegando i parametri e le correlazioni utilizzate.
- Il quinto capitolo racchiude le considerazioni conclusive del lavoro svolto e i commenti dei risultati ottenuti.

2 Stato dell'arte

La progettazione di strutture e infrastrutture è da sempre basata su quattro concetti: sicurezza, fruibilità, durabilità e sostenibilità. Tra questi, l'ultimo sta diventando un tema sempre più rilevante nel campo dell'ingegneria civile. [5] Le opere in calcestruzzo armato sono soggette a degrado. Le fessure veicolano gli agenti aggressivi e, se non riparate, possono portare ad un rapido deterioramento il cui risultato è l'aumento dei costi di esercizio e di gestione dell'opera a causa degli interventi di manutenzione necessari per garantire i livelli di prestazione fissati.

Molti paesi sviluppati, tra cui Germania, Corea del Sud e Stati Uniti, stanno assistendo ad una scena senza precedenti: un'enorme quantità di infrastrutture civili sono affette da degrado tale che la spesa annua per gli interventi di recupero e manutenzione supera il costo della costruzione di nuove infrastrutture. [6]

L'impatto economico annuale ammonta a 18-21 miliardi di dollari solo negli Stati Uniti [7], senza considerare che spesso gli interventi sul calcestruzzo sono di breve durata o falliscono dopo poco tempo dalla realizzazione, richiedendo ulteriori provvedimenti. [8]

Le preoccupazioni che nascono dalla presa di coscienza sulle condizioni di degrado delle infrastrutture civili, non si limitano ad un ambito economico [6], ma sono un problema per la società anche dal punto di vista dell'impatto ambientale. [5]

A partire dall'inizio del 2000 è emersa l'idea di progettare infrastrutture in calcestruzzo capaci di ripararsi senza intervento umano come possibile rimedio al dilagante degrado e per estendere la vita utile delle opere di ingegneria civile.

Il calcestruzzo auto-riparante potrebbe essere la risposta a queste necessità.

Alcuni benefici diretti del self-healing includono la riduzione del tasso di deterioramento, l'estensione della vita di servizio, la riduzione della frequenza e dei costi di riparazione nell'intero ciclo di vita di un'infrastruttura in calcestruzzo.

Ci si aspetta che i benefici derivanti dall'uso di questa tecnologia possano migliorare la sostenibilità ambientale poiché implicano: inferiore sfruttamento delle risorse materiali, riduzione del consumo di energia e di emissione di inquinanti legati alla produzione e al trasporto dei materiali, oltre a quello associato alle alterazioni del traffico nelle infrastrutture di trasporto durante gli interventi di riparazione/ricostruzione.

Le opere costruite con calcestruzzo autoriparante possono avere costo iniziale più elevato, ma i benefici che si possono trarre sono tali da giustificare la spesa iniziale. La riduzione al minimo o la totale assenza di costi aggiuntivi durante il ciclo di vita legati alle riparazioni, le rendono competitive con le attuali infrastrutture in calcestruzzo. [6]

In Figura 2.1 sono rappresentati i costi da affrontare durante tutto il ciclo di vita per strutture in calcestruzzo ordinario e i costi legati a calcestruzzi autoriparanti.

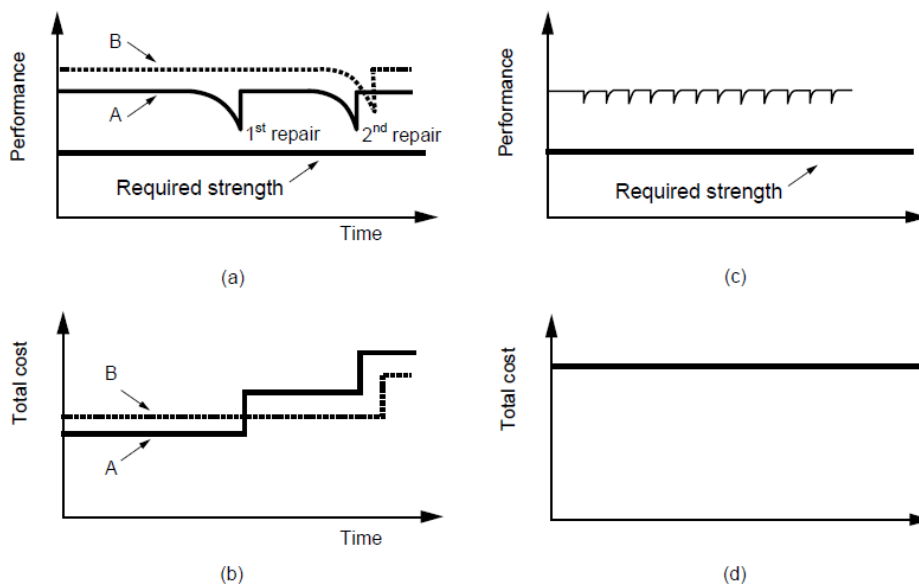


Figura 2.1: Modello di costo del ciclo di vita per strutture in calcestruzzo ordinario (linea continua) e ad elevate prestazioni (linea tratteggiata), che sottolinea l'incremento dei costi dovuto agli interventi di riparazione (a) e (b). Costo del ciclo di vita e performance di un calcestruzzo autoriparante. [9]

Mentre questa possibilità rimane ancora lontana dalla diffusione nel campo pratico, ha attirato una notevole attenzione nell'ambito della ricerca, che dal 2001 al 2011 ha visto una crescita esponenziale delle pubblicazioni in materia di self-healing concrete. [10] Ad oggi siamo in una fase di intensa ricerca, il cui ritmo continuerà ad accelerare. [6]

In questo capitolo si parlerà di calcestruzzo, partendo dalla descrizione dei suoi materiali costituenti e delle proprietà allo stato fresco e indurito. Si distingueranno i calcestruzzi ordinari da quelli ad elevate prestazioni e verrà introdotto il calcestruzzo fibrorinforzato. Si esporrà il problema del degrado che affligge le strutture in calcestruzzo armato, spiegandone i principali meccanismi. Infine, si presenterà il fenomeno del self-healing, riportando le classificazioni proposte, illustrando le principali tecnologie, delineando il percorso intrapreso dalla ricerca e indicando i propositi per il futuro.

2.1 Calcestruzzo

Il calcestruzzo è un materiale composito ottenuto da una matrice di cemento, aggregati, come sabbia e ghiaia, ed acqua, che consente lo sviluppo della reazione chimica di presa.

In seguito, verranno descritti brevemente i componenti del calcestruzzo ordinario, le reazioni chimiche responsabili del processo di presa e le principali proprietà del calcestruzzo allo stato fresco e indurito.

2.1.1 Cemento

In accordo con la definizione della norma UNI EN 197-1, il cemento è un legante idraulico, ossia un materiale inorganico finemente macinato che, se mescolato con acqua, forma una pasta che fa presa e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione. Una volta indurito, l'impasto sviluppa caratteristiche di resistenza e stabilità che vengono mantenute anche sott'acqua. [11]

La norma UNI EN 197-1 propone la classificazione dei tipi di cemento. Le classi principali sono:

- Cemento Portland (tipo I);
- Cemento Portland composito (tipo II);
- Cemento d'altoforno (tipo III);
- Cemento pozzolanico (tipo IV);
- Cemento composito ottenuto dall'aggiunta sia di loppa d'altoforno sia di materiali pozzolanici (tipo V).

Ogni tipo di cemento è individuato da una sigla composta da CEM, numero romano, lettere indicanti tipo e sottotipo di cemento e un numero che indica la classe di resistenza a compressione misurata a 28 giorni di maturazione del getto. Il valore di resistenza è seguito da N, resistenza iniziale ordinaria, o R, resistenza iniziale elevata.

2.1.1.1 Cemento Portland

In particolare, per la realizzazione di opere in calcestruzzo viene utilizzato il cemento Portland, ottenuto a partire dalla macinazione del prodotto di cottura di una miscela di argilla, calcare e sabbia, chiamata *clinker*. [12]

Le materie prime del clinker vengono macinate e portate a 1450 °C in un forno rotante. All'aumentare della temperatura, argilla e calcare si trasformano originando silicato tricalcico (C_3S), silicato bicalcico (C_2S), alluminato tricalcico (C_3A) e altri composti noti come fase ferrica (C_4AF). Oltre ai silicati e agli alluminati, sono presenti anche ossidi, tra cui quelli di sodio e potassio che sono responsabili dell'alcalinità dell'impasto. Aggiungendo anche piccole percentuali di gesso (circa 5%), si garantisce la presa corretta dell'impasto. È possibile l'aggiunta anche di altri materiali dalle proprietà idrauliche, come ceneri volanti e loppa d'altoforno (descritte al paragrafo 2.1.1.2) o inerti, come il calcare.

In uscita dal forno il materiale viene raffreddato ottenendo granuli di clinker che vengono macinati in mulini rotanti.

In Figura 2.2 si riporta lo schema semplificato di produzione del cemento Portland.

La finezza del materiale risultante incide sulla reattività, sulla velocità di indurimento, sul grado di idratazione finale, nonché sulla lavorabilità.

Solitamente, almeno il 90% in peso delle particelle ha dimensioni comprese tra 2 e 90 μm ; il 7-9% è minore di 2 μm e lo 0-4% è maggiore di 90 μm . [12]

Attraverso le curve di distribuzione granulometrica si descrive la finezza delle particelle di un cemento.

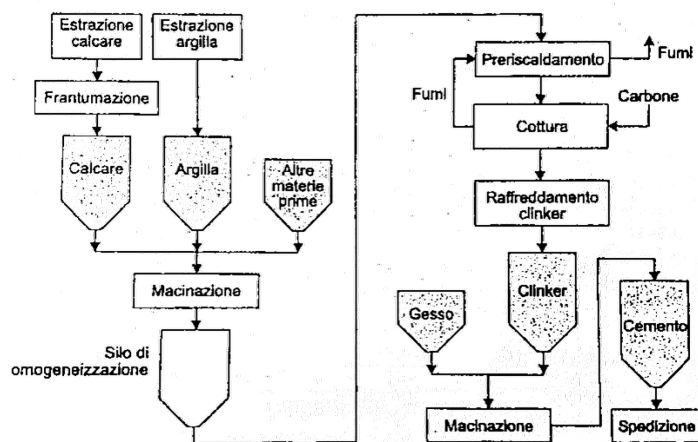


Figura 2.2: Schema semplificato di produzione del cemento Portland [12]

2.1.1.2 Cementi di miscela

I cementi di miscela si ottengono con aggiunte di materiali con proprietà pozzolaniche al cemento Portland.

I materiali pozzolanici possono essere di origine naturale, come la pozzolana, o di origine artificiale, come le ceneri volanti, il fumo di silice e la loppa d'altoforno.

Le pozzolane naturali sono materiali sedimentari, spesso di origine piroclastica. Per questo, contengono silice allo stato vetroso, caratterizzata da elevata porosità.

Le ceneri volanti sono polveri molto sottili, note anche come fly ashes (FA). Si ottengono come rifiuto di combustione del carbone polverizzato nelle centrali termoelettriche. Presentano una struttura vetroso, molto reattiva.

Il fumo di silice, noto come silica fume, è un prodotto di scarto dell'industria di produzione che usano forni ad arco elettrico.

La loppa granulata d'altoforno, nota anche come ground granulated blastfurnace slag, GGBS, è uno scarto del processo produttivo della ghisa. La scoria liquida in uscita dall'altoforno, se raffreddata bruscamente, può essere trasformata in granuli dalla struttura vetroso. Questo materiale presenta caratteristiche idrauliche latenti, che si manifestano solo in presenza di attivatori, sostanze comunemente presenti durante il processo di idratazione del cemento Portland.

Le pozzolane artificiali e la loppa d'altoforno sono residui di processi industriali. Il loro utilizzo ha risvolti positivi anche rispetto all'ambiente.

2.1.1.3 Idratazione del cemento portland

Miscelando cemento e acqua si ottiene un impasto dalla consistenza plastica e lavorabile. Con l'inizio della fase di presa e lo sviluppo delle reazioni di idratazione, l'impasto perde di plasticità fino alla solidificazione completa. I processi di idratazione proseguono dopo il termine del periodo di presa e per tutto il periodo detto di indurimento, in cui si sviluppa la resistenza meccanica.

Per promuovere l'idratazione del cemento si mette in atto una serie di procedure, tipiche della fase di stagionatura (o maturazione).

Le tappe fondamentali del processo di idratazione del cemento Portland sono [12]:

- Idratazione degli alluminati e formazione dell'ettringite. Gli alluminati sono responsabili del processo di presa, che avviene istantaneamente, tanto da dover essere rallentato, per garantire la lavorabilità, con aggiunta di gesso;
- Il gesso, reagendo con gli alluminati forma ettringite che ricopre i grani di cemento come una pellicola e ritarda il processo di idratazione;
- Formazione del gel CSH e degli altri prodotti di idratazione. Dopo che la pellicola di ettringite è diventata permeabile all'acqua, si avvia il processo di idratazione dei silicati, responsabili dell'indurimento della pasta cementizia. I silicati si idratano formando il gel CSH, costituito da lamelle che avvolgono il grano di cemento. Si producono anche cristalli esagonali di portlandite, ossia cristalli di idrossido di calcio, che consentono di mantenere alcalino il calcestruzzo;
- I prodotti di idratazione hanno volume maggiore del cemento e occupano gli spazi tra le particelle di cemento prima occupate dall'acqua. Il processo di idratazione prosegue con velocità decrescente.

La Figura 2.3 descrive in modo schematico la microstruttura del calcestruzzo durante il processo di idratazione del cemento portland.

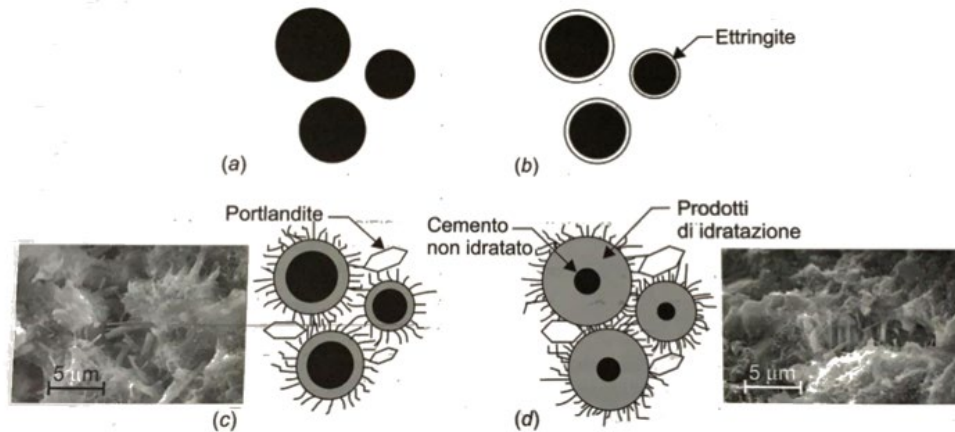


Figura 2.3: Microstruttura del calcestruzzo durante il processo di idratazione del cemento portland

2.1.1.4 Idratazione dei cementi di miscela

Nel caso di cementi di miscela, alla reazione di idratazione del cemento si sommano le reazioni di idratazione delle aggiunte minerali.

Il processo di idratazione dei cementi di miscela è solitamente più lento, e quindi, prolungato nel tempo. Anche lo sviluppo della resistenza meccanica risulterà ritardato. Tuttavia, le aggiunte pozzolaniche permettono di ottenere una struttura con porosità fini: si ha la cosiddetta affinazione dei pori, che rende questo tipo di cemento più resistente alla penetrazione di agenti aggressivi. Per consentire lo sviluppo della struttura dalle porosità ridotte, però, è necessario un periodo di maturazione maggiore. [12] [13]

2.1.2 Aggregati

Gli aggregati sono sostanze minerali di origine naturale, artificiale o di riciclo, con particelle adatte alla produzione del calcestruzzo per forma e dimensione.

Gli aggregati consentono di avere una maggiore resa in volume a parità di contenuto di cemento, riducendo così la quantità di cemento dell'impasto e

diminuendone il costo; si oppongono al ritiro durante la fase di presa e maturazione della pasta cementizia e limitano le conseguenze dello sviluppo del calore di idratazione, con effetti positivi sulla stabilità dimensionale del calcestruzzo. [12] [13]

La norma UNI EN 12620 ne definisce i requisiti chimici, fisici e geometrici; richiama le norme specifiche per le prove standardizzate, determina i controlli da eseguire e la loro frequenza. [14]

Gli aggregati si possono suddividere in fini, se più del 95% passa attraverso le maglie di un setaccio aventi apertura di 4 millimetri, o grossi.

La distribuzione delle dimensioni delle particelle degli aggregati è fondamentale per la realizzazione del calcestruzzo e viene determinata per vagliatura. L'analisi granulometrica si esegue facendo passare gli aggregati in una serie di setacci di diverse aperture. Al termine si misura la quantità di materiale rimasto nei vari setacci. I dati vengono rappresentati mediante tabelle o curve granulometriche che riportano la percentuale di aggregato trattenuto (o passato) in funzione dell'apertura delle maglie del vaglio. [12]

2.1.3 Acqua d'impasto

La qualità dell'acqua d'impasto è di rilevante importanza in quanto l'eventuale presenza di impurità può interferire con i processi di presa e indurimento, con lo sviluppo delle proprietà meccaniche, causare efflorescenze o macchie sulla superficie del calcestruzzo. [12]

Secondo la norma UNI EN 1008, possono essere utilizzate senza controlli le acque potabili. Devono essere sottoposte a controlli le acque di recupero dell'industria del calcestruzzo, le acque di origine sotterranea, le acque naturali di superficie e le acque reflue industriali. Non sono ammesse acque marine o salmastre e acque nere. [15]

2.1.4 Additivi

Per modificare le caratteristiche del calcestruzzo allo stato fresco o indurito è possibile unire particolari additivi durante il processo di miscelazione.

La norma UNI EN 934-2 classifica le tipologie di additivi e fornisce le prescrizioni in merito. [16]

Le principali tipologie di additivi sono:

- Superfluidificanti o riduttori d'acqua;
- Acceleranti e ritardanti di presa o indurimento;
- Aeranti;
- Ritentori di acqua.

Gli additivi superfluidificanti consentono di ridurre il contenuto di acqua senza influenzare la consistenza della miscela oppure di aumentare la lavorabilità senza modificare il rapporto acqua/cemento.

Gli additivi acceleranti e ritardanti consentono di modificare il comportamento a breve termine modificando i tempi di presa o la velocità di indurimento iniziale.

I ritentori d'acqua diminuiscono il rilascio dell'acqua del calcestruzzo per bleeding.

Gli additivi aeranti immettono bolle d'aria che creano porosità interconnesse che conferiscono al calcestruzzo maggiore resistenza ai cicli gelo-disgelo.

2.1.5 Proprietà dei calcestruzzi allo stato fresco

Il calcestruzzo fresco deve possedere un'adeguata combinazione tra fluidità, compattabilità e coesione al fine di poter essere messo in opera adeguatamente con i mezzi disponibili in cantiere. Si definisce lavorabilità l'insieme di queste caratteristiche. [12]

La lavorabilità del calcestruzzo dipende dalla struttura da realizzare e dalla modalità di messa in opera.

La norma UNI EN 206-1 definisce cinque classi di consistenza (da S1 a S5 con lavorabilità crescente) in funzione delle misure ottenute con la prova di abbassamento al cono di Abrams. [17]

La lavorabilità è influenzata dal contenuto di acqua, dalle caratteristiche geometriche degli aggregati e dalla presenza di additivi. In particolare, la lavorabilità aumenta con il contenuto di acqua; a pari contenuto di acqua risulta migliore all'aumentare del diametro massimo degli aggregati e se questi sono di forma tondeggianti; aumenta con la presenza di additivo superfluidificante.

Tuttavia, i fattori che incidono positivamente sulla lavorabilità sono sfavorevoli nei confronti della coesione, proprietà che determina la resistenza alla segregazione, cioè la separazione dei costituenti della miscela causandone una distribuzione non uniforme all'interno della matrice. Infatti, gli aggregati grossi tendono a depositarsi sul fondo, separandosi dagli aggregati fini e, dove manca la porzione fine, si producono delle cavità note come nidi di ghiaia, una zona debole sia per resistenza meccanica che per resistenza alla penetrazione di agenti aggressivi.

Il fenomeno della segregazione può essere ridotto con una buona miscelazione dell'impasto.

Oltre agli aggregati, si può manifestare la separazione dell'acqua d'impasto, fenomeno noto come bleeding o essudazione. L'acqua d'impasto affiora in superficie o all'interno del getto in corrispondenza degli aggregati grossi originando zone deboli meccanicamente e alla penetrazione degli agenti aggressivi.

2.1.6 Proprietà dei calcestruzzi allo stato indurito

Per quanto riguarda il comportamento allo stato indurito, la resistenza del calcestruzzo può essere influenzata dalla composizione, come il rapporto

acqua/cemento e il tipo di cemento, e dalle modalità di lavorazione e messa in opera.

Il rapporto acqua/cemento definisce la porosità dell'impasto. All'aumentare del rapporto a/c, aumenta la porosità e diminuisce la resistenza meccanica. Viceversa, con bassi rapporti a/c si possono ottenere notevoli aumenti di resistenza meccanica e di penetrazione degli agenti aggressivi.

È fondamentale il ruolo della messa in opera, dalla miscelazione, al trasporto alla corretta messa in opera del calcestruzzo garantendo una buona compattazione e l'eliminazione delle bolle d'aria. Successivamente, le cure fornite al getto in fase di maturazione consentiranno di raggiungere i livelli di resistenza previsti.

È necessario controllare temperatura e umidità per promuovere l'idratazione del cemento per tutto il periodo necessario. I metodi utilizzati per la stagionatura del calcestruzzo prevedono di coprire il getto con teli impermeabili per evitare l'evaporazione dell'acqua, di innaffiare il getto e di rimuovere le casseforme dopo un tempo prolungato.

Secondo le norme tecniche per le costruzioni [18] il calcestruzzo viene classificato in base al valore della resistenza caratteristica a compressione a 28 giorni. I calcestruzzi vengono suddivisi in classi in base a tale valore. La resistenza del calcestruzzo viene misurata attraverso prove di compressione monoassiale su campioni di forma e dimensioni standardizzate. Si ottengono curve sforzo-deformazione dalle quali è possibile comprendere il comportamento del materiale.

I calcestruzzi sono caratterizzati da scarsa resistenza a trazione, che viene del tutto trascurata nel dimensionamento strutturale. È difficile effettuare prove dirette di trazione su calcestruzzo, per questo vengono realizzate prove di flessione o prove di trazione indiretta.

Il superamento della resistenza a trazione, generato da sforzi interni (dovuti a sollecitazioni meccaniche o movimenti impediti da vincoli esterni o interni) al

calcestruzzo, può provocarne la fessurazione. Si può affermare che la formazione di fessure di piccola apertura sia del tutto fisiologica nel calcestruzzo. [12]

Le fessure del calcestruzzo sono la via d'accesso preferenziale per l'ingresso di sostanze in grado di provocare il degrado del calcestruzzo e delle armature disposte al suo interno (come descritto al paragrafo 2.4).

2.2 Calcestruzzi ad elevate prestazioni

Con un'accurata progettazione dell'impasto per quanto riguarda i componenti e le loro proporzioni e con le dovute attenzioni nella messa in opera, è possibile ottenere calcestruzzi ad elevate prestazioni.

I calcestruzzi ad alte prestazioni (HPC, High Performance Concrete) presentano un netto miglioramento di una o più caratteristiche grazie alla cura con cui vengono selezionati, proporzionati e miscelati i componenti. [13]

Vengono confezionati utilizzando cemento Portland con elevati dosaggi (circa 400-500 kg/m³) con aggiunte pozzolaniche o d'altoforno e un basso rapporto acqua-legante per poter sviluppare una microstruttura dalla bassissima porosità e resistenze meccaniche molto elevate (comprese tra 70 e 150 MPa). Si utilizzano additivi superfluidificanti per garantire i requisiti di lavorabilità.

L'affinamento della struttura dei pori capillari consente di ridurre la penetrazione degli agenti aggressivi che implica migliore durabilità dell'impasto.

Rispetto ai calcestruzzi ordinari il comportamento meccanico è legato sia alle caratteristiche della matrice cementizia, sia dell'aggregato. La rottura di questi materiali non è più intergranulare come nei calcestruzzi ordinari, ma intragranulare con superficie di rottura liscia.

I controlli di qualità durante la messa in opera svolgono un ruolo di fondamentale importanza. In particolare, la massima accuratezza deve essere utilizzata in fase di maturazione, periodo in cui si sviluppa la microstruttura che conferisce le proprietà finali richieste al materiale. È necessario garantire le condizioni di umidità atte a compensare l'evaporazione dell'acqua dall'impasto, provvedendo a integrare l'acqua consumata anche dal processo di idratazione.

2.3 Calcestruzzo fibrorinforzato

Il calcestruzzo fibrorinforzato viene definito dalla norma UNI 11039_01 come “un materiale composito costituito da calcestruzzo di base nel quale è inglobato un rinforzo fibroso diffuso ed omogeneamente distribuito”. [19]

Nell’ambito di calcestruzzi fibrorinforzati si possono distinguere:

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

Nei seguenti paragrafi si farà un accenno alle caratteristiche dei singoli componenti, al comportamento e alle proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato.

2.3.1 Caratteristiche delle fibre

Le fibre possono essere realizzate con diversi materiali. Si distinguono fibre di acciaio, polimeriche e di carbonio.

Oltre che dal tipo di materiale, le fibre risultano caratterizzate dai seguenti parametri:

- Lunghezza delle fibre, l_f : distanza tra le estremità della fibra;

- Lunghezza di sviluppo delle fibre, l_d : lunghezza della linea d'asse della fibra;
- Diametro equivalente, d_f : diametro di un cerchio con area uguale all'area media della sezione trasversale della fibra;
- Rapporto d'aspetto: rapporto tra la lunghezza l_f e il diametro equivalente della fibra d_f ;
- Resistenza a trazione: tensione corrispondente alla massima forza di trazione sopportata dalla fibra;
- Modulo di elasticità.

2.3.1.1 Fibre di acciaio

La norma UNI 11037 definisce i requisiti delle fibre d'acciaio da utilizzare come rinforzo per elementi in calcestruzzo. [20]

Secondo quanto riportato nelle istruzioni del CNR DT204_2006, le fibre di acciaio hanno una lunghezza l_f compresa generalmente tra 6 mm e 70 mm e un diametro equivalente d_f compreso tra 0.15 mm e 1.20 mm. Il modulo di elasticità delle fibre di acciaio può essere assunto pari a 200 GPa per le fibre a basso ed alto contenuto di carbonio e 170 GPa per quelle di acciaio inox. [21]

Si classificano in base al processo produttivo, alla forma, al tipo di acciaio e in base alle caratteristiche meccaniche:

- Processo produttivo:
 - Filo trafilato (Tipo A);
 - Lamiera tagliata (Tipo B);
 - Altre fabbricazioni.
- Forma:
 - Rettilinee;

- Sagomate.
- Tipo di acciaio:
 - acciaio a basso contenuto di carbonio ($C \leq 0.20$, Tipo 1);
 - acciaio ad alto contenuto di carbonio ($C > 0.20$, Tipo 2);
 - acciaio inox (Tipo 3).
- Caratteristiche meccaniche:
 - Categoria R1;
 - Categoria R2;
 - Categoria R3.

La Tabella 2-1 indica la suddivisione in classi di resistenza meccanica delle fibre metalliche.

Diametro equivalente [mm]	Resistenza minima a trazione [N/mm ²]												Prova di piegamento alternato
	R1				R2				R3				tutte le classi
	1)		2)		1)		2)		1)		2)		assenza di rotture
R_m	$R_{p0.2}$	R_m	$R_{p0.2}$	R_m	$R_{p0.2}$	R_m	$R_{p0.2}$	R_m	$R_{p0.2}$	R_m	$R_{p0.2}$		
$0.15 \leq d_f < 0.50$	400	320	480	400	800	720	1080	900	1700	1360	2040	1700	
$0.50 \leq d_f < 0.80$	350	280	450	350	800	640	1040	800	1550	1240	2015	1550	
$0.80 \leq d_f \leq 1.20$	300	240	390	300	700	560	910	700	1400	1120	1820	1400	
1) Per fibre rettilinee													
2) Per fibre sagomate													

Tabella 2-1: Classi di resistenza delle fibre di acciaio. R_m e $R_{p0.2}$ rappresentano, rispettivamente, la resistenza a trazione (corrispondente al carico massimo) e la resistenza di scostamento dalla proporzionalità con un'estensione non proporzionale pari allo 0.2% della lunghezza di base dell'estensimetro [21]

2.3.1.2 Fibre polimeriche e di carbonio

Sono disponibili in commercio fibre polimeriche di acrilico, arammide, nylon, poliestere, polietilene e polipropilene, e fibre di carbonio. Alcuni esempi di fibre sono raffigurati in Figura 2.4.

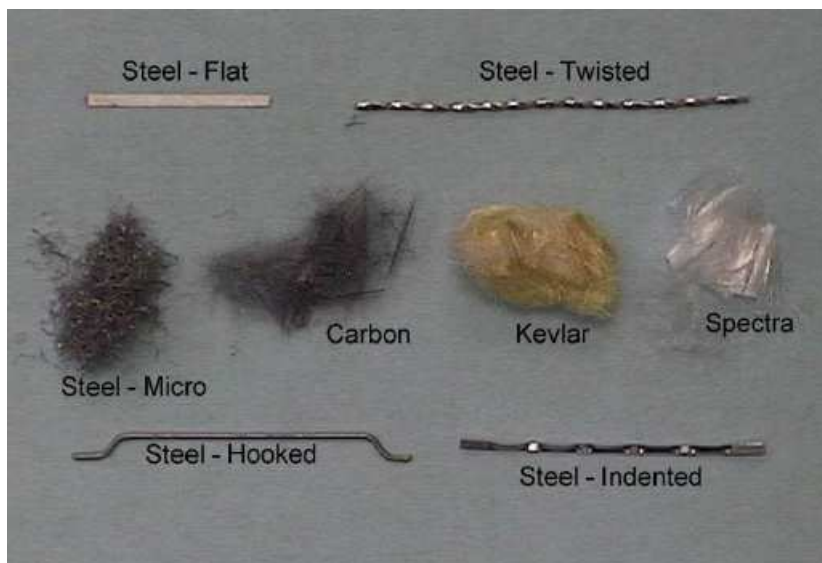


Figura 2.4: Tipologie di fibre [22]

Le fibre possono essere distinte in microfibre, con lunghezze contenute nell'ordine dei millimetri, e macrofibre con lunghezze fino a 80 mm. Valori tipici del rapporto d'aspetto sono compresi tra 100 e 500.

Nel caso di fibre non metalliche è necessario conoscere anche i valori di:

- Allungamento a rottura $\varepsilon = \Delta L/L$;
- Tensione allo 0,2 di deformazione residua.

Nella Tabella 2-2 sono indicate le caratteristiche delle fibre in commercio.

Tipo di fibra	Diametro equivalente [10^{-3} mm]	Densità [g/mm^3]	Resistenza a trazione [MPa]	Modulo di elasticità normale [MPa]	Deformazione ultima [%]
Acrilica	12,70-104,14	1,16-1,18	269-1000	13790-19306	7,5-50
Arammide I	11,94	1,44	2930	62055	4,4
Arammide II	10,16	1,44	2344	117215	2,5
Carbonio PAN HM	7,62	1,60-1,70	2482-3034	379914	0,60-0,70
Carbonio PAN HT	8,89	1,60-1,70	3447-3999	230293	1,00-1,50
Carbonio Pitch GP	9,91-12,95	1,60-1,70	483-793	27580-34475	2,00-2,40
Carbonio Pitch HP	8,89-17,78	1,80-2,15	1517-3103	151690-482650	0,50-1,10
Nylon	22,86	1,14	956	5171	20
Poliestere	19,81	1,34-1,39	227-1103	17237	12-150
Polietilene	25,40-1016	0,92-0,96	76-586	4999	3-80
Polipropilene	-	0,90-0,91	138-689	3447-4826	15
Polivinilcol	14,00-600	1,3	880-1600	25000-40000	6-10

Tabella 2-2: Caratteristiche fibre in commercio [21]

2.3.2 Caratteristiche della matrice

La matrice di un calcestruzzo fibrorinforzato è costituita da materiale cementizio, che sia calcestruzzo o malta.

Le caratteristiche della matrice sono le stesse di quelle utilizzate per calcestruzzi ordinari o ad alte prestazioni descritte al paragrafo 2.1. Inoltre, la granulometria della matrice deve garantire un buon accoppiamento con le fibre ed una buona lavorabilità dell'impasto, caratteristiche che possono essere ottenute aumentando la frazione fine.

2.3.3 Proprietà del calcestruzzo fresco e indurito

Le proprietà reologiche del calcestruzzo fibrorinforzato dipendono dalle caratteristiche di lavorabilità della matrice ma soprattutto, per FRC, dalla natura delle fibre, dal loro dosaggio e dalla loro geometria.

La presenza di fibre riduce la lavorabilità che può essere migliorata mediante interventi sulla composizione, quali l'aumento della frazione fine e/o la riduzione del diametro massimo dell'aggregato, e con l'aggiunta di additivi fluidificanti.

Inoltre, la lunghezza delle fibre deve essere correlata alle dimensioni minime degli elementi da realizzare. [21]

Le fibre devono presentare una distribuzione omogenea all'interno dell'impasto. Se non si effettua una corretta miscelazione si può incorrere nella formazione di accumuli/grovigli di fibre, fenomeno noto come *fiber-balling*. La loro presenza può provocare occlusioni tali da rendere difficoltose le operazioni di pompaggio.

Per ridurre l'eventualità che si manifesti questo problema, prima dell'inserimento delle fibre possono essere utilizzati sistemi per la setacciatura delle stesse, noti come sbrogliatori. [22]

La fase di getto è comunque molto delicata: si deve evitare la segregazione delle fibre e garantire una buona compattazione.

L'ampiezza delle fessure dovute al ritiro in fase plastica e al ritiro idraulico è ridotta per la presenza delle fibre.

Non vengono invece alterate la resistenza ai cicli gelo/disgelo e il fenomeno della carbonatazione.

2.3.4 Comportamento meccanico del calcestruzzo fibrorinforzato

L'aggiunta di fibre alla matrice cementizia ne modifica le proprietà meccaniche. In particolare, migliora il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure, la tenacità, la durabilità, nonché la resistenza all'urto (resilienza), alla fatica e all'abrasione della matrice cementizia. [21] [22]

Le fibre sono in grado di ridurre la fragilità del materiale, ma non viene sostanzialmente alterato il comportamento in compressione, che può essere assimilato a quello della matrice non rinforzata. [21] Pertanto, si analizzeranno i cambiamenti relativi al comportamento a trazione.

Il comportamento di un calcestruzzo ordinario, che presenta un comportamento fortemente degradante, può essere modificato in modo significativo dall'aggiunta di fibre, che risulta sempre più influenzato al crescere della percentuale volumetrica, V_f , delle fibre.

I calcestruzzi fibrorinforzati, una volta raggiunto il limite di resistenza a trazione, possono manifestare comportamento degradante, *strain-softening*, o incrudente, *strain-hardening*.

Il comportamento degradante è caratterizzato dalla localizzazione della deformazione in una sola fessura, per cui all'accumulo di deformazione irreversibile corrisponde una diminuzione dello sforzo.

Il comportamento incrudente è caratterizzato dall'insorgere di uno stato multi-fessurativo, per cui all'accumulo di deformazione plastica corrisponde un aumento dello sforzo.

Più nel dettaglio, e in riferimento alla Figura 2.5, si può osservare che la curva sforzo-deformazione, $\sigma - \varepsilon$, presenta un tratto iniziale pressoché lineare (tratto I) fino al punto di prima fessurazione (punto A), in seguito il materiale incrudisce con conseguente multi-fessurazione (tratto II) fino al punto di picco (punto B). Una volta raggiunto il picco, una delle fessure già formate diventa critica (localizzazione della fessura): da qui in poi il carico non può più aumentare, né si possono formare altre fessure. L'unica fessura che continua ad aprirsi è quella localizzata. Infine, la curva si completa con un tratto discendente (tratto III) fino alla rottura del materiale ed alla completa estrazione delle fibre per perdita di aderenza. [23] [22] [24]

A. E. Naaman e H. W. Reinhardt sostengono che il termine "prima fessurazione" è stato soggetto a molte discussioni e può essere interpretato in modi differenti. Infatti, può indicare il punto in cui si genera la prima fessura visibile, oppure il punto in cui si ha la deviazione dal tratto lineare iniziale nella curva sforzo-deformazione. [24]

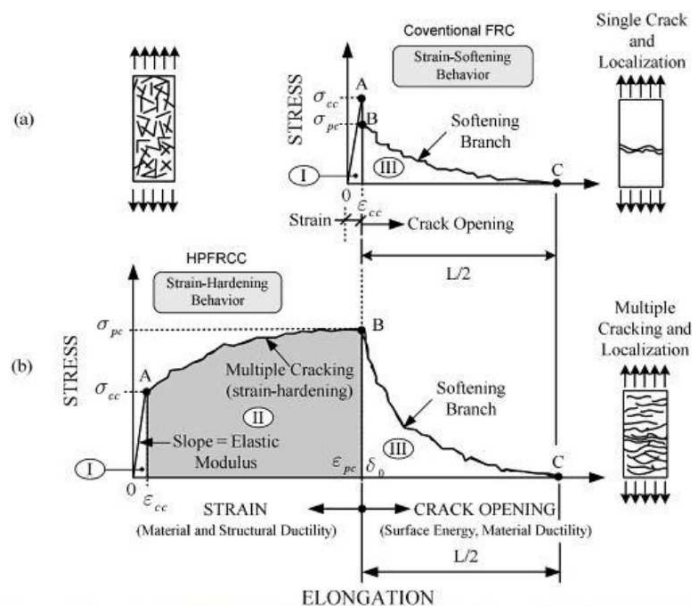


Figura 2.5: Comportamento dei calcestruzzi fibrorinforzati [25]

Per piccole percentuali volumetriche di fibre (circa 0.2-2%) il legame carico-spostamento a trazione di un FRC presenta ancora un ramo discendente (comportamento degradante), ma è caratterizzato da una resistenza residua e da una maggiore tenacità Figura 2.6 (a). Per percentuali volumetriche di fibre superiori (circa 2-8%), il comportamento può diventare incrudente, grazie alla comparsa di una multi-fessurazione Figura 2.6 (b). [21]

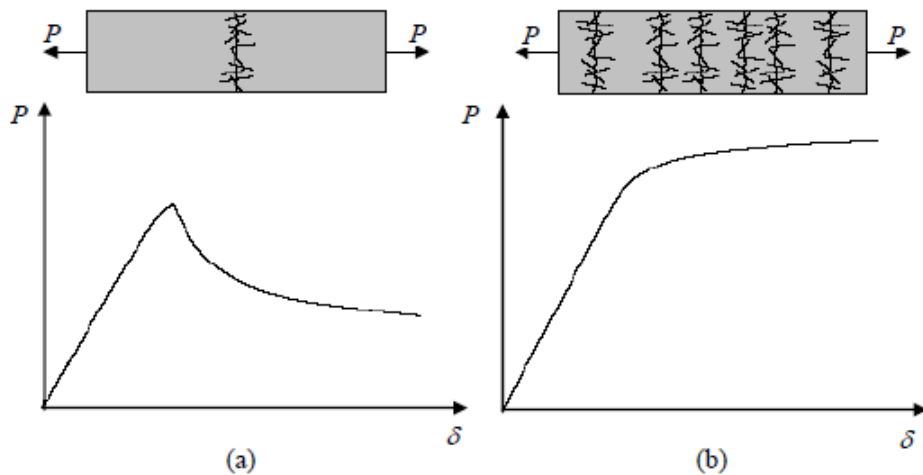


Figura 2.6: Curva carico P - spostamento δ per conglomerati fibrorinforzati caratterizzati da: basse percentuali di fibre (a) e alte percentuali di fibre (b). [21]

Le fibre manifestano il loro contributo a fessurazione avvenuta, conferendo al calcestruzzo una resistenza post fessurazione assente nella matrice senza fibre, [21] motivo per cui nei calcestruzzi ordinari si trascura il contributo del calcestruzzo teso. [26]

Grazie alla collaborazione delle fibre, il calcestruzzo è ancora in grado di sostenere uno sforzo di trazione dopo la formazione della prima fessura: le fibre contribuiscono alla trasmissione degli sforzi tra i vari conci della matrice fessurata (effetto ponte) e limitano la formazione e la propagazione delle fessure stesse. Il collasso del materiale si ha per sfilamento delle fibre rispetto la matrice cementizia; attraverso un principio di gerarchia delle resistenze, infatti, si può dimensionare il meccanismo di sfilamento delle fibre in modo tale che sia più debole della rottura delle stesse. [26]

Nella Figura 2.7 si riporta la propagazione di una fessura, in particolare è possibile distinguere 4 zone:

- zona micro-fessurata;
- zona di crescita della fessura;
- zona in cui si sviluppa l'effetto ponte delle fibre;
- zona priva di sforzi.

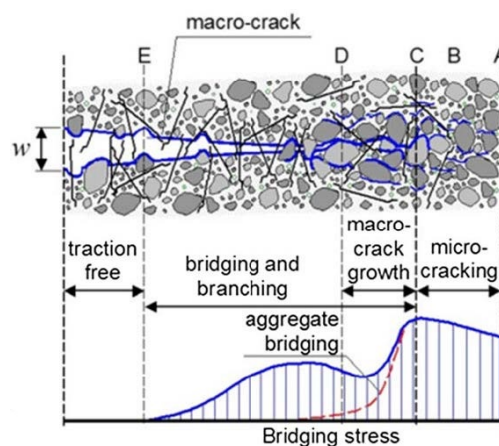


Figura 2.7: Propagazione della fessura [27]

La multi-fessurazione implica un'elevata capacità di deformazione, migliore duttilità [28], maggiore tolleranza al danno [29] e capacità di dissipazione dell'energia. [30]

Secondo le disposizioni del CNR [21], le proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato devono essere verificate opportunamente.

Per questo scopo si distinguono due tipi di caratterizzazione del fibrorinforzato indurito: una basata sulle proprietà nominali, determinate su provini normalizzati, realizzati e maturati in condizioni controllate, mediante prove standard di laboratorio l'altra sulle proprietà strutturali, riferite al materiale prelevato in opera.

La forza di estrazione specifica, Q , può essere ricavata dall'equilibrio in direzione normale alla superficie di frattura, assumendo le fibre parallele a tale direzione.

$$Q = n_f \cdot \pi \cdot d_f \cdot l_b \cdot \tau_m = \omega \cdot \frac{V_f}{A_f} \cdot \pi \cdot d_f \cdot l_b \cdot \tau_m = \omega \cdot \frac{V_f}{d_f} \cdot \pi \cdot l_f \cdot \tau_m$$

Equazione 1: Relazione per il calcolo della forza di estrazione specifica delle fibre

In cui:

- n_f , numero di fibre presenti sull'unità d'area della superficie di rottura;
- d_f , diametro equivalente della fibra;
- $l_b = l_f/4$, lunghezza di ancoraggio convenzionale di ciascuna fibra;
- τ_m , sforzo tangenziale medio d'aderenza;
- V_f , frazione volumetrica delle fibre;
- A_f , l'area della sezione retta della singola fibra.

L'equazione Equazione 1 non tiene conto di fattori quali forma della fibra, l'interfaccia fibra-matrice, la direzione del getto, le modalità di miscelazione e compattazione del calcestruzzo fresco che influenzano la dispersione delle fibre nella matrice ed il loro orientamento. Pertanto, poiché essa rappresenta solo un valore approssimato, è preferibile determinare sperimentalmente una curva sforzo-apertura di fessura, $\sigma_N - w$, mediante prove di trazione uniassiale o di flessione.

2.3.5 Classificazione dei calcestruzzi fibrorinforzati

I calcestruzzi ordinari vengono classificati in base alla resistenza a compressione. Ma poiché la peculiarità dei calcestruzzi fibrorinforzati è la resistenza a trazione, è logico introdurre una classificazione basata su tali valori di resistenza.

Secondo A. E. Naaman e H. W. Reinhardt per introdurre questa classificazione è importante definire alcuni parametri che rispondano alle domande: qual è il livello

minimo di trazione? Qual è la minima deformazione corrispondente al valore di picco dello sforzo? Qual è il modulo elastico minimo? [24]

La vera sfida è determinare il valore minimo di deformazione.

Per fare ciò si fa riferimento alle deformazioni di un elemento inflesso, pertanto si considera lineare il diagramma sforzo-deformazione per le condizioni di esercizio.

Allo snervamento l'acciaio delle barre d'armatura ha un valore di deformazione di circa $\varepsilon_y = 0.002$. tuttavia, la rottura insorge per livelli ben superiori a tale valore. Pertanto, l'FRC dovrebbe garantire un livello di deformazione superiore. A. E. Naaman e H. W. Reinhardt propongono un valore di deformazione in corrispondenza del picco pari a $\varepsilon_{pc} = 0.005$, assicurando che il materiale contribuisca alla resistenza e alla duttilità, garantendo la multi-fessurazione.

Visto che le coordinate del punto di prima fessurazione non sono sempre facili da determinare, un procedimento alternativo permette di indicare il valore minimo del modulo elastico. [24]

Alla luce di queste considerazioni, di numerose prove sperimentali e di modellazione di elementi in FRC, A. E. Naaman e H. W. Reinhardt sostengono che i parametri utili alla caratterizzazione dei calcestruzzi fibrirrinforzati siano:

- Sforzo e deformazione di prima fessurazione ($\varepsilon_{cc}; \sigma_{cc}$);
- Sforzo e deformazione di picco ($\varepsilon_{pc}; \sigma_{pc}$).

Di seguito vengono elencati i parametri riassunti in Figura 2.8:

- Classificazione in base alla resistenza. I calcestruzzi fibrirrinforzati vengono suddivisi classi in base al valore della massima tensione di trazione dopo la rottura (post-cracking), σ_{pc} . Le classi vengono definite per mezzo di un codice alfanumerico in cui T sta per "tensile" e il numero indica il valore di σ_{pc} espresso in MPa. Per esempio, la classe T-5 garantisce $\sigma_{pc} = 5$ MPa.

- Deformazione minima di picco. La capacità di deformazione minima dopo il picco è superiore a 0.005. Essendo questo valore superiore alla deformazione di snervamento delle armature, si garantisce che i compositi FRC con comportamento incrudente contribuiranno al controllo delle fessurazioni durante il servizio, nonché alla duttilità, all'assorbimento dell'energia e alla massima resistenza degli elementi.
- Modulo elastico minimo. Il valore del modulo tangente è di 10.500 MPa. Definendo il modulo elastico minimo non è necessario definire i valori di sforzo e deformazione di prima fessurazione.
- Livello di confidenza. Per tenere conto della variabilità statistica si assume un livello di confidenza al 90%.
- Dimensioni del campione. Devono essere definite le dimensioni dei provini per realizzare delle prove standardizzate.
- Resistenza di fessurazione e post-fessurazione. Per eliminare le ambiguità all'interno di una classe di resistenza sono necessarie maggiori informazioni riguardo la resistenza di fessurazione e post-fessurazione, in modo da distinguere un FRC con $\sigma_{pc} = 5,5$ MPa e un altro con $\sigma_{pc} = 9,9$ MPa assegnati entrambi alla classe T-5.

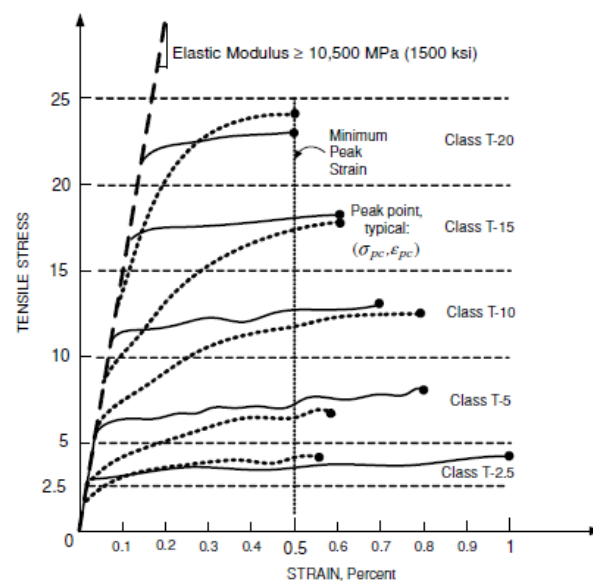


Figura 2.8: Classificazione FRC [24]

Come accennato al paragrafo 2.3.4 le fibre hanno un'influenza marginale sul comportamento di elementi non fessurati poiché i meccanismi resistenti prodotti dalle esse si sviluppano solamente dopo la rottura della matrice del calcestruzzo.

Un parametro progettuale importante per le strutture in calcestruzzo fibrorinforzato è la resistenza a trazione residua (post-cracking), definita anche come tenacità. Di Prisco et al. [31] introducono una classificazione basata sulle proprietà nominali della resistenza a trazione di post-fessurazione, determinate mediante prove di flessione secondo la norma UNI EN 14651 [32].

A causa delle difficoltà di esecuzione delle prove a trazione uniassiali su calcestruzzo, la resistenza a trazione è studiata con prove di flessione. Tuttavia, il comportamento a trazione è notevolmente differente, tanto che materiali per i quali si ottiene comportamento degradante con prove di trazione uniassiale possono presentare comportamento incrudente con prove di flessione (Figura 2.9).

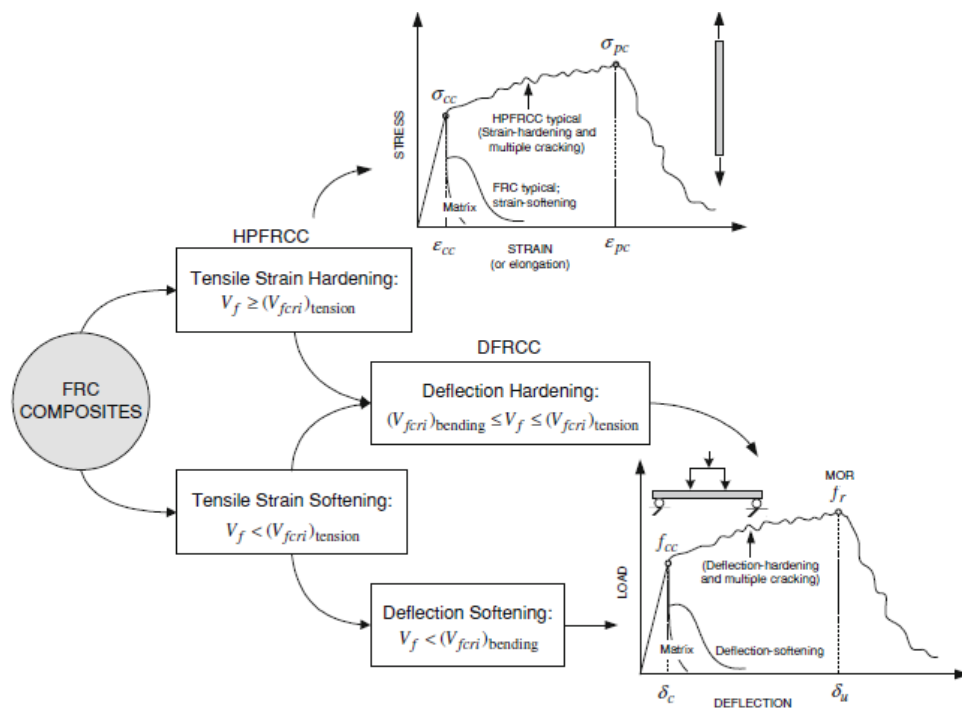


Figura 2.9: Comportamento FRC indagato con prove di trazione uniassiale o di flessione [31]

La resistenza di post-cracking varia con l'aumentare della deformazione o dell'apertura di fessura. Pertanto, è bene considerare due valori di deformazione: uno significativo per le verifiche in esercizio e uno per le verifiche in condizioni

ultime. Tuttavia, la norma europea [32] indica quattro valori di resistenza residua (f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} , f_{R4}), corrispondenti a diversi valori di Crack Mouth Opening Displacement (CMOD = 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm, rispettivamente) del campione.

La gestione di quattro valori di resistenza potrebbe destare confusione in fase di progettazione. Quindi, di Prisco et al. ipotizzano che f_{R1} possa essere utilizzato per le verifiche in esercizio e f_{R3} per le verifiche in condizioni ultime. Il rapporto f_{R1}/f_{R3} correla il comportamento in condizioni di esercizio e ultime.

Sulla base di questo, la tenacità può essere classificata con una coppia di parametri: il primo indica la classe di resistenza espressa attraverso il valore caratteristico f_{R1k} ; il secondo individua il rapporto f_{R1}/f_{R3} ed è indicato con una lettera.

Le classi di resistenza variano tra 1 e 8 Mpa. La lettera corrisponde a:

$$\text{"a"} \rightarrow 0.5 < \frac{f_{R1K}}{f_{R3K}} < 0.8$$

$$\text{"b"} \rightarrow 0.8 < \frac{f_{R1K}}{f_{R3K}} < 1.1$$

$$\text{"c"} \rightarrow 1.1 < \frac{f_{R1K}}{f_{R3K}} < 1.4$$

$$\text{"d"} \rightarrow 1.4 \leq \frac{f_{R1K}}{f_{R3K}}$$

Per esempio, un materiale con $f_{R1}=2.2$ MPa e $f_{R3}=1.8$ MPa è classificato come "2b".

2.3.6 Influenza dell'orientamento delle fibre

La letteratura che si occupa di questo campo è piuttosto vasta. Di seguito si vogliono citare solamente alcune osservazioni proposte da [23] e [33].

Alcune prove sperimentali condotte presso il Politecnico di Milano mostrano l'influenza dell'allineamento delle fibre sul comportamento del calcestruzzo fibrorinforzato. I risultati di prove DEWS (Double Edge Wedge Splitting) mostrano come provini con fibre ortogonali alle fessure presentano un comportamento incrudente, mentre quelli con fibre parallele presentano comportamento degradante. [23]

L. Ferrara, N. Ozyurt e M. di Prisco hanno studiato l'influenza dell'orientamento delle fibre sul comportamento di HPFRC. [33]

Possono essere ottenute prestazioni meccaniche elevate anche con contenuti di fibre relativamente bassi (circa l'1% in volume) se si governa l'orientamento delle fibre nel calcestruzzo attraverso la corretta definizione delle proprietà allo stato fresco e la tecnica di miscelazione.

Allineando le fibre nella direzione delle tensioni applicate durante l'esercizio dell'elemento strutturale, si ottiene un comportamento incrudente anche con ridotte percentuali di fibre. Questo approccio è vantaggioso anche dal punto di vista dei costi, minori per il basso contenuto di fibre, per la facilità di miscelazione e di messa in opera, aprendo così la strada alla diffusione su larga scala.

2.4 Degradamento delle opere in calcestruzzo armato

Qualsiasi struttura è sottoposta, dalla sua realizzazione alla sua demolizione, ad un insieme di azioni che conducono a un progressivo decadimento delle prestazioni della stessa, in seguito alle alterazioni subite dai materiali che la compongono.

Le norme odierne richiedono al progettista di tenere conto dell'evoluzione nel tempo del degrado dei materiali e degli effetti che esso ha sulle prestazioni della struttura.

Tuttavia, in un tempo non troppo lontano si pensava che le opere in calcestruzzo armato fossero immuni al degrado. A partire dagli anni Ottanta, a causa dell'aumento dei casi di degrado, si è compresa l'importanza di prevenire il degrado del calcestruzzo e, soprattutto, la corrosione delle armature. [1]

La definizione di durabilità viene introdotta nel contesto normativo con le NTC 2008 e ripresa dalle successive NTC 2018. Con esse la durabilità entra a far parte dei principi fondamentali per la progettazione e l'esecuzione. [1]

Secondo le NTC 2018 il livello di durabilità deve essere adeguato alle peculiarità di ogni singolo progetto e deve essere conseguito progettando la costruzione e la specifica manutenzione affinché il degrado subito dalla struttura durante la sua vita utile non riduca le prestazioni al di sotto del livello previsto.

Questo requisito deve essere soddisfatto, tenendo conto delle condizioni ambientali, attraverso la scelta opportuna di materiali, dettagli costruttivi che, ove possibile, consentano l'ispezionabilità, il dimensionamento corretto delle strutture, la pianificazione delle misure di protezione e manutenzione, l'adozione di sistemi di controllo, ecc. [18]

In questi paragrafi si vogliono introdurre i principali meccanismi che portano al degrado le costruzioni in calcestruzzo armato, poiché, una volta a conoscenza delle cause, si possano capire le strategie che tentano di porre rimedio a questi problemi.

L'azione che l'ambiente esercita sulle opere in calcestruzzo armato può essere di natura fisica, chimica, biologica o meccanica.

La causa più frequente di degrado delle opere in calcestruzzo armato è la corrosione delle armature dovuta all'azione dell'ambiente o al deterioramento del calcestruzzo che provoca in un secondo tempo la corrosione delle armature stesse.

2.4.1 Degrado del calcestruzzo

Il degrado del calcestruzzo può essere dovuto ad errori in fase di progettazione e di esecuzione e/o all'azione dell'ambiente.

Nel primo caso si parla di degrado precoce che si manifesta entro i primi giorni o a poche settimane dal getto. Il secondo si manifesta in tempi più lunghi, avanzando progressivamente dalla superficie verso l'interno del calcestruzzo.

Il **degrado precoce** è attribuibile a errori progettuali, dovuti a un'errata considerazione delle azioni presenti nei primi tempi dopo il getto, o costruttivi, dovuti a una non corretta posa in opera e stagionatura, fondamentali per prevenire la fessurazione prematura.

I fenomeni potenzialmente critici, che possono indurre tensioni all'interno della matrice cementizia con conseguente fessurazione, sono i seguenti:

- Ritiro contrastato;
- Assestamento plastico;
- Sviluppo del calore di idratazione;
- Gelo precoce.

Il ritiro contrastato, che si sviluppi a poche ore dal getto (ritiro plastico) o a stagionatura avvenuta (ritiro igrometrico), è responsabile dell'insorgenza di tensioni tali da causare la fessurazione del calcestruzzo.

L'assestamento del calcestruzzo dopo la messa in opera può indurre fessurazioni, specialmente nelle zone vicino alle armature.

Il calore di idratazione può determinare un riscaldamento maggiore al centro del getto rispetto alla superficie. Ciò può generare tensioni in grado di fessurare il materiale.

Il congelamento dell'impasto nelle prime ore dopo il getto può provocare danni importanti, fino alla completa disgregazione del conglomerato.

Questi processi favoriscono la penetrazione degli agenti aggressivi e rendono la struttura più vulnerabile all'azione dell'ambiente. [1]

La matrice del calcestruzzo può essere soggetta ad **attacco gelo-disgelo** dal momento che l'acqua contenuta nei pori del calcestruzzo, se esposta a basse temperature, può congelare.

Con il passaggio allo stato solido aumenta il suo volume (circa 9%), generando sforzi di trazione che possono condurre alla disgregazione del materiale.

Se il calcestruzzo è a contatto con acque o terreni contenenti ioni solfato, si può produrre il cosiddetto **attacco solfatico**.

Quando i solfati reagiscono con i costituenti della matrice cementizia danno luogo a prodotti espansivi che producono rigonfiamenti, fessure e disgregazione del calcestruzzo.

L'attacco solfatico si articola in tre stadi: penetrazione degli ioni solfato all'interno della matrice cementizia; reazione tra ioni solfato e idrossido di calcio con

formazione di gesso; reazione del gesso con gli alluminati e formazione di ettringite.

Tra queste la reazione più pericolosa è legata alla formazione di ettringite che esercita la maggior azione espansiva, sia per l'accrescimento dei cristalli sia per l'assorbimento di acqua che causa ulteriore rigonfiamento.

Se vengono coinvolti i silicati di calcio che costituiscono il gel C-S-H, invece degli alluminati, si produce la thaumasite e si assiste alla trasformazione della pasta cementizia in un materiale incoerente.

Infine, si può manifestare la **reazione alcali-aggregati** in presenza di alcune tipologie di aggregato in grado di reagire con gli ioni Na^+ , K^+ e OH^- , con produzione di prodotti espansivi che provocano il danneggiamento del calcestruzzo.

La fessurazione si presenta distribuita casualmente e dalle fessure può fuoriuscire gel bianco. Un altro fenomeno legato alla reazione alcali aggregati è il pop-out, l'espulsione di porzioni tronco-coniche.

2.4.2 Degradazione delle armature

Le armature di acciaio all'interno del calcestruzzo sono protette dalla corrosione grazie alle condizioni di passività del metallo nella matrice cementizia.

In un calcestruzzo integro, la soluzione che si trova nei pori del calcestruzzo dopo la fase di idratazione contiene prevalentemente idrossidi di sodio e potassio, con concentrazione variabile in base al tipo di cemento. Presenta un pH tra 13 e 13,8, pertanto l'ambiente createsi nella matrice cementizia è alcalino. In queste condizioni l'acciaio delle armature è ricoperto da un film di passività e la velocità di corrosione risulta trascurabile.

Tuttavia, i rinforzi metallici degli elementi in calcestruzzo armato possono subire una corrosione indotta dal fenomeno della carbonatazione o dalla presenza di cloruri.

La corrosione può manifestarsi in varie forme, come: corrosione uniforme, localizzata, Pitting, dissoluzione selettiva e corrosione associata a sollecitazioni meccaniche. L'entità del danno prodotto dalla corrosione dipende dal modo in cui procede l'attacco.

La corrosione uniforme si manifesta su tutta la superficie del metallo, procedendo con velocità simile. La conseguenza di questo tipo di attacco è l'assottigliamento, più o meno uniforme, dell'elemento metallico. Non è la più pericolosa per via della contenuta velocità di penetrazione.

La corrosione localizzata si sviluppa quando l'esposizione all'ambiente o la geometria dell'elemento metallico non sono uniformi; in queste condizioni alcune parti della superficie possono corrodere più di altre.

La corrosione da Pitting riguarda i metalli con comportamento passivo sottoposti a particolari condizioni come la presenza di cloruri. L'attacco da Pitting può essere penetrante, con velocità di avanzamento elevata.

In caso di leghe si può verificare la dissoluzione selettiva, cioè un attacco che interessa solo un particolare costituente.

Possono verificarsi effetti sinergici tra corrosione e azione meccanica, come nel caso di corrosione sotto sforzo, fragilimento da idrogeno e corrosione-fatica.

Di seguito verrà descritto il meccanismo della corrosione, che comprende il processo elettrochimico, lo studio della termodinamica e della cinetica della corrosione, le condizioni di passività; infine verranno esposti il fenomeno della corrosione da carbonatazione e da cloruri.

2.4.2.1 Meccanismo elettrochimico, termodinamica e cinetica della corrosione

La corrosione che si manifesta sui metalli a contatto con ambienti umidi avviene con un meccanismo elettrochimico che prevede quattro processi, come schematizzato in Figura 2.10:

- Reazione anodica di ossidazione del metallo: dà luogo alla formazione dei prodotti di corrosione e rende disponibili gli elettroni nel reticolo cristallino del metallo;
- Reazione catodica di riduzione: si riduce una specie chimica presente in ambiente e vengono consumati gli elettroni prodotti con il processo anodico;
- Circolazione di corrente nel metallo: si genera corrente dal flusso di elettroni nel reticolo cristallino del metallo;
- Circolazione di corrente nell'ambiente: si produce un flusso dovuto alla migrazione degli ioni disciolti nella soluzione liquida a contatto con la superficie del metallo.

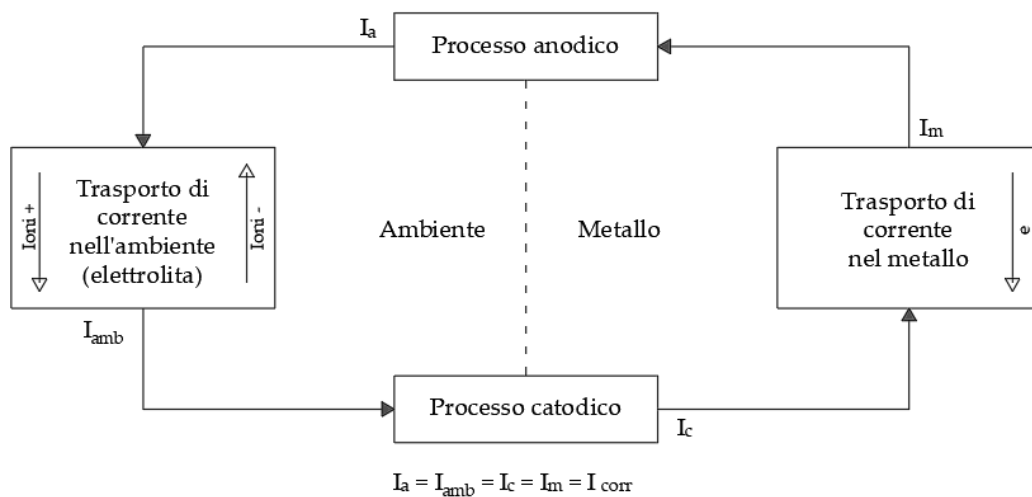


Figura 2.10: Meccanismo elettrochimico di corrosione

Il meccanismo elettrochimico della corrosione richiede il contemporaneo svolgimento della reazione anodica e catodica, che sono complementari: il numero di elettroni prodotti con la prima nell'unità di tempo, deve essere uguale al numero di elettroni consumati dalla seconda. Ne consegue che la corrente anodica, I_a , deve essere uguale alla corrente catodica, I_c , che devono essere uguali alla corrente circolante nel metallo, I_m , e nell'ambiente, I_{amb} . Il valore comune di queste correnti è la corrente del processo di corrosione, I_{corr} .

Le informazioni circa la possibilità che una reazione avvenga in una direzione definita, cioè informazioni sulla possibilità che un metallo subisca o meno la corrosione in un ambiente, sono date dalla termodinamica.

I parametri utilizzati sono i potenziali di equilibrio relativi al processo anodico e catodico. Il potenziale è una grandezza che può essere misurata con un voltmetro, utilizzando un elettrodo di riferimento, cioè un elettrodo sul quale avviene una reazione che possiede potenziale costante. I potenziali dipendono dal valore del pH.

Quando il potenziale, E , misurato è maggiore del potenziale di equilibrio, cioè quando si verifica la condizione $E > E_{eq}$, il metallo si può corrodere. In caso contrario, $E < E_{eq}$, il metallo è in condizioni di immunità.

Nel caso dei potenziali di equilibrio del processo anodico e catodico, la corrosione si può innescare se il potenziale di equilibrio del processo catodico è superiore a quello anodico:

$$E_{eq,a} < E_{eq,c}$$

Equazione 2: Condizione necessaria per l'innescamento della corrosione

L'Equazione 2 esprime una condizione necessaria ma non sufficiente in quanto i potenziali di equilibrio considerano solo aspetti termodinamici e non cinetici, che permettono di capire con che velocità si sviluppano i processi anodico e catodico.

Nello studio della corrosione sono particolarmente utili i *diagrammi di Evans* (Figura 2.11), che correlano il potenziale di un dato processo al logaritmo della densità di corrente, che permette di individuare la velocità di consumo del metallo.

Tracciando le *curve di polarizzazione* che descrivono i processi anodico e catodico, si individuano le condizioni di corrosione dall'intersezione delle due curve, cioè dal punto per cui:

- $E_a = E_c = E_{corr}$
- $i_a = i = i_{corr}$

E_{corr} è il potenziale di corrosione e i_{corr} è la velocità di corrosione. [1]

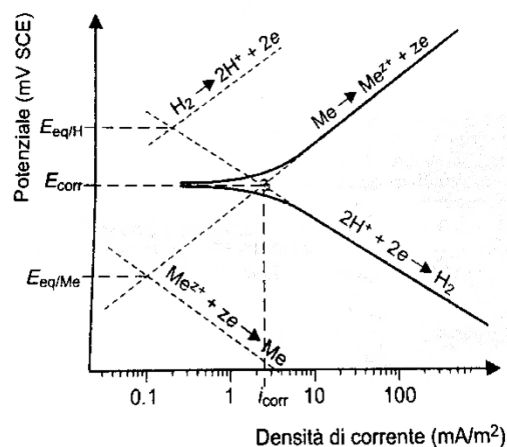


Figura 2.11: Esempio di diagrammi di Evans per lo studio delle condizioni di corrosione [1]

Passività

In alcuni metalli si possono instaurare condizioni di passività in determinate condizioni ambientali. In condizioni di passività il materiale presenta un'elevata resistenza alla corrosione: il metallo si ricopre di ossidi protettivi a formare un film che rendono trascurabile la velocità di corrosione.

Osservando la curva di polarizzazione per un materiale a comportamento attivo-passivo (Figura 2.12) si può notare un primo tratto caratterizzato da andamento attivo; raggiunti valori di potenziale tali per cui si forma il film di passività, la

corrente si riduce a valori trascurabili. Queste condizioni si mantengono per tutto l'intervallo di passività, oltre al quale la densità di corrente cresce nuovamente.

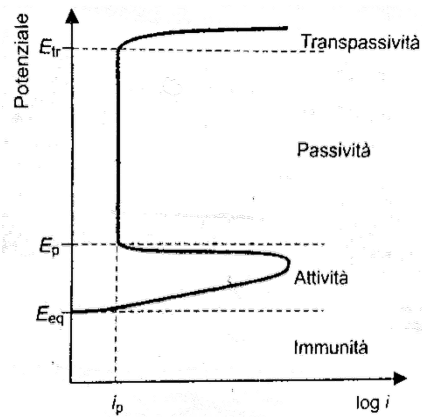


Figura 2.12: Curva di polarizzazione di un materiale a comportamento attivo-passivo [1]

I diagrammi di Pourbaix (Figura 2.13), diagrammi potenziale-pH, descrivono il comportamento di un metallo in un ambiente, individuando i domini di immunità, corrosione, passività. [1]

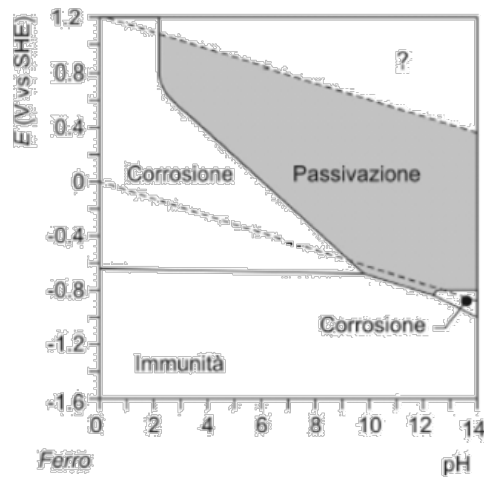
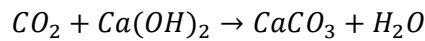


Figura 2.13: Diagramma Pourbaix semplificato [1]

2.4.2.2 Carbonatazione

L'anidride carbonica presente in atmosfera può reagire con i composti alcalini presenti nella soluzione contenuta nei pori del calcestruzzo.

Tale reazione, nota come reazione di carbonatazione, fa diminuire il pH fino a valori prossimi alla neutralità, per cui l'acciaio delle armature non è più in condizioni di passività.



Equazione 3: Reazione di carbonatazione

La carbonatazione interessa la superficie dell'elemento strutturale e progressivamente penetra all'interno di esso. La corrosione si innesca quando il fronte di carbonatazione ha raggiunto lo spessore del copriferro, ossia ha raggiunto la superficie delle armature.

L'innesco della corrosione è un momento critico: da questo momento in poi l'acciaio si corrode con una velocità dipendente dalle condizioni ambientali.

La velocità di carbonatazione aumenta all'aumentare della disponibilità di anidride carbonica nell'atmosfera, mentre la velocità di corrosione dipende dalla disponibilità di ossigeno e acqua sulla superficie dell'acciaio.

La Figura 2.14 riporta la legge che descrive la velocità di avanzamento del fronte di carbonatazione all'interno del calcestruzzo. Nello schema sottostante si evidenzia il raggiungimento del fronte di carbonatazione a livello delle armature.

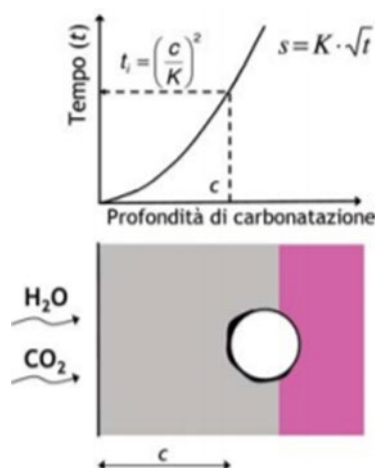


Figura 2.14: Velocità di avanzamento del fronte di carbonatazione. Raggiungimento del fronte di carbonatazione a livello delle armature (in rosa in calcestruzzo ancora alcalino)

Dopo l'innesco si ha la propagazione, periodo che si prolunga da quando l'armatura è depassivata fino al raggiungimento di condizioni non più tollerabili. La forma di corrosione prodotta dalla carbonatazione è generalizzata. [1]

La Figura 2.15 mostra l'evoluzione nel tempo del degrado di una struttura in calcestruzzo armato dovuto alla corrosione da carbonatazione.

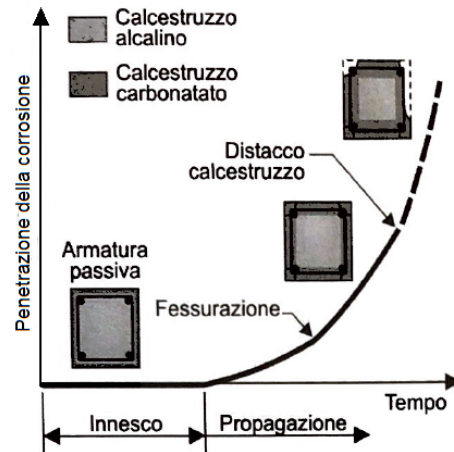


Figura 2.15: Evoluzione nel tempo del degrado di una struttura in calcestruzzo armato dovuto a corrosione da carbonatazione [1]

2.4.2.3 Cloruri

Una grave forma di corrosione che può colpire i metalli dal comportamento attivo-passivo (Figura 2.16) è il pitting, che provoca la rottura localizzata del film di passività.

Questo tipo di attacco si verifica in presenza di specie, come i cloruri, in grado di intaccare il film di passività.

L'innesco avviene una volta raggiunto il tenore critico di cloruri, valore che dipende dalle proprietà del materiale e dalle caratteristiche di esposizione ambientale.

Se l'ambiente a cui è esposto il metallo contiene cloruri, allora la curva di polarizzazione è limitata superiormente dal potenziale di pitting E_{pit} , che

corrisponde al valore di potenziale in cui si raggiunge il contenuto critico di cloruri.

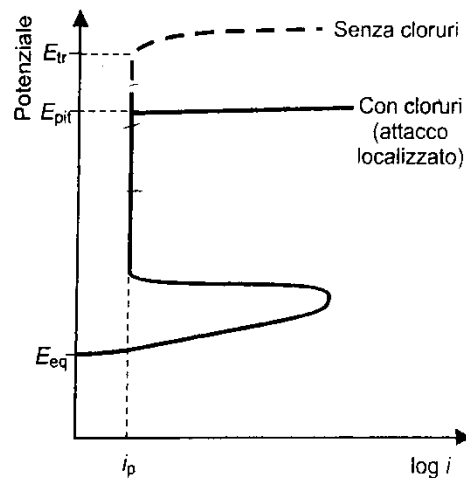


Figura 2.16: Curva di polarizzazione di un materiale attivo-passivo in un ambiente con cloruri

La penetrazione dei cloruri può essere descritta tramite un profilo che presenta elevati contenuti in superficie che decrescono a profondità maggiori. Il profilo dipende da molti fattori come le proprietà del calcestruzzo, il meccanismo di trasporto (che può essere una combinazione di meccanismi), la concentrazione di cloruri nell'ambiente.

Per via della molteplicità di parametri coinvolti e della natura complessa dei meccanismi di gioco, si utilizza un approccio semplificato per definire il profilo e la velocità di penetrazione.

La corrosione per pitting si innesca quando la penetrazione dei cloruri è tale da portare al raggiungimento del tenore critico alla superficie delle armature. A innesco avvenuto, l'attacco è fortemente localizzato e penetrante. Infatti, la zona anodica (dove si ha la rottura del film di passività) è molto piccola e circondata da una grande zona catodica (zona con film di passività integro). È noto che l'entità dell'attacco sull'area anodica aumenta al diminuire del rapporto tra le superfici

anodica e catodica: la densità di corrente anodica ha un valore elevato, quindi, la velocità di penetrazione dell'attacco è considerevole. [1]

La Figura 2.17 mostra gli effetti del raggiungimento del tenore critico dei cloruri in corrispondenza delle barre d'armature. Il grafico rappresenta il profilo del contenuto di cloruri. In rosso è definito il livello critico.

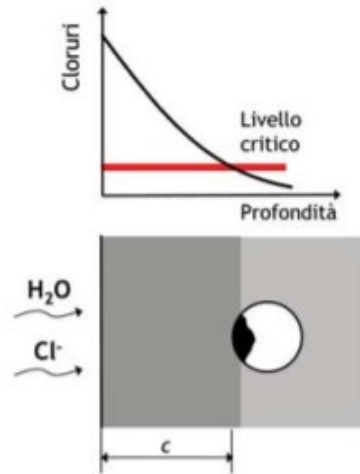


Figura 2.17: Raggiungimento del tenore critico di cloruri in corrispondenza delle barre d'armatura; Profilo del contenuto di cloruri.

2.5 Fenomeno del self-healing

Nonostante sia oggetto di ricerca solo degli ultimi decenni, la capacità di autorigenerazione del calcestruzzo è stata osservata per la prima volta nel 1836 [34]. In quell'anno la French Academy of Science pubblica delle ricerche che riguardano il fenomeno del self-healing applicato a strutture di contenimento dell'acqua e canali. [35] Emergono in questo modo le prime evidenze di self-healing autogeno, dovuto principalmente al prolungamento delle reazioni di idratazione. [36]

2.5.1 Classificazione

In primo luogo, è importante distinguere il termine "self-healing" da "self-sealing".

Il termine self-sealing, o self-closing, descrive un fenomeno per cui la fessura si richiude solo in superficie e non in profondità. È previsto il recupero della sola permeabilità del materiale danneggiato e non delle proprietà meccaniche.

Il termine self-healing si riferisce alla richiusura non solo superficiale, ma che ha origine in profondità della fessura. È possibile il recupero sia delle proprietà meccaniche, sia la riduzione della permeabilità. [35]

Il self-healing si distingue in autogeno e ingegnerizzato:

- Self-healing autogeno: si definisce tale la capacità del materiale di auto-ripararsi senza alcun intervento esterno. Le fessure si rimarginano per mezzo di componenti normalmente presenti nella non sono stati aggiunti intenzionalmente per sviluppare proprietà di healing; [37]
- Self-healing ingegnerizzato: si definisce tale la capacità del materiale di auto-ripararsi se promossa da aggiunte specificatamente progettate per indurre proprietà di healing. [38]

In molti hanno interpretato le differenze della natura del self-healing e hanno proposto varie classificazioni, molte delle quali sono state riassunte da Mihashi e Nishiwaki [39], in un lavoro del 2012 relativo allo stato dell'arte in ambito di calcestruzzi autoriparanti.

Il comitato tecnico per l'autoriparazione autogena dei materiali cementizi (JCI 2009) [40] ha proposto una classificazione in cui si riconosce l'esistenza di:

1. Rigenerazione naturale
2. Rigenerazione autonoma
3. Rigenerazione attivata.

Di queste, rigenerazione naturale (1) e autonoma (2) fanno parte della più ampia categoria della rigenerazione autogena (1+2). Tuttavia, la rigenerazione autonoma (2) può essere compresa anche nella categoria della rigenerazione ingegnerizzata (2+3), assieme alla rigenerazione attivata (3). La Figura 2.18 chiarisce quanto detto:

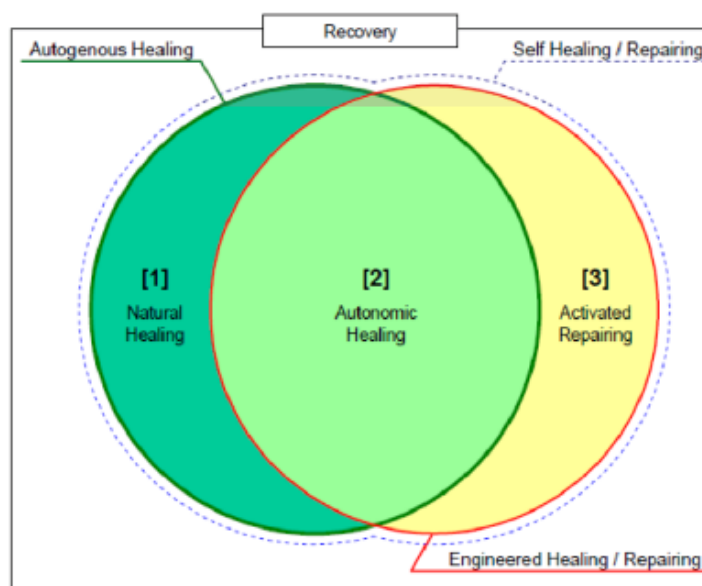


Figura 2.18: Definizione di self-healing/repairing [40]

De Rooij e Schlangen [41] nel loro report del RILEM Technical Committee 221-SHC, suddividono i fenomeni di autorigenerazione in base all'effetto ottenuto, che sia di "auto-chiusura" o di "auto-guarigione", e in base al tipo di processo da cui

il fenomeno scaturisce, che sia “autonomo” o “autogeno”. Da ciò nascono quattro categorie rappresentate in Figura 2.19:

1. Auto-richiusura autogena: il materiale stesso richiude la fessura, solitamente solo in superficie e non in profondità e/o per tutta la profondità della fessura.
2. Auto-guarigione autogena: il materiale stesso ripara la fessura, anche in profondità, recuperando in toto o in parte le proprietà iniziali.
3. Auto-richiusura autonoma: il materiale richiude la fessura, solitamente solo in superficie e non in profondità e/o per tutta la profondità della fessura, grazie ad aggiunte presenti nella sua matrice.
4. Auto-guarigione autonoma: il materiale ripara la fessura, anche in profondità, recuperando in toto o in parte le proprietà iniziali, grazie ad aggiunte presenti nella sua matrice.

		Action	
		Self-closing	Self-healing
Process	Autogenic	Autogenic self-closing	Autogenic self-healing
	Autonomic	Autonomic self-closing	Autonomic self-healing

Figura 2.19: Classificazione di self-healing concrete in base al report del RILEM Technical Committee 221 [41]

Tuttavia, le quattro categorie possono essere accorpate dando origine a due macrocategorie di fenomeni quali: self-healing, e self-repairing.

Il primo si distingue in auto-guarigione naturale, cioè che si manifesta spontaneamente, o ingegnerizzata, cioè che è stimolata dall'aggiunta di particolari sostanze al materiale. Il secondo in auto-riparazione, che sia attiva o passiva.

La Figura 2.20 presenta in modo schematico quanto esposto.

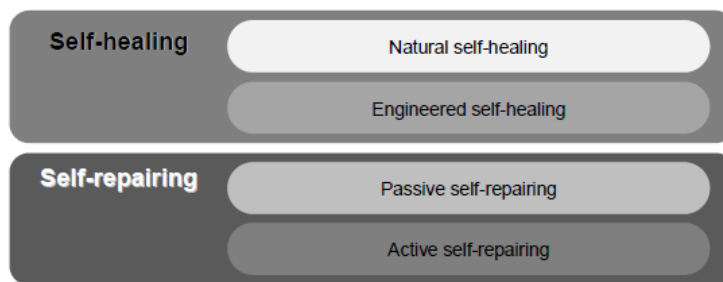


Figura 2.20: Definizione di self-healing e self-repairing [41]

2.5.2 Tecnologie

Nell'illustrare le tecnologie sviluppate ad oggi nell'ambito di calcestruzzi auto riparanti, si farà distinzione tra self-healing autogeno e ingegnerizzato.

2.5.2.1 Self-healing autogeno

Come già definito in precedenza, con il termine self-healing autogeno si fa riferimento al particolare fenomeno di auto-rigenerazione prodotto dal materiale costituente stesso, privo di aggiunte specifiche atte a promuovere la riparazione della fessura.

Molti studi, tra cui quelli di W. Ramm e M. Biscopig [42], C. Edvardsen [43] e N. Hearn e C. Morley [36] evidenziano che i principali meccanismi che favoriscono lo sviluppo di questo fenomeno sono:

1. Espansione del calcestruzzo ai lembi delle fessure;
2. Prosecuzione delle reazioni di idratazione del cemento;
3. Cristallizzazione del carbonato di calcio;
4. Chiusura delle fessure da parte di sedimenti trasportati dall' acqua;
5. Chiusura delle fessure mediante le particelle di calcestruzzo distaccatesi durante la formazione della fessura stessa.

I fattori che influiscono sulla capacità di auto-rigenerazione autogena possono essere suddivisi in cause fisiche, chimiche e meccaniche, come schematizzato in Figura 2.21.

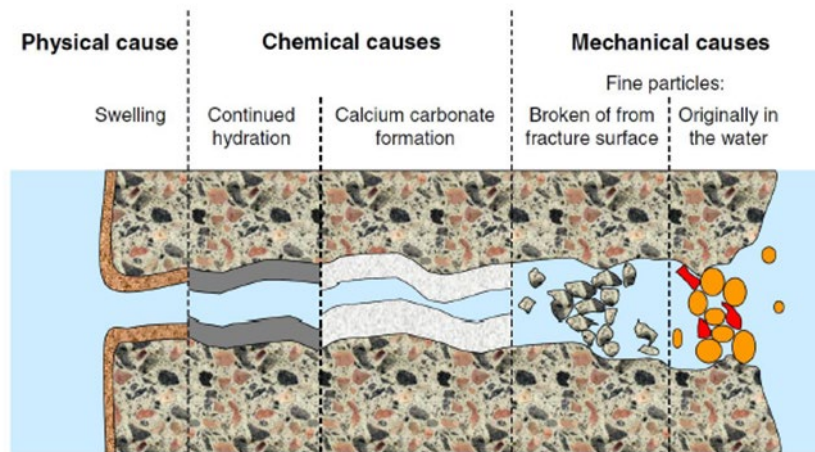


Figura 2.21: Cause che possono portare al self-healing autogeno [35]

L'espansione del calcestruzzo ai lembi della fessura si colloca tra le **cause fisiche**.

In condizioni di saturazione il calcestruzzo tende a rigonfiarsi, riducendo l'ampiezza della fessura. Tuttavia, si può affermare che questo fenomeno è poco rilevante, non affidabile e soprattutto reversibile. Infatti, in caso di evaporazione dell'acqua, il calcestruzzo torna alle sue dimensioni effettive, riportando i lembi della fessura alla loro collocazione iniziale. Inoltre, permette la chiusura solamente delle fessure di dimensioni molto ridotte.

La prosecuzione delle reazioni di idratazione del cemento e la cristallizzazione del carbonato di calcio si annoverano tra le **cause chimiche**.

Nella maggior parte dei calcestruzzi ordinari il 20-30% del cemento rimane anidro. La percentuale di particelle non idratate aumenta con il diminuire del rapporto acqua-cemento. Se le particelle non idratate entrano in contatto con acqua (in tutte le sue forme) si può sviluppare il meccanismo di idratazione ritardata. [5]

L'idratazione continuata, tuttavia, non può essere responsabile di una chiusura completa.

Si deve considerare anche l'età del calcestruzzo. Come è ben noto, il grado di idratazione procede nel tempo (Figura 2.22): presenta il massimo della velocità nei primi mesi dalla messa in opera, diminuendo gradualmente nel tempo. [12]

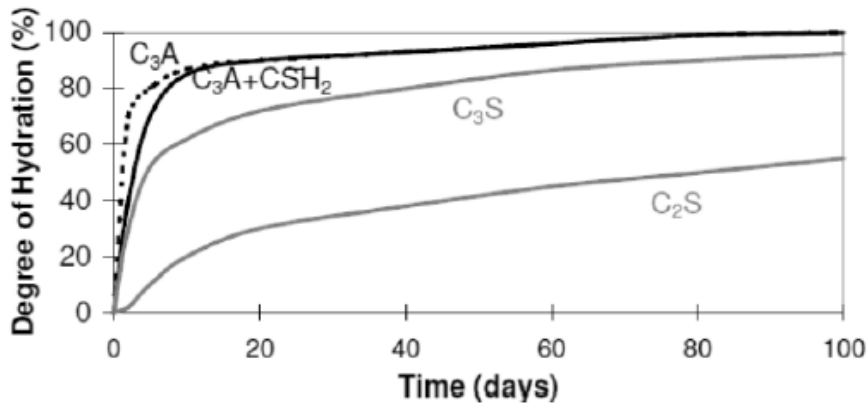
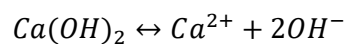


Figura 2.22: Andamento nel tempo dell'idratazione del cemento [44]

Può avvenire che, quando si rendono necessari i benefici dell'auto-rigenerazione, non siano disponibili particelle anidre. Secondo uno studio di N. Hearn e C. Morley i calcestruzzi con età maggiore di 26 anni non manifestano alcuna porzione non idratata. [36]

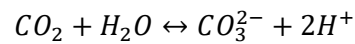
La cristallizzazione del carbonato di calcio avviene in seguito alla reazione tra ioni calcio e ioni carbonato.

Gli ioni calcio si rendono disponibili in seguito all'idratazione del calcestruzzo che produce idrossido di calcio secondo la seguente reazione:



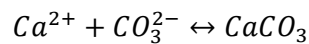
Equazione 4: Produzione di ioni calcio dall'idrossido di calcio formato con il processo di idratazione del cemento

L'anidride carbonica disciolta in acqua o presente in atmosfera rende possibile la formazione degli anioni carbonato secondo la seguente reazione:



Equazione 5: Formazione di ioni carbonato dall'anidride carbonica e acqua disciolte in atmosfera

Data la contemporanea presenza di cationi e anioni si sviluppa la reazione di carbonato di calcio che, precipitando ai lembi della fessura, ne promuove la richiusura:



Equazione 6: Razione di produzione del carbonato di calcio

C. Edvardsen [43] sostiene che, tra i meccanismi descritti, la principale causa sia proprio la cristallizzazione del carbonato di calcio. Sebbene nei calcestruzzi molto giovani il self-healing sia dovuto all'idratazione continuata, in quelli più datati la causa maggiormente riscontrabile è proprio la precipitazione del carbonato di calcio. [35]

Infine, si vogliono citare anche i meccanismi di **tipo meccanico**, tra cui vi sono la chiusura delle fessure da parte di sedimenti trasportati dall'acqua e la chiusura delle fessure mediante le particelle di calcestruzzo distaccatesi durante la formazione della fessura stessa.

Questi non rappresentano un vero e proprio meccanismo di auto-riparazione, in quanto le particelle di materiale depositato può essere incoerente e facilmente rimosso o asportato da fattori esterni.

Fattori che influenzano la capacità di auto-riparazione autogena

Esistono condizioni necessarie per permettere lo sviluppo del fenomeno del self-healing autogeno, che ne influenzano la capacità e che consentono di massimizzare la sua efficacia. [45] [22] [35]

- Presenza di acqua

La presenza di acqua è una condizione necessaria affinché si possa verificare il self-healing. Si è notato che al diminuire dell'umidità relativa, in particolare al di sotto del 95%, decresce l'efficacia del self-healing.

In assenza di acqua non si avrebbero le condizioni necessarie per l'innesco delle reazioni di idratazione e precipitazione del carbonato di calcio, cioè i meccanismi alla base dell'auto-rigenerazione autogena.

- Caratteristiche dell'acqua

Oltre ad essere fondamentale per il meccanismo di self-healing, l'acqua influenza l'efficacia della richiusura della fessura in base a velocità di flusso, pH e temperatura.

Se la velocità dell'acqua che fluisce all'interno della fessura è troppo elevata, non si ha il tempo necessario per la formazione e il deposito dei cristalli e/o si potrebbe avere il dilavamento degli stessi.

Per quanto riguarda il pH, è stato osservato che gli ambienti acidi riducono la capacità di auto-riparazione della fessura.

La temperatura consente di accelerare o rallentare la richiusura. È stato osservato che le basse temperature non favoriscono il self-healing.

- Ampiezza della fessura

L'ampiezza della fessura incide molto sulla capacità di auto-riparazione. I maggior indici di richiusura si ottengono con fessure di piccola entità, mentre con fessure molto ampie è difficile ottenere risultati rilevanti. Mantenendo nel tempo le condizioni favorevoli allo sviluppo del

meccanismo di self-healing è possibile ottenere il ripristino di fessure di apertura maggiore, anche se oltre un certo limite il fenomeno non continua a riproporsi. Non è ancora definibile tale limite. Tuttavia, è importante sottolineare che la curva dell'indice di richiusura ha un andamento a campana e presenta un picco per valori compresi tra 15-30 μm . Ciò significa che l'auto-rigenerazione è irrilevante anche per aperture inferiori. In questo caso l'ostacolo è proprio il piccolo spazio entro cui le molecole d'acqua non riescono a fluire con facilità. Per valori superiori a 30 μm si ottiene solamente una parziale richiusura della fessura.

- Stabilità della fessura

Oltre alle dimensioni, risulta importante anche la stabilità della fessura. In condizioni dinamiche, ossia variazione dell'ampiezza della fessura, tali variazioni provocherebbero il danneggiamento dei prodotti (di idratazione o cristallizzazione) o spostamento dei sedimenti.

- Composizione della miscela

La quantità di cemento, la presenza di aggregati o particelle fini possono determinare la maggiore o minore presenza di particelle non ancora idratate e quindi la disponibilità di particelle anidre pronte a reagire in caso di contatto con l'umidità esterna. Le aggiunte di additivi possono condurre a tempi di idratazione più o meno prolungati.

È possibile affermare che l'auto-rigenerazione autogena può essere stimolata e massimizzata:

1. Riducendo l'ampiezza della fessura;
2. Garantendo apporto di acqua continuo;
3. Favorendo le reazioni di idratazione ritardata e cristallizzazione del carbonato di calcio.

Il metodo più semplice è la riduzione del rapporto acqua-cemento, quindi si incrementa la quantità di cemento a pari acqua al fine di rendere disponibili più

particelle non idratate. È possibile realizzare dei cementi di miscela con aggiunte minerali quali loppa d'altoforno, ceneri volanti, fumo di silice, ecc., per sfruttare anche in questo caso l'idratazione ritardata (vedi paragrafo 2.1.1.4).

È possibile controllare l'apertura delle fessure utilizzando calcestruzzi fibrorinforzati che ne limitano l'ampiezza. La sinergia tra calcestruzzi fibrorinforzati e tecniche di self-healing si configura come una soluzione molto promettente: i calcestruzzi fibrorinforzati stimolano le proprietà di autoriparazione per la loro capacità di controllare l'apertura delle fessure (inferiore a 100 μm) e promuovere la multi-fessurazione. [37] [10] [39] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52]

2.5.2.2 Self-healing ingegnerizzato

Sono state studiate diverse tecnologie per stimolare o attivare l'auto-guarigione del calcestruzzo, che sfruttano:

- Additivi biologici
- Prodotti incapsulati
- Sistemi vascolari
- Polimeri: polimeri super assorbenti SAP
- Additivi cristallini

Additivi biologici

Tra i meccanismi che promuovono il self-healing vi è, come descritto al paragrafo 2.5.2.1, la cristallizzazione del carbonato di calcio. È possibile incentivare la precipitazione di quest'ultimo grazie alla collaborazione di alcune spore batteriche. Da qui, si può ottenere una tipologia di calcestruzzo auto-rigenerante inserendo nella miscela batteri in grado di indurre la precipitazione del carbonato

di calcio grazie alla loro attività metabolica in un ambiente ad alto contenuto di calcio. [53] [6]

La

Figura 2.23 descrive le fasi di richiusura di una fessura ad opera dei batteri.

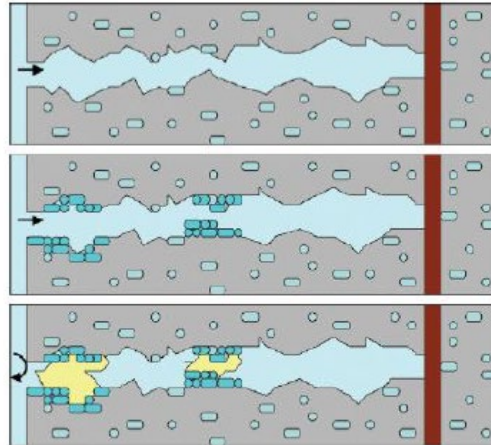


Figura 2.23: Fasi di richiusura della fessura a causa della presenza di batteri: il fenomeno si attiva con l'ingresso dell'acqua, a seguito di una continua idratazione si ha la precipitazione di carbonato di calcio sulle pareti della fessura fino alla sua completa [54]

I requisiti necessari all'applicazione di questa tecnica [55] [6] sono:

- I batteri scelti devono essere in grado di resistere all'ambiente alcalino del conglomerato e alla pressione interna che si sviluppa in seguito alla fase di presa;
- Deve essere disponibile un nutriente per l'alimentazione dei batteri;
- La vita dei batteri deve essere sufficientemente lunga, almeno pari alla vita utile della struttura;
- Le aggiunte di tipo biologico non devono alterare altre proprietà del calcestruzzo, in particolare non devono causare una riduzione della resistenza meccanica.

La vita dei batteri alcali-resistenti presenti in natura è di oltre i 50 anni. Tuttavia, quando sono inglobati nel calcestruzzo la loro vita è limitata a pochi mesi.

Per ovviare a questo problema Jonkers [56] prevede l'inserimento di grani di argilla espansa entro i quali sono stati immobilizzati delle spore batteriche. Con questo tentativo si mantengono "dormienti" i batteri in una struttura porosa fino al momento in cui il grano di argilla espansa non venga idratato, inducendo l'attivazione dei batteri. La vita dei batteri è stata estesa da alcuni ad oltre sei mesi, ma il risultato è ancora lontano dalla durata della vita utile della struttura.

Un'ulteriore indagine, nel tentativo di eliminare l'ostacolo dato dalla breve vita dei batteri all'interno della matrice del materiale cementizio, è stata svolta su calcestruzzi dotati di pareti cellulari e non di batteri vivi. [45]

Prodotti incapsulati

Il processo di self-healing può essere stimolato inserendo all'interno dell'impasto cementizio delle capsule contenenti l'agente curativo (Figura 2.24). Le capsule, sferiche (diametro=4-4000 μm) o cilindriche (diametro= 40 – 7000 μm , lunghezza= 15 – 250 mm), sono disperse uniformemente all'interno della matrice cementizia e sono caratterizzate da un comportamento fragile. L'obiettivo è quello di isolare le sostanze chimiche curative dal calcestruzzo fino a quando il propagarsi di una fessura non rompe le microcapsule. Infatti, le capsule restano inattive fino al manifestarsi della fessurazione. Propagandosi, la fessura le intercetta causandone la rottura e la conseguente fuoriuscita dell'agente curativo, che può innescare una reazione nella parte danneggiata o sigillare esso stesso la fessura.

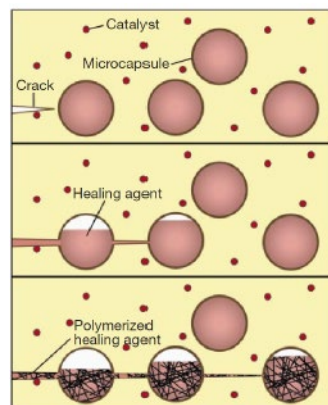


Figura 2.24: Meccanismo di self-healing promosso dalla presenza di prodotti incapsulati [57]

Sistemi vascolari

Un altro sistema studiato per favorire l'autoriparazione del calcestruzzo è l'uso di un sistema vascolare. Il sistema è composto da tubi cavi connessi a serbatoi, come mostrato in Figura 2.25 a), collocati all'esterno della struttura. I tubi, che presentano comportamento fragile, vengono disposti là dove è prevedibile la formazione delle fessure. In caso di sviluppo di una o più fessure, la rottura dei tubi consente l'uscita dell'agente riparante.

La presenza dei serbatoi permette di reintegrare nel tempo il sigillante, che può essere monocomponente o bicomponente.

Una delle problematiche correlate a questo sistema è la diminuzione proprietà meccaniche della struttura in quanto il diametro dei tubi fragili risulta essere notevole (diametro minimo=0.4 mm). Inoltre, il sistema non può essere inglobato nella miscela ma deve essere accuratamente progettato e messo in opera. Anche i serbatoi devono essere collocati in ambienti protetti.

Se non sono presenti i serbatoi ma solo i tubi di vetro, come rappresentato in Figura 2.25 b), il sistema può essere considerato come una variante dell'incapsulamento chimico con il vantaggio di trasportare potenzialmente una maggiore quantità di agente curativo rispetto alle microcapsule.

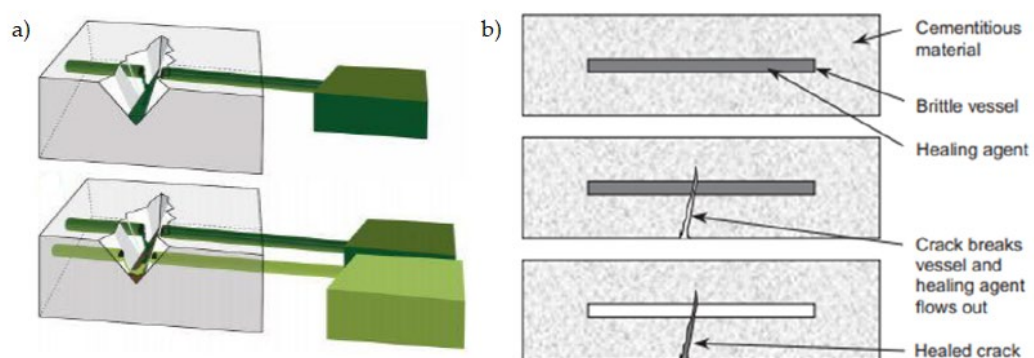


Figura 2.25: Meccanismo di self-healing promosso da sistemi vascolari (a) connessi a serbatoi esterni [58] e (b) non connessi a serbatoi esterni [45]

Polimeri super assorbenti SAP

Per incrementare il fenomeno del self-healing, all'impasto cementizio possono essere fatte aggiunte di polimeri super assorbenti, generalmente chiamati SAP (Super Absorbent Polymers) o idrogel.

Sono polimeri reticolari, fortemente idrofili, che a contatto con l'acqua o l'umidità si espandono.

Aggiunti alla miscela cementizia risultano essere poco reattivi allo stato fresco e durante la fase di presa poiché la loro reattività è influenzata dall'alcalinità e dalla concentrazione ionica della soluzione. Pertanto, manifestano un'espansione limitata.

Dopo l'idratazione liberano l'acqua assorbita, riducendosi di volume. In questo modo lasciano uno spazio attorno a sé creando un macro-poro. Allo stesso tempo, rilasciando l'acqua promuovono un'idratazione prolungata.

Quando la fessura si propaga i SAP entrano in contatto con l'ambiente esterno, quindi con l'acqua e l'umidità. I polimeri si gonfiano nuovamente, espandendosi e occupando, oltre al macro-poro, anche lo spazio aperto dalla fessura, sigillando la fessura e impedendo l'ingresso degli agenti aggressivi esterni.

La Figura 2.26 schematizza il meccanismo di self-healing promosso dai polimeri SAP.

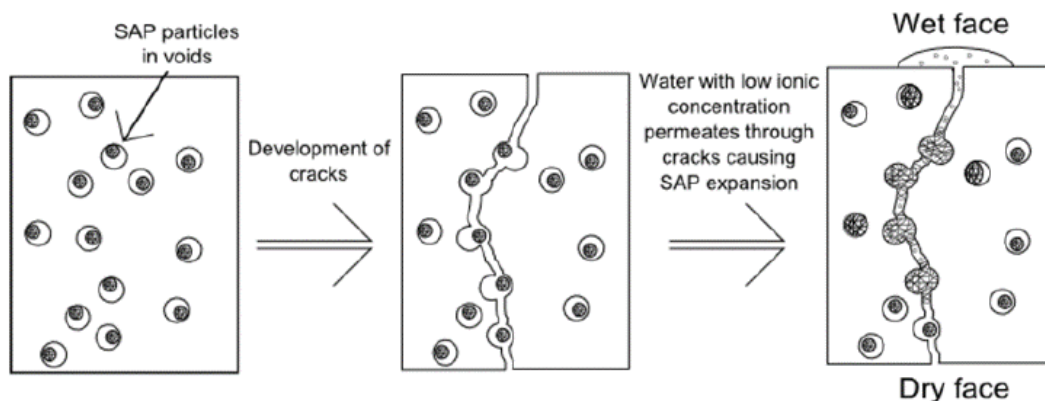


Figura 2.26: Meccanismo di self-healing promosso da polimeri SAP [38]

Additivi cristallini

Gli additivi cristallini sono particolari aggiunte in grado di ridurre la permeabilità del materiale.

Si tratta di miscele a base di silice, polvere di cemento o attivatori che manifestano proprietà idrofile. Ciò li rende in grado di reagire facilmente con l'acqua e di consentire la cristallizzazione del carbonato di calcio o il proseguimento delle reazioni di idratazione.

I depositi che si generano sono insolubili all'acqua: interrompono le connessioni tra le fessure, riducono la porosità del materiale sigillando le fessure e riducendo la penetrazione degli agenti esterni. Tali depositi diventano parte integrante della matrice, resistendo anche alle pressioni elevate che si sviluppano in seguito alla fase di presa della matrice. [59]

Possono essere utilizzati anche agenti espansivi (C_4A_3S , $CaSO_4$ e CaO), geomateriali espandenti (principalmente biossido di silicio e sodio alluminio silicato idrossido e montmorillonite argilla) e vari tipi di carbonati come parziale (10% in peso) sostituzione del cemento.

Gli agenti espandenti assorbono grandi quantità di acqua. Pertanto, devono essere dosati accuratamente per impedire espansioni eccessive tali da provocare la fessurazione del materiale. [60]

M. Roig-Flores et al. [59] hanno studiato gli effetti dell'aggiunta all'impasto degli additivi cristallini, additivi espansivi e una combinazione di entrambi i prodotti.

Per quanto riguarda l'aggiunta di soli prodotti cristallini, la capacità di autoguarigione si è rivelata limitata per fessure con ampiezza superiore a 150 μm . Si è ottenuta una guarigione completa su fessure con apertura fino a 400 μm .

Inoltre, l'aggiunta degli additivi cristallini offre miglioramenti anche sulle proprietà meccaniche, in particolare per il recupero della resistenza.

2.5.2.3 Pregi e difetti delle tecnologie di self-healing, prospettiva delle ricerche future

Li et al. [6] nel 2012 propongono un articolo che non vuole essere una literature review ma tenta di indagare le tipologie di *self-healing concrete* oggetto di ricerca fino a quel momento e di capire quali tecnologie sono le più promettenti, delineando la strada che la ricerca dovrebbe percorrere.

Introducono sei criteri che permettono di evidenziare l'efficacia della tecnologia. L'obiettivo di tale valutazione è mirato a evidenziare vantaggi e limitazioni dei vari approcci e per stimolare le ricerche future.

I sei parametri proposti sono:

- *Shelf-life*: la funzionalità della tecnologia di self-healing deve mantenersi nel tempo e deve essere almeno pari alla vita utile della struttura poiché non si sa quando si verificherà il danno e sarà necessario l'innesco del processo di guarigione.
- *Pervasiveness*: la funzionalità di auto guarigione deve essere diffusa in tutta la struttura, non solo in porzioni limitate poiché non si sa dove e con che orientamento potrebbe manifestarsi il danno.
- *Quality*: idealmente, il self-healing dovrebbe portare al portare al pieno recupero sia delle proprietà di trasporto, che includono permeabilità e diffusività, sia delle proprietà meccaniche, che includono rigidità, resistenza e duttilità. Durante il processo guarigione si devono creare legami chimici tra i prodotti e la fessura, questi non devono solamente riempire le crepe. Se vi è il solo recupero delle proprietà di trasporto si parla di self-sealing.
- *Reliability*: l'affidabilità della tecnologia di auto-rigenerazione si riferisce alla coerenza di recupero delle proprietà meccaniche e/o di trasporto.

- *Versatility*: le varie tecniche di self-healing devono consentire il recupero delle proprietà dei materiali esposti a condizioni ambientali differenti.
- *Repeatability*: le diverse tecnologie dovrebbero pertanto essere in grado di funzionare non solo una volta, ma più volte nel corso della vita utile di una struttura, poiché i fenomeni di danneggiamento potrebbero aver luogo ripetutamente. Il meccanismo deve rimanere operativo quando si verificano fessurazioni più volte, possibilmente anche nella stessa posizione.

I sei criteri sopra elencati sono stati utilizzati per valutare i principali metodi di self-healing sulla base delle ricerche condotte fino ad allora.

Li et al. raggruppa le tecnologie di self-healing in cinque categorie mostrate in Figura 2.27: incapsulamento chimico, incapsulamento batterico, additivi minerali, additivi chimici in tubi di vetro e rigenerazione autogena con controllo dell'apertura di fessura.

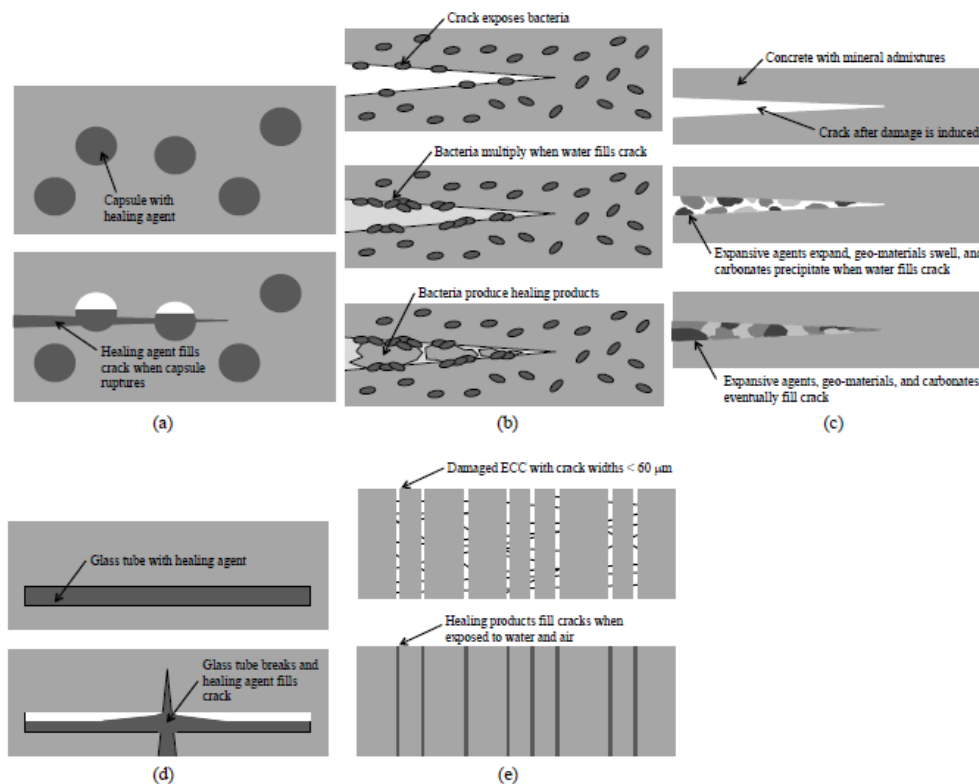


Figura 2.27: Illustrazione schematica delle tecnologie di self-healing: (a) prodotti incapsulati; (b) additivi biologici; (c) additivi cristallini; (d) sistemi vascolari; (e) controllo dell'apertura di fessura con FRC. [6]

Valutazione delle tecnologie mediante i sei criteri:

Incapsulamento chimico:

- + Buona versatilità: possono essere incapsulate differenti prodotti chimici in capsule di varie dimensioni;
- + Guarigione indipendente dall'ambiente esterno;
- + Lunga durata, che dipende da quanto il prodotto chimico può restare attivo;
- + Buona pervasività: le capsule sono miscelate direttamente nel calcestruzzo e, purché siano abbastanza forti da resistere alla miscelazione, possono essere uniformemente dispersi nella matrice senza essere danneggiate.
- Non è ripetibile: una volta svuotate le capsule non possono fornire nessun aiuto in caso di danno nella stessa area.

Incapsulamento batterico:

- + Tecnica pervasiva, i batteri vengono direttamente incorporati nella matrice cementizia.
- Shelf-life determinata da quanto le spore batteriche sono in grado di rimanere vitali.

Additivi chimici in tubi di vetro:

- + Guarigione indipendente dall'ambiente esterno;
- + Buona versatilità.
- Shelf-life dipendente da quanto tempo gli agenti chimici sono in grado di rimanere attivi;
- Tecnica non pervasiva: i tubi di vetro sono collocati in punti discreti;
- Il tubo di vetro deve essere orientato in senso perpendicolare al percorso di fessurazione previsto;

- Tecnica non ripetibile: i tubi di vetro vengono svuotati dopo il primo ciclo di caricamento.

Rigenerazione autogena con controllo dell'apertura di fessura:

- + Tecnica promettente;
- + I meccanismi di idratazione continua, come le reazioni pozzolaniche in materiali cementizi, sono noti per essere di lunga durata;
- + Tecnica altamente pervasiva poiché utilizza cemento non idratato e ceneri volanti, che sono uniformemente dispersi nella matrice;
- + Approccio ripetibile.

Additivi minerali:

- + Tecnica altamente pervasiva poiché gli additivi sono usati come sostituzione parziale del cemento, quindi risultano dispersi in modo uniforme in tutto il calcestruzzo.
- Attualmente non è chiaro se è ripetibile o versatile poiché questo approccio è stato testato solo in condizioni di umidità elevata e costante.

In risposta all'ultima considerazione relativa agli additivi cristallini, E. Cuenca, A. Tejedor e L. Ferrara [61] pubblicano nel 2018 i risultati di una ricerca il cui obiettivo è proporre e validare un metodo per la valutazione delle capacità di autoguarigione di calcestruzzi fibrorinforzati, studiando l'influenza di una miscela cristallina utilizzata per stimolare l'autoguarigione.

Durante la campagna sperimentale vengono studiate le capacità di autoriparazione di campioni di calcestruzzo sottoposti a cicli di fessurazione, con di prove DEWS (Double Edge Wedge Splitting), e di esposizione in condizioni ambientali differenti.

I risultati mostrano come l'esposizione ambientale sia il fattore determinante nella capacità di autoguarigione del materiale. In particolare, i campioni immersi in

acqua sono i soli che presentano la completa chiusura di fessure con apertura inferiore a 0.30 mm. L'additivo cristallino mantiene la sua efficacia fino a un anno per fessure con ampiezza di 0.15 mm anche sottoposte a cicli di fessurazione.

Un trattamento iniziale lungo può incrementare le capacità di autoguarigione specialmente in presenza di additivi cristallini, probabilmente a causa del moto osmotico delle particelle di origine cristallina verso le fessure dove si sviluppano le reazioni di guarigione.

Analisi al microscopio elettronico confermano la presenza di prodotti creati dall'idratazione ritardata dei componenti della matrice e degli additivi cristallini.

Sulla scia di Li et al., nel 2017 E. Cuenca e L. Ferrara [5] pubblicano un articolo che riassume tutte le ricerche sviluppate sull'argomento, sottolineando i traguardi raggiunti e identificando le ricerche più importanti. Dopo un'approfondita analisi della letteratura esistente sono stati evidenziati gli sviluppi e le prospettive future.

Fino ad oggi si può affermare che l'uso di materiali con comportamento autoriparante, che sia autogeno o ingegnerizzato, aumenta la durabilità delle strutture. Questo processo di guarigione è influenzato da alcuni fattori come la miscela di calcestruzzo, le caratteristiche dell'acqua, l'ampiezza, la geometria e la stabilità delle fessure, le condizioni di esposizione.

Appurato il ruolo chiave che il self-healing ha sulla durabilità delle strutture, sono necessari approfondimenti su alcuni aspetti volti a chiarire:

- La capacità di guarigione sotto carichi permanenti e costanti nel tempo;
- Comportamento a lungo termine;
- Gli effetti delle reazioni di autorigenerazione sul legame matrice-fibra;
- Uso di fibre naturali per stimolare il self-healing e come alternativa economica alle fibre metalliche e sintetiche;

- Migliorare la tecnica dell'incapsulamento che utilizza capsule in grado di rimanere integre durante la miscelazione e che non interferiscano con le proprietà meccaniche;
- Il ruolo dell'autoguarigione sulla corrosione;
- I risultati dell'autoguarigione sulle proprietà, fisiche e meccaniche, del materiale, che devono essere inseriti in un metodo di progettazione basato sulla durabilità;
- Sviluppo di metodi di prova standard per confrontare l'efficienza di ciascun metodo di autoguarigione.

Per quanto riguarda l'uso futuro di materiali autorigeneranti in applicazioni strutturali su larga scala, dovrebbero essere presi in considerazione due aspetti chiave: in primo luogo, dovrebbe essere valutata la fattibilità della produzione industriale di questi. In secondo luogo, è essenziale ottenere la fiducia degli appaltatori e dei proprietari delle strutture per dimostrare loro che i materiali autorigeneranti sono affidabili e possono essere utilizzati nel campo dell'edilizia.

Infine, per raggiungere tutti questi obiettivi è evidente che si rende necessaria la collaborazione interdisciplinare tra i ricercatori di tutti i settori scientifici come chimica, scienze dei materiali e ingegneria civile.

3 Descrizione dell'attività sperimentale

La campagna sperimentale ha come oggetto di studio due differenti miscele di calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni, di cui si è studiato il comportamento, le proprietà di recupero meccanico e di self-healing.

Nel presente capitolo verranno descritte tutte le fasi della campagna sperimentale, dalla realizzazione dei provini all'esecuzione delle prove sperimentali

In particolare, sarà descritto il progetto della miscela ed i singoli materiali costituenti, la fase di realizzazione dei provini, che comprende la realizzazione dei casseri, la preparazione dell'impasto, il getto, la maturazione, il taglio e la predisposizione dei provini per le prove sperimentali.

Infine, sono riportate le procedure seguite per l'esecuzione delle prove, la configurazione delle stesse, le attrezzature utilizzate e le modalità di estrazione dei dati da elaborare.

3.1 Realizzazione dei provini

La fase precedente alla realizzazione dei provini è il progetto delle miscele, ossia il *mix design*.

Definiti i materiali costituenti la miscela e le relative quantità, si è proseguito con la costruzione dei casseri, la miscelazione dei componenti e il getto. A maturazione avvenuta sono stati rimossi i casseri e preparati i singoli campioni per le prove.

3.1.1 Progetto della miscela

In questa campagna sperimentale sono state studiate due miscele i cui componenti sono indicati in Tabella 3-1:

Materiale	Mix			
	NP		P	
Cemento I 52,5 R	600,00	Kg/m ³	600,00	Kg/m ³
Loppa d'altoforno	500,00	Kg/m ³	500,00	Kg/m ³
Acqua	200,00	Kg/m ³	200,00	Kg/m ³
Fibre metalliche	120,00	l/m ³	120,00	l/m ³
Sabbia	982,10	Kg/m ³	982,10	Kg/m ³
Superfluidificante	33,00	l/m ³	33,00	l/m ³
Additivo cristallino	-	-	4,80	Kg/m ³

Tabella 3-1: Componenti delle miscele

Le due miscele differiscono per la presenza dell'additivo cristallino:

- Miscela NP: non contiene l'additivo cristallino (Penetron Admix);
- Miscela P: contiene l'additivo cristallino (Penetron Admix).

Entrambe le miscele presentano i parametri di Tabella 3-2:

Rapporto acqua cemento (a/c)	0,33
Rapporto acqua legante (a/l)	0,18
Percentuale di fibre in volume	1,54

Tabella 3-2: Parametri rappresentativi delle miscele

3.1.1.1 Materiali costituenti

Di seguito vengono descritti brevemente i materiali costituenti la miscela.

Cemento

La norma UNI EN 197-1 [11] classifica i cementi e stabilisce che ognuno di questi sia denominato con la sigla CEM seguita da:

- numero romano che indica il tipo;
- lettera che indica il sottotipo;
- numero che indica la classe di resistenza normalizzata.

Il cemento utilizzato in entrambe le miscele è il CEM I 52.5 R. Da ciò possiamo affermare quanto riportato di seguito:

- I

Cemento di tipo I: il cemento Portland è costituito almeno da 95% di clinker. Il contenuto di costituenti secondari non è superiore al 5%.

- 52.5

Classe di resistenza: il valore si riferisce alla resistenza a compressione a 28 giorni misurata su provini di malta preparati in modo standardizzato con rapporto a/c pari a 0,5 e rapporto sabbia/cemento pari a 3 (come indicato nella norma UNI EN 196-1 [62]).

- R

Resistenza iniziale elevata.

In Tabella 3-3 sono indicati i costituenti del CEM I 52.5 R.

Componente		Quantità percentuale
Silicato tricalcico	C_3S	65%
Silicato bicalcico	C_2S	11%
Alluminato tricalcico	C_3A	9%
Fase ferrica	C_4AF	6%

Tabella 3-3: Componenti CEM 52,5 R

Loppa d'altoforno

Come accennato al paragrafo 2.1.1.2, la loppa d'altoforno è la scoria derivante dal processo industriale di produzione della ghisa. Durante la lavorazione della ghisa si formano grandi quantità di residui liquidi costituita prevalentemente da ossidi di calcio, silicio e alluminio combinati tra di loro che, se raffreddati bruscamente all'uscita dell'altoforno, si trasformano in granuli porosi a struttura vetrosa che presentano caratteristiche idrauliche. [12]

La loppa manifesta caratteristiche idrauliche in presenza di attivatori, quali idrossidi di sodio, idrossidi di potassio o solfato di calcio, sostanze presenti nel clinker e quindi nel cemento portland.

In Tabella 3-4 è indicata la composizione della loppa utilizzata nelle miscele studiate.

Componente		Quantità
Silice	SiO ₂	39,00%
Ossido di calcio	CaO	37,50%
Ossido di alluminio	Al ₂ O ₃	11,00%
Ossido di magnesio	MgO	8,30%
Ossido di manganese	MnO	0,80%
Ossido ferrico	Fe ₂ O ₃	0,70%
Biossido di titanio	TiO ₂	0,55%
Ossido di potassio	K ₂ O ₂	0,30%
Ossido di sodio	Na ₂ O	0,20%
Carbonio	C	0,20%

Tabella 3-4: Composizione loppa d'altoforno

Acqua

Come concesso dalla norma UNI EN 1008 [15], è stata utilizzata acqua potabile senza effettuare controlli.

Fibre metalliche

Le fibre utilizzate come rinforzo della matrice cementizia sono micro-fibre metalliche in acciaio ottonato tipo Readymix 200, fornite dall'azienda Azichem.

Sono realizzate con una lega dal peso specifico di 7850 Kg/m³, hanno sezione tonda con diametro di circa 0.22 millimetri e lunghezza di circa 20 millimetri (rapporto dimensionale pari a 90).

Aggregati

Le caratteristiche degli aggregati sono state descritte al paragrafo 2.1.2.

Per il confezionamento delle miscele di calcestruzzo in esame è stata utilizzata sabbia di dimensioni massime di 2 mm come unica tipologia di aggregati.

La Figura 3.1 rappresenta la curva granulometrica della sabbia inserita nella miscela.

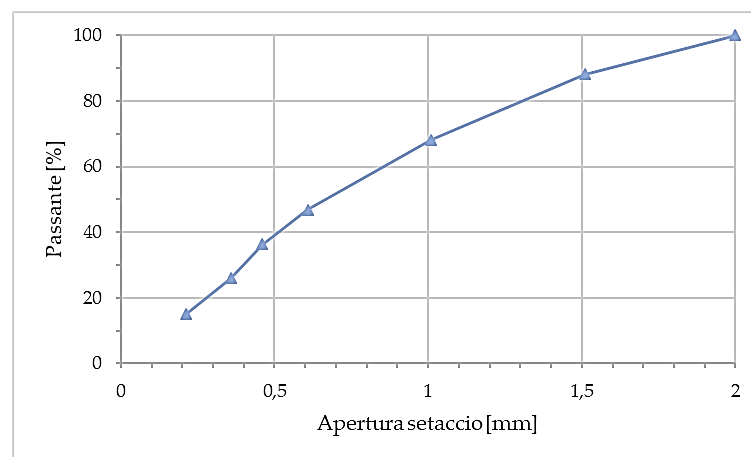


Figura 3.1: Curva granulometrica aggregati

Additivo superfluidificante

Gli additivi superfluidificanti, di cui si è detto al paragrafo 2.1.4, possono essere utilizzati per:

- aumentare la lavorabilità del calcestruzzo mantenendo costante il rapporto a/c e inalterata la resistenza meccanica;
- ridurre il contenuto di acqua, senza alterare la consistenza e il contenuto di cemento, incrementando la resistenza meccanica;
- diminuire sia il contenuto di acqua sia il dosaggio di cemento, riducendo i costi, mantenendo inalterate lavorabilità e resistenza meccanica.

Questo tipo di additivi sono sostanze polimeriche che agiscono disciogliendosi in acqua ed esercitando un'azione disperdente sui grani di calcestruzzo. In particolare, le macromolecole affidano la propria efficacia alla presenza di gruppi idrofobi che si adsorbono sui grani di cemento, e gruppi idrofili che si dispongono in acqua, impedendo l'avvicinarsi delle particelle tramite un'azione repulsiva. [12]

L'additivo superfluidificante utilizzato nelle miscele è a base di eteri policarbossilati, caratterizzati dalla presenza di gruppi polari nella parte idrofila che rendono elettricamente carica la superficie delle particelle. In questo modo le stesse particelle tendono a respingersi rendendo più fluido l'impasto. Si tratta dell'additivo MasterGlenium commercializzato dall'azienda BASF Italia.

Additivo cristallino

L'additivo cristallino, utilizzato solamente per la miscela P, è un prodotto commerciale denominato Penetron Admix (Figura 3.2).

Si tratta di un additivo in polvere utilizzato per l'impermeabilizzazione e la protezione chimica per cristallizzazione di strutture in calcestruzzo. È costituito da cemento Portland, sabbia silicea e ulteriori componenti chimici studiati per reagire con i prodotti di idratazione del cemento in presenza di umidità. I pori e le microfessurazioni della matrice vengono sigillati grazie alla formazione di cristalli insolubili. La durabilità del materiale ne risulta incrementata poiché il getto è impermeabile all'acqua e agli agenti esterni.



Figura 3.2: Additivo cristallino

3.2 Fase operativa di preparazione dei provini

I passaggi da seguire per la realizzazione dei provini di calcestruzzo da testare nella presente campagna sperimentale sono:

- costruzione dei casseri;
- preparazione dei materiali componenti e miscelazione;
- getto, curing iniziale, rimozione dei casseri e stagionatura;
- taglio dei provini.

3.2.1 Costruzione dei casseri

La prima operazione necessaria alla realizzazione dei provini è la costruzione dei casseri.

Per questa campagna sperimentale sono stati realizzati due tipologie di provini, cioè lastre prismatiche e cilindri.

Il presente lavoro tratta solamente delle prove effettuate sui provini prismatici. Tuttavia, è bene sottolineare che in fase di getto sono stati realizzati anche provini cilindrici con le stesse miscele.

Per le lastre sono stati utilizzati dei casseri in assi di legno; per i cilindri sono stati utilizzati cilindri in PVC. In Tabella 3-5 sono indicate le caratteristiche dimensionali e il volume teorico di calcestruzzo da impiegare.

Tipologia provini	Numero casseformi	Geometria [cm]			Volume di calcestruzzo [m ³]	
		Lunghezza (L)	Larghezza (B)	Altezza (H)		
Lastre	4	100	50	3,5	0,070	
Cilindri	10	-	10	30	0,024	
					0,094	Tot.

Tabella 3-5: Caratteristiche dimensionali dei casseri utilizzati e volume teorico di calcestruzzo che possono contenere

Le casseforme (Figura 3.3) sono state pulite, per rimuovere polveri ed eventuali residui dei getti precedenti, e cosparse di olio per il disarmo. Sono state disposte sopra un piano, per agevolare le operazioni getto, e con una livella se ne è verificata

la planarità. Le pendenze indesiderate sono state corrette con spessori, in modo da ottenere dei provini il più possibile planari.



Figura 3.3: Casseforme per lastre

3.2.2 Preparazione dei materiali componenti e miscelatura

Prima di procedere alla miscelazione i materiali sono stati pesati.

La fase di miscelazione risulta essere molto delicata specialmente in calcestruzzi fibrorinforzati, per la possibilità che si verifichi il fenomeno del *fiber balling* (Figura 3.4). Tale fenomeno può manifestarsi a causa di vari fattori, come l'eccessiva viscosità dell'impasto, tempo di miscelazione insufficiente o per errori durante l'inglobamento delle fibre all'impasto, come unione di fibre poco setacciate o aggiunte non gradualmente.



Figura 3.4: Fenomeno del fiber-balling

Per scongiurare l'insorgere di questo fenomeno i costituenti sono stati incorporati secondo il protocollo di miscelazione riportato in Tabella 3-6.

Ordine di miscelazione	Materiali componenti	Tempo di miscelazione
1.	Cemento, loppa d'altoforno, additivo cristallizzante (per la miscela P)	2 minuti
2.	Prima metà acqua	2 minuti
3.	Seconda metà acqua, additivo superfluidificante	2 minuti
4.	Aggregati	3 minuti
5.	Fibre (gradualmente)	5 minuti

Tabella 3-6: Ordine e tempi di miscelazione dell'impasto

Dopo aver unito tutti i componenti si è atteso ancora qualche minuto per una miscelazione ottimale con distribuzione omogenea delle fibre all'interno dell'impasto.

3.2.3 Getto

Il getto è stato realizzato manualmente con l'ausilio di secchi in materiale plastico.

I cilindri sono stati gettati versando il conglomerato dall'alto mentre le lastre da uno dei lati corti. (Figura 3.5)

Con il progetto delle due miscele sono state ottenute proprietà reologiche allo stato fresco tali da rendere il calcestruzzo auto-compattante. Grazie all'adeguata fluidità, compattabilità e coesione si è ottenuto un getto omogeneo evitando l'utilizzo di vibrazioni, che provocherebbero una distribuzione non uniforme delle fibre.



Figura 3.5: Getto delle lastre

Le fibre tendono a disporsi parallelamente alla direzione del getto, avanzando secondo le modalità descritte dalla Figura 3.7, allineandosi all'interno della lastra come in Figura 3.6.

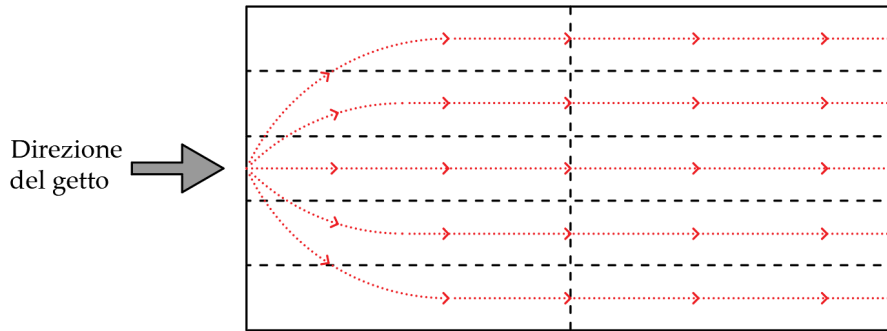


Figura 3.6: Direzione del getto e allineamento delle fibre

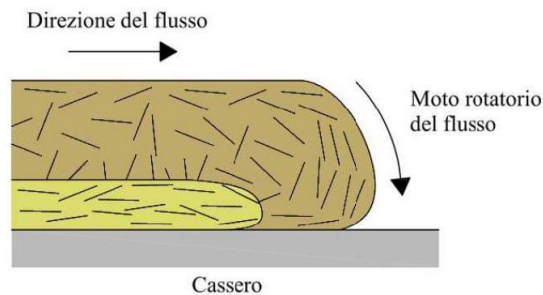


Figura 3.7: Avanzamento del flusso

Dalla Figura 3.6 si può osservare che non si avrà un orientamento omogeneo delle fibre in tutta la lastra: dal lato in cui si esegue il getto le fibre non saranno tutte disposte lungo l'asse del provino ma saranno presenti fibre mal orientate, nel caso della Figura 3.6 a sinistra, a causa dei vortici creati durante il rovesciamento del conglomerato nel cassero. Invece a destra della Figura 3.7, il cattivo allineamento delle fibre è dovuto a un effetto parete. Con l'avanzare del fronte del getto le fibre si orientano parallelamente al lato lungo del cassero grazie alla viscosità del calcestruzzo.

A causa del differente orientamento delle fibre dovuto al getto si presume che, sempre in riferimento alla Figura 3.6, i provini ottenuti dalla parte destra della lastra avranno un migliore comportamento meccanico dovuto alla corretta disposizione delle fibre; viceversa, i provini ottenuti dalla parte sinistra della lastra avranno un comportamento meccanico peggiore dovuto all'orientamento non uniforme delle fibre all'interno del getto.

Concluse le operazioni di getto, si è atteso il tempo necessario per la presa del conglomerato. Si è bagnata la superficie del getto e si è impedita l'evaporazione dell'acqua grazie all'uso di teli in plastica. Mantenendo il getto in condizioni di umidità sono state stimulate le reazioni di idratazione.

A 24 ore dal getto sono stati rimossi i casseri e i provini sono stati collocati in una camera a condizioni termo-idrometriche controllate, pari a 90% di umidità relativa e 20°C di temperatura, per un periodo di stagionatura di circa 90 giorni.

3.2.4 Taglio dei provini

Le lastre gettate sono state tagliate per ottenere provini dalle dimensioni utili alle prove sperimentali.

Le lastre, di dimensioni 1000x500x30 mm sono state suddivise in 10 parti delle dimensioni circa di 96x500x30 mm. In particolare, dopo il getto le lastre con miscela P avevano uno spessore medio di 2.50 cm mentre le lastre di miscela NP avevano uno spessore medio di 3.00 cm. Ciò è dovuto all'incertezza data dal getto manuale.

Oltre a marcare le linee guida per il taglio della lastra, sui singoli provini è stata posto il codice di riconoscimento, come descritto al paragrafo 3.3. riguardante la nomenclatura dei provini.

Infine, le lastre sono state tagliate con una sega circolare avente lame spesse 5 mm.
(Figura 3.8)



Figura 3.8: Taglio della lastra

In seguito al taglio tutti i provini sono stati stoccati nuovamente nella camera umida.

3.3 Nomenclatura dei provini

Al fine di identificare in modo univoco i provini della presente campagna sperimentale è stato utilizzato un codice alfa-numerico, in cui:

- Le **lettere** indicano la tipologia di mix: P, per la miscela contenente l'additivo cristallino Penetron Admixt; NP per la miscela non contenente alcun additivo cristallino.
- Il **primo numero** identifica la piastra da cui è stato tagliato il provino.
- Il **secondo numero** indica la posizione del provino all'interno della piastra.

Ad esempio, come evidenziato in Figura 3.9 il provino **NP1_3** è realizzato con la miscela NP, ossia senza aggiunte cristalline, appartiene alla piastra numero 1 ed è collocato in posizione numero 3. Il provino **P1_9** è realizzato con la miscela P, ossia con l'aggiunta di Penetron Admix, appartiene alla piastra numero 1 ed è collocato in posizione numero 9 (Figura 3.10).

NP1_1	NP1_6
NP1_2	NP1_7
NP1_3	NP1_8
NP1_4	NP1_9
NP1_5	NP1_10
NP2_1	NP2_6
NP2_2	NP2_7
NP2_3	NP2_8
NP2_4	NP2_9
NP2_5	NP2_10

Figura 3.9: Panorama provini NP

P1_1	P1_6
P1_2	P1_7
P1_3	P1_8
P1_4	P1_9
P1_5	P1_10
P2_1	P2_6
P2_2	P2_7
P2_3	P2_8
P2_4	P2_9
P2_5	P2_10

Figura 3.10: Panorama provini P

3.4 Piano prove

Dopo la realizzazione dei provini è stato necessario definire in modo univoco il piano prove.

Il piano prove è stato stilato non solo per la campagna descritta in questo elaborato, ma comprende la programmazione delle prove per tutti i laboratori partner del Politecnico di Milano che seguiranno la stessa procedura sperimentale nell'ambito della COST Action SARCOS, descritto nel paragrafo 1.1.

Al termine della fase di realizzazione dei provini si contano:

- 2 lastre mix P → 20 provini prismatici
- 2 lastre mix NP → 20 provini prismatici.

I provini testati nel presente lavoro sono 15 per ogni miscela.

Questa scelta nasce dal fatto che ogni campagna sperimentale deve essere eseguita sullo stesso numero di provini per ogni laboratorio e, alle università partner per questa sperimentazione, sono stati assegnati 15 provini di miscela NP e 15 di miscela P, suddivisi come segue (Tabella 3-7):

	Prove a rottura				
Polimi NP	0 mesi	2-1	2-6	1-1	1-6
	1 mesi	2-2	2-7	1-2	1-7
	3 mesi	2-3	2-8	1-3	1-8
	6 mesi	2-4	2-9	1-4	1-9
		2-5	2-10	1-5	1-10
Polimi P	0-1-3-6 mesi	2-1	2-6	1-1	1-6
	Provini in esubero	2-2	2-7	1-2	1-7
		2-3	2-8	1-3	1-8
		2-4	2-9	1-4	1-9
		2-5	2-10	1-5	1-10
Lab 1 e 2	3-1	3-6	1-1	1-6	
	3-2	3-7	1-2	1-7	
	3-3	3-8	1-3	1-8	
	3-4	3-9	1-4	1-9	
	3-5	3-10	1-5	1-10	
Lab 3 e 4	3-1	3-6	1-1	1-6	
	3-2	3-7	1-2	1-7	
	3-3	3-8	1-3	1-8	
	3-4	3-9	1-4	1-9	
	3-5	3-10	1-5	1-10	
Lab 5 e 6	3-1	3-6	1-1	1-6	
	3-2	3-7	1-2	1-7	
	3-3	3-8	1-3	1-8	
	3-4	3-9	1-4	1-9	
	3-5	3-10	1-5	1-10	
Lab 7 e 8	3-1	3-6	1-1	1-6	
	3-2	3-7	1-2	1-7	
	3-3	3-8	1-3	1-8	
	3-4	3-9	1-4	1-9	
	3-5	3-10	1-5	1-10	

Tabella 3-7: Piano prove. Suddivisione dei provini nei periodi temporali di prova.

Il piano prove si articola su un periodo di tempo di sei mesi. In questo elaborato sono descritti i risultati delle prove fino a tre mesi. In Tabella 3-8 si riporta il piano prove. In rosso sono indicate le prove ancora in corso.

Su tutti i provini sono state eseguite prove di flessione su quattro punti:

- Prove monotone a rottura per la caratterizzazione meccanica
- Pre-fessurazioni e ri-fessurazioni per la valutazione del self-healing.

Tali prove, sia per la miscela P sia per la miscela NP, risultano essere articolate come segue:

- A tempo "0 mesi"
 - 2 provini sottoposti a prove monotone a rottura;
 - 7 provini fessurati mediante prova di flessione su quattro punti con deformazione residua dell'1‰. Mappatura delle fessure. Immersione in acqua potabile.
- A tempo "1 mese"
 - 2 provini sottoposti a prove monotone a rottura;
 - 7 provini estratti dall'immersione in acqua potabile. Mappatura delle fessure per la valutazione del self-healing nel periodo. Ri-fessurati mediante prova di flessione su quattro punti con deformazione dell'1‰ (deformazione totale 2‰). Mappatura delle fessure per la valutazione del self-healing. Immersione in acqua potabile.
- A tempo "3 mesi"
 - 2 provini sottoposti a prove monotone a rottura;
 - 7 provini estratti dall'immersione in acqua potabile. Mappatura delle fessure per la valutazione del self-healing. Ri-fessurati mediante prova di flessione su quattro punti con deformazione dell'1‰ (deformazione totale 3‰). Mappatura delle fessure per la valutazione del self-healing. Immersione in acqua potabile.

Nome provino	Condizioni di esposizione	Mese 0		Mese 1		Mese 3		Mese 6	
		Prova	ε TOT.	Prova	ε TOT.	Prova	ε TOT.	Prova	ε TOT.
P1_1	Camera climatica	-	-	-	-	Rottura	-	-	-
P1_2	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
P1_3	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
P1_4	Camera climatica	Rottura	-	-	-	-	-	-	-
P1_5	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
P1_6	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
P1_7	Camera climatica	-	-	-	-	Rottura	-	-	-
P1_8	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
P1_9	Camera climatica	Rottura	-	-	-	-	-	-	-
P1_10	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
P2_1	Camera climatica	-	-	-	-	-	-	-	-
P2_2	Camera climatica	-	-	Rottura	-	-	-	-	-
P2_3	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
P2_6	Camera climatica	-	-	-	-	-	-	Rottura	-
P2_7	Camera climatica	-	-	Rottura	-	-	-	-	-
NP1_1	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
NP1_2	Camera climatica	-	-	-	-	Rottura	-	-	-
NP1_3	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
NP1_4	Camera climatica	Rottura	-	-	-	-	-	-	-
NP1_5	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
NP1_6	Camera climatica	-	-	-	-	-	-	Rottura	-
NP1_7	Camera climatica	-	-	-	-	Rottura	-	-	-
NP1_8	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
NP1_9	Camera climatica	Rottura	-	-	-	-	-	-	-
NP1_10	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
NP2_1	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
NP2_2	Camera climatica	-	-	Rottura	-	-	-	-	-
NP2_3	Immersione	Fessurazione	1 %	Ri-fessurazione	2 %	Ri-fessurazione	3 %	Ri-fessurazione	4 %
NP2_6	Camera climatica	-	-	-	-	-	-	Rottura	-
NP2_7	Camera climatica	-	-	Rottura	-	-	-	-	-

Tabella 3-8: Piano prove

3.5 Prova di flessione su quattro punti

Le prove effettuate, sia per la caratterizzazione meccanica sia per la prefessurazione e le successive ri-fessurazioni, sono prove di flessione su quattro punti.

Con questo tipo di prova è possibile indurre nel provino uno stato multifessurativo utile a indagare le condizioni di esercizio del calcestruzzo.

Nella parte centrale del provino, compresa tra le lame di carico, si ha una regione a momento massimo costante (l'andamento delle azioni interne è descritto al paragrafo 4.1).

Si ottiene l'apertura di più fessure, contrariamente a ciò che avviene con una prova di flessione su tre punti. In questo caso si genera una sola ed unica fessura nella sezione che presenta il valore massimo del momento, ossia in corrispondenza della lama di applicazione del carico.

Conformemente alle indicazioni delle istruzioni CNR-DT 204/2006 si è deciso di realizzare le prove su campioni non intagliati, onde consentire la multifessurazione e senza pre-determinare, mediante l'intaglio, la posizione di formazione della singola fessura. [21]

Le prove di flessione sono state eseguite in controllo di spostamento. Sono stati acquisiti i valori di deformazione verticale (freccia δ), l'apertura di fessura tra le lame di carico (Crack Opening Displacement *COD*) e di carico.

I provini sono stati disposti con la superficie di fondo cassero rivolta verso il piatto inferiore della macchina di prova, a contatto con le lame di appoggio. Questa scelta deriva dal fatto che la parte superficiale del getto, per effetto della segregazione, contiene meno fibre che, invece, tendono a concentrarsi sul fondo del cassero.

Effettuando le prove con questa configurazione si ottiene resistenza meccanica superiore e migliori caratteristiche di duttilità.

3.5.1 Configurazione della prova

La Figura 3.11 schematizza la configurazione di prova:

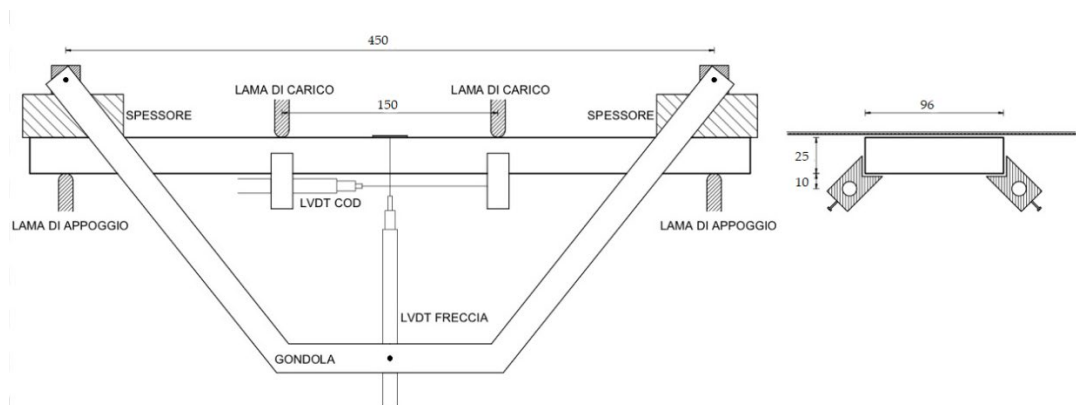


Figura 3.11: Configurazione prova di flessione su quattro punti

Ai fini della corretta esecuzione delle prove, è stata utilizzata la strumentazione che segue:

- Basette metalliche a coda di rondine
- Piastrine metalliche
- Telaio metallico "Gondola"
- Spessori in legno

3.5.2 Strumentazione di prova

La prova è stata effettuata con l'ausilio di una pressa elettromeccanica *Instron 8562* associata a:

- Lame di appoggio
- Lame di carico

- Pannello di comando
- Centralina di acquisizione
- Computer per la registrazione dei dati
- Trasduttori di spostamento LVDT

La pressa elettromeccanica Instron 8562 di Figura 3.12 è il macchinario con cui sono state effettuate tutte le prove.

La sua capacità massima di carico è di 100 kN e la corsa massima di 100 mm.



Figura 3.12: Pressa elettromeccanica Instron 8562

È costituita da una base fissa, un telaio con due colonne su cui può scorrere un traverso e una cella per la misura del carico nella parte sommitale del telaio stesso.

La posizione del traverso è regolabile mediante pistoni idraulici ad olio ed è fissato mediante un'unione bullonata che assicura una coppia di serraggio pari a 800 Nm. Al traverso è collegato il piatto superiore della pressa. Quello inferiore è mobile e viene azionato da un pistone idraulico.

Con questo dispositivo è possibile effettuare prove sia in controllo di spostamento, sia in controllo di carico.

Per la prova di flessione su quattro punti è necessario munire i piatti di carico della pressa con le di lame di appoggio e di carico.

Le lame di appoggio sono fissate su una trave d'acciaio con un'unione bullonata e sono distanti 450 mm. Le lame di carico sono connesse ad un sistema snodabile e hanno una distanza di 150 mm l'una dall'altra. Le lame risultano rispettivamente centrate per caricare in modo simmetrico il provino. (Figura 3.13)



Figura 3.13: Pressa Instron munita di lame di carico e di appoggio per l'esecuzione della prova di flessione su quattro punti

La pressa viene controllata da un pannello di comando digitale (Figura 3.14).



Figura 3.14: Pannello di comando pressa Instron

I dati vengono raccolti da una centralina di acquisizione dati tipo UPM 60, collegata alla macchina di prova e agli strumenti di misura. I dati vengono trasmessi dalla centralina al computer che li registra tramite il software *Lab View*. (Figura 3.15)



Figura 3.15: Centralina di acquisizione. Computer per la registrazione dei dati

Per la lettura degli spostamenti sono stati utilizzati dei trasduttori chiamati LVDT, cioè *Linear Variable Differential Transformer*. Gli LVDT sono dispositivi elettromagnetici utilizzati per la lettura di piccoli spostamenti con precisione dell'ordine del micron.

Sono stati utilizzati quattro LVDT: due per misurare la deformazione verticale del provino (freccia δ), due per misurare la deformazione in senso orizzontale (Crack Opening Displacement, COD). (Figura 3.16)



Figura 3.16: LVDT posizionati secondo la configurazione di prova

3.5.3 Preparazione dei provini

La fase preliminare all'esecuzione della prova meccanica prevede la preparazione del provino, per ottenere il risultato di Figura 3.17. Per ognuno di questi sono state effettuate le operazioni che seguono:

- Rilievo geometrico delle dimensioni del provino: sono state annotate tre misurazioni per ogni dimensione e successivamente mediate;
- Marcatura delle linee di riferimento: sono state tracciate delle linee di riferimento per collocare correttamente il provino sulle lame di carico e di appoggio e per fissaggio delle basette e delle piastrine metalliche;
- Pulizia elementi metallici: eventuale rimozione di residui dalle basette e dalle piastrine metalliche per garantire una migliore adesione al calcestruzzo;

- Miscelazione dell'adesivo: è stato utilizzato un adesivo bicomponente tipo "T-Bond PRO.1 Fischer" per garantire una buona presa in tempi limitati.
- Posizionamento elementi metallici: sono state collocate le basette metalliche a coda di rondine e la piastrina metallica rettangolare seguendo le linee di riferimento.



Figura 3.17: Preparazione dei provini

Le basette metalliche sono di due tipologie, come mostrato in Figura 3.18: quelle forate permettono l'alloggiamento degli LVDT orizzontali, che misurano il Crack Opening Displacement, mentre quelle piene fungono da contrasto per la punta mobile dei trasduttori stessi.

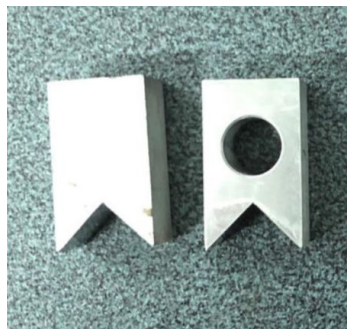


Figura 3.18: Basette metalliche

Gli LVDT verticali, che misurano l'abbassamento verticale cioè la freccia, sono sostenuti dal telaio metallico in Figura 3.19. Per questi, si utilizza la piastrina metallica presente in Figura 3.17 come riscontro.



Figura 3.19: Telaio metallico "Gondola" per il supporto degli LVDT verticali

3.5.4 Allestimento della prova

Dopo aver atteso il tempo necessario alla presa dell'adesivo, può essere allestita la prova, come mostrato in Figura 3.20, seguendo i passaggi:

- Collocamento del telaio metallico di supporto degli LVDT verticali sul piano di carico della pressa;
- Inserimento del provino tra le lame di carico e il telaio metallico, collocandolo avendo cura di seguire le linee guida tracciate durante la preparazione del provino;
- Posizionamento degli spessori in legno tra telaio metallico e superficie superiore del provino;
- Inserimento degli LVDT negli appositi alloggiamenti e serraggio per il mantenimento della posizione stabilita;
- Posizionamento delle punte metalliche mobili degli LVDT.

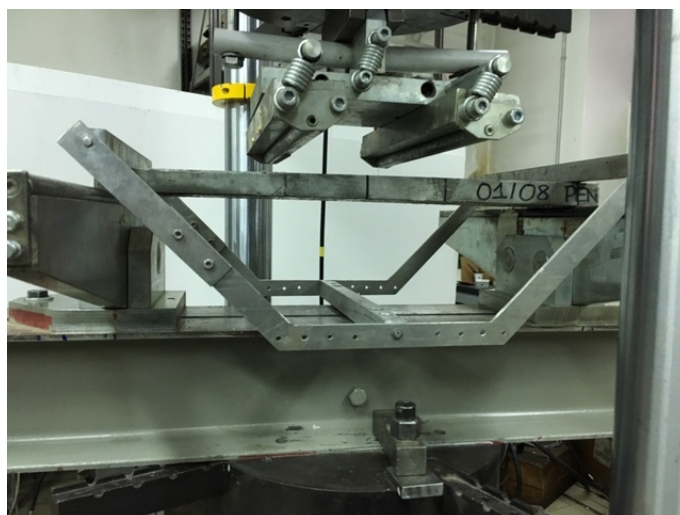


Figura 3.20: Allestimento della prova. Posizionamento telaio metallico. Inserimento del provino tra le lame di carico e appoggio.

3.5.5 Esecuzione della prova

Dopo aver allestito la prova e verificato di rispettare tutte le condizioni di set-up, la prova può avere inizio procedendo come descritto di seguito:

- Calibrazione della pressa;
- Inserimento dei parametri della prova come la velocità (pari a 0.015mm/s) e il massimo spostamento consentito del piatto della pressa (considerando la corsa massima della macchina per cui si raggiungono le condizioni di blocco automatico);
- Applicazione del precarico: il provino deve essere avvicinato alle lame di carico evitando il contatto. Successivamente si può imporre un precarico pari a 0.05 kN. In alternativa a questo procedimento, è possibile applicare il precarico avvicinando gradualmente il provino alle lame di carico, leggendo il valore del carico sul pannello di comando della pressa;
- Verifica della corretta connessione della centralina di acquisizione dei dati e degli LVDT;
- Avvio del software "LabView" e creazione di un nuovo file per la registrazione dei dati;

- Avvio della fase di carico.

Durante la prova è stata monitorata l'apertura/chiusura delle punte degli LVDT. A seguito delle deformazioni subite dal provino gli LVDT orizzontali tendono a dilatarsi, mentre quelli verticali a comprimersi. Pertanto, in fase di allestimento della prova è bene comprimere il più possibile gli LVDT orizzontali ed estendere quelli verticali. Tuttavia, durante le prove di flessione su provini di questa geometria, le deformazioni sono tali da far raggiungere la fine corsa agli LVDT. In alcuni casi è stato necessario mettere in pausa la prova per riposizionare correttamente i trasduttori di spostamento e riprenderla nell'immediato.

3.5.6 Dati acquisiti

Il software Lab View registra i dati ottenuti e li salva in formato “.dat”.

Le stringhe di dati salvati, di cui si riporta un esempio in Figura 3.21, contengono come dati utili:

- Numero dello step di acquisizione;
- Valore del carico espresso in chilo-Newton;
- Letture dei quattro LVDT espresse in millimetri.

Step	tempo (s)	Stroke (mm)	Load (kN)	Strain
1	20.54	-0.018	-0.059	-0.000
2	23.54	-0.063	-0.088	0.000
3	25.54	-0.094	-0.112	-0.000
4	28.54	-0.139	-0.136	-0.000
5	31.54	-0.184	-0.160	0.000

COD-MID-F (mm)	COD-MID-R (mm)	EPS-Fr-Left (mm)	EPS-Re-Left (mm)
0.001	-0.001	0.003	-0.001
0.002	-0.001	0.013	0.001
0.002	-0.002	0.020	0.001
0.003	-0.002	0.028	0.003
0.004	-0.003	0.038	0.004

Figura 3.21: Dati acquisiti

Questi dati sono stati elaborati come descritto al paragrafo 4.1.

3.6 Prove di caratterizzazione meccanica

Le prove di caratterizzazione meccanica sono state effettuate mediante prove di flessione su quattro punti monotone a rottura. Le prove di rottura permettono di caratterizzare meccanicamente il materiale, quindi di comprenderne il comportamento. Sulla base dei risultati ottenuti con tali prove è possibile stabilire come procedere con il resto della sperimentazione.

Sono state eseguite facendo aumentare progressivamente il carico fino al raggiungimento del carico di picco e prolungando il ramo di scarico fino a circa un terzo del valore massimo.

Dall'elaborazione dei dati estratti con le prove monotone a rottura si ottengono curve $\sigma_N - COD$, come descritto al paragrafo 4.2, curve rappresentative del comportamento di ogni miscela.

Da queste possono essere ricavati i parametri utili al calcolo degli indici di recupero meccanico, come descritto al paragrafo 4.4.

3.7 Pre-fessurazione e ri-fessurazione

Con le pre-fessurazioni si vuole imporre al provino una deformazione residua pari all'1‰ nella zona compresa tra le lame di carico, soggetta a momento costante, in modo da generare uno stato multi-fessurativo caratteristico delle condizioni di esercizio del calcestruzzo.

L'obiettivo è provocare l'apertura di micro-fessure all'interno del calcestruzzo che verranno monitorate per studiarne le capacità di self-healing.

Con le successive ri-fessurazioni, effettuate a intervalli di tempo pari a un mese, tre mesi e sei mesi (come meglio descritto nel paragrafo 3.4) si impone nuovamente una deformazione dell'1‰ che si somma a quella preesistente. In questo modo si sottopone il provino ad una sorta di "prova a fatica a lungo termine".

Operativamente, è necessario capire a che valore di Crack Opening Displacement (COD) scaricare il provino per ottenere la deformazione residua richiesta.

Per tale motivo è necessaria la stima della cedevolezza del materiale e della deformazione residua.

3.7.1 Stima cedevolezza

Uno dei dati input del software Lab View è la cedevolezza del provino.

La cedevolezza viene definita come l'inverso della rigidità:

$$C = \frac{1}{k}$$

È possibile stimare il valore della rigidità flessionale del provino come pendenza della retta secante ai rami di scarico delle prove di caratterizzazione meccaniche cicliche (Figura 3.22).

Non essendo queste oggetto della campagna sperimentale ci si è rifatti ai valori ottenuti dalle prove di Alferi-Famiani [45] e Borgioni-Cervini [22] che hanno testato tre miscele differenti tra cui vi era anche una miscela di tipo P.

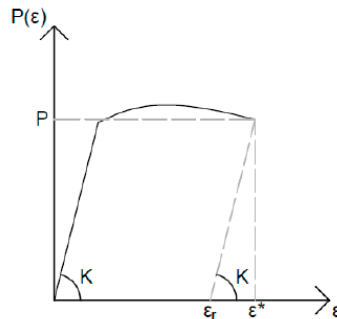


Figura 3.22: Stima del valore di cedevolezza. Procedimento grafico. [22]

3.7.2 Stima deformazione residua

Osservando la configurazione di prova in Figura 3.11 si può notare che i trasduttori di spostamento non sono alla stessa quota del lato inferiore teso del provino: a causa delle modalità di fissaggio, gli LVDT risultano essere a una quota inferiore di circa 10 mm.

Pertanto, durante la sperimentazione non si ottengono valori di COD che corrispondono all'effettiva deformazione delle fibre all'intradosso del provino.

Come prima cosa si deve determinare il valore di allungamento degli LVDT a fine prova che corrisponde al raggiungimento della deformazione residua richiesta all'intradosso della trave.

Sotto l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane, osservando la Figura 3.23, si può affermare che:

$$\frac{COD_{res,p}}{h - x} = \frac{COD_{LVDT}}{h - x + \delta_{LVDT}}$$

Equazione 7: Relazione di equilibrio per il calcolo di COD_{LVDT}

Sapendo che:

$$COD_{res,p} = \varepsilon_{res,p} \cdot l_0$$

Equazione 8: COD residuo all'intradosso del provino

Si ottiene:

$$COD_{LVDT} = \left(\frac{h - x + \delta_{LVDT}}{h - x} \right) \cdot COD_{res,p}$$

Equazione 9: Relazione per determinare COD residuo all'altezza degli LVDT

In cui:

- h , altezza del provino;
- x , posizione dell'asse neutro misurato dall'estradosso del provino. Si assume $x = h/2$;
- δ_{LVDT} , distanza degli LVDT dall'intradosso del provino;
- l_0 , distanza tra le basette di supporto degli LVDT;
- $\varepsilon_{res,p}$, deformazione residua desiderata all'intradosso del provino;
- $COD_{res,p}$, apertura di fessura residua all'intradosso del provino;
- COD_{LVDT} , apertura di fessura letta dagli LVDT.

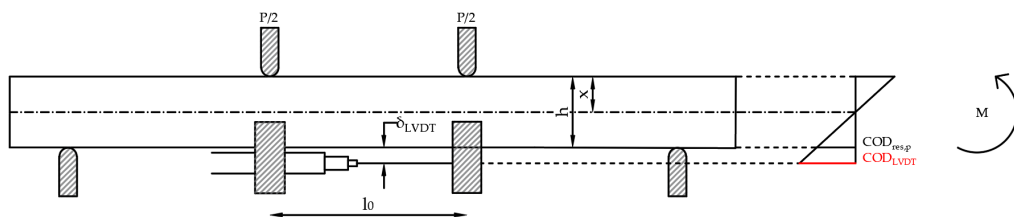


Figura 3.23: Schema per la definizione di COD_{LVDT} .

In Tabella 3-9 si riassumono i valori ottenuti per le due miscele che tengono conto delle proprietà geometriche dei provini studiati.

Mix	l_0 [mm]	h [mm]	x [mm]	δ_{LVDT} [mm]	$\varepsilon_{res,p}$	$COD_{res,p}$	COD_{LVDT}
NP	150	30	15	10	1 ‰	0,15	0,25
P	150	27	13,5	11	1 ‰	0,15	0,27

Tabella 3-9: Determinazione del COD residuo a livello degli LVDT poiché sia imposta una deformazione dell'1‰.

Il programma "Lab View", utilizzato per la registrazione dei dati e per la visualizzazione in tempo reale dell'andamento della prova, restituisce il valore $COD_{LVDT,ist}$ istante per istante, cioè il valore di apertura di fessura atteso in caso di rimozione del carico a quell'istante.

Tale valore è calcolato dal programma in base alla relazione, dalla quale è possibile ricavare il valore della deformazione residua noti il carico, la deformazione relativa a quel carico e la cedevolezza del provino:

$$COD_{LVDT} = COD_{LVDT,ist} - P_{ist} \cdot C$$

Equazione 10: Valore di COD_{LVDT} atteso a fine prova, dopo la fase di scarico del provino

In cui:

- $COD_{LVDT,ist}$, media dei valori di COD letti dagli LVDT istante per istante;
- P_{ist} , carico sul provino funzione di $COD_{LVDT,ist}$
- C , cedevolezza del provino valutata al paragrafo 3.7.1.

3.8 Valutazione del self-healing

La valutazione delle proprietà di self-healing viene effettuata attraverso l'elaborazione e l'analisi delle immagini scattate al microscopio delle fessure aperte con le prove di pre e ri-fessurazione.

3.8.1 Mappatura delle fessure

Per l'acquisizione delle immagini delle fessure da monitorare è stato utilizzato il microscopio Dino Lite (Figura 3.24). Si tratta di un microscopio digitale che si collega al computer tramite USB e consente la visualizzazione delle immagini tramite il software Dino Capture.



Figura 3.24: Microscopio Dino Lite

Il software ha una schermata composta da due pannelli. Nel più grande è possibile visualizzare gli oggetti presenti nel campo visivo del microscopio e si percepiscono gli spostamenti dell'inquadratura. Il secondo pannello mostra le anteprime delle foto scattate, che possono essere salvate e suddivise in più cartelle.

In primo luogo, è stato deciso il valore di ingrandimento tale per cui, mantenendo il microscopio a contatto con la superficie del provino, l'immagine acquisita avesse una buona messa a fuoco. Questo procedimento è utile al fine di avere una sola scala di conversione pixel-millimetri.

Il valore di ingrandimento ottimale è di 225x.

La mappatura di ciascun provino prevede:

- Conteggio del numero di fessure;
- Mappatura di circa metà delle fessure in cinque punti;

- Mappatura di una fessura completa.

Si è deciso di realizzare due strategie differenti per mappatura al fine di valutare quale metodo sia il più efficace ed affidabile.

Per identificare sul provino i punti di misura mese dopo mese, sono stati individuati al microscopio degli elementi facilmente distinguibili e riconoscibili. In corrispondenza di questi sono stati tracciati dei cerchi con pennarelli indelebili a punta fine di diverso colore, seguendo l'oculare del microscopio (Figura 3.25).

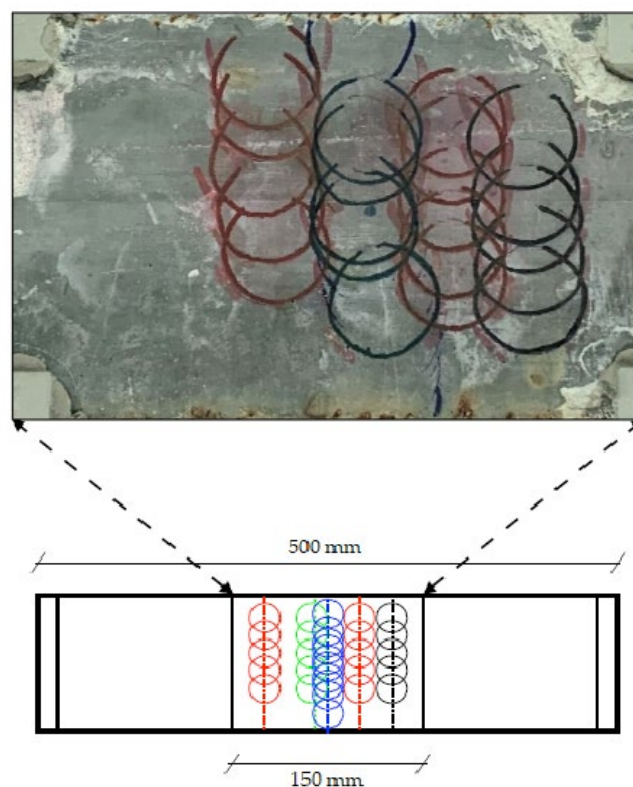


Figura 3.25: Mappatura fessure

Le criticità riscontrabili in questa fase sono dovute al fatto che la superficie del provino non è sempre liscia, ma può presentare avvallamenti dovute alla forma del cassero, sporgenze per residui di adesivo o piccole bolle nella matrice cementizia per cui non è possibile ottenere una messa a fuoco ideale. Le immagini risultano poco nitide e questo influisce negativamente sul risultato delle successive misurazioni.

3.8.2 Elaborazione delle immagini

Per poter effettuare le misurazioni sulle immagini è necessario che i singoli scatti realizzati a microscopio siano uniti per ricostruire il punto di misura.

Per l'unione delle immagini si utilizza il software Adobe Photoshop. Il comando Photomerge consente di unire più foto in un'unica immagine continua.

Per la riuscita della sovrapposizione è importante:

- Lasciare il margine di sovrapposizione adeguato. Gli scatti consecutivi devono risultare sovrapposti di almeno il 40% e non più del 70%, altrimenti il programma potrebbe non ricostruire la vista continua;
- Mantenere la stessa lunghezza focale. Ciò è garantito dal fatto che ci è mantenuto un solo valore di ingrandimento;
- Non ruotare il microscopio durante gli scatti e non cambiare il punto di osservazione. La tolleranza del programma alle rotazioni e agli spostamenti è limitata;
- Mantenere la stessa esposizione, quindi assicurarsi che le foto siano scattate nelle medesime condizioni di illuminazione.

Si ottengono risultati ottimali unendo le foto a gruppi di tre o quattro e selezionando l'opzione "riposiziona" che evita che le immagini sorgente siano alterate, allungate o tagliate, ma mantiene la corrispondenza degli scatti sovrapposti (Figura 3.26). È bene controllare la buona riuscita dell'unione grazie alla finestra che indica quale porzione di ogni immagine è stata utilizzata per la fusione (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Per le fessure mappate completamente bisogna procedere per gradi, unendo le singole foto in gruppi e successivamente unire i gruppi. Non sempre è possibile ottenere un'immagine completa per limiti del programma: il software non riesce a gestire un numero troppo elevato di immagini. Quindi, le fessure totali sono

suddivise in tratti. In Figura 3.26 vi è un esempio della sovrapposizione delle immagini.

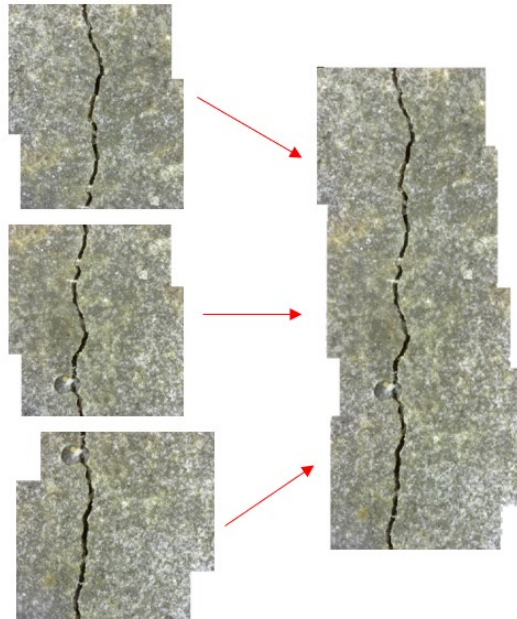


Figura 3.26: Risultato unione immagini

A immagini unite, come in Figura 3.28 a), è possibile effettuare le misurazioni dei punti di misura e delle fessure complete.

Il primo passaggio prevede l'impostazione della scala di misurazione.

Con il programma Adobe Photoshop è possibile creare una scala di conversione pixel-millimetri utilizzando come riferimento la mascherina di calibrazione presente nel microscopio (Figura 3.27). In questo modo le letture sulle immagini restituiranno già dati espressi in millimetri.

È possibile seguire i passaggi:

- Scattare una foto con il microscopio alla mascherina graduata;
- Aprendo l'immagine con il programma Adobe Photoshop si utilizza lo strumento righello per misurare quanti pixel occupano lo spazio di un millimetro;

- Noto il numero di pixel in un millimetro relativo all'ingrandimento adottato è possibile impostare la scala di conversione, che dovrà essere selezionata ogni volta che si registra una misurazione.

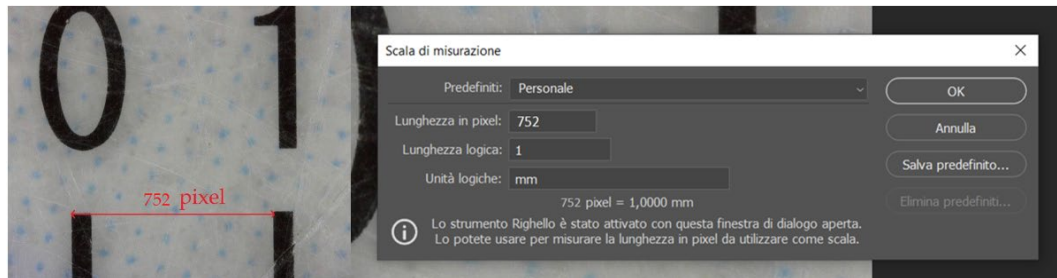


Figura 3.27: Calibrazione scala di conversione

Per l'estrazione dei dati per ogni fessura ci si affida a un'analisi basata sui colori. L'idea è quella di misurare quanti pixel ci sono di un dato colore. Grazie all'impostazione della scala di misurazione il numero di pixel è convertito i dati espressi in millimetri.

Si elencano i passaggi effettuati:

- Con lo strumento lazo si ritaglia l'immagine seguendo i bordi della fessura (Figura 3.28 b). Tale passaggio è necessario perché, se si mantiene la foto intera, potrebbero essere presenti zone dello stesso colore che deve essere conteggiato al di fuori della fessura: così si esclude questa eventualità;
- Conversione dell'immagine in scala di grigi e successivamente in bitmap (Figura 3.28 c). Convertendo l'immagine in bianco e nero con la soglia del 50% la matrice cementizia integra, caratterizzata da grigi chiari, verrà sostituita da pixel bianchi; l'area della fessura, caratterizzata da grigi molto scuri, verrà sostituita da pixel neri;
- Con lo strumento "seleziona colore" vengono isolati i pixel di colore scelto, ossia il nero;

- Registrando la misurazione della selezione, assicurandosi di aver impostato la scala di selezione, si ottiene una lista di dati che possono essere esportati in formato “.txt”.

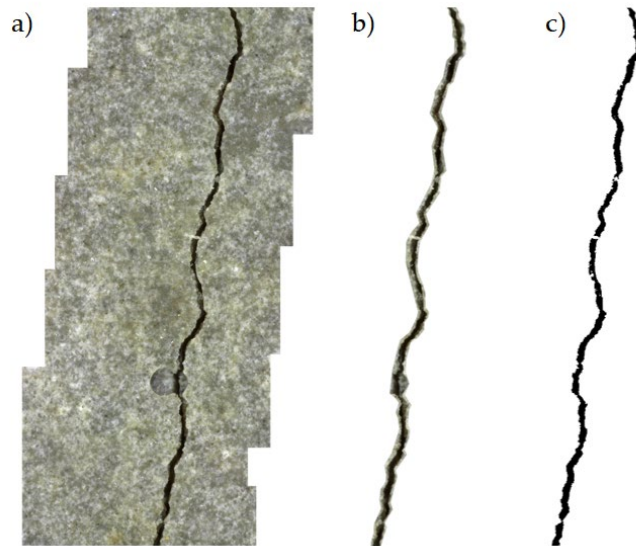


Figura 3.28: Punto di misura P1_2_2a: a) unione delle immagini; b) ritaglio con strumento lazo; c) conversione in bitmap

In Figura 3.29 è riportato un esempio di dati estratti. La prima riga di ogni foglio contiene il totale dei dati relativi alla fessura appena misurata. Nel file estratto sono indicati:

- Etichetta: il numero progressivo della misurazione realizzata;
- Data e ora dell'acquisizione;
- Nome del documento di cui sono state registrate le specifiche;
- Sorgente della misurazione;
- Scala di conversione impostata;
- Unità di misura della scala di conversione;
- Fattore di scala;
- Conteggio: numero di elementi conteggiati nell'immagine
- Area della selezione;

- Perimetro della selezione;
- Circolarità;
- Altezza della selezione;
- Larghezza della selezione.

I dati utili all'elaborazione successiva (descritta al paragrafo 4.5) sono:

- Area: rappresenta l'estensione della superficie della fessura, espressa in millimetri quadrati;
- Altezza: rappresenta l'altezza della selezione, cioè la lunghezza della fessura.

Etichetta	Data e ora	Documento	Sorgente	Scala
Misurazione 1	2019-12-30T15:17:17+01:00	P1_2_1a.png	Selezione	225x = 752 PIXEL 1 MM (752 pixel = 1,0000 mm)

Unità scala	Fattore scala	Conteggio	Area	Perimetro	Circolarità	Altezza	Larghezza
mm	752	70	0,185475	19,07362	0,006407	6,117021	1,25

Figura 3.29: Dati estratti con Adobe Photoshop

4 Elaborazione ed analisi dei dati sperimentali

In questo capitolo verranno elaborati ed analizzati i dati acquisiti con le prove sperimentali, secondo i metodi descritti nel capitolo precedente.

In particolare, si studiano le proprietà di recupero meccanico, introducendo l'indice di recupero della resistenza e due indici di recupero della rigidezza, e l'efficacia del self-healing delle miscele in esame. Infine, verranno correlati i parametri meccanici con gli indici di auto-riparazione ed è proposto un confronto tra le modalità di mappatura eseguite sui campioni.

4.1 Elaborazione dati prove a flessione su quattro punti

Al termine delle prove di flessione su quattro punti è possibile tracciare le curve $\sigma_N - COD$, che correlano lo sforzo nominale e il Crack Opening Displacement.

I dati registrati con il software LabView contengono i valori del carico applicato P , che però dipende dalla geometria del provino. Per eliminare tale dipendenza si introduce il valore di sforzo, ottenibile dalla relazione:

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

Equazione 11: Formula di Navier

In cui:

- σ_N , sforzo nominale espresso in MPa;
- M , momento agente sulla sezione espresso in Nmm;
- I , momento d'inerzia della sezione;
- y , distanza, rispetto al baricentro, del punto in cui si vuole calcolare lo sforzo.

Per una sezione rettangolare il momento d'inerzia vale:

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

Con b e h che rappresentano rispettivamente il valore di base e altezza del provino.

Poiché si vuole determinare il valore di sollecitazione massima presente nel provino, si assume:

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

La fibra più sollecitata si trova al lembo inferiore del provino.

Per determinare il momento agente sulla sezione è necessario considerare lo schema statico derivante dalla configurazione di prova: si tratta di una trave in semplice appoggio soggetta a due carichi concentrati di stessa intensità, come mostrato in Figura 4.1.

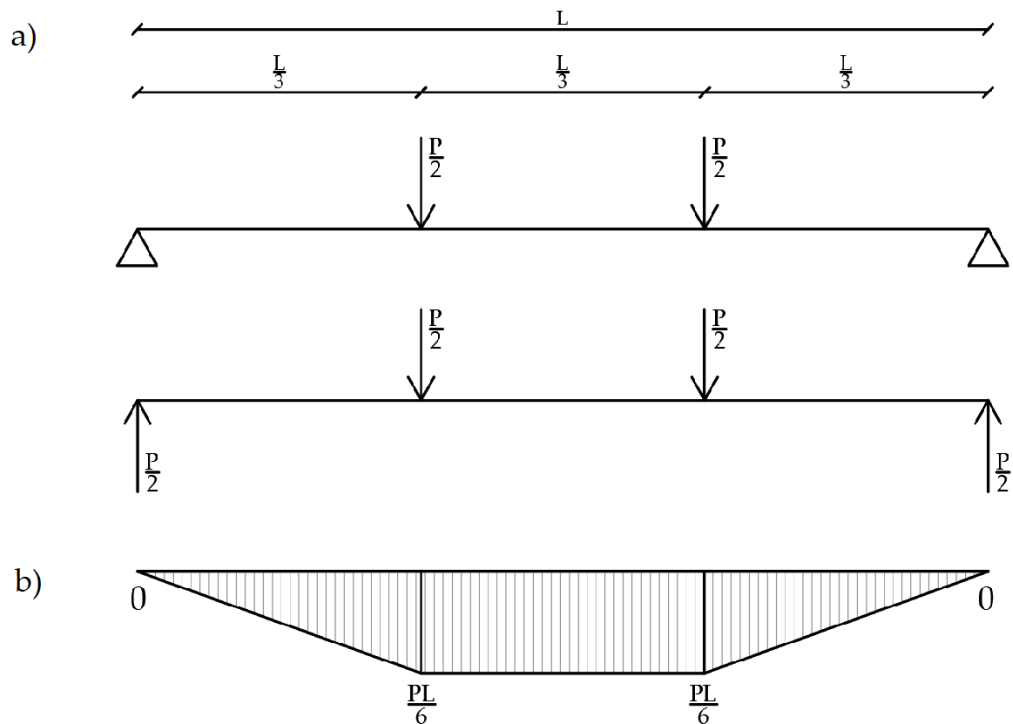


Figura 4.1: Prova di flessione su quattro punti. a) Schema statico per il calcolo del momento agente; b) Diagramma del momento flettente.

Attraverso semplici equazioni di equilibrio si ottiene il valore del momento massimo, che risulta pari a:

$$M_{max} = \frac{PL}{6}$$

Equazione 12: Valore del massimo momento

In cui:

- P , valore del carico espresso in N
- L , distanza tra i coltelli di appoggio della macchina di prova, pari a 450 mm.

Sostituendo nell'Equazione 11 le espressioni del momento massimo M_{max} , del momento d'inerzia I e il valore di y , si ottiene la relazione per calcolare lo sforzo nominale σ_N :

$$\sigma_N = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2}$$

Equazione 13: Espressione per il calcolo dello sforzo nominale in provini soggetti a prova di flessione su quattro punti

4.2 Prove monotone a rottura

Le prove monotone a rottura sono necessarie al fine di caratterizzare meccanicamente il materiale oggetto di studio, seguendo la procedura descritto al paragrafo 3.6.

Per ogni mix di calcestruzzo sono stati caratterizzati meccanicamente due provini per ogni periodo di prova, come indicato al paragrafo 3.4.

In Figura 4.2 e in Figura 4.4 si riportano le curve $\sigma_N - COD$ ottenute dalle prove di flessione su quattro punti, monotone a rottura per ogni periodo di prova: il tempo zero, t_0 , corrisponde all'inizio delle prove sperimentale, a 90 giorni dal getto; "t30" indica le prove effettuate a un mese dall'inizio delle prove; "t90" indica le prove effettuate a tre mesi dall'inizio delle prove.

La Figura 4.3 e la Figura 4.5 mostrano le curve di riferimento ottenute come media dei valori dei provini caratterizzati ad ogni periodo di prova. Le curve di riferimento vengono utilizzate per la valutazione degli indici di recupero meccanico.

Dalle curve di Figura 4.3 e Figura 4.5 si può notare come, sia la miscela NP sia la miscela P, siano caratterizzate da un comportamento incoerente: dopo un primo tratto lineare ascendente si raggiunge la zona in cui si sviluppa la microfessurazione. All'aumentare dell'apertura di fessura non si registrano riduzioni significative di sforzo; questo andamento è dovuto proprio alla presenza delle fibre. Raggiunto il picco, lo sforzo decresce. In questo tratto si verifica la localizzazione di una fessura, cioè dopo il picco aumenterà l'apertura solo di tale fessura critica.

In allegato A si trovano le curve delle prove monotone di rottura di ogni provino e le curve di riferimento di entrambe le miscele relative ai tre periodi di prova.

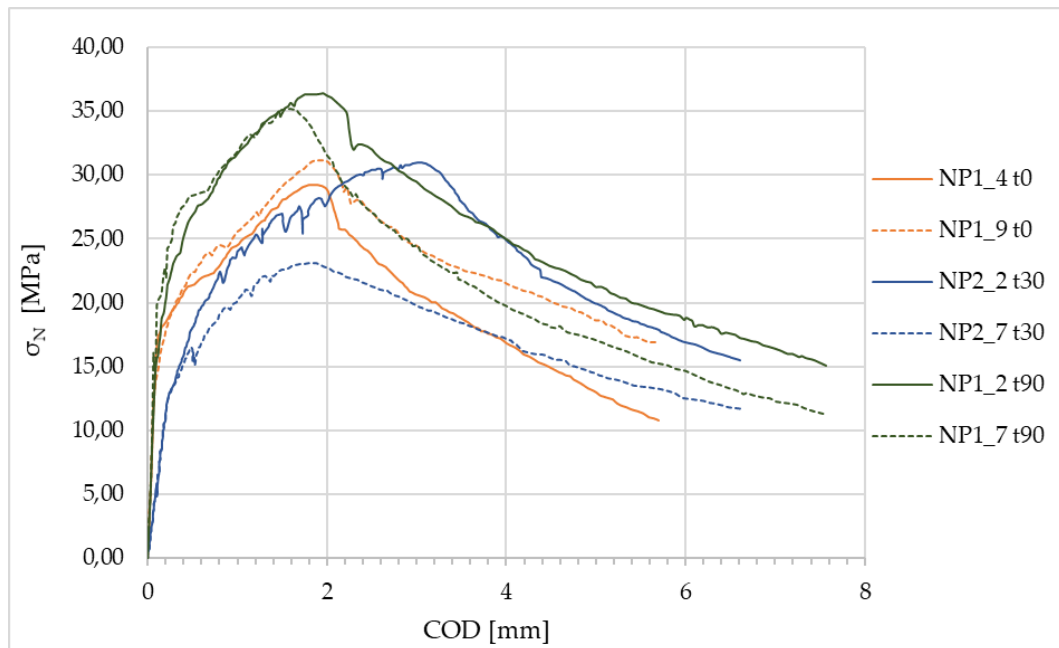


Figura 4.2: Curve prove monotone a rottura - Miscela NP

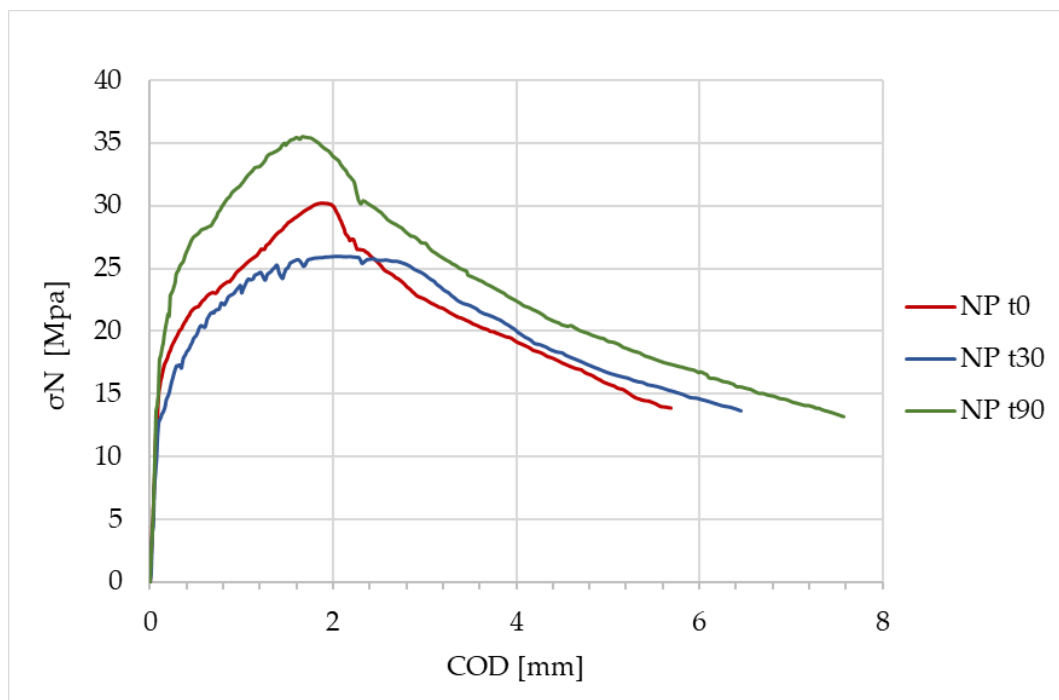


Figura 4.3: Curve di riferimento-Prove monotone a rottura miscela NP

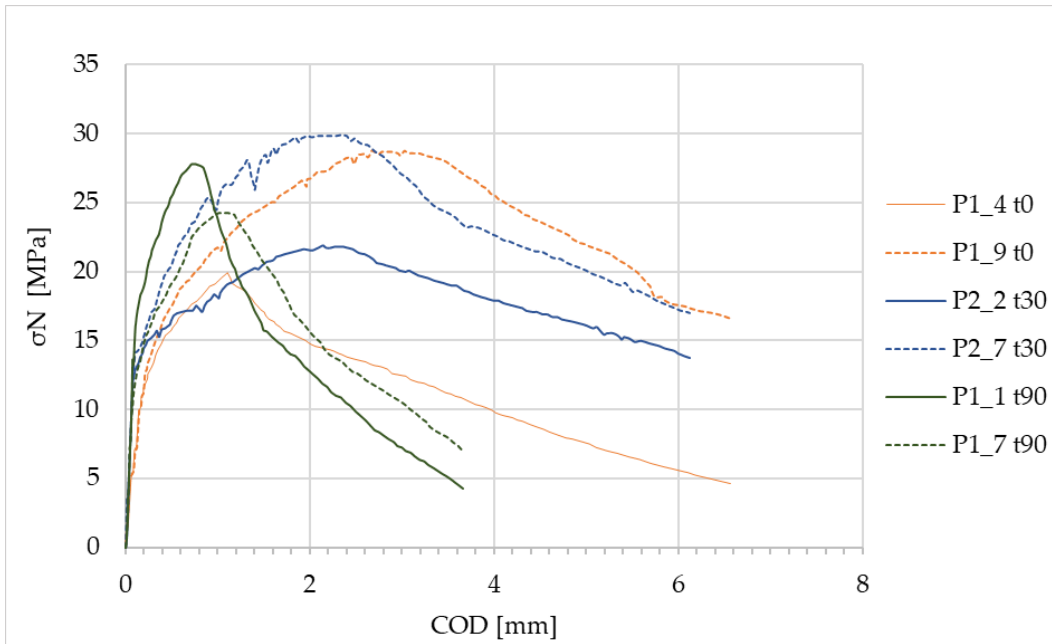


Figura 4.4: Curve prove monotone a rottura - Miscela P

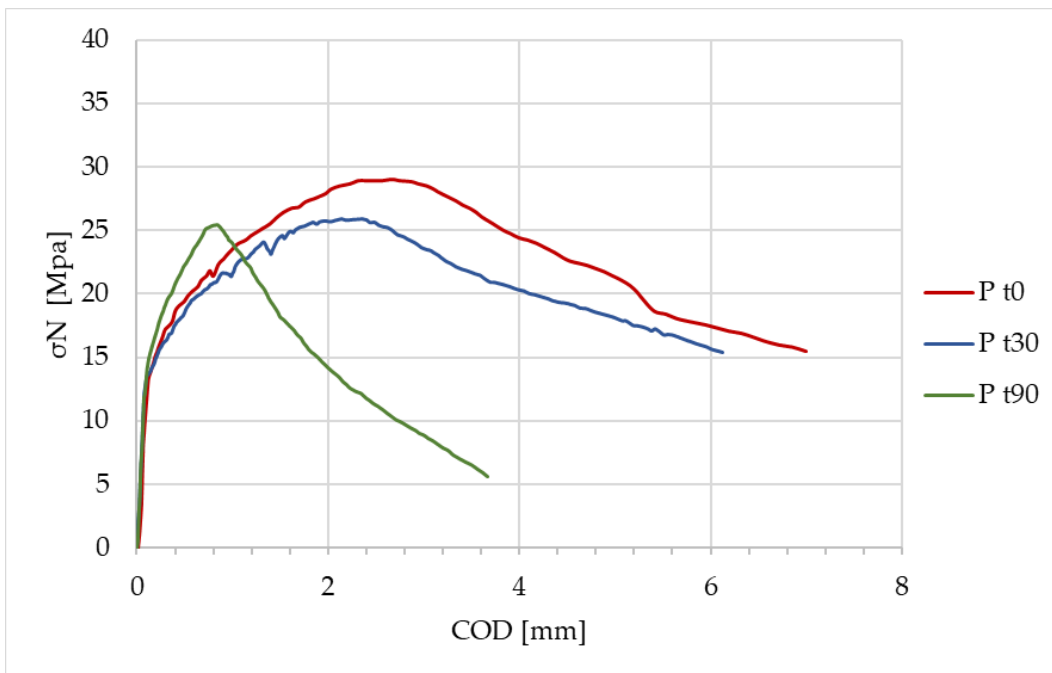


Figura 4.5: Curve di riferimento-Prove monotone a rottura miscela P

4.3 Prove di fessurazione

Le prove di flessione su quattro punti condotte hanno lo scopo di generare uno stato multi-fessurativo nel provino testato, come descritto al paragrafo 3.7, per valutare le capacità di self-healing e di recupero meccanico delle due miscele.

Con le prove di flessione su quattro punti si è imposta una deformazione ε che induce una multi-fessurazione nella zona maggiormente sollecitata, cioè quella soggetta al massimo momento. Tale area risulta essere la parte centrale di ogni provino, compresa tra i coltelli di carico.

Ad ogni periodo di prova, ossia a tempo zero, un mese e tre mesi dall'inizio delle prove, è stata impresso un carico tale per cui la deformazione residua fosse pari a $\varepsilon=1\%$.

Per ricavare la deformazione totale, alla deformazione imposta ad ogni ciclo successivo di prova è stata sommata la deformazione imposta in precedenza, in modo da ottenere $\varepsilon=2\%$ a un mese e $\varepsilon=3\%$ a tre mesi dall'inizio della campagna (per maggior chiarezza si fa riferimento a Tabella 3-8).

Per ottenere la deformazione totale, derivante dai successivi cicli di prova, è necessario che le curve σ -COD acquisite con successivi cicli di prove, vengano traslate lungo l'asse delle ascisse, facendo coincidere il primo punto della fessurazione i -esima (i) con l'ultimo punto della fessurazione precedente ($i-1$). Per chiarire meglio questa procedura si veda la Tabella 4-1.

Ai valori $COD_{indipendente}$ valutato a tempo 30 giorni si somma il valore $COD_{indipendente}$ ottenuto a tempo zero. Al valore del $COD_{indipendente}$ a 90 giorni si somma COD_{reale} a 30 giorni.

Periodo di prova	COD _{residui} INDIPENDENTI [mm]	COD _{residui} REALI [mm]
t0	0,262	0,262
t30	0,271	0,533
t90	0,202	0,735

Tabella 4-1: Esempio di calcolo dei valori dei COD reali a partire dai COD indipendenti, provino NP1_10

In Figura 4.6 viene mostrato graficamente il risultato della traslazione delle curve.

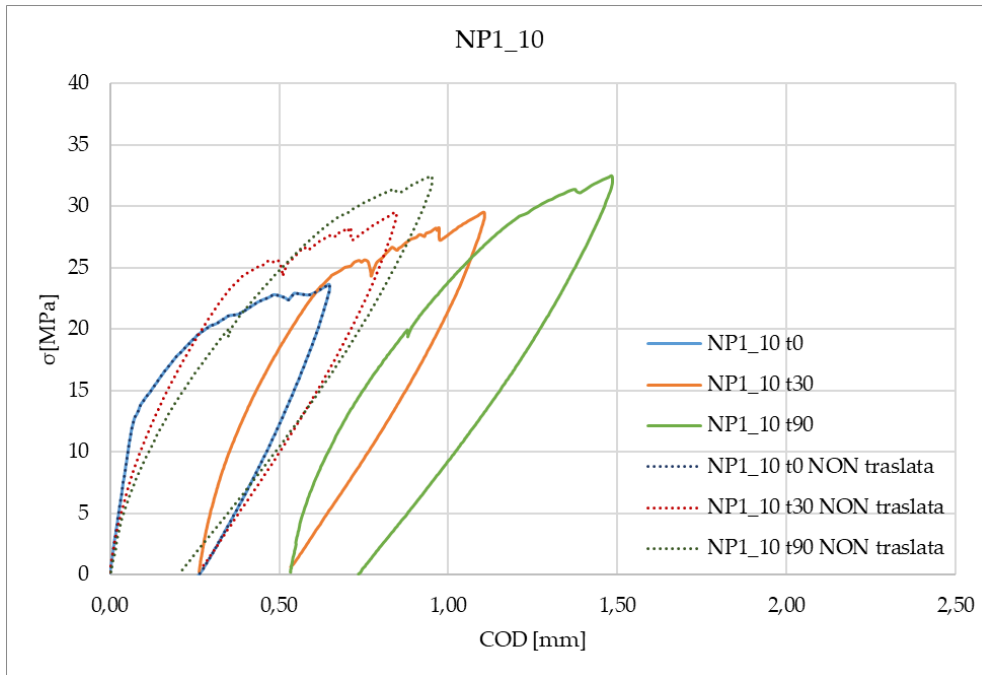


Figura 4.6: Procedura di esempio per il tracciamento delle curve di fessurazione traslate

I grafici con le curve di fessurazione traslate sono servite a definire i parametri utili alla quantificazione degli indici di recupero meccanico.

Nell'allegato B sono riportate le curve σ -COD traslate di tutti i provini analizzati.

In Tabella 4-2 e in Tabella 4-3 sono riportati tutti i valori di COD residui reali, cioè quelli ottenuti sommando i COD successivi, e indipendenti, ottenuti al termine di ogni prova.

	COD _{residui REALI} [μm]			COD _{residui INDIPENDENTI} [μm]		
	COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}
NP1_1	291	597	799	291	306	202
NP1_3	296	613	1053	296	318	440
NP1_5	277	572	819	277	296	247
NP1_8	345	643	930	345	298	287
NP1_10	262	533	735	262	271	202
NP2_1	274	532	747	274	258	215
NP2_3	281	500	799	281	219	299

Tabella 4-2: Valori di Crack Opening Displacement reali e indipendenti, miscela NP

	COD _{residui REALI} [μm]			COD _{residui INDIPENDENTI} [μm]		
	COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}
P1_2	269	561	901	269	293	340
P1_3	248	453	554	248	205	101
P1_5	291	568	790	291	278	222
P1_6	622	918	1231	622	296	313
P1_8	297	581	859	297	284	279
P1_10	293	597	923	293	304	326
P2_3	276	551	828	276	275	277

Tabella 4-3: Valori di Crack Opening Displacement reali e indipendenti, miscela P

4.4 Indici di recupero meccanico

Sulla base dell'elaborazione delle curve ottenute con le prove di rottura monotona e dei cicli di fessurazione, è possibile valutare gli indici di recupero meccanico. In questo elaborato sono stati analizzati l'indice di recupero della resistenza (ISR) e due indici di recupero della rigidezza (IDaR0 e IDaR*).

4.4.1 Indice di recupero della resistenza (ISR)

L'indice di recupero della resistenza permette di valutare il recupero di resistenza meccanica dei diversi calcestruzzi oggetto di indagine.

Tale indice può essere ottenuto dalla relazione:

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

Equazione 14: Definizione indice di recupero della resistenza ISR

In cui:

- σ_s^i è lo sforzo nominale del punto di scarico del ciclo i-esimo di fessurazione;
- $\sigma_s^{RIF,i}$ è lo sforzo nominale valutato sulla curva di riferimento del tempo i-esimo, in corrispondenza della ascissa (COD_s^i) relativa alla σ_s^i .

Per comprendere meglio il significato dei termini appena introdotti utili al calcolo dell'indice di recupero della resistenza meccanica, si riporta in Figura 4.7 un esempio in cui si mostra graficamente l'individuazione dei valori di σ_s^i e $\sigma_s^{RIF,i}$.

In Allegato C si riportano le curve utilizzate per determinare σ_s^i e $\sigma_s^{RIF,i}$ per ogni provino e una tabella con i relativi valori.

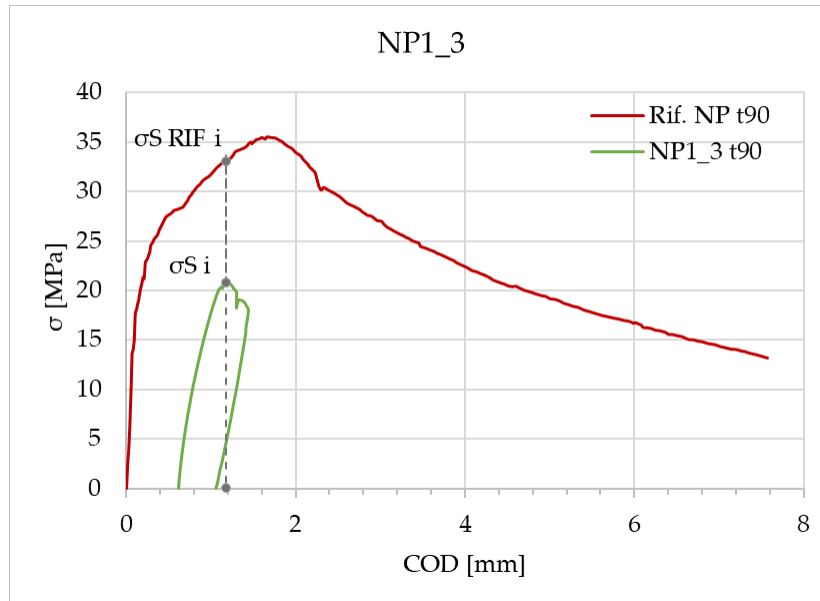


Figura 4.7: Esempio individuazione valori di σ_s^i e $\sigma_s^{RIF,i}$ per il calcolo di ISR, provino NP1_3

L'indice di recupero della resistenza assume i seguenti significati:

- $ISR = 0 \rightarrow \sigma_s^i = \sigma_s^{RIF,i}$, nessun recupero di resistenza meccanica;
- $ISR < 0 \rightarrow \sigma_s^i < \sigma_s^{RIF,i}$, diminuzione di resistenza meccanica;
- $ISR > 0 \rightarrow \sigma_s^i > \sigma_s^{RIF,i}$, aumento di resistenza meccanica.

In Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.11 sono riportati i valori dell'indice di recupero della resistenza per ogni provino, per ogni periodo di prova.

Dalla Figura 4.8 emerge che la miscela NP a 30 giorni è caratterizzata da valori positivi dell'indice ISR, che corrispondono ad un incremento della resistenza meccanica. Solo il provino NP1_3 non presenta recupero della resistenza.

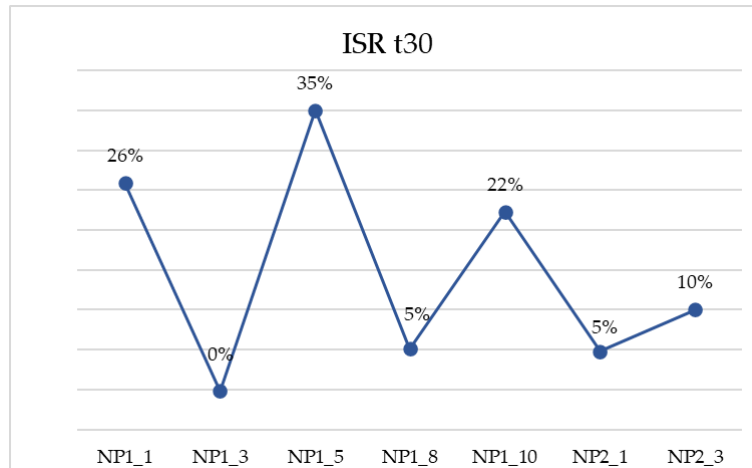


Figura 4.8: Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR a 30 giorni - Miscela NP

Dalla Figura 4.9 emerge che la miscela NP a 90 giorni è caratterizzata da valori negativi dell'indice ISR, che corrispondono ad un decremento della resistenza meccanica. Solo il provino NP1_5 presenta un lieve recupero della resistenza.

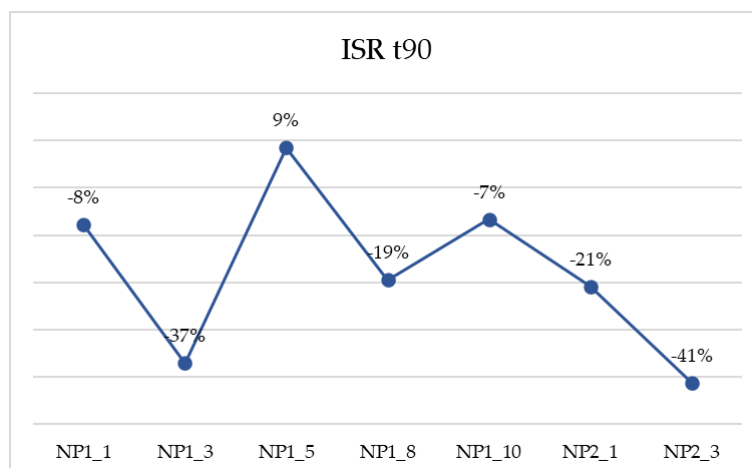


Figura 4.9: Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR a 90 giorni - Miscela NP

Dalla Figura 4.10 emerge che la miscela P a 30 giorni è caratterizzata da valori sia positivi sia negativi dell'indice ISR, che corrispondono ad un recupero non omogeneo della resistenza meccanica.

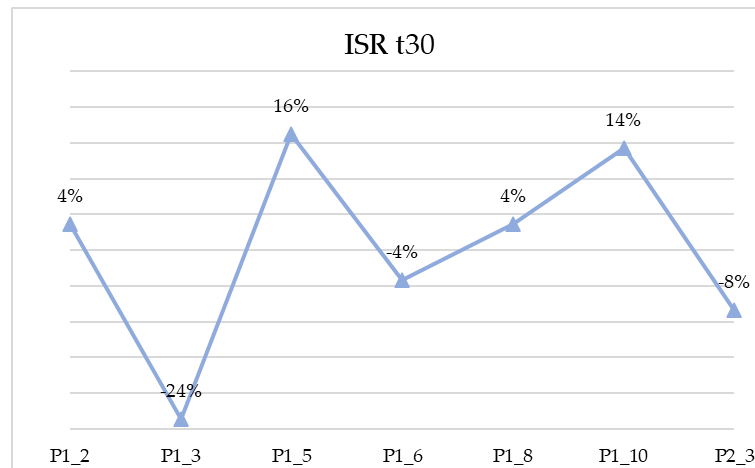


Figura 4.10 Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR a 30 giorni - Miscela P

Dalla Figura 4.11 emerge che la miscela NP a 90 giorni è caratterizzata da valori positivi dell'indice ISR, che corrispondono ad un incremento della resistenza meccanica. Solo il provino P1_3 presenta picco negativo del valore di ISR.

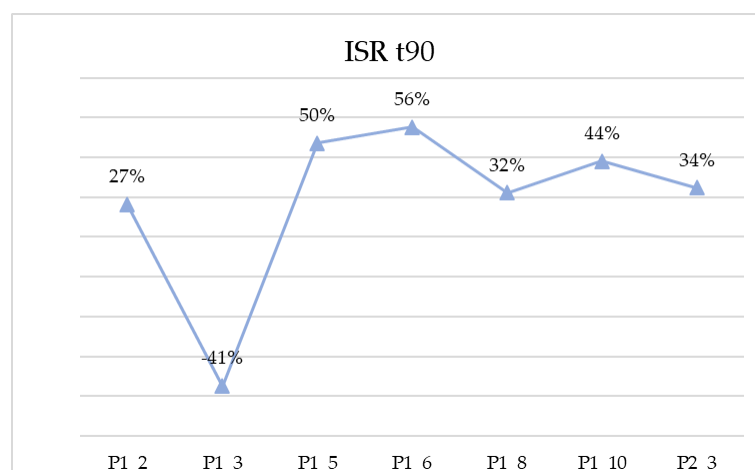


Figura 4.11: Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR a 90 giorni - Miscela P

La Figura 4.12 mostra l'andamento dei valori medi dell'indice di recupero della resistenza per le miscele NP e P. I valori medi sono calcolati al netto degli estremi (massimo e minimo).

La miscela NP presenta un incremento della resistenza meccanica a 30 giorni; a 90 giorni presenta un indice ISR negativo che indica la diminuzione della resistenza meccanica.

La miscela P è caratterizzata da un lieve incremento di resistenza meccanica a 30 giorni; a 90 giorni presenta un netto miglioramento di resistenza, effetto dell'attività di lungo termine dell'additivo cristallino.

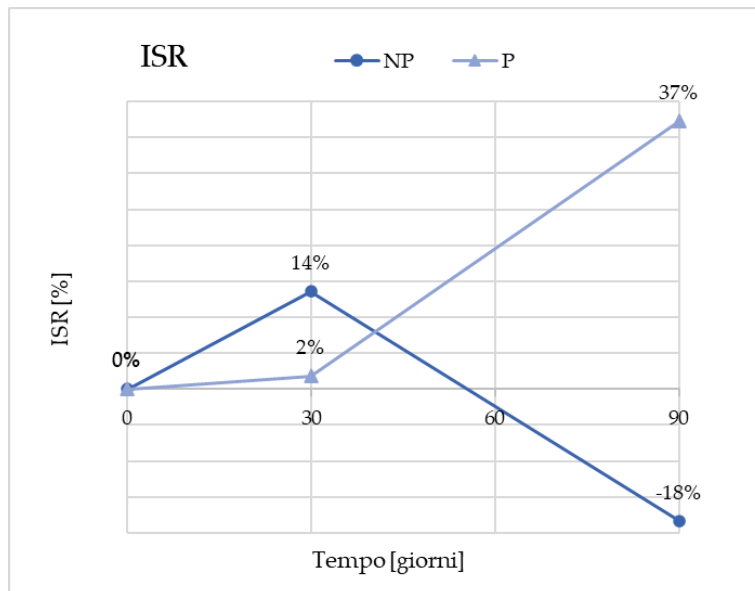


Figura 4.12: Andamento dell'indice di recupero della resistenza ISR - Valori medi

4.4.2 Indice di recupero della rigidezza 1 (IdaR0)

L'indice di recupero delle rigidezze IdaR0 permette di valutare il recupero del danno dei diversi calcestruzzi oggetto di indagine, in riferimento al ciclo di prefessurazione, cioè rispetto al ciclo di carico iniziale.

Si calcola come rapporto tra il recupero di rigidezza del ciclo i-esimo di fessurazione rispetto alla rigidezza al momento della pre-fessurazione e la perdita di rigidezza tra fase di carico e fase di scarico al momento della pre-fessurazione.

L'indice IdaR0 può essere valutato tramite la seguente espressione:

$$IDaR0 [\%] = \frac{k_c^i - k_s^0}{k_c^0 - k_s^0}$$

Equazione 15: Definizione indice di recupero della rigidezza IDaR0

In cui:

- k_c^i , rappresenta la rigidezza di carico del ciclo i-esimo di fessurazione;
- k_s^0 , rappresenta la rigidezza di scarico della curva di pre-fessurazione;
- k_c^0 , rappresenta la rigidezza di carico della curva di pre-fessurazione.

Per comprendere meglio il significato dei termini appena introdotti utili al calcolo dell'indice di recupero della rigidezza, si riporta in Figura 4.13, un esempio in cui si mostra graficamente l'individuazione di k_c^i, k_s^0, k_c^0 .

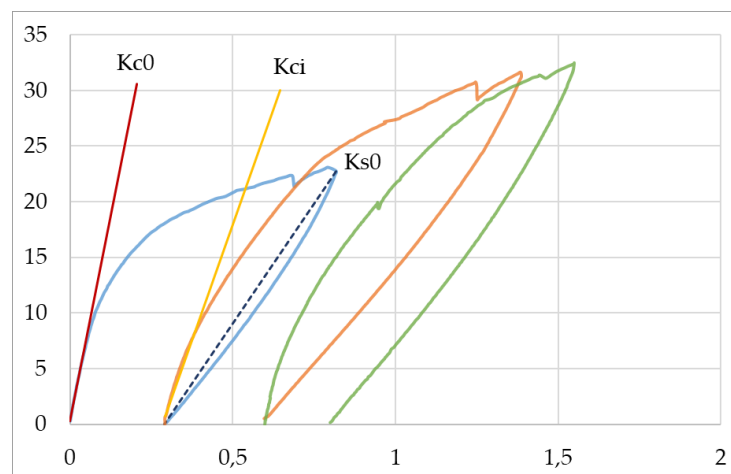


Figura 4.13: Esempio per l'individuazione dei valori di rigidezza $Kc0$, $Ks0$ e Kci , per il calcolo dell'indice $IdaR0$

La rigidezza di carico viene calcolata come pendenza della tangente al ramo di carico della curva, a partire dallo sforzo di inizio carico fino al 25% del carico di picco.

La rigidezza di scarico viene calcolata come pendenza della secante passante per i punti di inizio scarico e di fine scarico.

In particolare, per determinare il valore delle rigidezze è stato utilizzato il comando "pendenza" del programma Excel, che definisce una regressione lineare dei valori di ordinate e ascisse noti indicati.

In Allegato D si riportano le curve utilizzate per determinare k_c^i, k_s^0, k_c^0 per ogni provino e una tabella con i relativi valori.

L'indice di recupero delle rigidezze assume i seguenti significati:

- $IDaR0 = 0 \rightarrow k_c^i = k_s^0$, nessuna variazione di rigidezza, nessun recupero del danno;
- $IDaR0 < 0 \rightarrow k_c^i - k_s^0 < 0$, diminuzione della rigidezza, aumento del danno;
- $0 < IDaR0 < 100\% \rightarrow k_c^i < k_c^0$, diminuzione della rigidezza i-esima, recupero parziale del danno;
- $IDaR0 \geq 100\% \rightarrow k_c^i \geq k_c^0$, aumento della rigidezza, recupero totale del danno.

In Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17, sono riportati i valori dell'indice di recupero della rigidezza IDaR0 per ogni provino, per ogni periodo di prova.

Osservando i valori degli indici ottenuti per ogni campione, per quanto riguarda la miscela P (Figura 4.14), dopo il primo ciclo di prove i provini presentano un recupero parziale del danno ad eccezione del provino P1_6 in cui si verifica un incremento del danno e del provino P1_8 in cui si ha un miglioramento della rigidezza (con valore dell'indice superiore a 100%). Complessivamente si ottiene un recupero parziale del danno con un valore di $IdaR0$ di circa il 65.77% dopo il primo ciclo di prove.

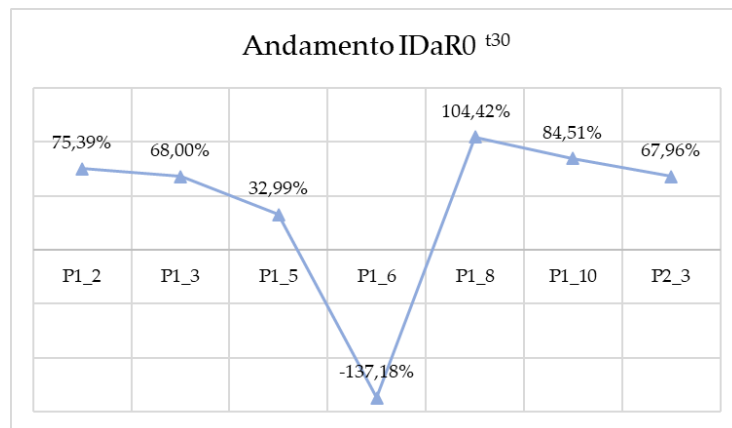


Figura 4.14: Andamento dell'indice $IdaR0$ a 30 giorni, miscela P

A 90 giorni (Figura 4.15), ossia dopo la seconda ri-fessurazione si ottiene andamento analogo. La maggior parte dei provini mostra recupero parziale delle rigidzze, mentre i provini P1_3 e P1_8 incrementano le loro rigidzze e il provino P1_6 non recupera rispetto al valore di rigidzza iniziale. Complessivamente, a 90 giorni si ha un recupero del danno superiore delle rigidzze rispetto al primo ciclo di ri-fessurazione, con un valore di $IdaR0$ pari a 84.40%.

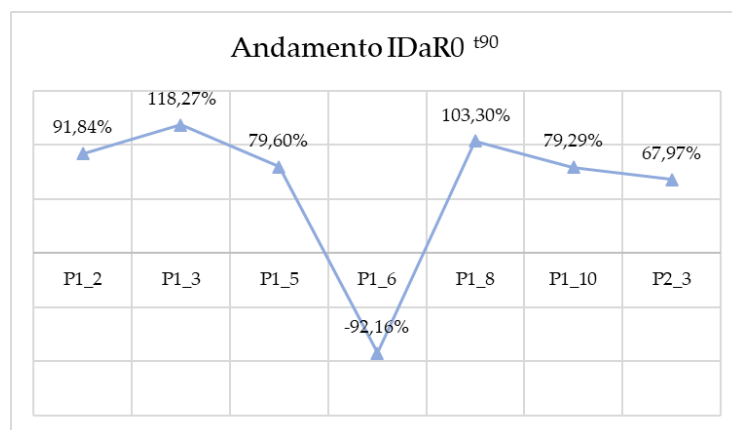


Figura 4.15: Andamento dell'indice $IdaR0$ a 90 giorni, miscela P

Per quanto riguarda la miscela NP, a 30 giorni tutti i provini presentano un recupero parziale del danno (Figura 4.16). Complessivamente si ottiene un recupero parziale di circa il 35.43%. Sebbene tutti i provini presentino un valore di indice di recupero della rigidezza compreso tra zero e cento, $0 < \text{IdaR0} < 100\%$, globalmente la miscela NP ha un recupero inferiore rispetto alla miscela P.

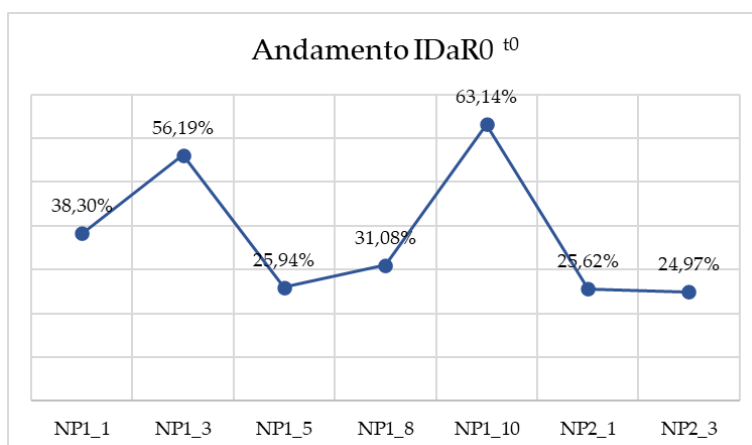


Figura 4.16: Andamento indice IdaR0 a 30 giorni, miscela NP

A 90 giorni (Figura 4.17) si ottiene andamento analogo al precedente. Tutti i provini mostrano un recupero parziale del danno ad eccezione del provino NP2_3 in cui si verifica un lieve incremento del danno. Complessivamente, a 90 giorni, si ha un recupero del danno inferiore delle rigidezze rispetto al primo ciclo di ri-fessurazione, con un valore di IdaR0 pari a 25.21%. Anche in riferimento al secondo ciclo di ri-fessurazione la miscela NP ha un recupero inferiore rispetto alla miscela P.

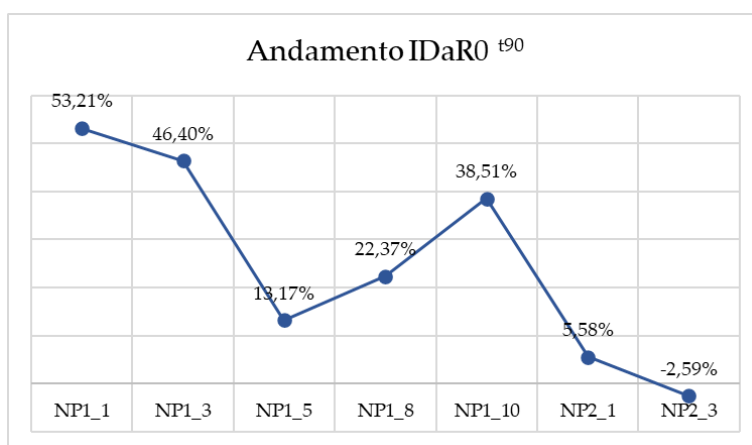


Figura 4.17: Andamento indice IdaR0 a 90 giorni, miscela NP

La Figura 4.18 mostra l'andamento dei valori medi dell'indice IDaR0 per le miscele NP e P, ai successivi periodi di prova. I valori medi sono calcolati al netto degli estremi (massimo e minimo).

A 30 giorni sia la miscela NP sia la miscela P presentano un recupero parziale delle rigidzze, con un valore dell'indice IDaR0 rispettivamente di 37.89% e 42.30. A 90 giorni la miscela P recupera ulteriormente la rigidzza, incrementando il valore dell'indice. Anche la miscela NP mostra un recupero parziale del danno che si mantiene inferiore rispetto a quello calcolato al ciclo precedente.

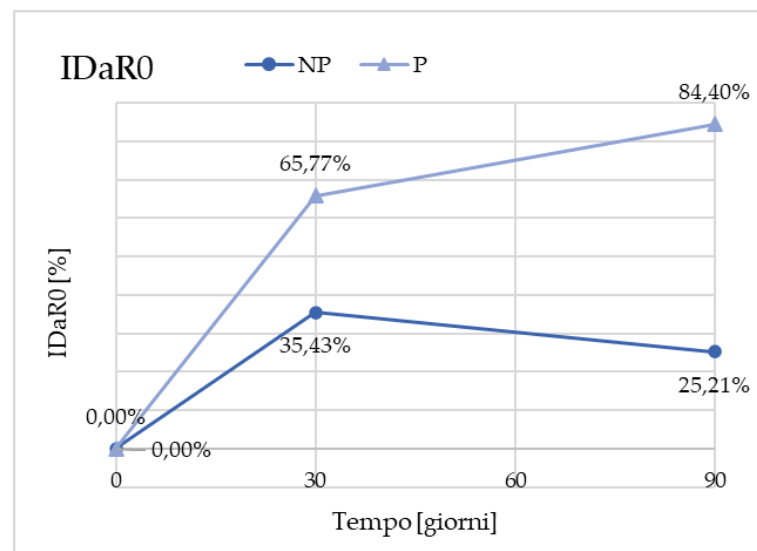


Figura 4.18: Andamento dell'indice IDaR0 - Valori medi

4.4.3 Indice di recupero della rigidezza 2 (IdaR*)

L'indice IdaR consente di valutare il recupero delle rigidzze in riferimento al ciclo di fessurazione precedente. Tale indice può essere valutato attraverso l'espressione:

$$IDaR^* [\%] = \frac{k_c^i - k_s^{i-1}}{k_c^{i-1} - k_s^{i-1}}$$

Equazione 16: Definizione indice di recupero della rigidzza IdaR*

In cui:

- k_c^i , rappresenta la rigidzza di carico del ciclo i-esimo di fessurazione;
- k_s^{i-1} , rappresenta la rigidzza di scarico del ciclo di fessurazione precedente al ciclo i-esimo;
- k_c^{i-1} , rappresenta la rigidzza di carico della curva fessurazione precedente al ciclo i-esimo.

Per comprendere meglio il significato dei termini appena introdotti utili al calcolo dell'indice di recupero della rigidzza, si fa riferimento a in Figura 4.19, per l'individuazione di $k_c^i, k_s^{i-1}, k_c^{i-1}$.

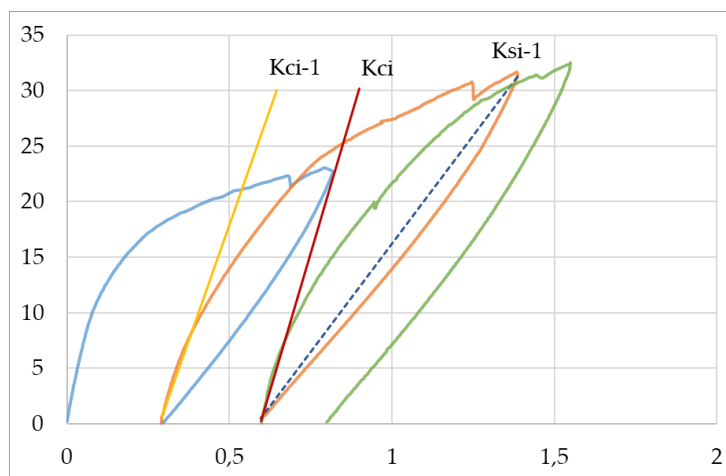


Figura 4.19: Esempio per l'individuazione dei valori di rigidzza K_{ci} , K_{si} e K_{ci-1} , per il calcolo dell'indice $IdaR^*$

I valori delle rigidezze sono stati ricavati con modalità analoghe a quelle descritte al paragrafo 4.4.2.

L'indice di recupero delle rigidezze assume i seguenti significati:

- $IDaR0 = 0 \rightarrow k_c^i = k_s^{i-1}$, nessuna variazione di rigidezza, nessun recupero del danno;
- $IDaR0 < 0 \rightarrow k_c^i - k_s^0 < 0$, diminuzione della rigidezza, aumento del danno;
- $0 < IDaR0 < 100\% \rightarrow k_c^i < k_c^{i-1}$, diminuzione della rigidezza i-esima, recupero parziale del danno;
- $IDaR0 \geq 100\% \rightarrow k_c^i \geq k_c^{i-1}$, aumento della rigidezza, recupero totale del danno.

In Allegato D si riportano le curve utilizzate si riportano utilizzate per determinare $k_c^i, k_s^{i-1}, k_c^{i-1}$ per ogni provino e una tabella con i relativi valori.

In Figura 4.20 e in Figura 4.21 si riportano i valori dell'indice IDaR* per ogni provino.

I grafici di Figura 4.20 e di Figura 4.21 si riferiscono al recupero delle rigidezze tra la prima (a 30 giorni) e la seconda ri-fessurazione (a 90 giorni) , in quanto valutare il recupero tra pre-fessurazione (tempo zero) e prima ri-fessurazione coincide con la stima dell'indice IDaR0^{t30} riportato in Figura 4.14 per la miscela P e in Figura 4.16 per la miscela NP.

Tra la prima e la seconda ri-fessurazione (Figura 4.20), i provini della miscela P presentano un recupero parziale del danno ad eccezione del provino P1_3 in cui si verifica un lieve incremento del danno e dei provini P1_8 e P1_10 in cui si ha un miglioramento della rigidità. Complessivamente, a 30 giorni si ottiene un recupero parziale del danno con un valore di $IdaR^*$ di 65.77%; a 90 giorni il valore di $IdaR^*$ vale 73.33%.

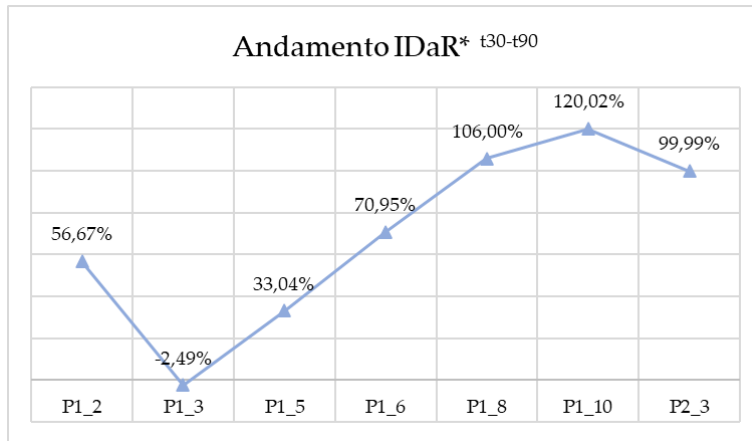


Figura 4.20: Andamento indice $IdaR^*$ tra secondo e terzo ciclo di prova (30-90 giorni), miscela P

Tra la prima e la seconda ri-fessurazione (Figura 4.21), nessun provino della miscela NP presenta incremento del danno. Tutti mostrano un recupero parziale del danno ad eccezione del provino P1_3 in cui si ha un miglioramento della rigidità. Complessivamente, a 30 giorni il recupero è pari a 35.43%; a 90 giorni si ottiene un recupero parziale del danno con un valore di $IdaR^*$ di circa il 68.20%.

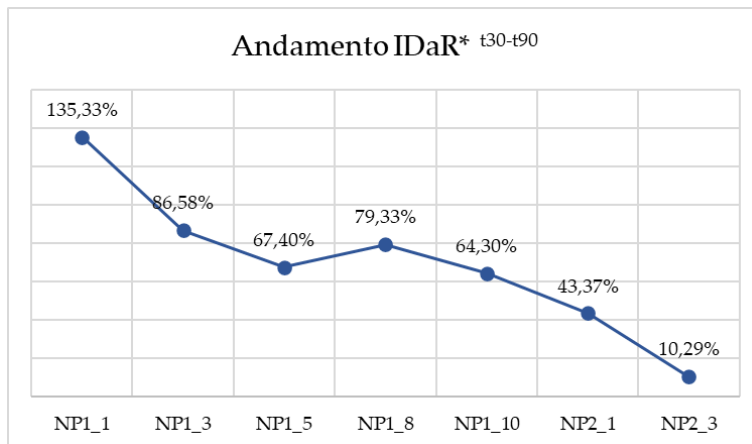


Figura 4.21: Andamento indice $IdaR^*$ tra secondo e terzo ciclo di prova (30-90 giorni), miscela NP

In Figura 4.22 è rappresentato l'andamento dei valori medi dell'indice IDaR* per le miscele NP e P. I valori medi sono calcolati al netto degli estremi (massimo e minimo).

Entrambe le miscele presentano un recupero delle rigidezze tra un ciclo di prove e il successivo. Inoltre, i valori dell'indice risultano essere confrontabili e sono entrambi di circa 70%. Si è verificato per entrambe le miscele un recupero parziale del danno, nonostante le ri-fessurazioni eseguite sui campioni.

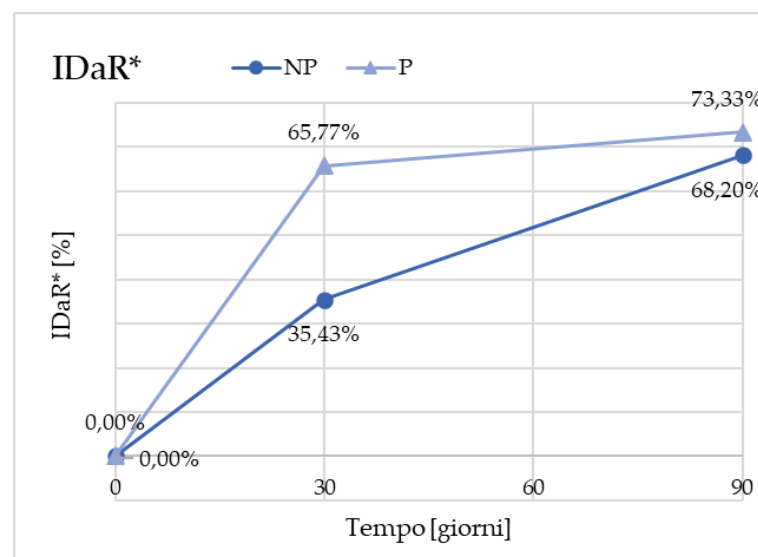


Figura 4.22: Andamento dell'indice IDaR* - Valori medi

4.5 Indici di self-healing

Dopo aver estratto con il software Adobe Photoshop (seguendo la procedura descritta al paragrafo 3.8) i dati dalle immagini acquisite con il microscopio digitale, è stato possibile valutare parametri quali l'apertura media e l'area della fessura.

4.5.1 Apertura media di fessura

La stringa di dati estratti con Adobe Photoshop contiene, tra gli output, il valore "Area" e il valore "Altezza".

Il valore "Area" è espresso in millimetri quadrati grazie all'impostazione della scala di misurazione pixel-millimetri di cui si è parlato al paragrafo 3.8.2. Tale valore indica l'area dei pixel che risultano essere neri dopo la conversione in bitmap, ossia l'effettiva area della fessura aperta.

Attraverso il valore di "Area" e "Altezza" è possibile ottenere un valore di ampiezza media:

$$W_{media} \cong \frac{A}{h}$$

Equazione 17: Definizione apertura media di fessura W

Una procedura alternativa per la valutazione dell'apertura media di fessura è data dalla seguente relazione:

$$W_{media} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{3}$$

Equazione 18: Relazione alternativa per il calcolo dell'apertura media di fessura

Con ciò si vuole calcolare la media di tre misure di apertura di fessura ottenute con lo "strumento righello" del programma Adobe Photoshop.

Tuttavia, escluso il tempo di inizio della campagna sperimentale in cui il provino risulta essere ancora pulito e privo di impurità, nei successivi periodi di osservazione è difficoltoso individuare chiaramente i lembi della fessura, e quindi eseguire una misurazione affidabile. Ciò è dovuto a molteplici fattori, tra cui:

presenza di materiale depositato più o meno coerente, healing non omogeneo e richiusura parziale della fessura.

L'utilizzo dello strumento righello porta con sé ulteriori fattori di incertezza: è necessario posizionare manualmente il cursore per il tracciare il segmento senza l'ausilio di comandi in grado di intercettare automaticamente le estremità della fessura; risulta complicato il mantenersi perfettamente ortogonali ai lembi della fessura; infine, è molto difficile realizzare misure a intervalli di osservazione successivi nello stesso punto esatto.

Pertanto, si è deciso di valutare l'apertura medi di fessura W tramite l'Equazione 17.

4.5.2 Indice di richiusura

L'indice di richiusura permette di stimare l'efficacia delle proprietà di self-healing delle miscele in esame.

L'indice di richiusura, IR , viene valutato secondo la relazione:

$$IR [\%] = 1 - \frac{A_i}{A_{i-1}} \frac{L_{i-1}}{L_i} = 1 - \frac{W_i}{W_{i-1}}$$

Equazione 19: Definizione indice di richiusura IR

In cui:

- A_i , area della fessura misurata al tempo i-esimo, che corrisponde alla fine del periodo di osservazione;
- A_{i-1} , area della fessura misurata al periodo di osservazione precedente al tempo i-esimo;
- L_i , lunghezza della fessura misurata al tempo i-esimo, che corrisponde alla fine del periodo di osservazione;
- L_{i-1} , lunghezza della fessura misurata al periodo di osservazione precedente al tempo i-esimo;
- W_i apertura media di fessura misurata al tempo i-esimo, che corrisponde alla fine del periodo di osservazione;
- W_{i-1} , apertura media di fessura misurata al periodo di osservazione precedente al tempo i-esimo.

L'indice di recupero, espresso tramite percentuale, può assumere i seguenti valori:

- $IR = 0\%$, nessun recupero rispetto all'inizio del periodo di osservazione, la fessura è completamente aperta;
- $0\% < IR < 100\%$, recupero parziale rispetto all'inizio del periodo di osservazione, la fessura è parzialmente richiusa;

- $IR = 100\%$, recupero totale rispetto all’inizio del periodo di osservazione, la fessura è completamente chiusa.

Si vuole sottolineare che l’indice di recupero così calcolato è un indice relativo. Si misura la differenza nei valori di apertura di fessura medi, riferiti al periodo di osservazione. Poiché ad ogni periodo di osservazione corrisponde anche la ri-fessurazione del provino, non è possibile fare sempre riferimento all’apertura misurata al tempo zero: con le successive ri-fessurazioni la fessura viene riaperta a valori simili a quelli iniziali. Sulla base del valore di apertura che si ha all’inizio di ogni periodo di osservazione, si valuta l’indice di recupero.

Il periodo di osservazione corrisponde all’intervallo di tempo che intercorre tra una perturbazione meccanica e l’altra, ossia tra successive fessurazioni. Per maggiore chiarezza si veda la Tabella 4-4 in cui sono evidenziate tutte le tappe delle prove per la valutazione del self-healing. In Tabella 4-5 si evidenziano quali gruppi di foto sono stati confrontati in ogni periodo di osservazione.

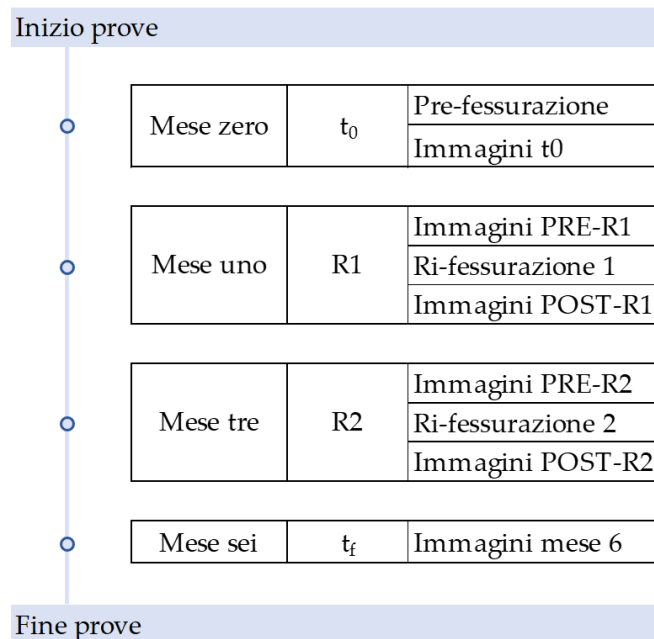


Tabella 4-4: Schema riassuntivo prove

Periodo di osservazione 1		
Dati	Immagini microscopio	Sigla
Iniziali:	DOPO pre-fessurazione	t_0
Finali:	PRIMA ri-fessurazione 1	PRE-R1

Periodo di osservazione 2		
Dati	Immagini microscopio	Sigla
Iniziali:	DOPO ri-fessurazione 1	POST-R1
Finali:	PRIMA ri-fessurazione 2	PRE-R2

Periodo di osservazione 3		
Dati	Immagini microscopio	Sigla
Iniziali:	DOPO ri-fessurazione 2	POST-R2
Finali:	Mese 6	t_f

Tabella 4-5: Schema periodi di osservazione

In Figura 4.23 si riportano le immagini dei punti di misura utilizzate per l'estrazione dei dati. In Allegato F sono presenti gli scatti per ogni punto di misura analizzato.

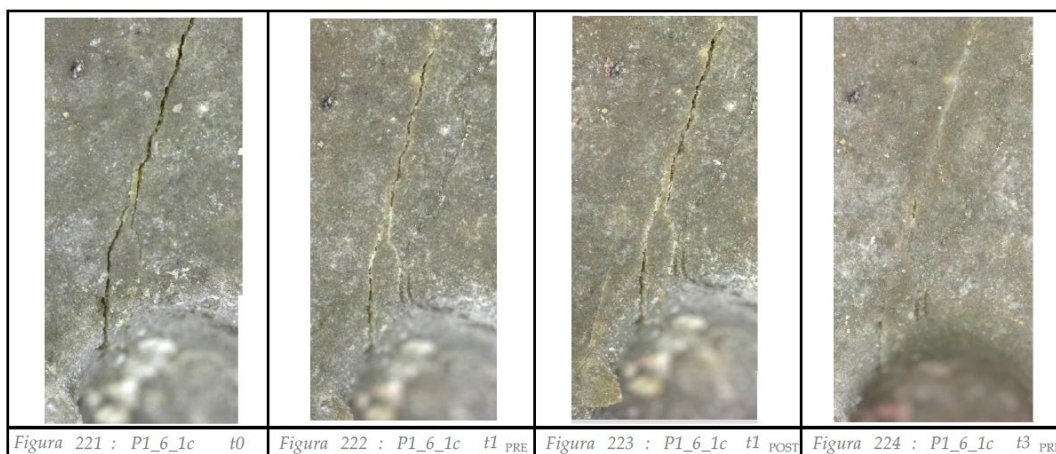


Figura 4.23: Esempio di immagini relative allo stesso punto di misura nei successivi periodi di osservazione

4.6 Analisi del panorama fessurativo

In Tabella 4-6 si riassume il panorama fessurativo dei provini soggetti alle prove di flessione su quattro punti al lembo inferiore della lastra.

La tabella contiene i valori medi su tutti i campioni: restituisce un valore unico per le due miscele studiate.

In Allegato E si riportano anche i dati relativi ad ogni provino e a tutte le fessure analizzate di ogni provino. In Allegato F sono presenti i dati dei singoli punti di misura.

Mix	N° fessure	COD residui [μm]			Mese 0-1			Mese 1-3		
		COD ₁₀	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀ media [μm]	W _{R1 PRE} media [μm]	IR ₀₋₁	W _{R1 POST} media [μm]	W _{R2 PRE} media [μm]	IR ₁₋₃
NP	17	327,79	603,93	869,11	58,40	5,85	83,44%	21,90	8,17	61,56%
P	11	289,29	570,00	840,21	58,40	14,80	78,85%	41,70	14,12	69,75%

Tabella 4-6: Panorama fessurativo per provini soggetti a prove di flessione su quattro punti, miscele NP e P

Dalla prima lettura dei dati medi rappresentativi delle due miscele si evince che il mix NP presenta un numero superiore di fessure, tendenzialmente più piccole (dato che si evince maggiormente nelle tabelle dell'allegato E); la miscela P presenta meno fessure ma con un'apertura media superiore.

È importante osservare che i provini realizzati con la miscela P hanno un numero inferiore di fessure che sono più grandi. Ciò è dovuto a difetti derivanti dalla fase di getto. A causa dell'effetto della segregazione, si suppone che contenuto e distribuzione delle fibre non sono ovunque omogenei. Infatti, la miscela P è caratterizzata da un comportamento peggiore, differenza che, poiché i due mix differiscono solamente per la presenza o meno dell'additivo cristallino, non dovrebbe sussistere o essere così evidente.

Sulla base dei valori di apertura media misurati, si è deciso di individuare un range di apertura e di conteggiare il numero delle fessure per ogni intervallo. Questa valutazione è stata svolta all'inizio e alla fine di ogni periodo di misurazione, in modo da individuare la frequenza degli intervalli di apertura presenti subito dopo

la fessurazione e monitorare la variazione nella distribuzione dell'ampiezza delle fessure al termine del periodo di osservazione.

Inoltre, mediante questa elaborazione è possibile individuare il range di ampiezza preponderante, valutare se una miscela presenta un numero maggiore o minore di fessure rispetto all'altra e, di conseguenza, quale miscela è caratterizzata dalla presenza di fessure con apertura maggiore o minore.

Il grafico di Figura 4.24 mostra la distribuzione dell'ampiezza delle fessure in intervallo di dieci micron. La miscela NP ha il maggiore numero di fessure (si tratta delle sole mappate, il numero totale esatto delle fessure di ogni provino si trova nelle tabelle dell'Allegato E) appartenenti all'intervallo 0-10 micron. La miscela P presenta il maggior numero di fessure nell'intervallo 20-30 micron.

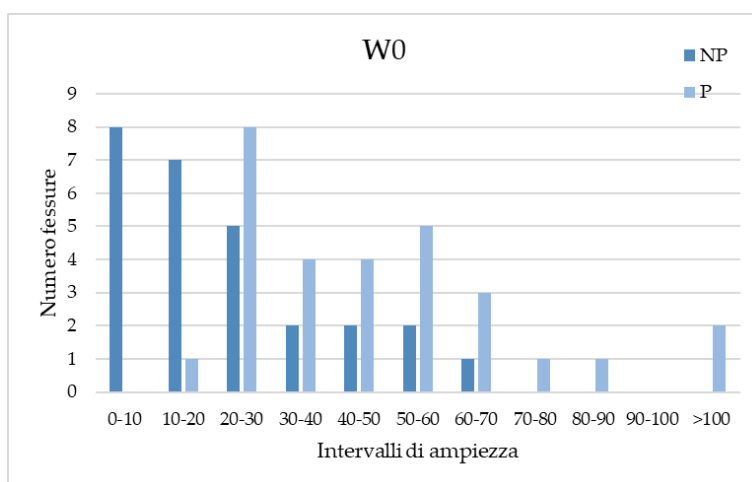


Figura 4.24: Distribuzione delle fessure negli intervalli di apertura all'inizio del primo periodo di osservazione (t0)

Al termine del periodo di osservazione (Figura 4.25) la maggior parte delle fessure della miscela NP rientrano nell'intervallo 0-10 micron. Si è passato da 8 fessure presenti in tale intervallo all'inizio del periodo di osservazione, a un totale di 19. Si vuole sottolineare che tale grafico non indica un aumento delle fessure con apertura media compresa tra 0-10 micron. Il numero superiore di fessure con aperture tra zero e dieci micron indica che: le fessure con apertura media minore si sono completamente richiuse oppure hanno ridotto il valore di W rientrando nel primo intervallo di ampiezze. Le fessure più grandi, in seguito al processo di self-

healing, vedono una riduzione della loro apertura media. Per cui cresce il numero di fessure presenti nell'intervallo 0-10 micron. Tutte le fessure hanno apertura minore rispetto all'inizio del periodo di osservazione.

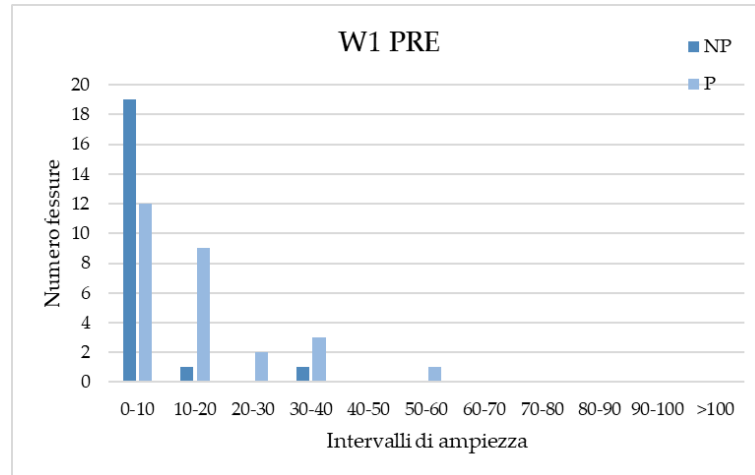


Figura 4.25: Distribuzione delle fessure negli intervalli di apertura alla fine del primo periodo di osservazione

Tra il grafico di Figura 4.24 e quello di Figura 4.25 il numero complessivo delle fessure si riduce da 27 a 21 poiché alcune fessure manifestano un indice di recupero pari al 100%. Per queste fessure non è stato misurato il valore di apertura media in quanto risultano completamente richiuse.

Per la miscela P il picco si sposta nell'intervallo 0-10. Le fessure presentano, ovviamente, valore di apertura media inferiore rispetto all'inizio del periodo di osservazione. Dal totale di 29 fessure di passa a 27 fessure smistate negli intervalli, per lo stesso motivo descritto in precedenza.

All'inizio del secondo periodo di osservazione (Figura 4.26), ossia dopo la prima ri-fessurazione, la miscela NP ha ancora la maggior parte delle fessure appartenenti all'intervallo 0-10. Le altre sono distribuite prevalentemente tra i successivi intervalli 10-20 e 20-30.

La miscela P mantiene il picco di fessure nell'intervallo 20-30, con numerose fessure appartenenti al range 10-20 e 40-50.

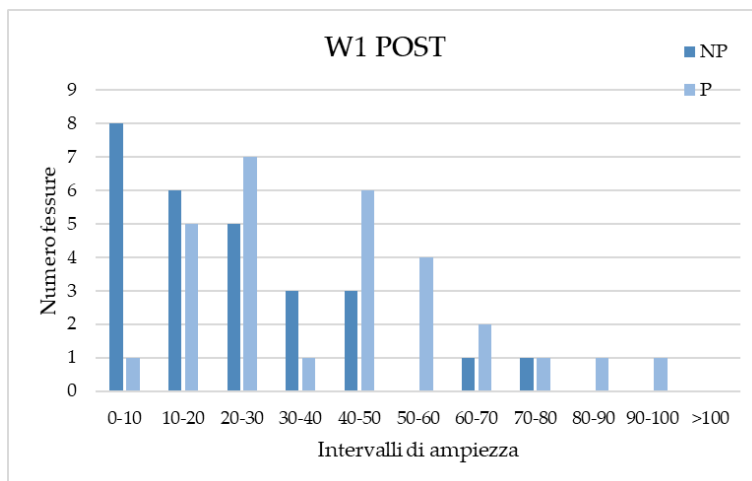


Figura 4.26: Distribuzione delle fessure negli intervalli di apertura all'inizio del secondo periodo di osservazione

Al termine del periodo di osservazione (Figura 4.27), dopo circa due mesi di immersione in acqua potabile, la miscela NP presenta 16 fessure nell'intervallo 0-10 sul totale di 23 fessure. La miscela P presenta 12 fessure nel medesimo intervallo e 10 nel successivo, su un totale di 28.

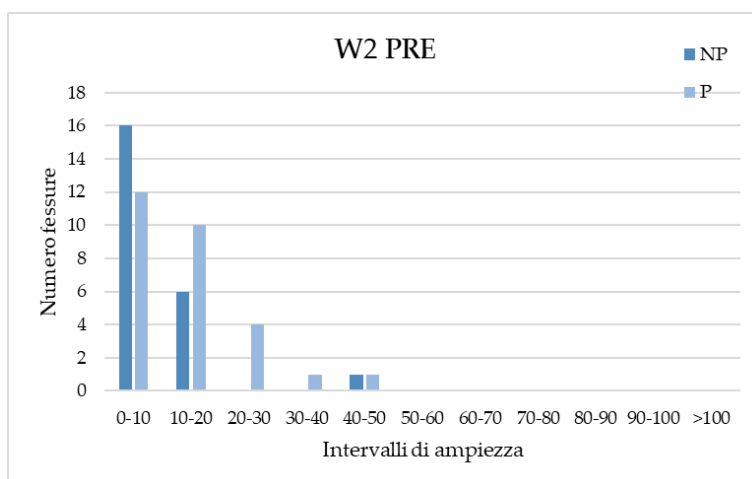


Figura 4.27: Distribuzione delle fessure negli intervalli di apertura alla fine del secondo periodo di osservazione

4.7 Analisi e discussione del self-healing

I grafici di Figura 4.28 e Figura 4.29 mostrano l'andamento per i diversi tempi di healing dell'indice di richiusura in funzione dell'apertura di fessura. Si fa riferimento all'apertura media che si ha all'inizio di ogni intervallo di misurazione.

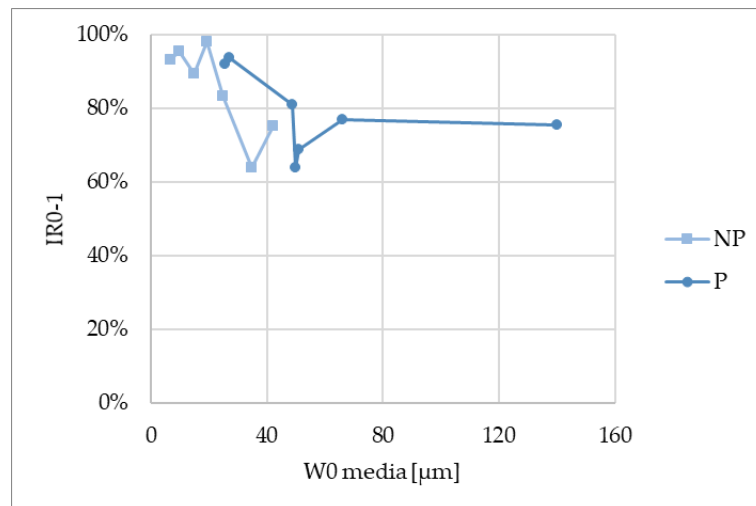


Figura 4.28: Andamento indice di richiusura al termine del primo periodo di osservazione a 30 giorni in funzione dell'apertura media di fessura iniziale.

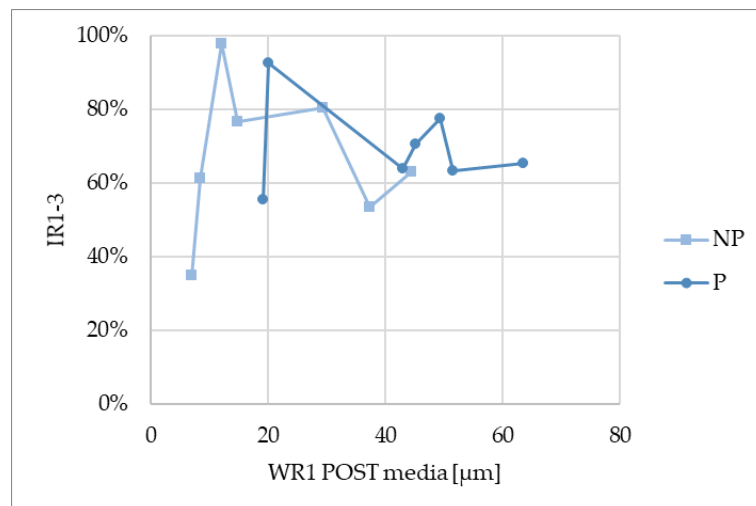


Figura 4.29: Andamento indice di richiusura al termine del secondo periodo di osservazione a 90 giorni in funzione dell'apertura media di fessura iniziale.

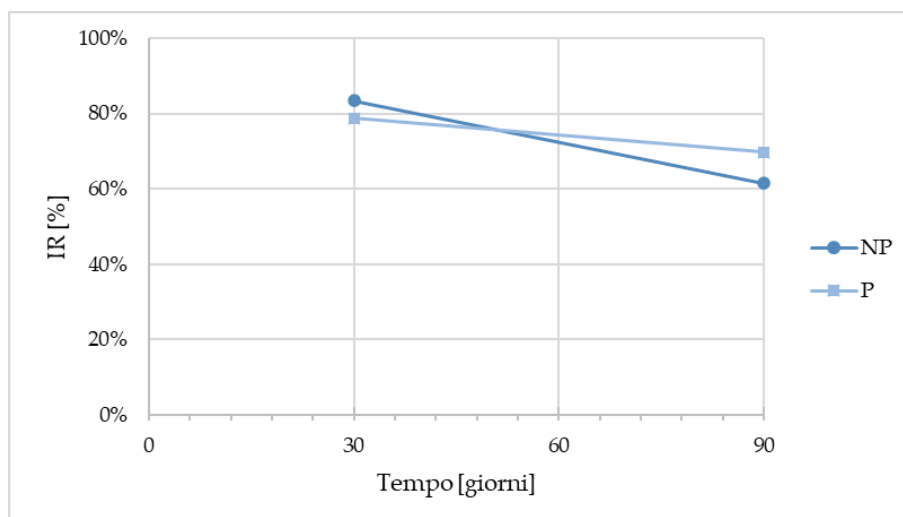


Figura 4.30: Andamento globale dell'indice di recupero per miscele NP e P

La Figura 4.30 mostra l'andamento dell'indice di recupero IR delle due miscele nei due periodi di osservazione successivi.

La miscela NP mostra nell'immediato un indice di recupero leggermente superiore rispetto alla miscela P.

Questo andamento può essere giustificato dal fatto che i provini realizzati con mix NP sono caratterizzati da fessure con valori più bassi di apertura media. In particolare, la miscela NP presenta un numero maggiore di fessure con valori di apertura media inferiore a fronte della stessa deformazione imposta durante le fessurazioni. Le cause di questo comportamento sono state ipotizzate al paragrafo 4.6.

Molti studi mostrano che le fessure con aperture limitate hanno proprietà di self-healing migliori, cioè riescono a richiudersi di più rispetto a fessure con ampiezze più elevate: a valori di apertura media di fessura, W , minori corrispondono indici di recupero, IR, maggiori.

Al termine del secondo periodo di osservazione l'indice di recupero della miscela NP risulta essere inferiore della miscela P.

Tale comportamento può essere imputabile alla presenza dell'additivo cristallino "Penetron" che contraddistingue la miscela P, che stimola in modo prolungato la formazione di cristalli insolubili in grado di sigillare le fessure. Nella miscela NP, con il passare del tempo si esauriscono le possibilità di idratazione ritardata.

L'andamento globale dell'indice di recupero per provini ri-fessurati, è decrescente: si ha un recupero superiore nel breve periodo che tende a diminuire nei cicli di prova successivi.

I valori di indice di recupero ottenuti sono confrontabili con quelli ottenuti da [22]. Nella loro campagna sperimentale hanno studiato tre miscele di calcestruzzi differenti, una delle quali è uguale alla miscela P studiata nel presente lavoro. Per provini con dimensioni ed esposizione analoghe a quelle utilizzata in questa campagna sperimentale, A. Cervini e N. Borgioni hanno ottenuto valori di indici di recupero pari al 71% a 30 giorni e 51% a 90 giorni.

4.8 Correlazione indici meccanici e self-healing

Al termine delle elaborazioni descritte in questo capitolo, sono stati messi in relazione gli indici di recupero meccanico con gli indici utili alla valutazione del self-healing.

I seguenti grafici presentano il valore dell'indice di richiusura in ascissa, mentre in ordinata vi sono gli indici di recupero meccanico da confrontare. In particolare, sono stati tracciati grafici che correlano:

- Indice di recupero della resistenza ISR e indice di richiusura IR;
- Indice di recupero delle rigidezze IDaR0 e indice di richiusura IR;
- Indice di recupero delle rigidezze IDaR0* e indice di richiusura IR.

Sono stati tracciati grafici in cui sono indicati i soli valori medi rappresentativi delle miscele ed altri che riportano i valori relativi ad ogni singolo provino.

I grafici che contengono solamente i valori medi permettono di confrontare i risultati ottenuti tra miscela P ed NP rispetto ad ogni periodo di osservazione e di valutare l'andamento degli indici nel tempo per ciascuna miscela.

I grafici che contengono i valori per ogni provino mostrano la distribuzione degli indici per ogni miscela nei due periodi di osservazione. In queste figure si è preferito mantenere le due miscele, P ed NP, separate.

La Figura 4.31, la Figura 4.32 e la Figura 4.33 riportano la correlazione tra indice di recupero della resistenza ISR e indice di richiusura IR.

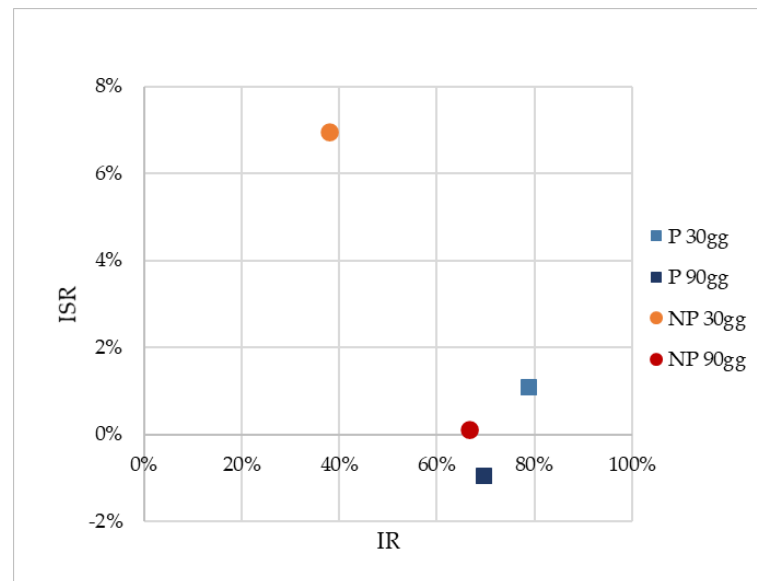


Figura 4.31: Correlazione indice di recupero della resistenza ISR con indice di richiusura IR, a t30 e t90, per le miscele NP e P – Valori medi

Secondo la Figura 4.31, nel primo periodo di osservazione la miscela NP presenta un indice di recupero della resistenza superiore alla miscela P, pur avendo indice di richiusura inferiore. Si osserva che, soffermandosi sui valori valutati a 30 giorni, all'aumentare dell'indice di richiusura diminuisce il valore di ISR.

Nel secondo periodo di osservazione si nota che i valori medi delle miscele sono molto simili. L'indice di recupero della resistenza è ridotto per entrambe le miscele.

Globalmente, la miscela P presenta una diminuzione nel tempo sia dell'indice di recupero della resistenza sia dell'indice di richiusura. All'aumentare di IR si hanno valori di ISR leggermente superiori, registrati nel primo periodo di osservazione (30 giorni). Successivamente (90 giorni) diminuisce ISR e IR.

La miscela NP presenta una diminuzione dell'indice di recupero della resistenza nel tempo, mentre l'indice di richiusura aumenta. All'aumentare di IR, si hanno valori di ISR inferiori. Nel primo periodo di osservazione, si registrano valori di ISR più elevati a fronte di IR minori.

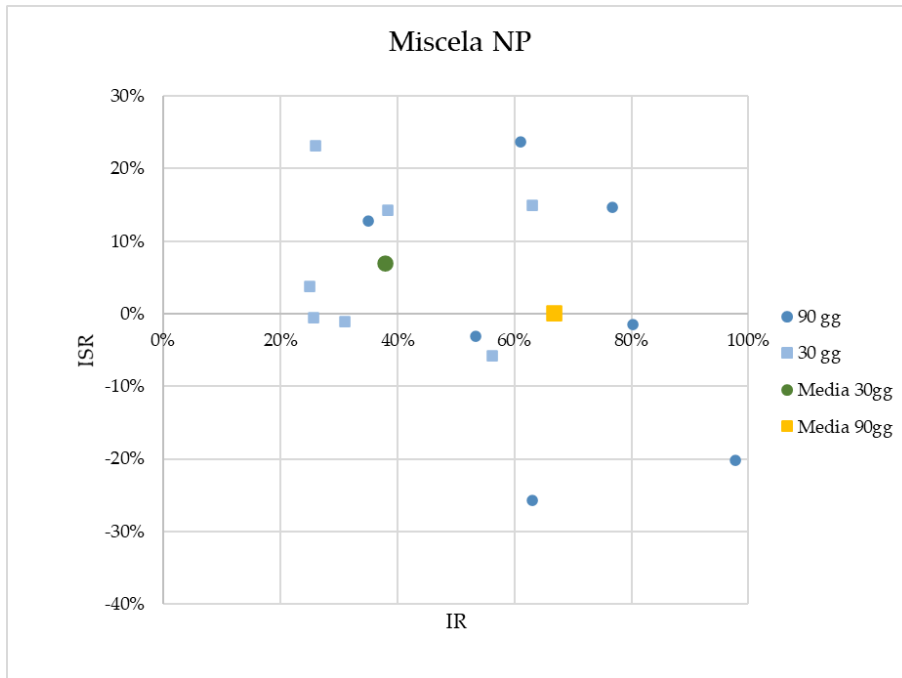


Figura 4.32: Correlazione ISR con IR, a t30 e t90 - Miscela NP

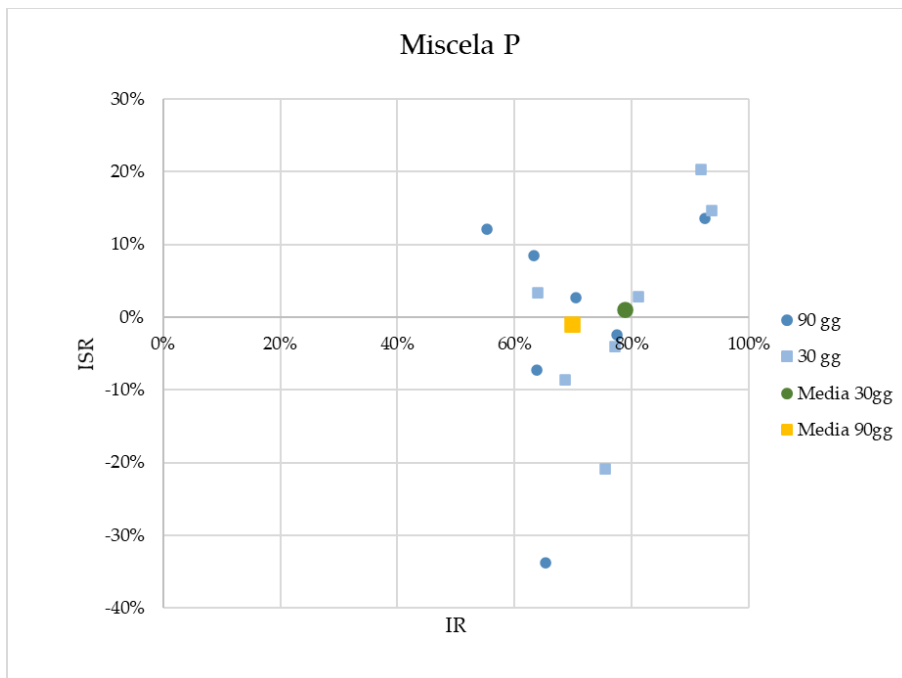


Figura 4.33: Correlazione ISR con IR, a t30 e t90 - Miscela P

La Figura 4.34, la Figura 4.35 e la Figura 4.36 riportano la correlazione tra indice di recupero della rigidità IDaR0 e indice di richiusura IR.

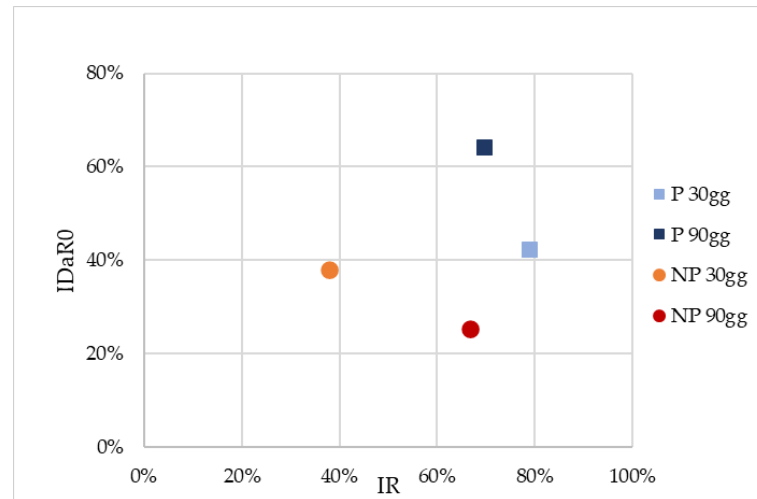


Figura 4.34: Correlazione indice di recupero della rigidità IDaR0 con indice di richiusura IR, a t30 e t90, per le miscele NP e P – Valori medi

Dal grafico di Figura 4.34 si vede come la miscela NP presenti a 30 giorni, valori dell'indice di recupero delle rigidità IDaR0 e dell'indice di richiusura IR inferiori alla miscela P. In questo intervallo di osservazione all'aumentare dell'indice di richiusura si ha un simultaneo aumento dell'indice di recupero delle rigidità.

Nel secondo periodo di osservazione la differenza tra gli indici della miscela NP e della miscela P si mantengono. La miscela NP presenta valori sia di IR sia di IDaR0 inferiori alla miscela P.

Complessivamente per la miscela NP si osserva una diminuzione dell'indice IDaR0 compensato da un incremento del valore di IR.

Contrariamente, la miscela P è caratterizzata da valori di IR più alti a 30 giorni e inferiori a 90 giorni; mentre l'indice di recupero delle rigidità è superiore nell'ultimo periodo di prova.

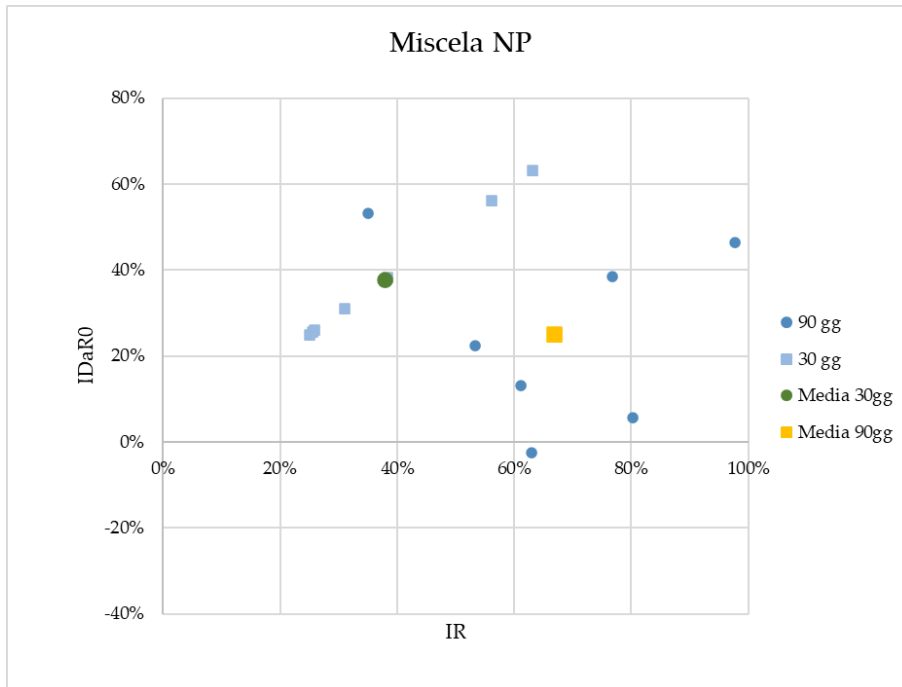


Figura 4.35: Correlazione IDaR0 con IR, a t30 e t90 - Miscela NP

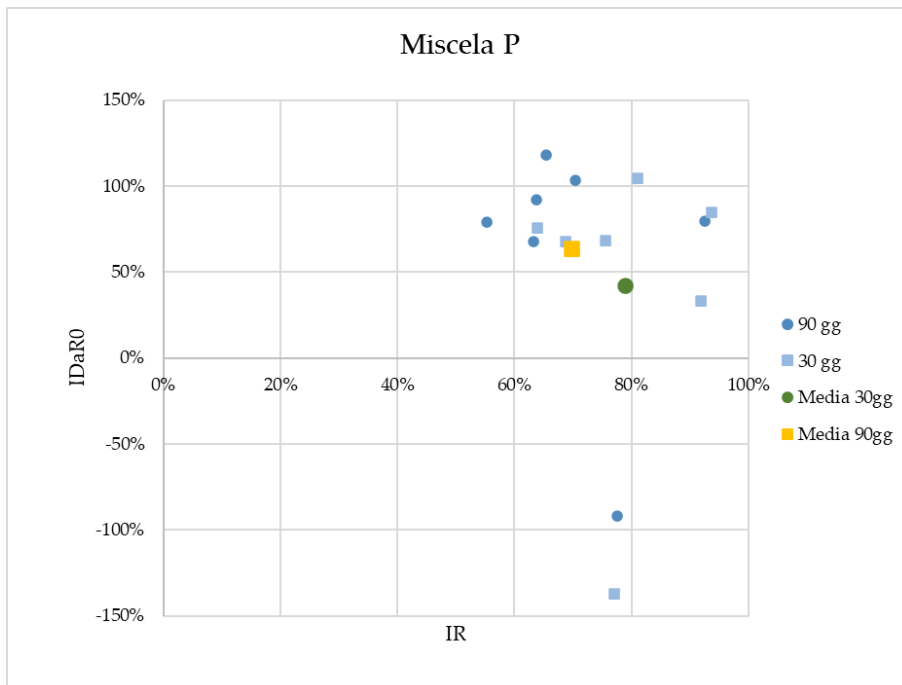


Figura 4.36: Correlazione IDaR0 con IR, a t30 e t90 - Miscela P

Infine, in Figura 4.37, Figura 4.38 e Figura 4.39 sono presenti i valori dell'indice di recupero delle rigidità IDaR* valutati per cicli successivi di prova, correlati all'indice di richiusura IR.

A 30 giorni la miscela P è caratterizzata da valori superiori sia di IR sia di IDaR* rispetto ai valori assunti dalla miscela NP nel medesimo periodo di prova.

Nell'intervallo tra 30 e 90 giorni la miscela NP presenta un miglioramento in entrambi i parametri, mentre la miscela P ha un incremento del valore di IDaR* accompagnato da una diminuzione del valore di IR.

Complessivamente la miscela NP ha un miglioramento di entrambi gli indici tra primo e secondo ciclo di prove. La miscela P riduce il valore dell'indice di richiusura a fronte di un recupero superiore delle rigidità.

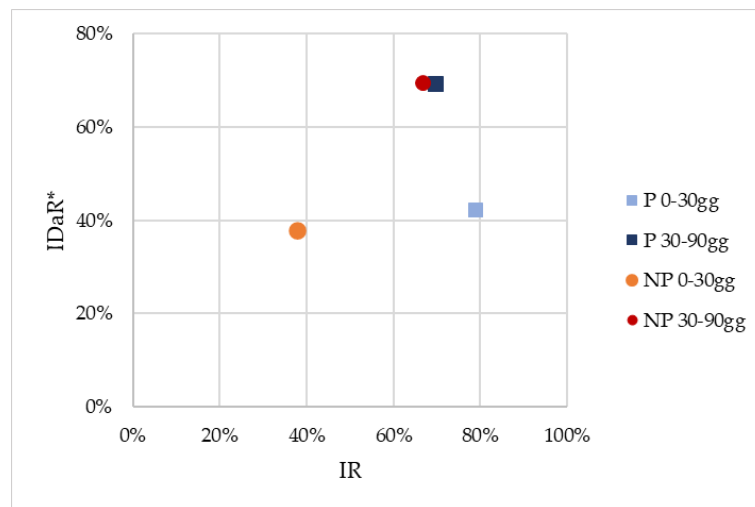


Figura 4.37: Correlazione indice di recupero della rigidità IDaR* con indice di richiusura IR, a t30 e t90, per le miscele NP e P- Valori medi

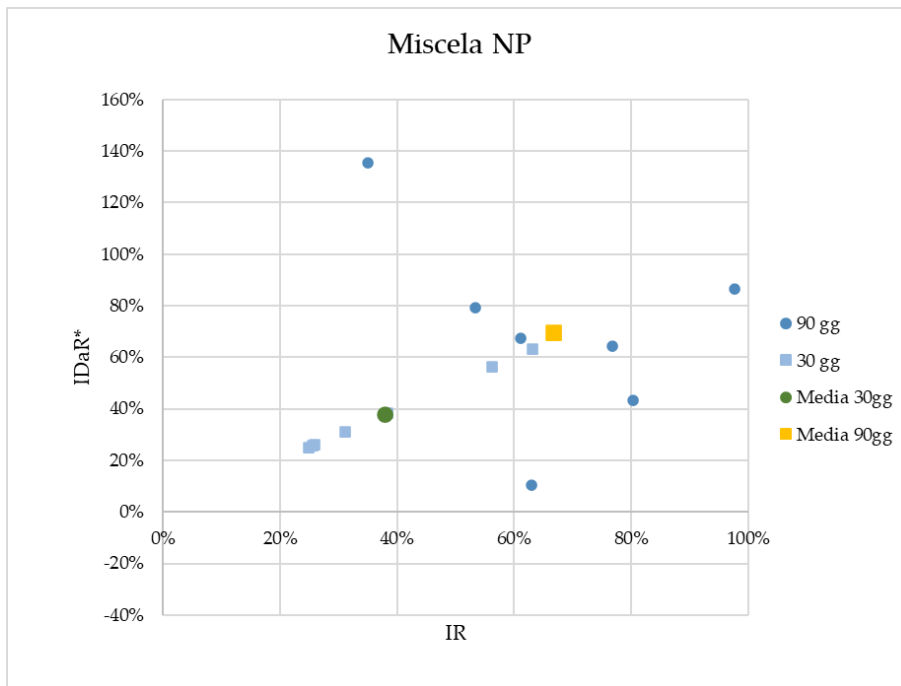


Figura 4.38: Correlazione IDaR* con IR, a t30 e t90 - Miscela NP

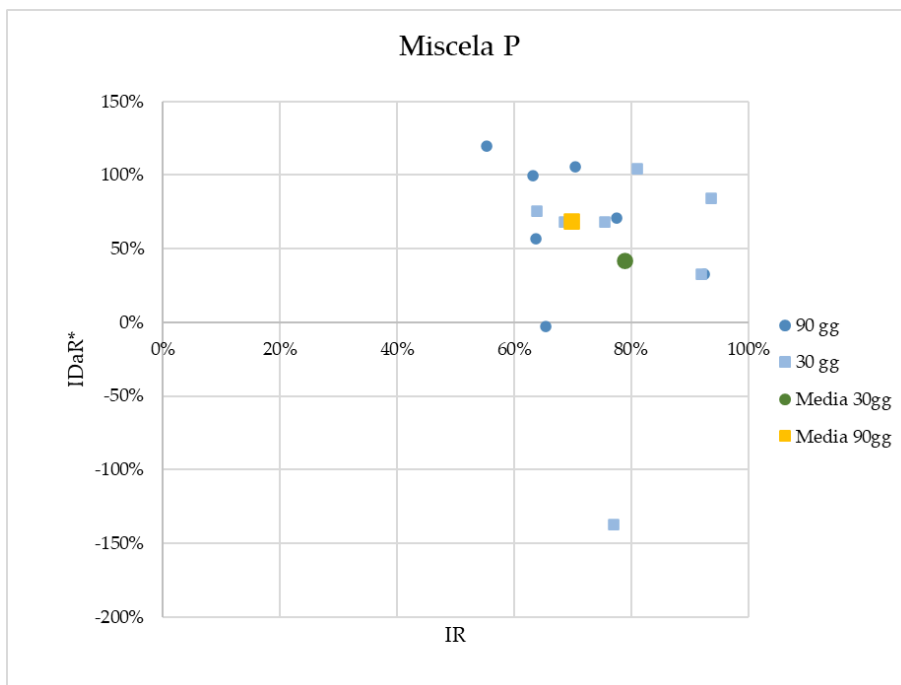


Figura 4.39: Correlazione IDaR* con IR, a t30 e t90 - Miscela NP

4.9 Confronto metodi per la mappatura delle fessure

Le operazioni di mappatura dei provini per la valutazione delle capacità di self-healing sono state eseguite con due strategie differenti: per punti su circa la metà delle fessure presenti e su una fessura completa per ogni provino.

Lo scopo è quello di valutare l'efficacia e l'affidabilità dei due metodi.

La procedura che prevede la mappatura dell'intera fessura fornisce dei risultati affidabili e rappresentativi dell'effettiva capacità di auto-riparazione della stessa. Tuttavia, consente di osservare un numero inferiore di fessure data l'onerosità delle elaborazioni (si consideri che una fessura completa mappata con ingrandimento del microscopio pari a 225 volte si ottiene dall'unione di 200-300 scatti).

Mappando le fessure per punti, a parità di tempo impiegato per l'elaborazione delle foto, si ottengono dati relativi a un numero maggiore di fessure. I dati estratti descrivono meglio il comportamento globale del provino. Tuttavia, è possibile che i punti (cinque per fessura mappata in questa campagna sperimentale) individuino dei punti singolari, non rappresentativi della fessura nel complesso.

Di seguito si riporta l'andamento dell'indice di richiusura calcolato a partire dai dati ottenuti con la mappatura completa (All) e per punti (Points), per ogni intervallo di osservazione.

Nel caso di Figura 4.40 entrambi i metodi mostrano valori dell'indice di recupero simili, con variazioni che si discostano di pochi punti percentuali. Vi sono però alcune eccezioni, come nel caso del provino NP2_1 in cui si ha una differenza di circa 45 punti percentuali. In Figura 4.41 i valori presentano differenze reciproche maggiori che si aggirano attorno ai 15 punti percentuali. Per quanto riguarda la Figura 4.42 due campioni presentano risultati nettamente differenti tra i due metodi di mappatura, i provino NP2_1 e NP1_3; mentre in Figura 4.43 le differenze sono maggiori e riguardano i provini P1_3, P1_6 e P1_8.

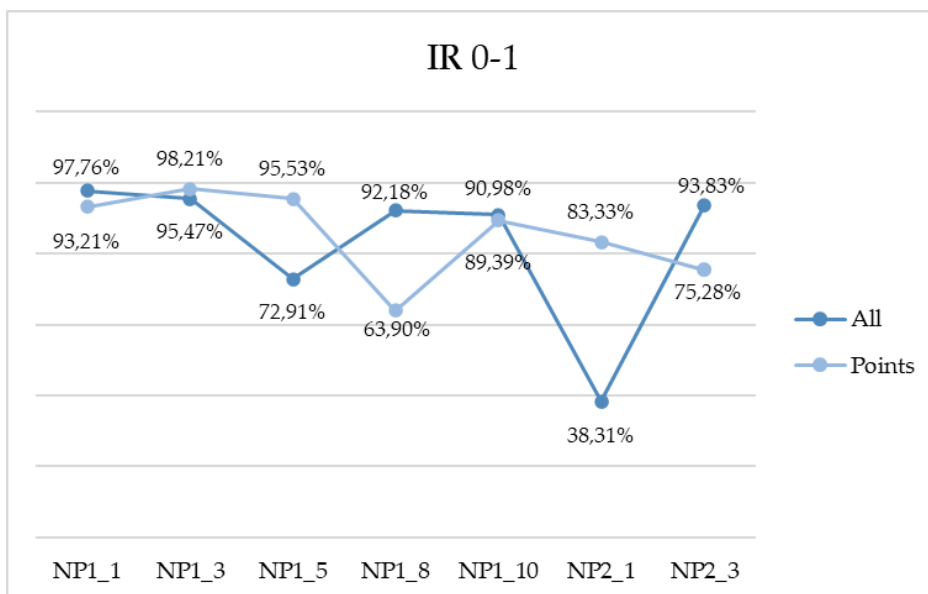


Figura 4.40: Indice di recupero al termine del primo periodo di osservazione (tra tempo zero e un mese), valutato con dati estratti da mappatura completa della fessura e per punti, provini NP

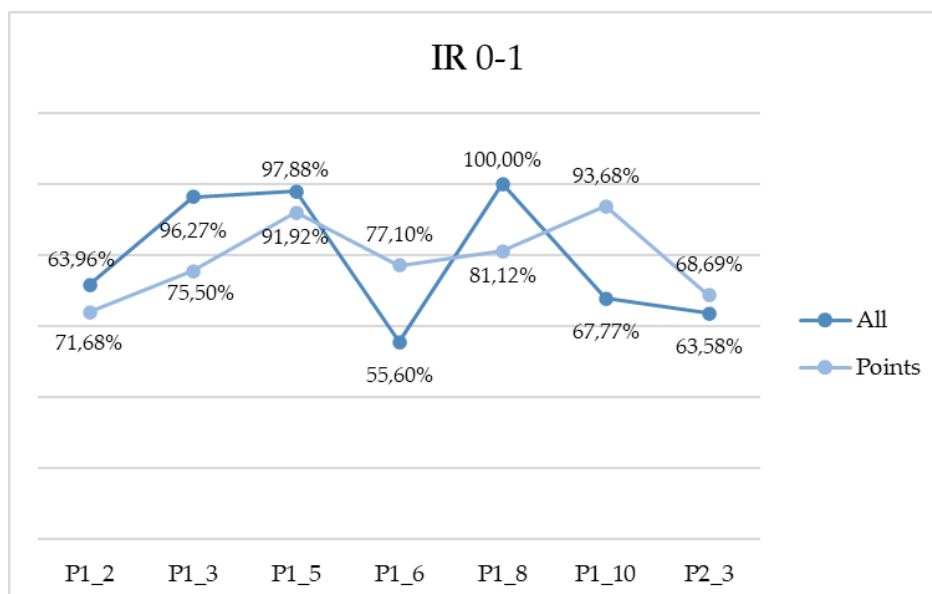


Figura 4.41: Indice di recupero al termine del primo periodo di osservazione (tra tempo zero e un mese), valutato con dati estratti da mappatura completa della fessura e per punti, provini P

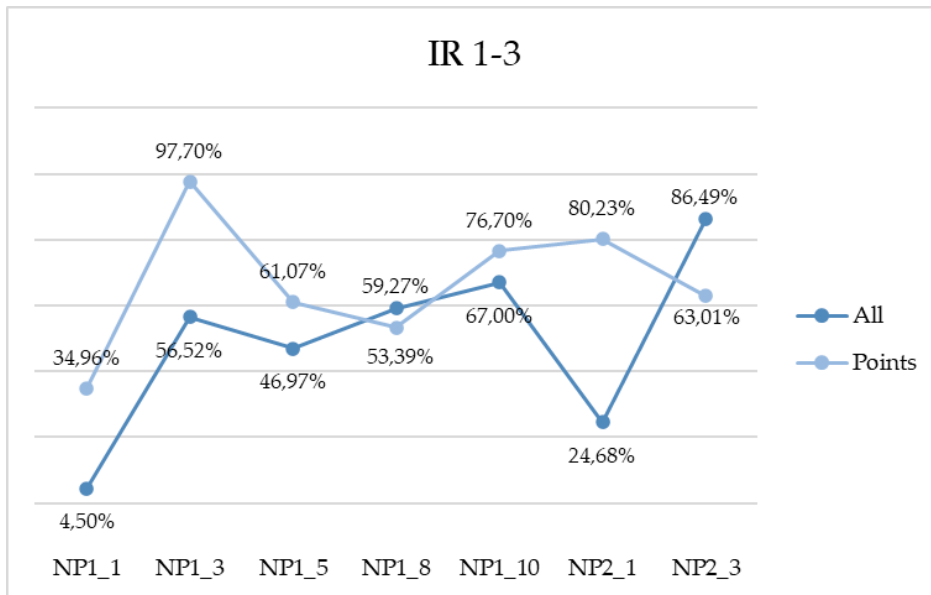


Figura 4.42: Indice di recupero al termine del secondo periodo di osservazione (tra un mese e tre mesi), valutato con dati estratti da mappatura completa della fessura e per punti, provini NP

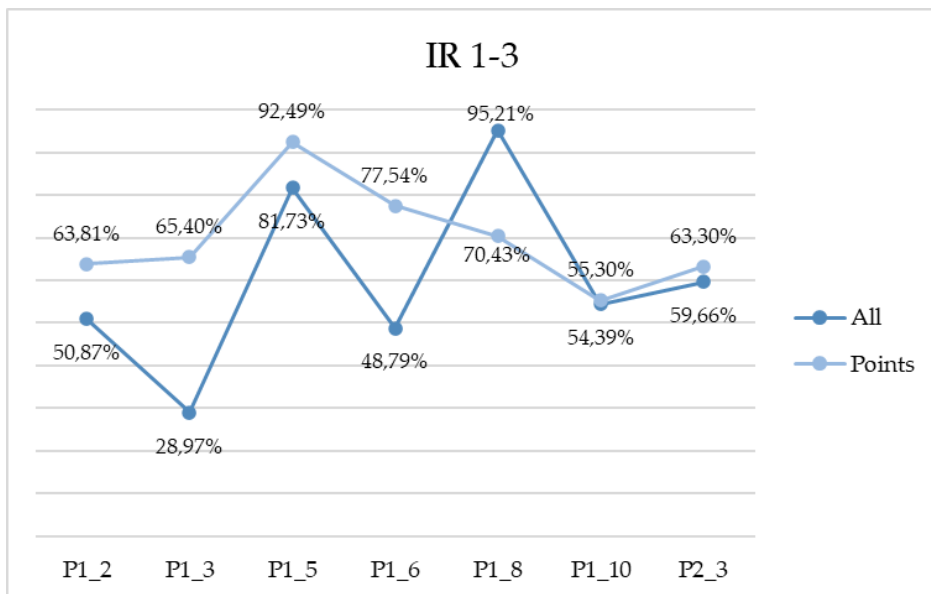


Figura 4.43: Indice di recupero al termine del secondo periodo di osservazione (tra un mese e tre mesi), valutato con dati estratti da mappatura completa della fessura e per punti, provini P

5 Conclusioni

Questo elaborato ha come obiettivo la valutazione delle capacità di autoriparazione autogena e stimolata di calcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni.

Mediante l'applicazione di una metodologia sperimentale sono state studiate due miscele cementizie fibrorinforzate che si differenziano per l'aggiunta di additivo cristallino (Penetron Admix) in una di esse.

Le due miscele sono state individuate dalla sigla P (con additivo cristallino Penetron Admix) ed NP (senza additivo cristallino Penetron Admix). Gli altri componenti sono cemento Portland, loppa d'altoforno, aggregati fini, acqua, additivo superfluidificante e fibre metalliche.

I materiali sono stati gettati in lastre (100x50x3 cm) che sono state accuratamente stagionate e infine tagliate in dieci provini prismatici ciascuna.

È stato stilato il programma della campagna sperimentale che prevede quattro cicli di prove, iniziando a 90 giorni dal getto e successivamente a un mese, tre mesi e sei mesi dalla prima fessurazione.

I campioni sono stati sottoposti a prove monotone a rottura per la caratterizzazione meccanica, mediante prove di flessione su quattro punti. Sia la miscela NP sia la miscela P evidenziano un comportamento incrudente, garantito dalla presenza delle fibre metalliche che migliorano il comportamento a trazione, la tenacità, la duttilità, la resilienza e la durabilità in quanto contrastano l'apertura progressiva delle fessure della matrice cementizia.

Al fine di comprendere le capacità di autoriparazione del materiale e le proprietà di recupero meccanico, sono stati eseguiti cicli di fessurazione, sempre mediante prove di flessione su quattro punti.

I cicli di fessurazione sono stati alternati a periodi di immersione continua in acqua. A ciascuno di essi sono stati associati i valori dell'indice di richiusura e

l'apertura media di fessura. Tali dati sono stati ottenuti mediante analisi delle immagini scattate con l'ausilio di un microscopio digitale ed elaborati con il software Adobe Photoshop.

Dalle indagini svolte sul panorama fessurativo è emerso che la miscela NP presenta un numero superiore di fessure con valori di apertura media più ridotti rispetto alla miscela P, che è caratterizzata dalla presenza di un minor numero di fessure con un'apertura media superiore.

Questa differenza potrebbe, parzialmente, essere imputata a problemi riscontrati in fase di getto, come la segregazione responsabile di una distribuzione non omogenea delle fibre all'interno del getto.

Per quanto riguarda l'indice di richiusura, a 30 giorni risulta leggermente superiore il valore della miscela NP (83%) rispetto alla miscela P (79%). Ciò significa che a 30 giorni non risulta così evidente il contributo dell'additivo cristallino. In questa fase, sono presenti all'interno del materiale, ancora molte particelle anidre e, grazie al condizionamento in acqua, vengono stimulate le reazioni di idratazione ritardata che risultano essere le principali responsabili dell'autoguarigione del calcestruzzo. Inoltre, i provini realizzati con il mix NP sono caratterizzati dalla presenza di fessure con apertura media più piccola e solitamente, a valori di W minori, corrispondono più elevati valori di indice di richiusura IR.

A 90 giorni invece si manifesta il contributo delle aggiunte cristalline. Infatti, per la miscela P l'indice IR è superiore (70%) rispetto alla miscela NP (60%).

È importante sottolineare che, nel caso di provini ri-fessurati, cioè che subiscono successive perturbazioni, l'indice di richiusura si riduce nel tempo, in quanto le reazioni promosse dalle aggiunte si ritrovano a dover far fronte ad aperture di fessura sempre rinnovate sul valore iniziale e dunque non beneficiano della loro progressiva riduzione. Inoltre, è fondamentale la sinergia dei meccanismi di stimolazione dell'autoriparazione dei calcestruzzi con le fibre, che consentono di ridurre l'apertura delle fessure.

Sulla base dell'elaborazione dei dati ottenuti con le prove monotone a rottura e le successive fessurazioni è stato possibile valutare alcuni indici di recupero meccanico, quali l'indice di recupero della resistenza (ISR), l'indice di recupero della rigidezza valutato rispetto al ciclo di fessurazione iniziale (IDaR0) e l'indice di recupero della rigidezza valutato tra un ciclo e il successivo (IDaR*).

Per quanto riguarda l'indice di recupero della resistenza ISR si può affermare che anche in questo caso a 30 giorni il contributo delle aggiunte cristalline è trascurabile. Entrambe le miscele presentano un recupero delle proprietà meccaniche. Invece, a 90 giorni la miscela NP presenta un valore negativo (-18%) dell'indice di recupero che corrisponde a un peggioramento della resistenza, mentre la miscela P presenta un valore positivo (+37%), effetto dell'attività di lungo termine dell'additivo cristallino e di una efficace sinergia con il rinforzo fibroso.

I parametri in grado di descrivere meglio il comportamento dei provini ri-fessurati sono gli indici di recupero delle rigidezze IDaR0 e IDaR*, che consentono di valutare il recupero del danno, che sia nullo, parziale o totale.

Per entrambe le miscele si ha un recupero parziale delle rigidezze. A 30 giorni l'indice IDaR0 per la miscela P è di circa 66% mentre raggiunge l'84% a 90 giorni rispetto al ciclo iniziale. Per la miscela NP si ha un recupero migliore a 30 giorni (35%) che diminuisce a 90 giorni (25%) rispetto alle condizioni iniziali.

Tra le successive ri-fessurazioni sia la miscela NP sia la miscela P mostrano un miglioramento del recupero della rigidezza, tra un ciclo e l'altro il danno viene recuperato parzialmente.

Infine, sono state stabilite delle relazioni tra gli indici di recupero meccanico e gli indici di richiusura. In questo caso risulta più difficile individuare delle tendenze univoche tra indici meccanici e di self-healing.

L'indice di richiusura diminuisce nel tempo ed è accompagnato da una diminuzione anche dell'indice di recupero della resistenza (ISR).

L'indice di recupero della rigidità IDaR0 risulta essere maggiore a 90 giorni, mentre nell'ultimo periodo di osservazione l'indice di richiusura si riduce. La miscela P è comunque caratterizzata da valori superiori rispetto alla miscela NP, grazie all'azione dell'additivo cristallino.

L'indice di recupero della rigidità IDaR* presenta valori più elevati tra gli ultimi cicli di fessurazione, sebbene in ascissa vi siano valori dell'indice di richiusura che tendono a diminuire nel tempo. Nell'ultimo ciclo il materiale rimane imperturbato per un tempo superiore (circa un mese in più), fatto che potrebbe incidere sulla formazione di legami più stabili a livello della microstruttura del calcestruzzo, producendo un migliore recupero del danno.

La medesima procedura sperimentale è stata seguita in parallelo dai tutti laboratori partner nell'ambito della COST Action SARCOS: al termine delle campagne sperimentali implementate sarà fondamentale il confronto dei risultati ottenuti. In ogni modo, si può affermare che questa metodologia sperimentale si sta progressivamente consolidando e, vista la sua significatività, può essere proposta come "standard" per la valutazione dell'efficacia di prodotti e tecnologie nell'ambito di calcestruzzi autoriparanti.

Riferimenti bibliografici

- [1] L. Bertolini, *Materiali da costruzione. Volume II. Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro*, Città studi edizioni, 2012.
- [2] M. Sahamaran, G. Yildirim, G. Hasiloglu Aras, S. Bahadir Keskin e M. Lachemi, *Self-Healing of Cementitious Composites to Reduce High CO2 Emissions*, 2017.
- [3] IPCC, *Climate Change 2014 - Synthesis Report*, 2015.
- [4] C. Meyer, *The greening of the concrete industry*, 2009.
- [5] E. Cuenca e L. Ferrara, «Self-healing Capacity of Fiber Reinforced Cementitious Composites. State of the Art and Perspectives,» 2017.
- [6] V. C. Li e E. Herbert, «Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure,» 2012.
- [7] SDC-Strategic Development Council, *Vision 2020. A vision for the concrete repair protection and strengthening industry*, 2006.
- [8] B. Mather e J. Warner, *Why do concrete repairs fail*, 2003.
- [9] K. Van Breugel, *Is there a market for selfhealing cement-based materials*, 2007.
- [10] M. Wu, B. Johannesson e M. Geiker, *A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material*, 2012.
- [11] UNI EN 197-1, *Cemento - Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni*, 2011.
- [12] L. Bertolini, *Materiali da costruzione. Volume I. Struttura, proprietà e tecnologie di produzione*, Città studi edizioni, 2010.

- [13] M. A. Pisani, «Consolidamento delle strutture. Guida ai criteri, ai materiali e alle tecniche più utilizzate,» Milano, HOEPLI, 2012, pp. 211-216.
- [14] UNI EN 12620, *Aggregati per calcestruzzo*, 2008.
- [15] UNI EN 1008, *Acqua d'impasto per il calcestruzzo - Specifiche di campionamento, di prova e di valutazione dell'idoneità dell'acqua, incluse le acque di ricupero dei processi dell'industria del calcestruzzo, come acqua d'impasto del calcestruzzo*, 2003.
- [16] UNI EN 934-2, *Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 2: Additivi per calcestruzzo - Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed etichettatura*, 2012.
- [17] UNI EN 206-1, *Calcestruzzo - Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità*, 2006.
- [18] NTC 2018, *Norme Tecniche per le Costruzioni*, 2018.
- [19] UNI 11039-1, *Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio - Definizioni, classificazione e designazione*, 2003.
- [20] UNI 11037, *Fibre d'acciaio da impiegare nel confezionamento di conglomerato cementizio rinforzato*, 2003.
- [21] CNR-DT 204, *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato*, 2006.
- [22] A. Cervini e N. Borgioni, *Capacità di riparazione autogena di compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni (UHPFRC)*, a.a 2018-2019.
- [23] F. Lo Monte e L. Ferrara, «Characterization of the Tensile Behaviour of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete,» in *The New Boundaries of Structural Concrete - Innovative Cementitious Materials*, 2019.
- [24] A. E. Naaman e H. W. Reinhardt, «Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response,» 2006.

- [25] C. Shi e Y. Mo, *High-Performance Constructions Materials: Science and Applications*, 2008.
- [26] L. Papa e S. Passoni, *Caratterizzazione meccanica e capacità di riparazione autogena di compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni (UHPRFC)*, a.a 2017-2018.
- [27] I. Lofgren, *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction-a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis.*, 2005.
- [28] M. Shamaran e V. Li, «Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments,» 2008.
- [29] H. Fukuyama e H. Suwada, «Experimental response of HPRFCC dampers for structural control,» 2003.
- [30] G. Fisher e V. Li, «Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel-reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions,» 2002.
- [31] M. di Prisco, G. Plizzari e L. Vandewalle, *Fibre reinforced concrete: new design perspectives*, 2009.
- [32] UNI EN 14651, *Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche - Misurazione della resistenza a trazione per flessione [limite di proporzionalità (LOP), resistenza residua]*, 2007.
- [33] L. Ferrara, N. Ozyurt e M. di Prisco, «High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of “casting-flow induced” fibre orientation,» 2010.
- [34] K.R. Lauer e F. O. Slate, «Autogenous healing of cement paste,» 1956.
- [35] F. Pirritano, *Efficacia degli additivi cristallizzanti sulle capacità di autoriparazione di calcestruzzi giovani*, a.a. 2013-2014.

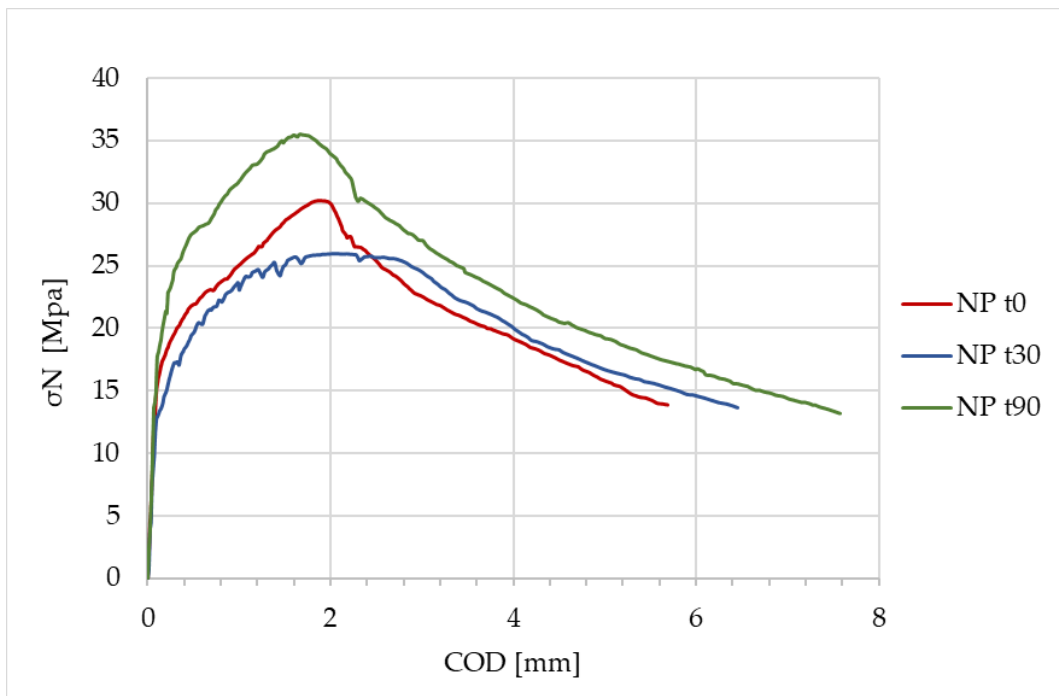
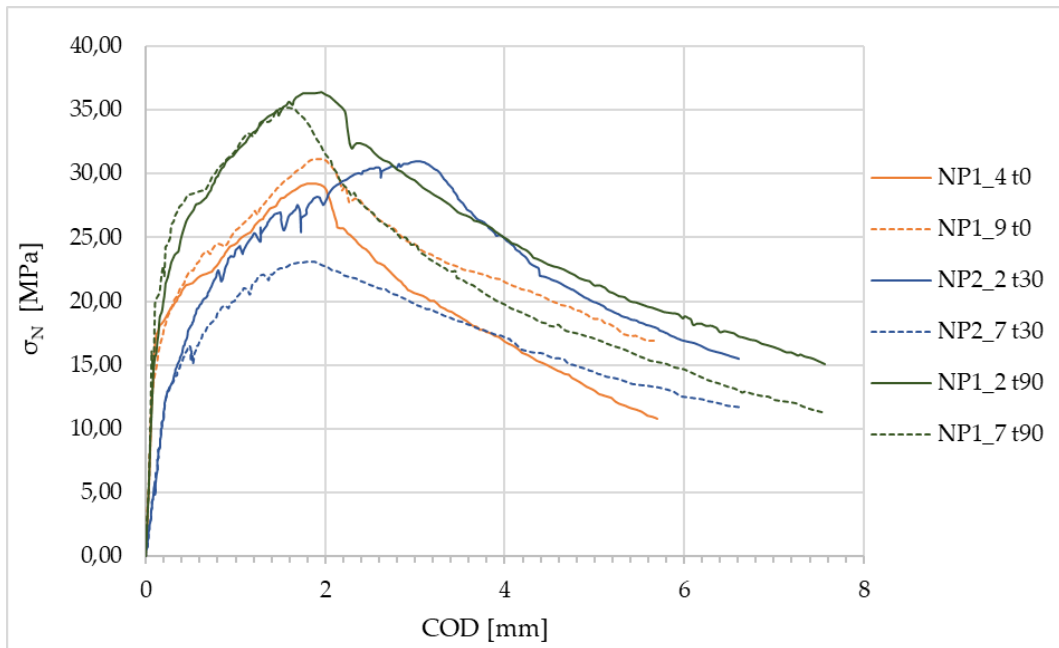
- [36] N. Hearn e C. Morley, «Self-sealing property of concrete – Experimental evidence,» 1997.
- [37] K. Van Tittelboom, E. Gruvaert, H. Rahier e N. De Belie, «Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation,» 2012.
- [38] K. Van Tittelboom, D. Snoeck, J. Wang e N. De Belie, «Most recent advances in the field of self-healing cementitious materials,» 2013.
- [39] H. Mihashi e T. Nishiwaki, «Development of Engineered Self-Healing and Self Repairing Concrete,» 2012.
- [40] S. Igarashi, M. Kunieda e T. Nishiwaki, «Research activity of JCI technical committee TC-075B: Autogenous healing in cementitious materials,» 2009.
- [41] M. De Rooij e E. Schlangen, «Self-healing phenomena in cement-based materials».
- [42] W. Ramm e M. Biscop, «Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete,» 1998.
- [43] C. Edvardsen, «Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete,» 1999.
- [44] C. M. Aldea, W. J. Song, J. S. Popovics e S. P. Shah, *Extent of Healing of cracked Normal Strength Concrete*, 2000.
- [45] A. Alferi e L. Famiani, *Caratterizzazione meccanica ed identificazione del comportamento "costitutivo" a trazione di compositi cementizi fibreorinforzati ad elevate prestazioni*, a.a 2018-2019.
- [46] S. Qian, J. Zhou e E. Schlangen, «Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites,» 2010.

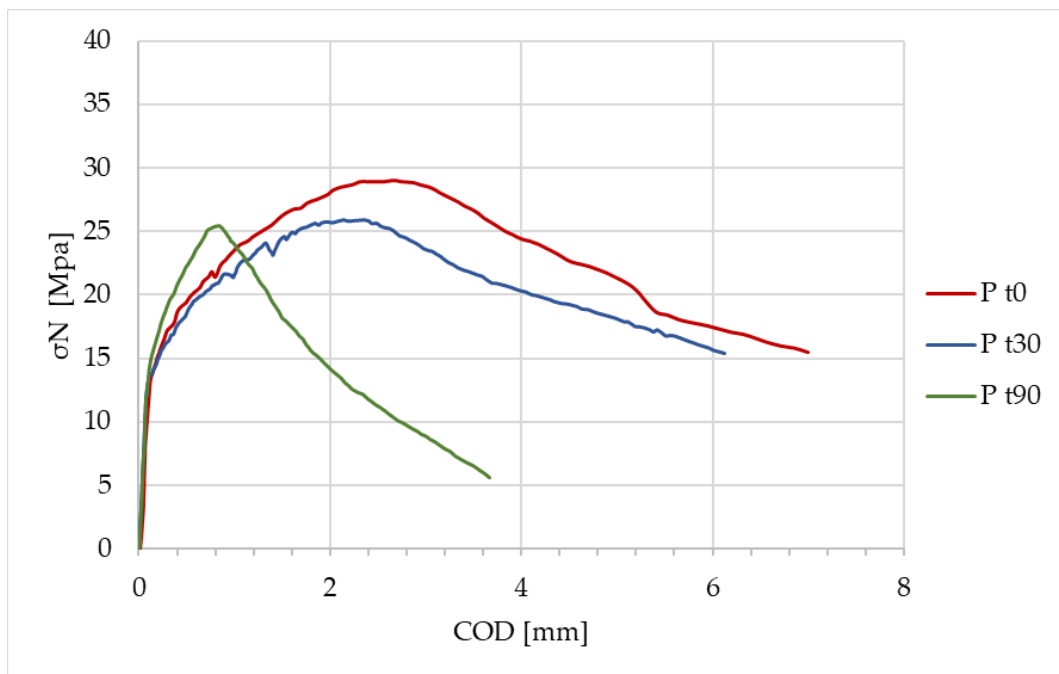
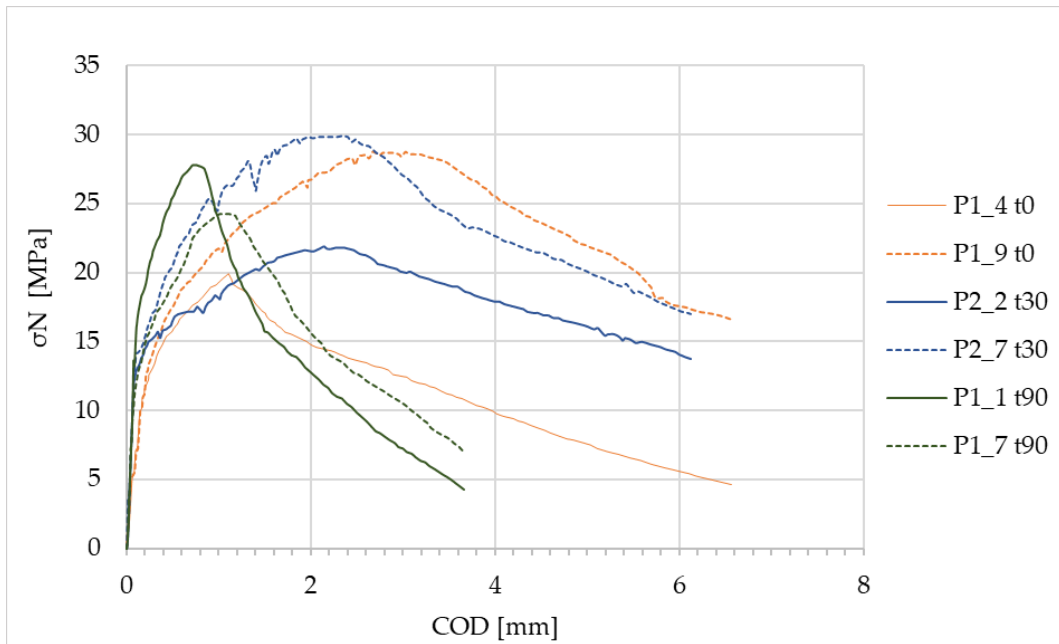
- [47] T. Nishiwaki, S. Kwon, D. Homma, M. Yamada e H. Mihashi, «Self-healing capability of fiber-reinforced cementitious composites for recovery of watertightness and mechanical properties,» 2014.
- [48] Y. Yang, E. Yang e V. Li, «Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age,» 2011.
- [49] E. Cuenca e P. Serna, «Failure modes and shear design of prestressed hollow core slabs made of fiber-reinforced concrete,» 2013.
- [50] E. Cuenca, «On shear behavior of structural elements made of steel fiber reinforced concrete,» 2015.
- [51] E. Cuenca e P. Serna, «Shear behavior of prestressed precast beams made of self-compacting fiber reinforced concrete,» 2013.
- [52] E. Cuenca, J. Echeagaray-Oviedo e P. Serna, «Influence of concrete matrix and type of fiber on the shear behavior of selfcompacting fiber reinforced concrete beams,» 2015.
- [53] H. Mihashi e T. Nishiwaki, «Developement of Engineerd Self-Healing and Self-Repairing Concrete State-of-the-Art Report,» 2015.
- [54] H. M. Jonkers, *Self Healing Concrete: A Biological Approach*, 2007.
- [55] H. M. Jonkers, «Self-healing of cracks in concrete using a bacterial approach,» 2010.
- [56] H. M. Jonkers, *Bacteria-based self-healing concrete*, 2011.
- [57] S. R. White, N. R. Sottos, P.H. Geubelle, J. S. Moore, M. R. Kessler, S. R. Sriram e E. N. Brown, *Autonomic healing of polymer composites*, 2001.
- [58] K. Van Tittelboom e N. De Belie, *Self-Healing in Cementitious Materials - A Review*, 20113.

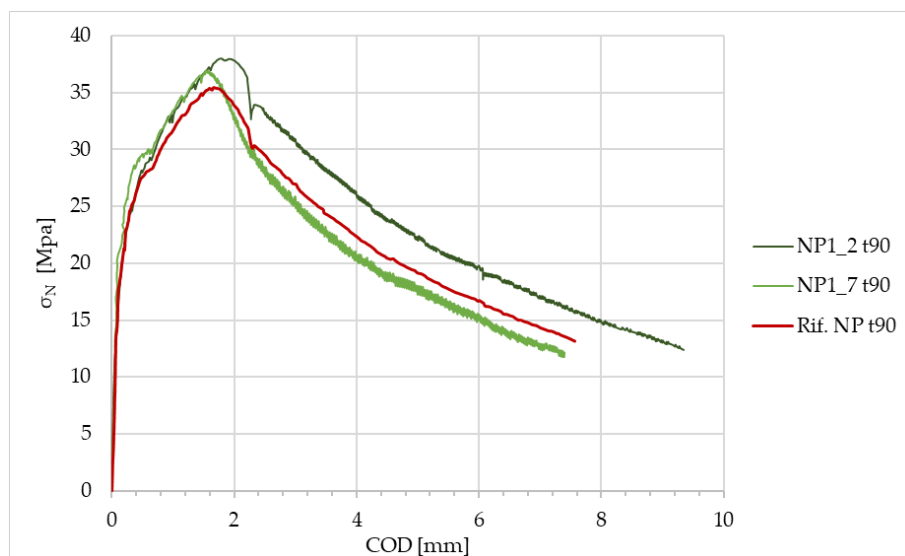
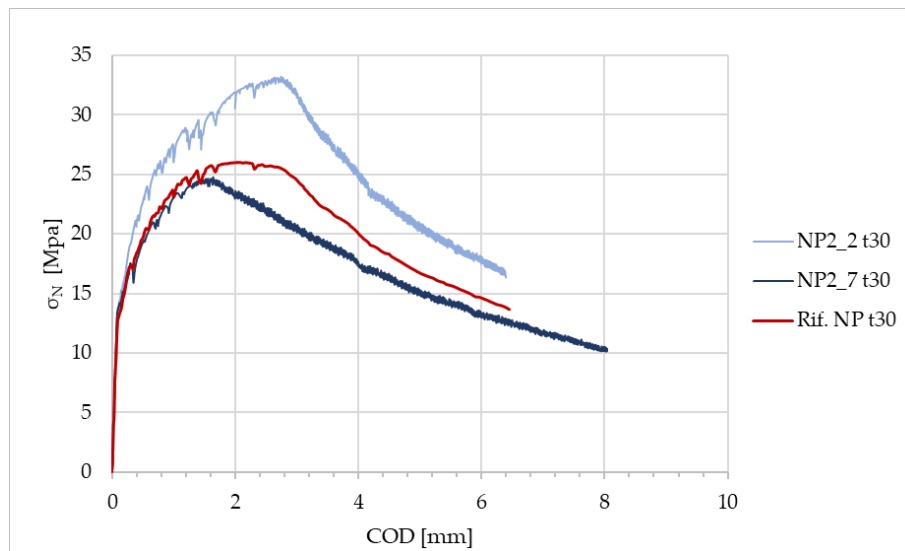
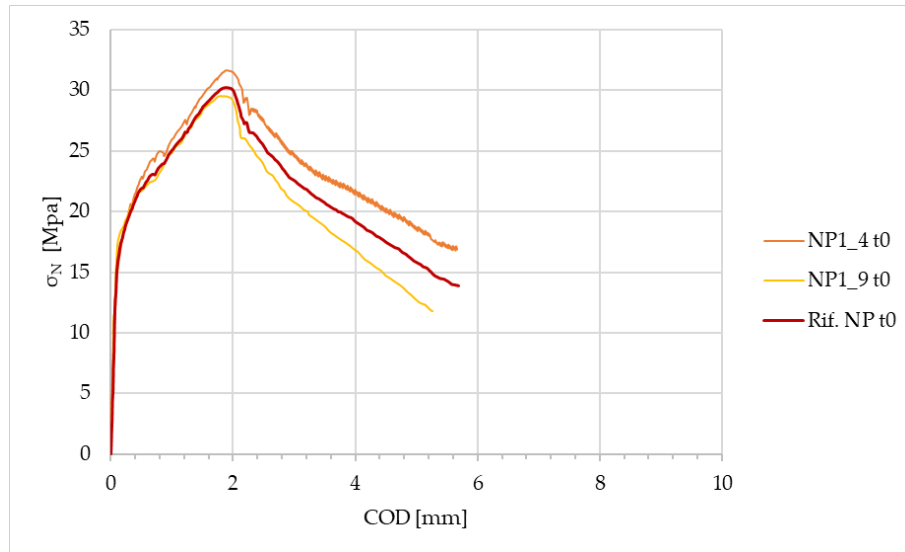
- [59] M. Roig-Flores, S. Moscato, P. Serna e L. Ferrara, *Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments*, 2015.
- [60] F. Moretti, *Capacità di autoriparazione autogena di compositi cementizi fibrorinforzati ad alte prestazioni (HPFRCC)*, a.a 2014-2015.
- [61] E. Cuenca, A. Tejedor e L. Ferrara, *A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles*, 2018.
- [62] UNI EN 196-1, *Metodi di prova dei cementi - Parte 1: Determinazione delle resistenze meccaniche*, 2016.
- [63] S. K. Ramachandran, K. Ramakrishnan e S.S. Bang, «Remediation of concrete using micro-organisms,» 2001.
- [64] K. Van Tittelboom, N. De Belie, W. De Muynck e W. Verstraete, «Use of bacteria to repair cracks in concrete,» 2010.
- [65] E. Schlangen e M. De Rooij, «Self-healing phenomena in cement-based materials,» 2013.
- [66] F. Xing e E. Schlangen, *Self-healing concrete – Its efficiency and evaluation*, 2016.
- [67] T. Nishiwaki, H. Mihashi, B. Jang e K. Miura, «Self-Healing system for concrete with selective heating around crack,» 2006.
- [68] E. Cuenca e P. Serna, «Shear behavior of Self-Compacting concrete and Fiber-Reinforced concrete push-off specimens,» 2010.
- [69] S. Morsali, *The application of bacteria as a main factor in self-healing concrete*, 2019.

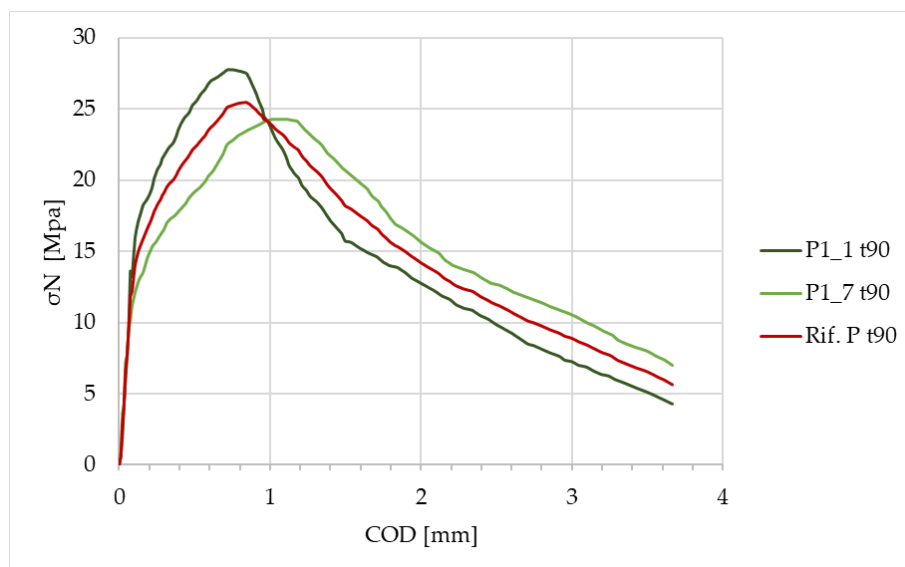
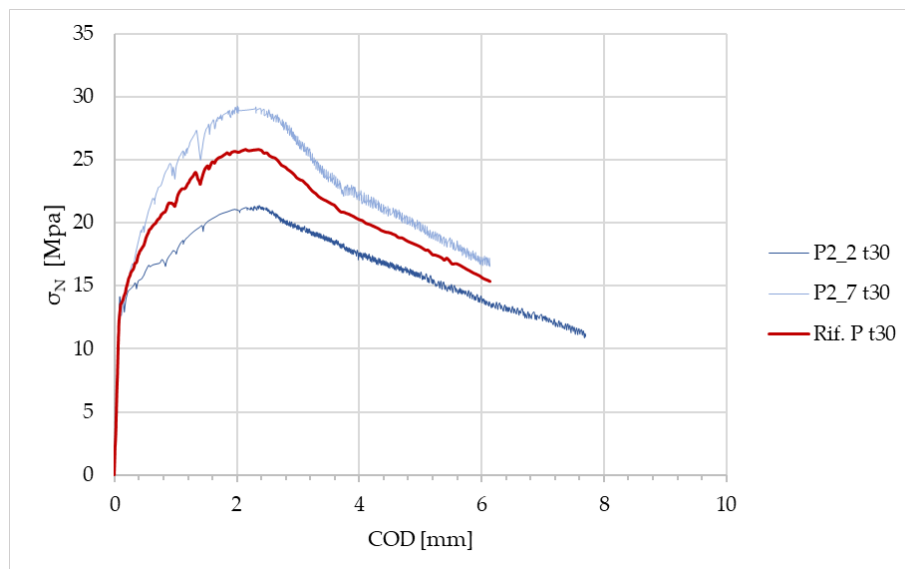
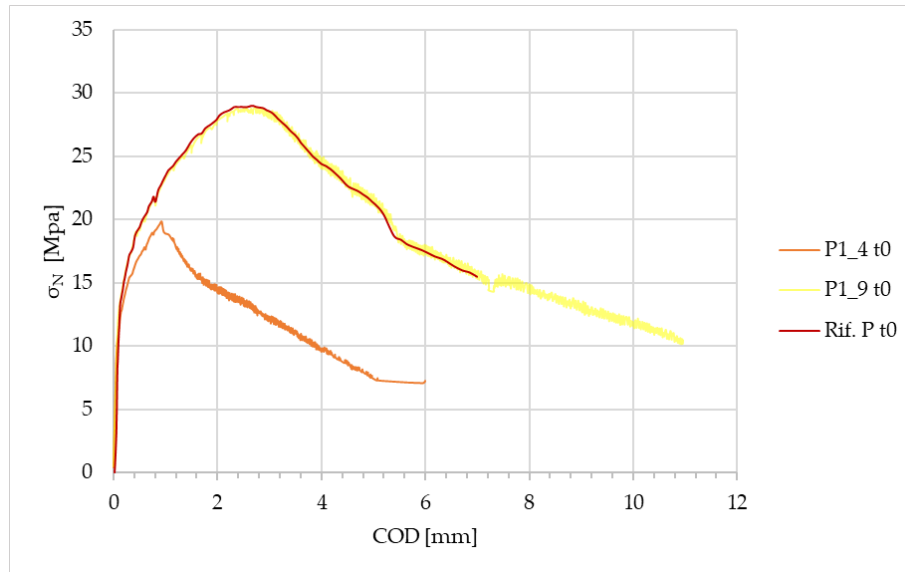
Allegato A

Prove monotone a rottura



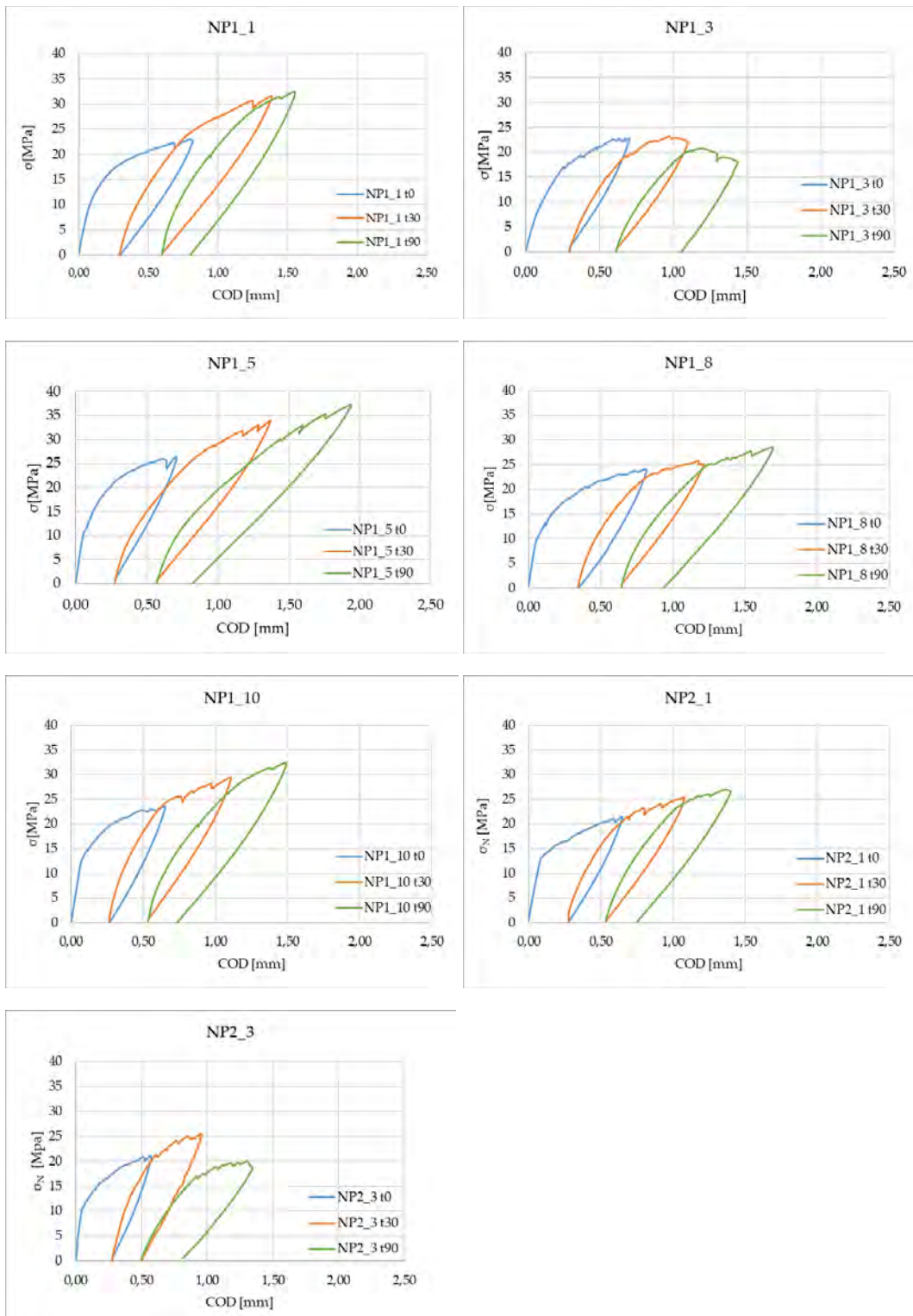


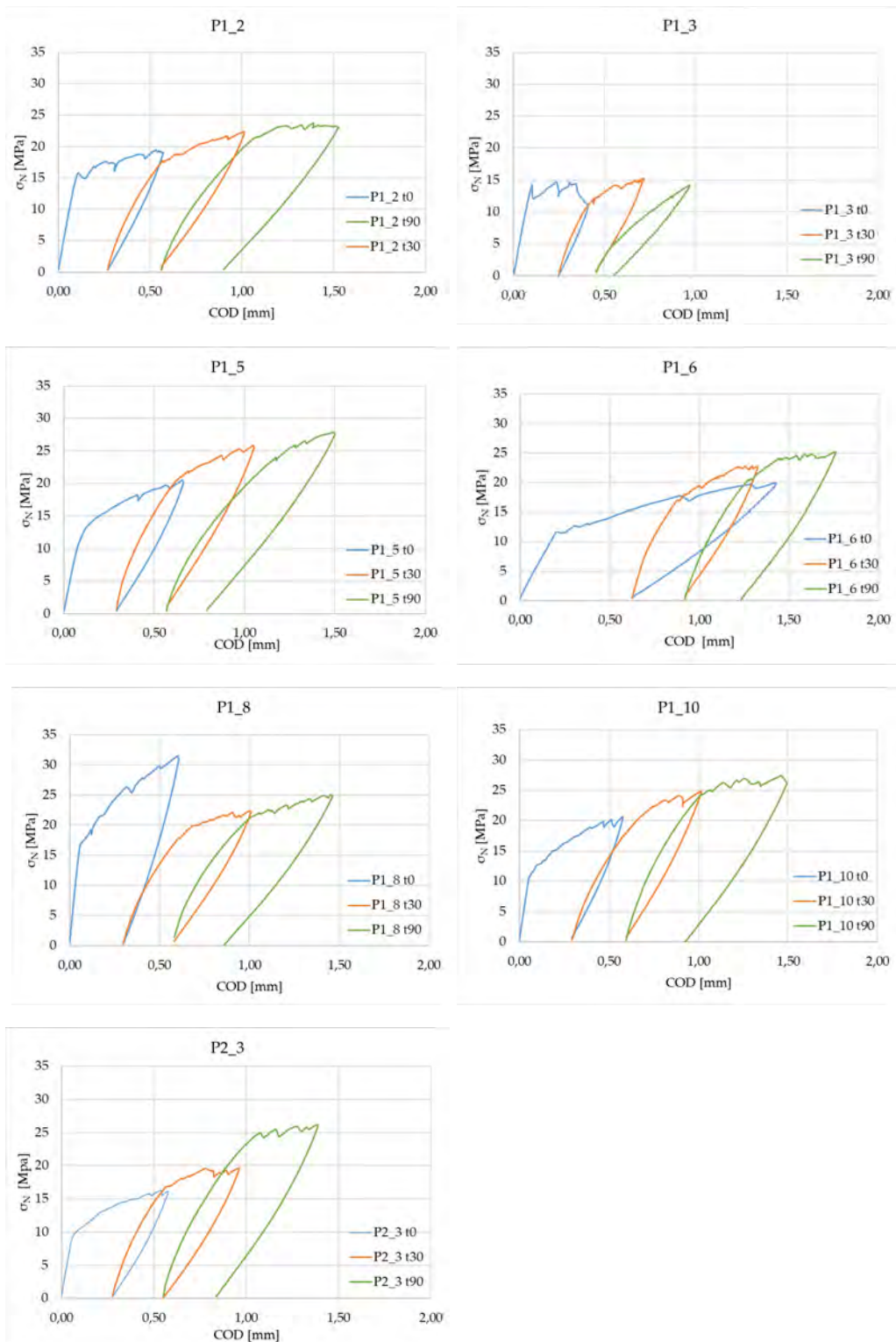




Allegato B

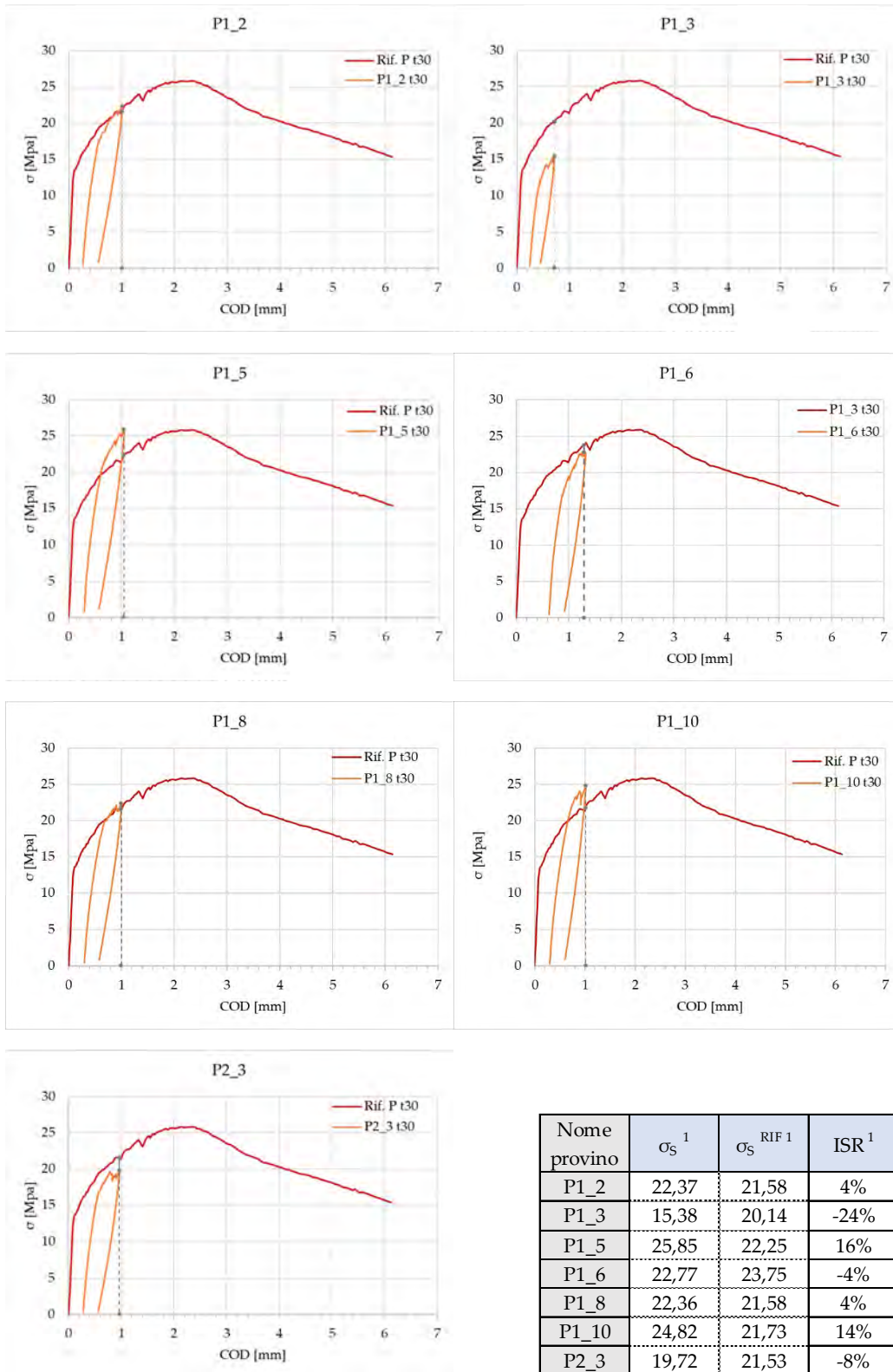
Prove di fessurazione

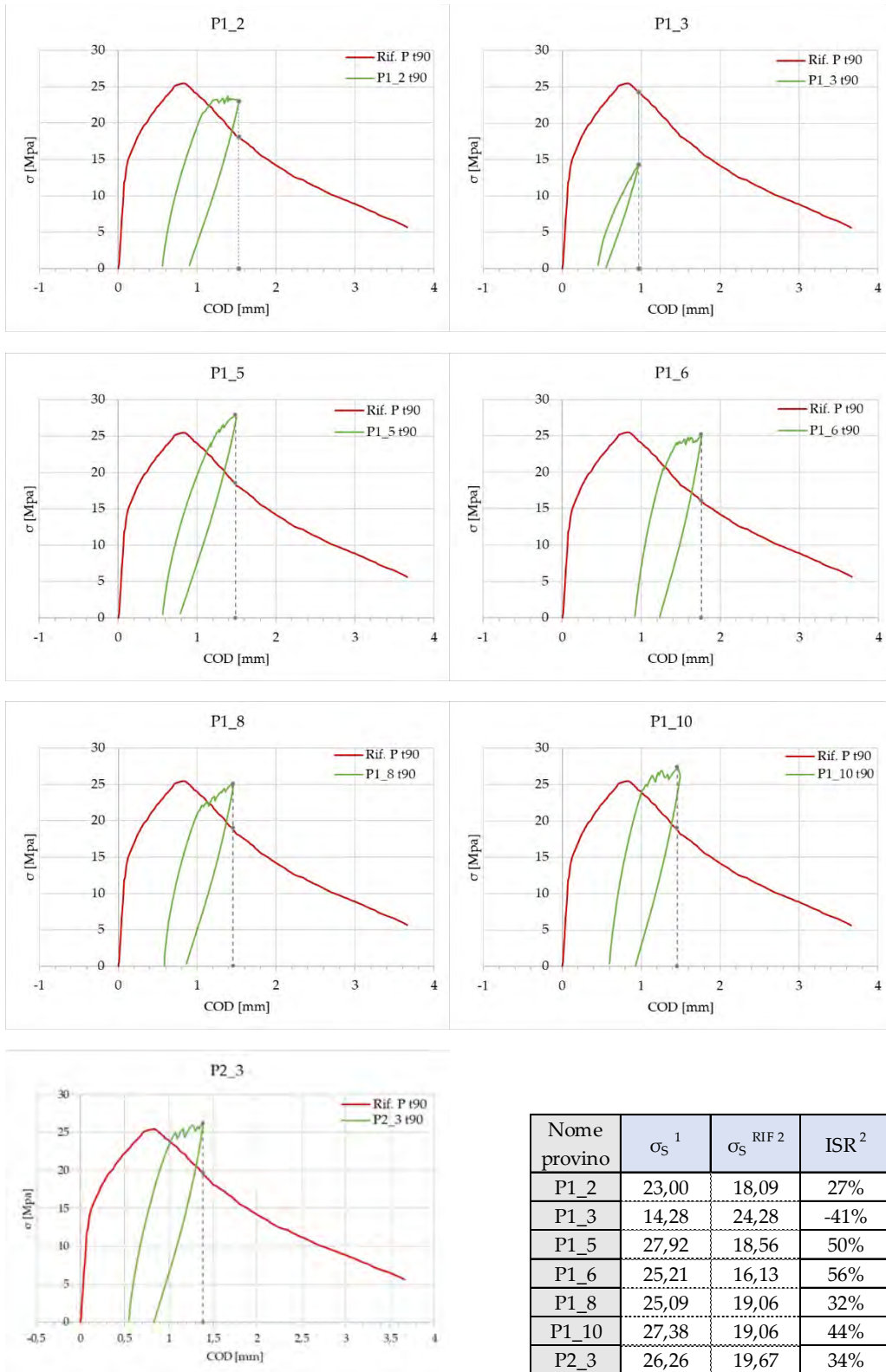


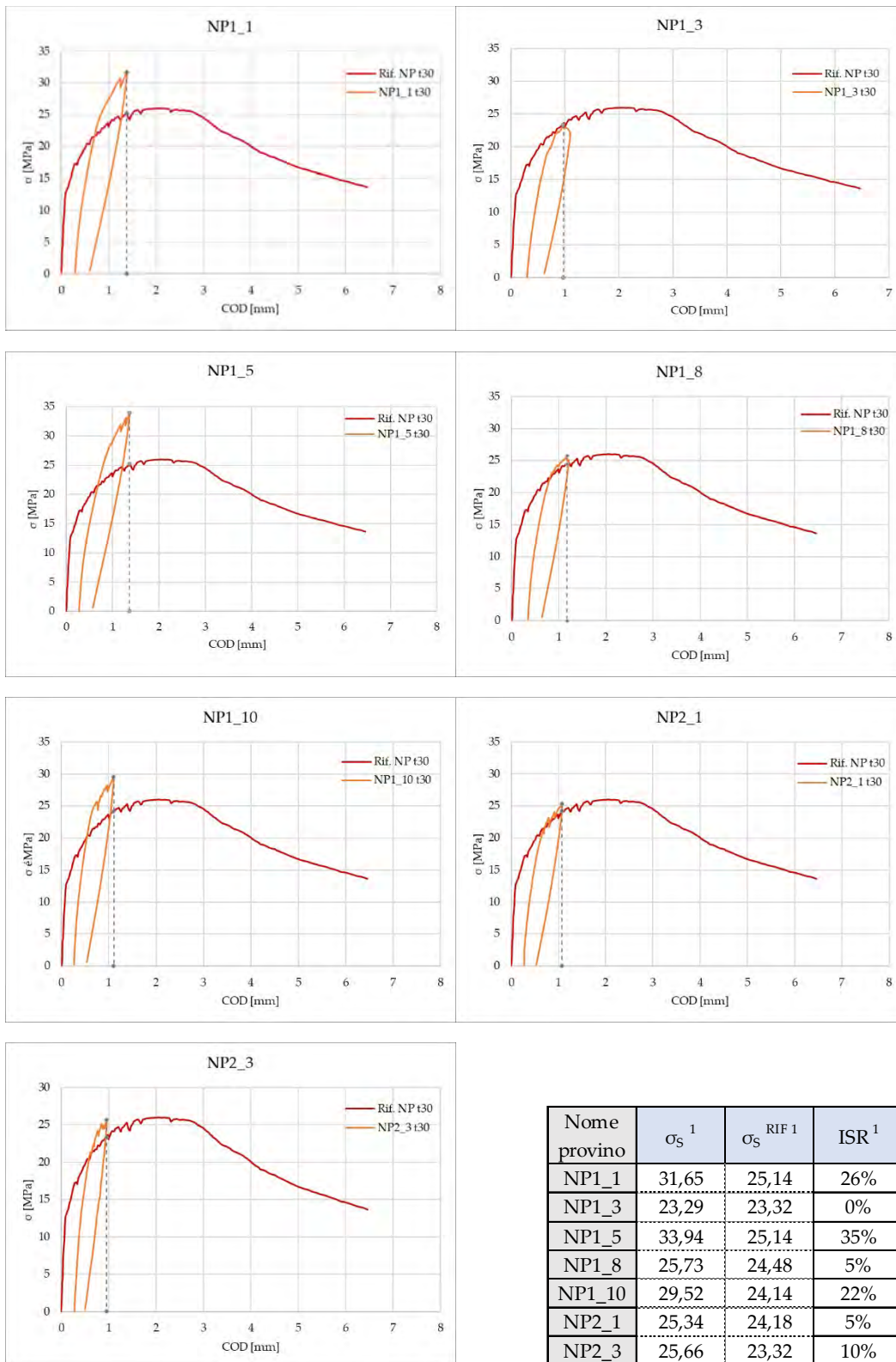


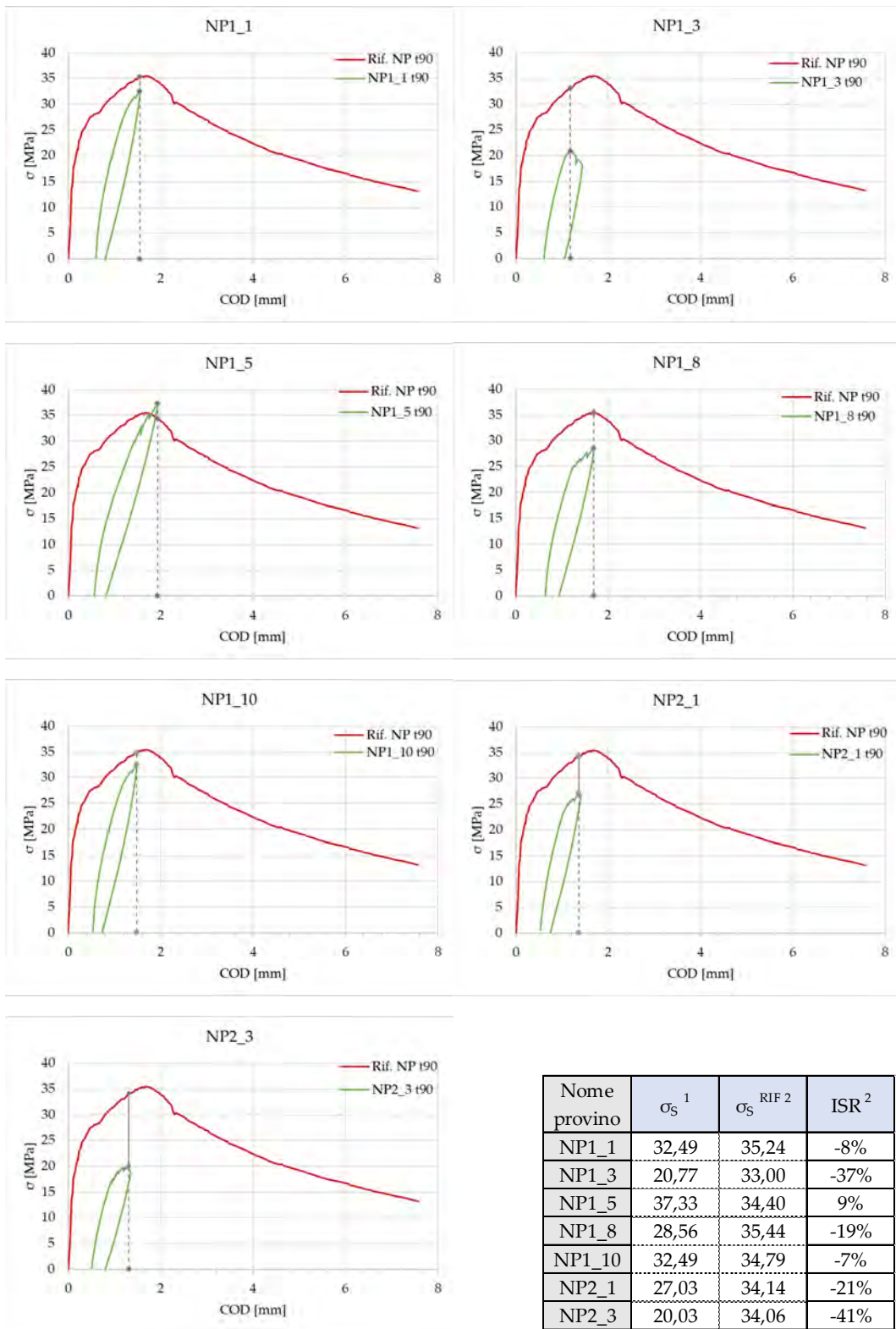
Allegato C

Indici recupero resistenza



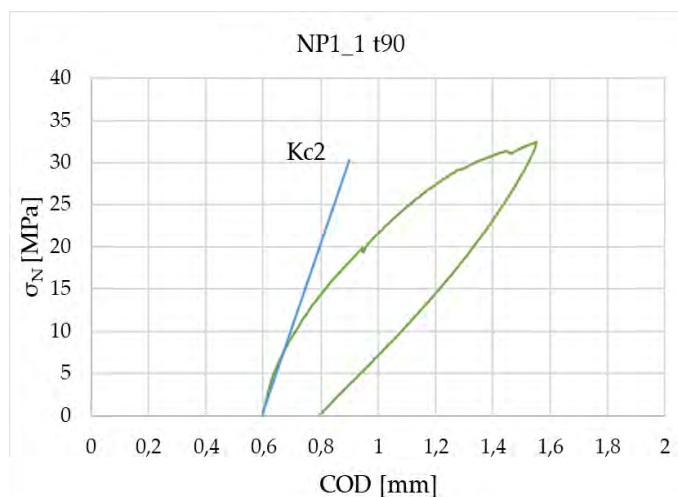
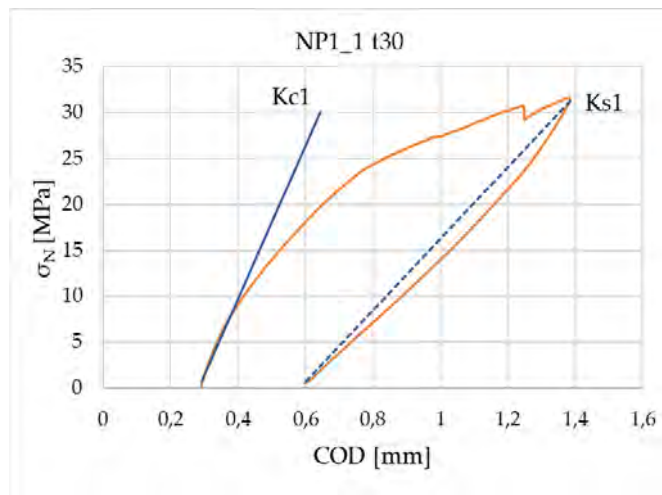
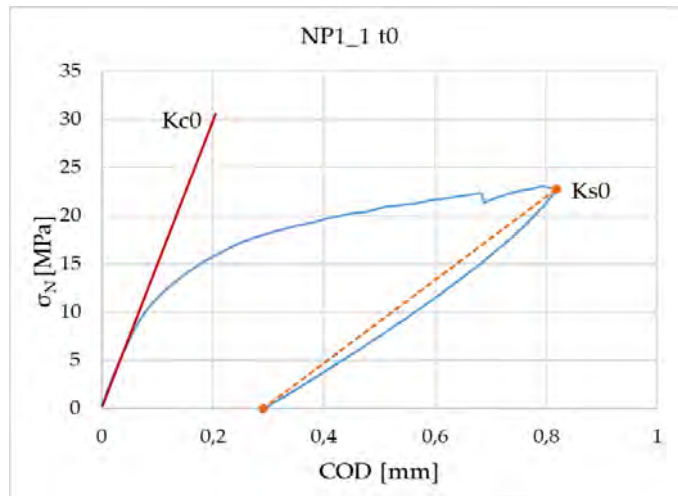




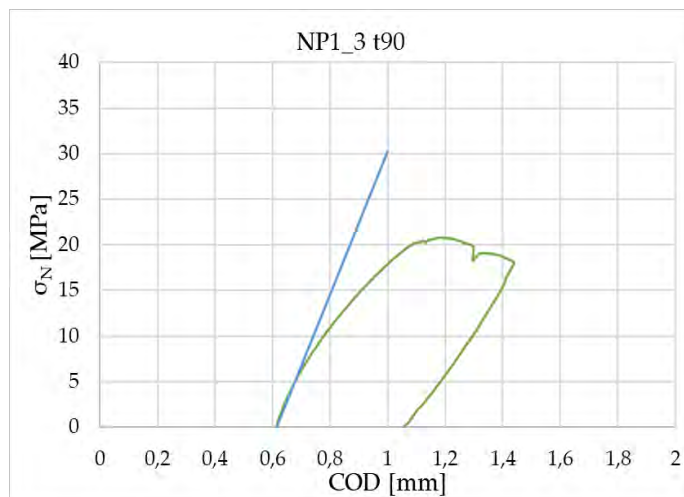
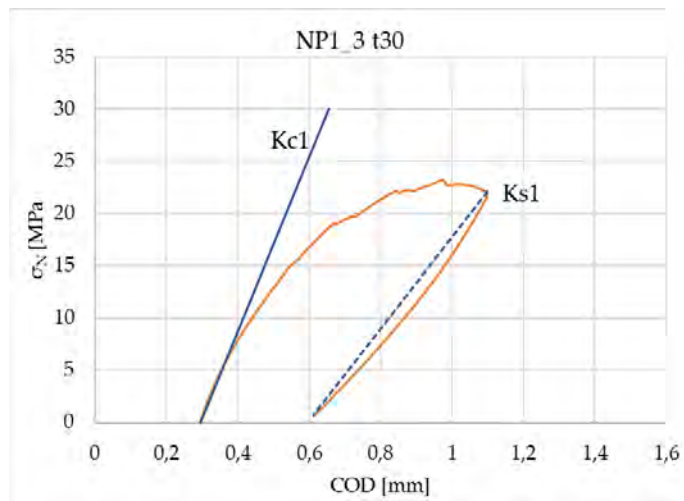
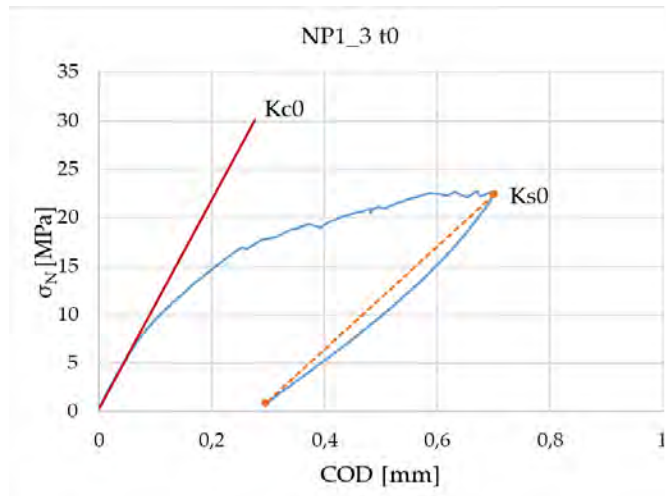


Allegato D

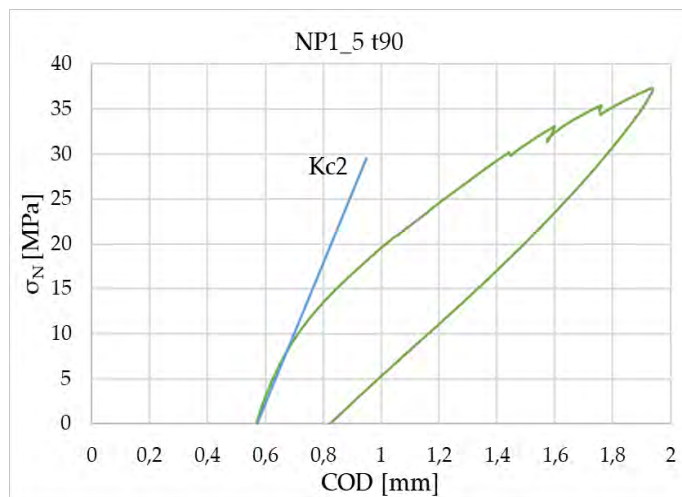
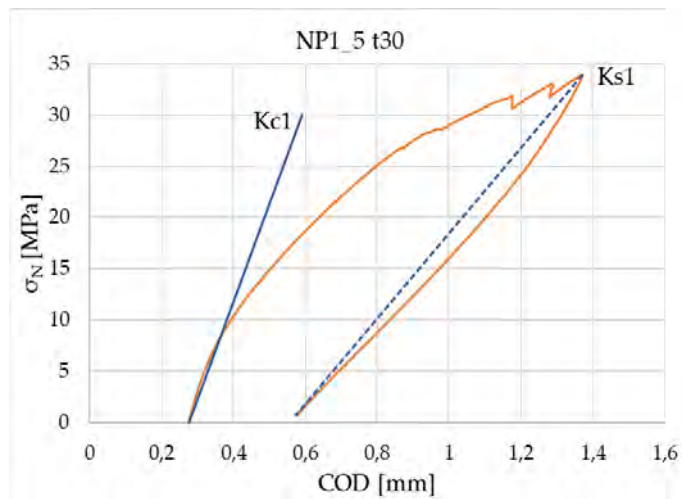
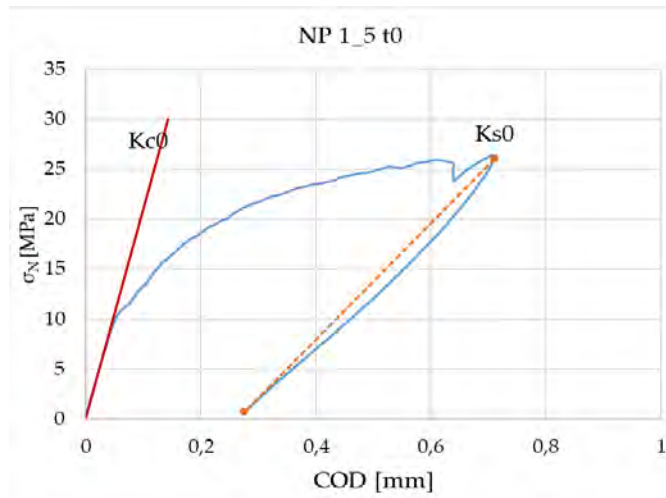
Indici recupero rigidezza



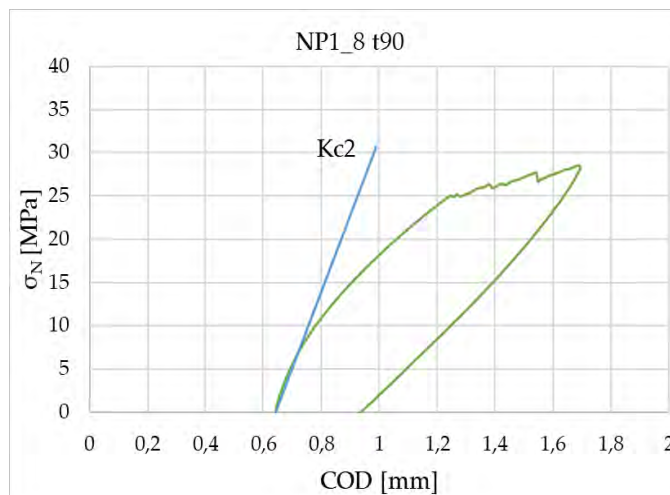
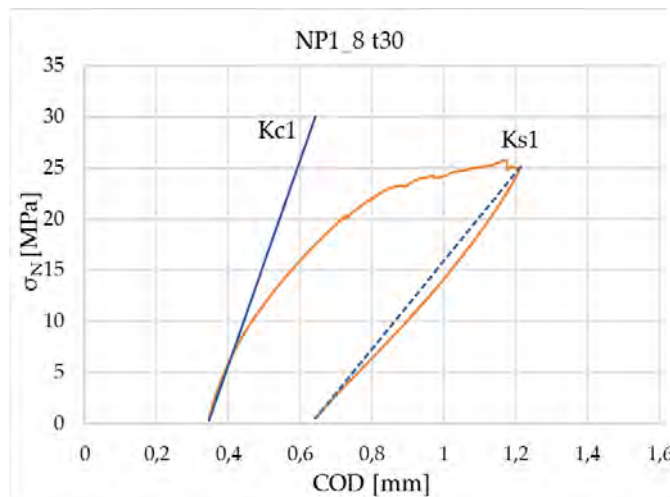
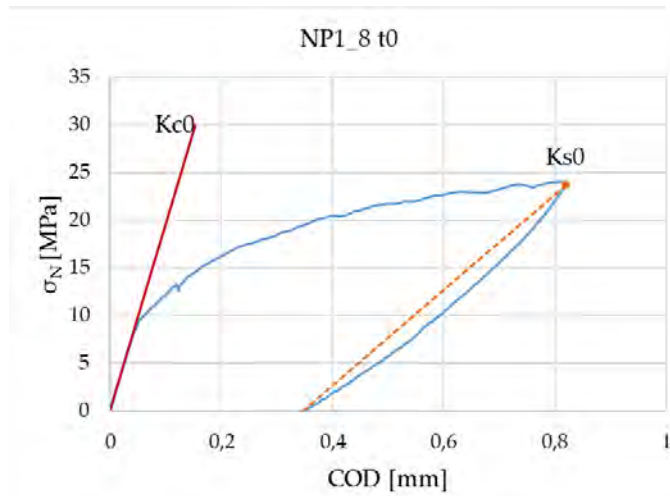
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
NP1_1	43,06	148,49	83,44	38,93	99,16	38,30%	53,21%	135,33%



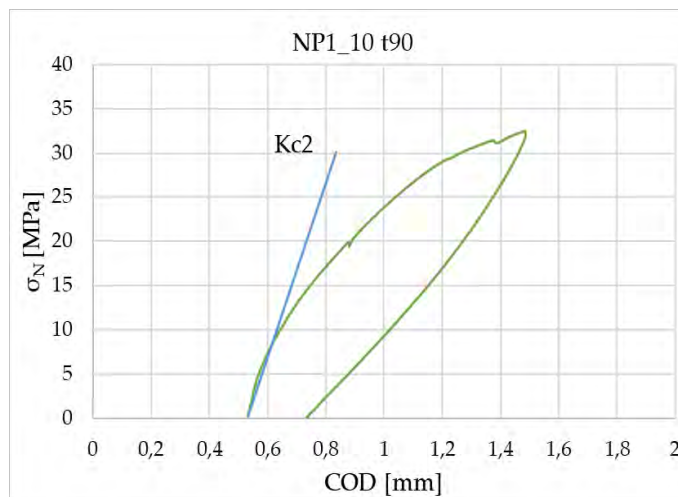
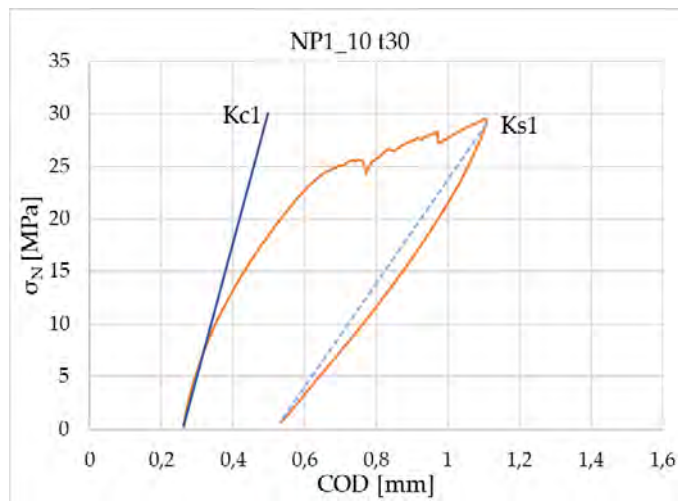
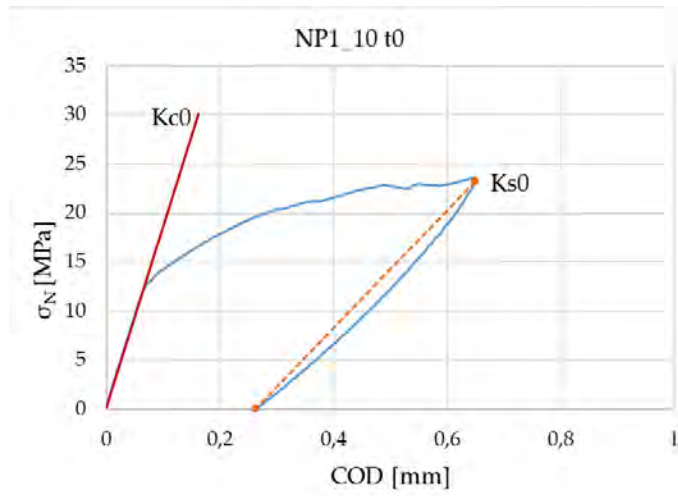
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
NP1_3	53,04	107,43	83,60	43,91	78,28	56,19%	46,40%	86,58%



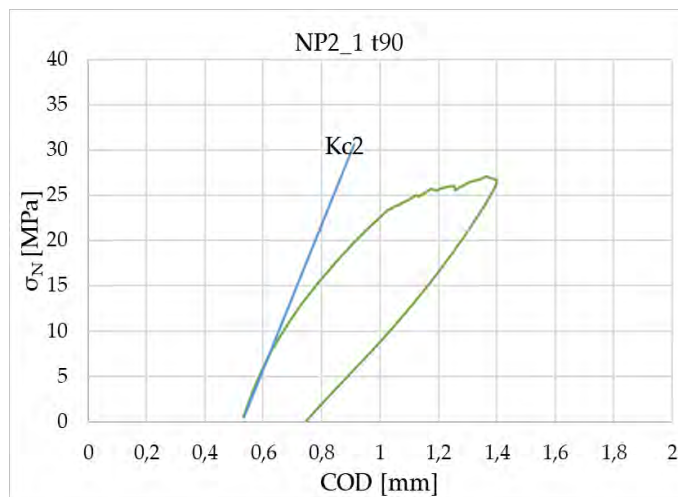
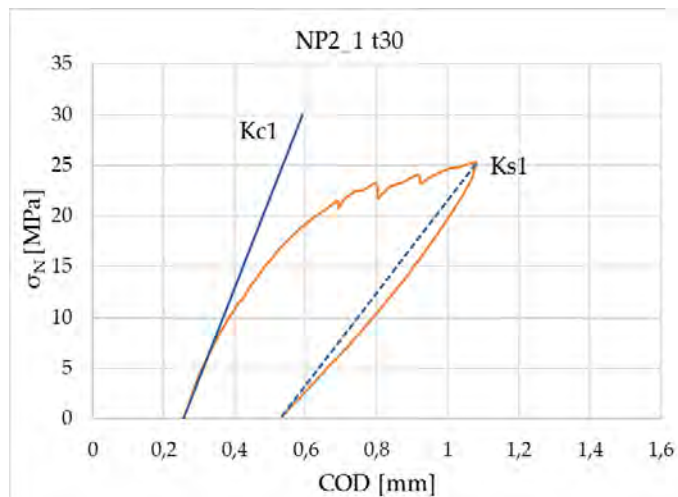
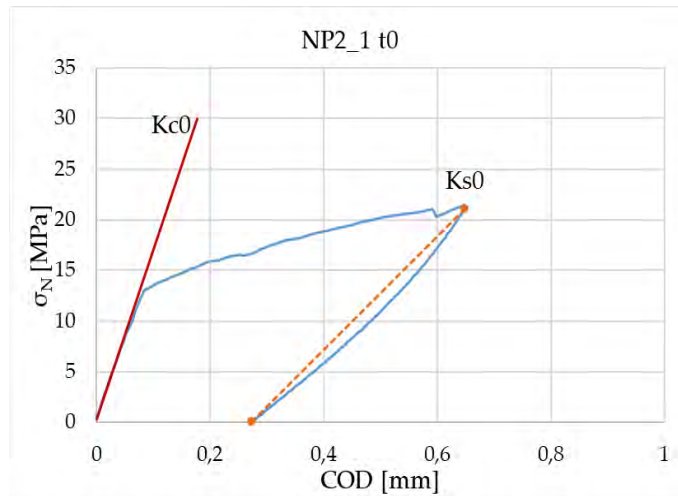
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
NP1_5	58,17	208,52	97,18	41,66	77,98	25,94%	13,17%	67,40%



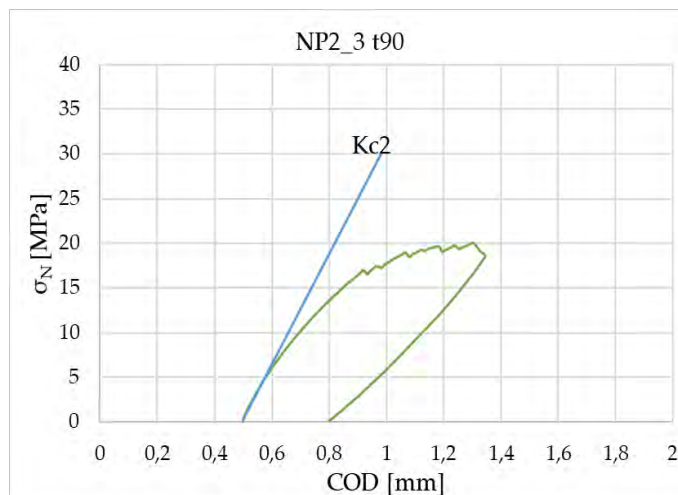
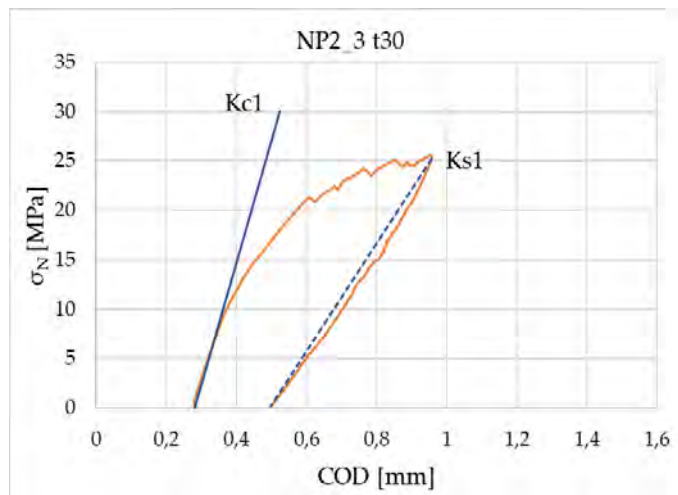
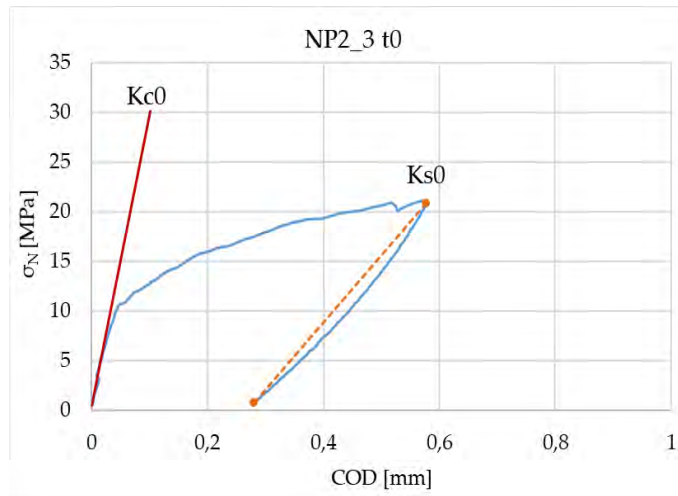
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	IDaR ₀ ^{t30}	IDaR ₀ ^{t90}	IDaR* ^{t30-t90}
NP1_8	58,17	195,19	100,77	42,99	88,82	31,08%	22,37%	79,33%



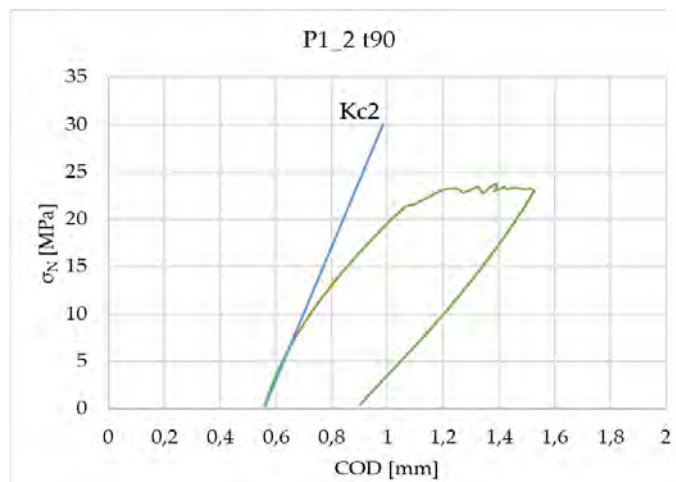
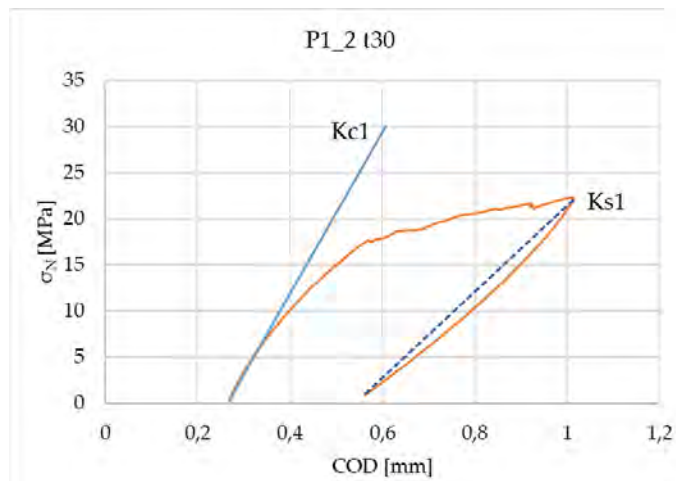
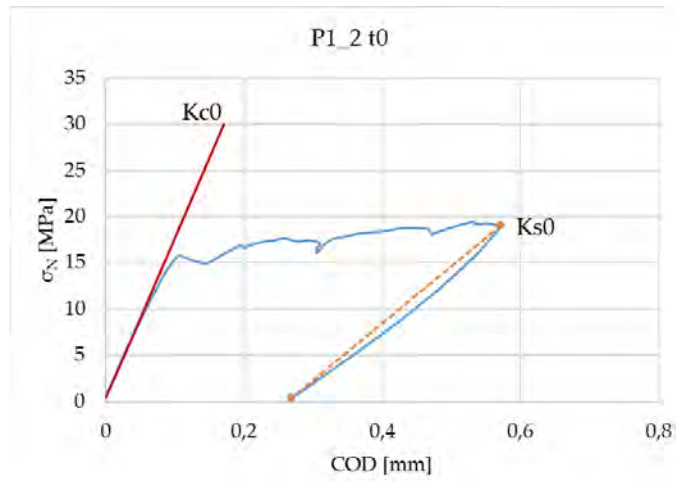
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
NP1_10	56,00	168,07	126,76	49,45	99,16	63,14%	38,51%	64,30%



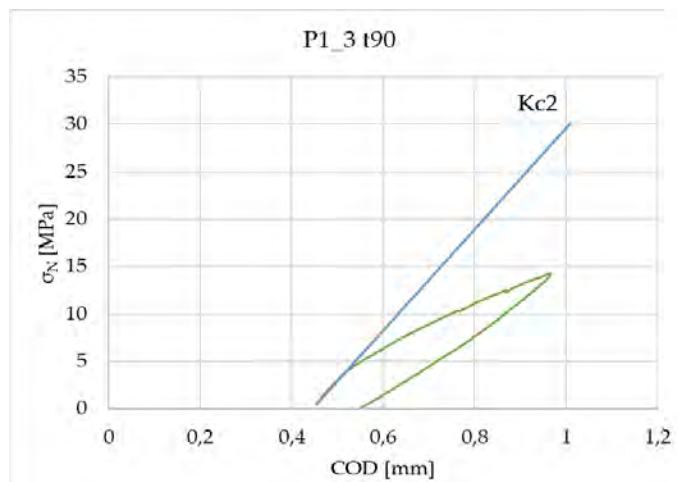
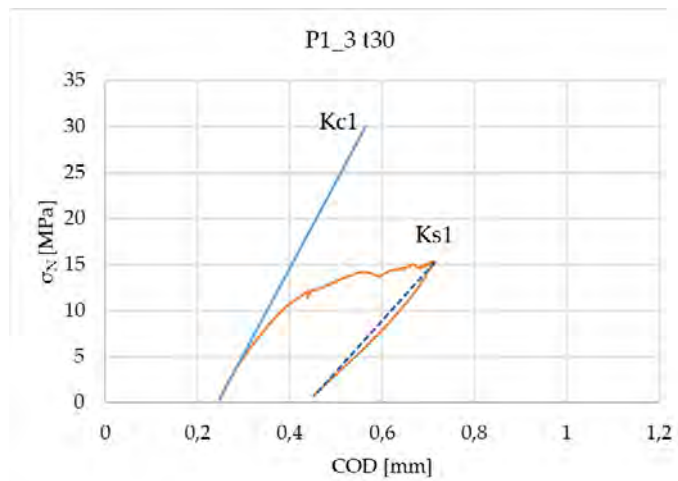
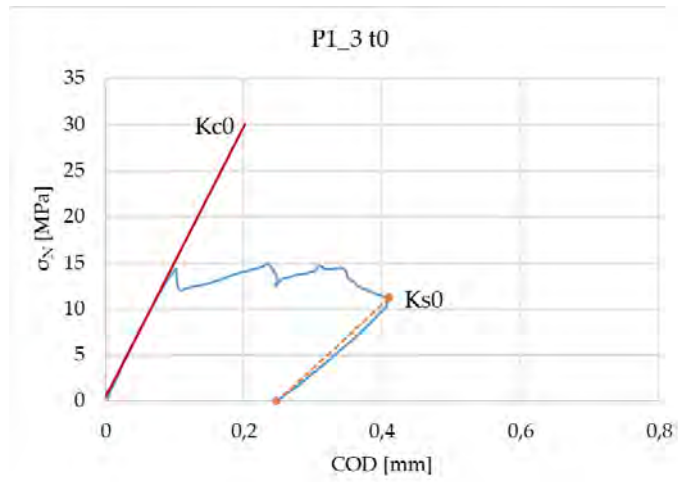
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
NP2_1	67,64	293,01	125,39	45,61	80,21	25,62%	5,58%	43,37%



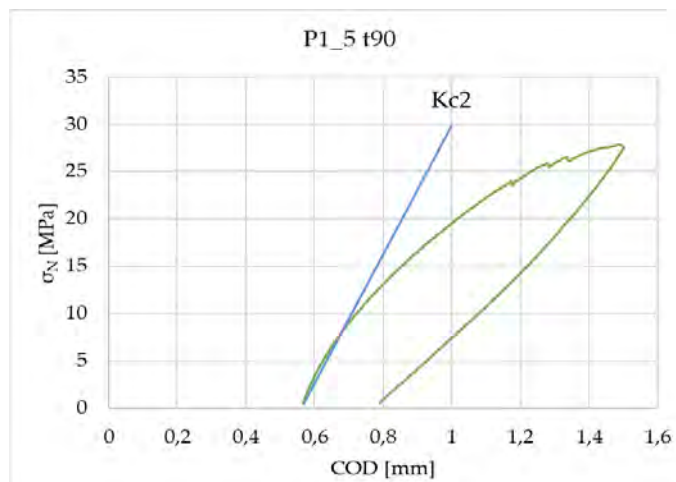
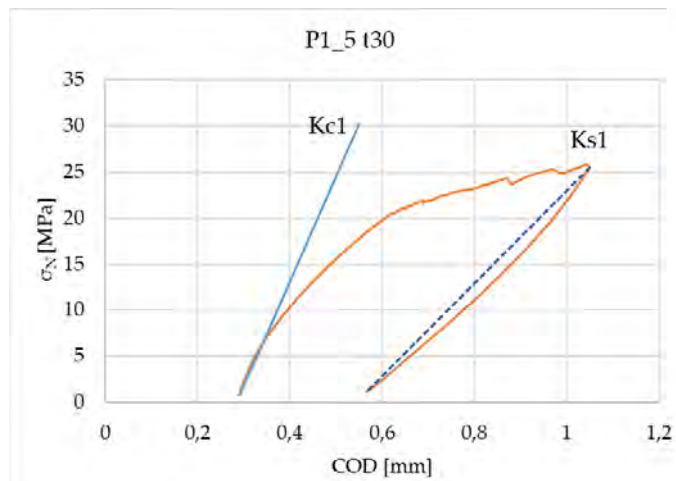
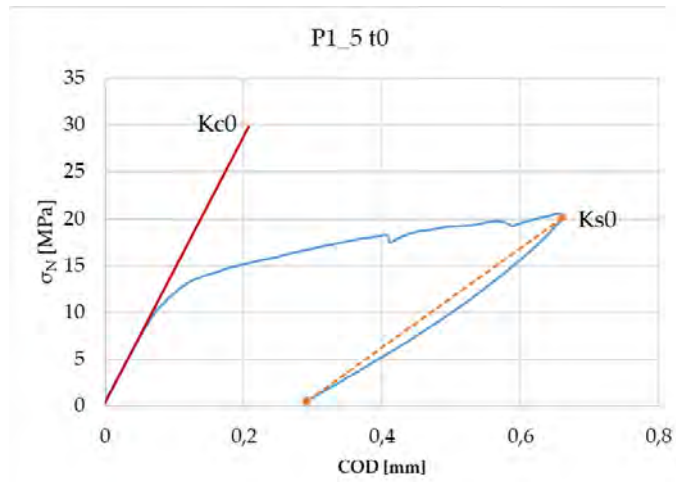
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
NP2_3	67,64	293,01	123,91	54,67	61,80	24,97%	-2,59%	10,29%



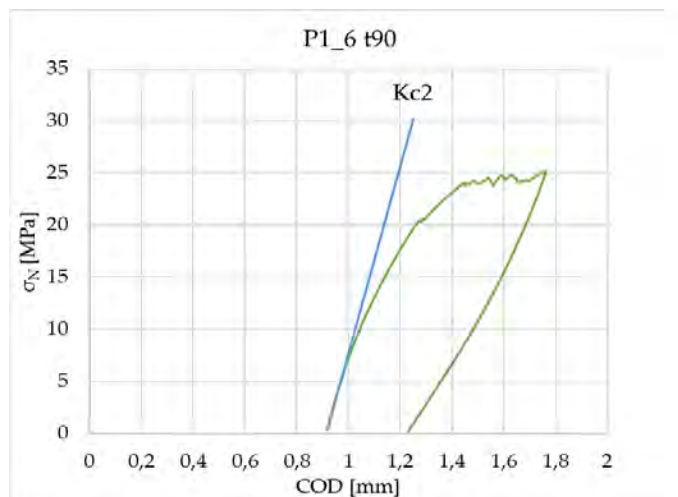
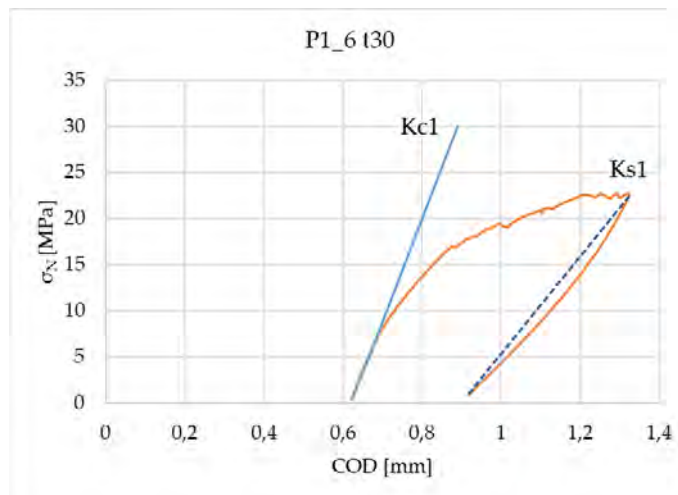
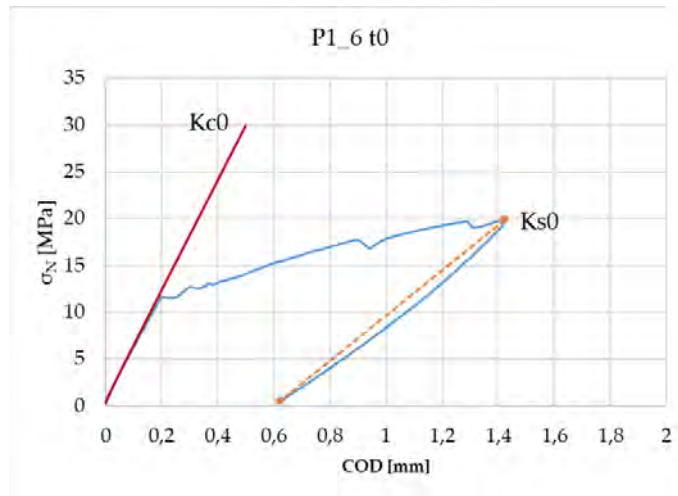
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
P1_2	61,56	173,04	89,00	46,67	70,66	75,39%	91,84%	56,67%



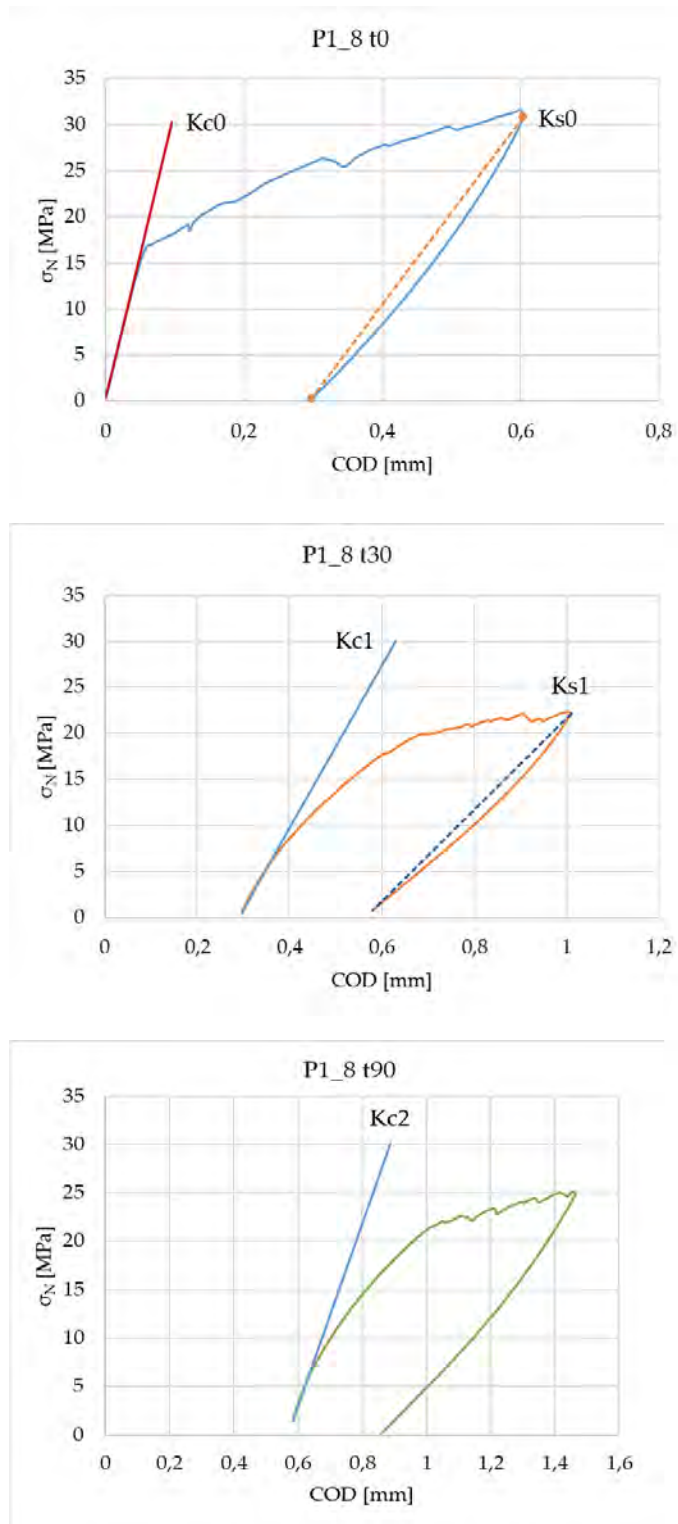
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
P1_3	68,94	146,98	93,91	55,64	54,69	68,00%	118,27%	-2,49%



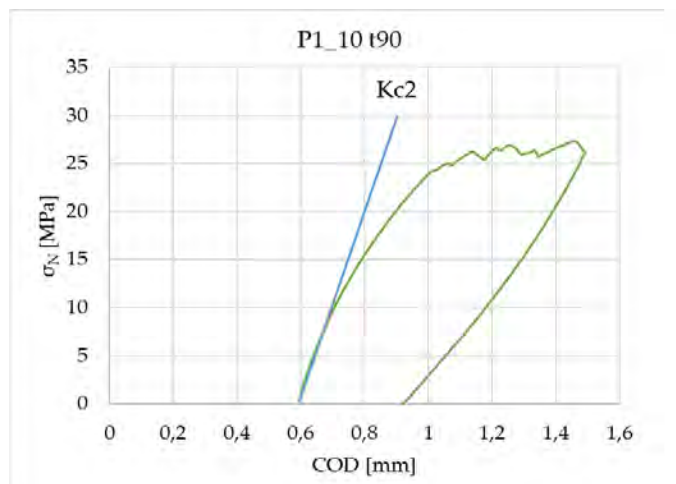
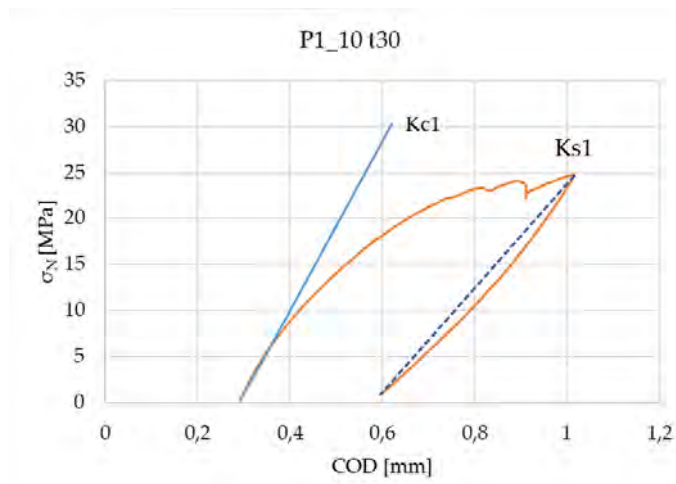
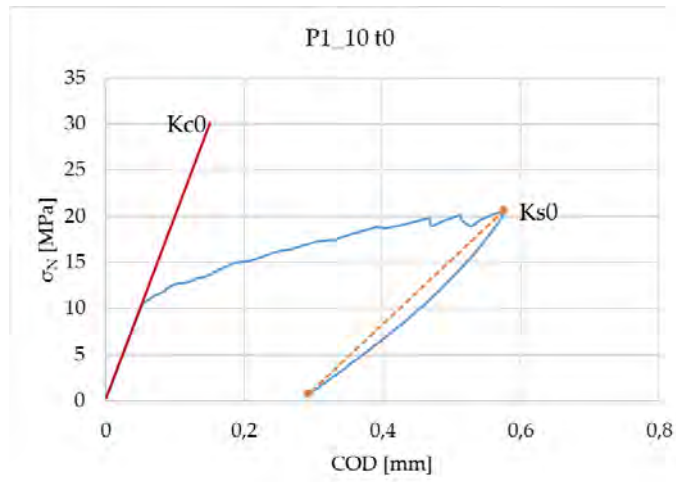
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
P1_5	52,68	141,89	112,46	50,37	70,88	32,99%	79,60%	33,04%



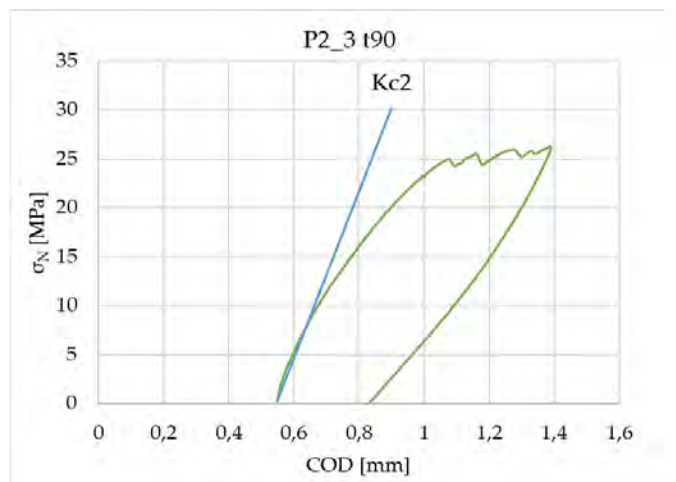
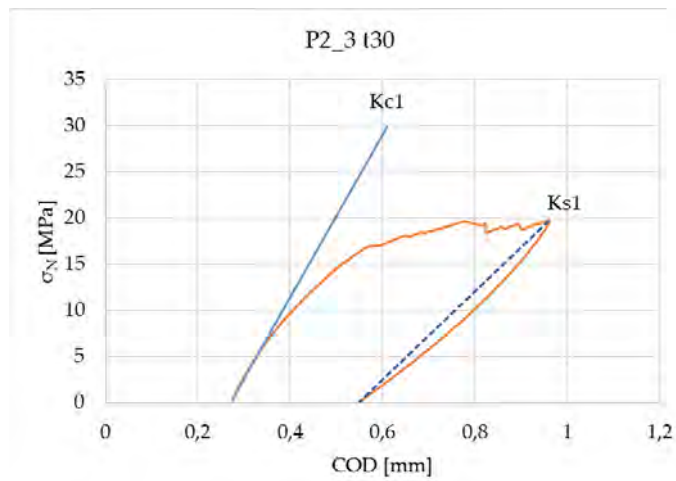
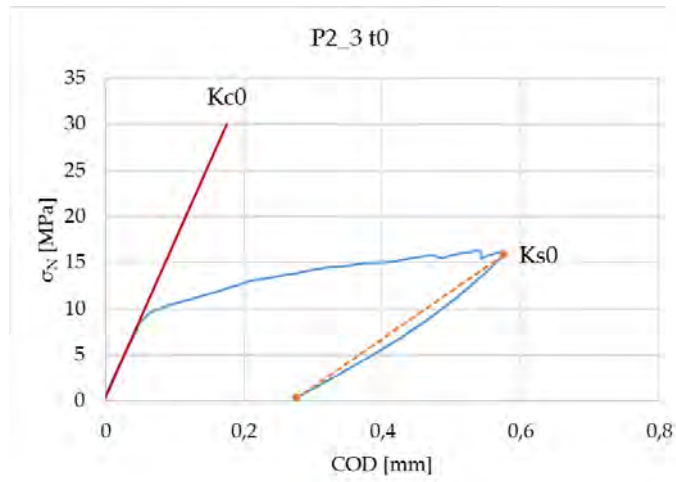
Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^{* t30-t90}$
P1_6	24,20	59,29	107,43	53,04	91,63	-137,18%	-92,16%	70,95%



Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
P1_8	99,24	313,08	89,80	49,93	92,19	104,42%	103,30%	106,00%



Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
P1_10	70,25	197,88	90,02	56,74	96,69	84,51%	79,29%	120,02%



Nome provino	Kc^0	Ks^0	Kc^1	Ks^1	Kc^2	$IDaR_0^{t30}$	$IDaR_0^{t90}$	$IDaR^*_{t30-t90}$
P2_3	52,01	169,45	89,63	47,77	89,63	67,96%	67,97%	99,99%

Allegato E

Panorama fessurativo

Mix	N° fessure	COD _{residui} [µm]			Mese 0-1			Mese 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W _{0 media} [µm]	W _{R1 PRE media} [µm]	IR ₀₋₁	W _{R1 POST media} [µm]	W _{R2 PRE media} [µm]	IR ₁₋₃
NP	16,57	327,79	603,93	869,11	58,40	5,85	83,44%	21,90	8,17	61,56%
P	10,57	289,29	570,00	840,21	58,40	14,80	78,85%	41,70	14,12	69,75%

Mix	Provino	N° fessure	COD _{residui} [µm]			Mese 0-1			Mese 1-3		
			COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W _{0 media} [µm]	W _{R1 PRE media} [µm]	IR ₀₋₁	W _{R1 POST media} [µm]	W _{R2 PRE media} [µm]	IR ₁₋₃
NP	NP1_1	31	291,00	597,00	799,00	6,86	3,07	93%	6,94	6,87	35%
	NP1_3	11	295,50	613,00	1052,50	19,50	4,77	98%	12,00	5,64	98%
	NP1_5	15	276,50	572,00	819,00	9,71	1,43	96%	8,54	3,26	61%
	NP1_8	14	345,00	643,00	930,00	34,85	16,11	64%	37,40	19,81	53%
	NP1_10	19	262,00	533,00	735,00	14,96	4,26	89%	14,75	4,07	77%
	NP2_1	15	274,00	532,00	747,00	24,91	4,17	83%	29,30	8,05	80%
P	NP2_3	11	281,00	500,00	799,00	42,20	7,13	75%	44,38	9,50	63%
	P1_2	14	268,50	561,00	900,50	49,77	19,04	64%	42,93	19,02	64%
	P1_3	6	248,00	453,00	553,80	140,23	31,83	75%	63,53	22,35	65%
	P1_5	14	290,50	568,00	790,00	25,65	4,58	92%	20,09	4,60	92%
	P1_6	8	622,00	918,00	1230,50	65,99	17,35	77%	49,44	12,96	78%
	P1_8	11	297,00	580,50	859,00	48,76	10,45	81%	45,10	12,28	70%
P	P1_10	13	293,00	596,50	922,50	27,21	2,35	94%	19,25	8,82	55%
	P2_3	8	275,50	550,50	827,50	51,21	17,96	69%	51,53	18,81	63%

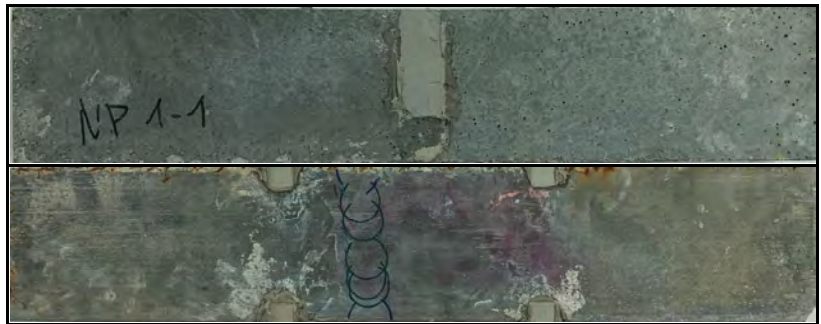
Mix	Provino	Fessura	COD residui [μm]			Mese 0-1			Mese 1-3		
			COD ₁₀	COD _{R1}	COD _{R2}	W _{0,media} [μm]	W _{R1 PRE,media} [μm]	IR ₀₋₁	W _{R1 POST,media} [μm]	W _{R2 PRE,media} [μm]	IR ₁₋₃
NP	NP1_1	1	291,00	597,00	799,00	6,86	3,07	93%	6,94	6,87	35%
		1				50,84	4,77	93%	47,07	5,64	91%
		2	295,50	613,00	1052,50	13,90	-	100%	0,41	-	100%
		3				7,01	-	100%	0,22	-	100%
	NP1_3	4				6,24	-	100%	0,31	-	100%
		1				10,92	1,91	87%	10,84	4,18	62%
		2				6,28	1,23	93%	5,61	2,32	57%
		3	276,50	572,00	819,00	8,12	-	100%	7,17	2,81	61%
	NP1_5	4				13,61	1,16	98%	10,96	5,82	43%
		5				9,64	-	100%	8,11	1,18	82%
		1				56,13	30,33	46%	66,14	45,19	32%
		2	345	643	930	26,28	15,06	56%	29,40	15,45	54%
	NP1_8	3				28,97	9,50	67%	26,12	10,41	50%
		4				28,02	9,55	87%	27,94	8,19	78%
		1				19,49	5,22	83%	20,38	6,26	71%
		2	262	533	735	16,24	2,84	88%	13,23	5,48	68%
	NP1_10	3				14,94	4,70	87%	15,31	3,47	79%
		4				9,17	-	100%	10,10	1,08	89%
		1				34,64	5,78	83%	49,26	11,65	72%
		2				41,22	6,18	85%	39,93	13,37	67%
NP2_1	3	274	532	747	26,39	3,67	95%	34,94	2,46	93%	
	4				15,32	2,90	85%	17,86	4,72	69%	
	5				6,95	2,31	69%	4,49	-	100%	
	1				40,28	8,23	83%	48,34	10,65	72%	
NP2_3	2				21,12	5,12	77%	32,85	4,91	73%	
	3	281	500	799	69,32	8,33	76%	71,53	14,29	55%	
	4				38,07	6,83	65%	24,82	8,15	52%	

Mix	Provino	Fessura	COD _{residui} [µm]			Mese 0-1			Mese 1-3		
			COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W _{0 media} [µm]	W _{R1 PRE media} [µm]	IR ₀₋₁	W _{R1 POST media} [µm]	W _{R2 PRE media} [µm]	IR ₁₋₃
P	P1_2	1				37,17	12,91	65%	42,06	1674%	71%
		2	268,5	561	900,5	85,86	38,13	56%	90,31	41,54	55%
		3				46,44	14,83	68%	17,95	6,54	64%
		4				29,61	10,30	67%	21,39	11,27	66%
	P1_3	1				278,76	57,39	80%	82,06	36,83	54%
		2	248	453	553,8	121,27	32,44	71%	78,81	21,46	72%
		3				20,66	5,66	76%	29,70	8,76	70%
	P1_5	1				20,40	1,09	95%	17,40	-	100%
		2				33,09	7,86	79%	23,11	15,49	71%
		3	290,5	568	790	33,90	4,80	85%	26,91	1,26	97%
		4				29,10	-	100%	23,07	1,27	97%
		5				11,78	-	100%	9,96	0,40	98%
	P1_6	1				62,25	25,10	60%	44,06	7,37	84%
		2	622	918	1230,5	65,06	17,20	74%	48,76	19,46	65%
		3				56,77	11,03	86%	42,34	20,26	67%
		4				79,88	16,06	88%	62,61	4,75	95%
	P1_8	1				51,08	11,57	83%	57,13	13,75	77%
		2	297	580,5	859	48,81	11,57	76%	39,21	17,01	54%
		3				45,16	9,25	90%	40,45	6,40	82%
		4				50,00	9,40	76%	43,63	11,95	69%
P1_10	1				26,59	4,21	84%	17,46	11,20	30%	
	2	293	596,5	922,5	23,75	2,08	99%	17,75	7,92	54%	
	3				28,40	2,12	94%	23,85	7,27	77%	
	4				30,09	1,02	98%	17,94	8,88	60%	
P2_3	1				26,58	9,23	66%	27,98	14,61	47%	
	2				45,46	8,72	80%	52,93	4,33	92%	
	3	275,5	550,5	827,5	66,65	32,00	53%	56,37	28,79	49%	
	4				58,72	22,31	62%	57,36	27,66	54%	
	5				58,64	17,56	83%	63,01	18,67	76%	

Allegato F

Dati punti di misura

Provino
NP1_1



Geometria	
L	498 mm
b	97 mm
h	32 mm

Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	291,00	597,00	799,00	15,05	3,07	80%	10,57	6,87	35%
	b				2,72	-	100%	-	-	100%
	c				2,80	-	100%	3,32	-	100%
	d				-	-	-	-	-	-
	e				-	-	-	-	-	-

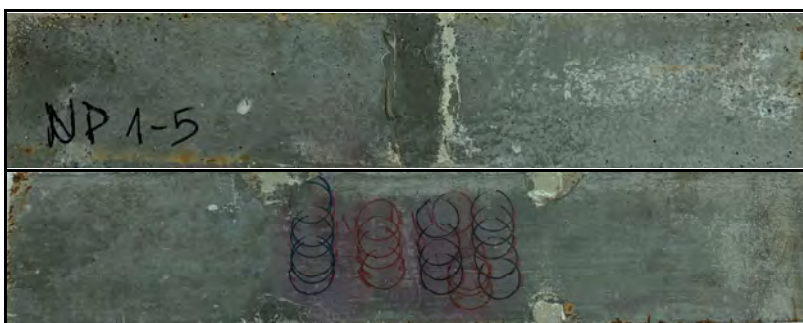
Provino
NP1_3



Geometria	
L	498 mm
b	97 mm
h	31 mm

Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	295,50	613,00	1052,50	57,53	8,41	85%	37,91	-	100%
	b				50,12	1,47	97%	35,89	3,22	91%
	c				35,18	-	100%	68,70	1,59	98%
	d				46,91	7,01	85%	76,37	15,33	80%
	e				64,49	2,20	97%	16,46	2,43	85%
2	a				14,31	-	100%	0,27	-	100%
	b				11,50	-	100%	0,16	-	100%
	c				11,28	-	100%	1,03	-	100%
	d				16,15	-	100%	0,20	-	100%
	e				16,27	-	100%	0,40	-	100%
3	a				9,53	-	100%	0,16	-	100%
	b				3,08	-	100%	0,25	-	100%
	c				7,29	-	100%	0,26	-	100%
	d				8,15	-	100%	0,23	-	100%
4	a				2,59	-	100%	0,47	-	100%
	b				6,54	-	100%	0,34	-	100%
	c				1,43	-	100%	0,38	-	100%
	d				10,00	-	100%	0,21	-	100%
	e				10,63	-	100%	0,17	-	100%

Provino
NP1_5

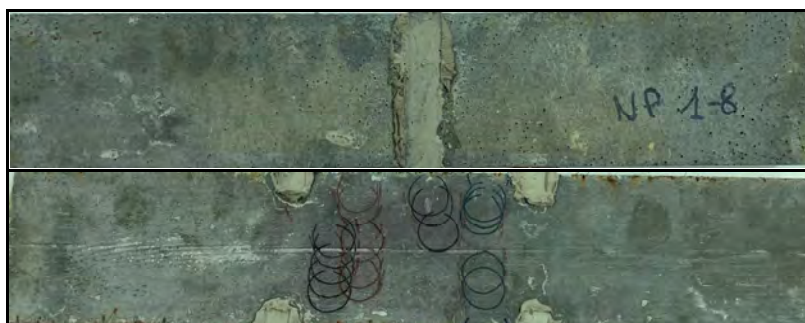


Geometria	
L	497 mm
b	97 mm
h	31 mm

Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	276,50	572,00	819,00	11,74	3,71	68%	11,89	5,86	51%
	b				9,67	-	100%	7,72	2,53	67%
	c				11,74	1,56	87%	10,18	3,39	67%
	d				11,00	1,64	85%	13,37	6,26	53%
	e				10,45	0,74	93%	11,03	2,86	74%
2	a	276,50	572,00	819,00	10,57	1,96	81%	9,16	4,64	49%
	b				4,91	0,49	90%	3,67	1,65	55%
	c				5,37	-	100%	6,48	1,18	82%
	d				4,27	-	100%	3,11	1,82	41%
3	a	276,50	572,00	819,00	6,91	-	100%	6,15	1,88	69%
	b				6,95	-	100%	8,67	4,10	53%
	c				8,35	-	100%	5,64	2,32	59%
	d				10,27	-	100%	8,22	2,94	64%
4	a	276,50	572,00	819,00	9,99	-	100%	9,88	5,91	40%
	b				13,74	-	100%	7,73	6,89	11%
	c				16,14	1,16	93%	12,87	8,97	30%
	d				14,57	-	100%	13,35	1,50	89%
5	a	276,50	572,00	819,00	6,39	-	100%	5,43	0,97	82%
	b				11,51	-	100%	9,70	1,14	88%
	c				19,17	-	100%	16,00	1,38	91%
	d				5,59	-	100%	4,65	0,16	97%
	e				5,55	-	100%	4,75	2,25	53%

Provino
NP1_8

Geometria	
L	497 mm
b	97 mm
h	32,3 mm



Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	345,00	643,00	930,00	42,40	20,73	51%	48,87	26,76	45%
	b				66,99	38,36	43%	77,66	50,61	35%
	c				56,43	31,51	44%	83,51	54,51	35%
	d				50,65	31,88	37%	70,57	53,82	24%
	e				64,18	29,18	55%	50,11	40,24	20%
2	a	345,00	643,00	930,00	29,21	-	100%	18,43	0,75	96%
	b				16,59	4,29	74%	19,25	5,70	70%
	c				28,35	20,83	27%	30,67	21,12	31%
	d				29,54	18,70	37%	40,89	27,14	34%
	e				27,69	16,43	41%	37,75	22,54	40%
3	a	345,00	643,00	930,00	35,59	9,55	73%	29,20	17,93	39%
	b				43,17	16,24	62%	39,43	18,39	53%
	c				8,16	2,71	67%	9,73	4,07	58%
4	a	345,00	643,00	930,00	18,95	0,27	99%	27,32	1,24	95%
	b				17,07	-	100%	18,30	0,29	98%
	c				17,59	-	100%	19,83	0,27	99%
	d				41,99	11,97	71%	34,42	16,09	53%
	e				44,48	16,40	63%	39,85	23,08	42%

Provino
NP1_10

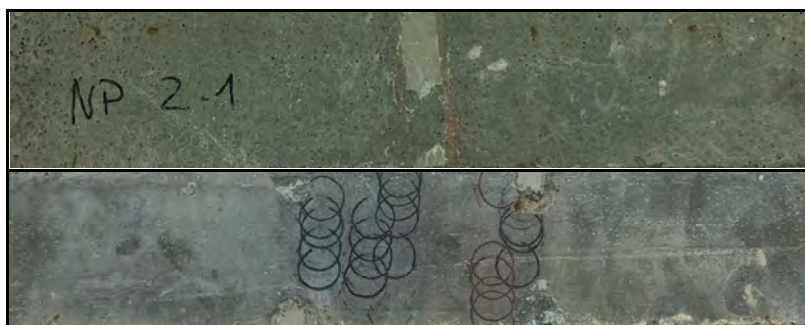
Geometria	
L	498 mm
b	97 mm
h	31 mm



Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	262,00	533,00	735,00	11,15	-	100%	10,52	1,63	84%
	b				14,55	3,60	75%	21,66	5,49	75%
	c				23,01	3,70	84%	20,41	8,98	56%
	d				29,24	8,36	71%	28,92	8,95	69%
2	a	262,00	533,00	735,00	6,22	-	100%	5,34	0,12	98%
	b				11,98	3,42	71%	13,14	7,74	41%
	c				15,93	0,71	96%	12,56	0,70	94%
	d				31,50	6,03	81%	20,18	18,14	10%
	e				15,56	1,23	92%	14,92	0,69	95%
3	a	262,00	533,00	735,00	17,59	-	100%	17,80	0,41	98%
	b				9,30	-	100%	11,94	1,71	86%
	c				14,16	1,21	91%	12,68	2,26	82%
	d				18,72	8,20	56%	18,80	9,51	49%
4	a	262,00	533,00	735,00	10,29	-	100%	9,21	0,69	92%
	b				7,76	-	100%	7,35	0,07	99%
	c				8,26	-	100%	10,07	2,66	74%
	d				6,85	-	100%	6,34	0,76	88%
	e				12,71	-	100%	17,56	1,21	93%

Provino
NP2_1

Geometria	
L	497 mm
b	96 mm
h	27 mm



Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	274,00	532,00	747,00	19,48	3,52	82%	14,94	4,58	69%
	b				41,46	4,92	88%	50,25	7,20	86%
	c				27,56	5,53	80%	33,06	18,89	43%
	d				36,71	4,73	87%	76,05	11,89	84%
	e				48,00	10,21	79%	72,01	15,69	78%
2	a	274,00	532,00	747,00	42,74	4,67	89%	38,63	13,48	65%
	b				35,39	5,05	86%	52,49	18,11	66%
	c				37,10	5,50	85%	34,39	7,38	79%
	d				49,66	9,49	81%	34,19	14,53	58%
3	a	274,00	532,00	747,00	14,68	-	100%	19,91	0,28	99%
	b				27,38	-	100%	30,26	1,09	96%
	c				34,46	-	100%	44,13	0,07	100%
	d				31,36	3,28	90%	58,16	7,10	88%
	e				24,09	4,06	83%	22,24	3,74	83%
4	a	274,00	532,00	747,00	14,70	3,44	77%	23,40	8,87	62%
	b				19,29	4,27	78%	27,61	5,84	79%
	c				18,30	2,45	87%	10,92	5,59	49%
	d				15,98	-	100%	20,63	0,53	97%
	e				8,32	1,43	83%	6,75	2,77	59%
5	a	274,00	532,00	747,00	8,18	2,18	73%	-	-	-
	b				8,43	2,33	72%	-	-	-
	c				9,92	4,49	55%	5,39	-	100%
	d				5,12	2,04	60%	6,22	-	100%
	e				3,12	0,50	84%	1,85	-	100%

Provino
NP2_3

Geometria	
L	495 mm
b	97 mm
h	26,3 mm



Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	281,00	500,00	799,00	6,20	0,31	95%	0,44	0,24	45%
	b				21,33	1,82	91%	10,01	1,18	88%
	c				15,91	3,81	76%	17,01	4,31	75%
	d				53,77	14,85	72%	51,19	14,98	71%
	e				104,21	20,37	80%	163,03	32,54	80%
2	a				5,78	2,01	65%	2,19	0,87	60%
	b				74,25	13,94	81%	83,68	17,96	79%
	c				7,45	2,80	62%	6,11	2,57	58%
	d				7,21	1,73	76%	4,15	1,13	73%
	e				10,89	-	100%	68,11	2,03	97%
3	a				166,36	10,59	94%	120,82	8,86	93%
	b				144,96	18,92	87%	179,54	23,63	87%
	c				12,33	7,04	43%	25,07	20,50	18%
	d				9,68	1,10	89%	6,04	4,09	32%
	e				13,26	4,01	70%	26,16	14,35	45%
4	a				72,20	9,73	87%	13,35	1,59	88%
	b				85,19	7,26	91%	65,60	4,56	93%
	c				9,83	6,28	36%	12,28	10,94	11%
	d				13,63	7,46	45%	26,40	20,01	24%
	e				9,52	3,42	64%	6,47	3,63	44%

Provino
P1_2



Geometria	
L	496 mm
b	97 mm
h	27 mm

Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	268,50	561,00	900,50	34,65	13,97	60%	40,35	-	100%
	b				42,42	16,51	61%	44,28	19,82	55%
	c				41,19	9,48	77%	52,04	18,52	64%
	d				30,41	11,67	62%	31,57	11,88	62%
2	a	268,50	561,00	900,50	82,01	40,81	50%	115,95	59,23	49%
	b				62,90	22,16	65%	87,54	25,60	71%
	c				55,06	23,86	57%	60,44	33,93	44%
	d				106,59	45,24	58%	104,13	45,97	56%
	e				122,73	58,58	52%	83,49	42,99	49%
3	a	268,50	561,00	900,50	21,56	3,93	82%	9,70	2,77	71%
	b				23,51	10,58	55%	12,75	5,22	59%
	c				90,35	27,79	69%	32,76	11,98	63%
	d				50,33	17,01	66%	16,58	6,21	63%
4	a	268,50	561,00	900,50	14,74	3,38	77%	9,50	-	100%
	b				28,07	12,17	57%	15,65	7,21	54%
	c				49,45	17,13	65%	35,40	13,11	63%
	d				26,16	8,51	67%	25,00	13,48	46%

Provino
P1_3

Geometria	
L	496 mm
b	97 mm
h	27 mm



Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	248,00	453,00	553,80	261,31	55,15	79%	111,30	14,67	87%
	b				267,45	49,57	81%	55,88	31,88	43%
	c				351,10	88,91	75%	114,55	77,19	33%
	d				194,17	31,46	84%	67,15	33,21	51%
	e				319,77	61,88	81%	61,43	27,19	56%
2	a	248,00	453,00	553,80	86,61	40,34	53%	40,83	10,55	74%
	b				94,10	35,17	63%	34,15	6,46	81%
	c				152,72	37,08	76%	82,35	36,70	55%
	d				124,06	28,44	77%	94,68	31,26	67%
	e				148,88	21,17	86%	142,04	22,32	84%
3	a	248,00	453,00	553,80	18,62	3,03	84%	20,89	8,48	59%
	b				12,94	1,16	91%	11,46	2,50	78%
	c				11,86	3,74	69%	60,93	20,20	67%
	d				35,03	14,61	58%	34,19	3,26	90%
	e				24,82	5,77	77%	21,06	9,37	56%

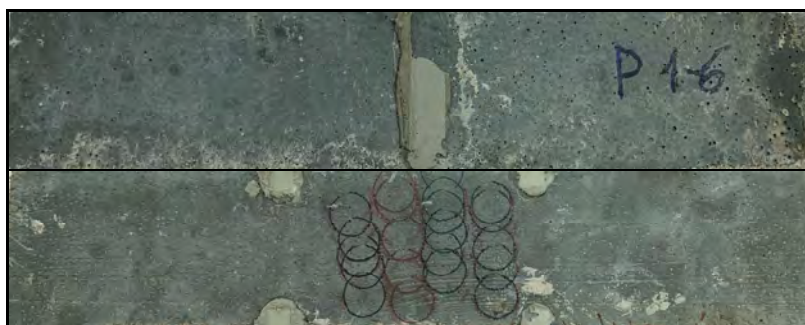
Provino
P1_5

Geometria	
L	496 mm
b	95 mm
h	23 mm



Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	290,50	568,00	790,00	31,27	2,07	93%	28,76	-	100%
	b				32,89	0,58	98%	23,82	-	100%
	c				13,18	0,70	95%	13,07	-	100%
	d				8,84	1,02	88%	5,88	-	100%
	e				15,81	-	100%	15,47	-	100%
2	a	290,50	568,00	790,00	46,55	16,05	66%	33,91	22,42	34%
	b				44,06	11,92	73%	32,11	22,15	31%
	c				27,35	5,22	81%	16,85	1,91	89%
	d				13,36	1,04	92%	12,59	-	100%
	e				34,14	5,08	85%	20,08	-	100%
3	a	290,50	568,00	790,00	33,35	0,76	98%	28,80	2,25	92%
	b				37,17	2,57	93%	25,97	-	100%
	c				33,92	4,82	86%	31,15	0,92	97%
	d				31,16	11,04	65%	21,72	0,60	97%
4	a	290,50	568,00	790,00	33,75	-	100%	22,97	0,99	96%
	b				37,16	-	100%	29,73	1,54	95%
	c				16,38	-	100%	16,50	-	100%
5	a	290,50	568,00	790,00	12,20	-	100%	11,06	-	100%
	b				33,15	-	100%	29,49	-	100%
	c				6,72	-	100%	4,68	0,40	91%
	d				5,06	-	100%	3,93	-	100%
	e				1,75	-	100%	0,64	-	100%

Provino
P1_6

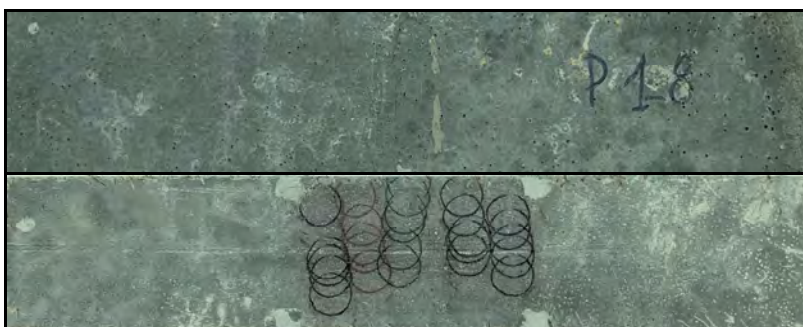


Geometria	
L	500 mm
b	98 mm
h	29 mm

Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	622,00	918,00	1230,50	65,68	37,33	43%	39,27	1,95	95%
	b				48,79	19,39	60%	40,28	1,24	97%
	c				64,49	21,65	66%	51,37	8,63	83%
	d				77,02	26,06	66%	44,36	7,06	84%
	e				55,30	21,08	62%	45,04	17,96	60%
2	a	622,00	918,00	1230,50	63,70	27,16	57%	48,90	6,09	88%
	b				70,97	21,01	70%	49,16	15,14	69%
	c				80,11	22,73	72%	63,06	31,03	51%
	d				54,59	12,51	77%	52,01	-	100%
	e				55,95	2,59	95%	30,64	25,58	17%
3	a	622,00	918,00	1230,50	32,31	-	100%	24,24	-	100%
	b				54,25	4,23	92%	47,13	39,03	17%
	c				41,77	6,67	84%	38,84	15,85	59%
	d				90,06	14,48	84%	63,32	24,35	62%
	e				65,44	18,75	71%	38,19	1,81	95%
4	a	622,00	918,00	1230,50	83,40	15,62	81%	62,32	11,50	82%
	b				80,97	17,57	78%	75,35	-	100%
	c				95,92	-	100%	62,66	1,55	98%
	d				79,50	15,00	81%	87,94	-	100%
	e				59,63	-	100%	24,79	1,22	95%

Provino
P1_8

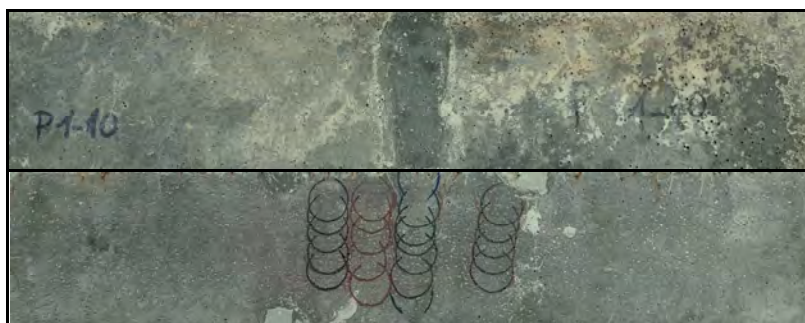
Geometria	
L	500 mm
b	97 mm
h	28 mm



Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	297,00	580,50	859,00	49,44	9,20	81%	51,91	9,22	82%
	b				30,84	-	100%	30,37	1,80	94%
	c				89,93	14,89	83%	92,01	20,10	78%
	d				43,96	10,86	75%	58,23	13,01	78%
	e				41,21	11,32	73%	53,14	24,60	54%
2	a	297,00	580,50	859,00	32,99	11,43	65%	34,31	16,28	53%
	b				50,59	8,77	83%	30,77	18,64	39%
	c				54,63	12,43	77%	40,48	13,87	66%
	d				55,37	15,23	72%	56,85	17,06	70%
	e				50,44	9,98	80%	33,62	19,20	43%
3	a	297,00	580,50	859,00	45,77	4,79	90%	31,90	3,50	89%
	b				19,58	-	100%	10,63	3,39	68%
	c				54,44	10,86	80%	54,29	12,16	78%
	d				40,41	-	100%	55,19	2,17	96%
	e				65,63	12,10	82%	50,25	10,78	79%
4	a	297,00	580,50	859,00	64,76	7,36	89%	48,71	9,21	81%
	b				47,84	5,07	89%	33,02	4,12	88%
	c				34,72	7,94	77%	29,37	11,04	62%
	d				79,39	13,10	83%	78,22	15,77	80%
	e				23,30	13,51	42%	28,82	19,61	32%
5	a	297,00	580,50	859,00	138,14	42,33	69%	207,94	79,60	62%
	b				28,38	20,22	29%	30,90	26,06	16%
	c				20,76	8,45	59%	26,74	18,74	30%
	d				18,65	11,00	41%	2,37	1,42	40%
	e				12,24	-	100%	14,16	1,77	88%

Provino
P1_10

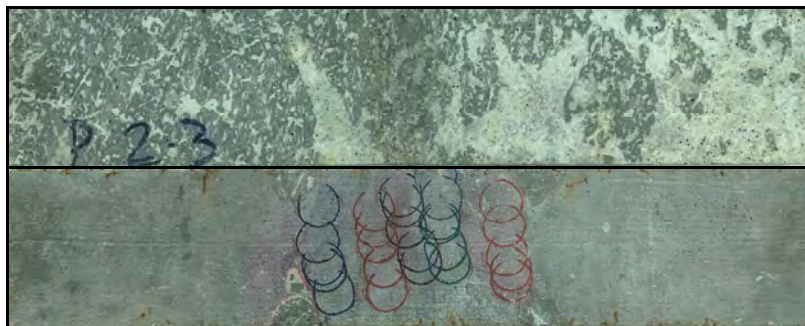
Geometria	
L	495 mm
b	97 mm
h	26,3 mm



Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	293,00	596,50	922,50	32,67	5,37	84%	23,13	7,62	67%
	b				41,26	8,96	78%	22,76	11,99	47%
	c				28,37	1,71	94%	11,05	10,48	5%
	d				17,19	0,26	98%	18,17	15,15	17%
	e				13,46	4,74	65%	12,19	10,76	12%
2	a	293,00	596,50	922,50	13,71	-	100%	11,42	4,83	58%
	b				22,02	-	100%	21,85	17,49	20%
	c				33,49	2,08	94%	21,98	7,14	67%
	d				27,30	-	100%	23,23	4,64	80%
	e				22,20	-	100%	10,29	5,51	46%
3	a	293,00	596,50	922,50	21,17	1,60	92%	35,27	4,34	88%
	b				28,83	2,18	92%	24,32	4,68	81%
	c				29,20	2,77	91%	15,84	4,24	73%
	d				36,04	1,92	95%	28,65	15,81	45%
	e				26,79	-	100%	15,17	-	100%
4	a	293,00	596,50	922,50	16,80	-	100%	12,30	10,98	11%
	b				28,80	0,19	99%	13,31	-	100%
	c				31,84	-	100%	16,61	2,43	85%
	d				46,36	1,23	97%	23,58	13,22	44%
	e				26,67	1,62	94%	23,90	-	100%

Provino
P2_3

Geometria	
L	496 mm
b	97 mm
h	28,3 mm



Fessura	Punto di misura	COD _{residui} [μm]			Tempo 0-1			Tempo 1-3		
		COD _{t0}	COD _{R1}	COD _{R2}	W ₀	W _{R1 PRE}	IR ₀₋₁	W _{R1 POST}	W _{R2 PRE}	IR ₁₋₃
1	a	275,50	550,50	827,50	21,96	4,79	78%	10,74	5,79	46%
	b				25,58	9,82	62%	11,58	5,29	54%
	c				30,68	12,59	59%	24,90	16,57	33%
	d				33,87	13,21	61%	56,95	25,87	55%
	e				20,80	5,74	72%	35,75	19,51	45%
2	a	275,50	550,50	827,50	44,97	3,79	92%	41,95	2,14	95%
	b				60,64	5,31	91%	85,47	5,80	93%
	c				46,42	12,38	73%	35,78	3,61	90%
	d				46,42	13,84	70%	71,54	7,02	90%
	e				28,85	8,28	71%	29,91	3,09	90%
3	a	275,50	550,50	827,50	67,21	31,31	53%	41,94	22,77	46%
	b				100,38	53,61	47%	85,05	48,74	43%
	c				72,91	32,77	55%	77,03	35,64	54%
	d				42,93	22,84	47%	28,40	16,73	41%
	e				49,82	19,45	61%	49,43	20,09	59%
4	a	275,50	550,50	827,50	65,83	20,53	69%	73,10	36,12	51%
	b				50,89	20,76	59%	52,14	17,60	66%
	c				64,84	32,39	50%	75,63	36,25	52%
	d				62,16	25,31	59%	55,63	39,30	29%
	e				49,89	12,58	75%	30,30	9,01	70%
5	a	275,50	550,50	827,50	58,88	17,86	70%	61,35	23,70	61%
	b				55,94	17,16	69%	82,19	27,68	66%
	c				52,57	-	100%	64,50	1,27	98%
	d				58,95	-	100%	59,17	-	100%
	e				66,85	17,65	74%	47,85	22,02	54%

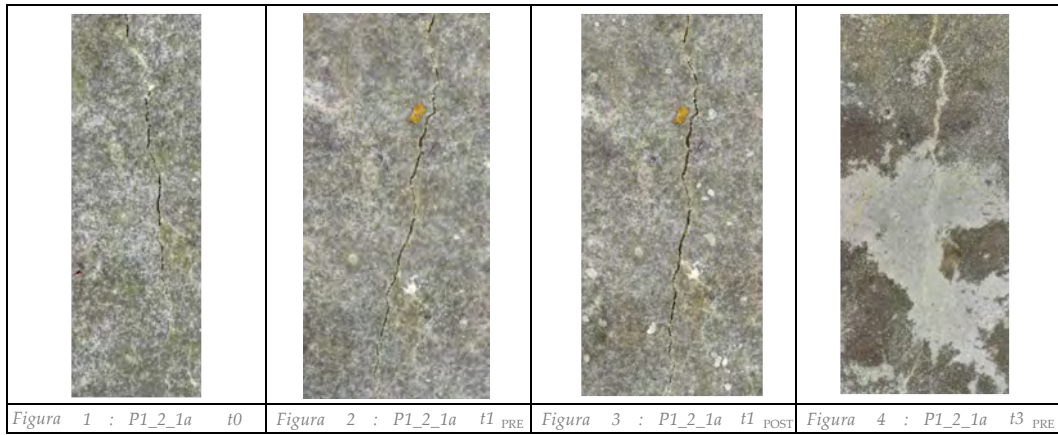
Allegato G

Immagini punti di misura

Provino: P1_2

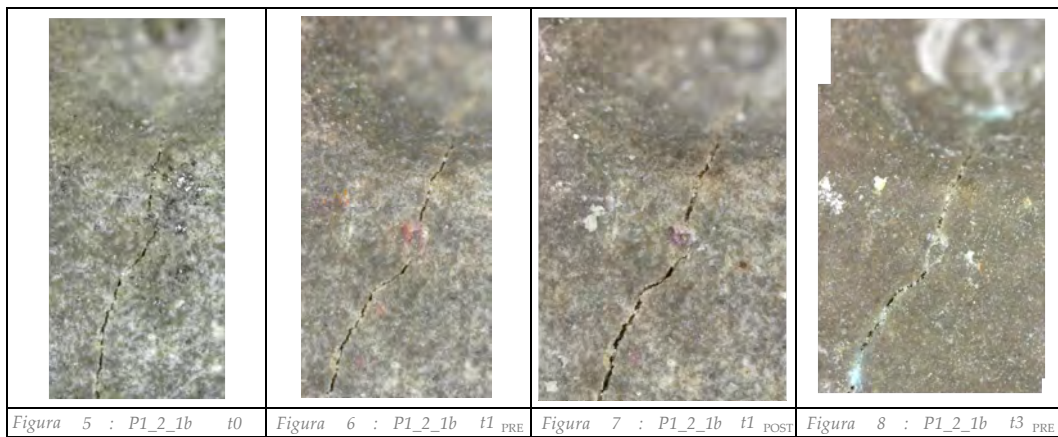
Fessura: 1

Punto di misura: a



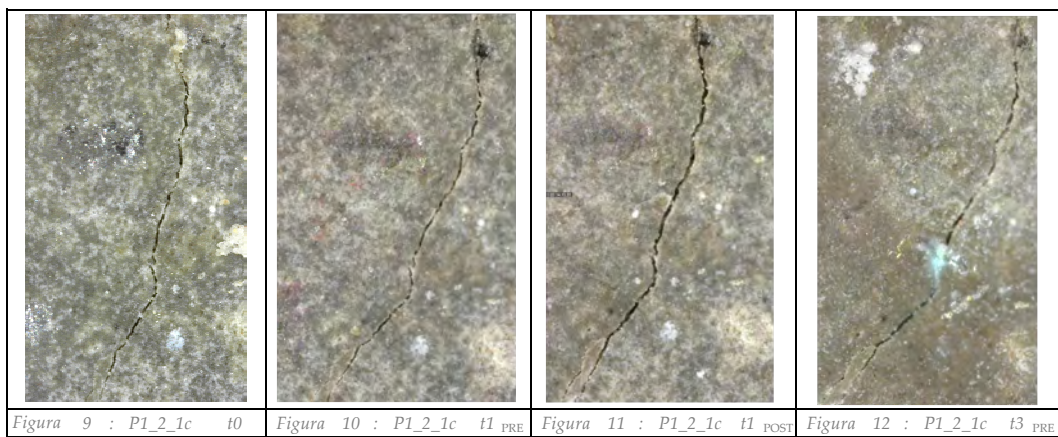
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

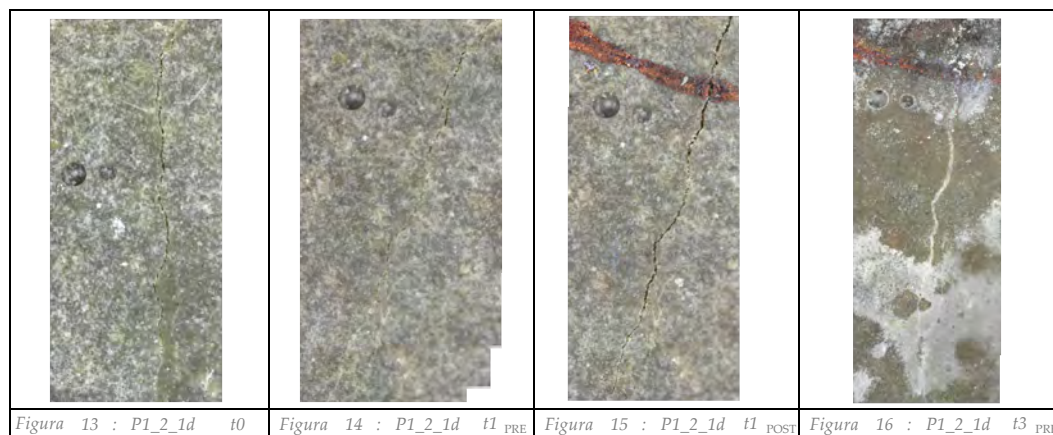
Punto di misura: c



Provino: P1_2

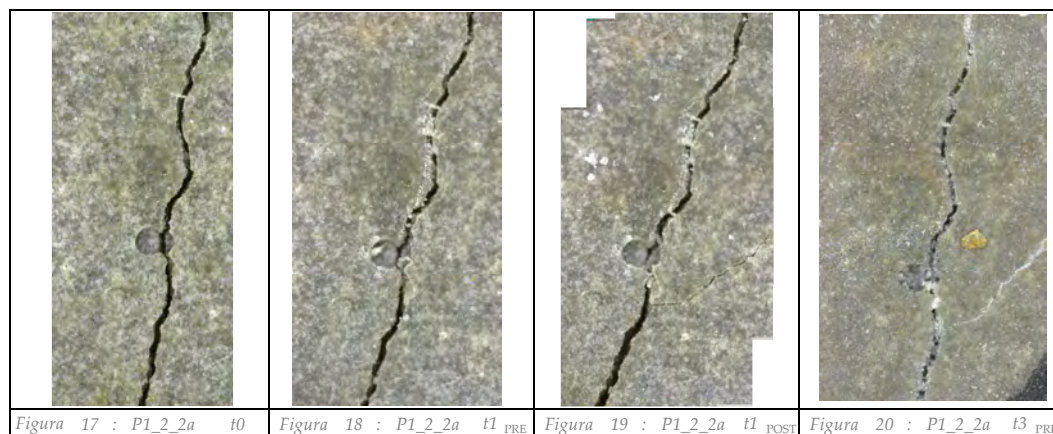
Fessura: 1

Punto di misura: d



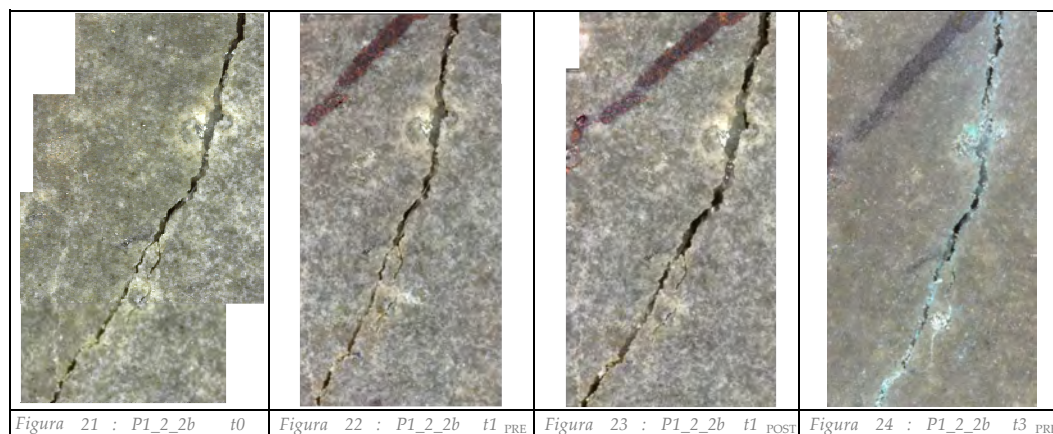
Fessura: 2

Punto di misura: a



Fessura: 2

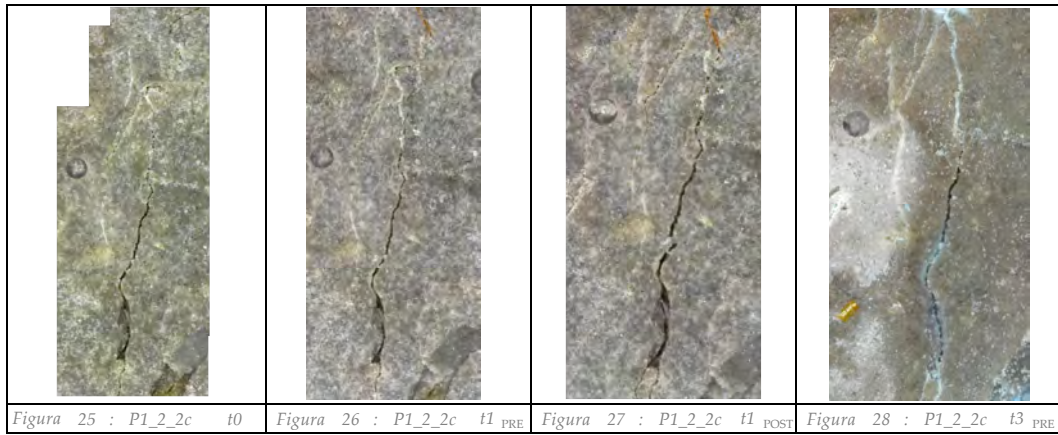
Punto di misura: b



Provino: P1_2

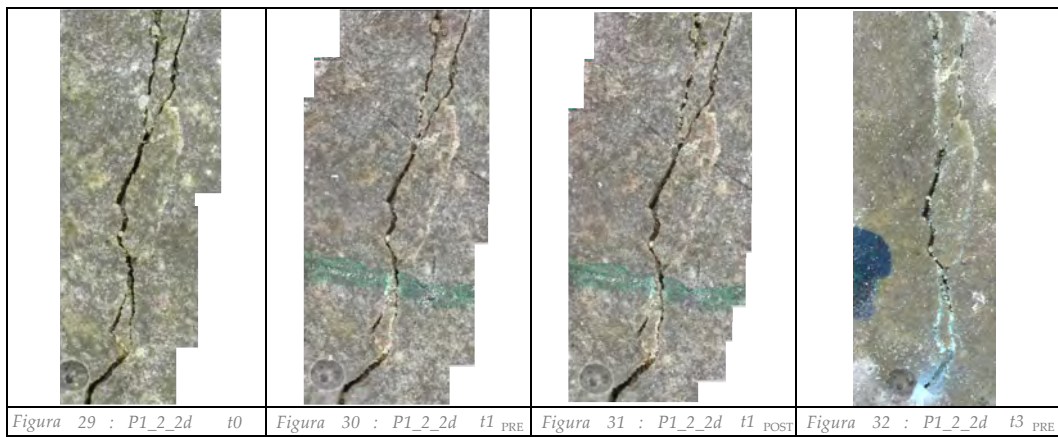
Fessura: 2

Punto di misura: c



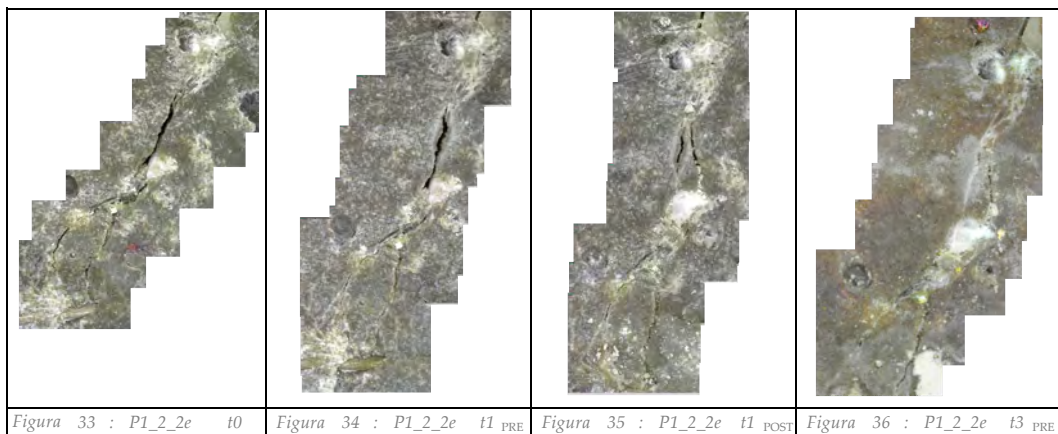
Fessura: 2

Punto di misura: d



Fessura: 2

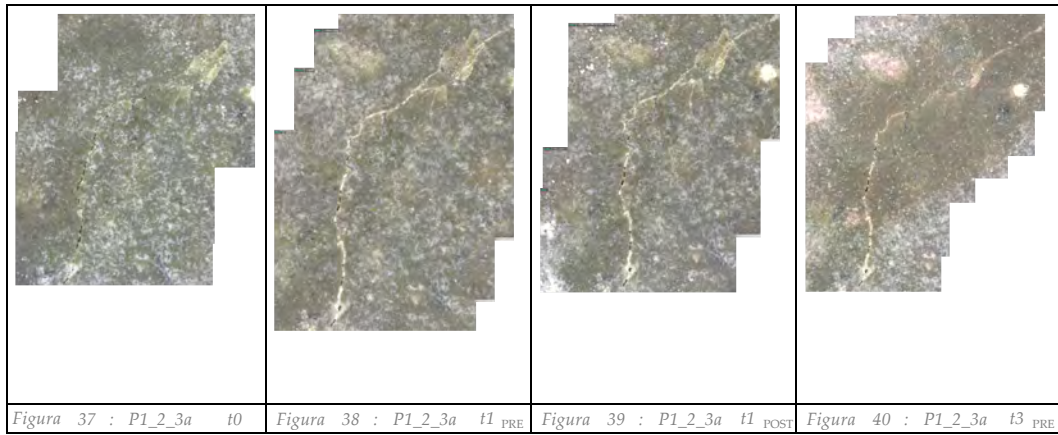
Punto di misura: e



Provino: P1_2

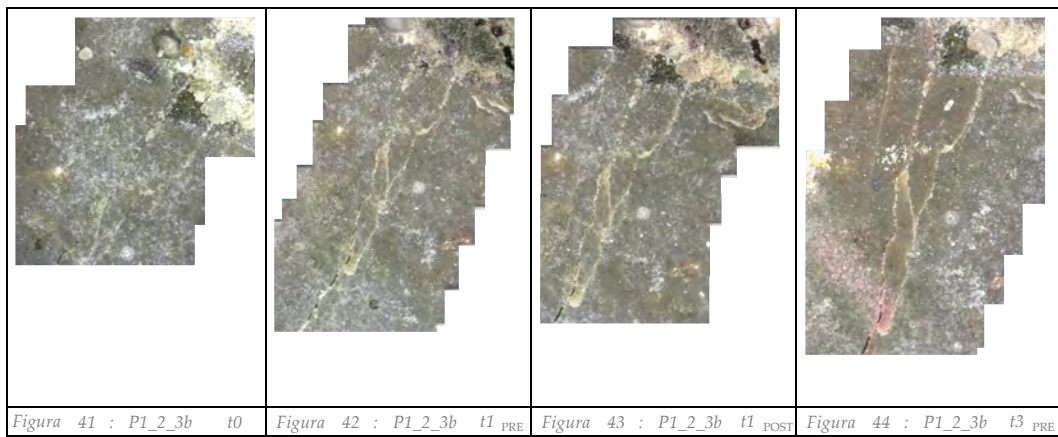
Fessura: 3

Punto di misura: a



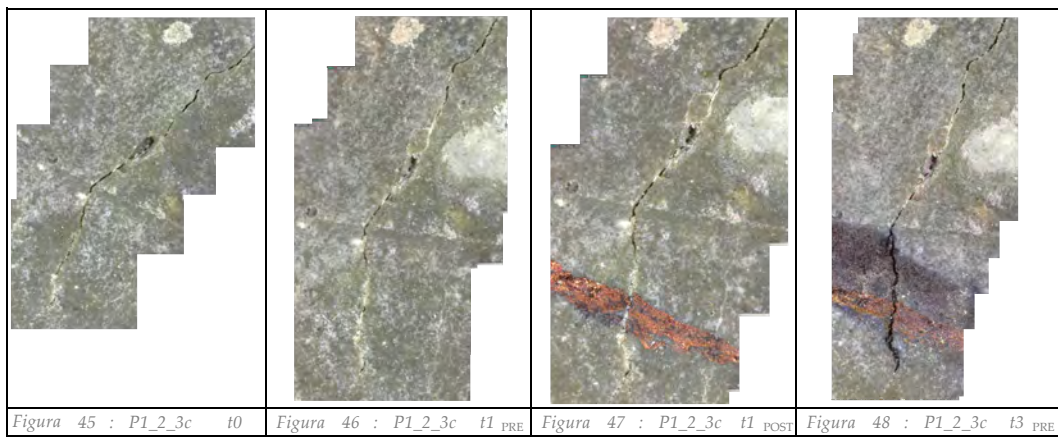
Fessura: 3

Punto di misura: b



Fessura: 3

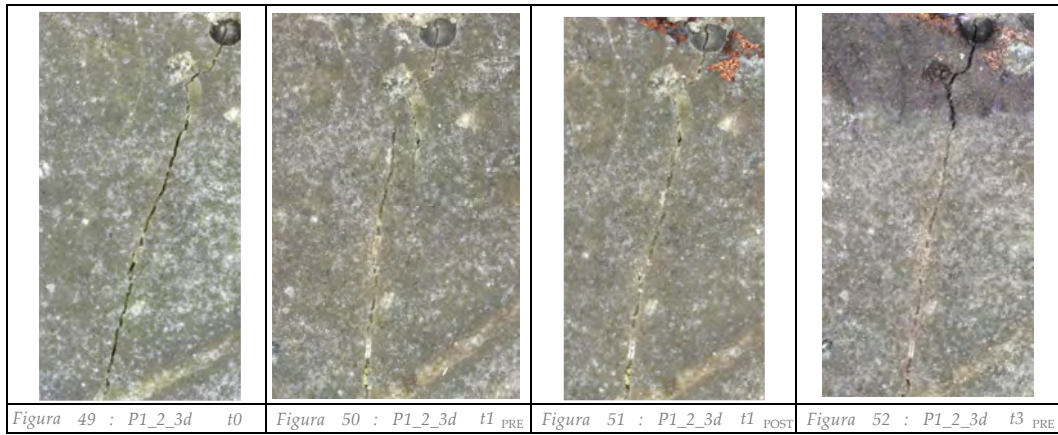
Punto di misura: c



Provino: P1_2

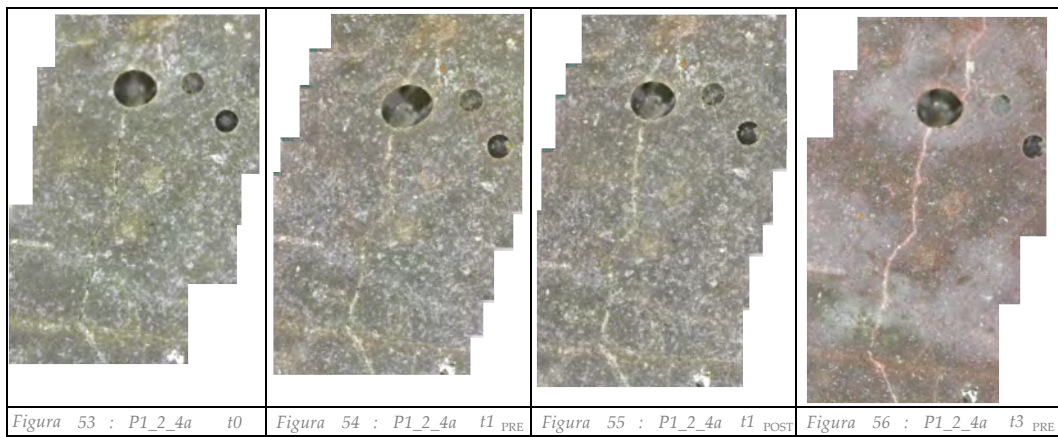
Fessura: 3

Punto di misura: d



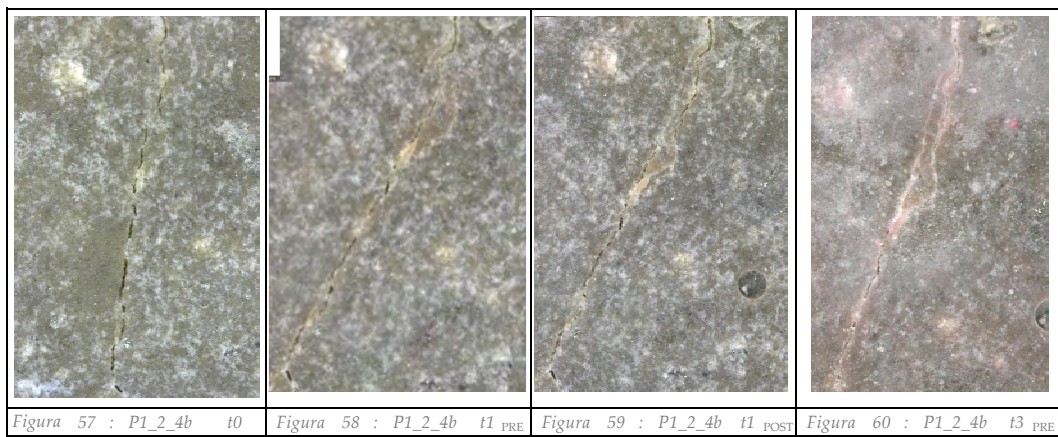
Fessura: 4

Punto di misura: a



Fessura: 4

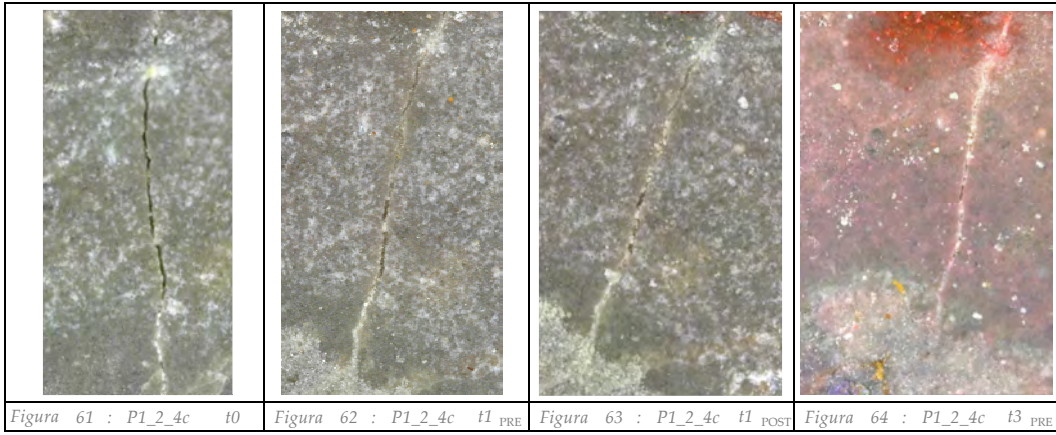
Punto di misura: b



Provino: P1_2

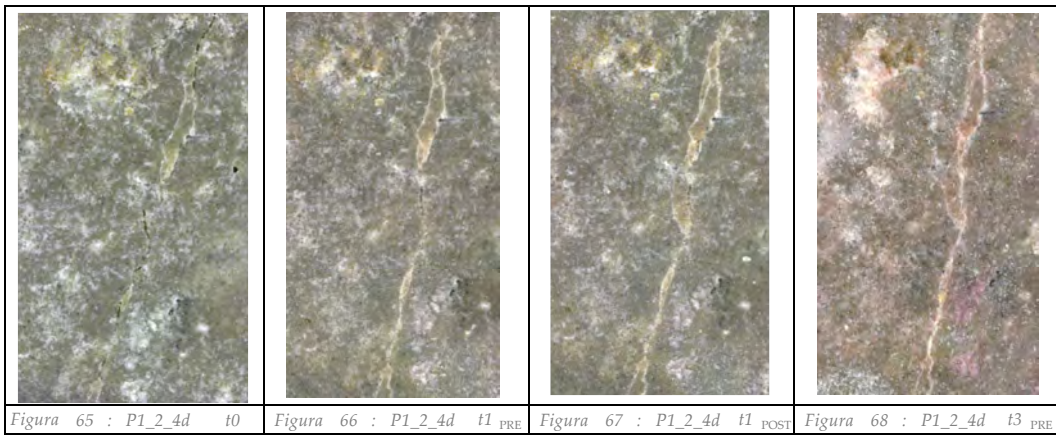
Fessura: 4

Punto di misura: c



Fessura: 4

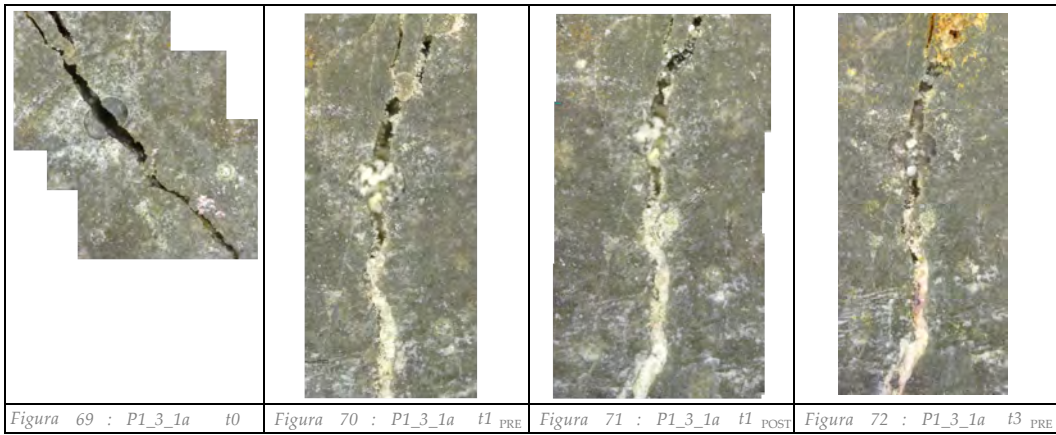
Punto di misura: d



Provino: P1_3

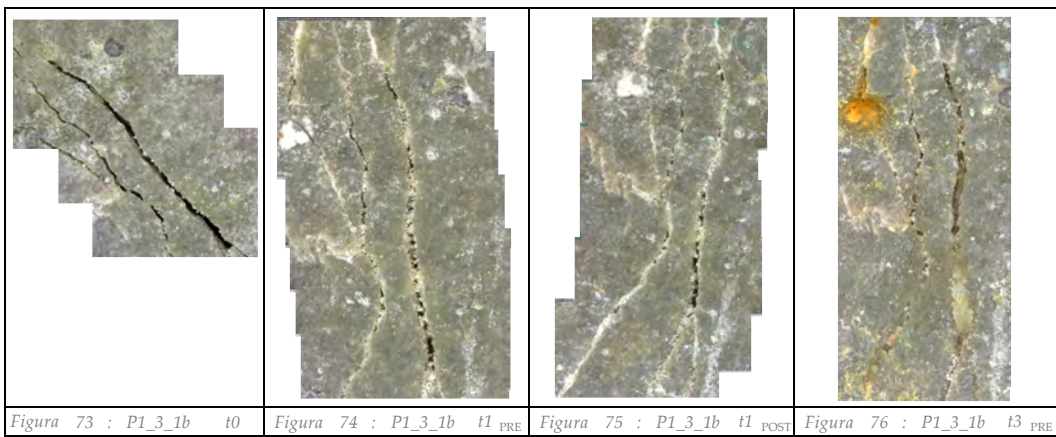
Fessura: 1

Punto di misura: a



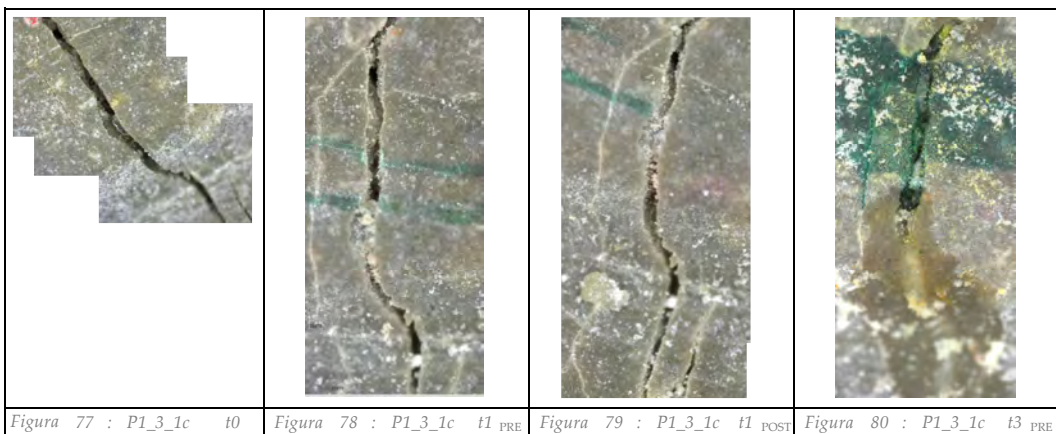
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

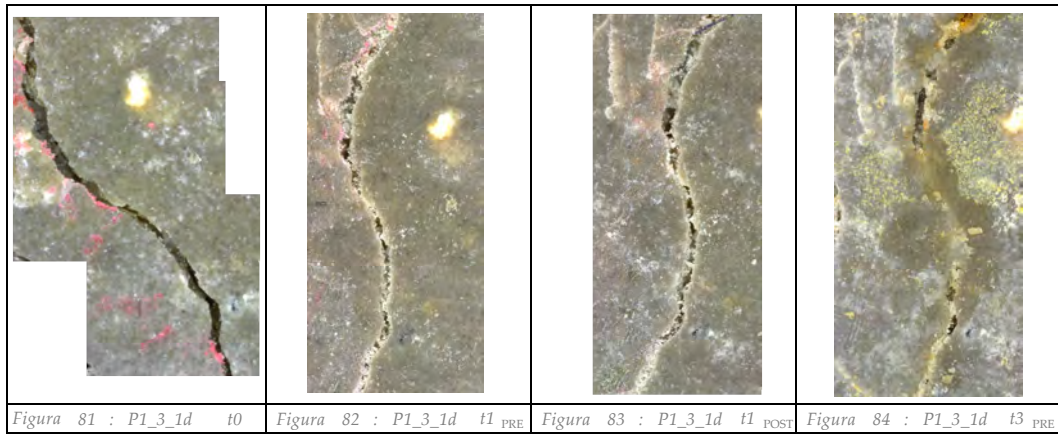
Punto di misura: c



Provino: P1_3

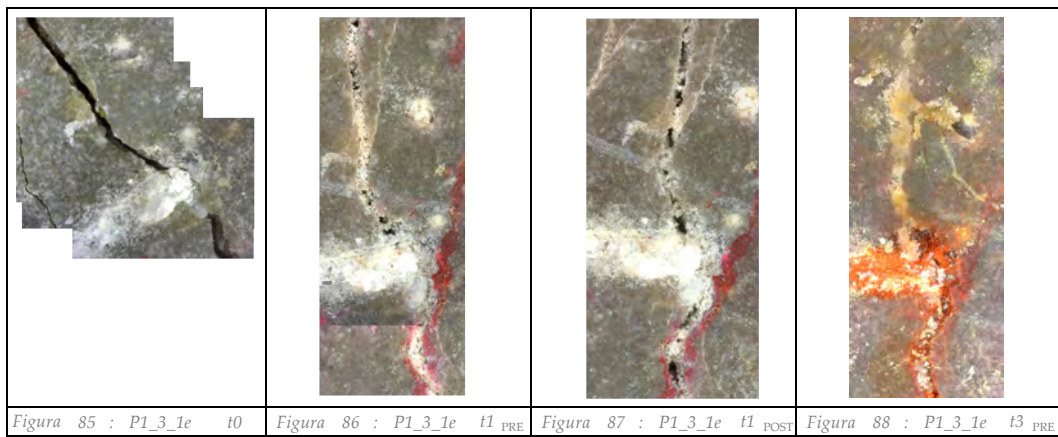
Fessura: 1

Punto di misura: d



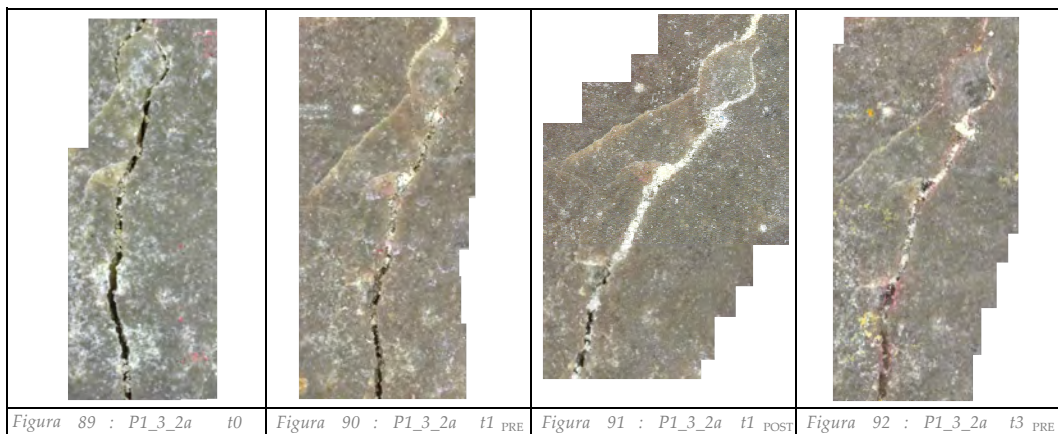
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

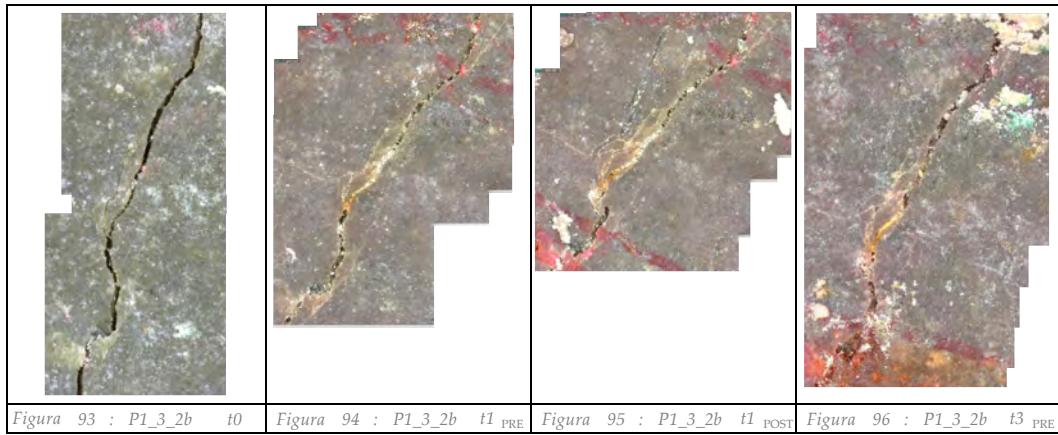
Punto di misura: a



Provino: P1_3

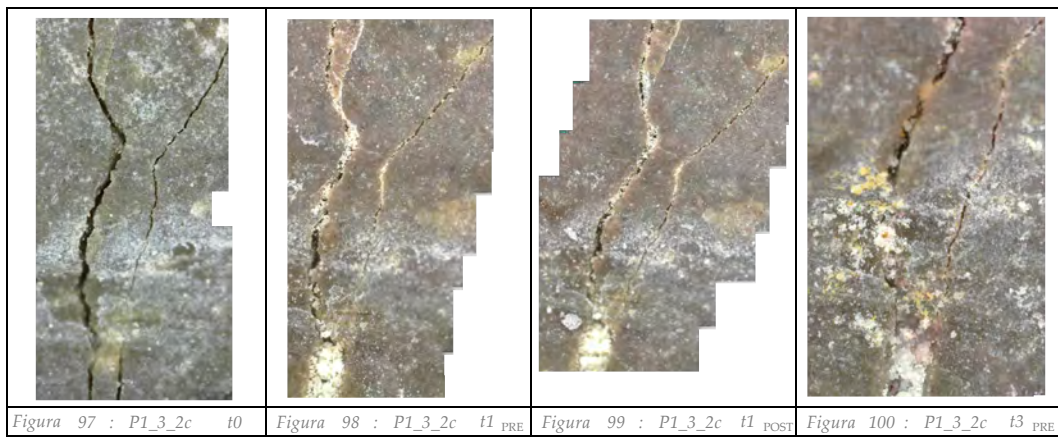
Fessura: 2

Punto di misura: b



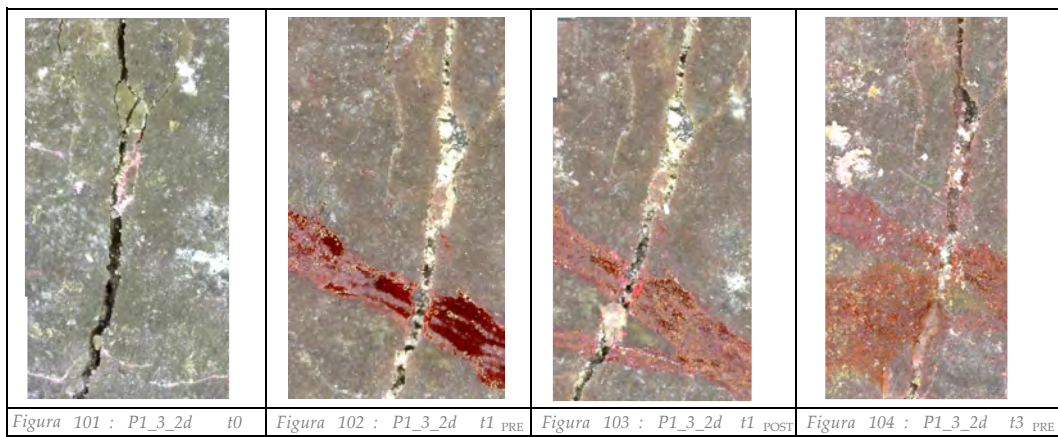
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

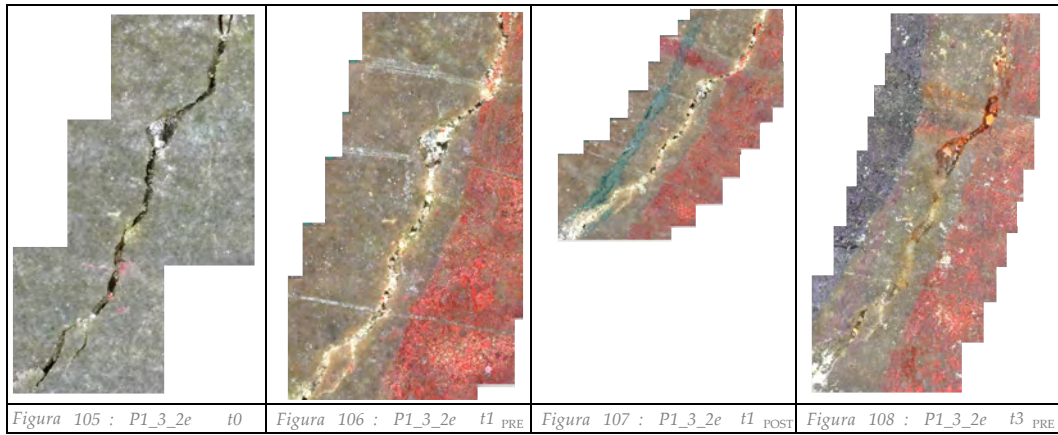
Punto di misura: d



Provino: P1_3

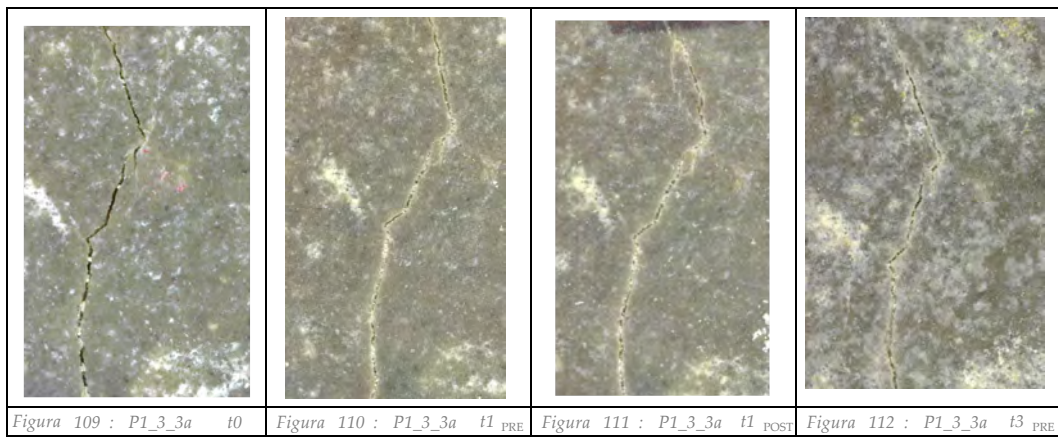
Fessura: 2

Punto di misura: e



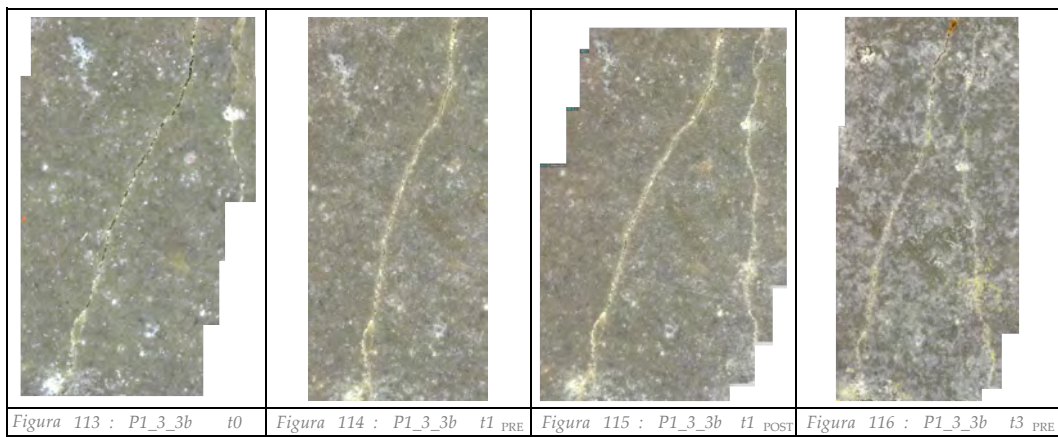
Fessura: 3

Punto di misura: a



Fessura: 3

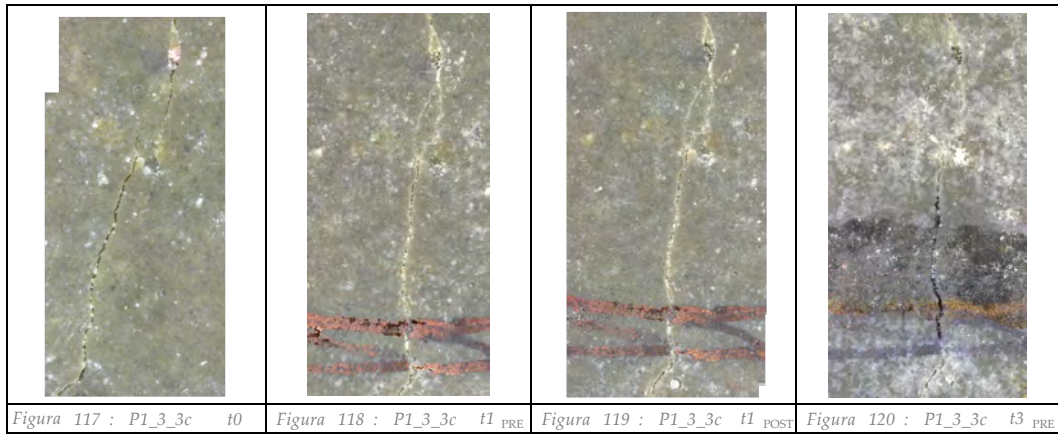
Punto di misura: b



Provino: P1_3

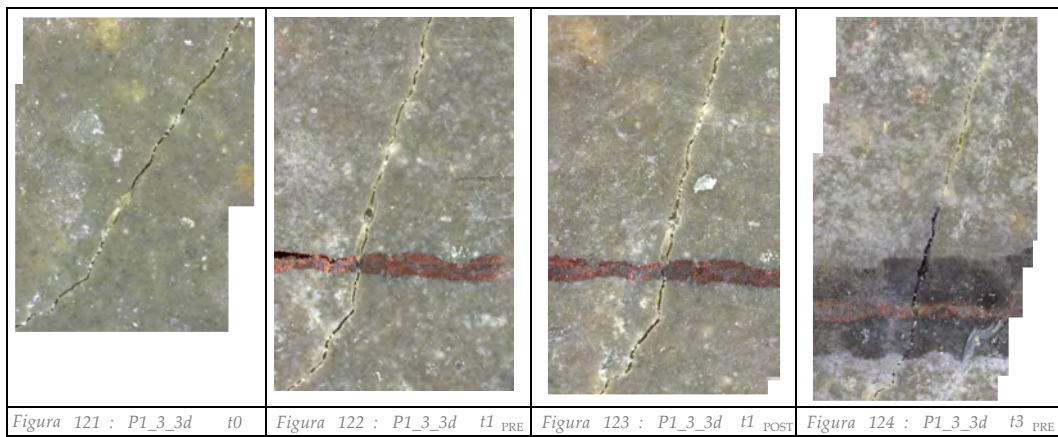
Fessura: 3

Punto di misura: c



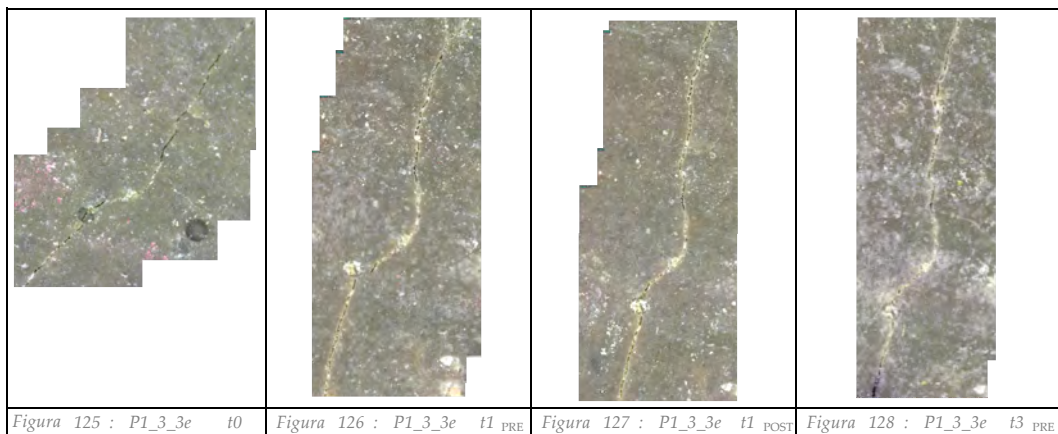
Fessura: 3

Punto di misura: d



Fessura: 3

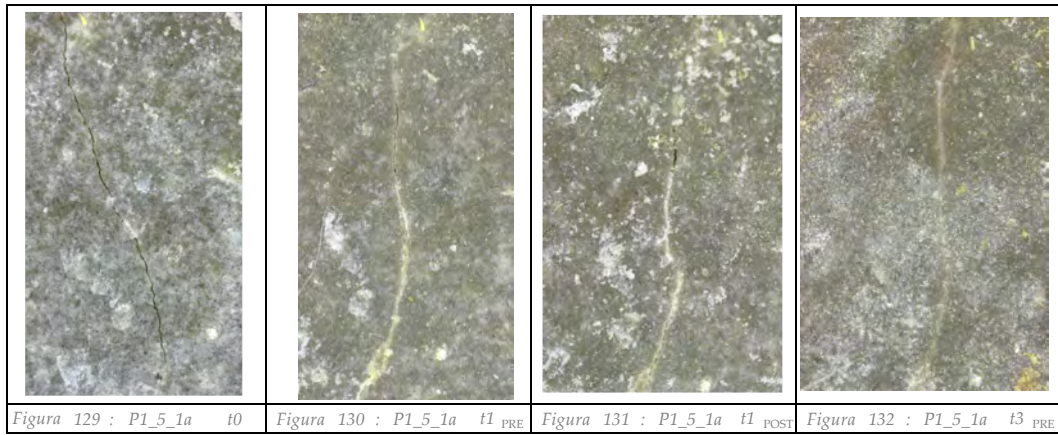
Punto di misura: e



Provino: P1_5

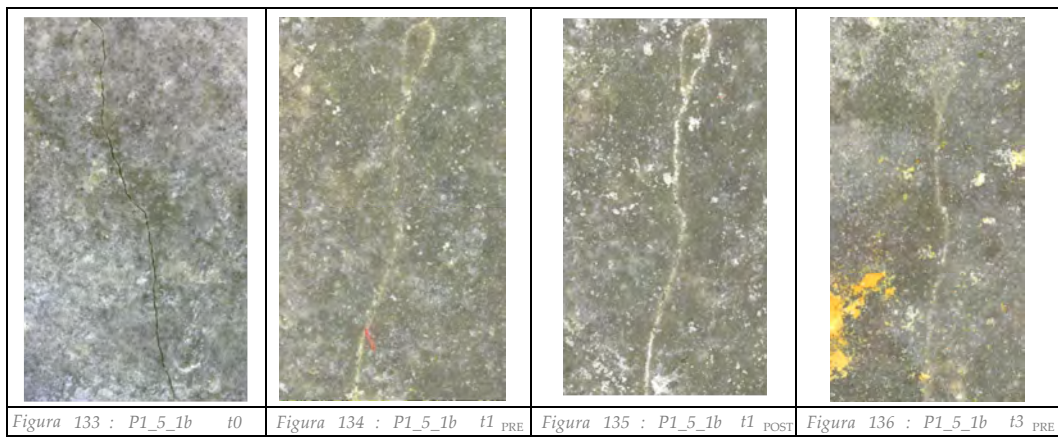
Fessura: 1

Punto di misura: a



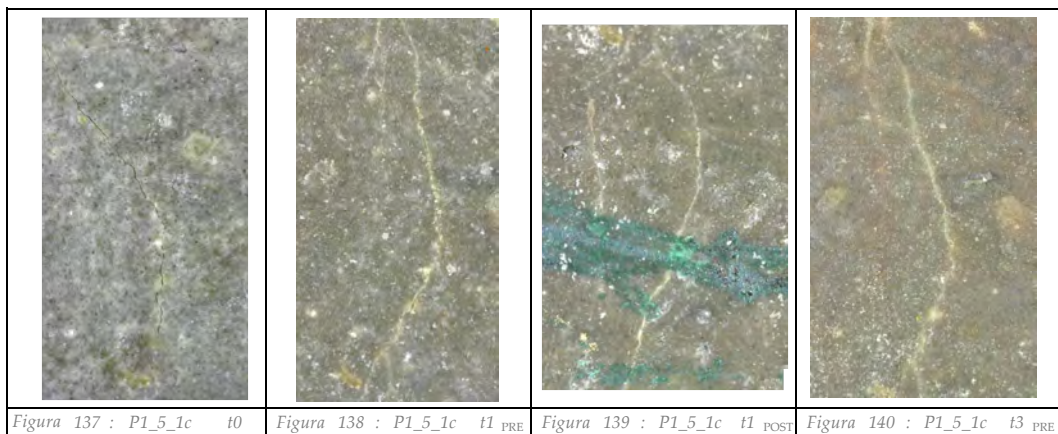
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

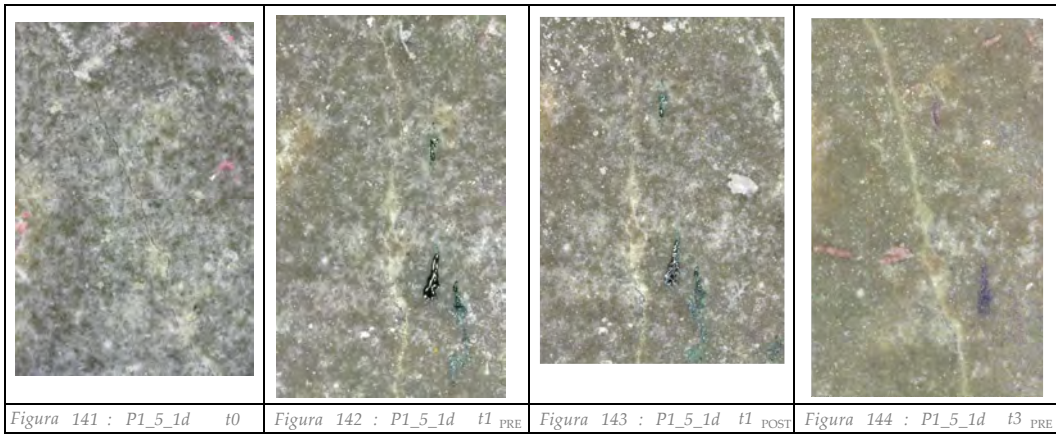
Punto di misura: c



Provino: P1_5

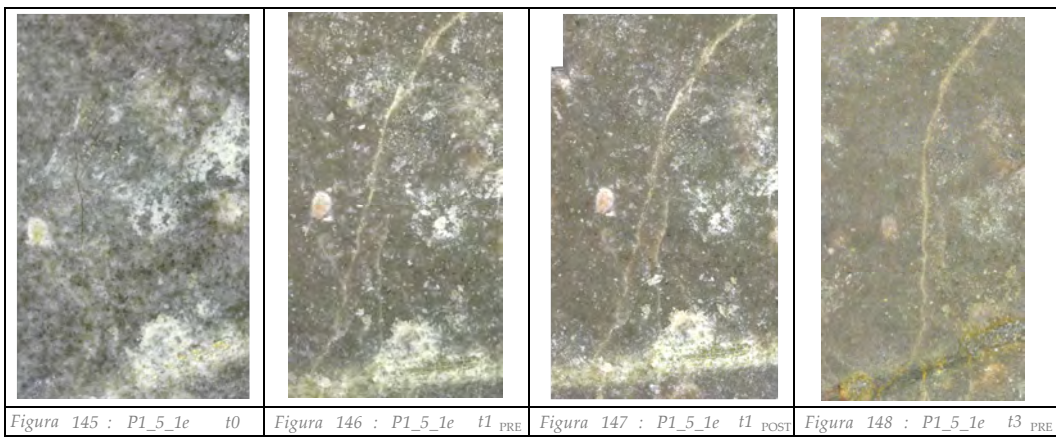
Fessura: 1

Punto di misura: d



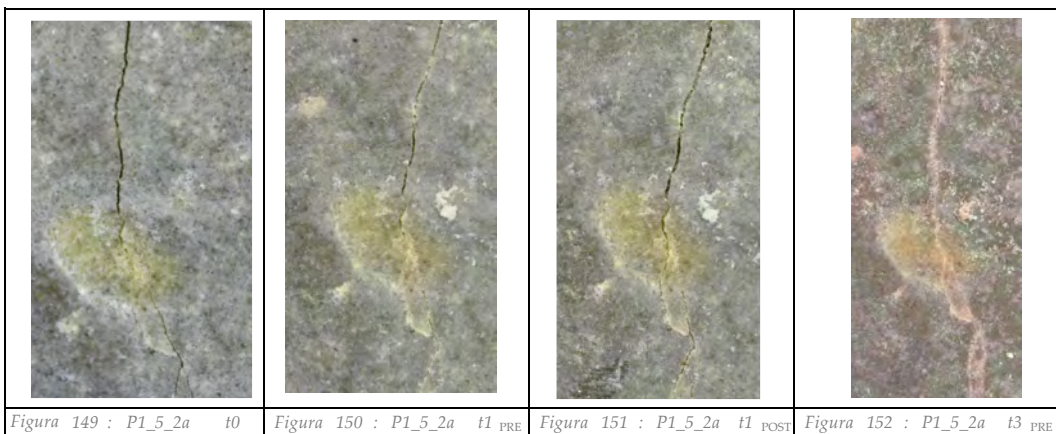
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

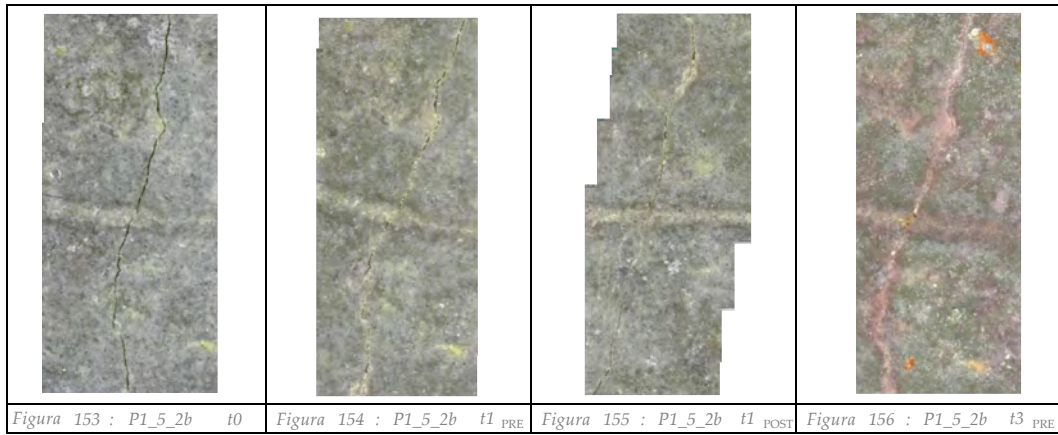
Punto di misura: a



Provino: P1_5

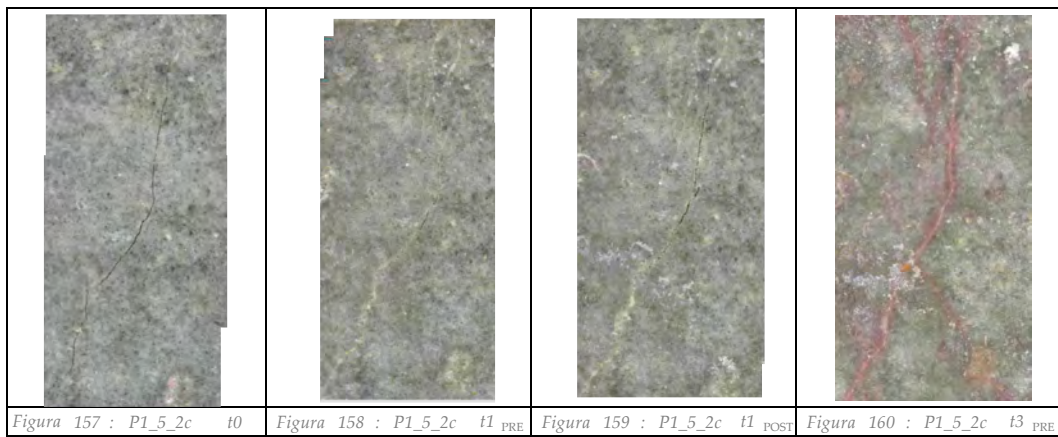
Fessura: 2

Punto di misura: b



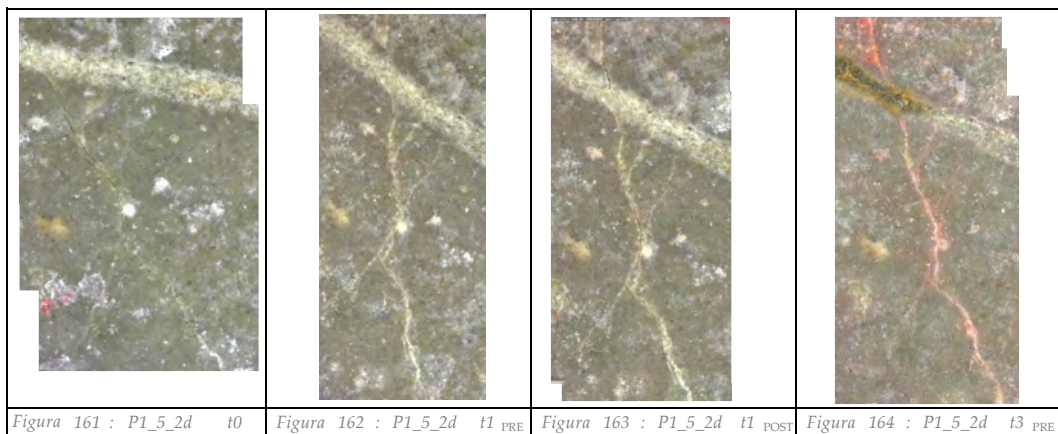
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

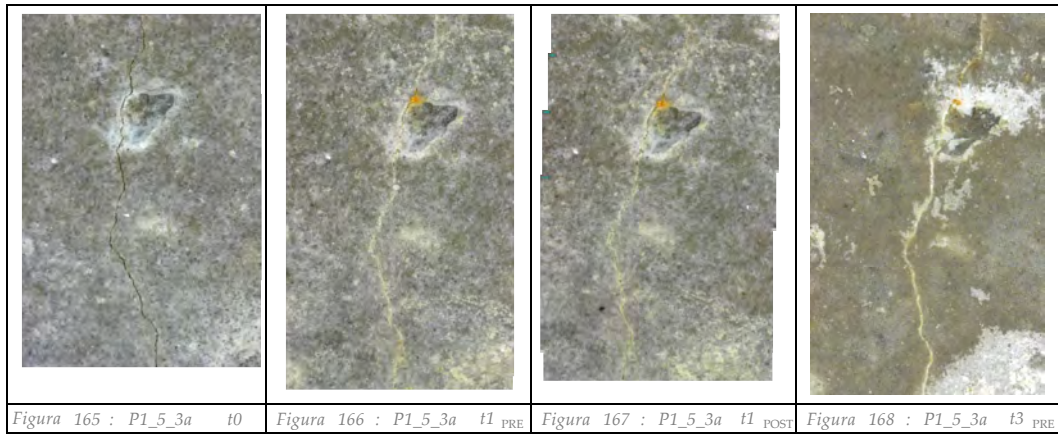
Punto di misura: d



Provino: P1_5

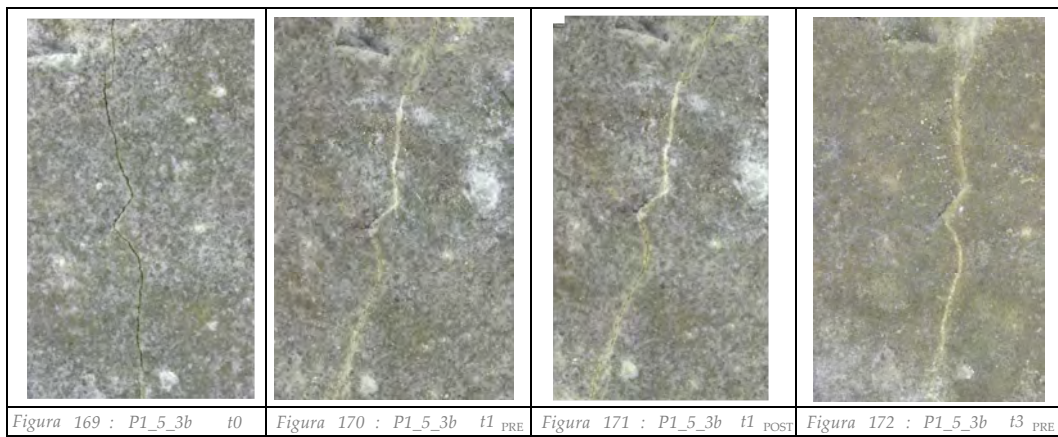
Fessura: 3

Punto di misura: a



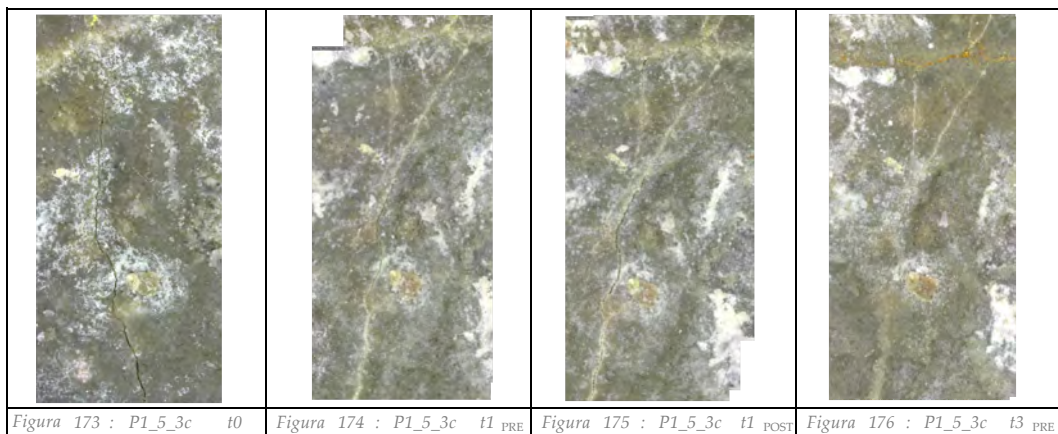
Fessura: 3

Punto di misura: b



Fessura: 3

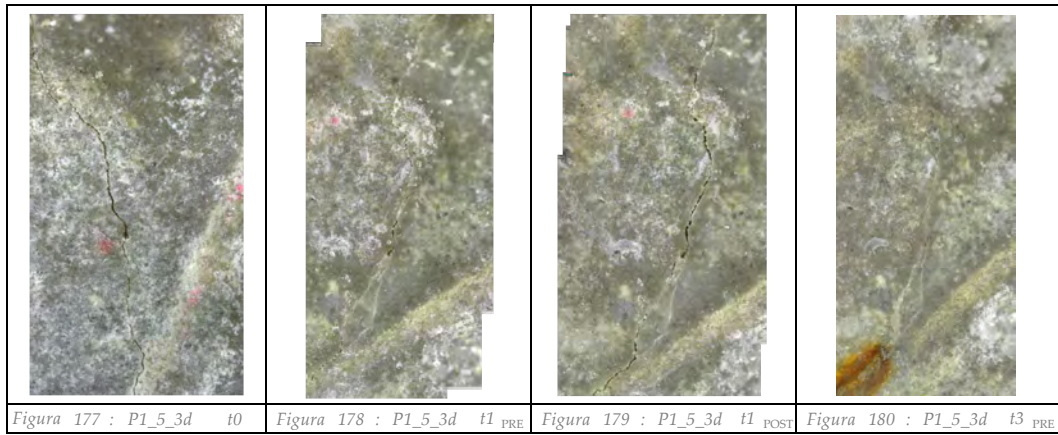
Punto di misura: c



Provino: P1_5

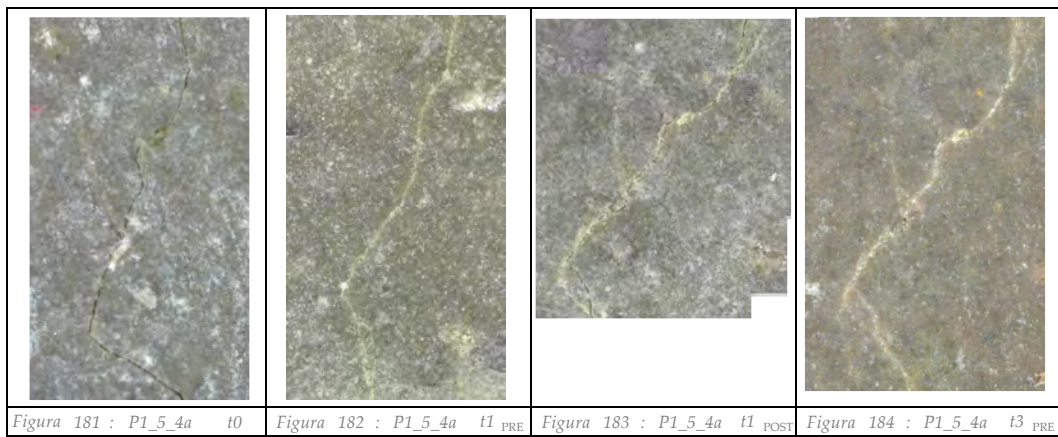
Fessura: 3

Punto di misura: d



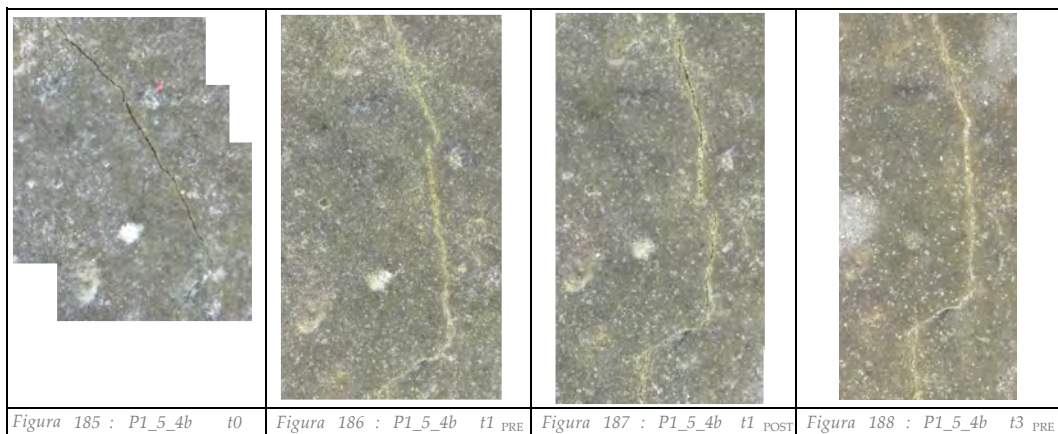
Fessura: 4

Punto di misura: a



Fessura: 4

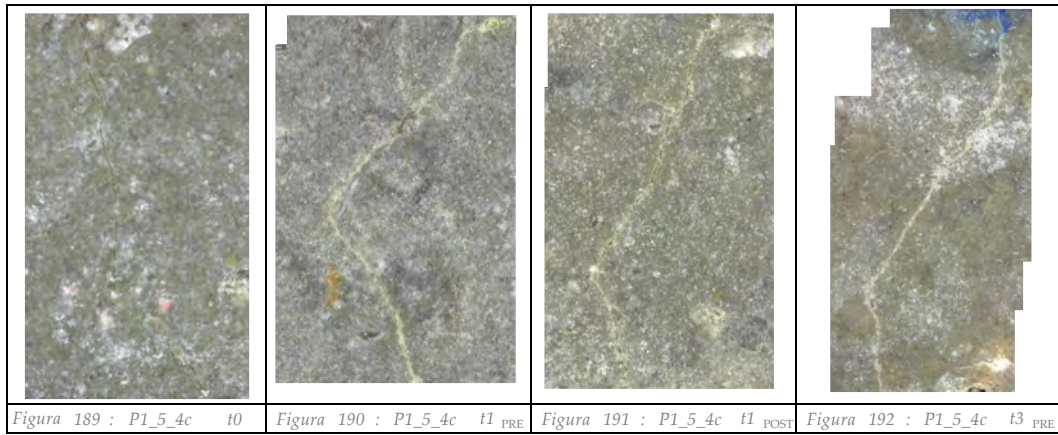
Punto di misura: b



Provino: P1_5

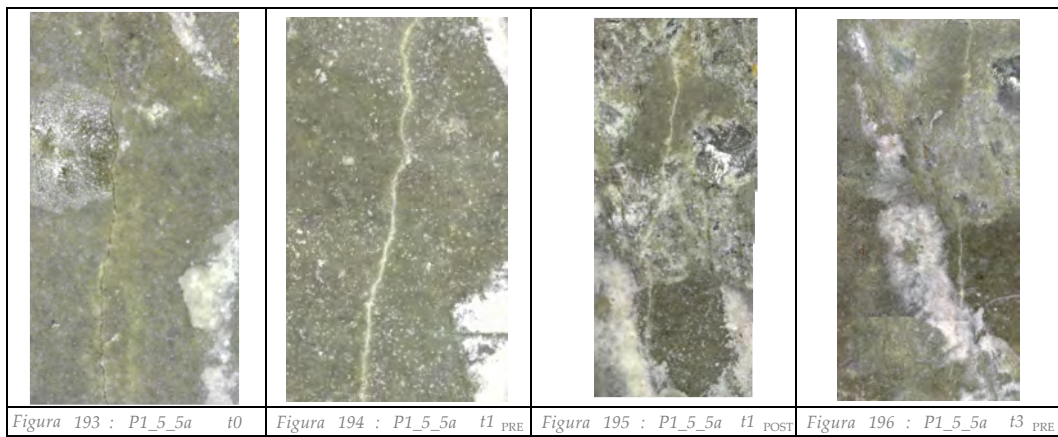
Fessura: 4

Punto di misura: c



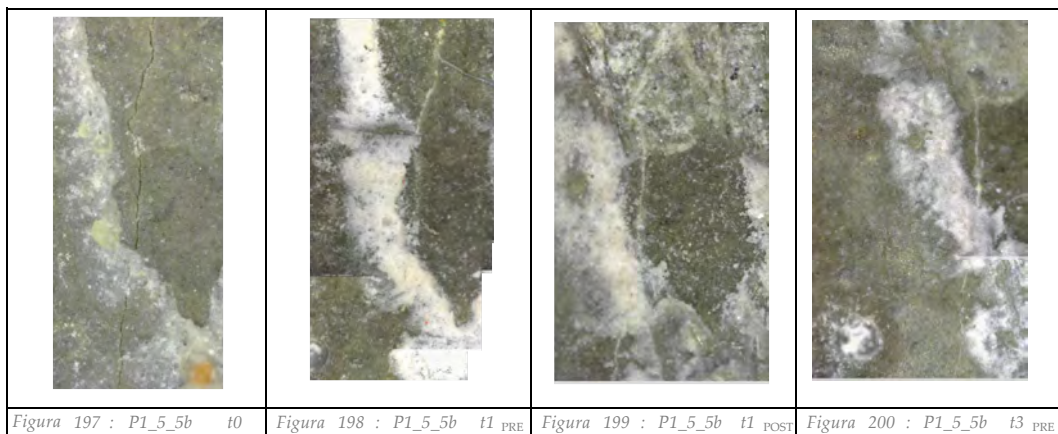
Fessura: 5

Punto di misura: a



Fessura: 5

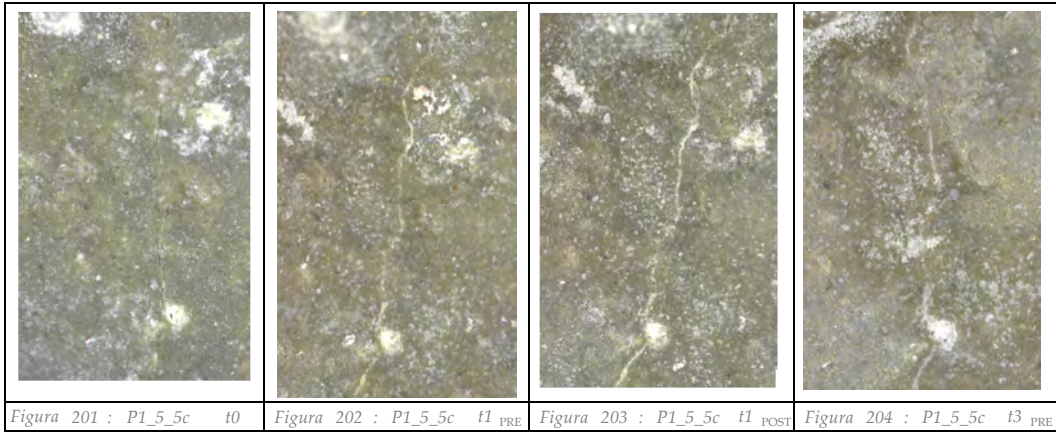
Punto di misura: b



Provino: P1_5

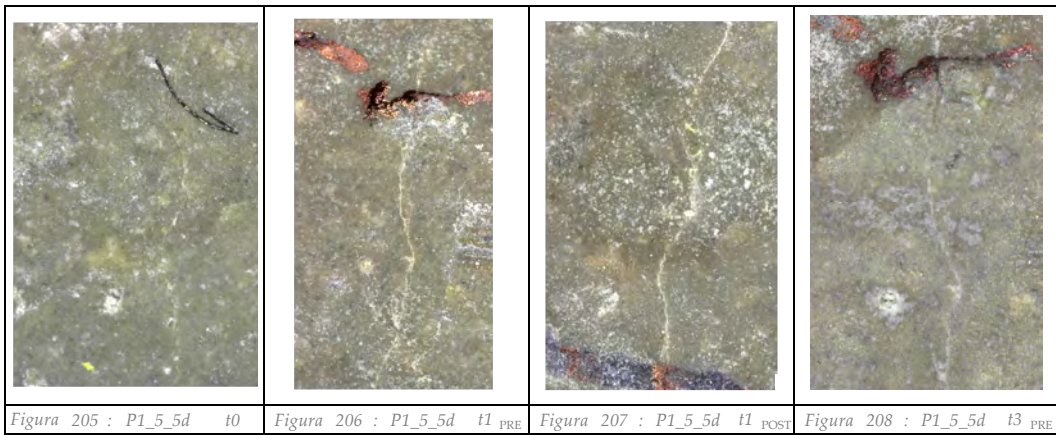
Fessura: 5

Punto di misura: c



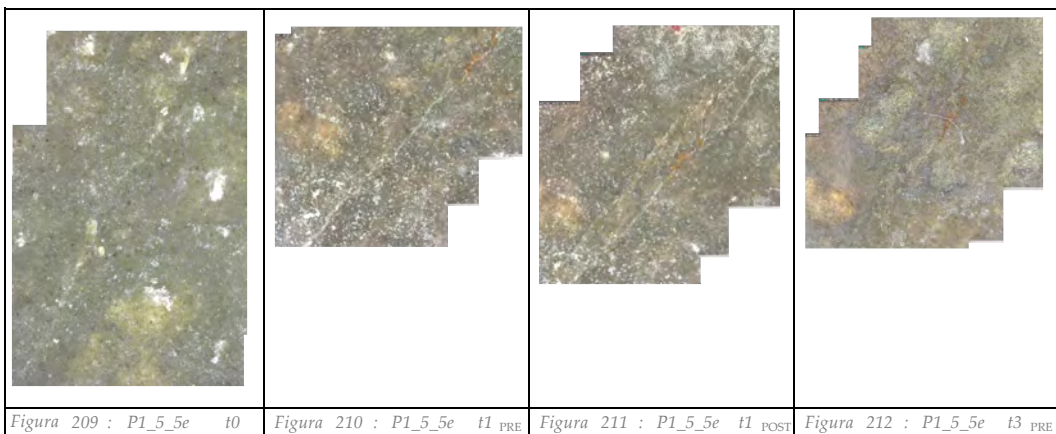
Fessura: 5

Punto di misura: d



Fessura: 5

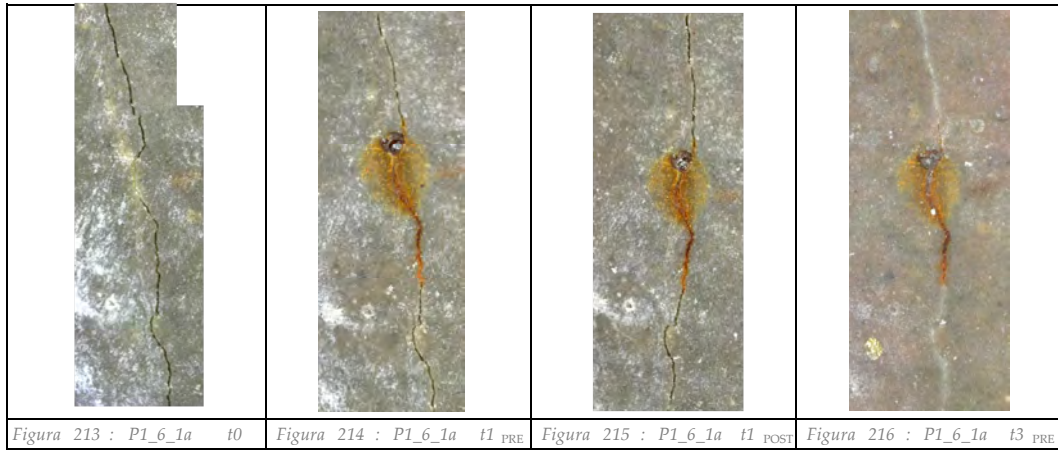
Punto di misura: e



Provino: P1_6

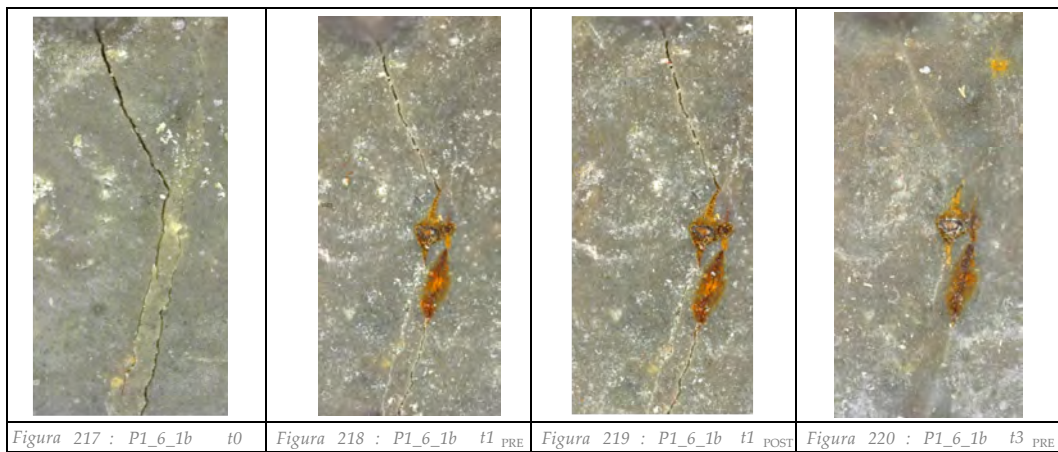
Fessura: 1

Punto di misura: a



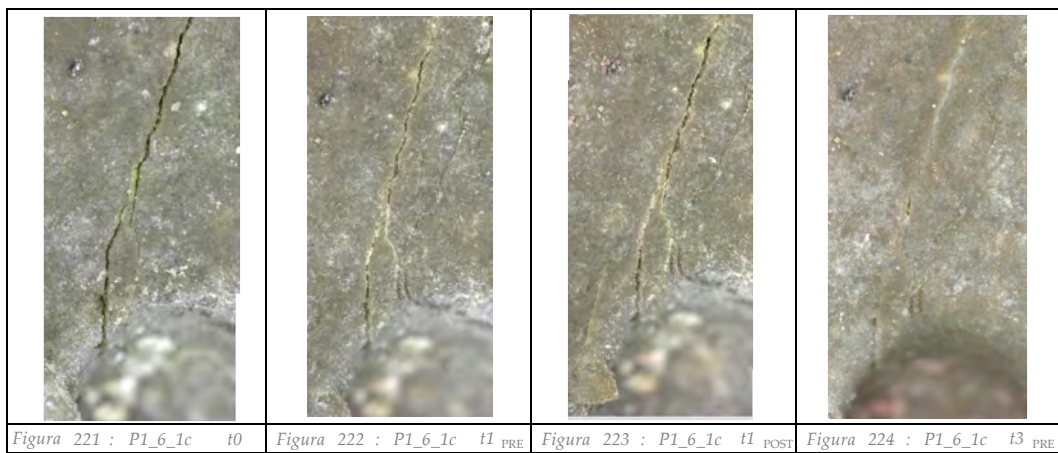
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

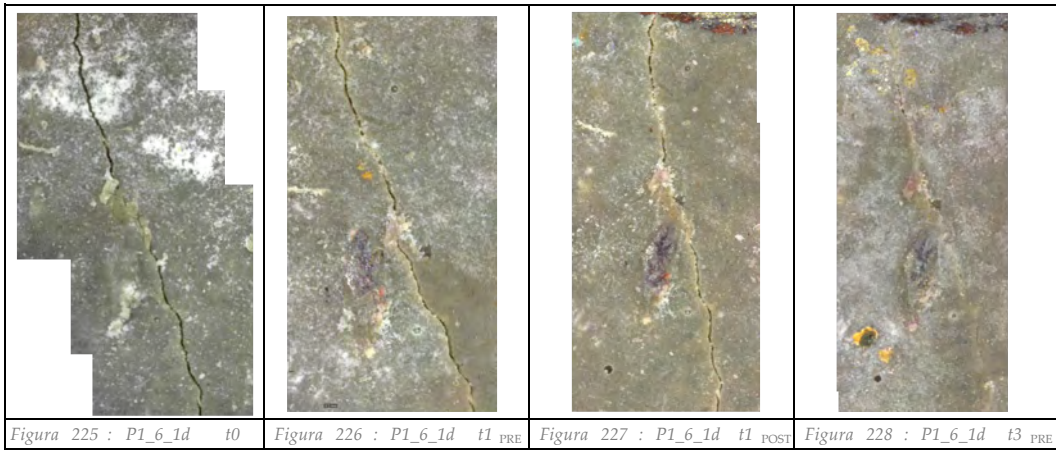
Punto di misura: c



Provino: P1_6

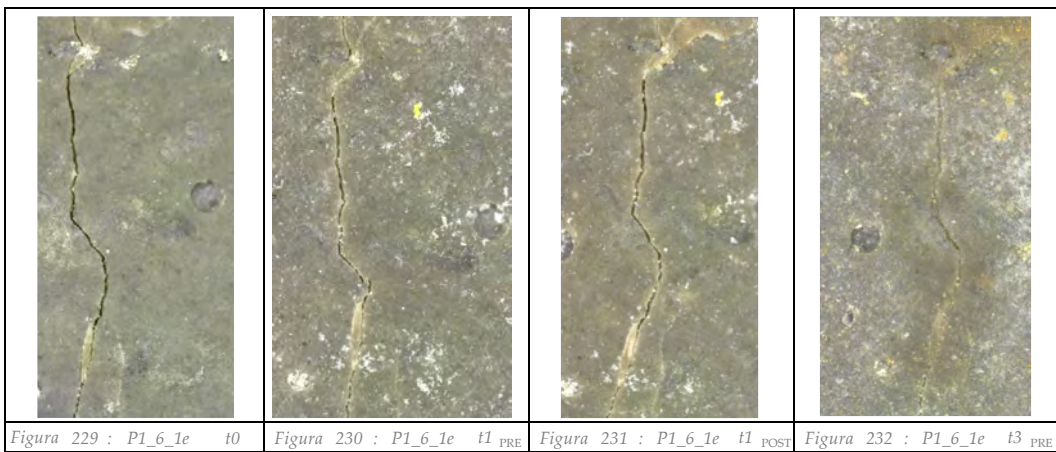
Fessura: 1

Punto di misura: d



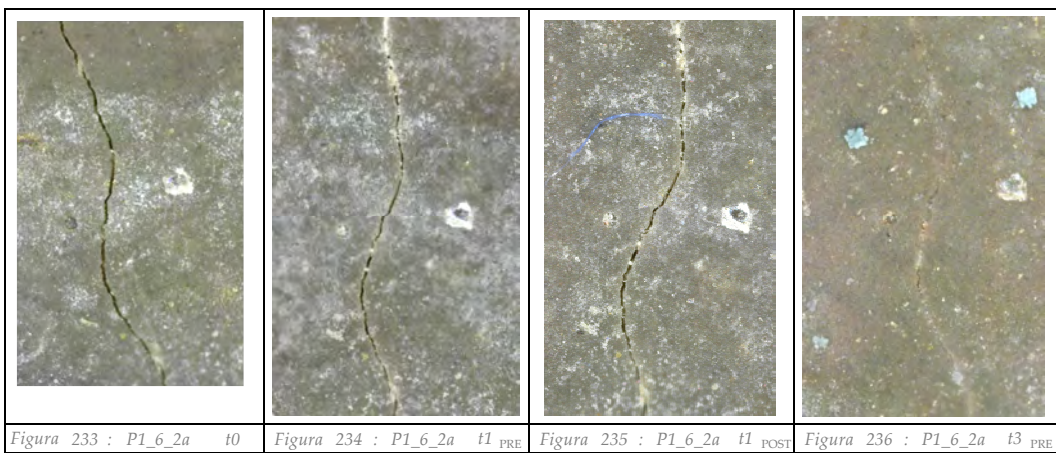
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

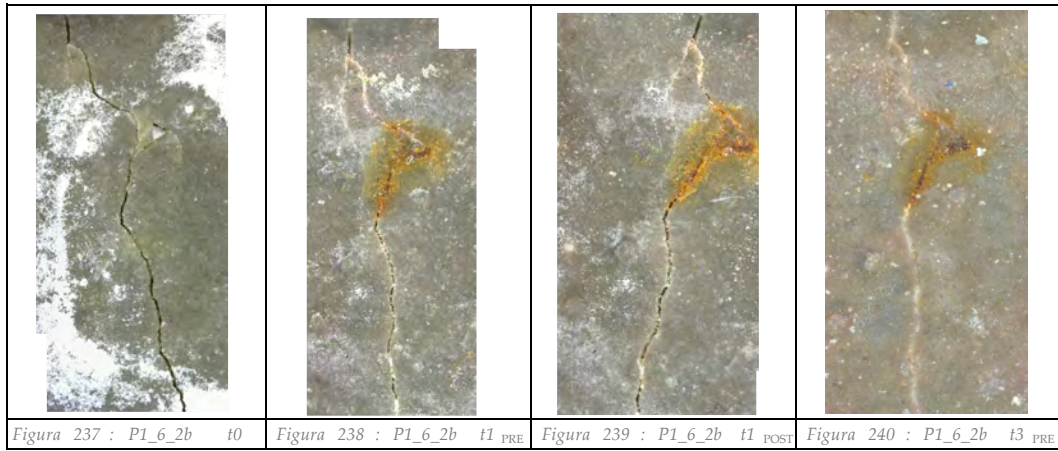
Punto di misura: a



Provino: P1_6

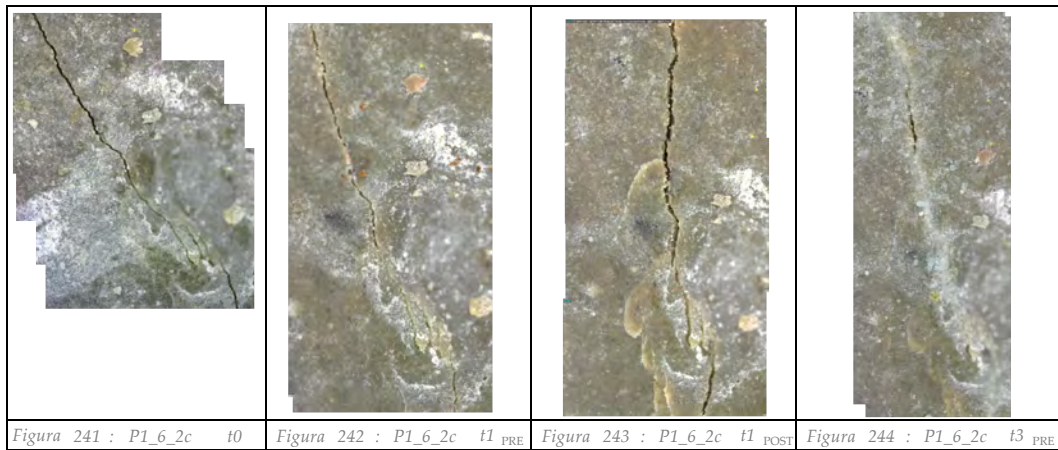
Fessura: 2

Punto di misura: b



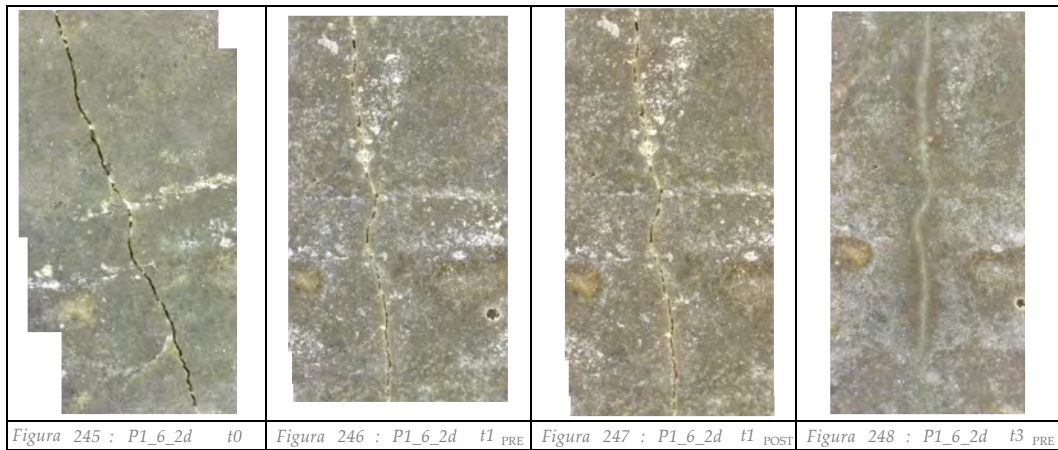
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

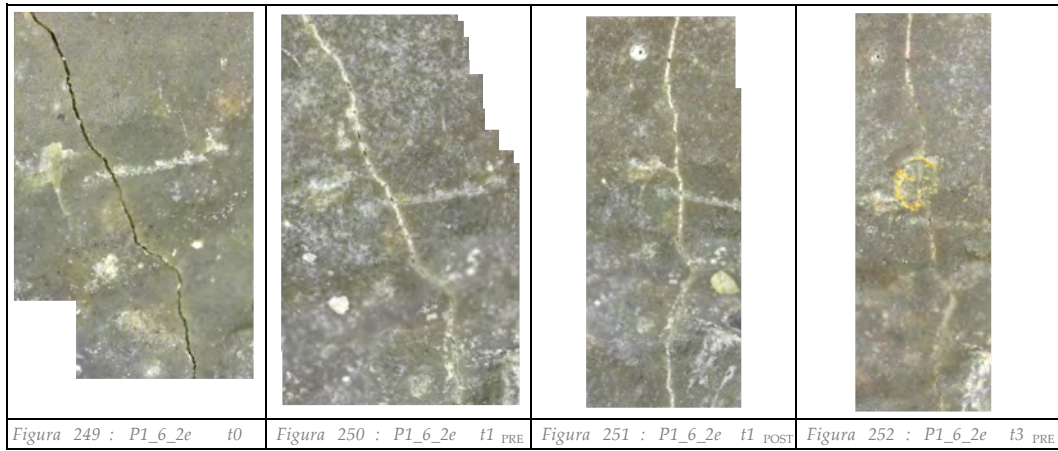
Punto di misura: d



Provino: P1_6

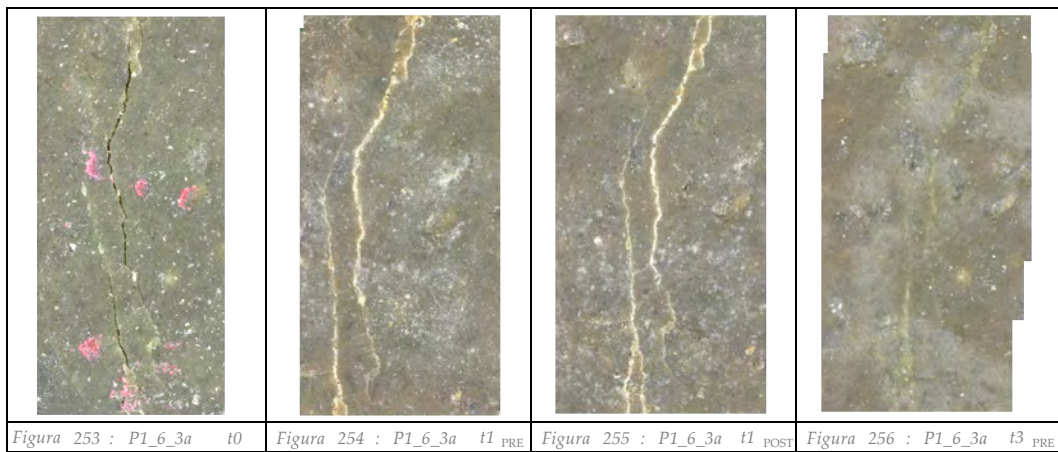
Fessura: 2

Punto di misura: e



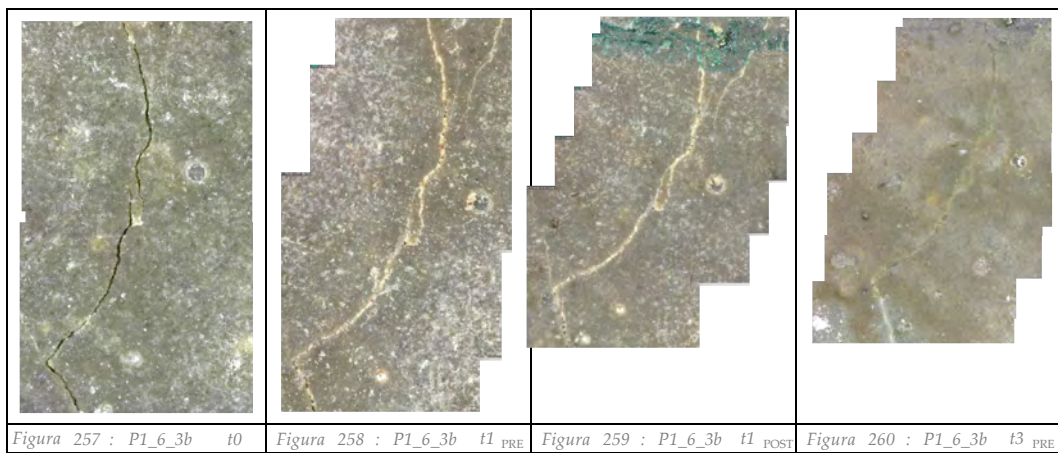
Fessura: 3

Punto di misura: a



Fessura: 3

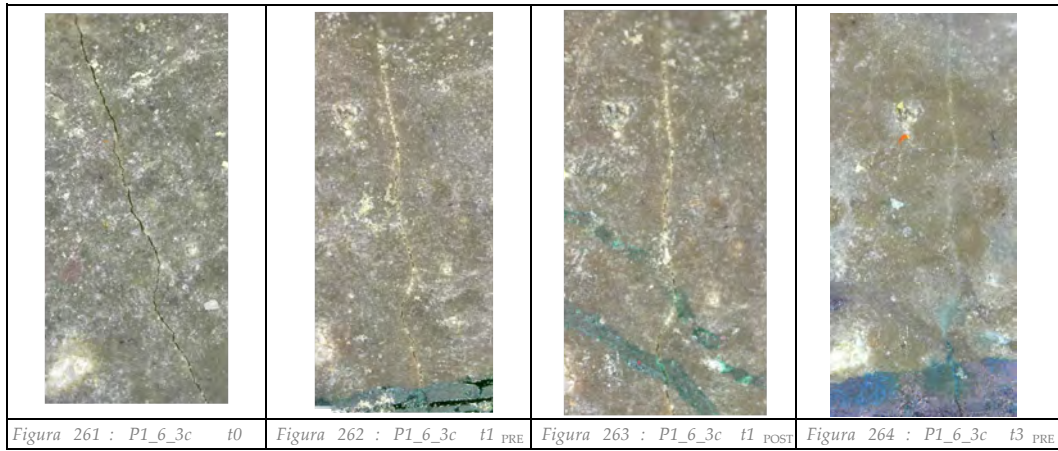
Punto di misura: b



Provino: P1_6

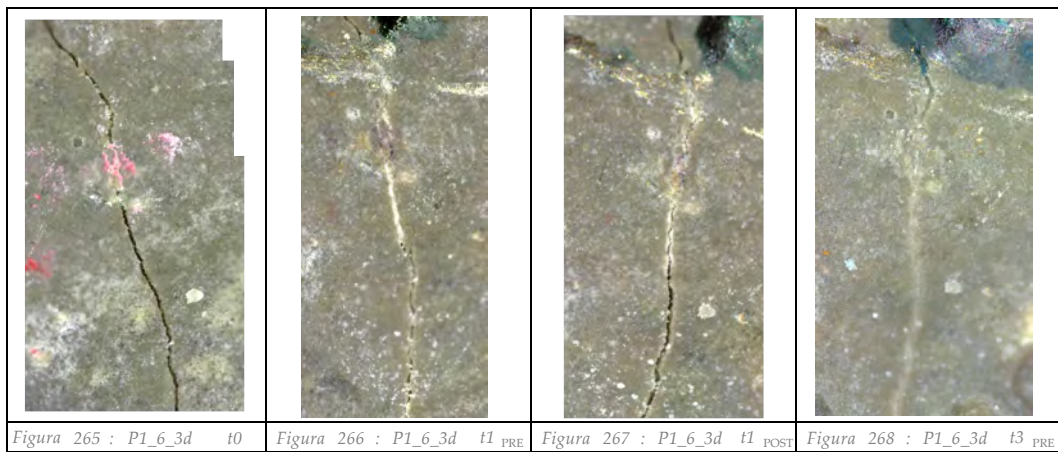
Fessura: 3

Punto di misura: c



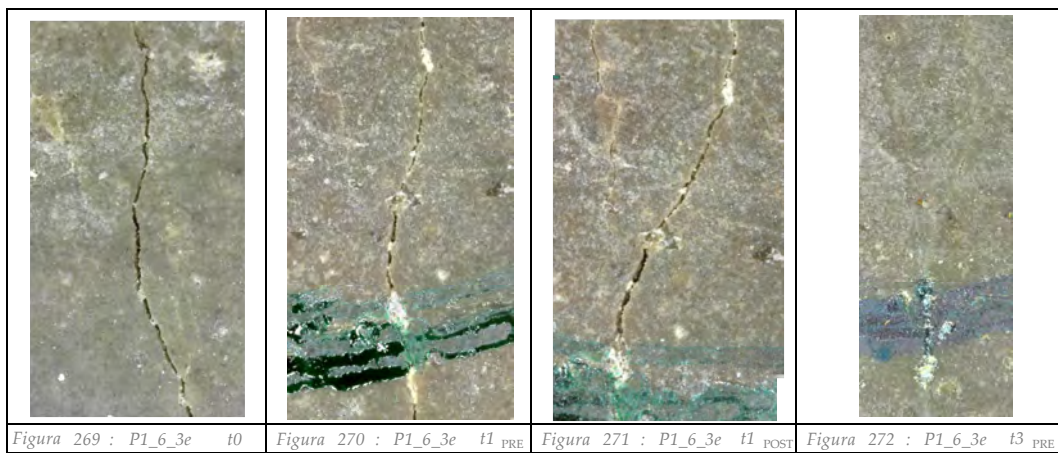
Fessura: 3

Punto di misura: d



Fessura: 3

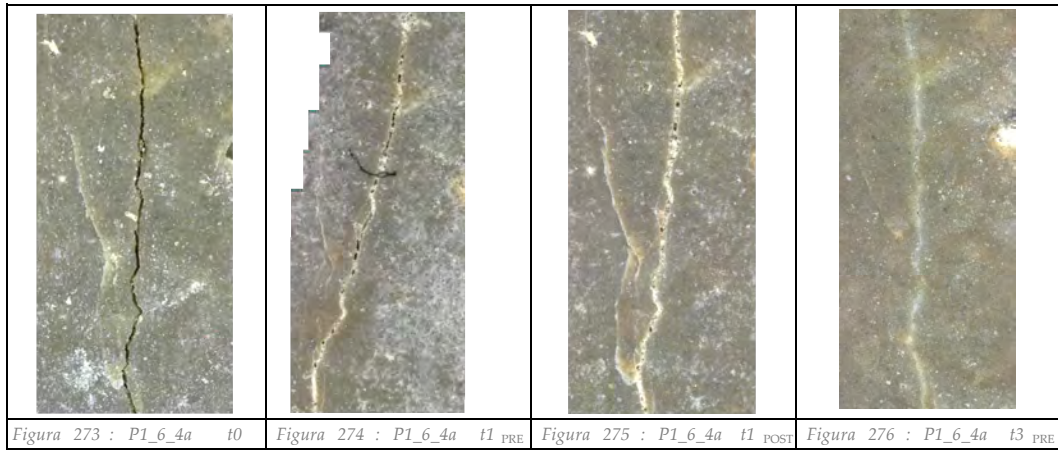
Punto di misura: e



Provino: P1_6

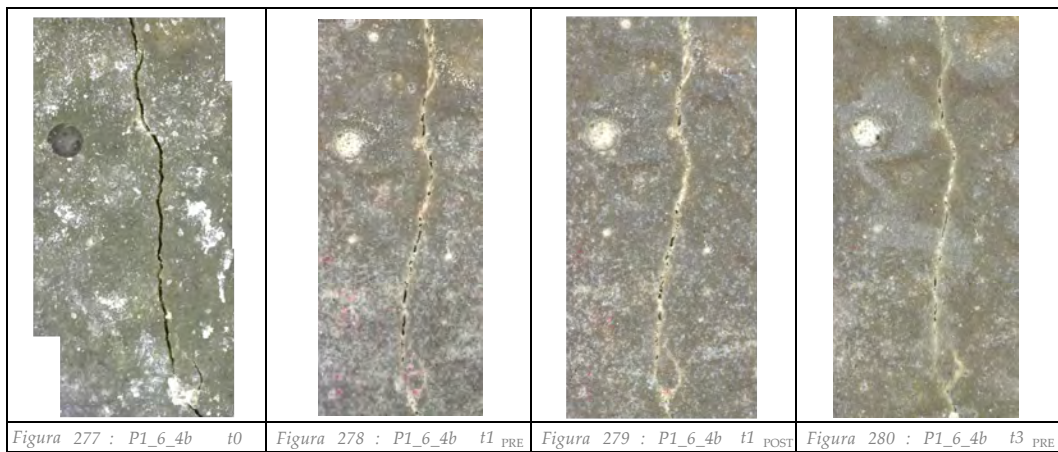
Fessura: 4

Punto di misura: a



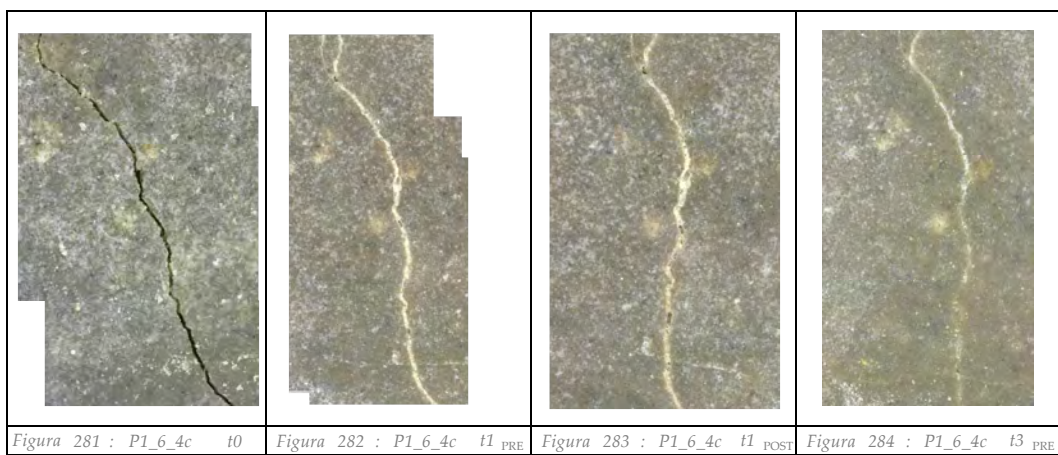
Fessura: 4

Punto di misura: b



Fessura: 4

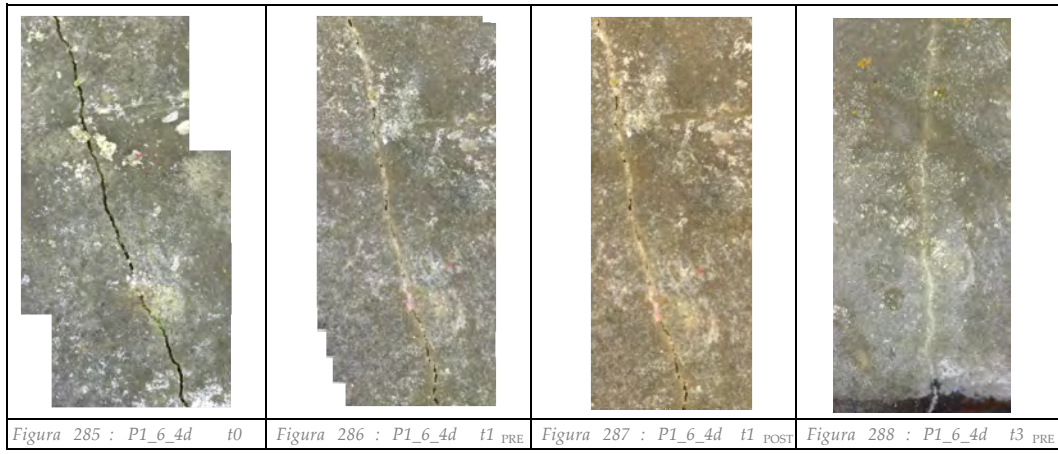
Punto di misura: c



Provino: P1_6

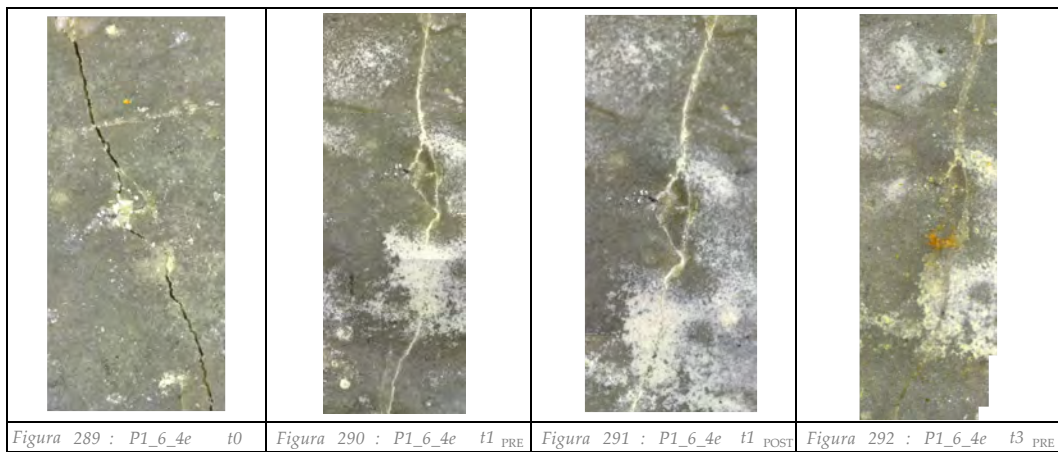
Fessura: 4

Punto di misura: d



Fessura: 4

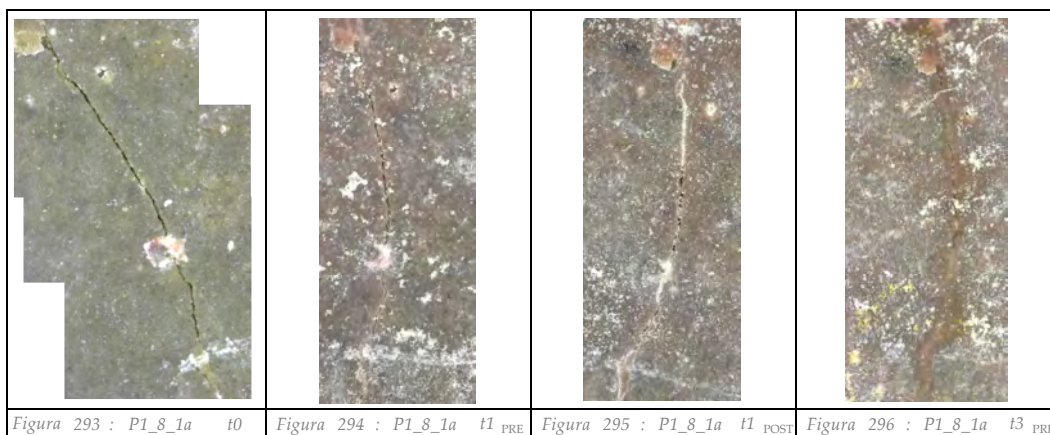
Punto di misura: e



Provino: P1_8

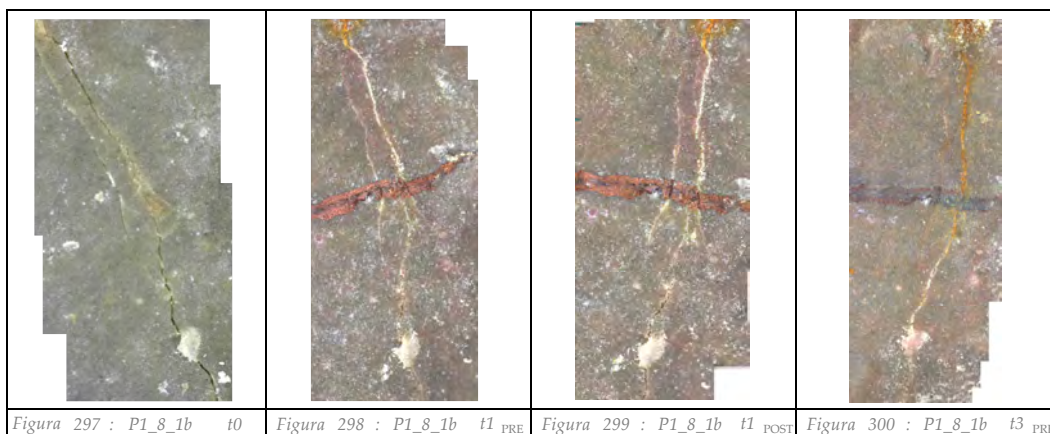
Fessura: 1

Punto di misura: a



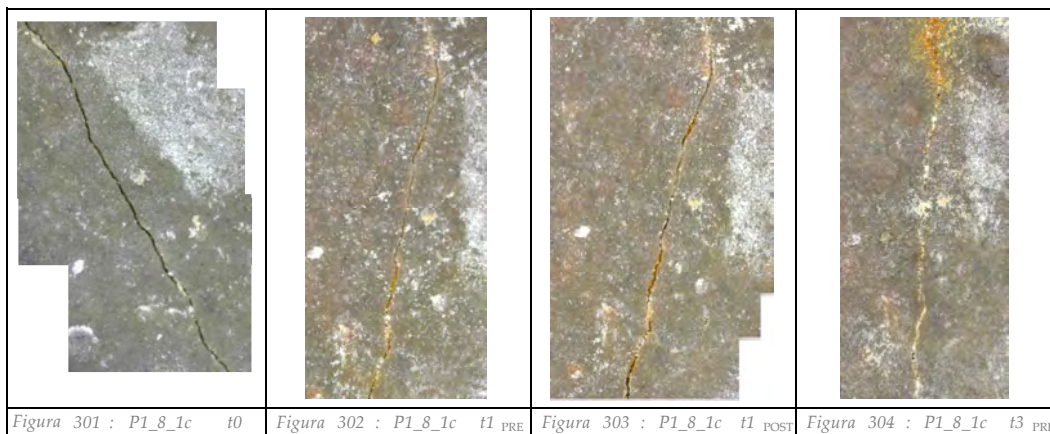
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

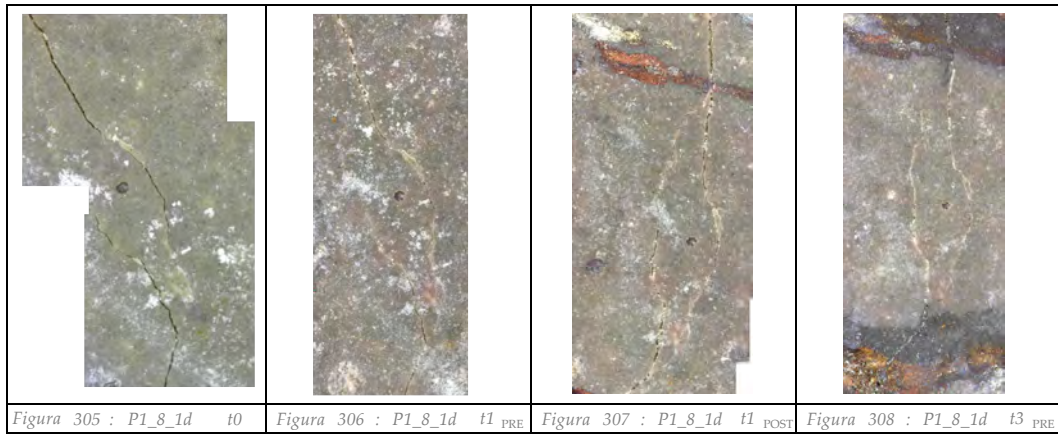
Punto di misura: c



Provino: P1_8

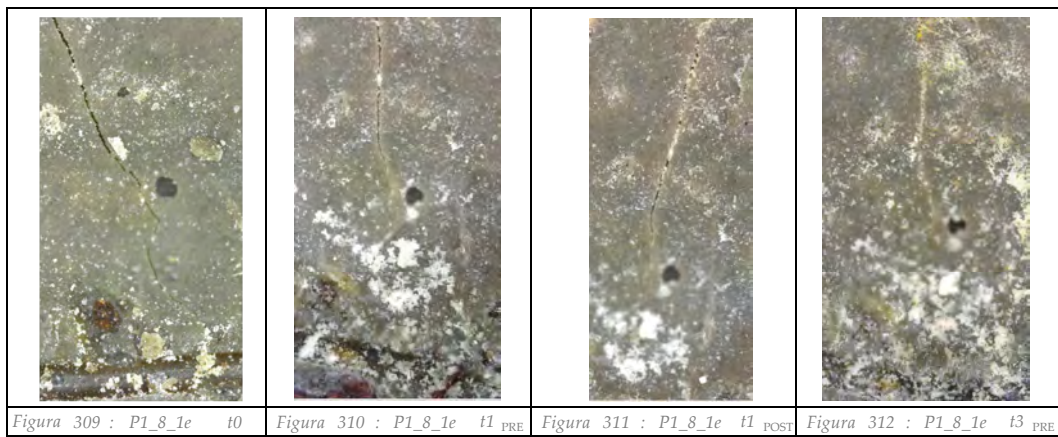
Fessura: 1

Punto di misura: d



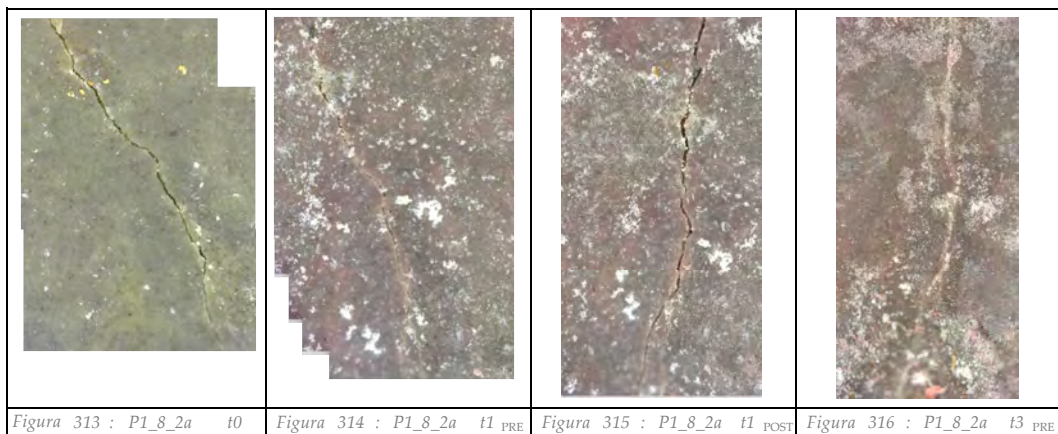
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

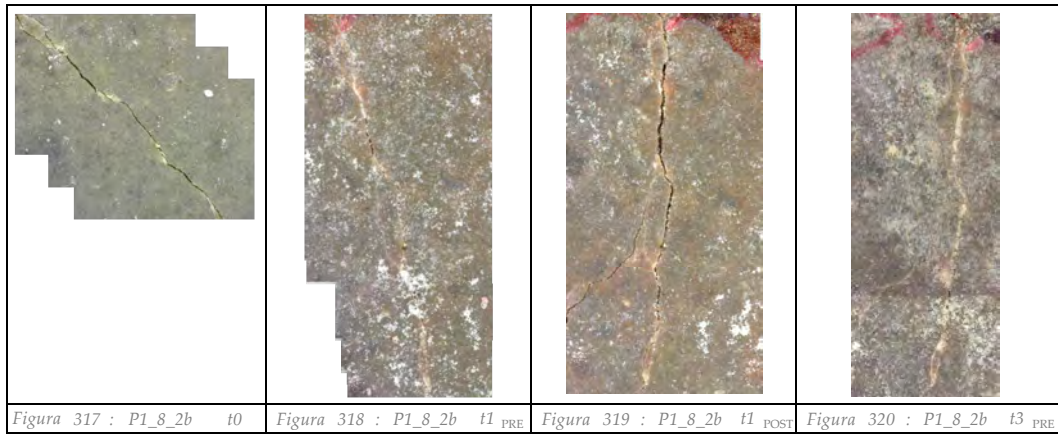
Punto di misura: a



Provino: P1_8

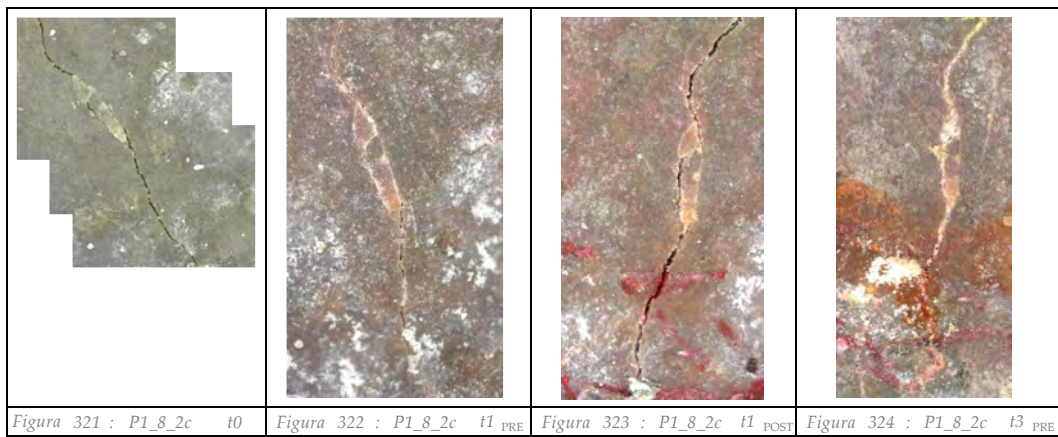
Fessura: 2

Punto di misura: b



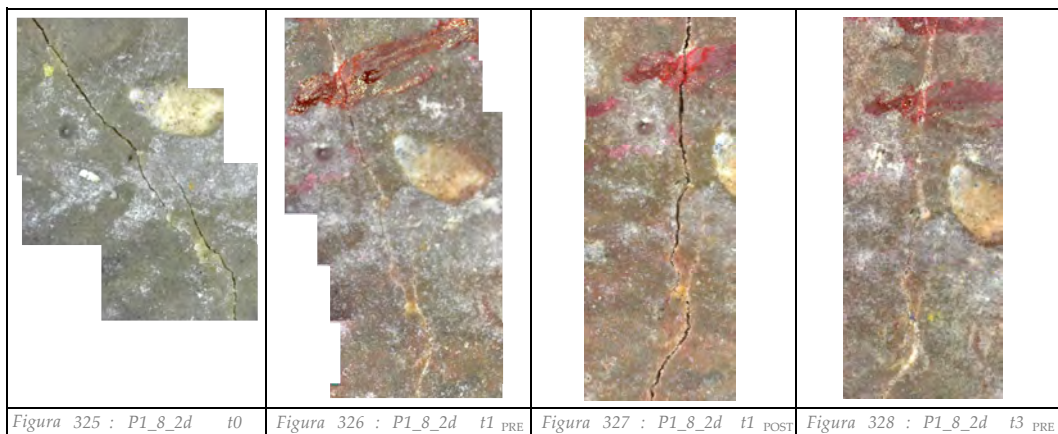
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

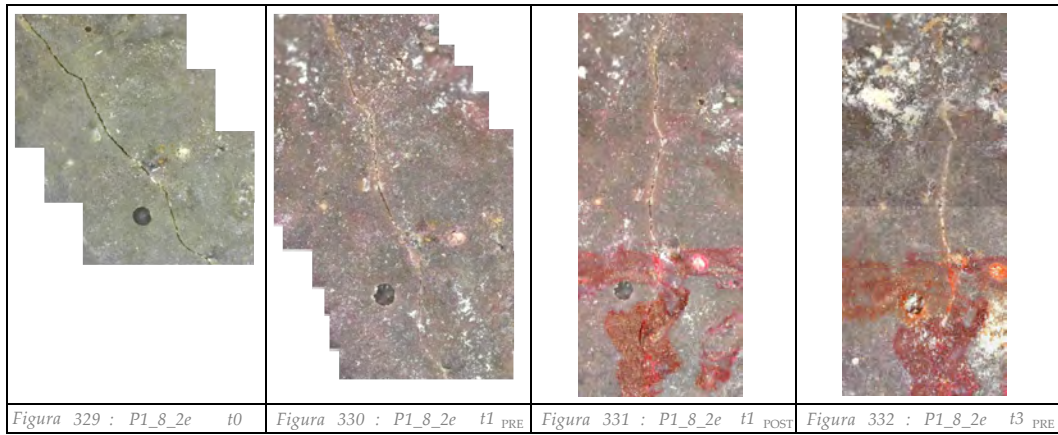
Punto di misura: d



Provino: P1_8

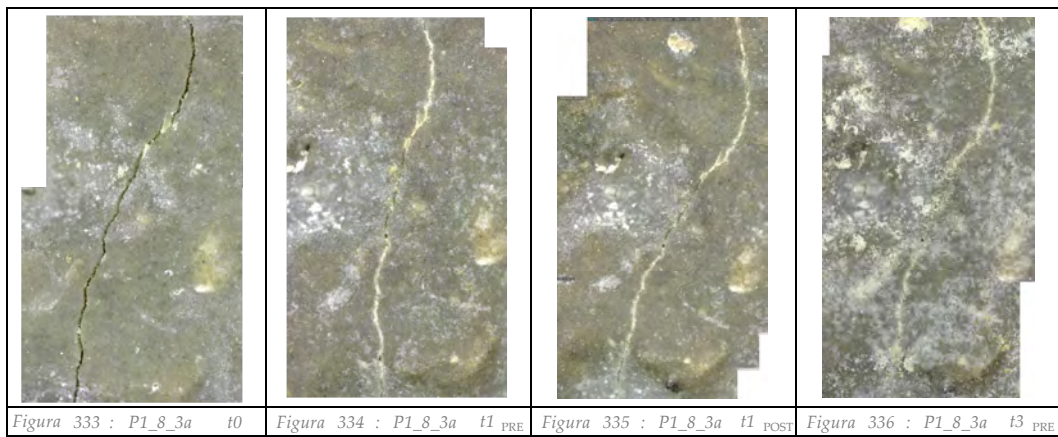
Fessura: 2

Punto di misura: e



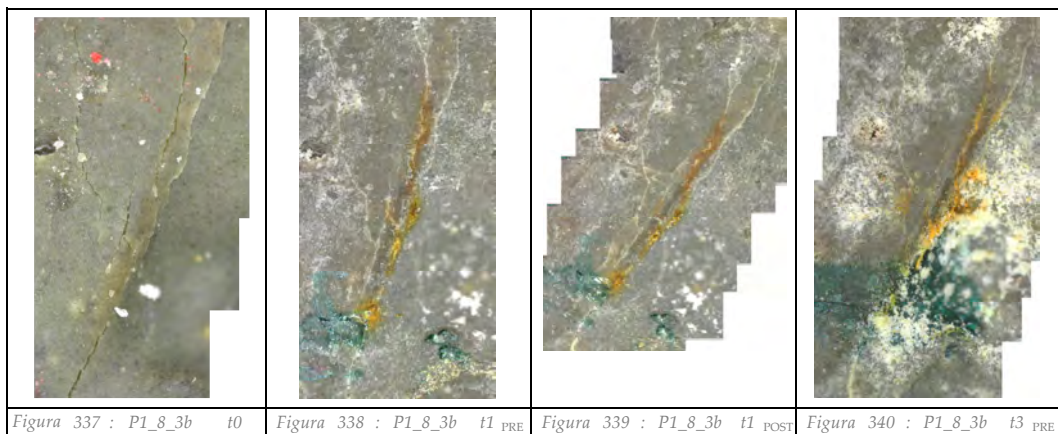
Fessura: 3

Punto di misura: a



Fessura: 3

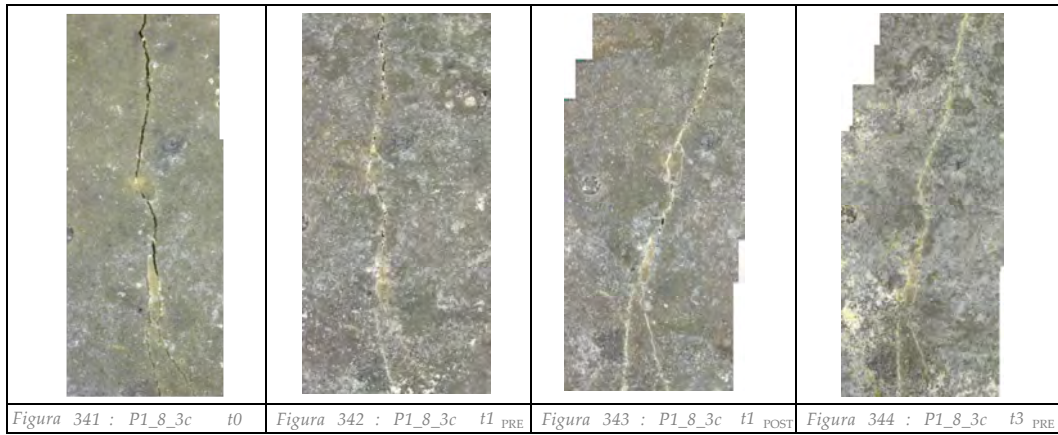
Punto di misura: b



Provino: P1_8

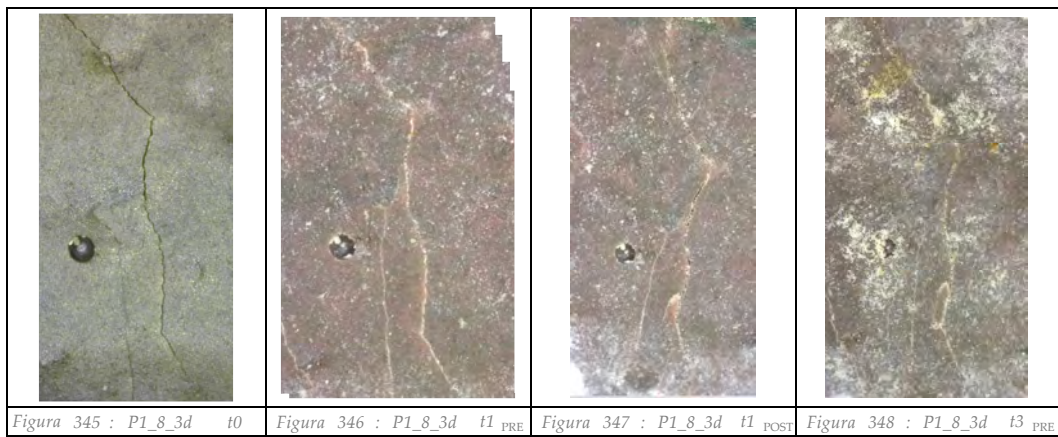
Fessura: 3

Punto di misura: c



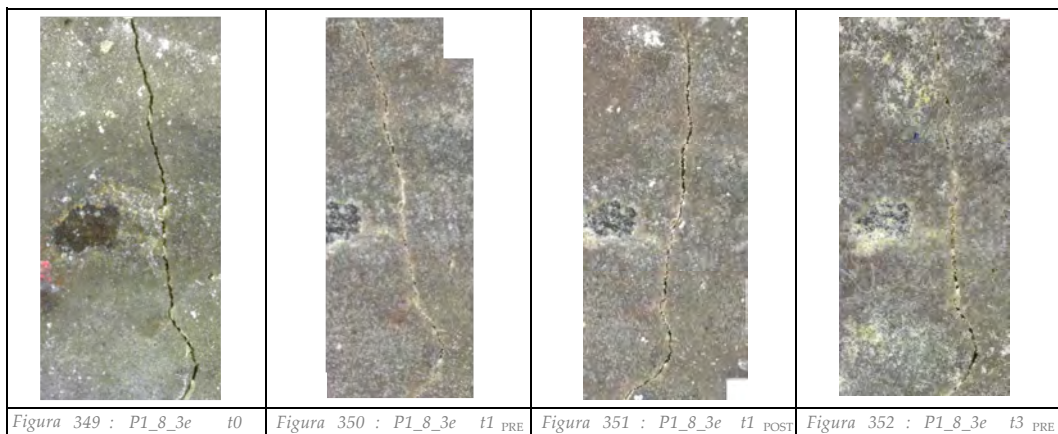
Fessura: 3

Punto di misura: d



Fessura: 3

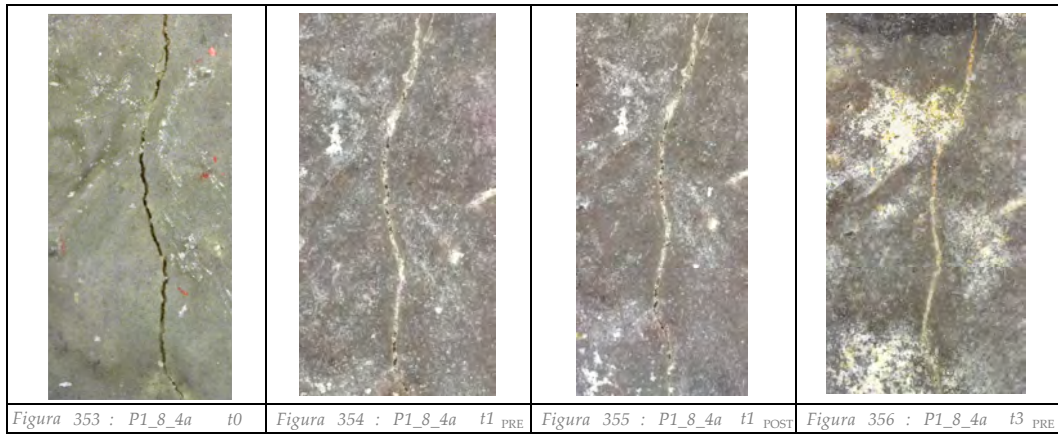
Punto di misura: e



Provino: P1_8

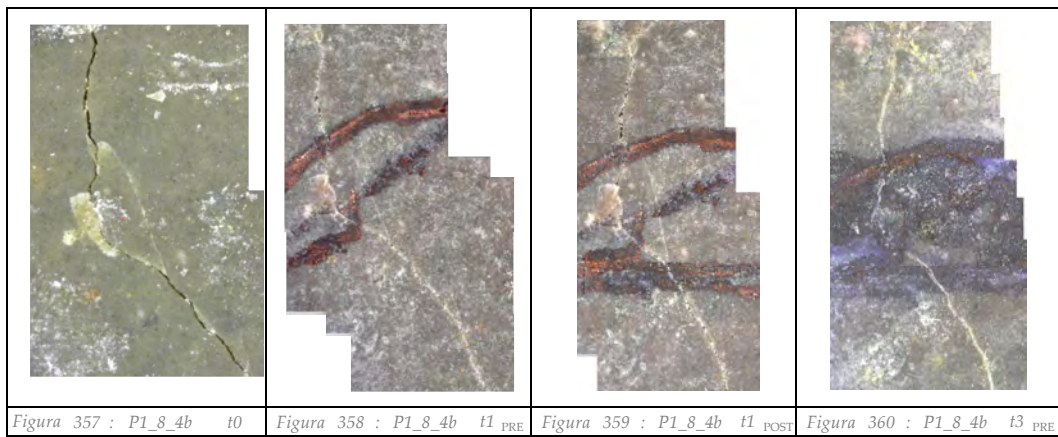
Fessura: 4

Punto di misura: a



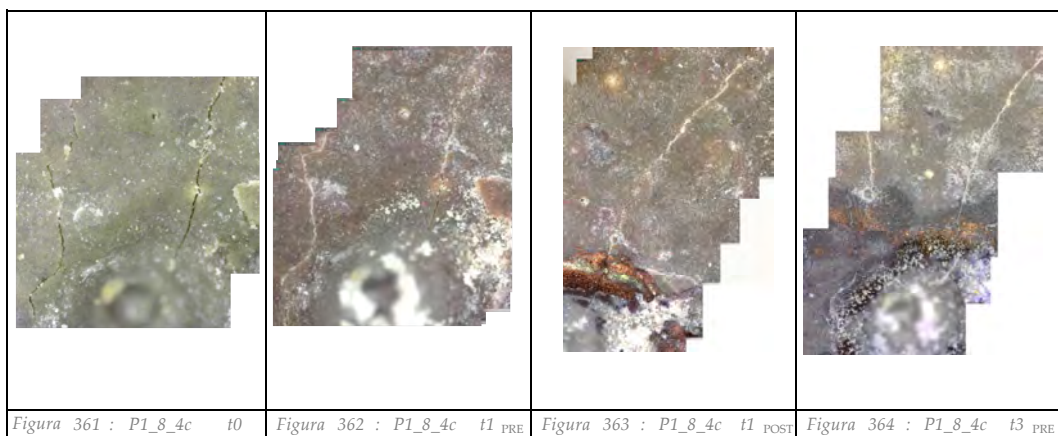
Fessura: 4

Punto di misura: b



Fessura: 4

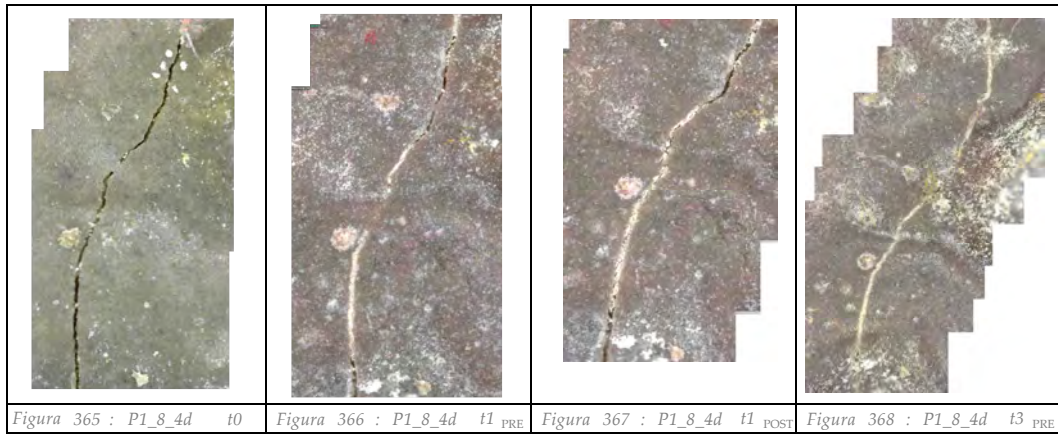
Punto di misura: c



Provino: P1_8

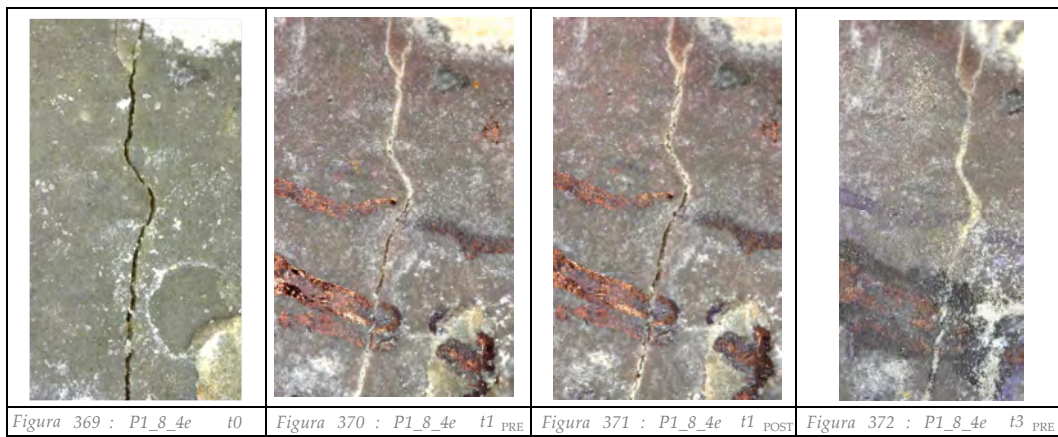
Fessura: 4

Punto di misura: d



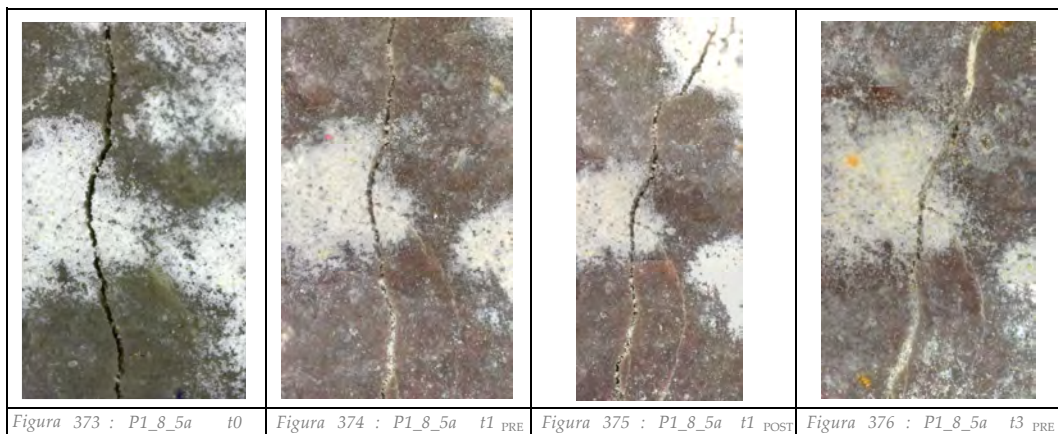
Fessura: 4

Punto di misura: e



Fessura: 5

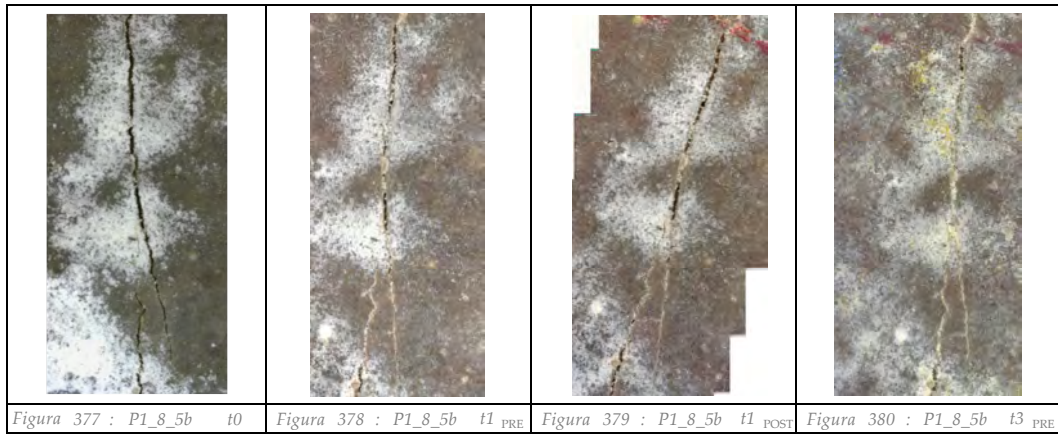
Punto di misura: a



Provino: P1_8

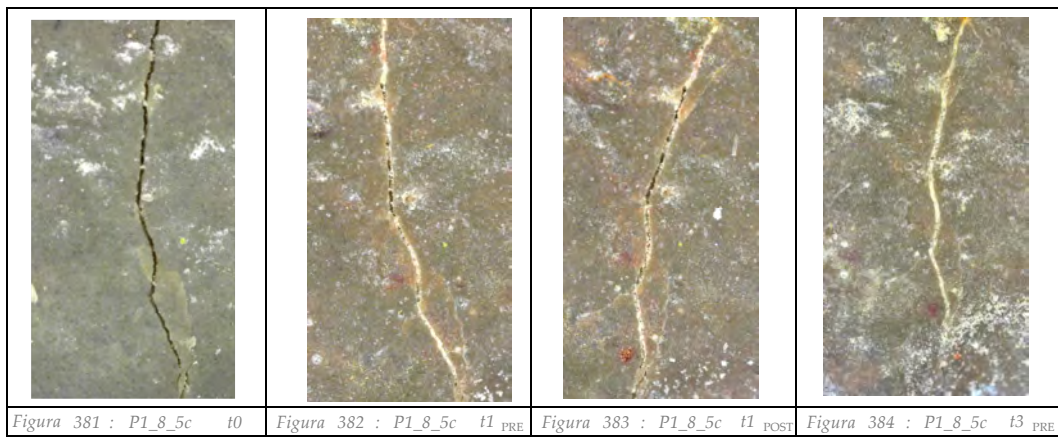
Fessura: 5

Punto di misura: b



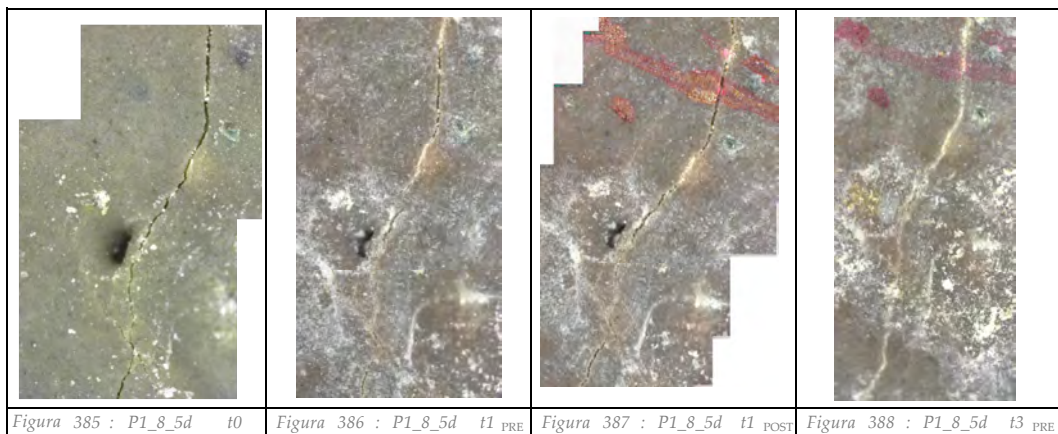
Fessura: P1_8

Punto di misura: c



Fessura: 5

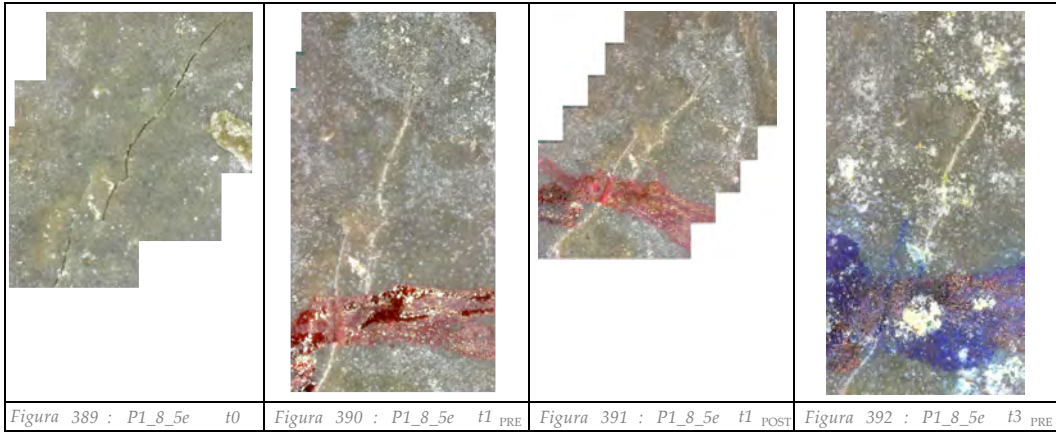
Punto di misura: d



Provino: P1_8

Fessura: 5

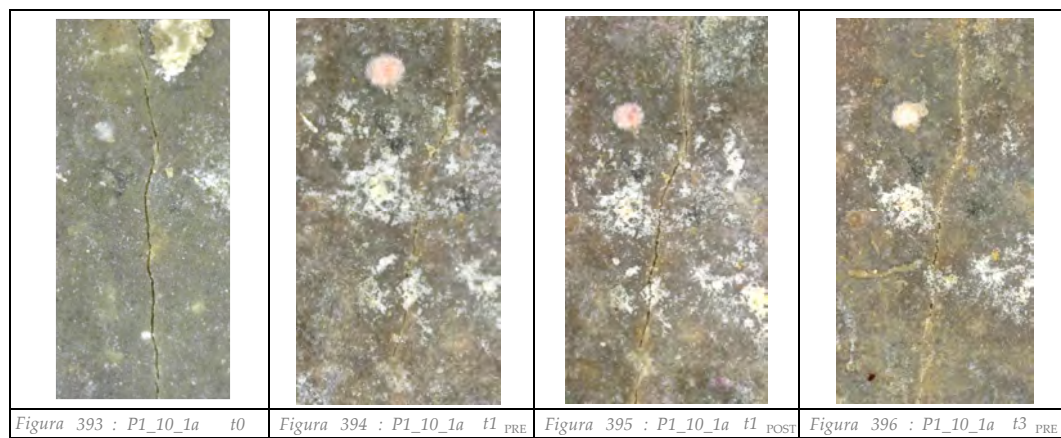
Punto di misura: e



Provino: P1_10

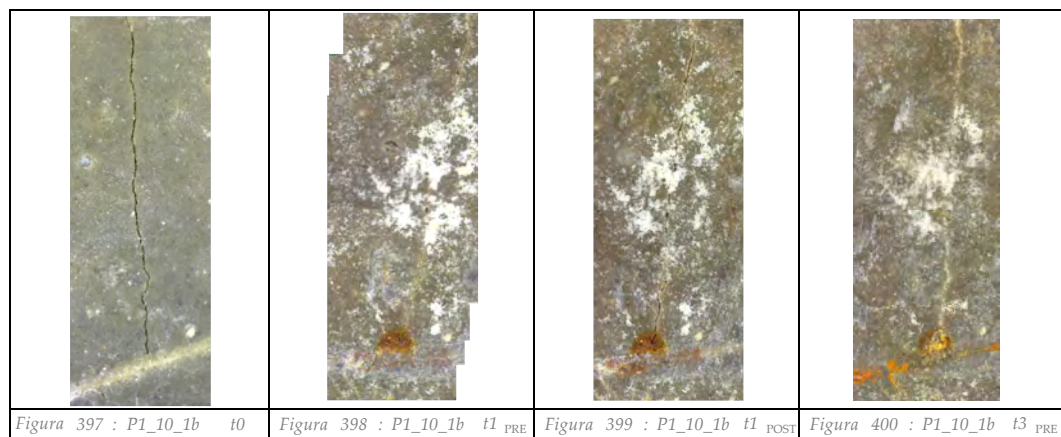
Fessura: 1

Punto di misura: a



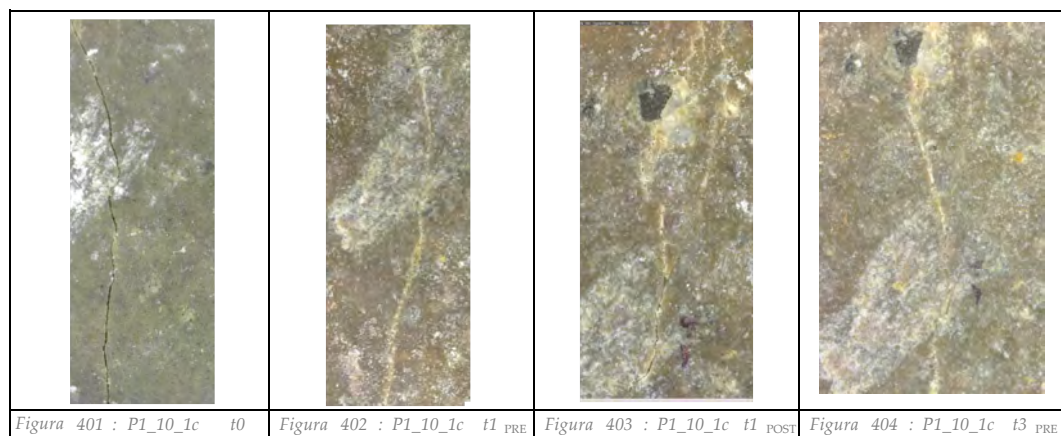
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

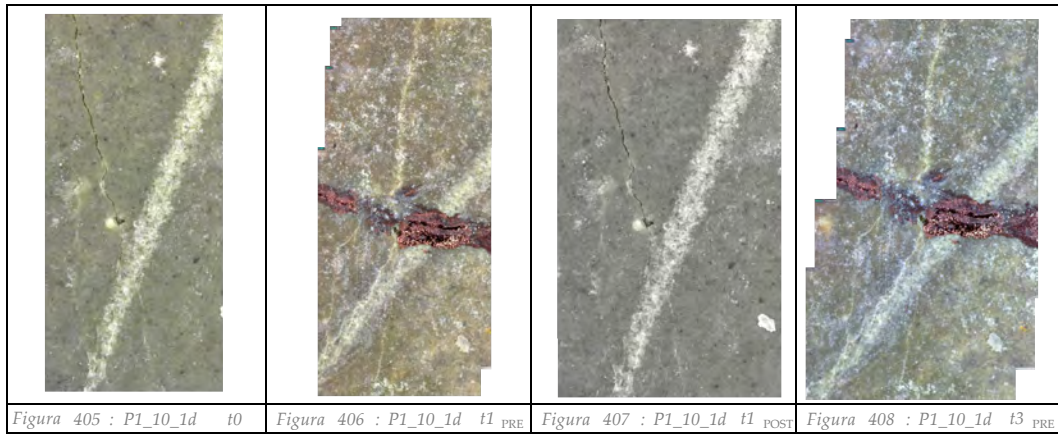
Punto di misura: c



Provino: P1_10

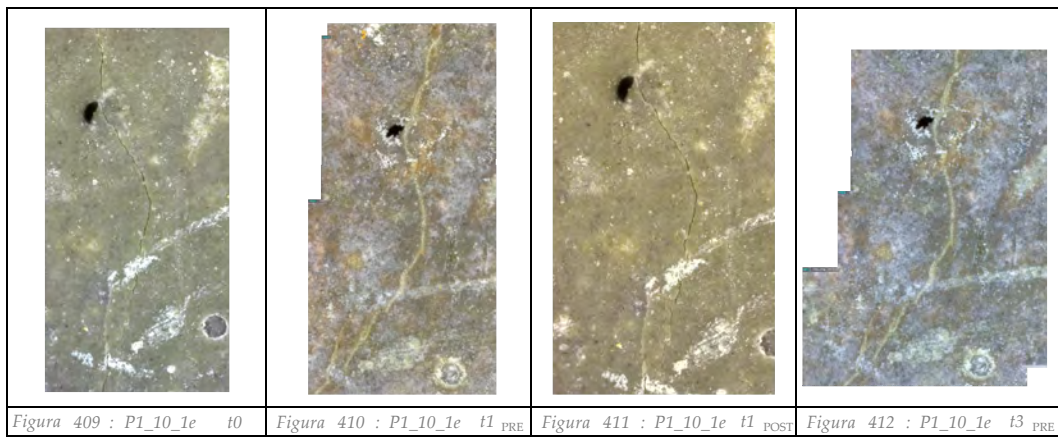
Fessura: 1

Punto di misura: d



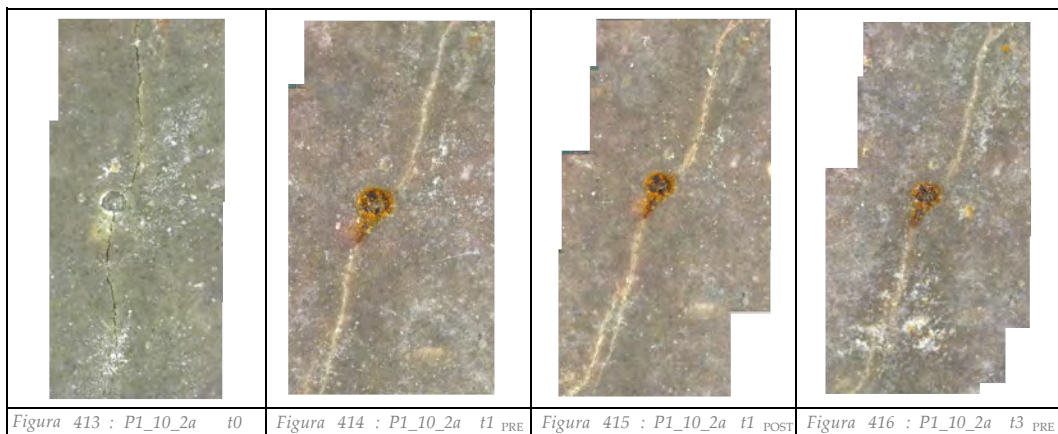
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

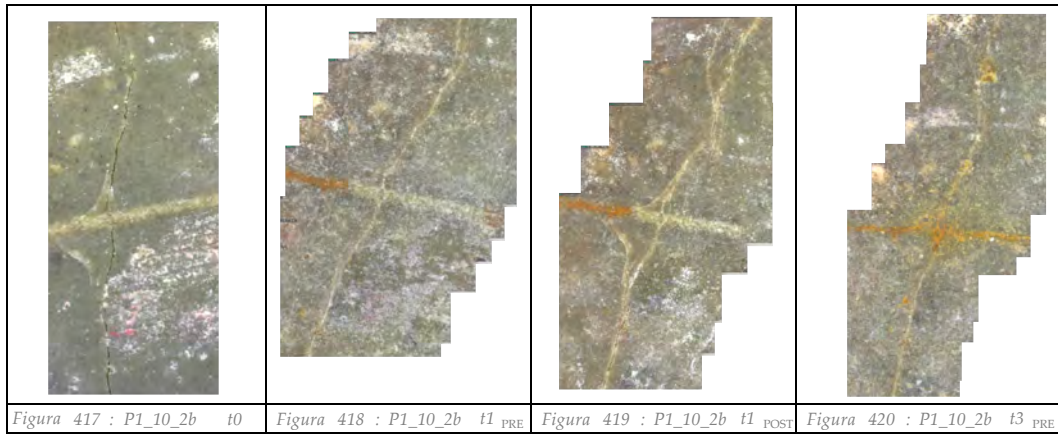
Punto di misura: a



Provino: P1_10

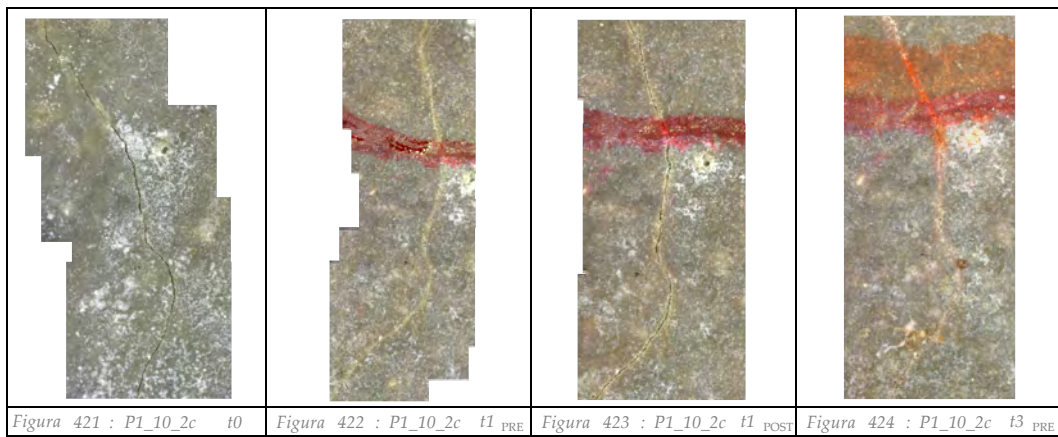
Fessura: 2

Punto di misura: b



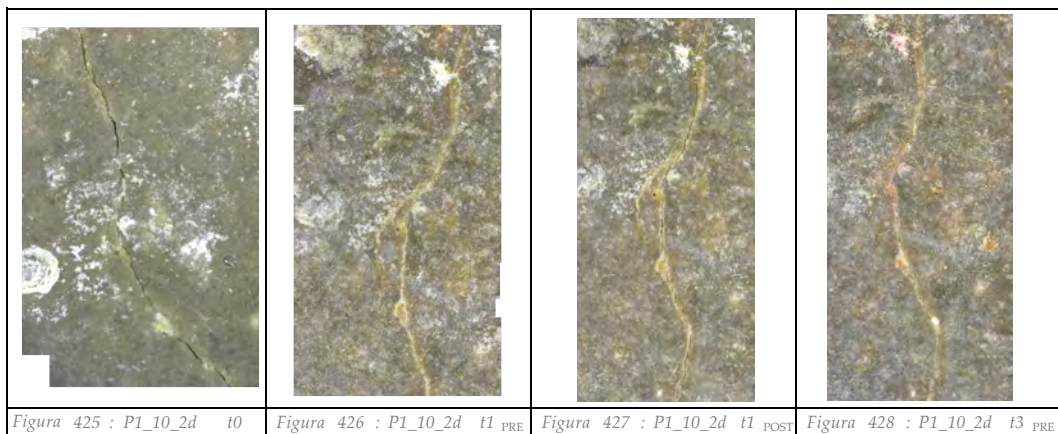
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

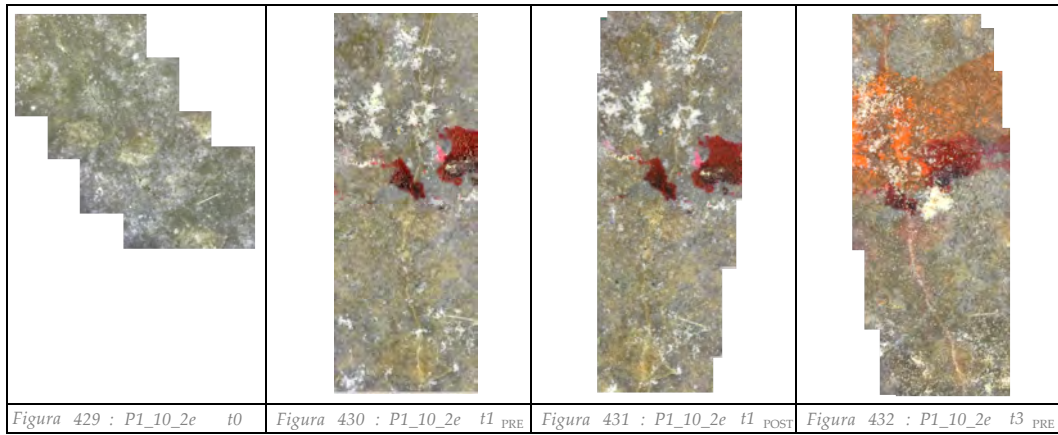
Punto di misura: d



Provino: P1_10

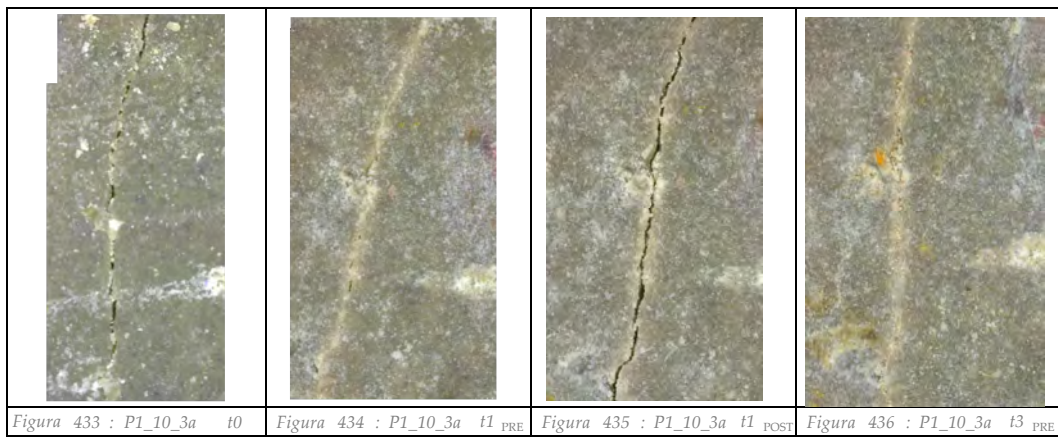
Fessura: 2

Punto di misura: e



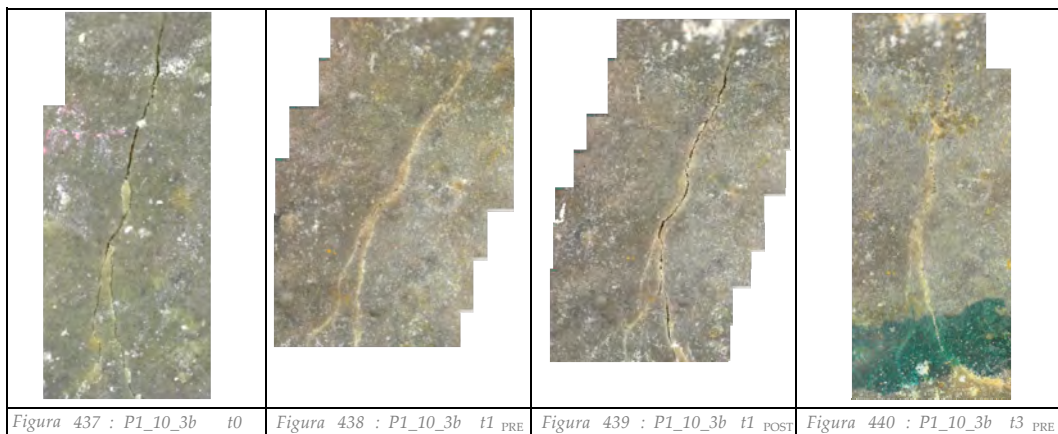
Fessura: 3

Punto di misura: a



Fessura: 3

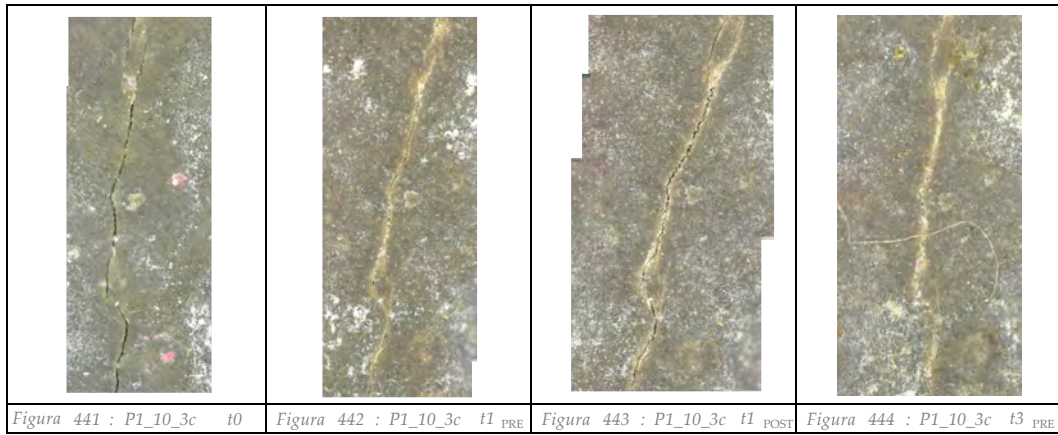
Punto di misura: b



Provino: P1_10

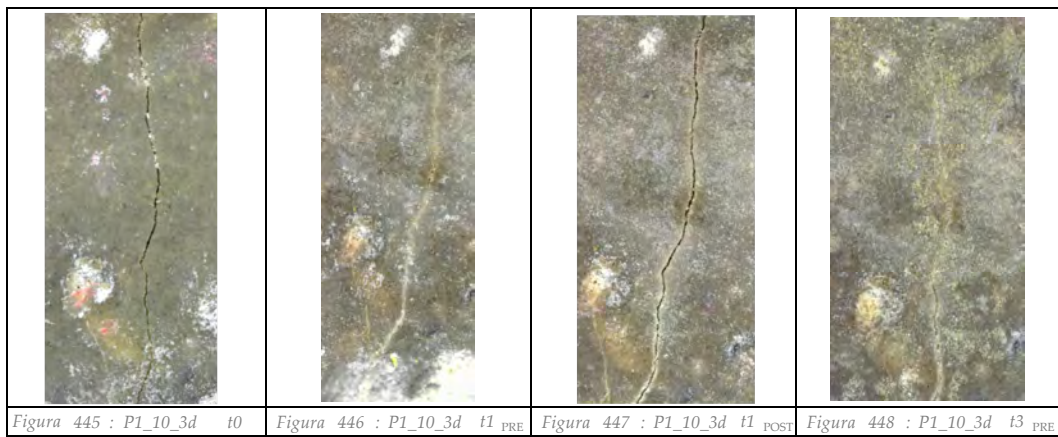
Fessura: 3

Punto di misura: c



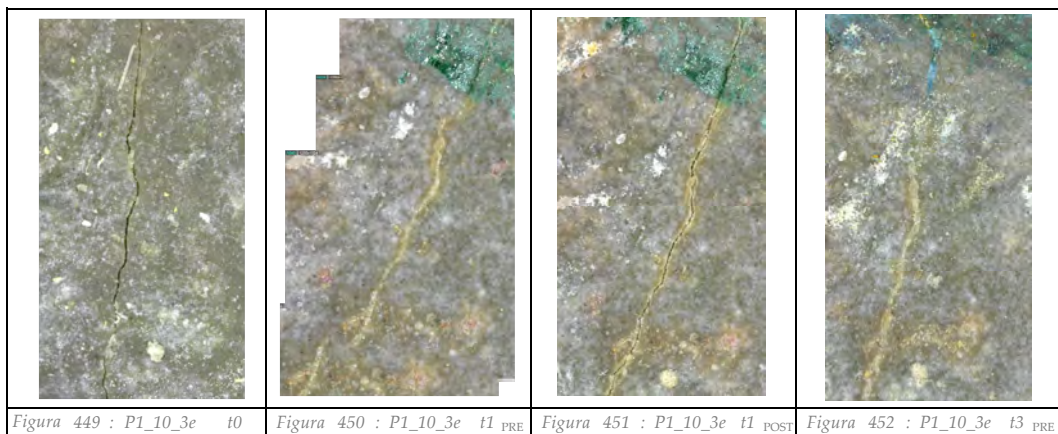
Fessura: 3

Punto di misura: d



Fessura: 3

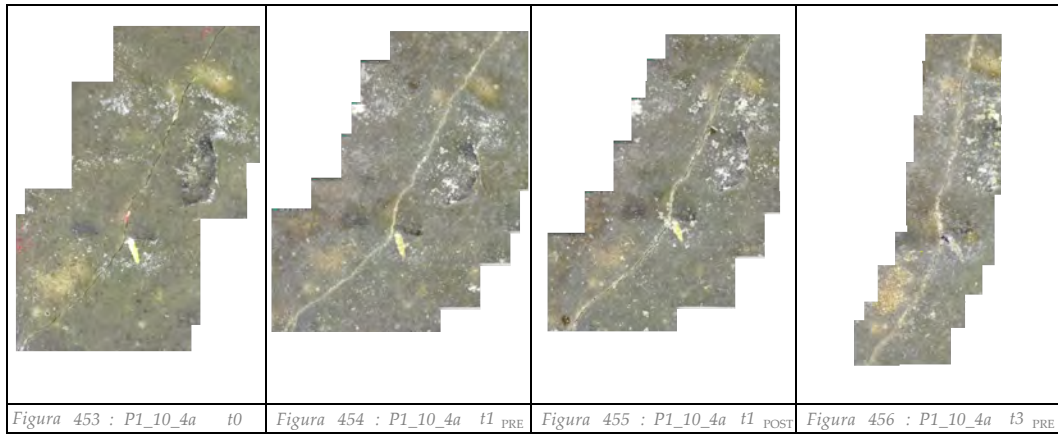
Punto di misura: e



Provino: P1_10

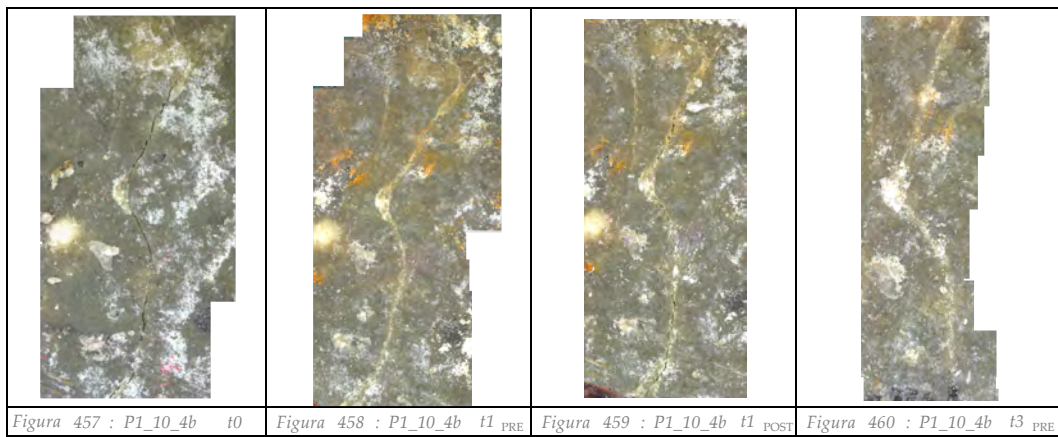
Fessura: 4

Punto di misura: a



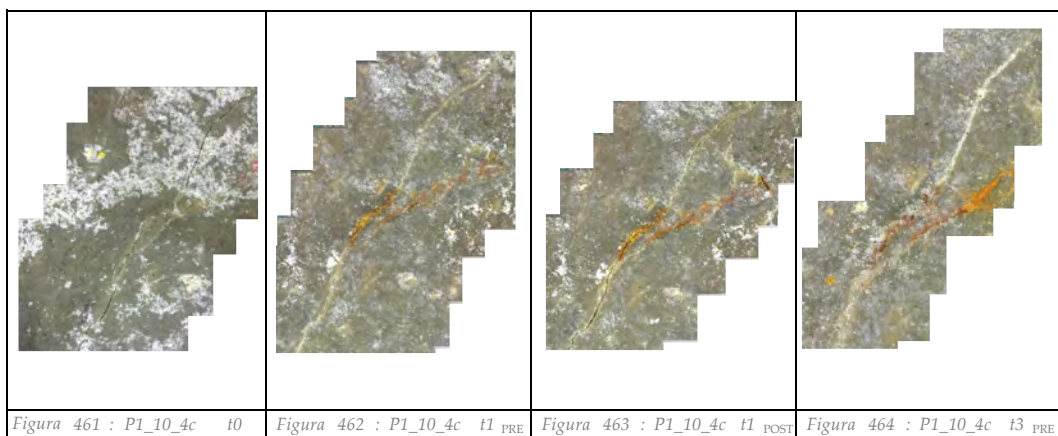
Fessura: 4

Punto di misura: b



Fessura: 4

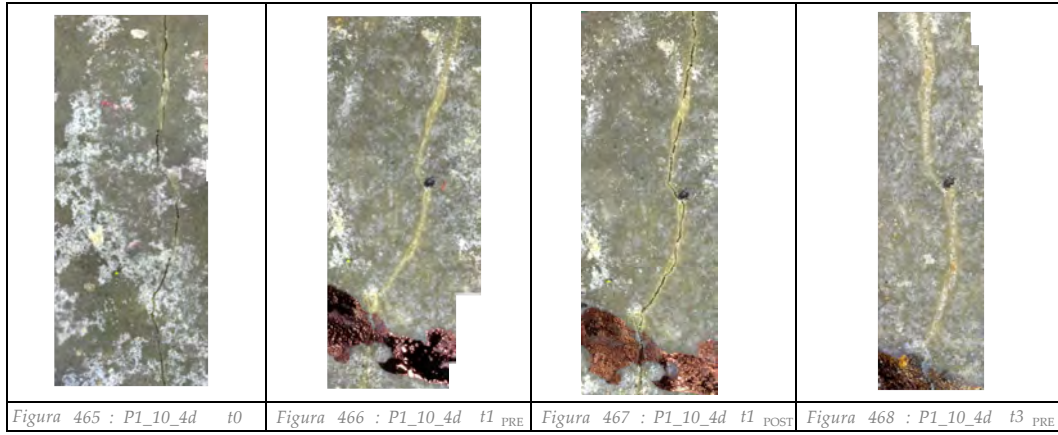
Punto di misura: c



Provino: P1_10

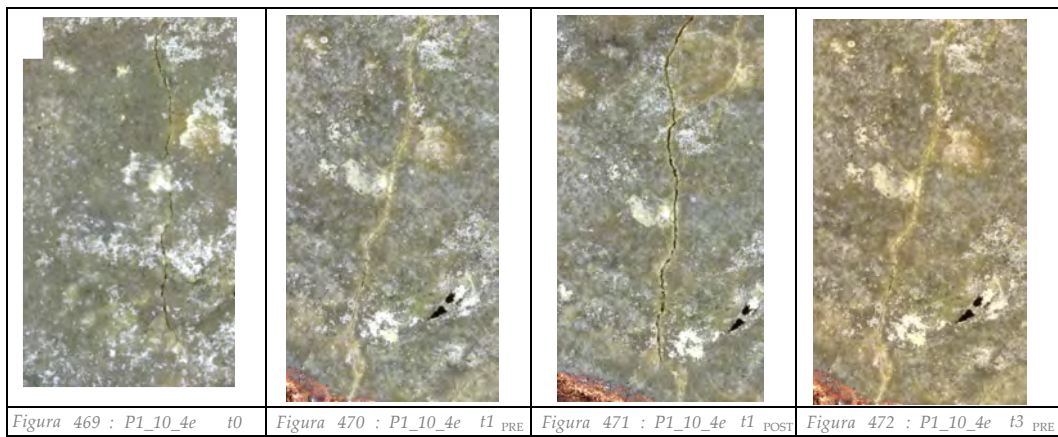
Fessura: 4

Punto di misura: d



Fessura: 4

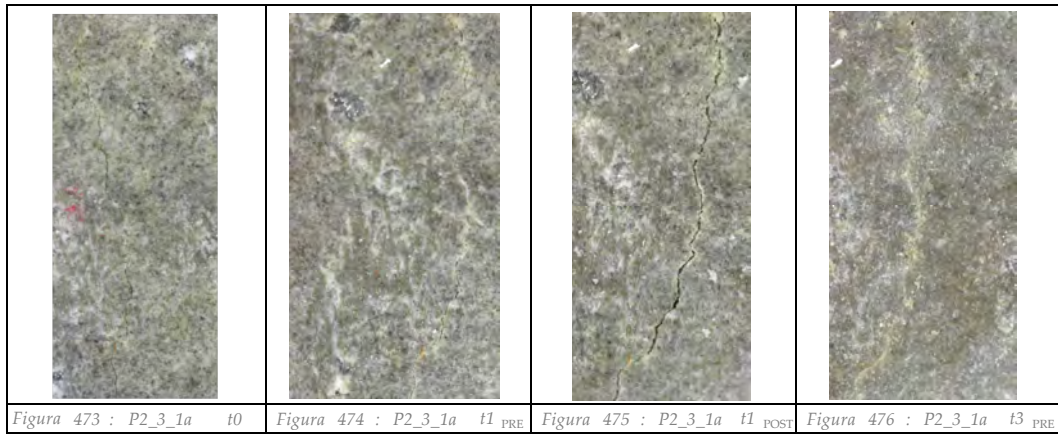
Punto di misura: e



Provino: P2_3

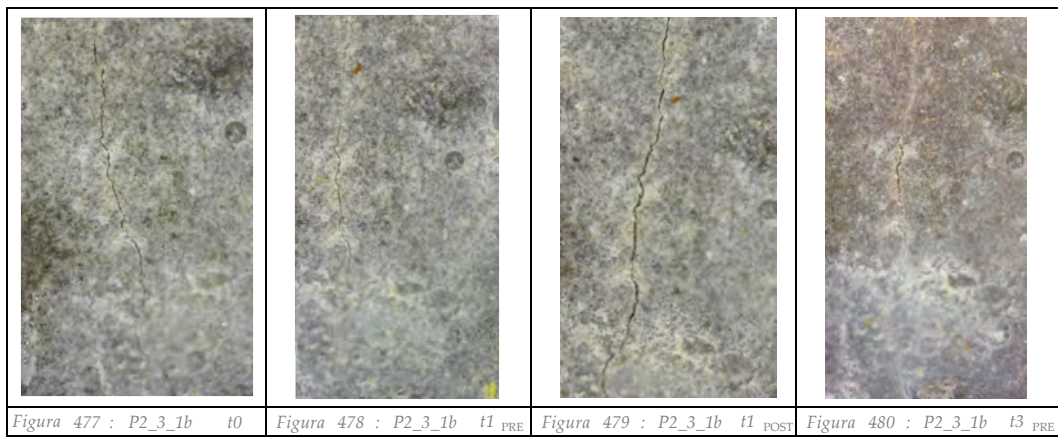
Fessura: 1

Punto di misura: a



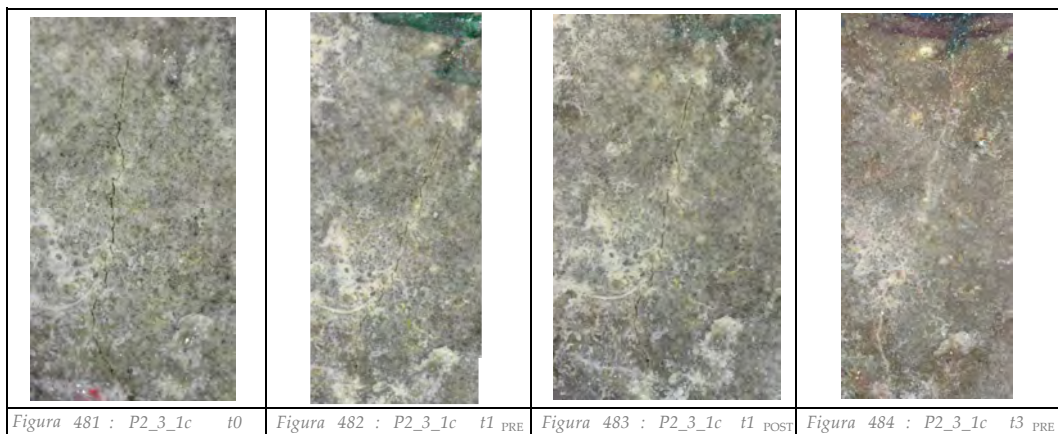
Fessura: 1

Punto di misura: a



Fessura: 1

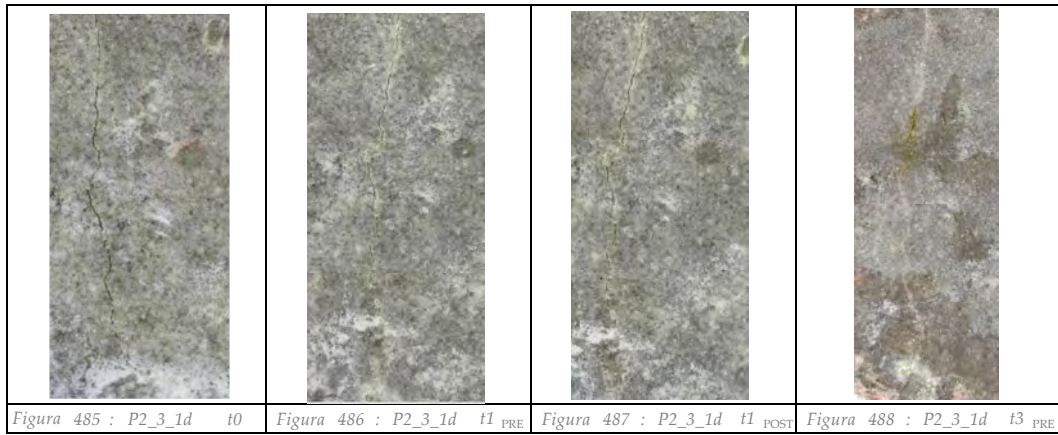
Punto di misura: c



Provino: P2_3

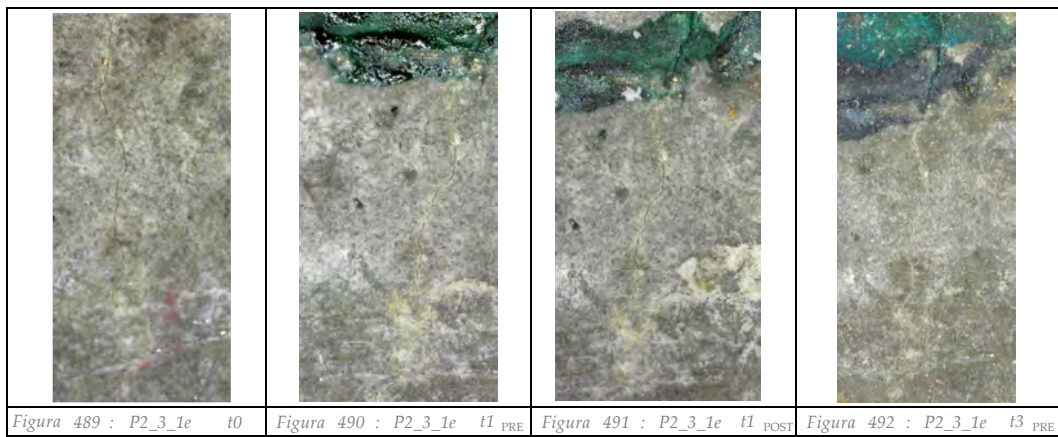
Fessura: 1

Punto di misura: d



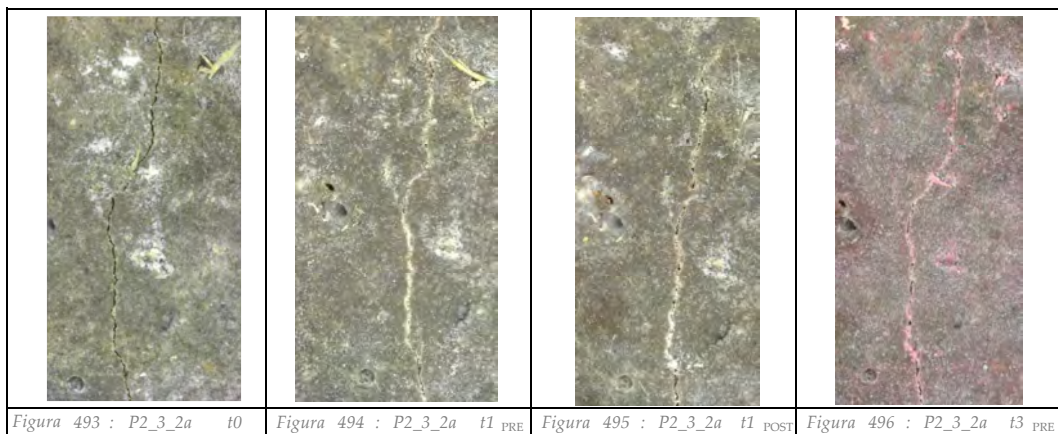
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

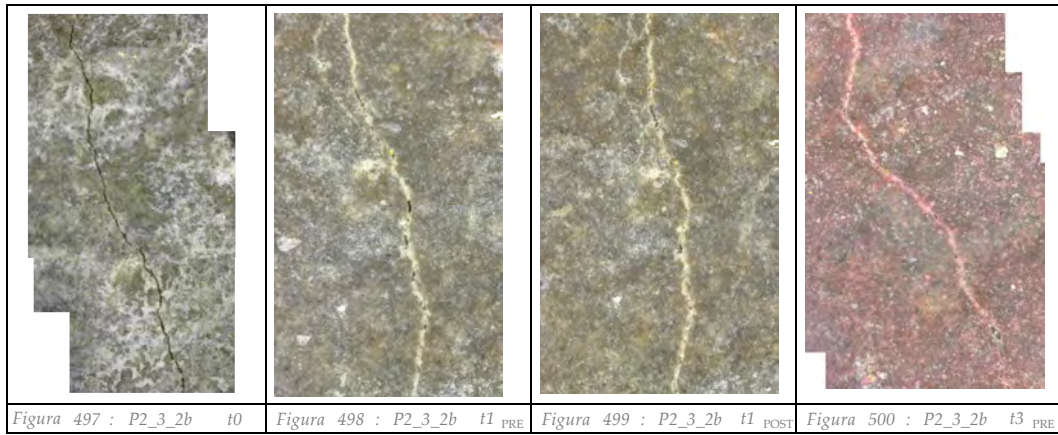
Punto di misura: a



Provino: P2_3

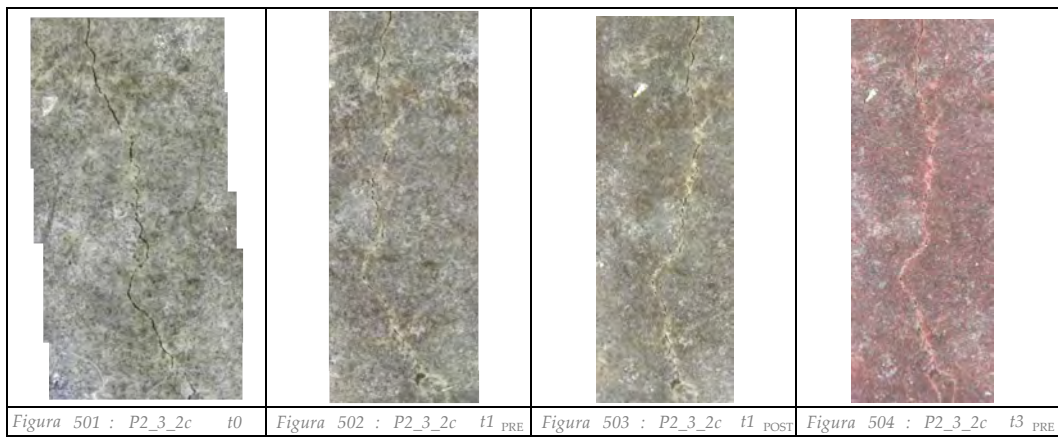
Fessura: 2

Punto di misura: b



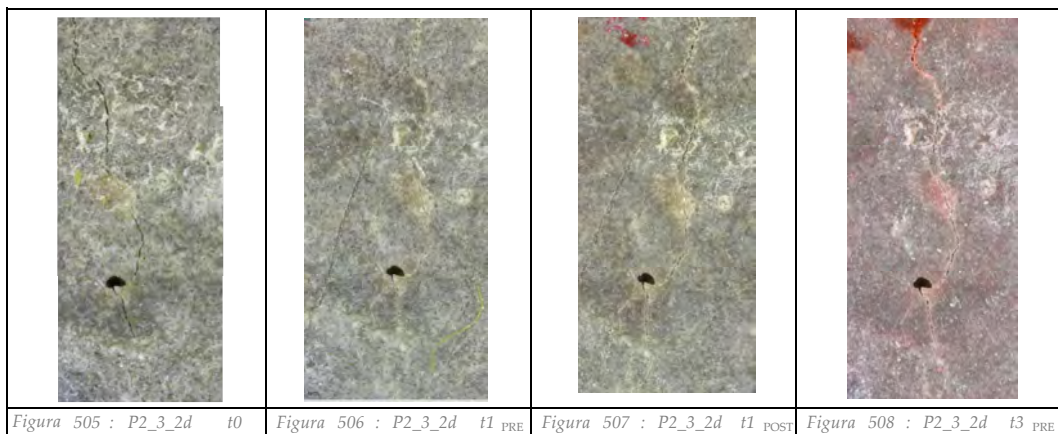
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

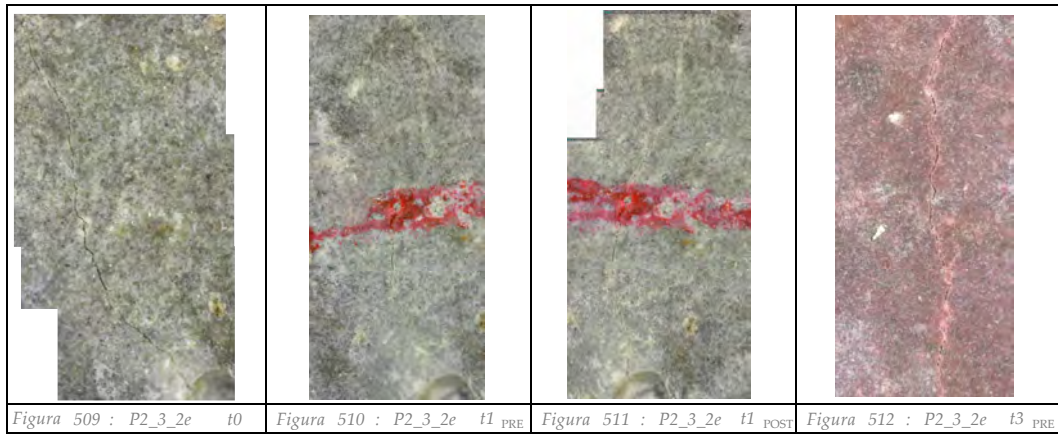
Punto di misura: d



Provino: P2_3

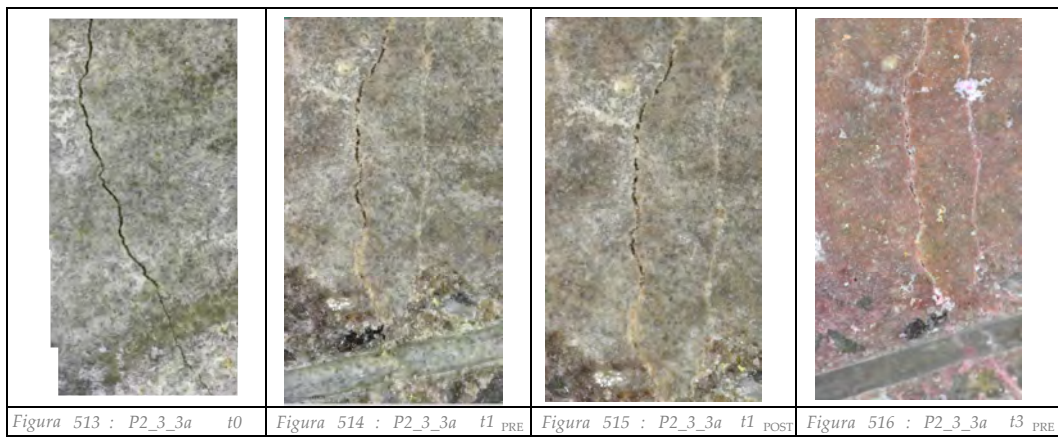
Fessura: 2

Punto di misura: e



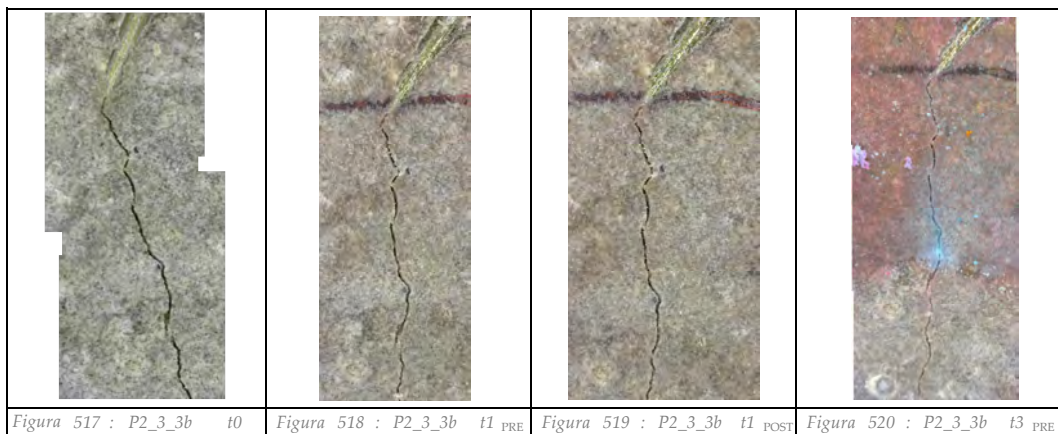
Fessura: 3

Punto di misura: a



Fessura: 3

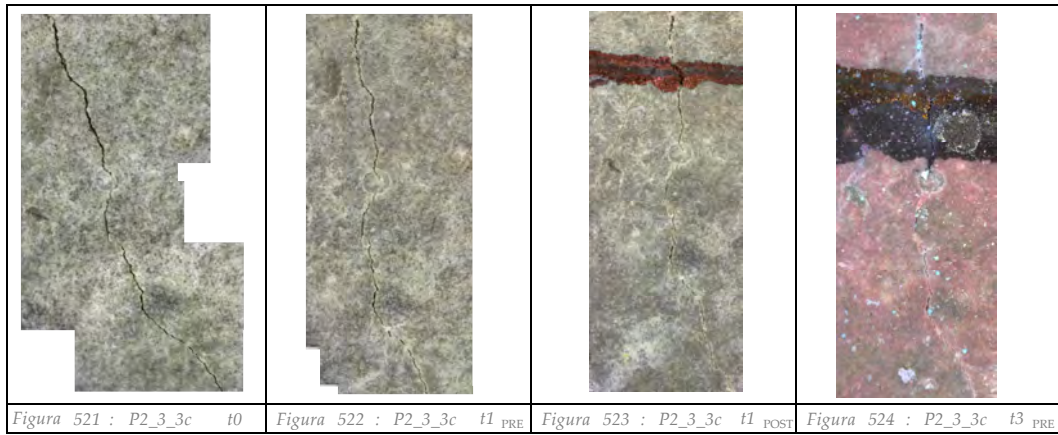
Punto di misura: b



Provino: P2_3

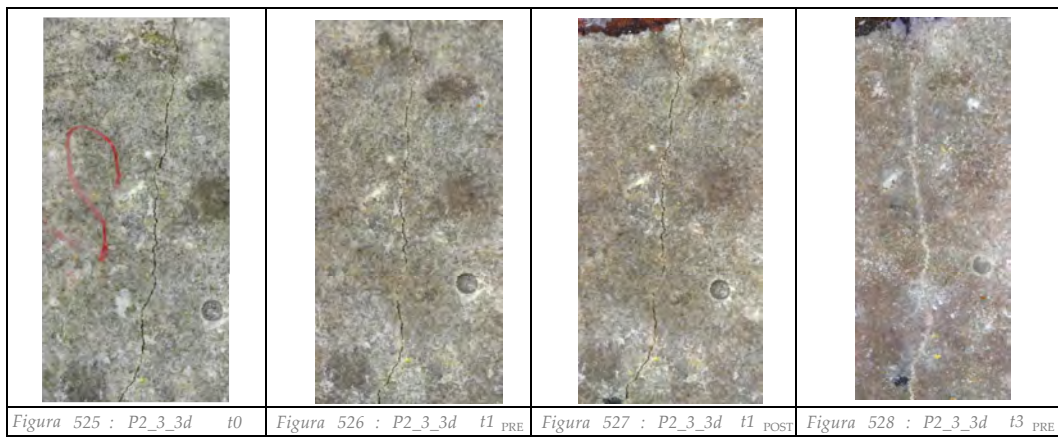
Fessura: 3

Punto di misura: c



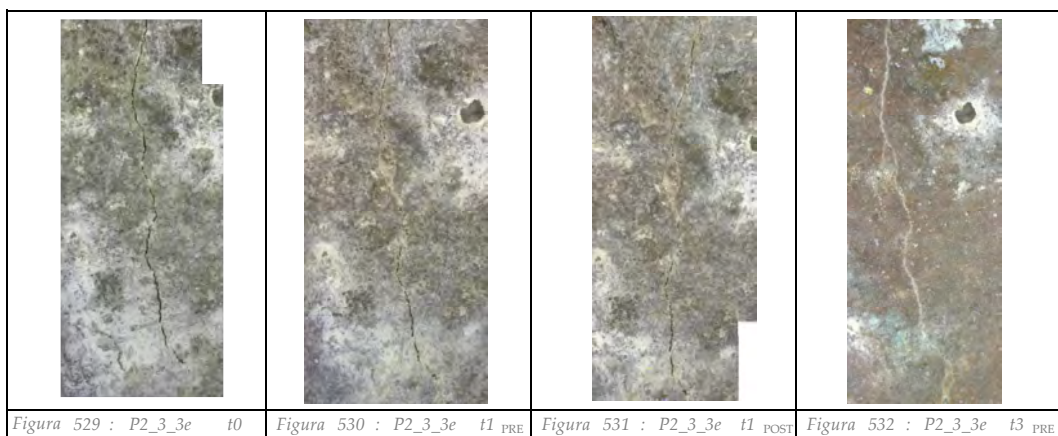
Fessura: 3

Punto di misura: d



Fessura: 3

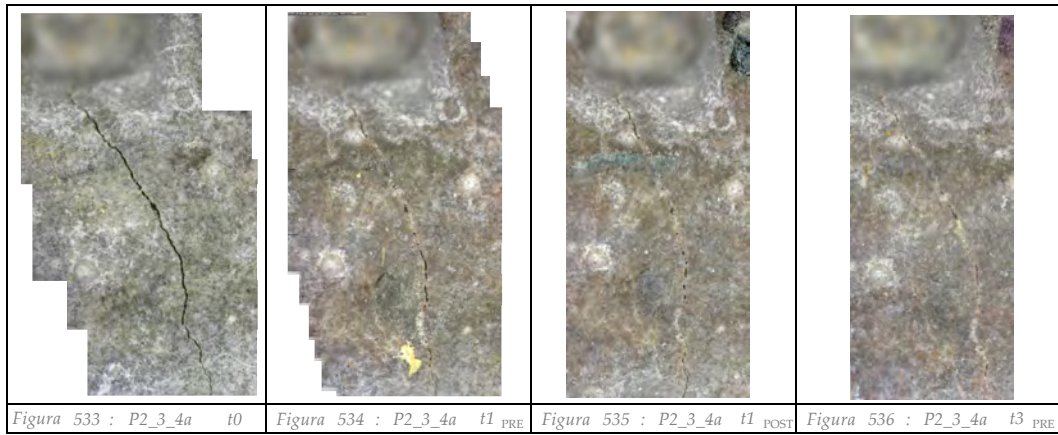
Punto di misura: e



Provino: P2_3

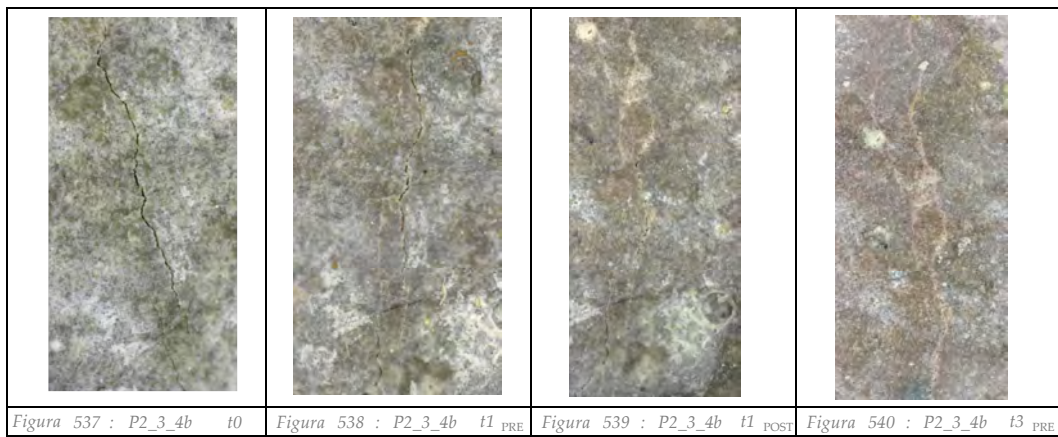
Fessura: 4

Punto di misura: a



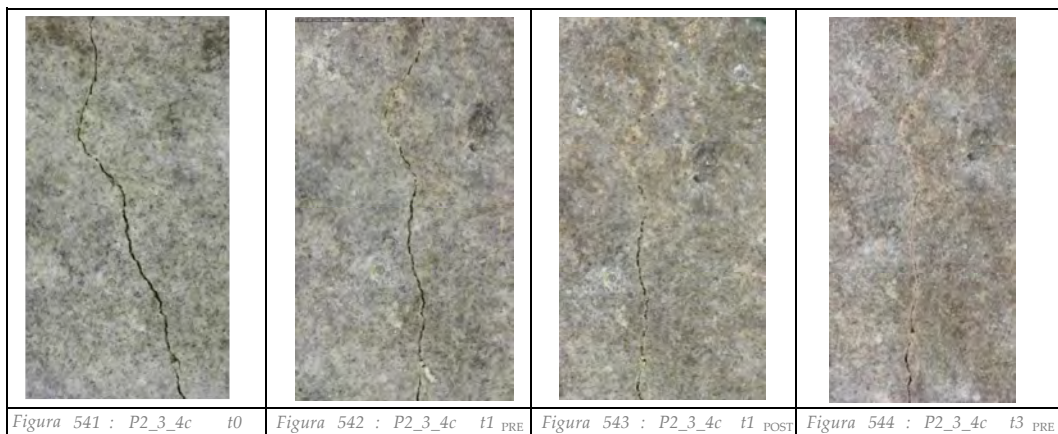
Fessura: 4

Punto di misura: b



Fessura: 4

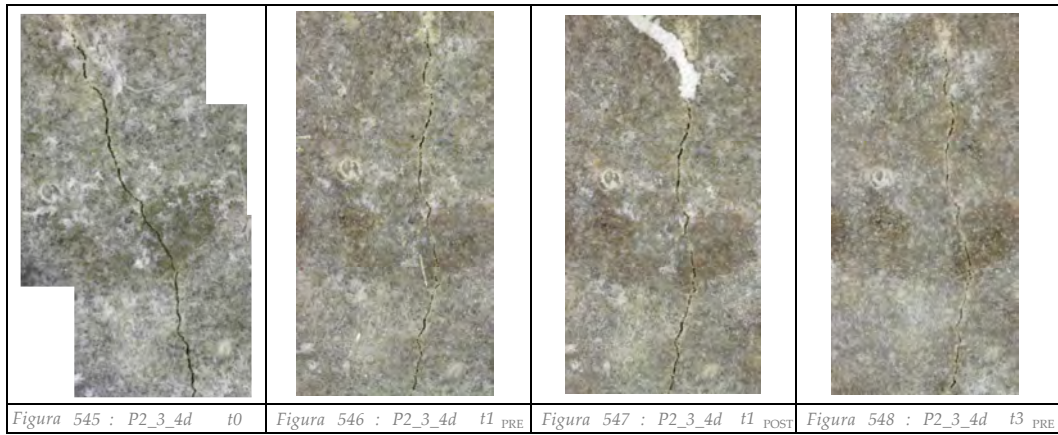
Punto di misura: c



Provino: P2_3

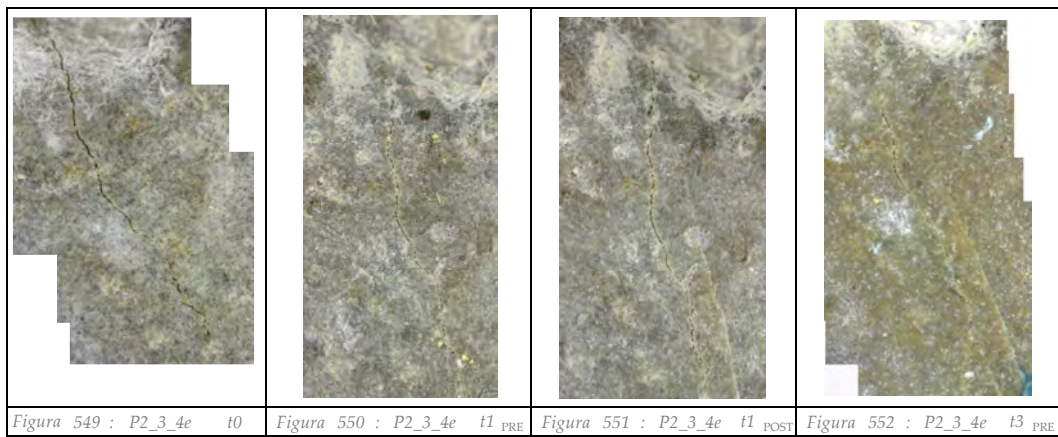
Fessura: 4

Punto di misura: d



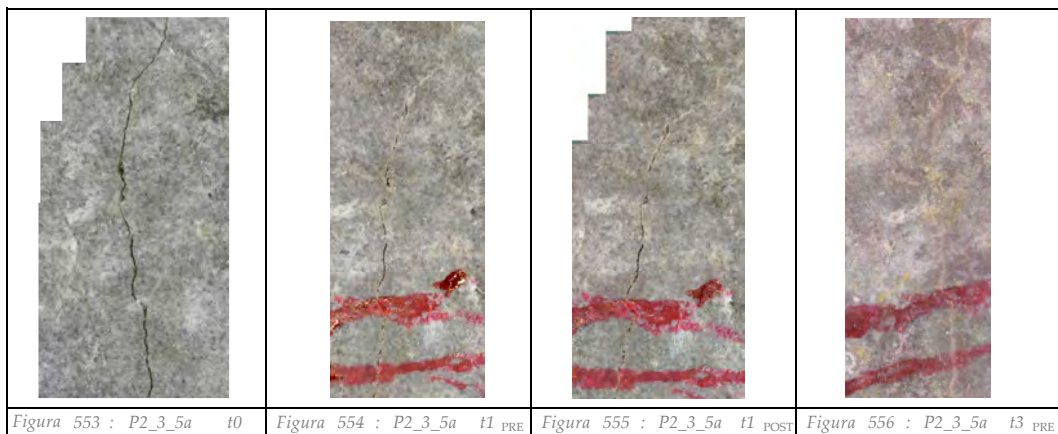
Fessura: 4

Punto di misura: e



Fessura: 5

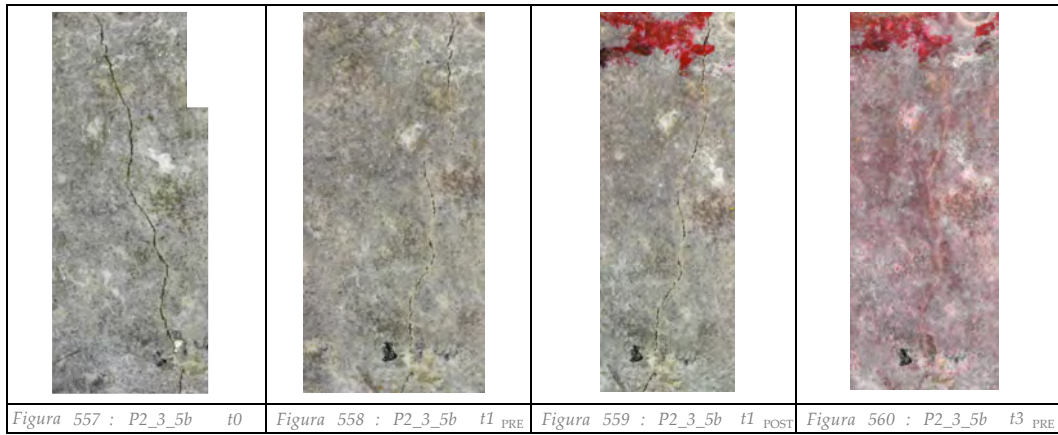
Punto di misura: a



Provino: P2_3

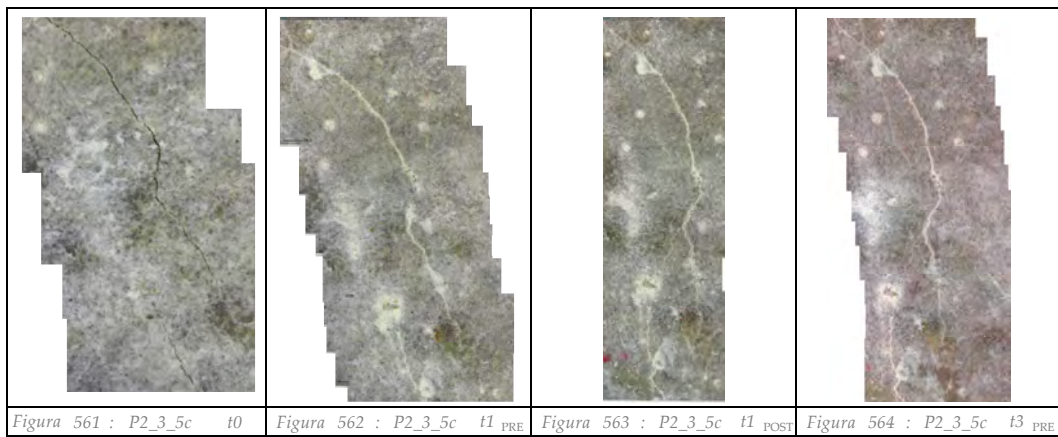
Fessura: 5

Punto di misura: b



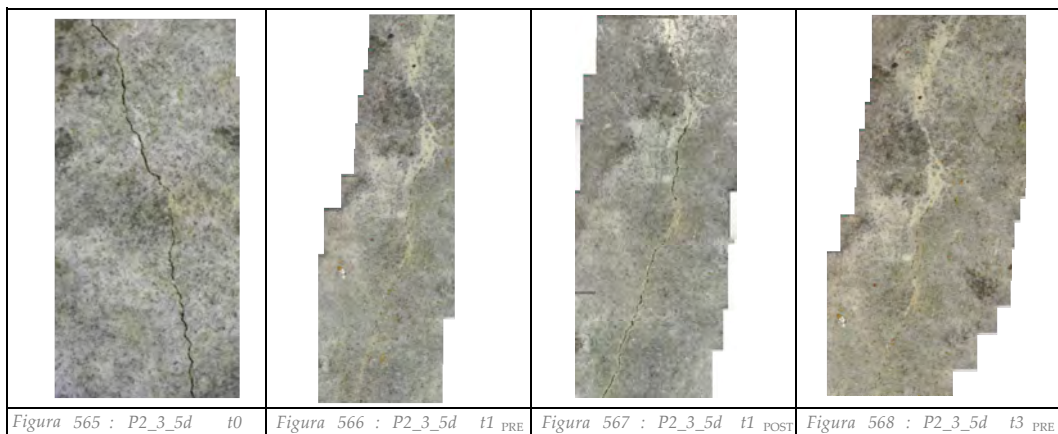
Fessura: 5

Punto di misura: c



Fessura: 5

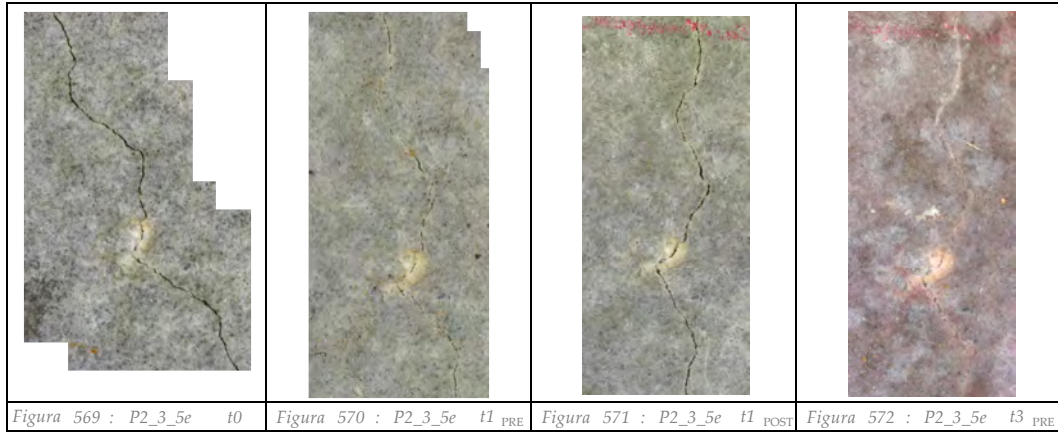
Punto di misura: d



Provino: P2_3

Fessura: 5

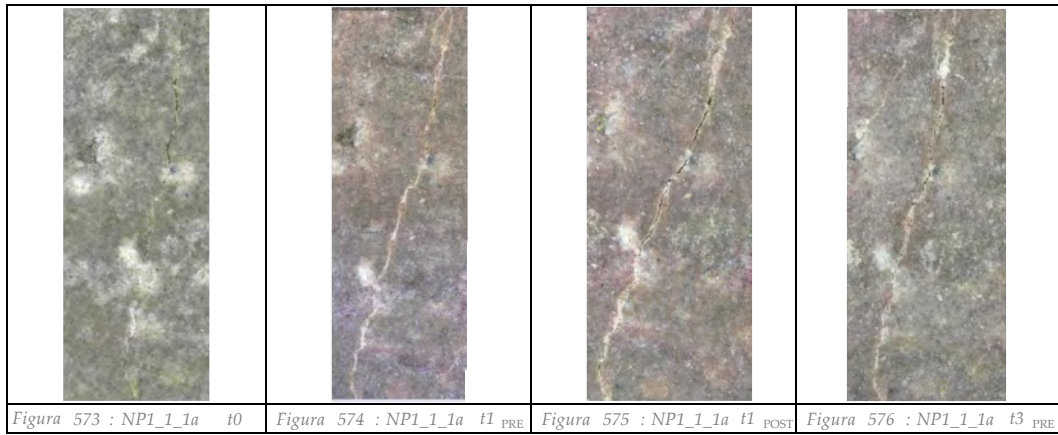
Punto di misura: e



Provino: NP1_1

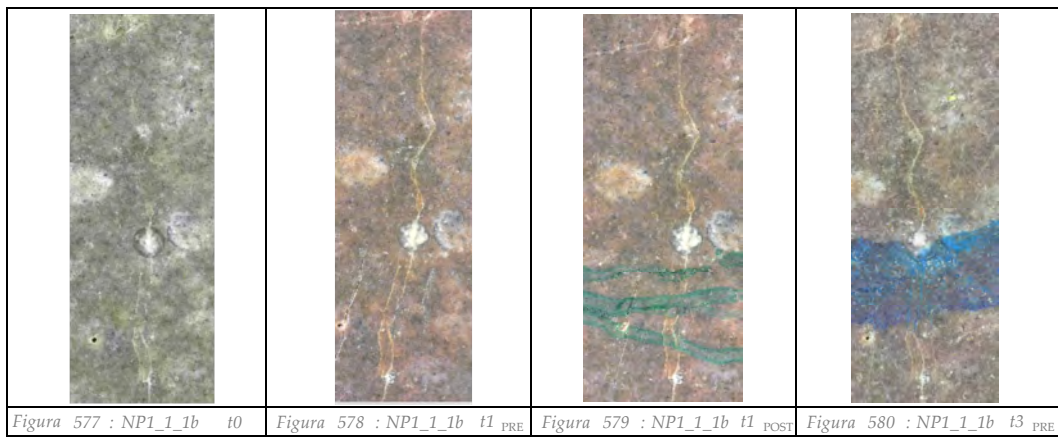
Fessura: 1

Punto di misura: a



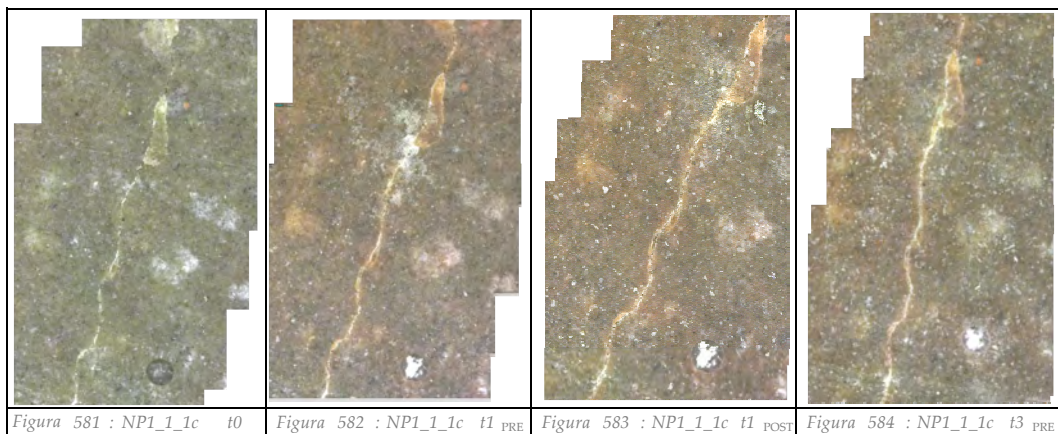
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

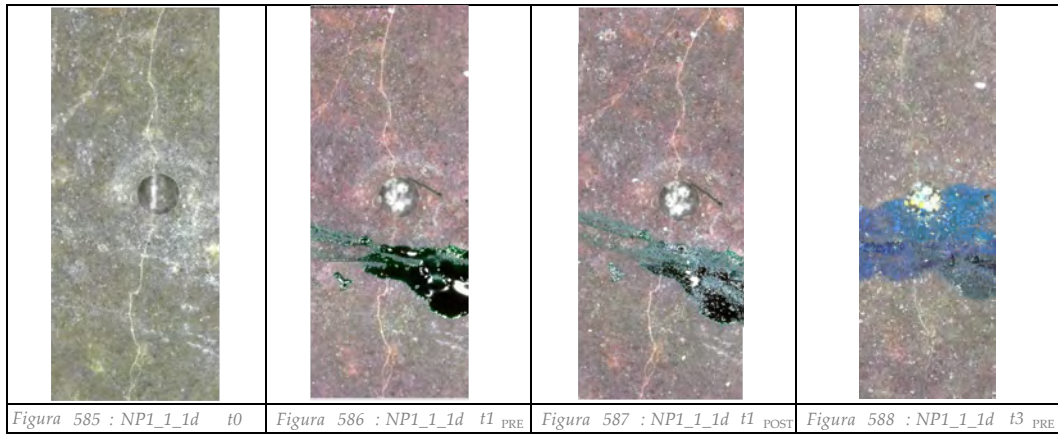
Punto di misura: c



Provino: NP1_1

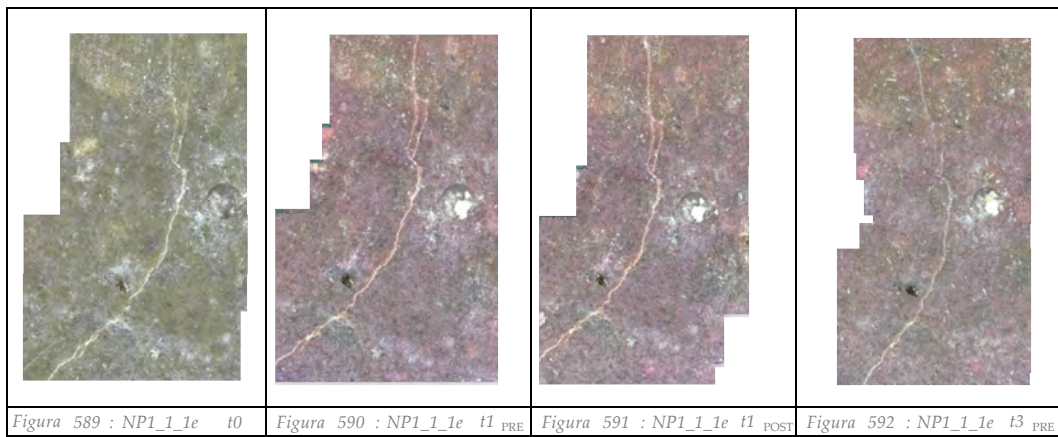
Fessura: 1

Punto di misura: d



Fessura: 1

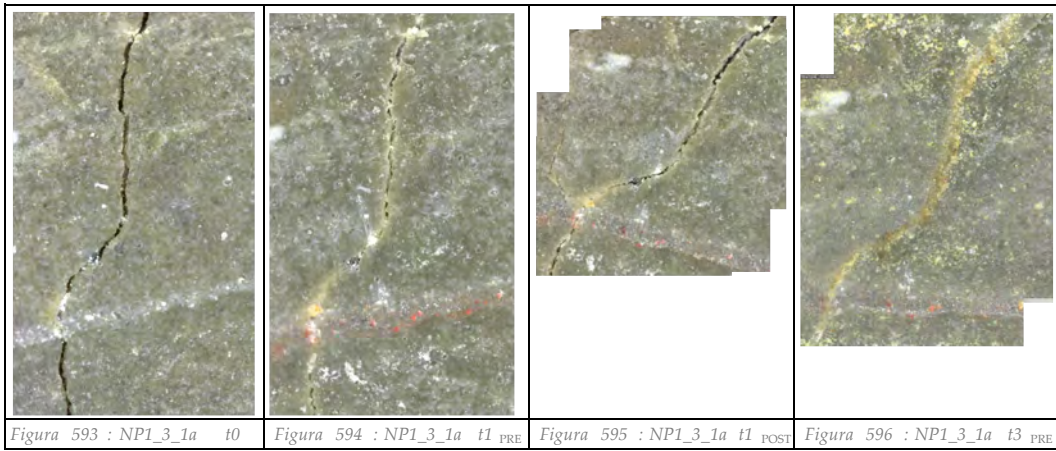
Punto di misura: e



Provino: NP1_3

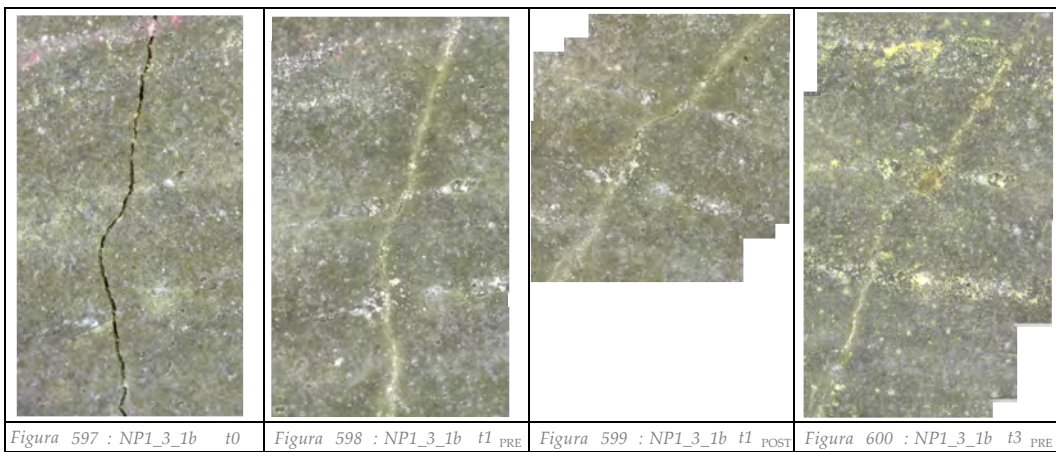
Fessura: 1

Punto di misura: a



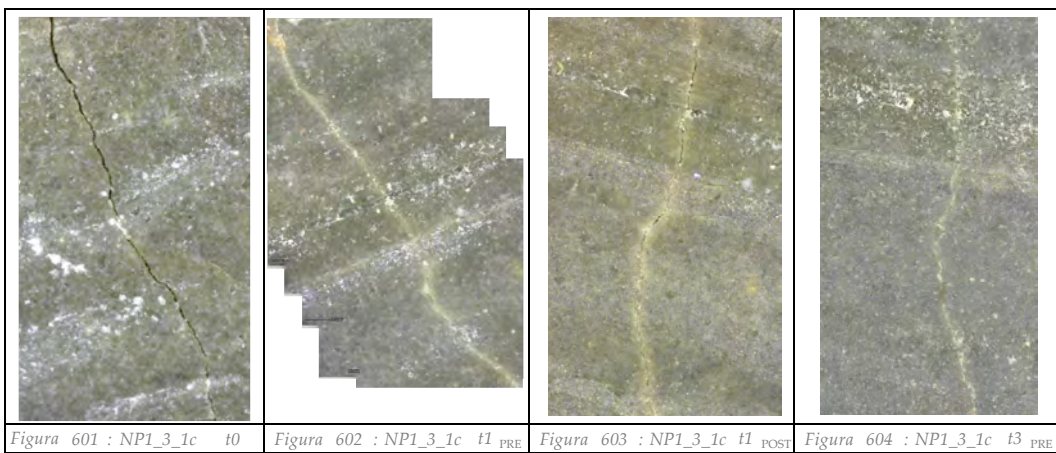
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

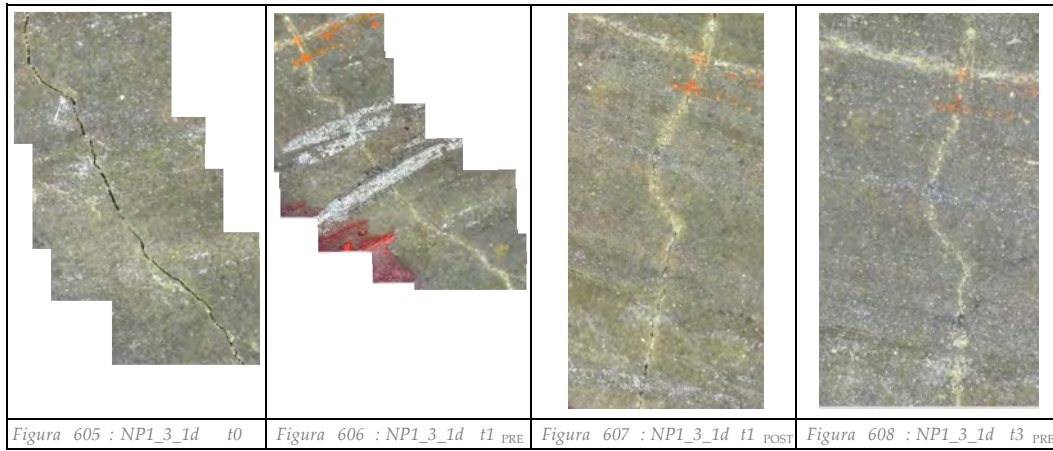
Punto di misura: c



Provino: NP1_3

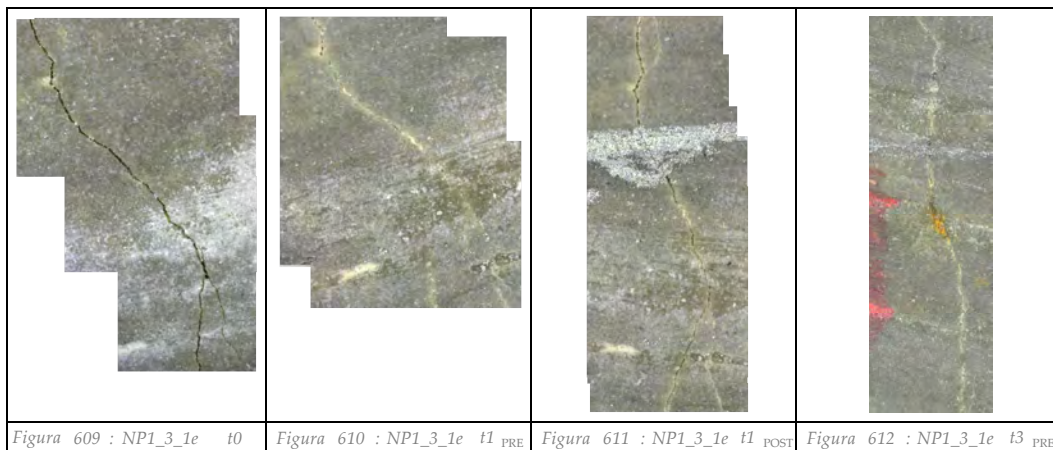
Fessura: 1

Punto di misura: d



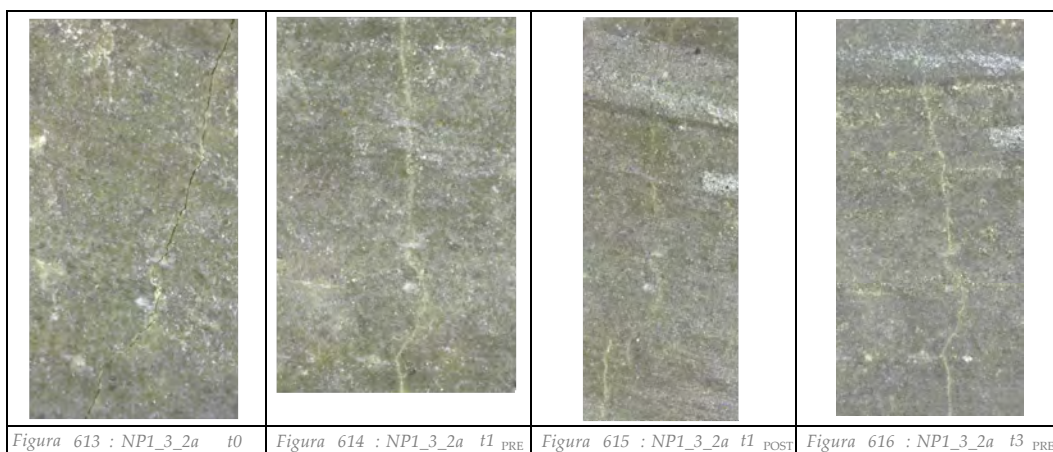
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

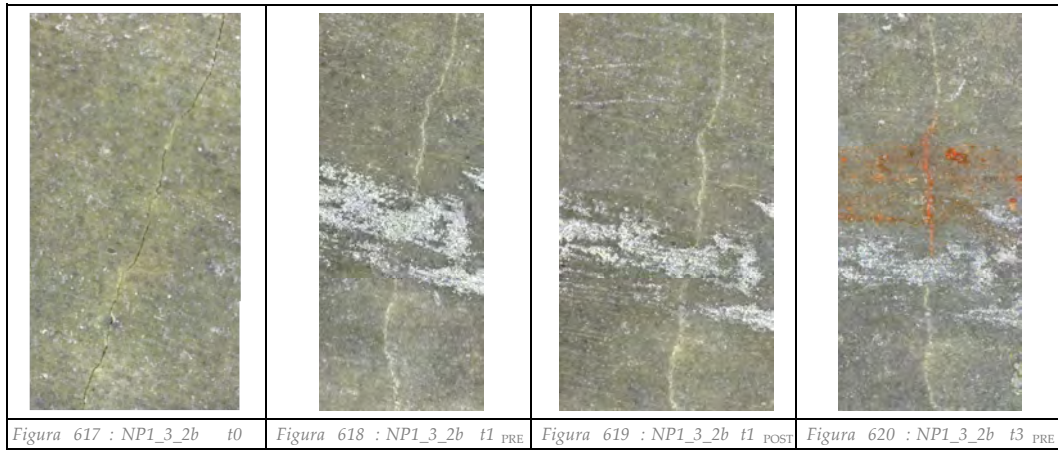
Punto di misura: a



Provino: NP1_3

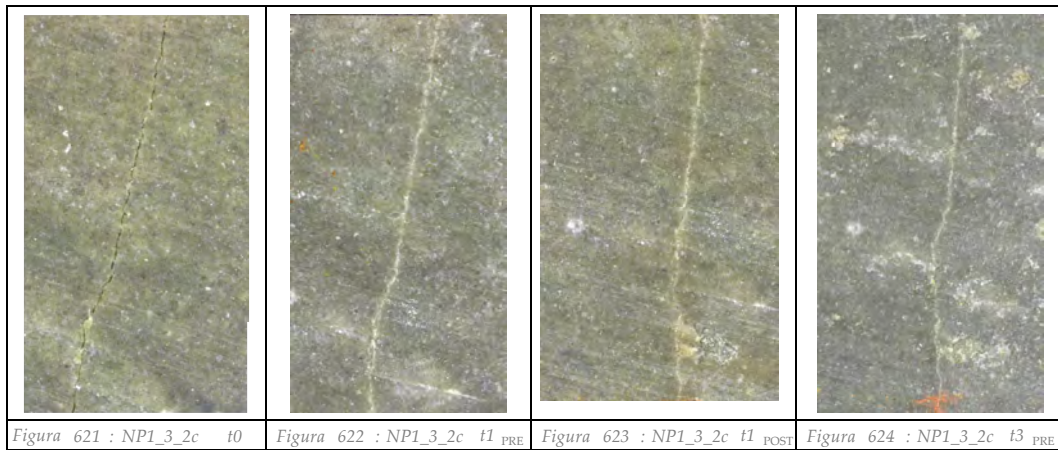
Fessura: 2

Punto di misura: b



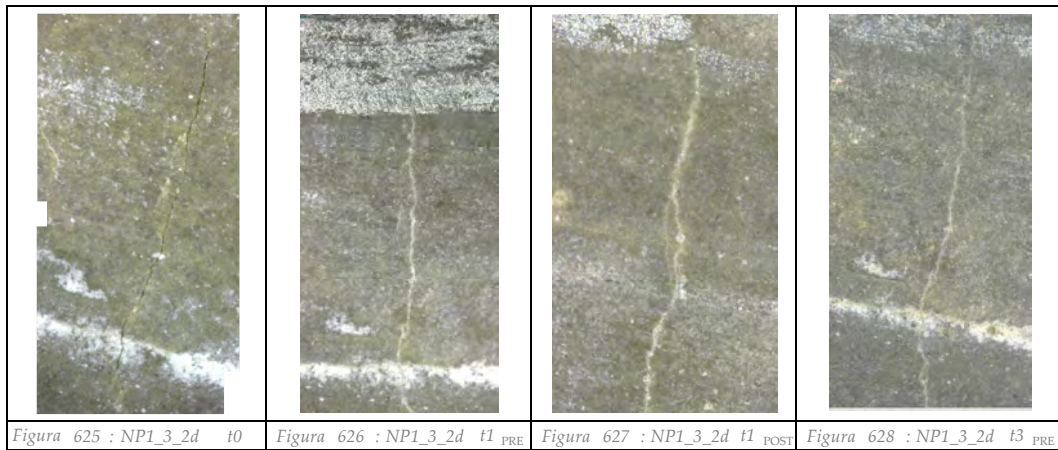
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

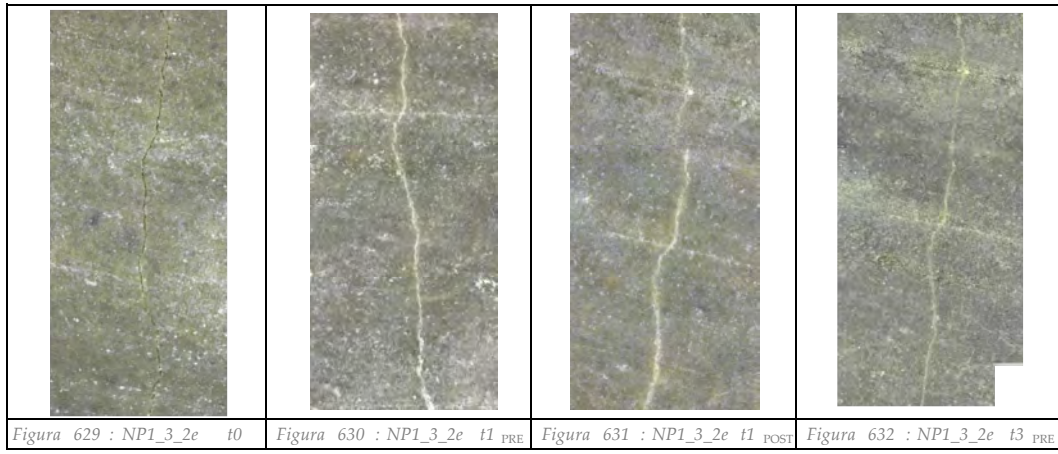
Punto di misura: d



Provino: NP1_3

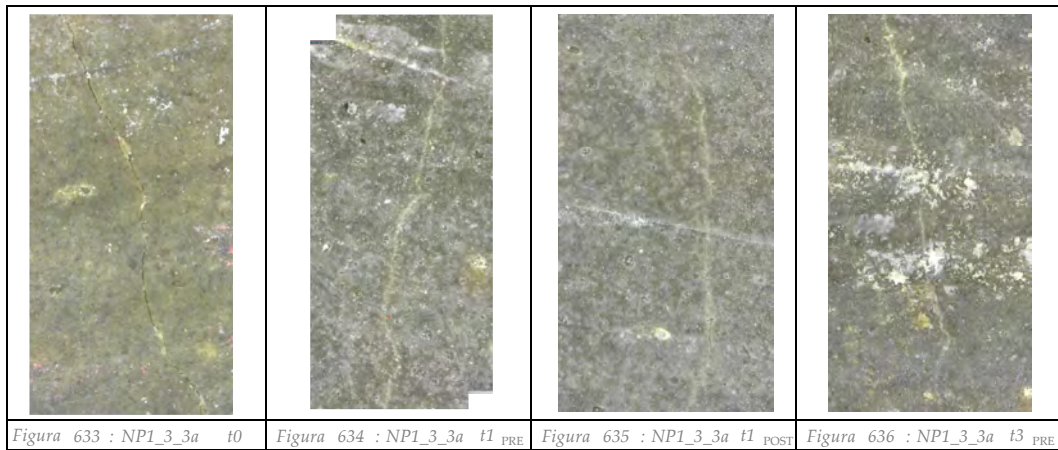
Fessura: 2

Punto di misura: e



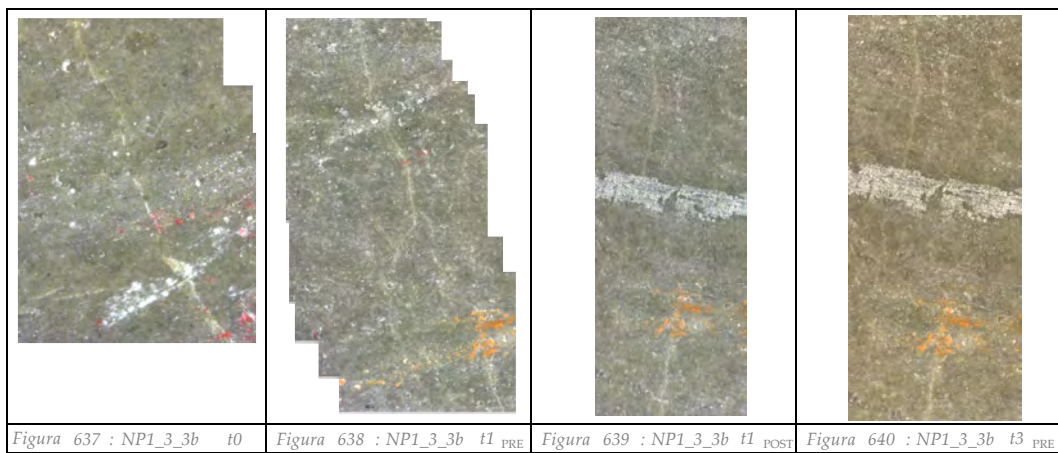
Fessura: 3

Punto di misura: a



Fessura: 3

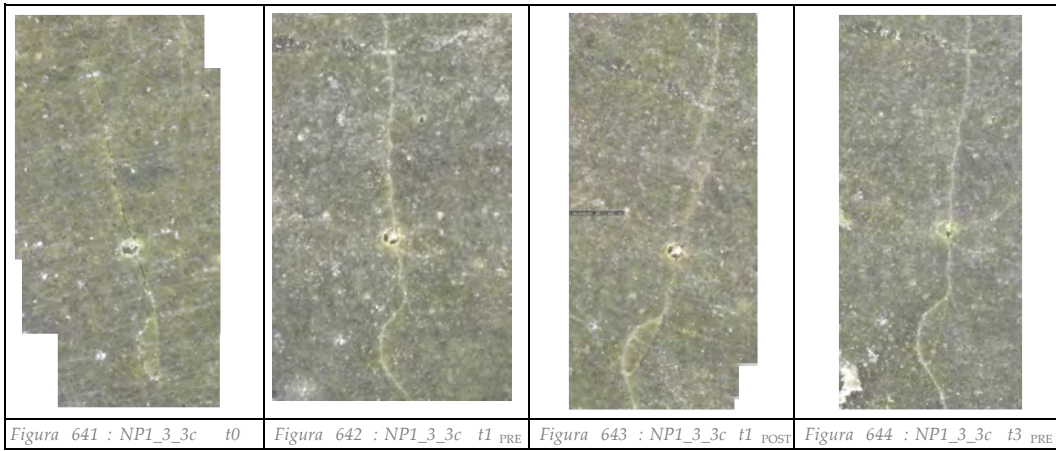
Punto di misura: b



Provino: NP1_3

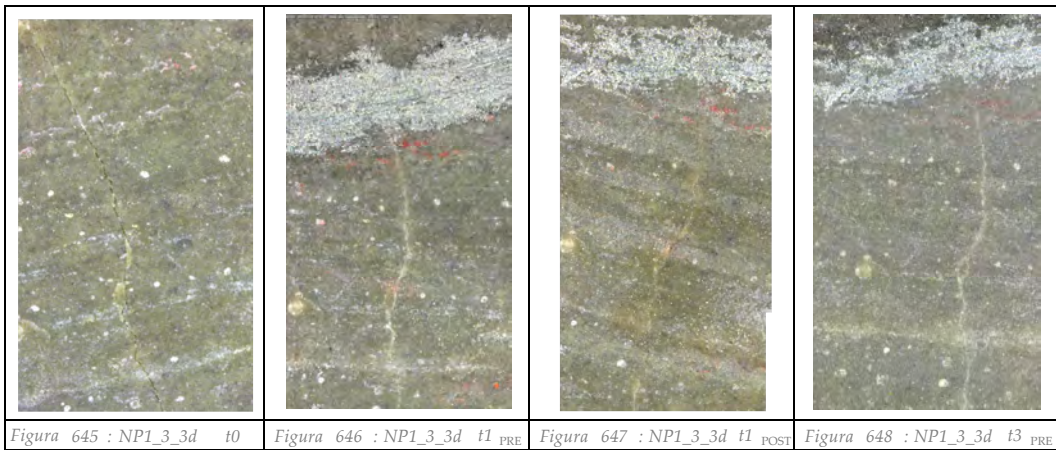
Fessura: 3

Punto di misura: c



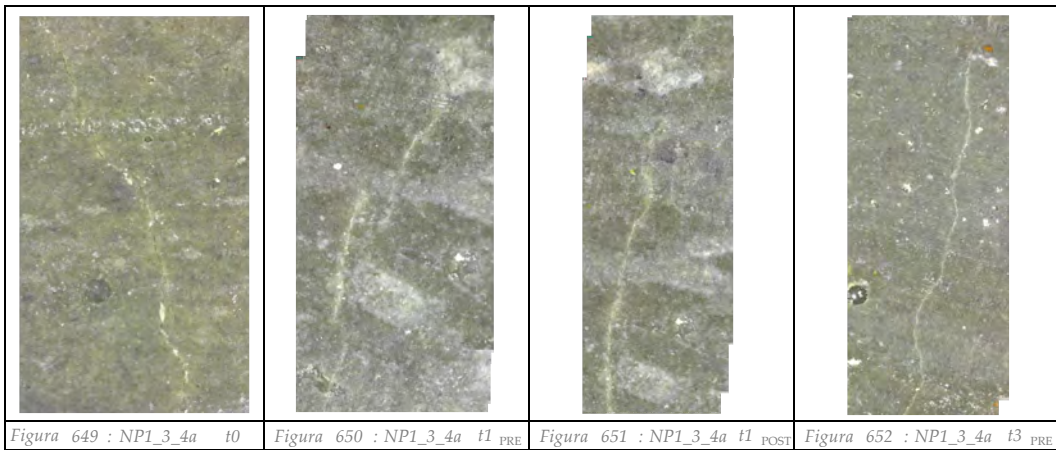
Fessura: 3

Punto di misura: d



Fessura: 4

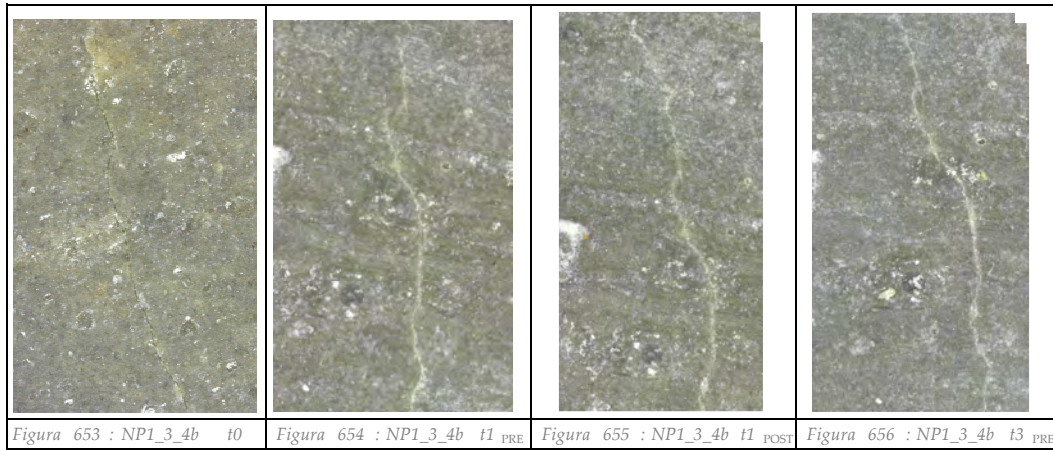
Punto di misura: a



Provino: NP1_3

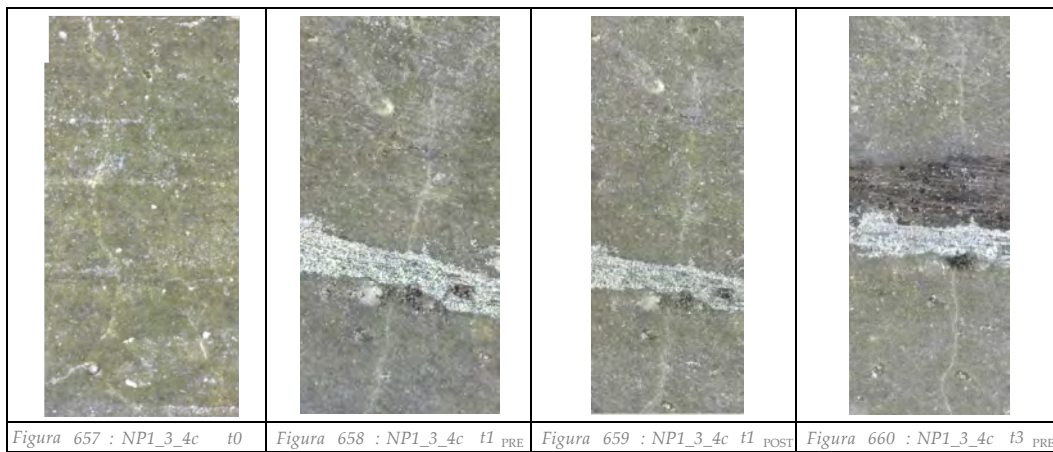
Fessura: 4

Punto di misura: b



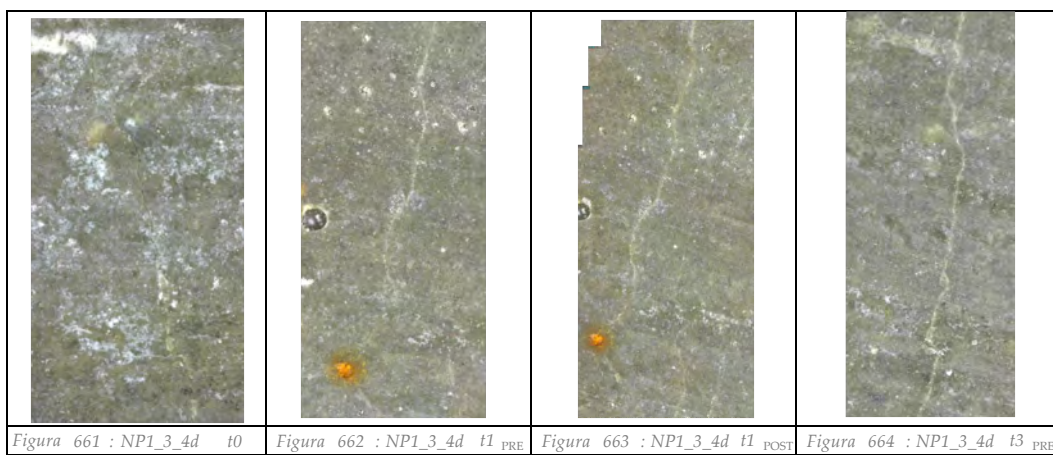
Fessura: 4

Punto di misura: c



Fessura: 4

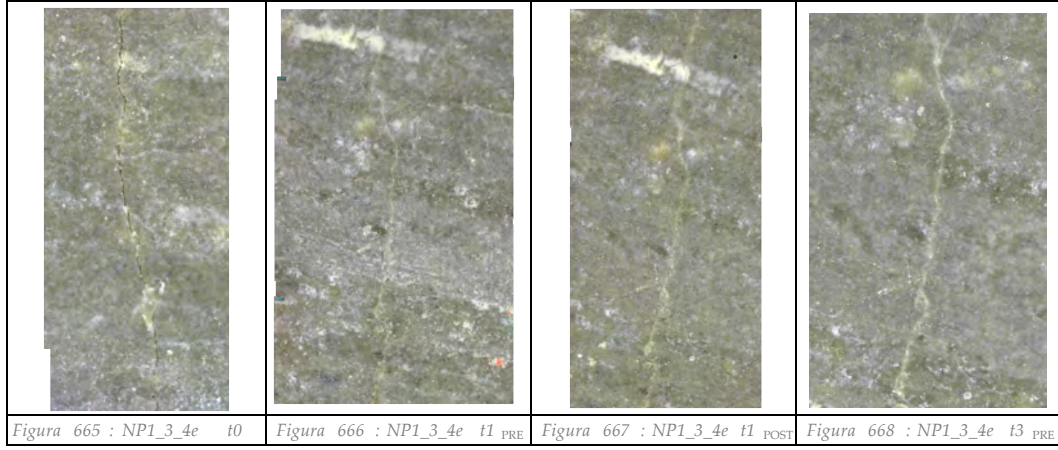
Punto di misura: d



Provino: NP1_3

Fessura: 4

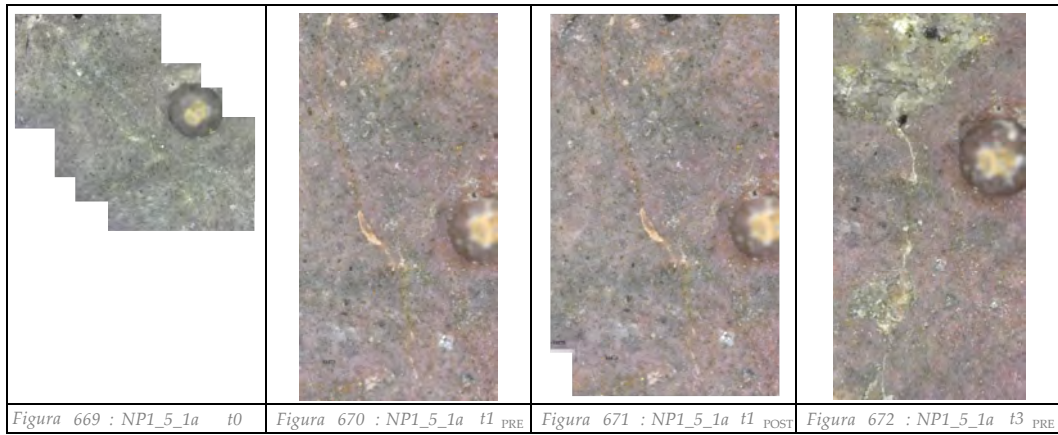
Punto di misura: e



Provino: NP1_5

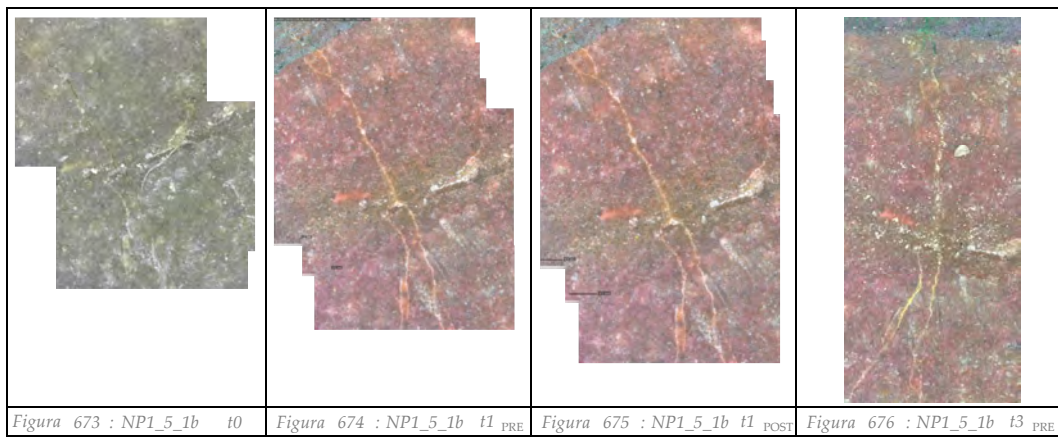
Fessura: 1

Punto di misura: a



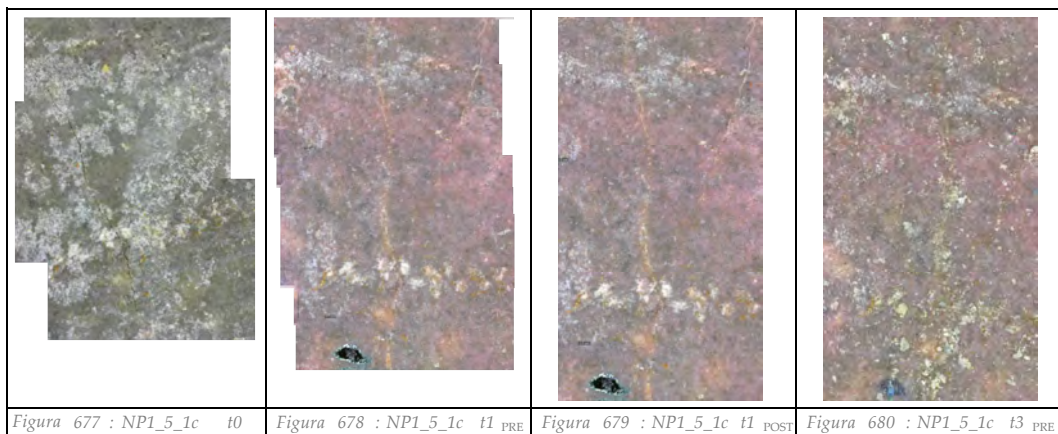
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

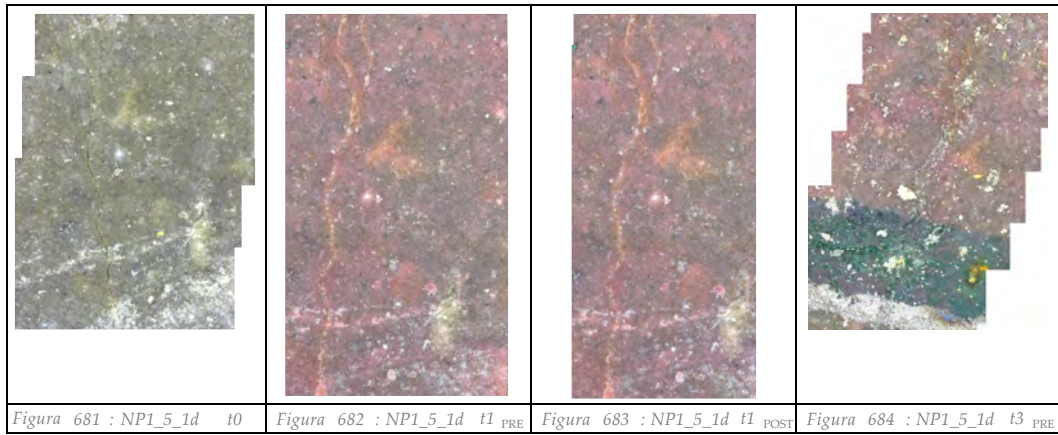
Punto di misura: c



Provino:NP1_5

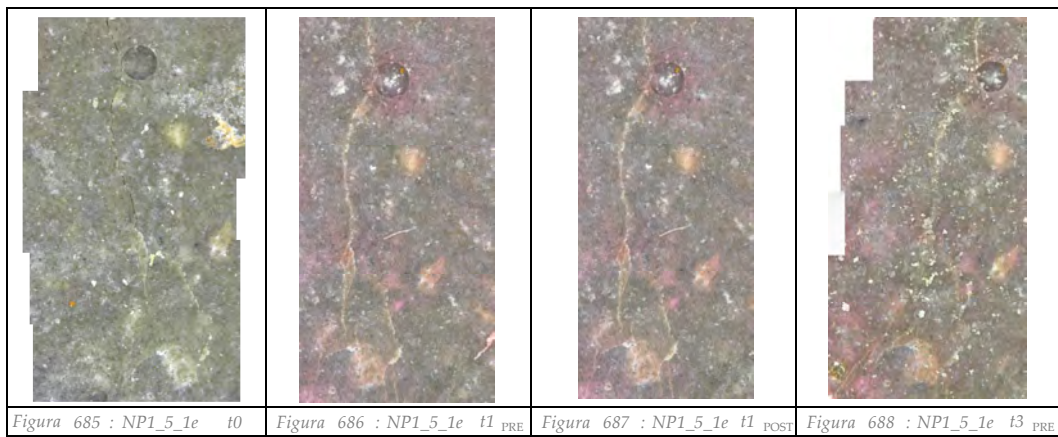
Fessura: 1

Punto di misura: d



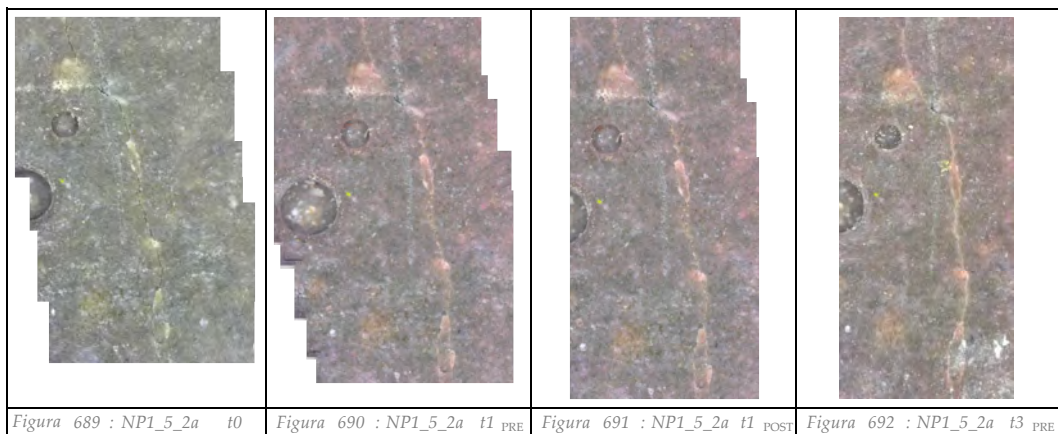
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

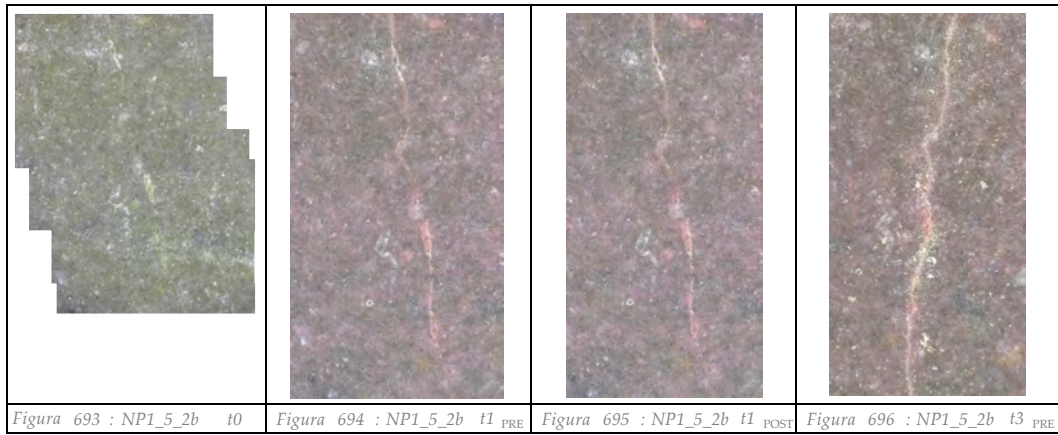
Punto di misura: a



Provino: NP1_5

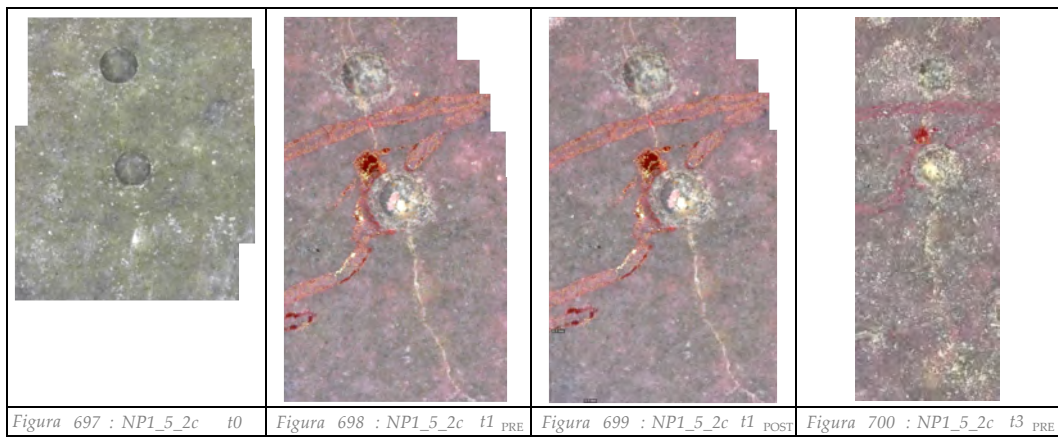
Fessura: 2

Punto di misura: b



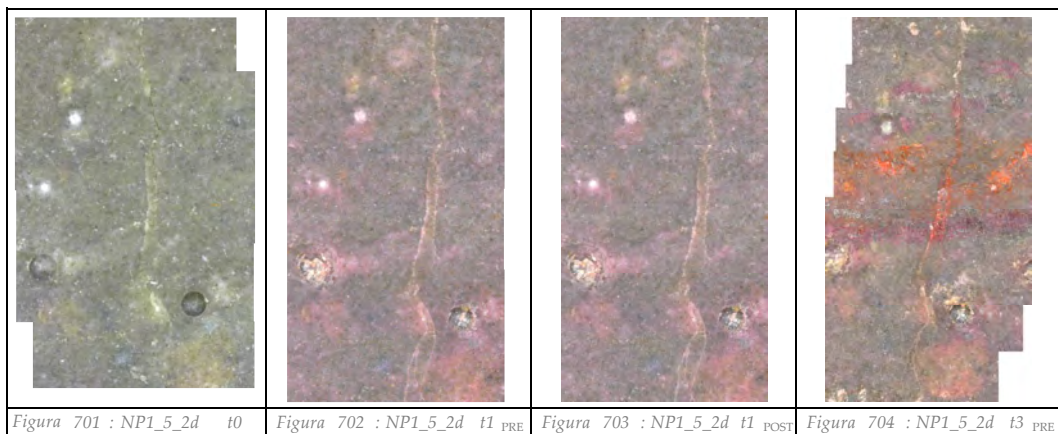
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

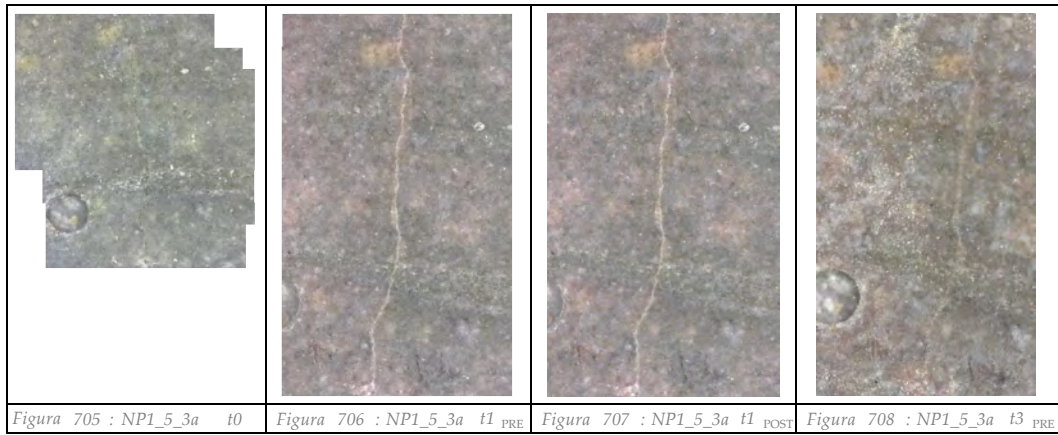
Punto di misura: d



Provino:

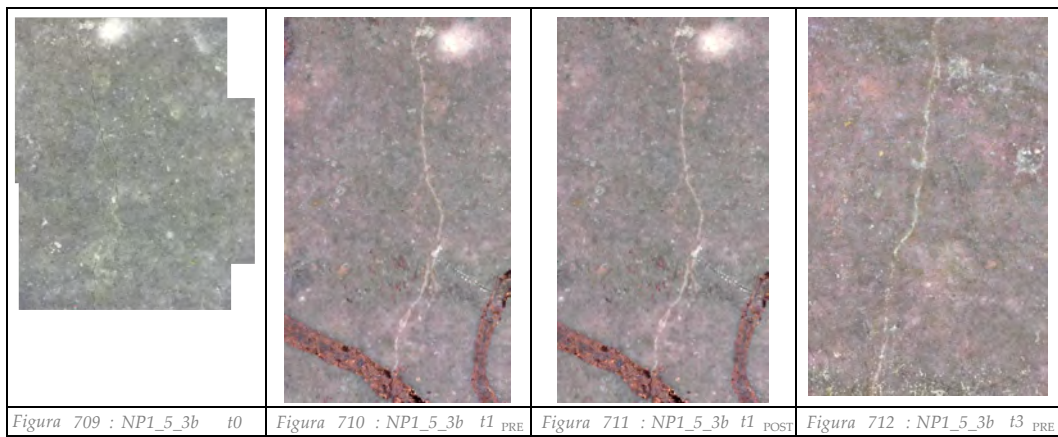
Fessura: 3

Punto di misura: a



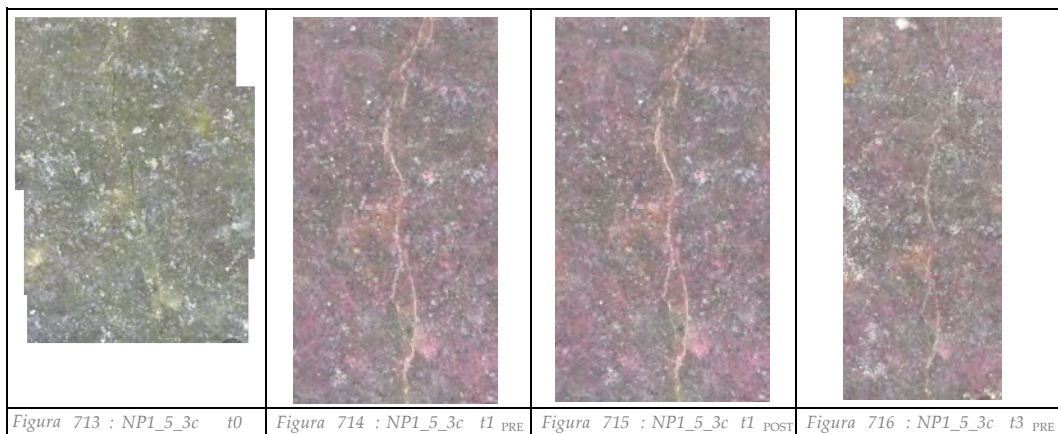
Fessura: 3

Punto di misura: b



Fessura: 3

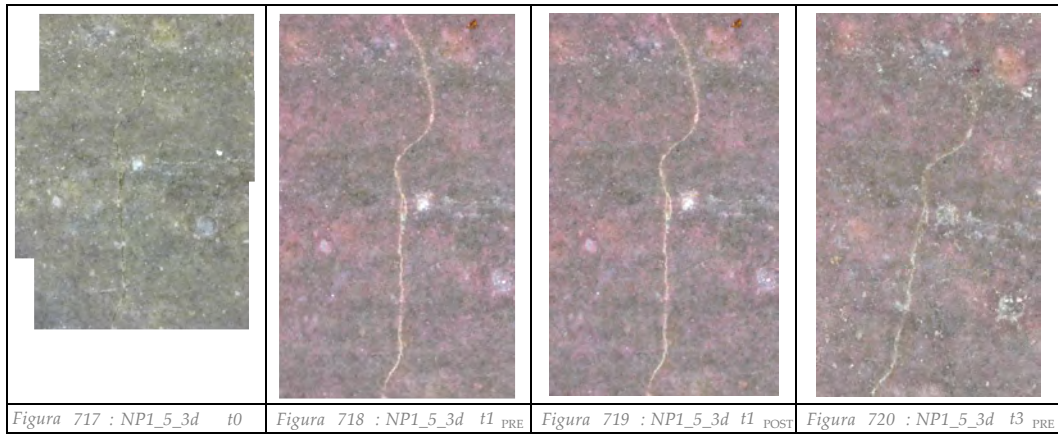
Punto di misura: c



Provino:NP1_5

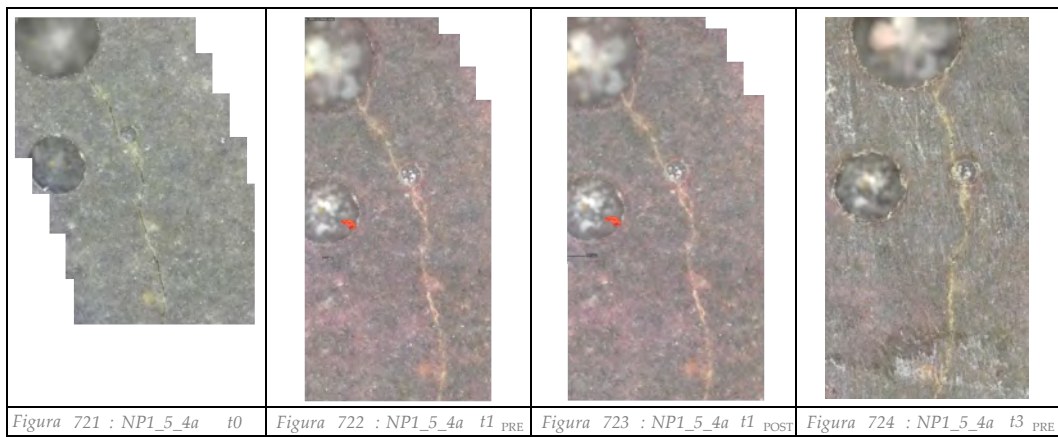
Fessura: 3

Punto di misura: d



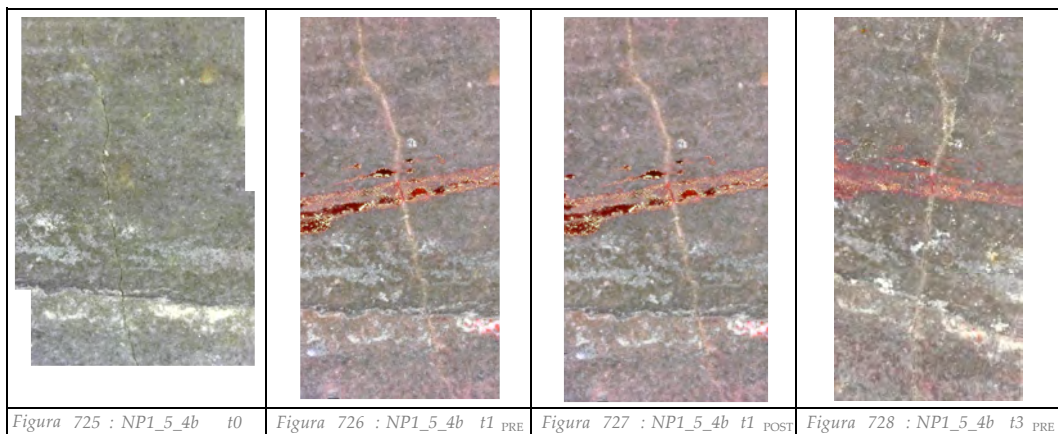
Fessura: 4

Punto di misura: a



Fessura: 4

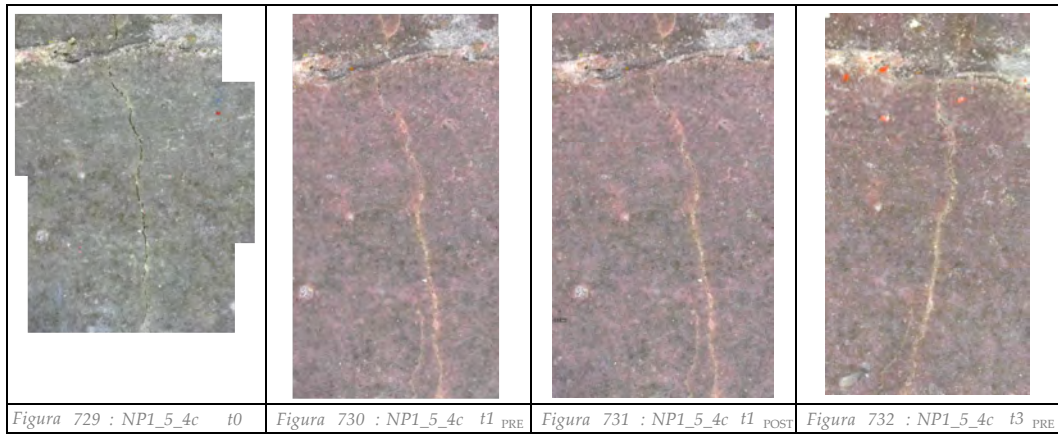
Punto di misura: b



Provino: NP1_5

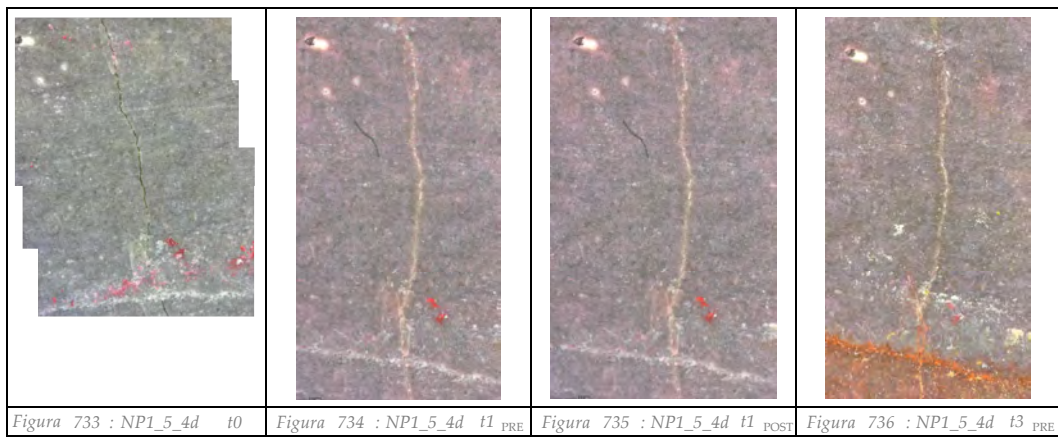
Fessura: 4

Punto di misura: c



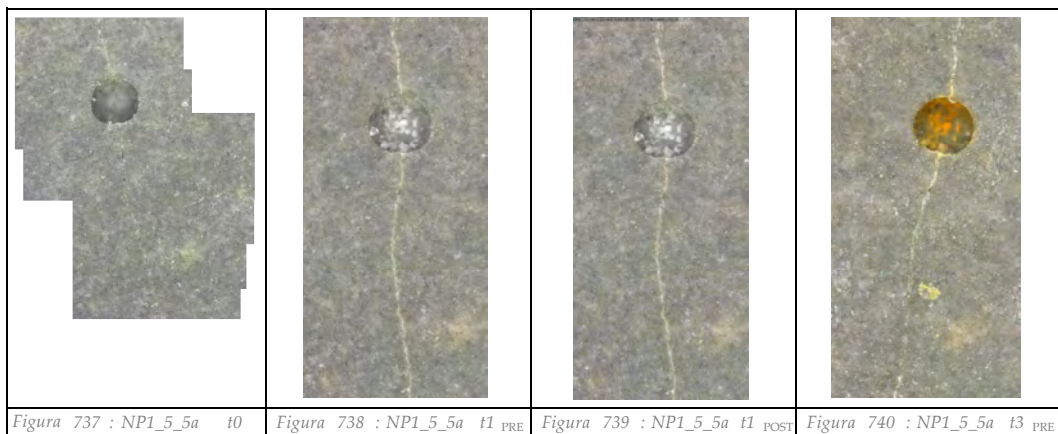
Fessura: 4

Punto di misura: d



Fessura: 5

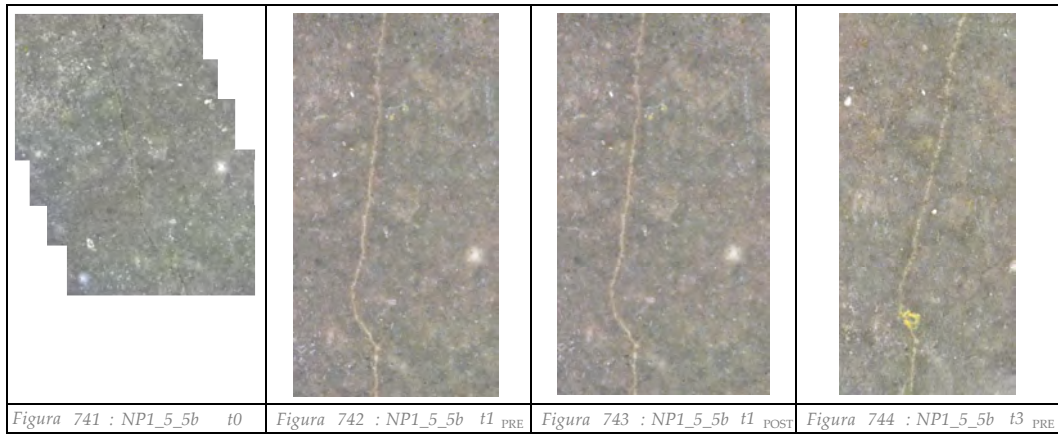
Punto di misura: a



Provino: NP1_5

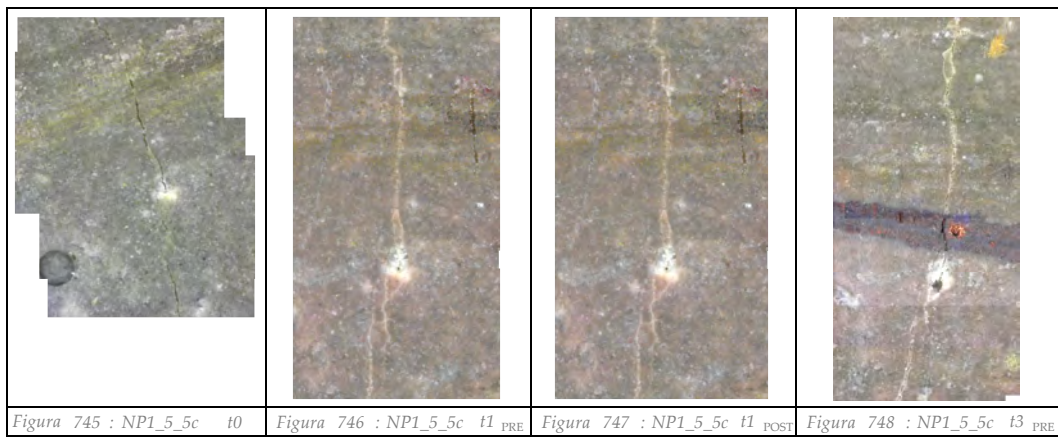
Fessura: 5

Punto di misura: b



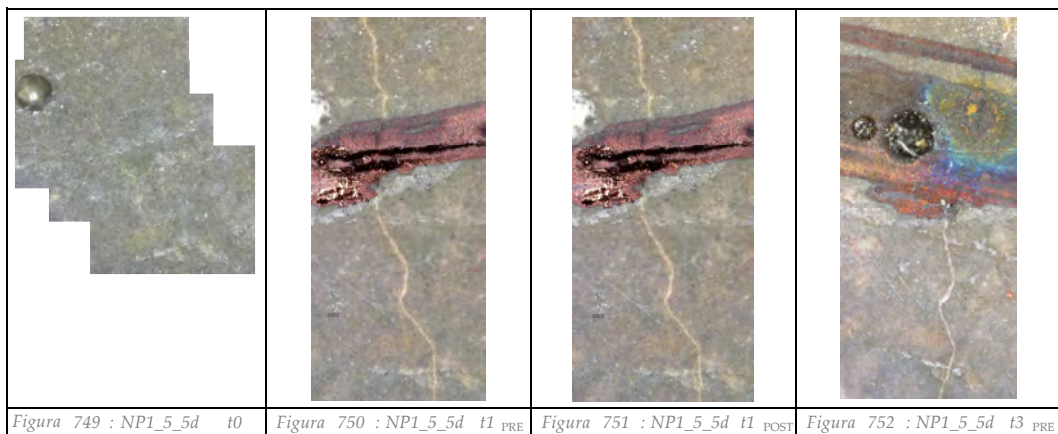
Fessura: 5

Punto di misura: c



Fessura: 5

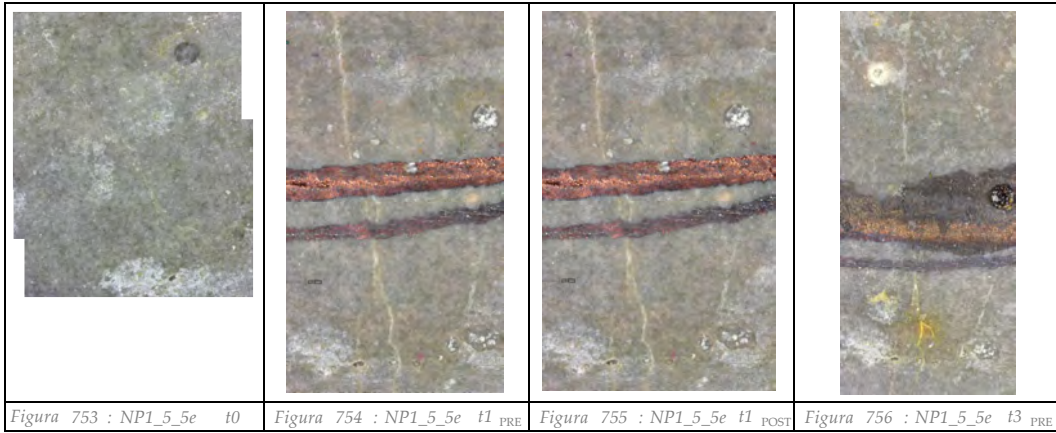
Punto di misura: d



Provino: NP1_5

Fessura: 5

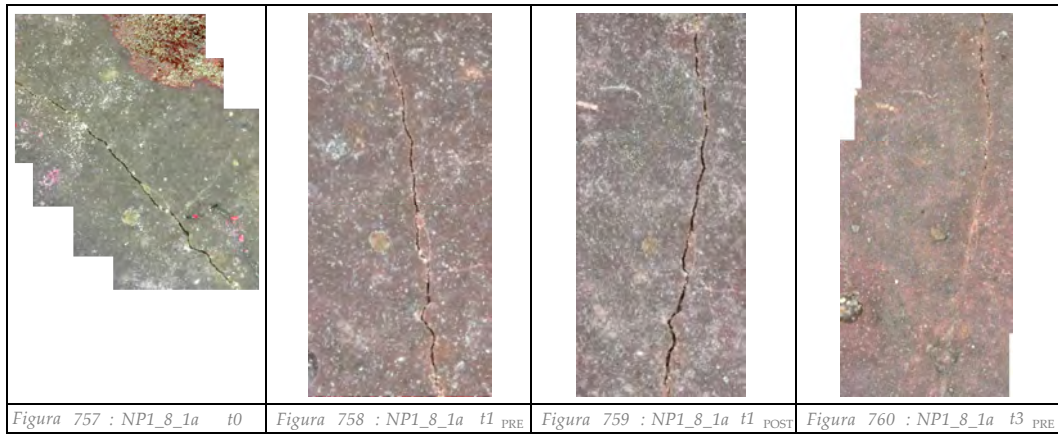
Punto di misura: e



Provino: NP1_8

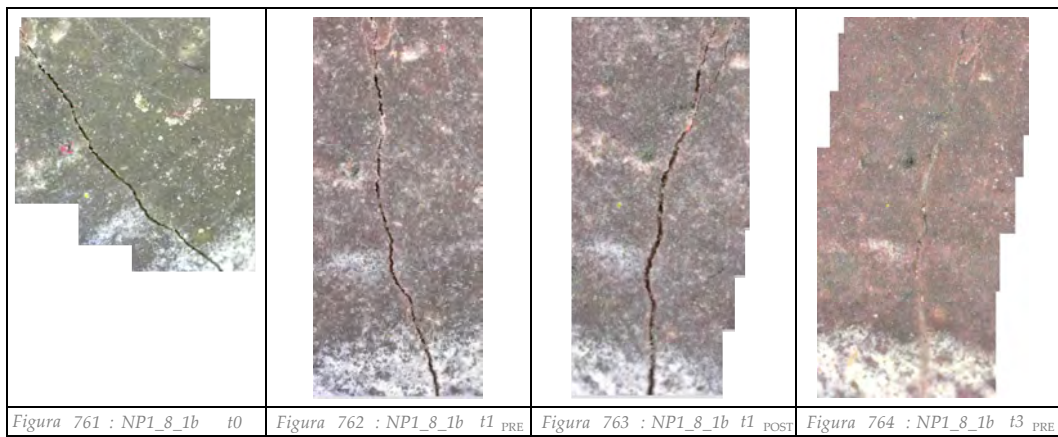
Fessura: 1

Punto di misura: a



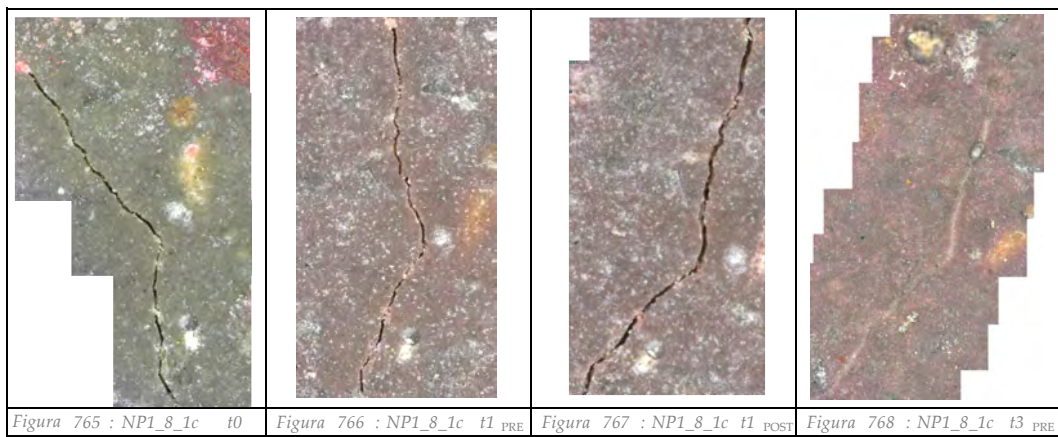
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

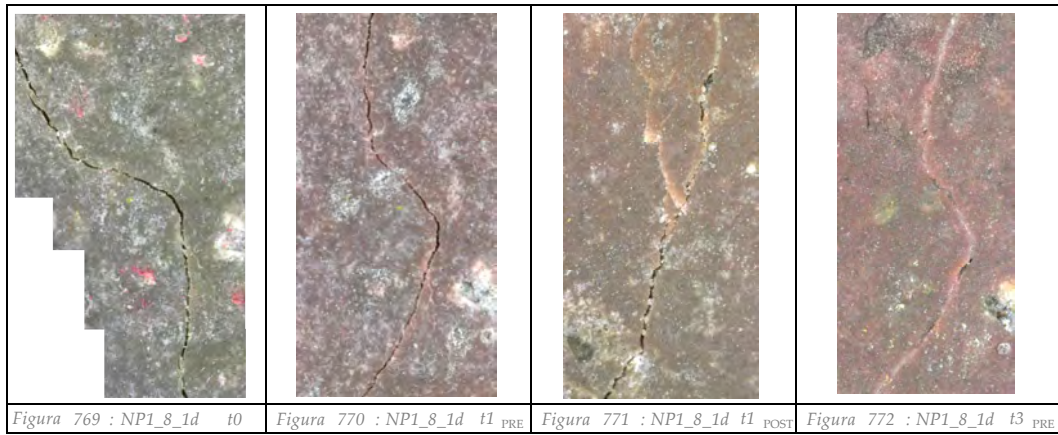
Punto di misura: c



Provino: NP1_8

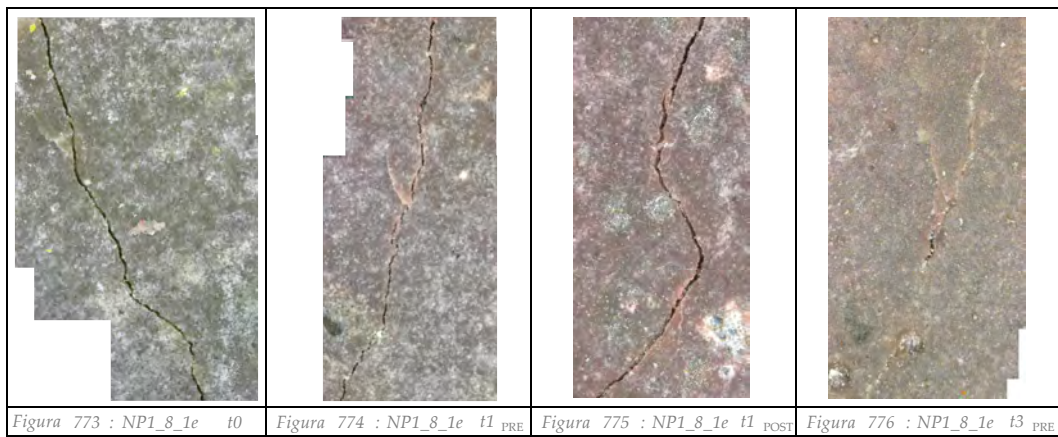
Fessura: 1

Punto di misura: d



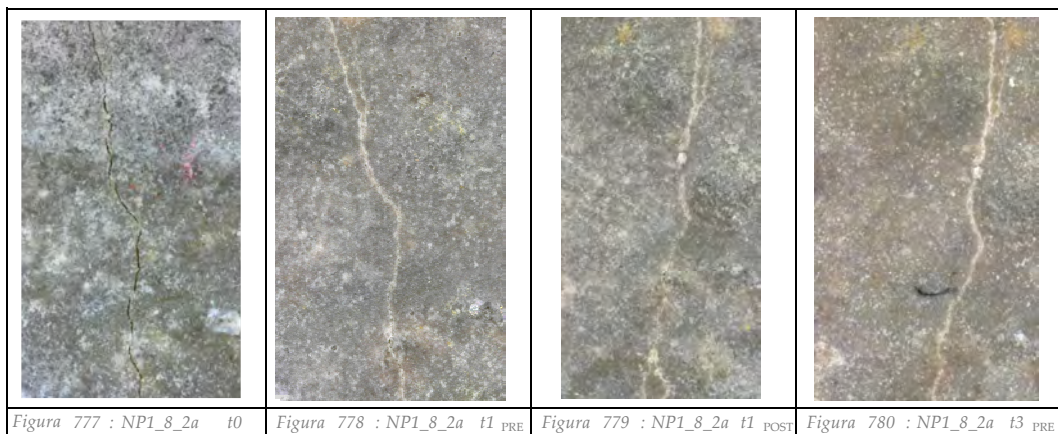
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

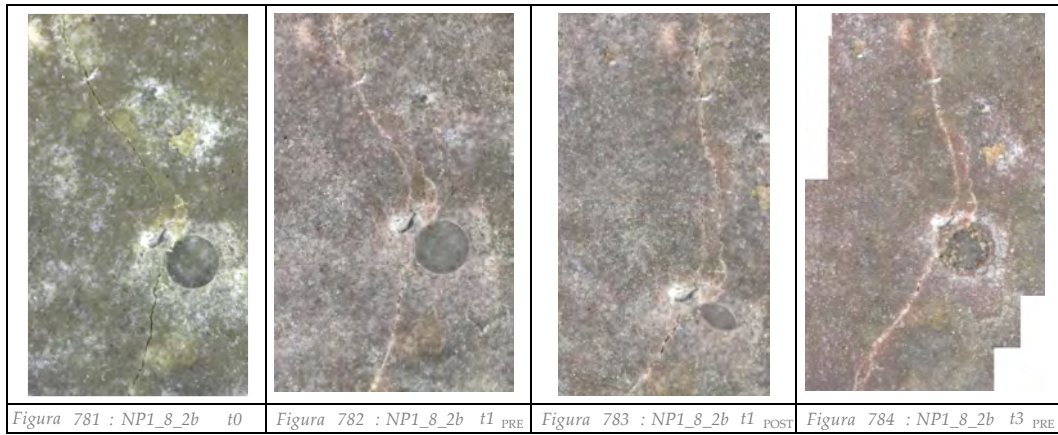
Punto di misura: a



Provino: NP1_8

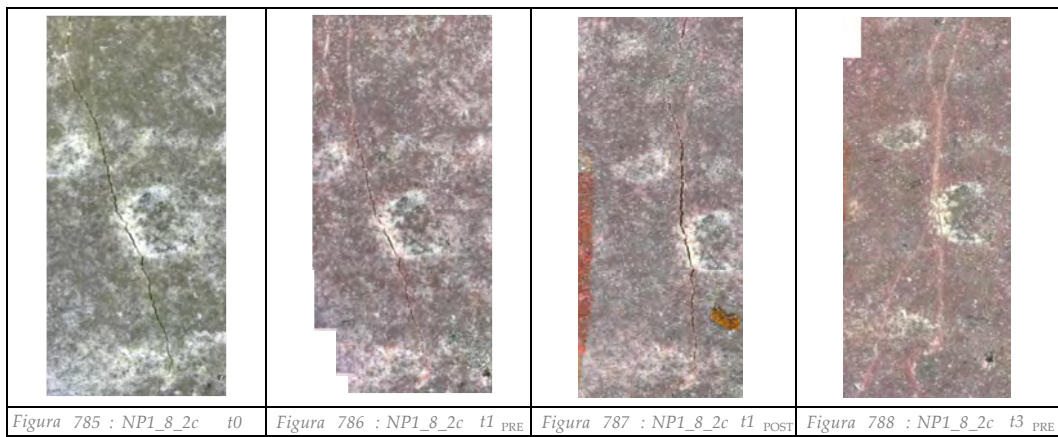
Fessura: 2

Punto di misura: b



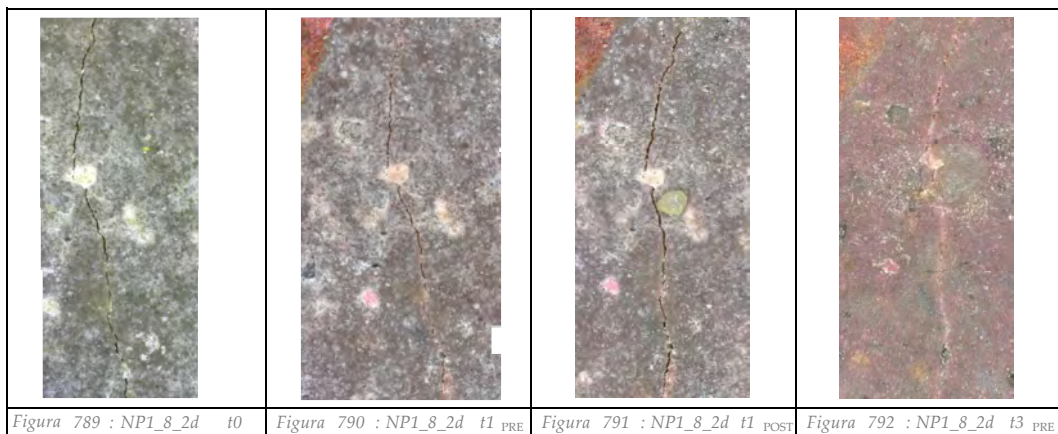
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

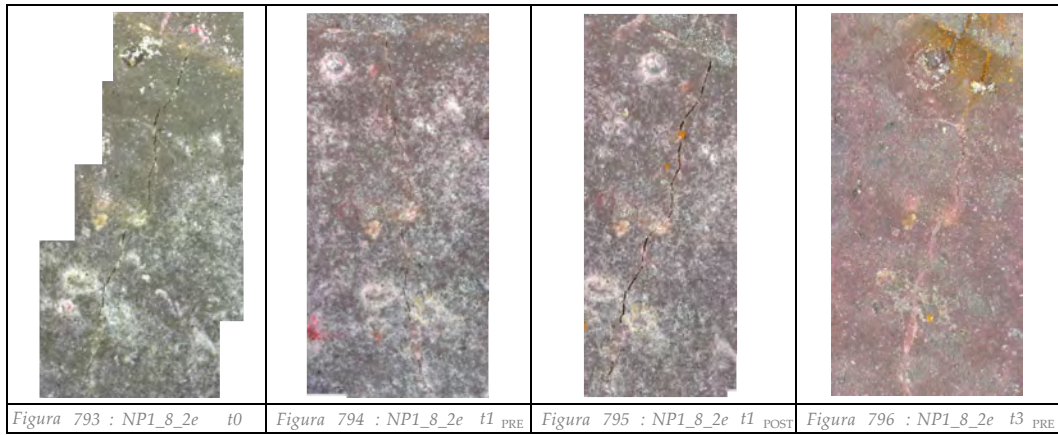
Punto di misura: d



Provino: NP1_8

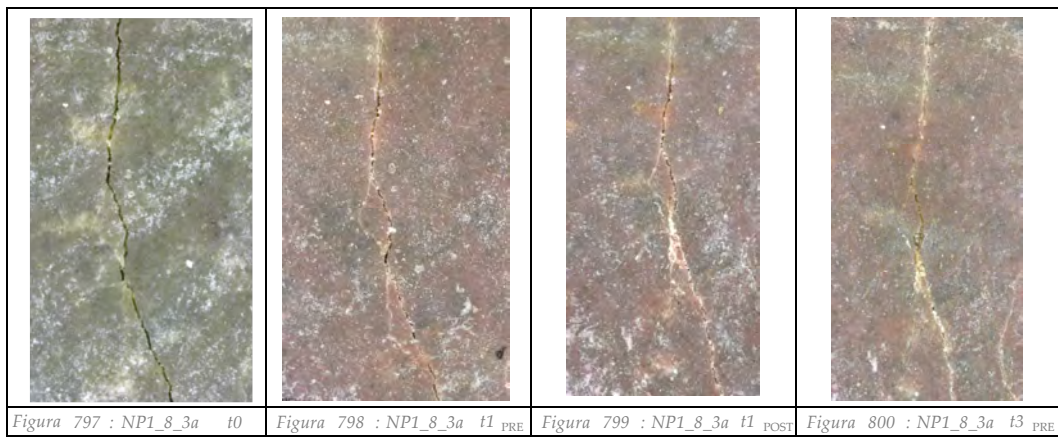
Fessura: 2

Punto di misura: e



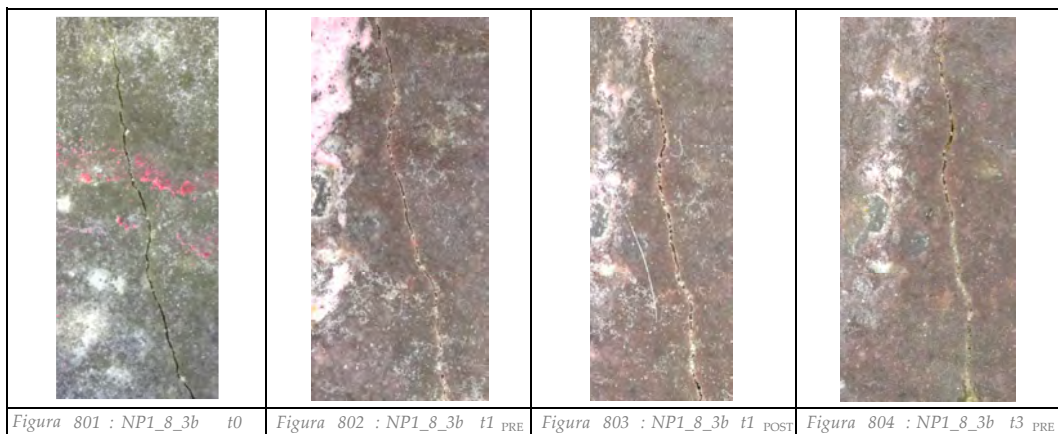
Fessura: 3

Punto di misura: a



Fessura: 3

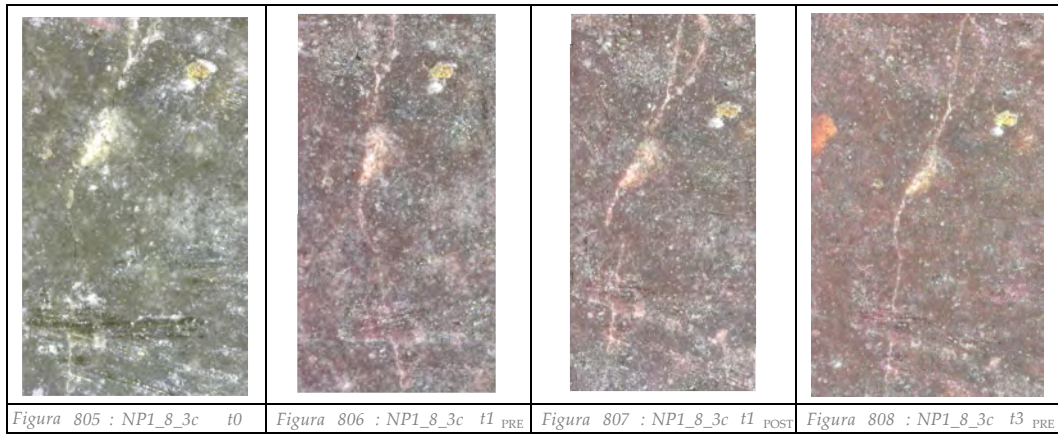
Punto di misura: b



Provino: NP1_8

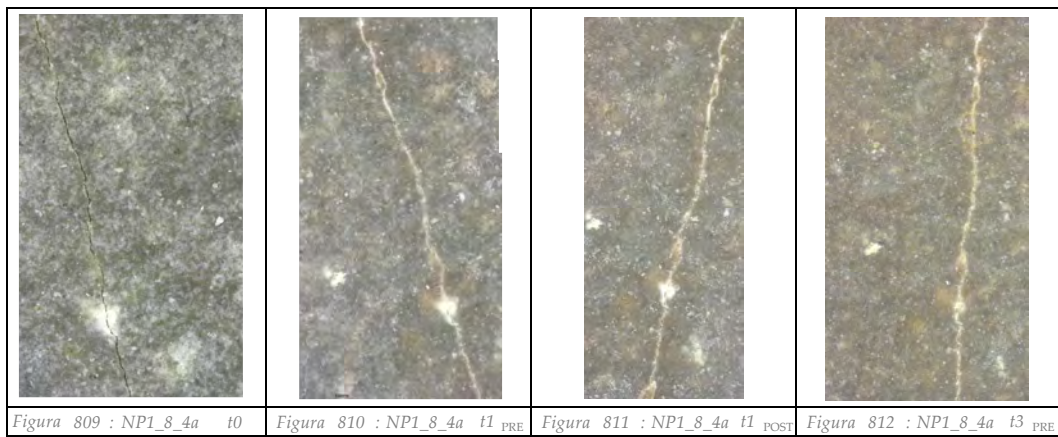
Fessura: 3

Punto di misura: c



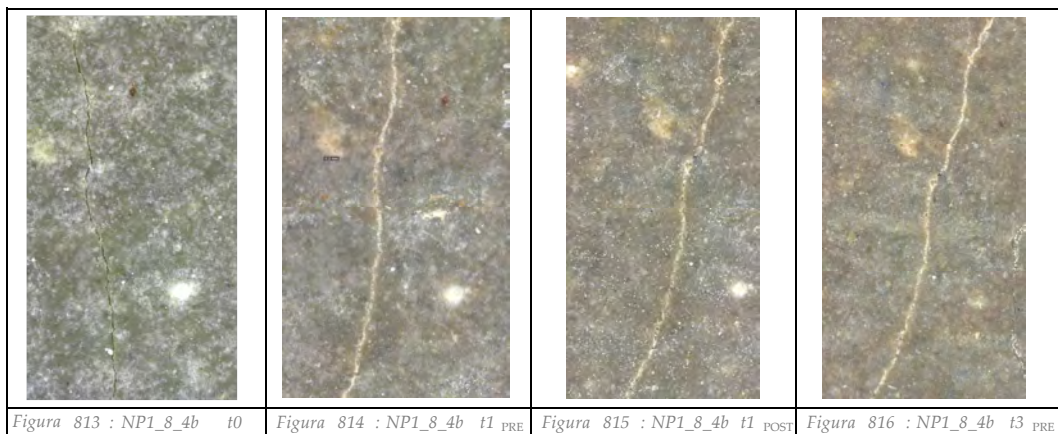
Fessura: 4

Punto di misura: a



Fessura: 4

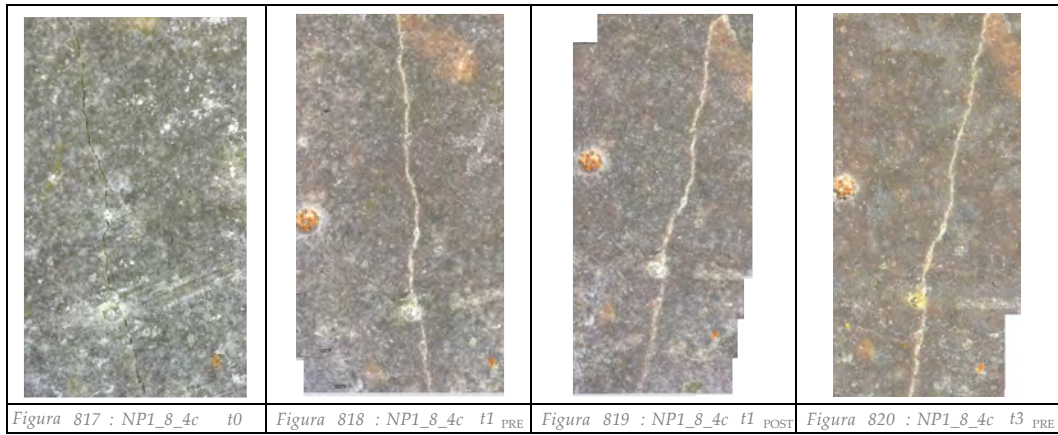
Punto di misura: b



Provino: NP1_8

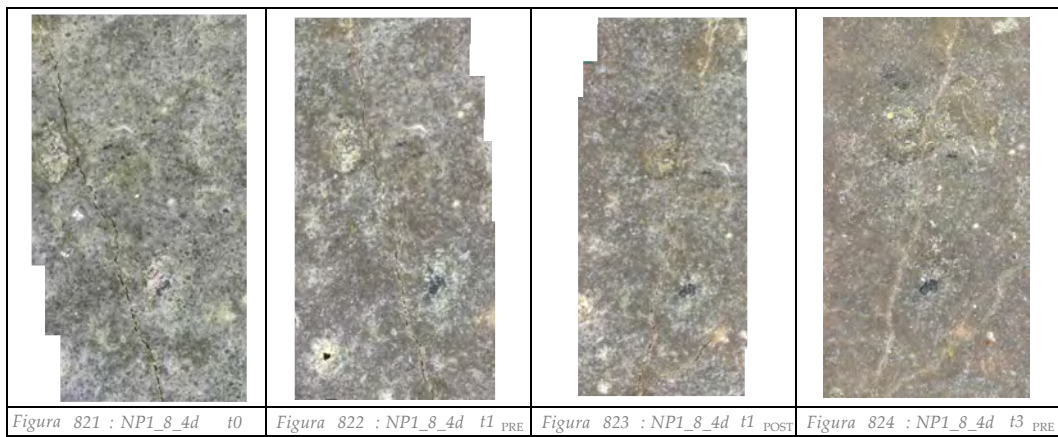
Fessura: 4

Punto di misura: c



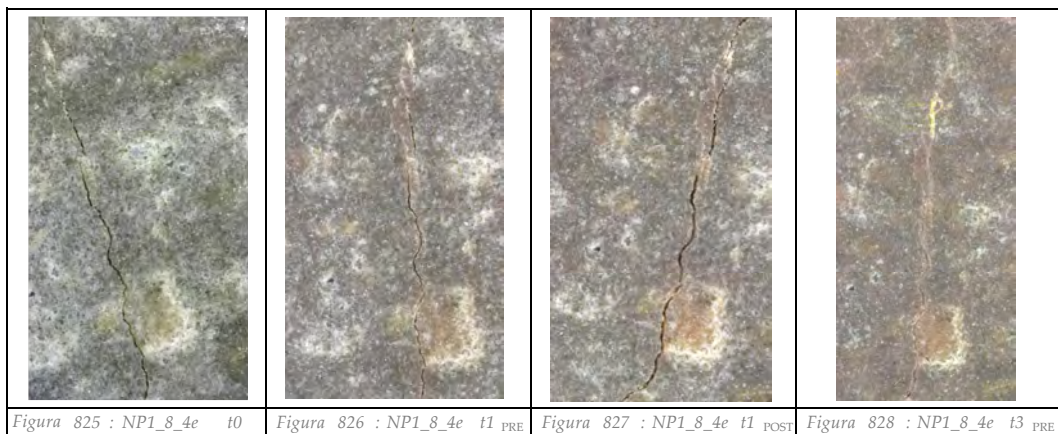
Fessura: 4

Punto di misura: d



Fessura: 4

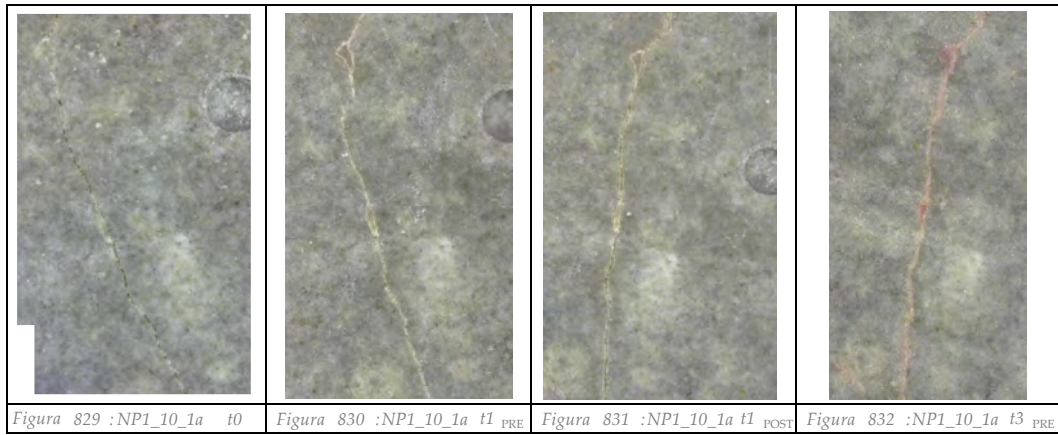
Punto di misura: e



Provino: NP1_10

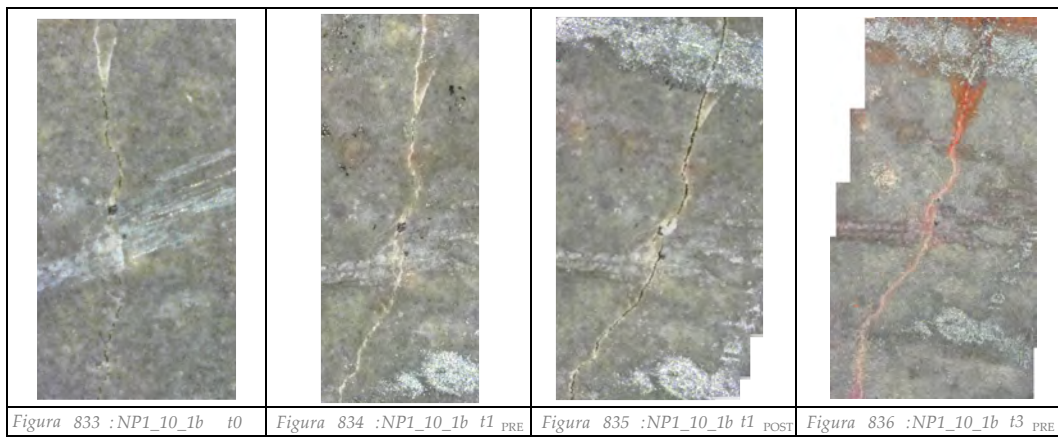
Fessura: 1

Punto di misura: a



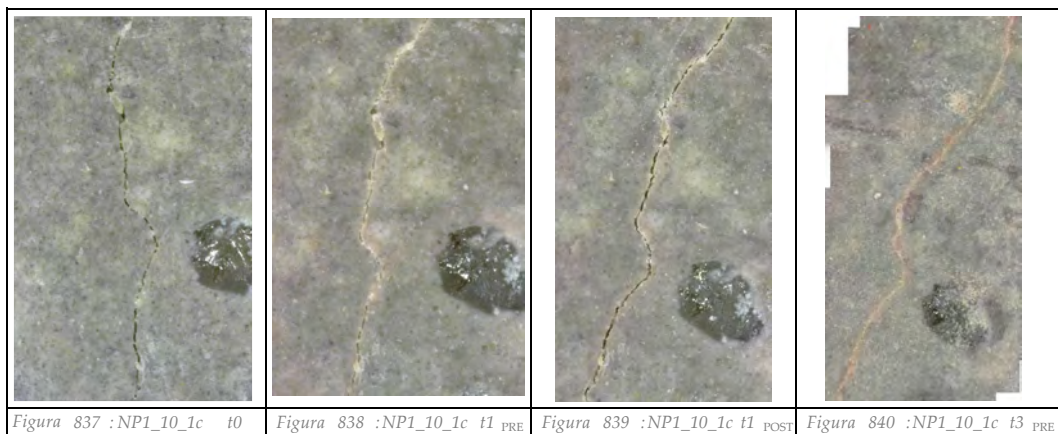
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 2

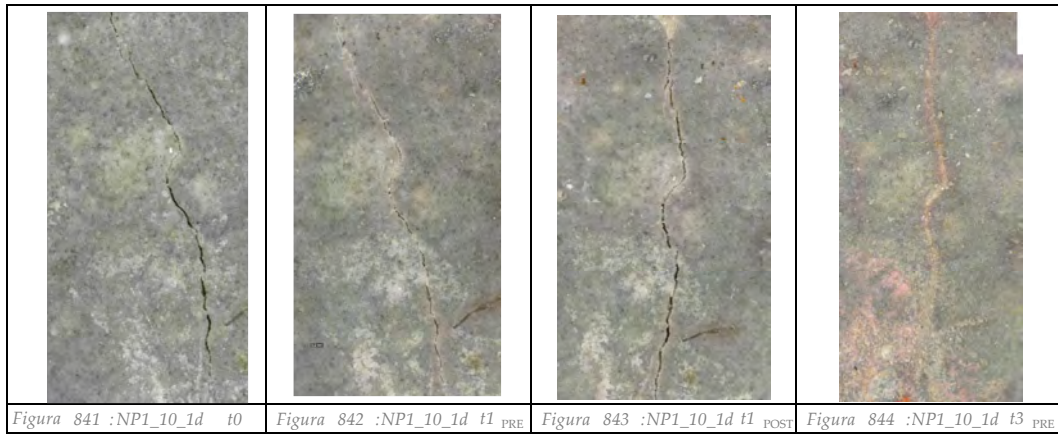
Punto di misura: c



Provino: NP1_10

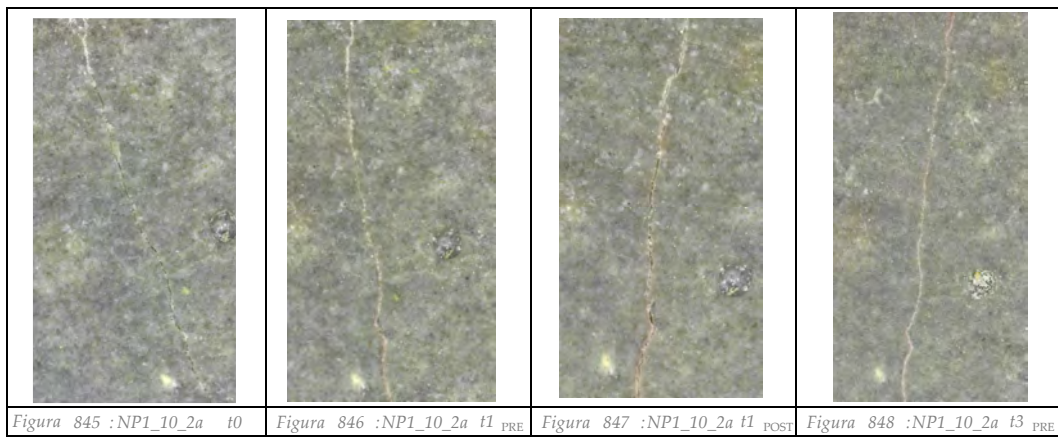
Fessura: 1

Punto di misura: c



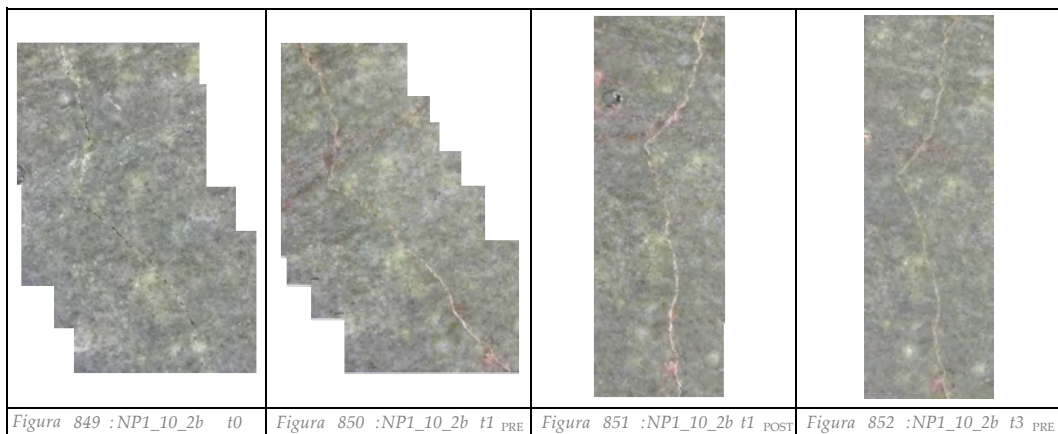
Fessura: 2

Punto di misura: a



Fessura: 2

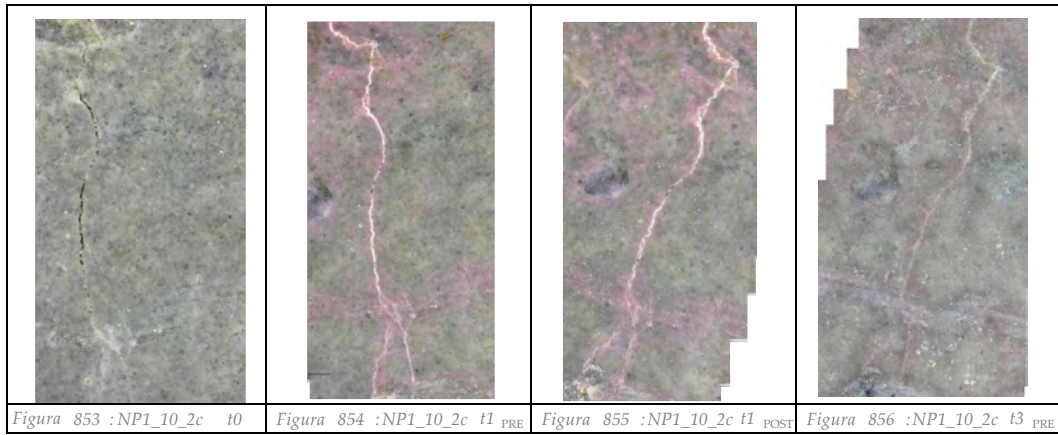
Punto di misura: b



Provino: NP1_10

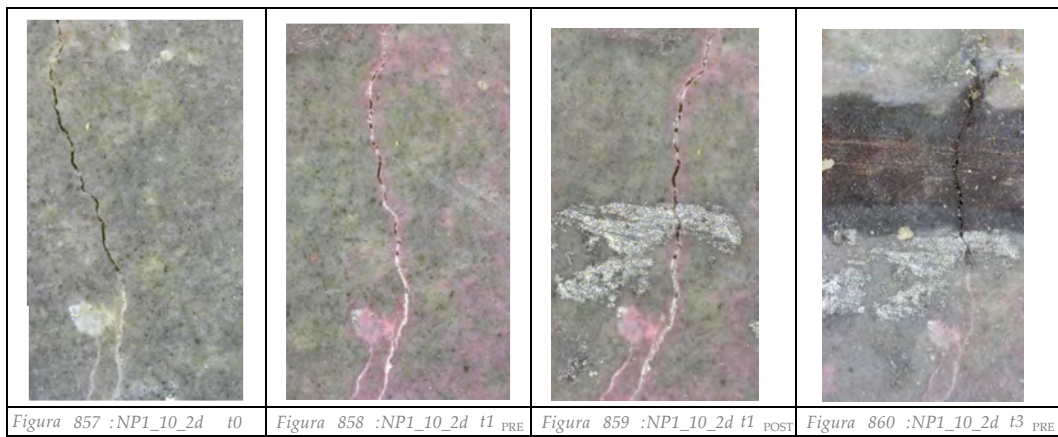
Fessura: 2

Punto di misura: c



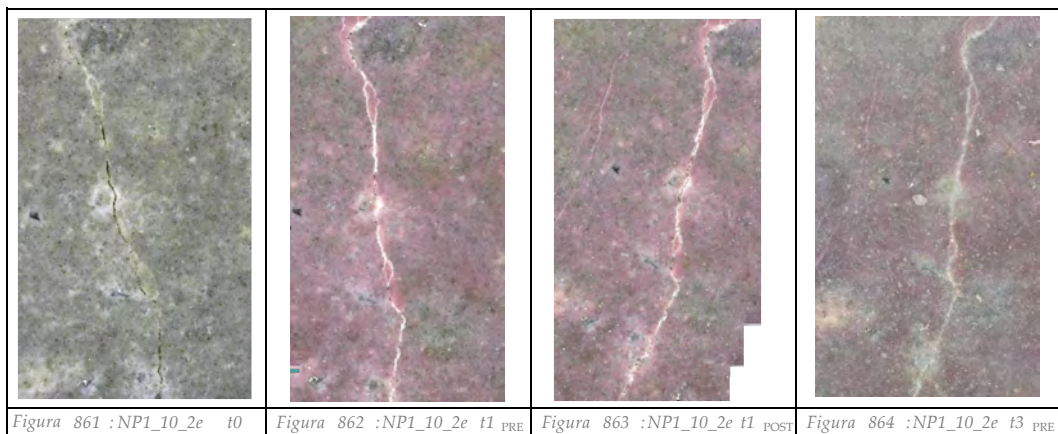
Fessura: 2

Punto di misura: d



Fessura: 2

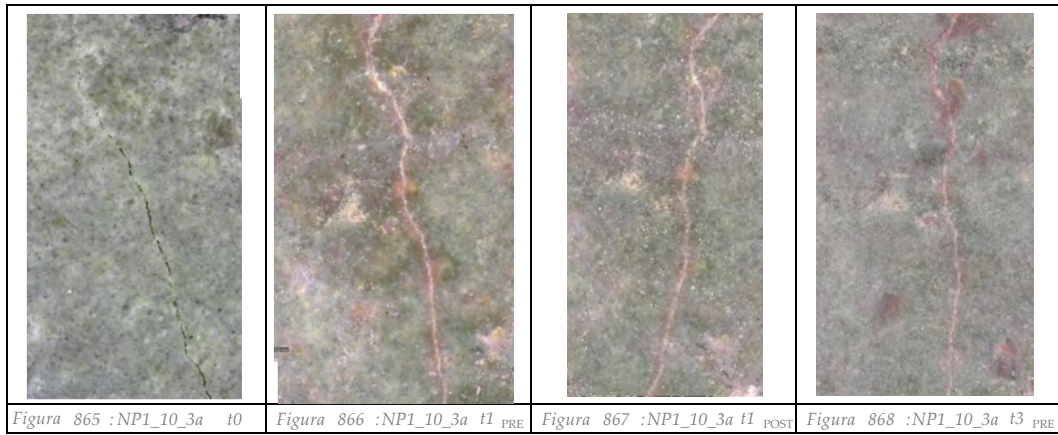
Punto di misura: e



Provino: NP1_10

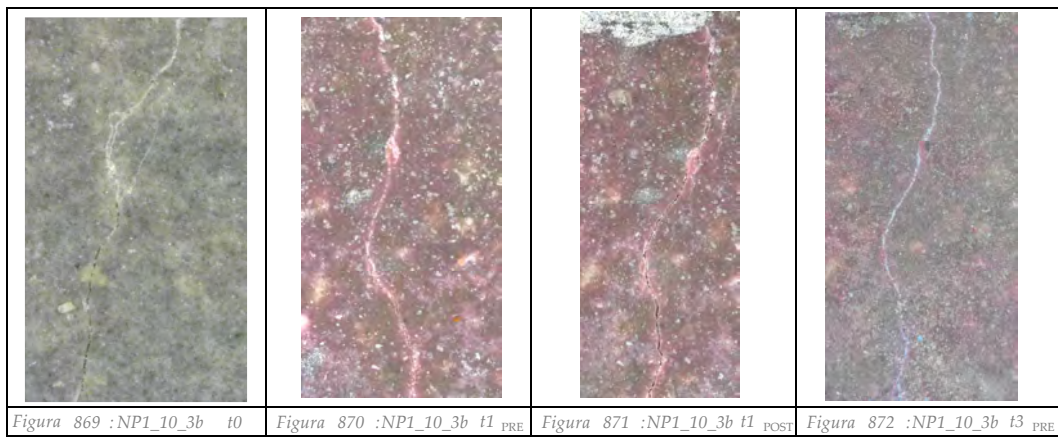
Fessura: 3

Punto di misura: a



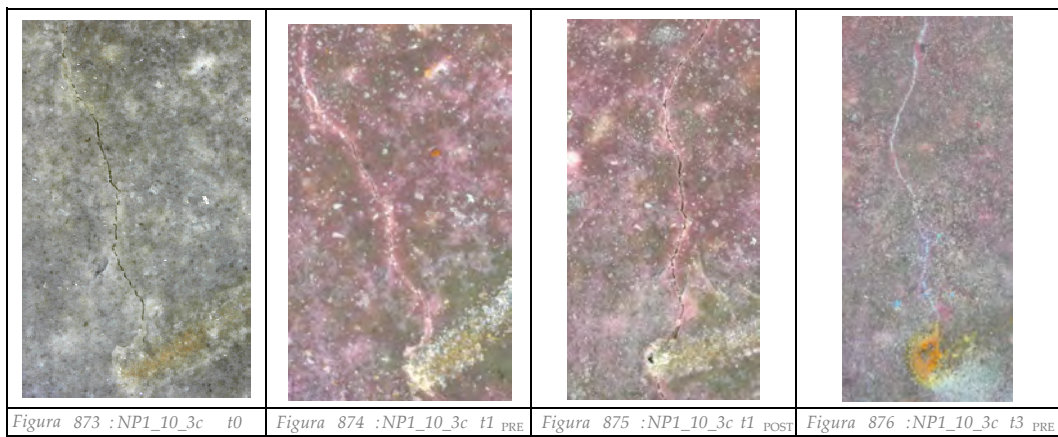
Fessura: 3

Punto di misura: b



Fessura: 3

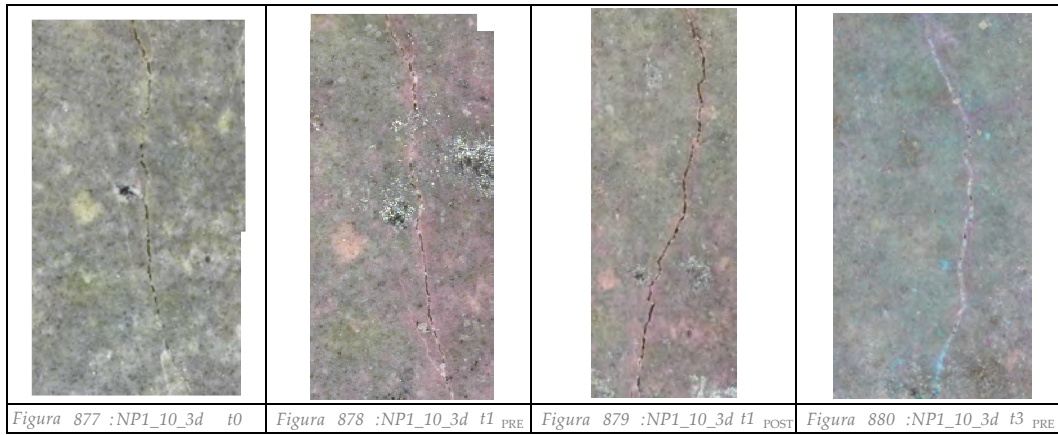
Punto di misura: c



Provino: NP1_10

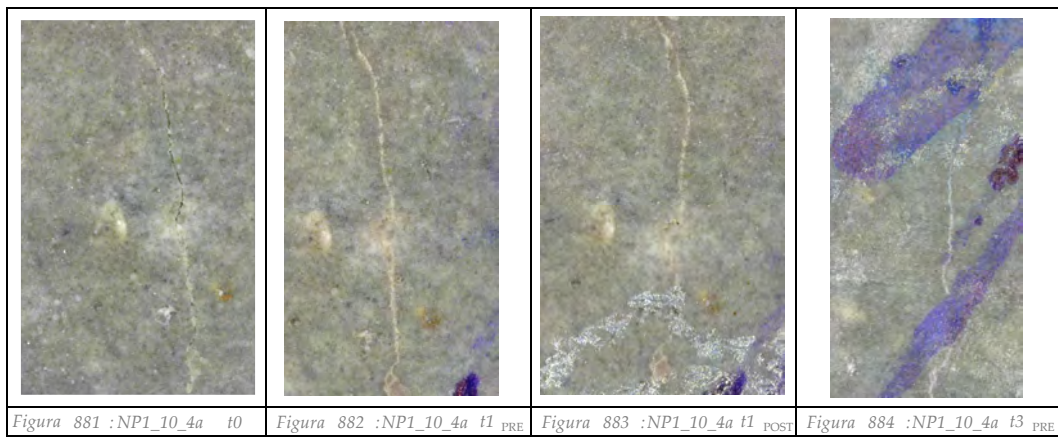
Fessura: 3

Punto di misura: d



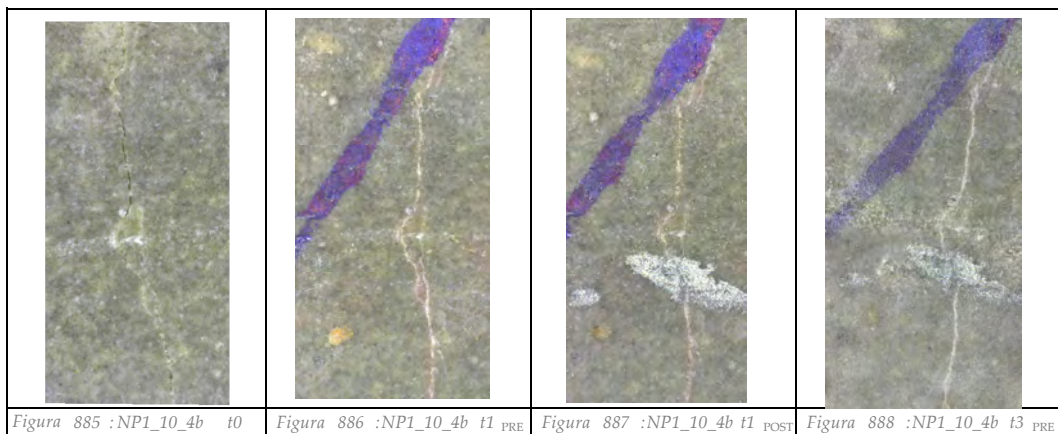
Fessura: 4

Punto di misura: a



Fessura: 4

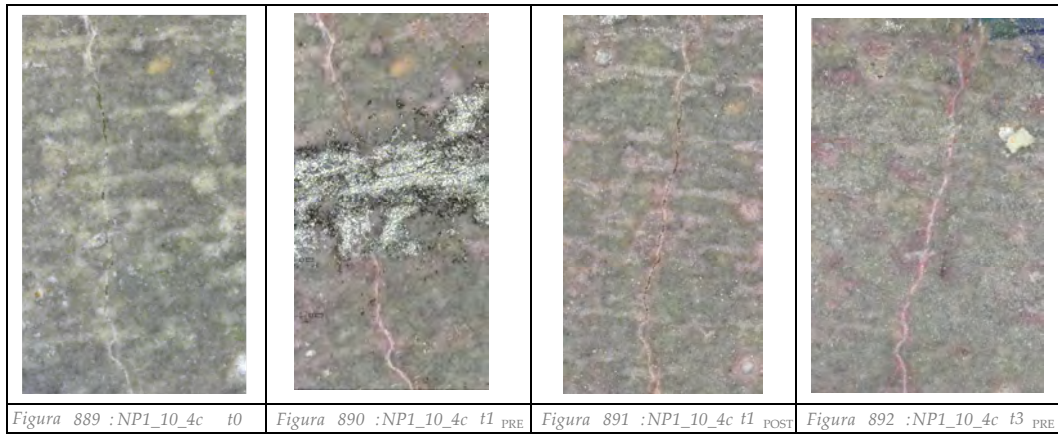
Punto di misura: b



Provino: NP1_10

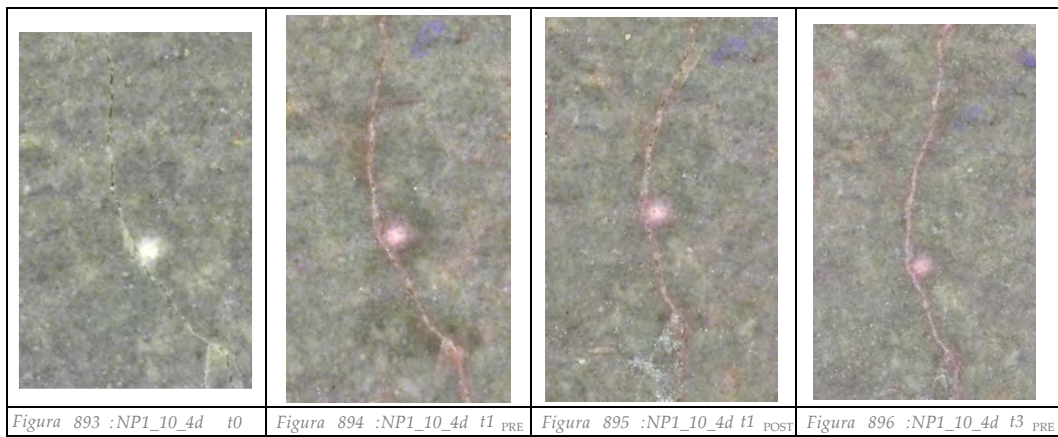
Fessura: 4

Punto di misura: c



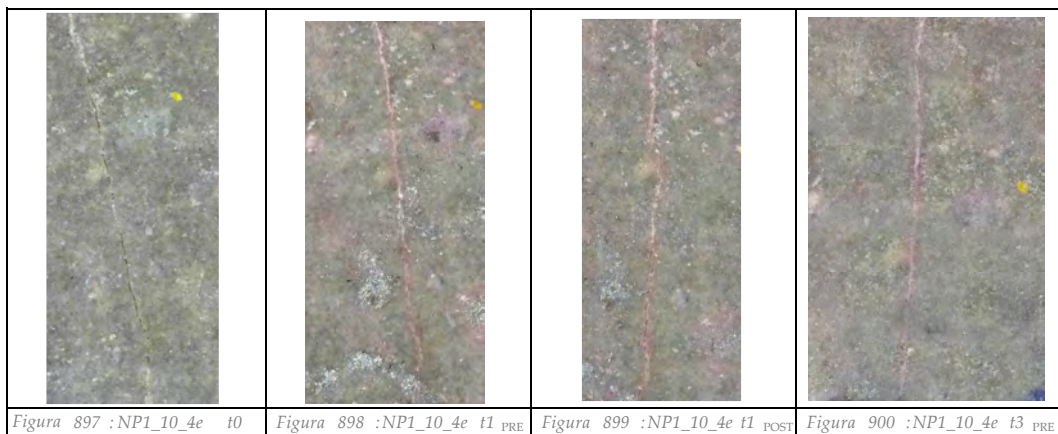
Fessura: 4

Punto di misura: d



Fessura: 4

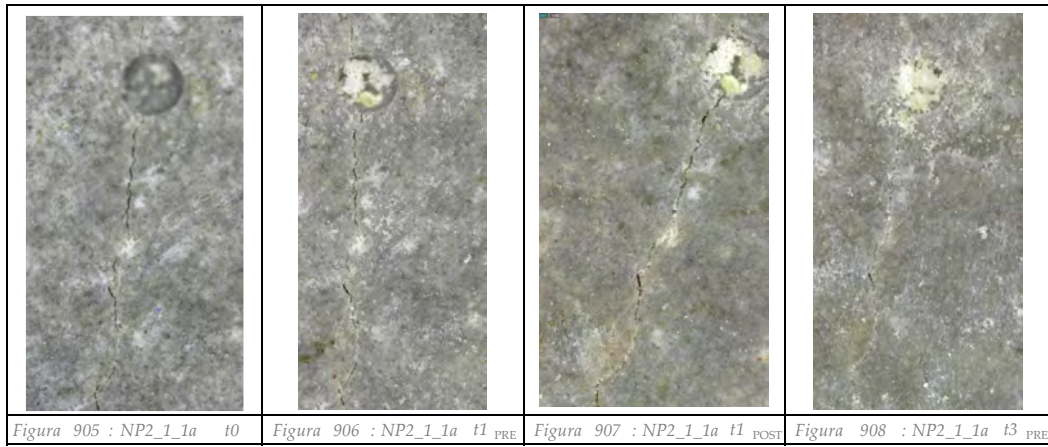
Punto di misura: e



Provino: NP2_1

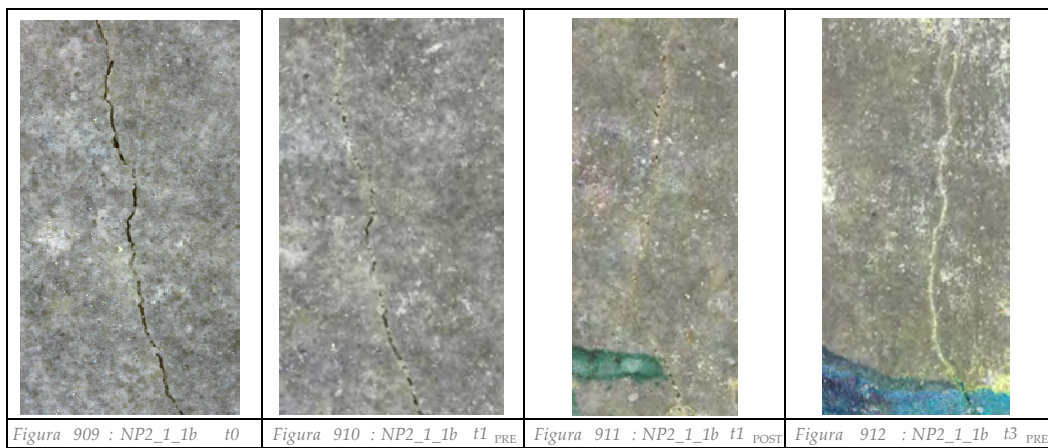
Fessura: 1

Punto di misura: a



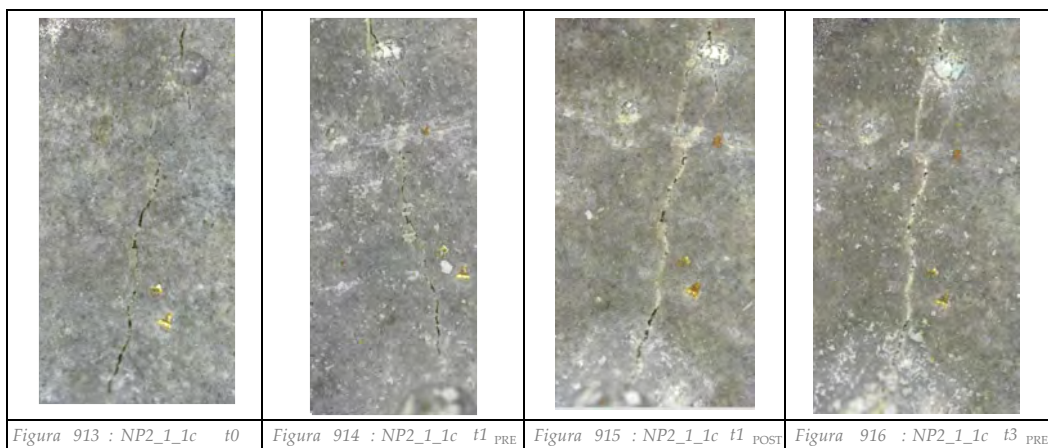
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

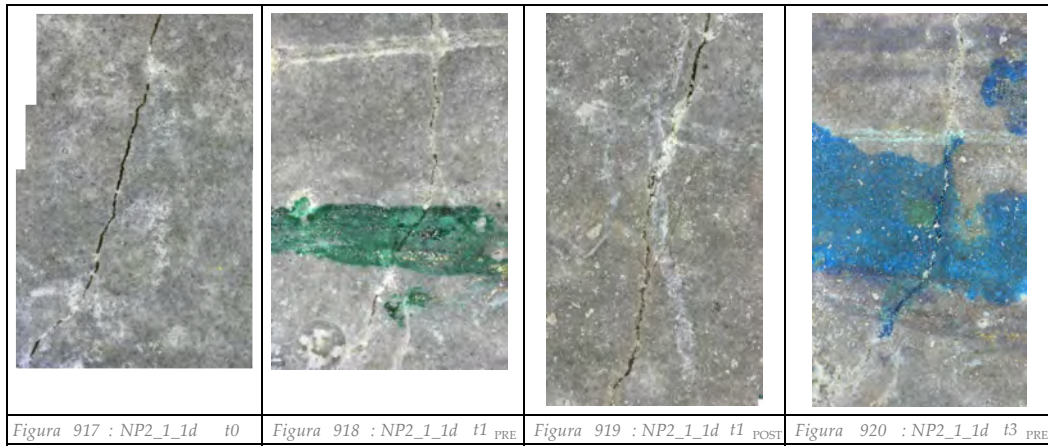
Punto di misura: c



Provino: NP2_1

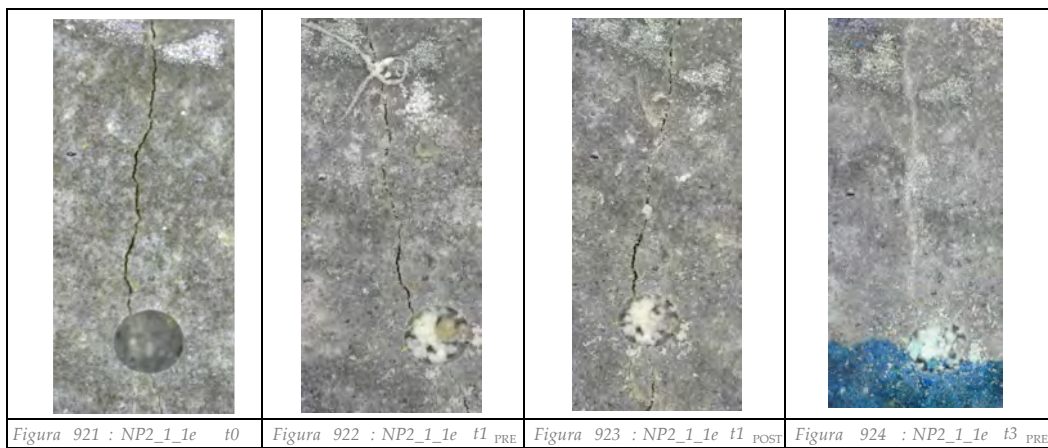
Fessura: 1

Punto di misura: d



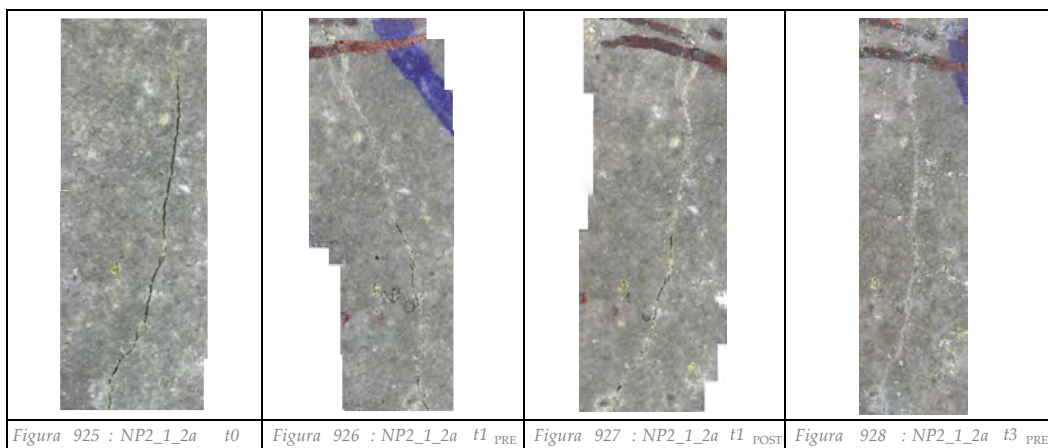
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

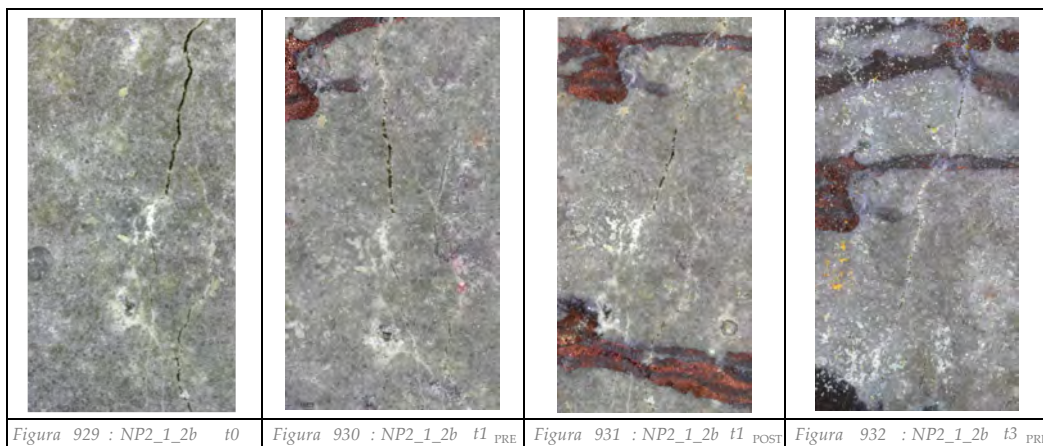
Punto di misura: a



Provino: NP2_1

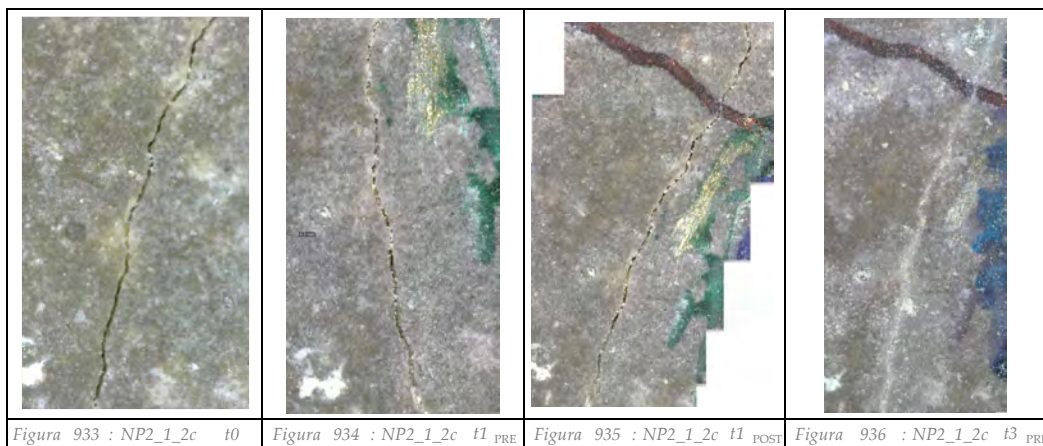
Fessura: 2

Punto di misura: b



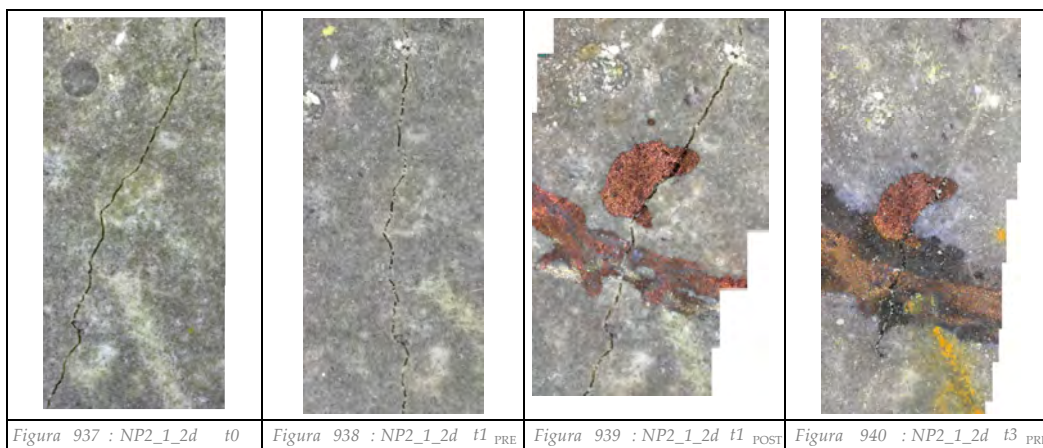
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

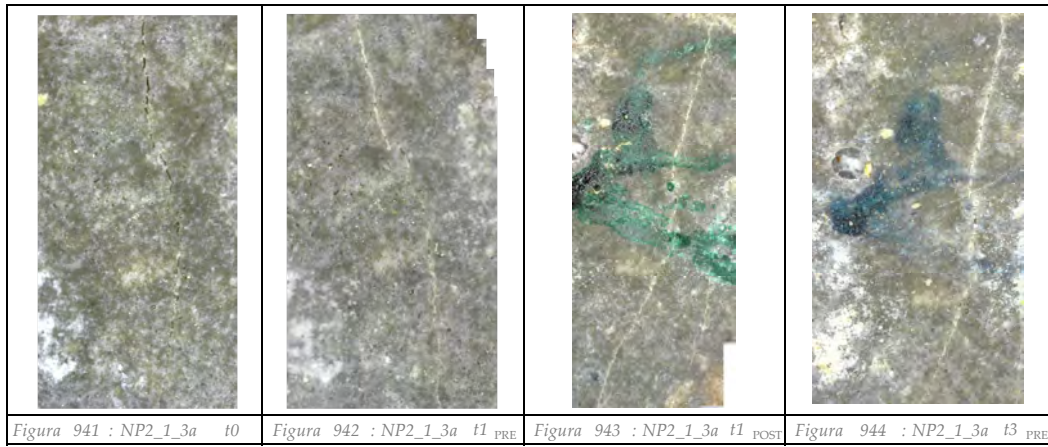
Punto di misura: d



Provino: NP2_1

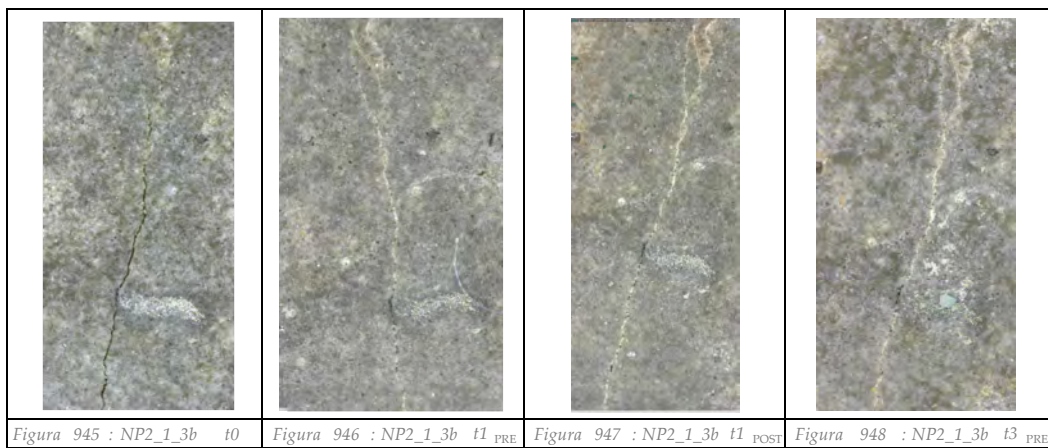
Fessura: 3

Punto di misura: a



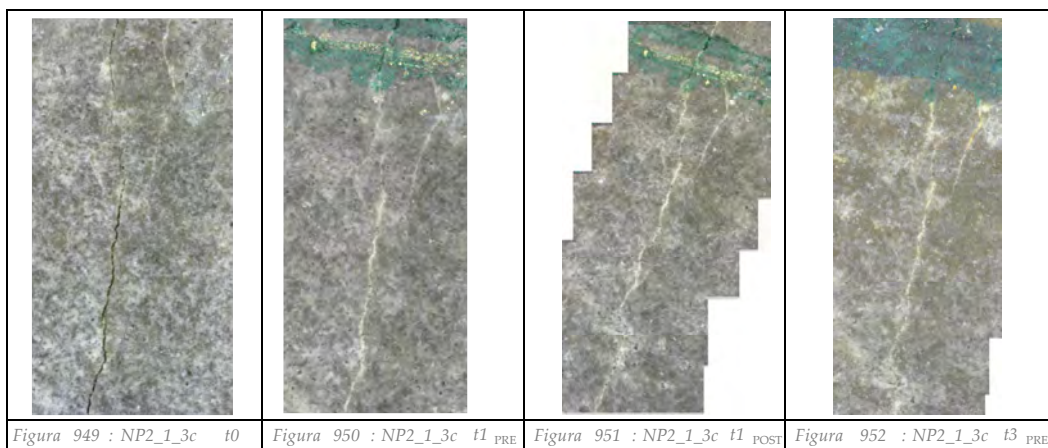
Fessura: 3

Punto di misura: b



Fessura: 3

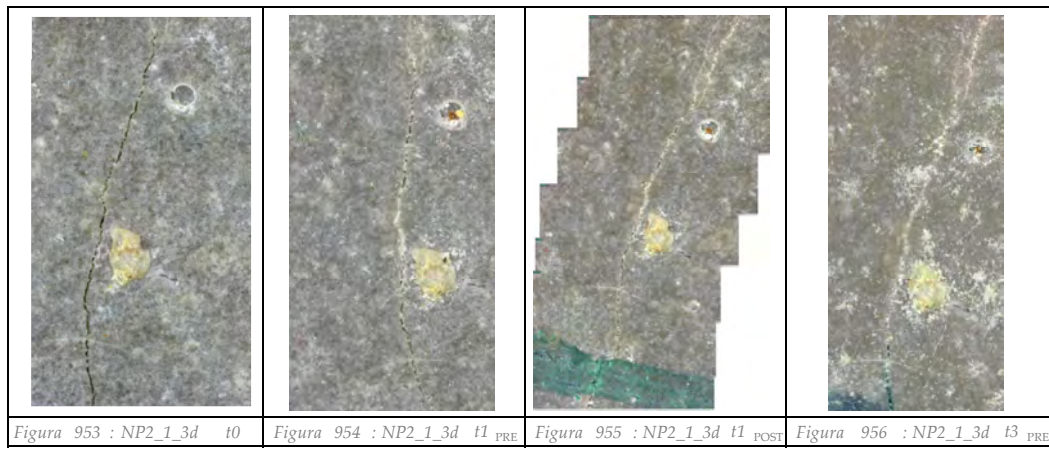
Punto di misura: c



Provino: NP2_1

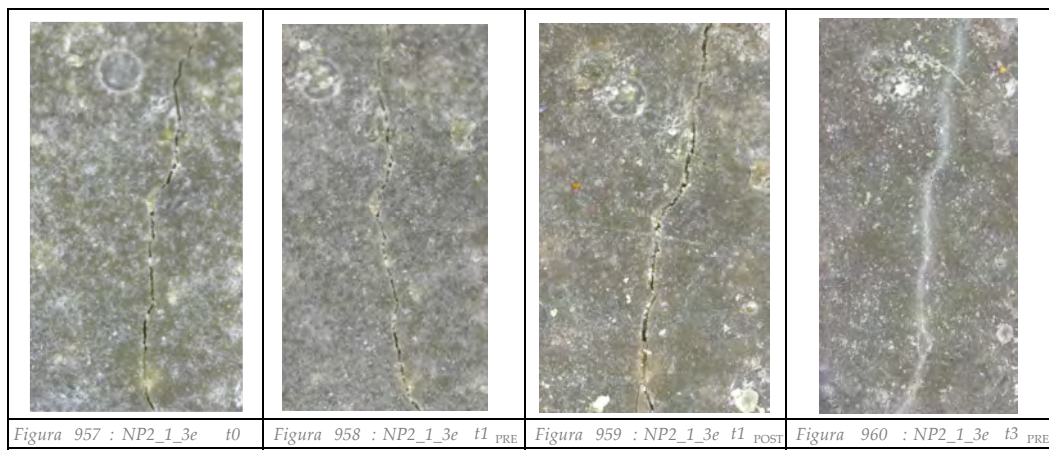
Fessura: 3

Punto di misura: d



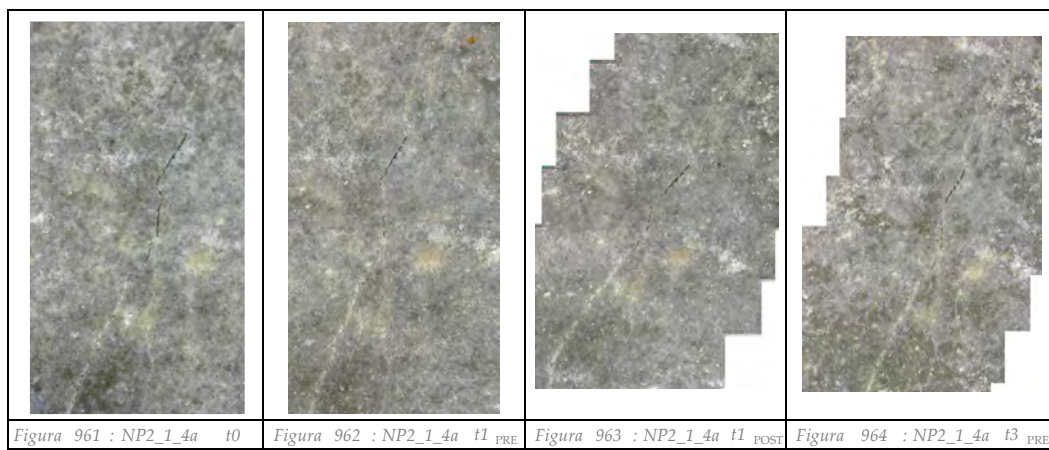
Fessura: 3

Punto di misura: e



Fessura: 4

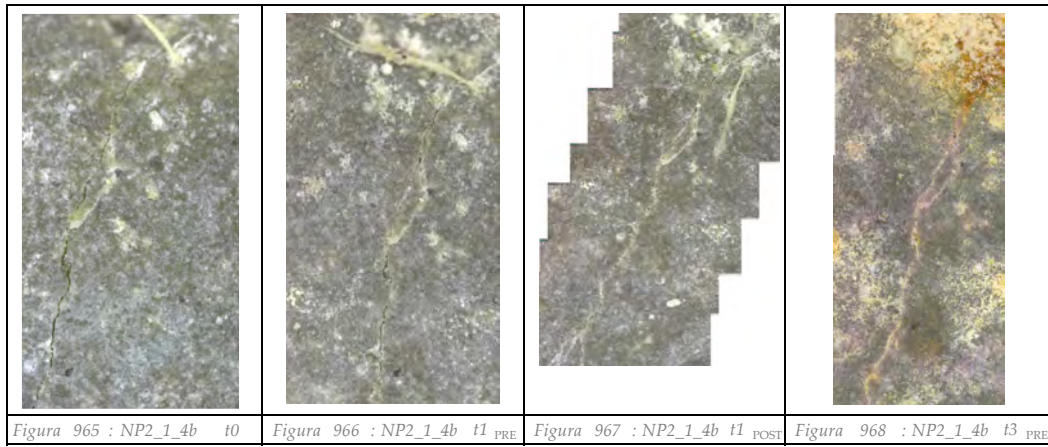
Punto di misura: a



Provino: NP2_1

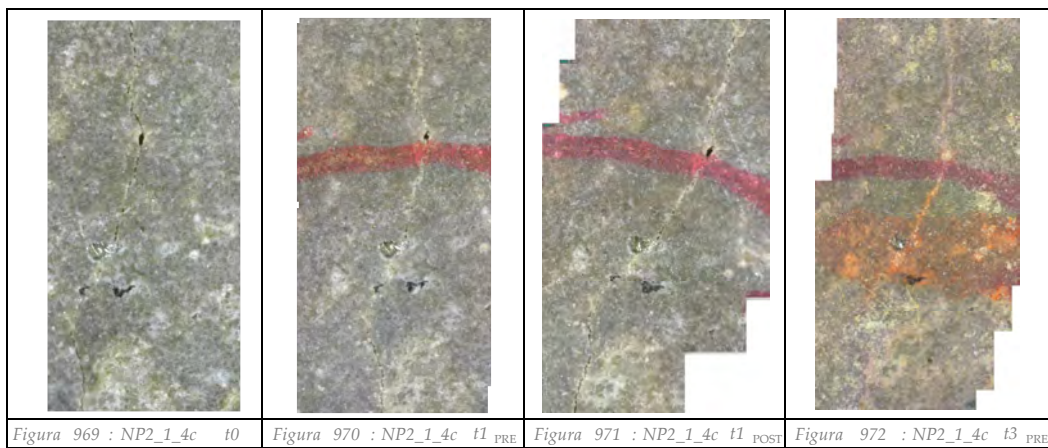
Fessura: 4

Punto di misura: b



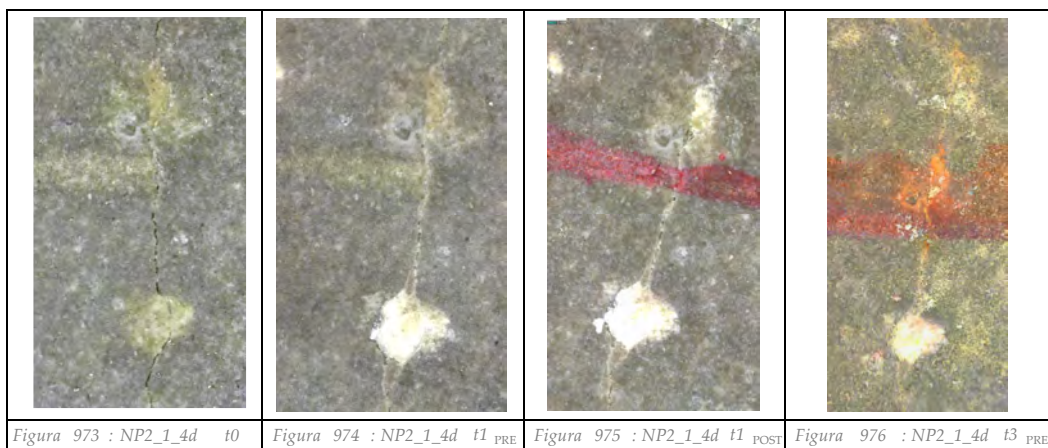
Fessura: 4

Punto di misura: c



Fessura: 4

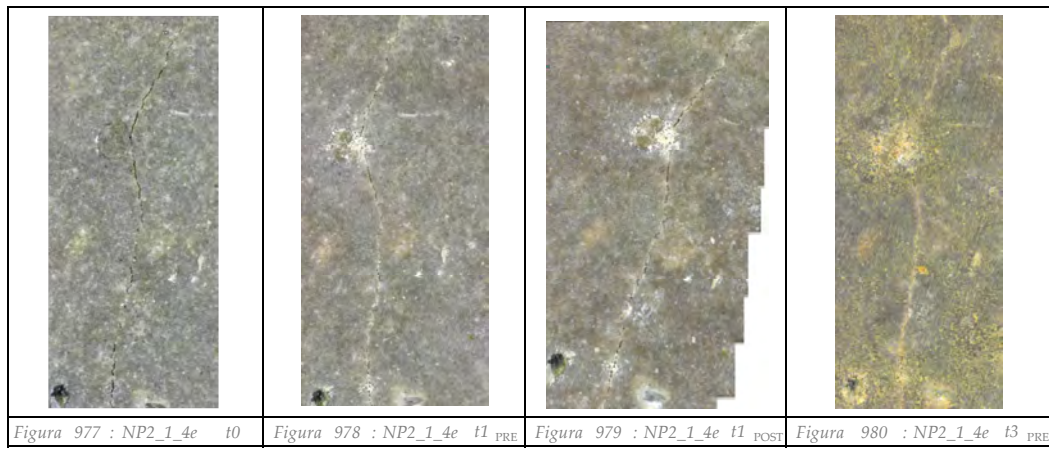
Punto di misura: d



Provino: NP2_1

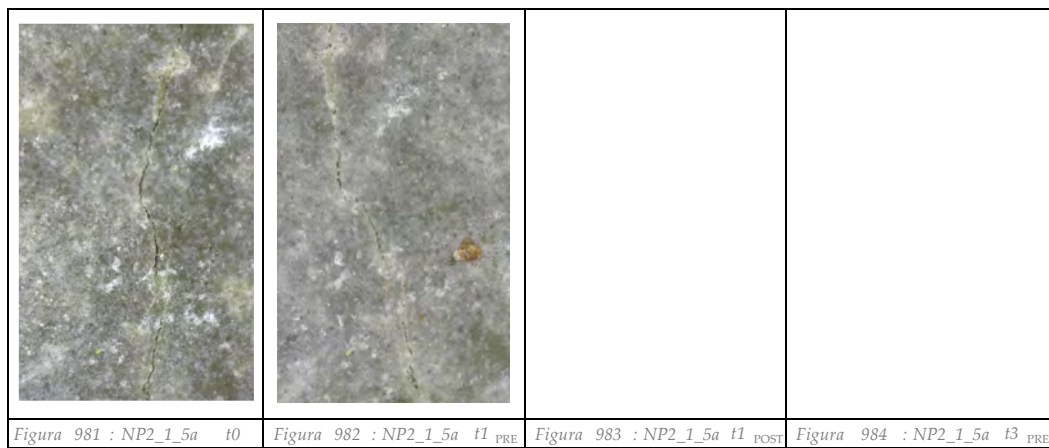
Fessura: 4

Punto di misura: e



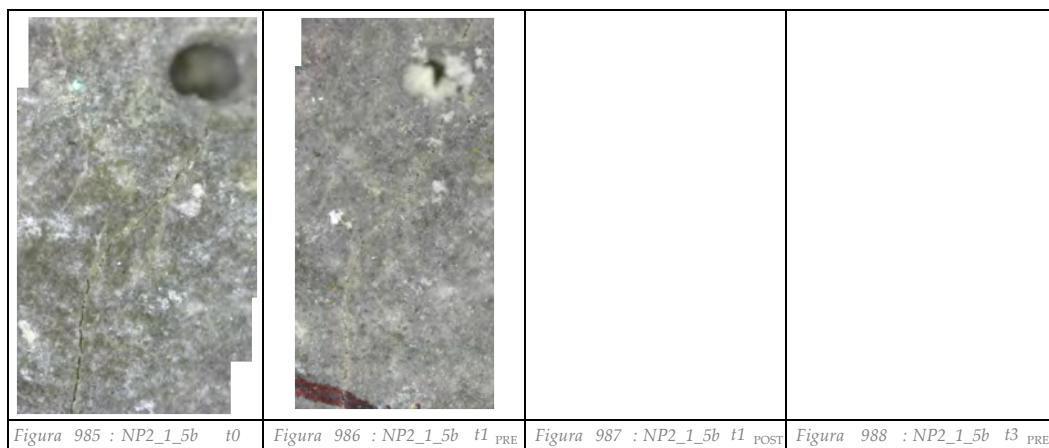
Fessura: 5

Punto di misura: a



Fessura: 5

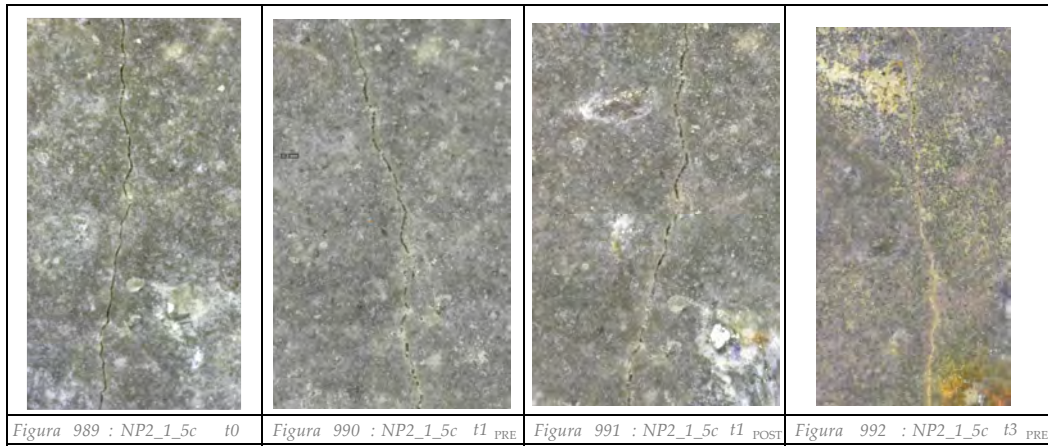
Punto di misura: b



Provino: NP2_1

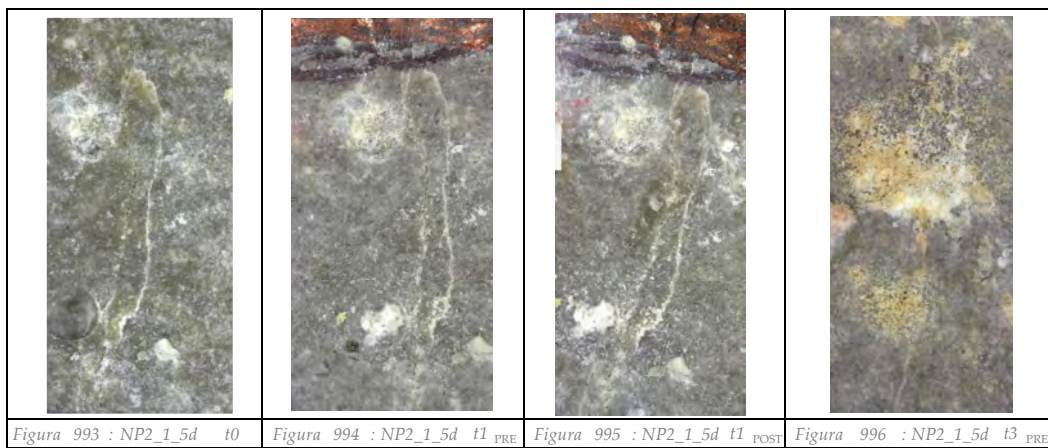
Fessura: 5

Punto di misura: c



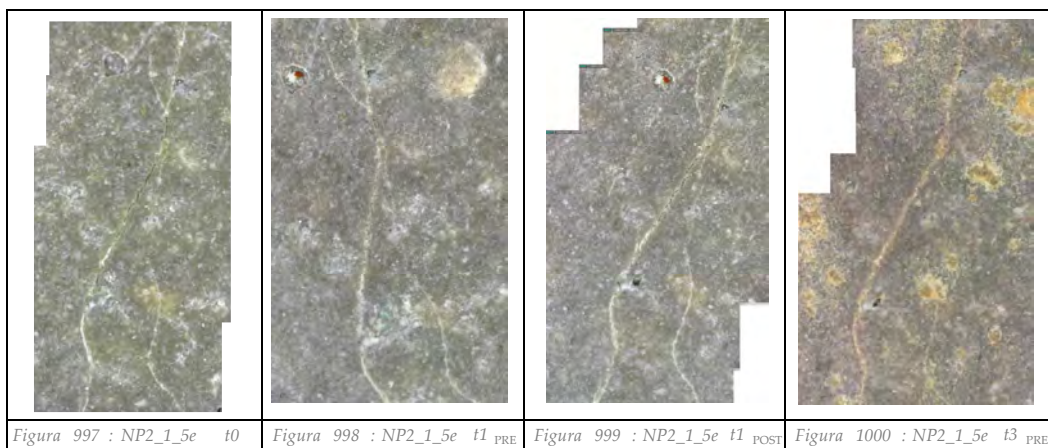
Fessura: 5

Punto di misura: d



Fessura: 5

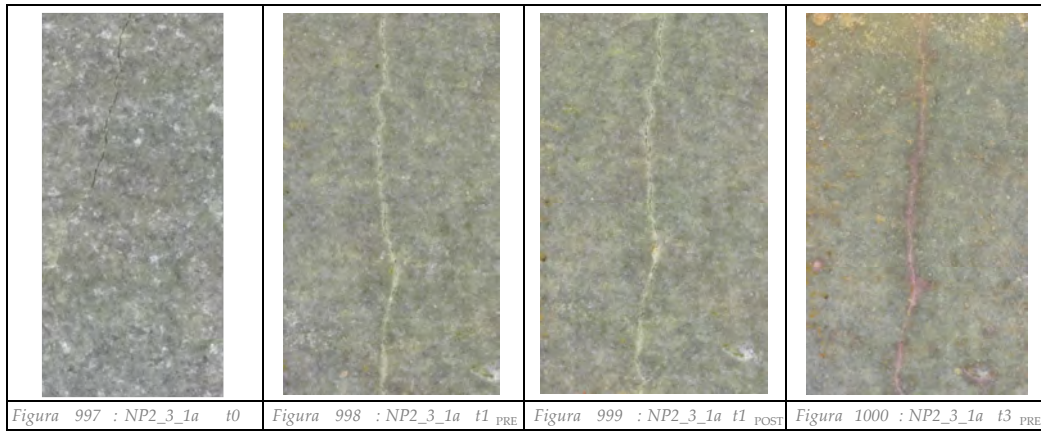
Punto di misura: e



Provino: NP2_3

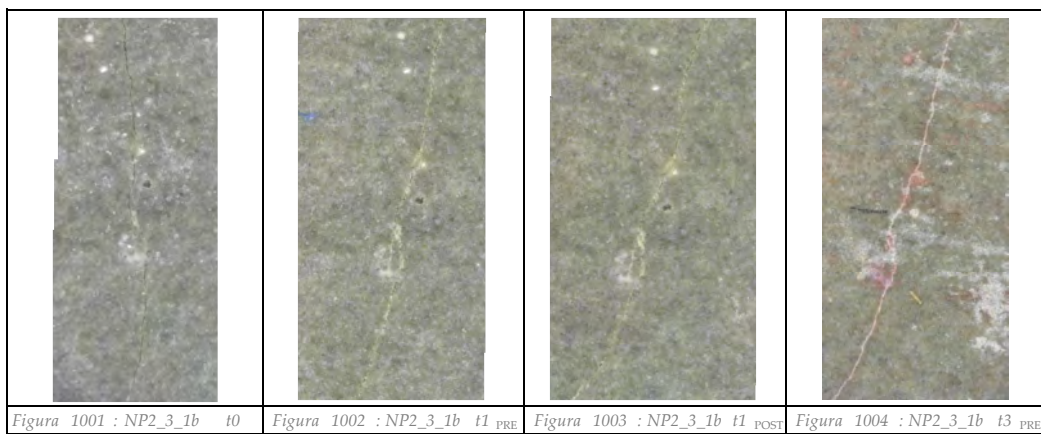
Fessura: 1

Punto di misura: a



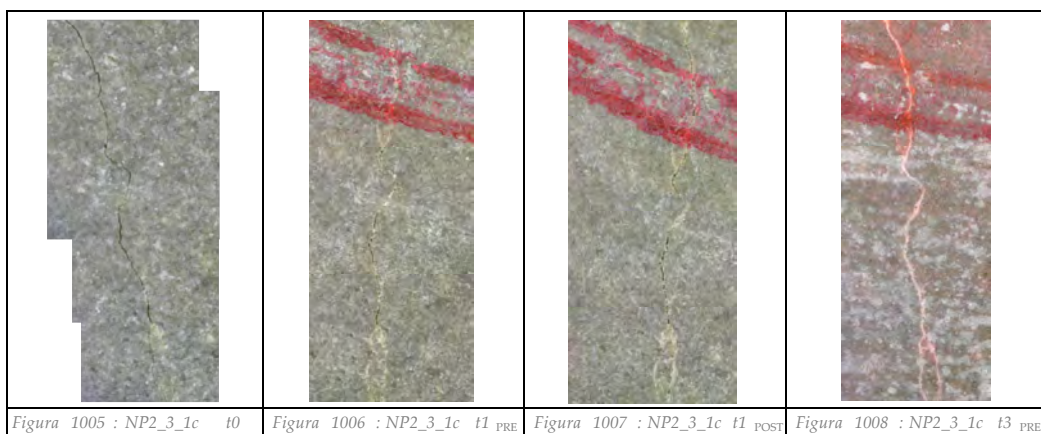
Fessura: 1

Punto di misura: b



Fessura: 1

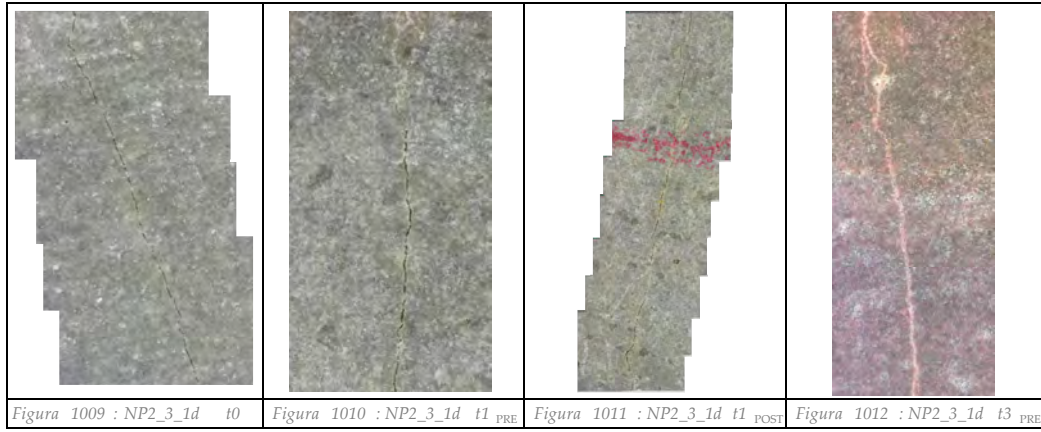
Punto di misura: c



Provino: NP2_3

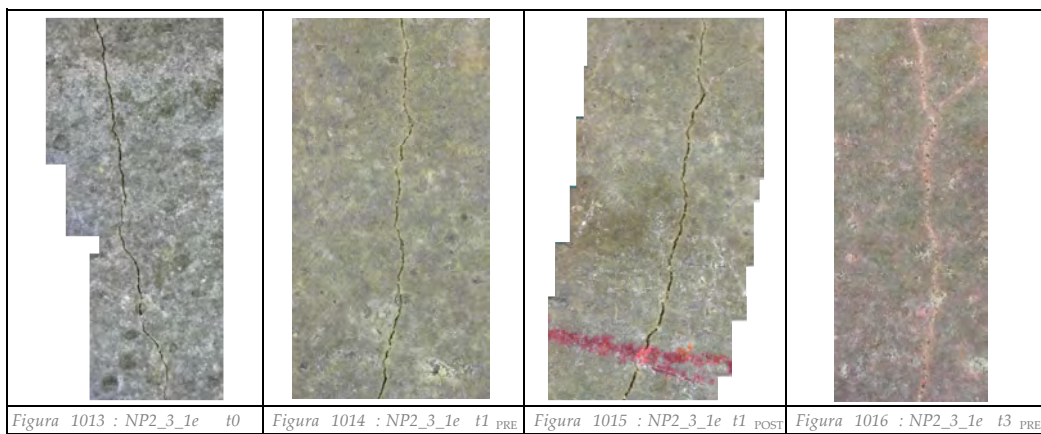
Fessura: 1

Punto di misura: d



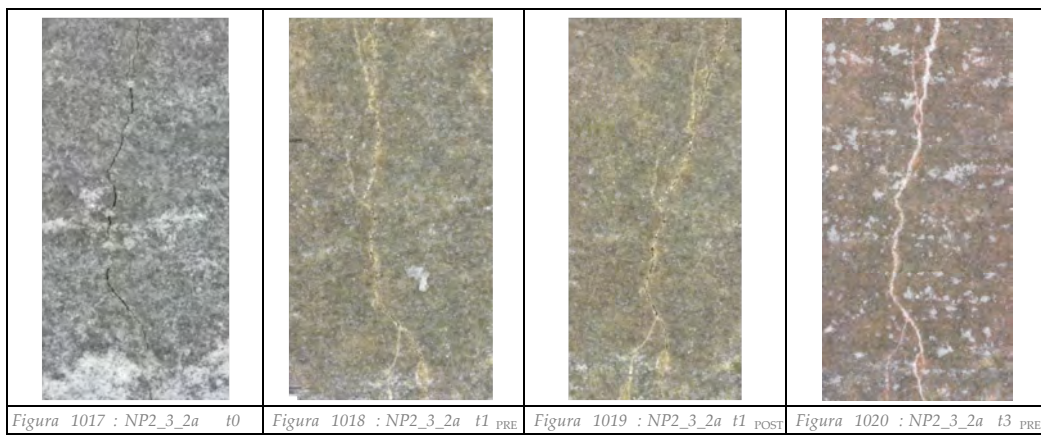
Fessura: 1

Punto di misura: e



Fessura: 2

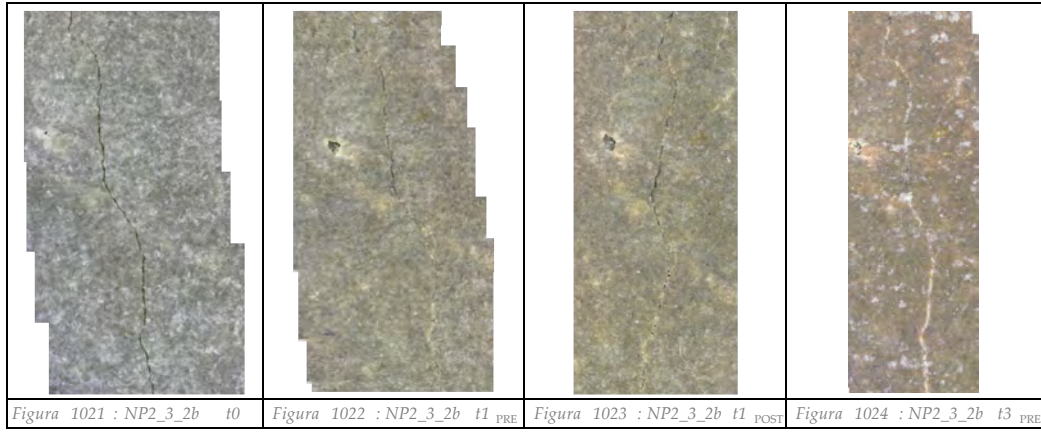
Punto di misura: a



Provino: NP2_3

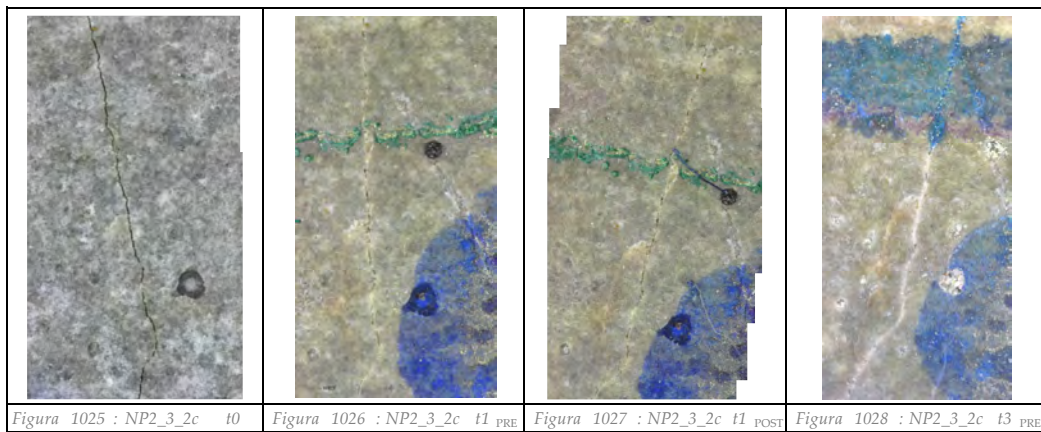
Fessura: 2

Punto di misura: b



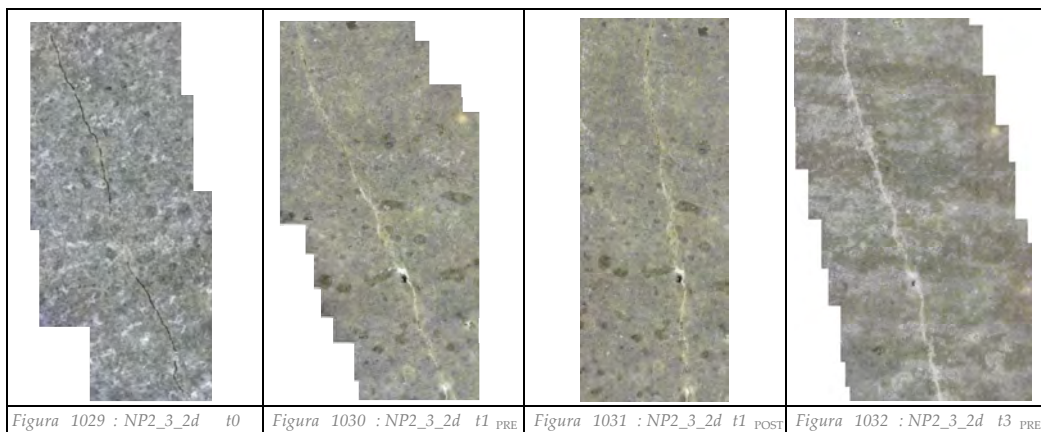
Fessura: 2

Punto di misura: c



Fessura: 2

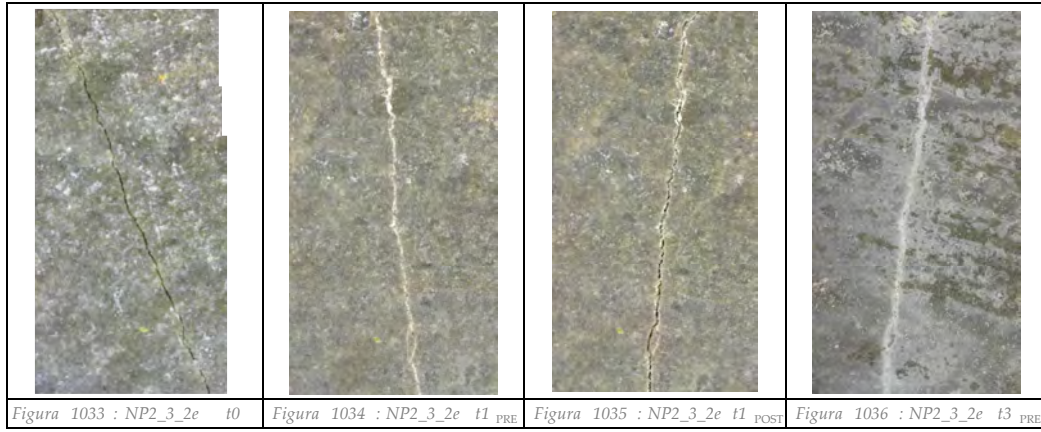
Punto di misura: d



Provino: NP2_3

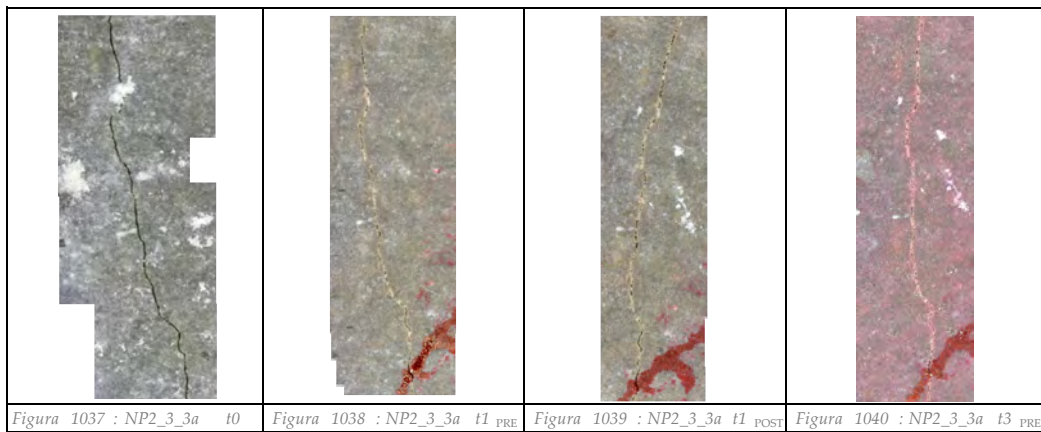
Fessura: 2

Punto di misura: e



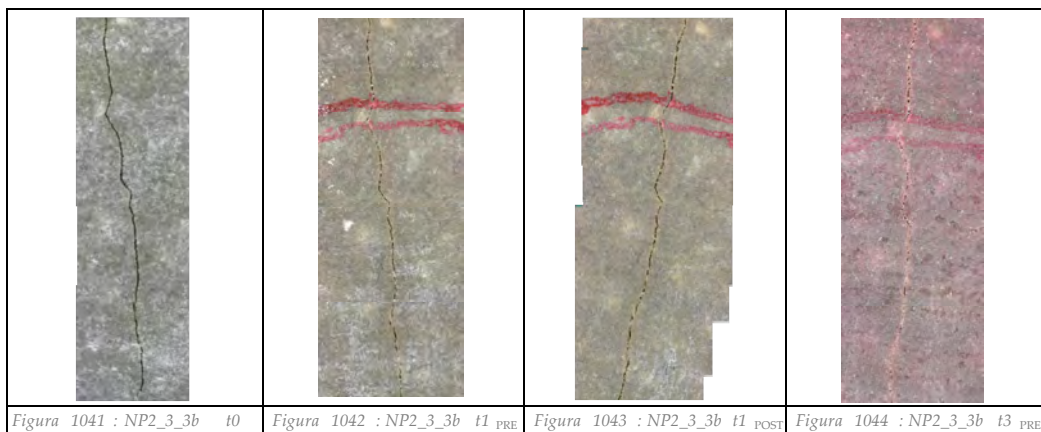
Fessura: 3

Punto di misura: a



Fessura: 3

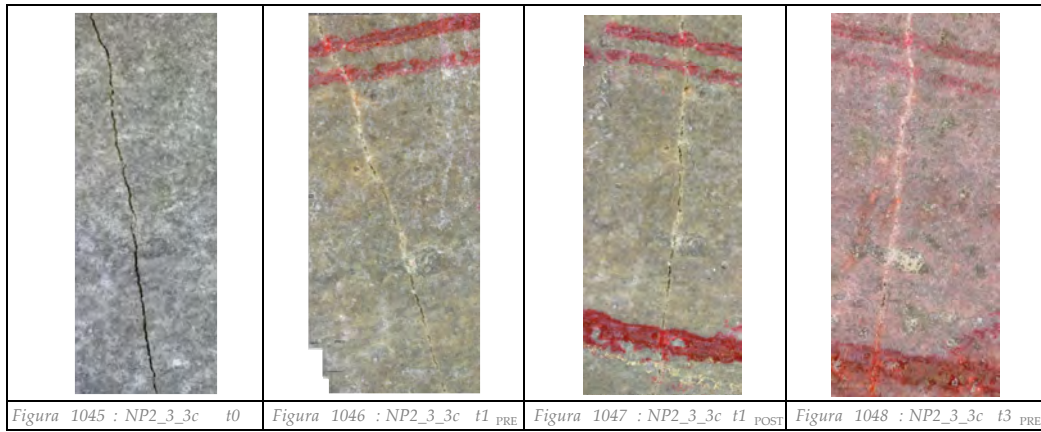
Punto di misura: b



Provino: NP2_3

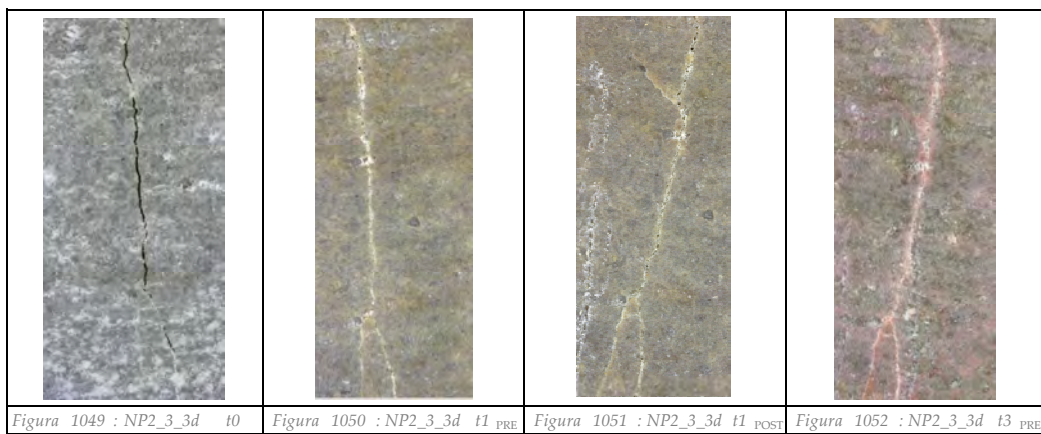
Fessura: 3

Punto di misura: c



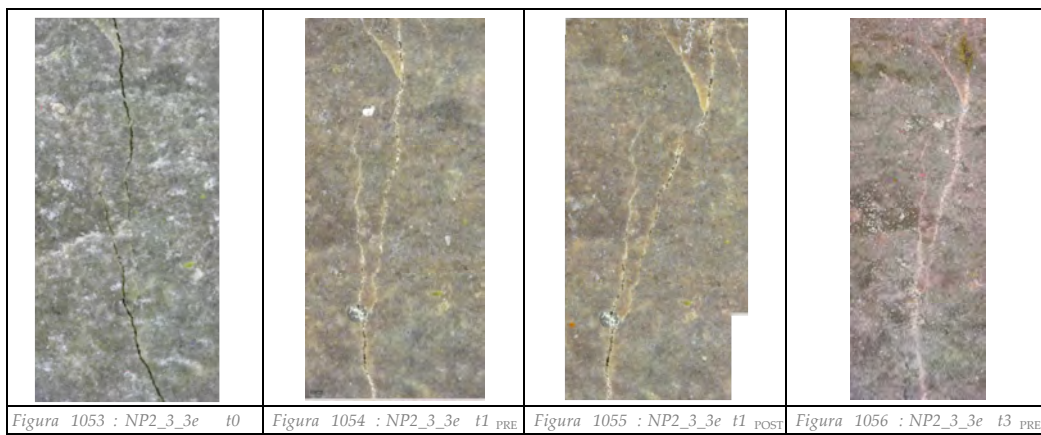
Fessura: 3

Punto di misura: d



Fessura: 3

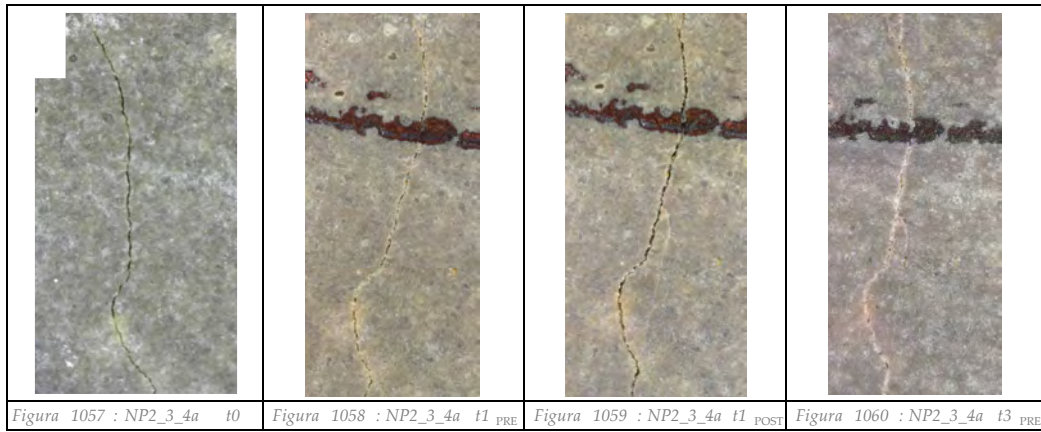
Punto di misura: e



Provino: NP2_3

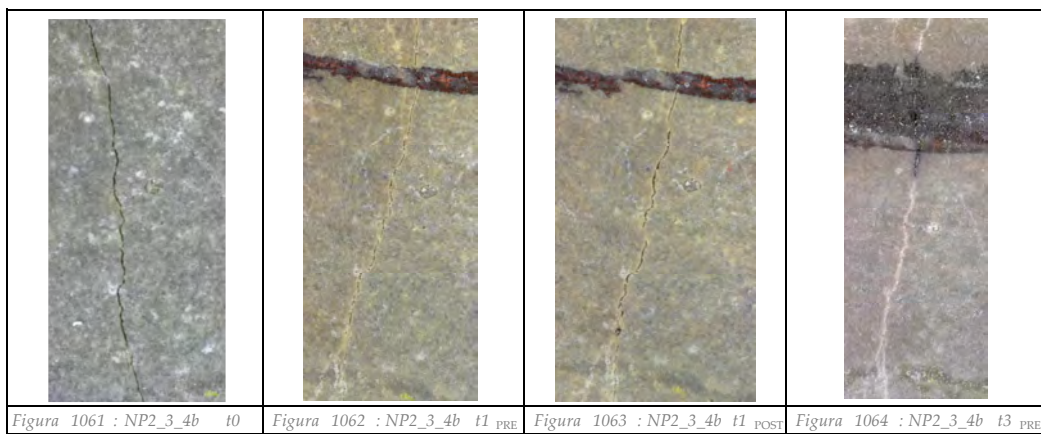
Fessura: 4

Punto di misura: a



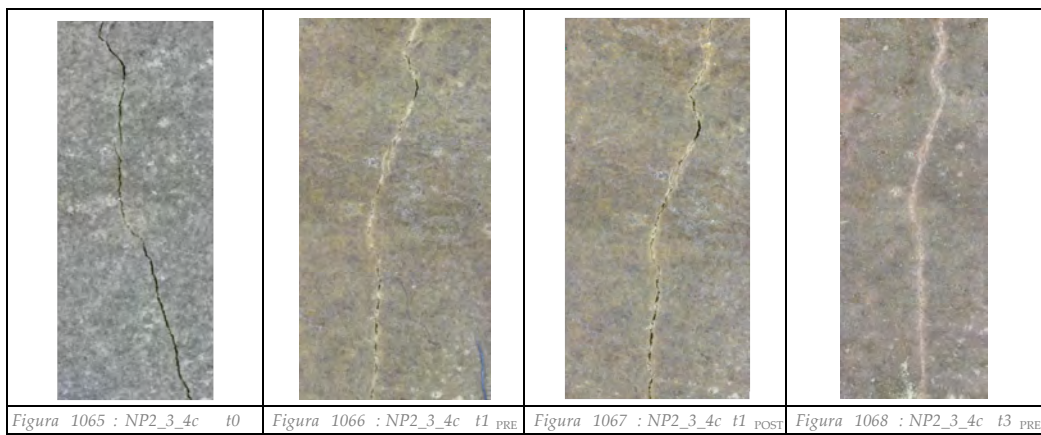
Fessura: 4

Punto di misura: b



Fessura: 4

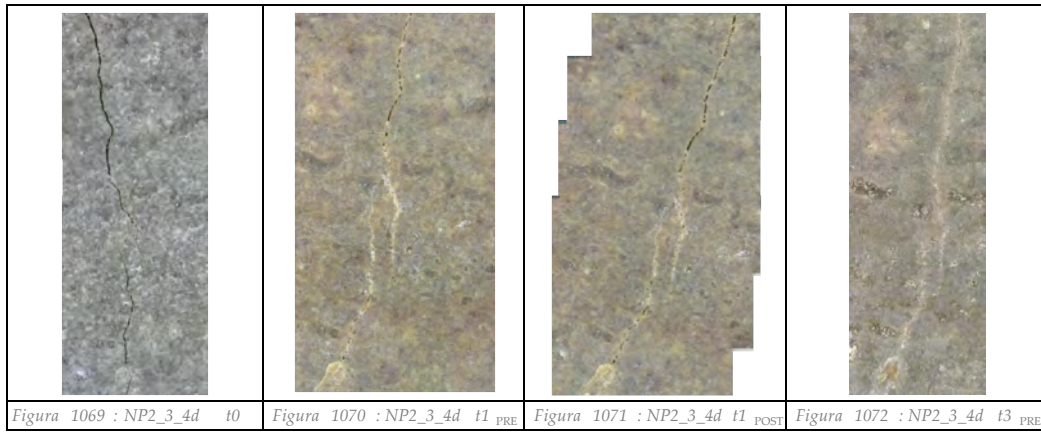
Punto di misura: c



Provino: NP2_3

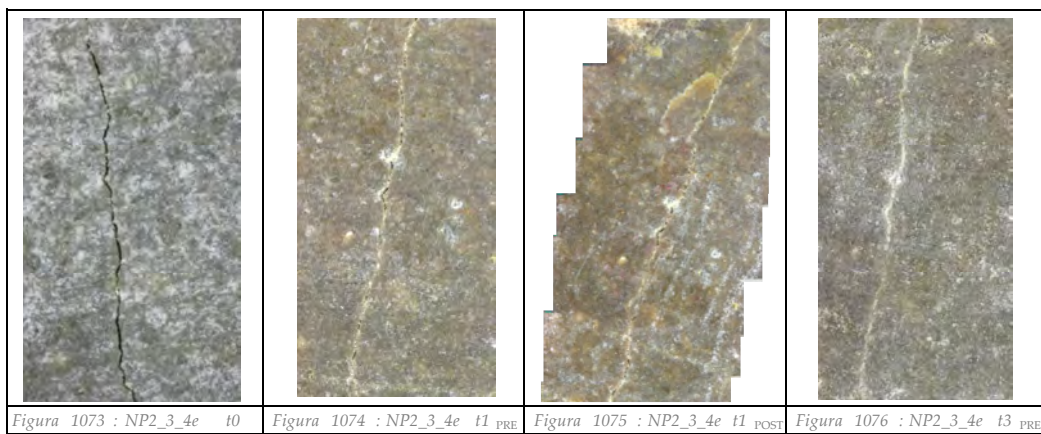
Fessura: 4

Punto di misura: d



Fessura: 4

Punto di misura: e



Allegato H

Correlazione indici meccanici e indici self-healing

