

POLITECNICO DI MILANO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

Corso di Laurea in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale



**EFFICACIA DELLE FIBRE NATURALI SULLA
CAPACITÀ DI AUTORIPARAZIONE DI COMPOSITI A
MATRICE CEMENTIZIA**

Relatore: Prof. Ing. Liberato Ferrara

Correlatore: Ing. Saulo Rocha Ferreira

Tesi di Laurea di:

Marco DELLA TORRE Matr. 787291

Anno Accademico 2013/2014

ABSTRACT

Nella presente tesi sono stati analizzati compositi cementizi ad alte prestazioni fibrorinforzati (HPFRCCs) con fibre naturali. Le fibre naturali utilizzate provengono dal Brasile, grazie al progetto di ricerca internazionale EnCoRe – ENvironmentally-friendly solution for CONcrete with REcycled and natural components. Si sono quindi valutate le capacità autoriparanti di tali materiali con un mix design che avesse una percentuale di fibre sul volume pari al 1,28%, con un utilizzo misto di fibre naturali e d'acciaio. La valutazione è stata eseguita tramite prove a flessione su quattro punti eseguite in due momenti, intervallate da un periodo di "terapia" in diverse condizioni di esposizione, di periodo 3 e 6 mesi. Indagini al microscopio ottico sono state eseguite per portare maggiori evidenze dell'avvenuto recupero meccanico. La realizzazione di provini con solo fibre naturali è stata fatta per valutare l'assorbimento relativo della quantità di acqua in cicli di asciutto/ambiente umido. Sono stati oggetto di analisi anche l'effettiva dispersione delle fibre e le procedure di getto. Inoltre si è valutato il ritiro autogeno e igrometrico di compositi utilizzando solo una tipologia di fibre e confrontate con un mix privo di fibre allo scopo di valutarne l'effetto: le fibre naturali infatti possono creare un reticolo poroso all'interno della matrice cementizia che può ampliare gli scambi tra interno della matrice e l'ambiente esterno e quindi avere effetti sul fenomeno del ritiro.

Within this dissertation high performance fiber reinforced cement based composites (HPFRCCs) with natural fibers have been analyzed. The natural fibers come from Brazil, through the international research project EnCoRe – ENvironmentally-friendly solution for CONcrete with REcycled and natural components. The self-healing capacity has been evaluated for composites with a fiber volume fraction of 1,28%, using a hybrid fiber reinforcement consisting of natural and steel fibers. The evaluation has been performed by means of four points bending testes done in two different times, in between of a "therapy" ranging over different exposure times, 3 and 6 months respectively. Microscope analysis have been performed to support the results gathered from mechanical tests. Only natural fibres specimens were been used to analyse the water retention capability during dry/humid cycles. The role of fibers dispersion within the specimens and the casting flow protocol was also analyzed. Moreover, the autogenous and drying shrinkage of composites with different types of fibres have been also studied and compared with the reference mixture without fiber, in order to support the assumption that natural fibers can create a porous network and a preferred way to connect the internal matrix and the environment.

ABSTRACT.....	2
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE	17
1.1 Il progetto di ricerca EnCoRe	18
1.2 Lavoro di ricerca sviluppato al PoliMi	19
1.3 Lavoro svolto nella presente tesi	20
CAPITOLO 2: FIBRE NATURALI E CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI	22
2.1 Calcestruzzi tradizionali, fibrorinforzati e ad alte prestazioni.....	23
2.1.1 Evoluzione tecnologica	23
2.1.1.1 Storia del calcestruzzo.....	23
2.1.1.2 Fattori evolutivi.....	24
2.1.1.3 Il calcestruzzo “moderno”	26
2.1.2 Materiali	27
2.1.2.1 Cemento	27
2.1.2.2 Aggiunte minerali.....	29
2.1.2.3 Aggregati.....	31
2.1.2.4 Acqua.....	32
2.1.2.5 Additivi	32
2.1.3 Calcestruzzo tradizionale	33
2.1.4 Calcestruzzo fibrorinforzato.....	34
2.1.4.1 Fibre	35
2.1.5 Calcestruzzi ad Alte Prestazioni	37
2.1.5.1 Resistenza a compressione	38
2.1.5.2 Modulo di Young.....	39
2.2 Calcestruzzi Fibrorinforzati ad Alte Prestazioni (HPFRCC)	40
2.2.1 Comportamento degli HPFRCC.....	40
2.2.2 Elevata duttilità	42
2.3 Fibre naturali –NFRC (Natural Fiber Reinforced Concrete).....	46
2.3.1 Sviluppi di elementi cementizi rinforzati da fibre naturali	46
2.3.1.1 Degradazione da ambiente alcalino	47
2.3.1.2 Migliorare la durabilità	48
2.3.2 Tipologia	49

2.3.2.1	Struttura delle fibre vegetali.....	49
2.3.2.2	Agave sisalana – <i>Sisal</i>	51
2.3.2.3	Attalea funifera – <i>Piassava</i>	55
2.3.2.4	Cocos nucifera – <i>Coir</i>	57
2.3.2.5	Ananas erectifolius – <i>Curaua</i>	59
2.3.2.6	Corchorus capsulari – <i>Juta</i>	61
2.3.2.7	Cannabis sativa – <i>Canapa Indiana</i>	63
2.3.2.8	Micro e nano elementi a base di cellulosa	65
2.3.3	Caratterizzazione delle proprietà meccaniche.....	67
2.3.3.1	Variazione dei valori in base alla presenza di difetti.....	67
2.3.3.2	Variaizione in funzione della morfologia delle fibre	71
2.3.3.3	Trattamenti superficiali.....	72
2.3.4	Elementi a matrice cementizia	75
2.3.4.1	Risposta tensione-deformazione in trazione.....	76
2.3.4.3	Comportamento flessionale.....	80
2.3.5	Applicazioni ed approcci progetturali.....	84
2.3.5.1	Laminati con fibre di <i>Sisal</i>	84
2.3.5.2	Durabilità	86
CAPITOLO 3: SELF-HEALING IN MATERIALI CEMENTIZI		95
3.1	Cos'è il Self-healing?.....	96
3.2	Perché il Self-healing nei materiali cementizi?	99
3.2.1	Bilancio di emissioni e sostenibilità.....	100
3.2.2	Gestione del danno	100
3.2.2.1	Damage Prevention Paradigm – DPP	100
3.2.2.1	Damage Control Paradigm – DCP	101
3.3	Come avviene il Self-healing?	103
3.3.1	Chiusura della fessura.....	103
3.3.2	Recupero meccanico	107
3.3.3	Self-healing autogeno.....	109
3.3.3.1	Cause del self-healing autogeno	109
3.3.3.2	Condizioni di sviluppo del Self-healing autogenico.....	111

3.3.4 Self-healing ingegnerizzato	116
3.3.4.1 Fibre cave	116
3.3.4.2 Microincapsulamento.....	120
3.3.4.3 Polimeri Super Assorbenti (SAP – Super Absorbent Polymer).....	122
3.3.4.3 Materiali/leghe a memoria di forma (Shape Memory Material/Alloy)	125
3.3.4.4 Agenti espansivi.....	127
3.3.4.5 Nanoparticelle intelligenti	130
3.3.4.6 Aggiunte microbiotiche.....	130
3.3.4.7 Riepilogo Self-healing autonomico	137
3.4 Quando avviene il Self-healing?.....	139
3.5 Dove avviene il Self-healing.....	143
CAPITOLO 4: INDAGINE SPERIMENTALE.....	146
4.1 Elementi di valutazione	147
4.2 Mix design e Materiali d’impiego.....	148
4.2.1 Mix design HPFRCCs.....	148
4.2.2 Materiali usati.....	149
4.2.2.1 Cemento	149
4.2.2.2 Loppa d’altoforno	149
4.2.2.3 Aggregato.....	149
4.2.2.4 Additivo superfluidificante	150
4.2.2.5 Fibre d’acciaio.....	151
4.2.2.6 Fibre Naturali	152
4.3 Campagna ritiro	162
4.3.1 Mix Design e realizzazione provini.....	162
4.3.1.1 Miscelazione	163
4.3.1.2 Realizzazione dei provini	166
4.3.2 Analisi del ritiro	169
4.3.3 Prove meccaniche.....	172
4.4 Campagna Self-healing.....	175
4.4.1 Realizzazione dei provini	176
4.4.2.1 Getto.....	177

4.4.2.2 Taglio e nomenclatura provini.....	180
4.4.2 Programma delle prove	185
4.4.2.1 Suddivisione provini e le relative terapie.....	186
4.4.2.2 Suddivisione provini per lastra.....	190
4.4.2.3 Condizioni di esposizione	195
4.4.3 Prove sperimentali	198
4.4.3.1 Prove a flessione.....	199
4.4.3.2 Indagini al microscopio e controllo fessurativo	205
4.4.3 Variazione di acqua assorbita	213
CAPITOLO 5: ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	215
5.1 Campagna ritiro	216
5.1.1 Mix design.....	216
5.1.2 Analisi del ritiro	216
5.1.2.1 Ritiro autogeno.....	217
5.1.2.2 Ritiro globale	219
5.1.2.3 Ritiro da essiccamento.....	221
5.1.3 Proprietà meccaniche	223
5.2 Campagna self-healing.....	224
5.2.1 Considerazioni iniziali	224
5.2.1.1 Dati di output e loro sviluppo.....	224
5.2.2 Validazioni.....	227
5.2.2.1 Comportamento del mix design e ordinamento delle fibre.....	227
5.2.2.2 Validazioni di provino	235
5.2.3 Indici di recupero.....	241
5.2.3.1 Valori di riferimento e tabelle di utilizzo	241
5.2.3.2 Valori di riferimento sui grafici	243
5.2.3.3 Definizione degli indici	248
5.2.4 Analisi degli indici – <i>Steel + Sisal</i>	256
5.2.4.1 Analisi in funzione delle condizioni di esposizione – 3 mesi	256
5.2.4.3 Andamento degli indici in funzione del tempo.....	262

5.2.4.4 Paragone con solo fibre <i>Steel</i> con e senza l'ausilio di additivo cristallizzante	269
5.2.5 Indagine al microscopio	270
5.2.5.1 Esposizione Wet&Dry	271
5.2.5.2 Esposizione WATER.....	272
5.2.5.3 Esposizione Camera Umida – 90%.....	275
5.2.5.4 Esposizione Camera Umida – 50%.....	275
5.2.5.4 Empiric Crack Closure - EmCC	276
CAPITOLO 6: CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	277
6.1 Commenti conclusivi.....	278
6.1.2 Effetto delle fibre naturali sul self-healing	278
6.1.2 Campagna <i>Sisal Hybrid</i>	279
6.1.3 Campagna ritiro	279
6.2 Sviluppi futuri	280
RINGRAZIAMENTI.....	282
BIBLIOGRAFIA.....	Error! Bookmark not defined.
APPENDICE A.....	292
APPENDICE B1	297
APPENDICE B2	307
APPENDICE B3	318
APPENDICE B4	330
APPENDICE C1	346
APPENDICE C2.....	363
APPENDICE C3	379

Indice delle Figure

Figura 2. 1 - Il faro di Eddystone costruito dall'ingegnere britannico John Smeaton	24
Figura 2. 2 - Combinazione di fattori che influenzano il prodotto finale [1].....	25
Figura 2. 3 - Diagramma della scelta dei materiali [2]	26
Figura 2. 4 - Processo produttivo del cemento Portland	28
Figura 2. 5 - Immagini al SEM di cemento (a sx) e di loppa granulata d'altoforno (a dx) [5]	31
Figura 2. 6 - Repulsione elettrostatica ed elettrostatica e sterica [3].....	32
Figura 2. 7 - Effetto del dosaggio sul comportamento del FRC. Basse percentuali di fibre (a), alte percentuali (b) [4]	35
Figura 2. 8 - Dispersione delle fibre in matrici con diversa dimensione degli aggregati [1].....	35
Figura 2. 9 - Influenza del rapporto d'aspetto di una fibra con l'energia assorbita [1]	36
Figura 2. 10 - A sx, Two Union Square Building, Washington USA. A dx Sherbroke Bridge in Quebec. Entrambi realizzati con HPC.....	37
Figura 2. 11 Legame sforzo-deformazione in compressione uniassiale per diverse classi di calcetruzzo	39
Figura 2. 12 - Classificazione dei composti fibrinforzati [6].....	40
Figura 2. 13 - Concetto di 'strain-hardening' e 'strain-softening' sotto sforzi assiali di trazione	41
Figura 2. 14 - Classificazione degli FRC basata sulla risposta sforzo-deformazione pre prove a trazione e a flessione [7]	42
Figura 2. 15 - ECC: (a) andamento sforzo-deformazione e (b) sviluppo delle microfessure [9].....	43
Figura 2. 16 - Andamento della corrosione in funzione della tipologia di fessura [6]	44
Figura 2. 17 - Applicazione degli ECC come trave a taglio [14].....	45
Figura 2. 18 - Effetto del self-healing sull'ECC prima (a, c) e dopo (b, d) [9]	45
Figura 2. 19 - Immagine e schema di una decomposizione in ambiente alcalino di una fibra di Sisal [12]	47
Figura 2. 20 - Meccanismo di degradazione in ambiente alcalino di una fibra naturale (sisal) [14]	48
Figura 2. 21 - Microstruttura cellulare: (a, b) sezione trasversale di una fibra che mostra lumen e lamella di congiunzione. (c) disegno schematico che mostra i diversi strati [16]	49
Figura 2. 22 - Modello ipotetico di orientamento delle microfibrille all'interno delle pareti cellulari. P = parete Primaria; S.. = strati della parete Secondaria [17].....	50
Figura 2. 23 - Pianta di Agave Sisalana (sx) e dettaglio della foglia con indicate le fibre al suo interno (dx) .51	51
Figura 2. 24 - Tipologie di fibre nella foglia di Sisal: (a) strutturale, (b) ad arco [18]	52
Figura 2. 25 - Microstruttura della fibra di Sisal: (a) fibra cellulare con lumen, (b) dettaglio della divisione della parete cellulare [19]	52
Figura 2. 26 - Delaminazione delle pareti cellulari prima della rottura [23].....	53
Figura 2. 27 - Immagine della rottura avvenuta per fatica [18]	54
Figura 2. 28 - Valori di tensione a fatica e cicli (sx) e diagramma sforzo-deformazione per le fibre che hanno superato la prova a fatica (dx) [18]	54
Figura 2. 29 - Pianta di attalea funifera a dx e fibre piassava a dx. Immagine cortesia da fao.org	55
Figura 2. 30 - Immagini al microscopio delle fibre, con dettaglio delle protuberanze (basso dx) [22, 24]	56
Figura 2. 31 - Cocos nucifera a sx e imballaggio di Coir a dx, da wikimedia.org.....	57
Figura 2. 32 - Immagini al microscopio delle fibre coir [24, 27]	58
Figura 2. 33 - (a) Ananas erectifolius, (b) fibre di Curaua e (c) immagine al microscopio a scansione elettronica del termine della fibra [28]	59
Figura 2. 34 - Fibre di curaua al microscopio a scansione elettronica [24, 30].....	60
Figura 2. 35 - Pianta corchorus capsulari e fibra di Juta ad asciugarsi al sole. Immagini wikimedia.org.	61
Figura 2. 36 - Fibra di Juta schematica (sx) e al microscopio a scansione (dx) [32, 24]	62
Figura 2. 37 - Canapa indiana in piantagione (sx) e fibre imballate (dx), da wikimedia.org.....	63
Figura 2. 38 - Fibre di canapa: estrazione dal fusto ligneo (sx); fibra elementare (dx) [34, 36]	64
Figura 2. 39 - Passaggio dalla macroscale alla nanoscale, le fibre naturali e le loro fibrille [41].....	65
Figura 2. 40 - Immagine alla luce polarizzata della fibra di canapa. I tratti più luminosi sono i difetti [37]...68	68

Figura 2. 41 - Set-up delle prove a trazione delle fibre naturali [24].....	69
Figura 2. 42 - Andamento del modulo di Weibull m [27].....	70
Figura 2. 43 - Due comportamenti tipici delle fibre naturali (a) alte prestazioni e (b) basse prestazioni [27].	71
Figura 2. 44 - Dispersione dei valori di resistenza a trazione per la fibra di juta e l'area sezionale (a); valori di resistenza in rapporto di area per varie tipologie di fibre (b) [27].....	72
Figura 2. 45 - Effetto del trattamento chimico sulle fibre di Sisal [38].....	74
Figura 2. 46 - Sezione trasversale delle fibre di sisal prima (a, b) e dopo (c, d) del processo di "hornification" [40].....	75
Figura 2. 47 - Set-up per le prove a trazione dirette dei provini con fibre naturali [45].....	77
Figura 2. 48 - Analisi delle immagini (a) provino, (b) traccia delle fessure, (c) apertura di fessura [45].....	77
Figura 2. 49 - Risposta tensionale del composto con fibre di Sisal: tensione-deformazione e apertura di fessura (a), relazione tra deformazione della prove e della macchina (b) [45].....	78
Figura 2. 50 - Set-up per la prova a flessione di provini laminati con fibre di Sisal [45].....	81
Figura 2. 51 - Comportamento flessionale di fibre di Sisal in un sistema composito: (a) tensione ed apertura di fessura / spostamento; (b) paragone tensione/trazione; (c) funzione di distribuzione cumulativa [45].....	82
Figura 2. 52 - Computazione dell'asse neutro: (a) deformazione intradosso/estradosso per prova a flessione; (b) apertura di fessura vs. asse neutro [45].....	83
Figura 2. 53 - Procedura di realizzazione di provini corrugati (a) getto, (b) pressione del getto nello stampo, (c) provino finito [49].....	85
Figura 2. 54 - Effetto delle fibre sui provini corrugati (a) in funzione del diagramma forza-spostamento e le relative rotture (b) e (c).[49].....	85
Figura 2. 55 - Effetto della stagionatura per provini senza CH e con matrice di PC (sx); confronto tra provino senza CH prima e dopo la stagionatura (dx) [49].....	87
Figura 2. 56 - Indagini al microscopio di elementi senza CH: (a) veduta complessiva, (b) fibra di Sisal, (c) dettaglio della fibra, (d) EDS mappatura della regione, (e) mappatura di ioni carbonio sull'interfaccia fibra-matrice [46].....	87
Figura 2. 57 - Immagini SEM per elemento con PC: (a) veduta d'insieme, (b) fibra di Sisal, (c) analisi spettroscopica, (d) regione analizzata da EDS, (e) regione mappata EDS, (f) quantificazione degli ioni calcio nell'interfaccia matrice-fibra [49].....	89
Figura 2. 58 - Forced Air Flow Chamber (FAFC): (a) schema funzionale, (b) unità di controllo dei parametri termoigrometrici, (c) provini durante l'esposizione [46].	90
Figura 2. 59 - Andamento del grafico sforzo-spostamento dei provini da zero cicli (M0-0) fino a 100 cicli (M0-100) [46].....	90
Figura 2. 60 - Provini senza cicli wet&dry (in alto), e provini con wet&dry (basso) [46].....	91
Figura 2. 61 - Superficie di frattura per provini non condizionati (a) e dopo 25 cicli (b). Si nota la lunghezza di estrazione delle fibre [46].....	91
Figura 2. 62 - Andamento dei cicli wet&dry per provini senza CH [46].....	92
Figura 2. 63 - Fessurazione in provini senza CH, senza cicli wet&dry (a), 25 cicli (b), 50 cicli (c), 75 cicli (d), 100 cicli (e) [46].....	93
Figura 2. 64 - Superficie di rottura dei provini senza CH, senza wet&dry (a), passando per 25 (b), 50 (c), 75 (d) e 100 cicli (e) [46].....	93
Figura 2. 65 - Immagini al microscopio di elementi cementizi con cemento Portland (a) visione d'insieme, (b) inquadramento della fibra, (c) ingrandimento della fibra.....	94
Figura 3 1 Diagramma di Venn in accordo con JCI-TB075 [1].....	97
Figura 3 3 Precipitazione di carbonato di calcio [5].....	103
Figura 3 4 Formazione e nucleazione di carbonato di calcio [5].....	106
Figura 3 5 Schematizzazione della precipitazione del carbonato di calcio [5].....	106

Figura 3 6: nuove fessure formatesi dopo il periodo di cura. Da notare i prodotti bianchi del self-healing sulla fessura curata, mentre quelle nuove non presentano nulla. [7]	107
Figura 3 7 Cause di Self-healing Autogenico [2]	109
Figura 3 8: Dimensionalizzazione della fessura idealizzata in funzione della dimensione degli aggregati ...	115
Figura 3 9: formazione e crescita differente dei prodotti di self-healing tra pasta cementiza e aggregati [13]	116
Figura 3 10 a SX: fibre cave al microscopio; a DX fibra di vetro con estremità sigillata [14]	116
Figura 3 11 Monitoraggio fuoriuscita del materiale di riempimento delle fibre cave [14]	117
Figura 3 12 Schema rappresentativo del set-up utilizzato da Mihashi [63]	118
Figura 3 13 Schema di set-up di travetti con tubi e pipette [14]	118
Figura 3 14 SX, schema di funzionamento del provino con autodiagnosi, a DX sezione del condotto autodiagnostico [19]	119
Figura 3 15 a) fessura nella matrice. b) rilascio per capillarità di agente curante. c) contatto dell'agente con catalizzatore	120
Figura 3 16 Sequenza temporale della rottura della microcapsula	120
Figura 3 17: distribuzione di tensioni lungo i bordi della capsula	121
Figura 3 18: immagine microscopio SEM della capsula rotta	121
Figura 3 19: microcapsule riempite con 'olio di legno' (A) e con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (B) [2]	121
Figura 3 20: tipo di incapsulamento dei polimeri superassorbenti [2, 23]	122
Figura 3 21: fase di accumulo di acqua nei SAP - la barra in basso a sinistra misura 500 μm [2]	123
Figura 3 22: chiusura di fessura in provini senza SAP (in alto) e con due diversi tipi di SAP (centro e basso). I numeri in alto indicano il tempo trascorso in secondi. [30]	124
Figura 3 23: Funzionamento degli SMA, passaggio da una struttura martensitica a una austenitica tramite riscaldamento	126
Figura 3 24: frazione di martensite in rapporto alla temperatura	126
Figura 3 25: IRC prima del passaggio di corrente (a SX) e dopo il passaggio di corrente (a DX) [24]	127
Figura 3 26: rapporto tra OPC (cemento Portland) e le reazioni necessarie allo sviluppo dei prodotti di self-healing: prodotti espansivi, prodotti di rigonfiamento, prodotti di precipitazione [13]	128
Figura 3 27: (I) Particelle impregnate e ricoperte con pasta cementizia (II) Inserite in matrice (III) Carbonatazione aumenta porosità (IV) Rivestimento particelle danneggiato da carbonatazione, rilascio di soluzione (V) Processo di healing prende luogo [2]	129
Figura 3 28: a SX una Micella [wikipedia], a DX la formazione di una micella a nucleo copolimero immerso in acqua [3]	130
Figura 3 29: (SX) Bacillus sphaericus in spore e segmenti. (DX) Carbonato di calcio precipitato [2]	132
Figura 3 30: aSX: argilla espansa con spore batteriche e composto precursore organico. aDX: argilla espansa miscelata nel calcestruzzo [2, 14]	132
Figura 3 31: Sabbia diatomacea al SEM [2]	134
Figura 3 32: SX) SEM dei carbonato di calcio a x1000 e x5000. DX) Assorbimento capillare di acqua nel tempo [2]	134
Figura 3 33: Precipitazione di cristalli di carbonato di calcio prodotti in calcestruzzi con batteri [14]	136
Figura 3 34: Quantotà di articoli scientifici pubblicati negli anni, via scopus.com	140
Figura 3 35: a) formazione di fessura con l'applicazione di un carico. b) stabilizzazione della fessura allo scarico. c) fase di trasporto indotta dalla fessura. d) chiusura della fessura grazie alla fase trasporto. e) cicatrizzazione [31]	140
Figura 3 36: metodo di self-healing attivo: rilascio di metilmetacrilato in tubi di cera dopo un primo riscaldamento. Polimerizzazione di metilmetacrilato successivamente ad un secondo riscaldamento [16] ...	141
Figura 3 37: rilascio passivo illustrato attraverso la rottura fisica della fibra sotto carico [16]	141
Figura 3 38: Deviazione dell'onda a seguito di una fessura [38]	143

Figura 4. 1 – Curva granulometrica della sabbia impiegata per il confezionamento della malta.....	150
Figura 4. 2 - Cemento durante la fase di pesatura	151
Figura 4. 3 – Aggregato utilizzato nei getti.....	151
Figura 4. 4 - Loppa d’altoforno	151
Figura 4. 5 - Superfluidificante.....	151
Figura 4. 6 - Microfibre d’acciaio rivestite in ottone	152
Figura 4. 7 - Pianta giovane di Sisal.....	154
Figura 4. 8 - Fibre di Sisal pronte all’uso	154
Figura 4. 9 - Differenti tipi di fibre: fibre strutturali (a) a forma di zoccolo di cavallo e fibre ad arco (b).....	154
Figura 4. 10 - Fibre di Sisal asciutte	155
Figura 4. 11 - Fibre di Sisal sature d’acqua	155
Figura 4. 12 - Fibra di Sisal al SEM.....	155
Figura 4. 13 - Fibra strutturale di Sisal.....	155
Figura 4. 14 - Fibre di Eucalyptus, sia in mattonella (basso), sia sgretolata (alto).....	156
Figura 4. 15 - Dettaglio della fibra sgretolata	156
Figura 4. 16 - Immagine al microscopio a scansione elettronica per la misurazione del diametro delle fibre di Eucalyptus. Dettaglio per lo studio condotto.....	157
Figura 4. 17 - Sezione trasversale della fibra di Eucalyptus	157
Figura 4. 18 - Fibre di Eucalyptus passate al setaccio dopo essere state sgretolate	158
Figura 4. 19 - Sospensione acquosa delle fibre di Nanopulp	159
Figura 4. 20 - Realizzazione di un foglio di Nanopulp	159
Figura 4. 21 - Scansione al microscopio di un foglio di Nanopulp	160
Figura 4. 22 - Miscelatrice planetaria [12]	164
Figura 4. 23- Miscelatrice orbitale e recipiente	165
Figura 4. 24 - Fase 1 della miscelazione	165
Figura 4. 25 - Miscelazione del composto HPFRCC.....	165
Figura 4. 26 - Risultato dopo una miscelazione senza raffreddamento indiretto	166
Figura 4. 27 - Miscelazione a bagnomaria	166
Figura 4. 28 - Three gang cassero per la realizzazione dei provini [12].....	167
Figura 4. 29 - Provini prismatici 40x40x160 per le misurazioni a ritiro autogeno (sopra) e totale (sotto) ...	168
Figura 4. 30 - Estensimetro lineare per la misurazione del ritiro assiale	170
Figura 4. 31 - Bilancia di precisione	170
Figura 4. 32 - Grafico del ritiro con fibre Steel	172
Figura 4. 33 - Foto della pressa idraulica MetroCom.....	173
Figura 4. 34 - Telaio per flessione 3 punti.....	173
Figura 4. 35 - Risultati delle prove meccaniche per i provini post-ritiro	173
Figura 4. 36 - Schema della prova a flessione su 3 punti	174
Figura 4. 37 - Schema delle prove a compressione	174
Figura 4. 38 - Prova a flessione su 3 punti	174
Figura 4. 39 - Prova a compressione semplice.....	174
Figura 4. 40 - IN ALTO: da SX - miscelazione del getto - aggiunta di superfluidificante - aggiunta di fibre IN BASSO: da SX – cassero con calcestruzzo allo stato fresco – principio di allineamento delle fibre [3]....	178
Figura 4. 41 - Taglio delle lastre con lama circolare (SX) e provini tagliati (DX)	181
Figura 4. 42 - Distribuzione del getto nella lastra, dispersione delle fibre e taglio dei provini	182
Figura 4. 43 - Esempio di nomenclatura dei provini.....	183
Figura 4. 44 - Tracciamento delle linee sui provini	185
Figura 4. 45 - Vista sinottica della campagna self-healing.....	187
Figura 4. 46 - Vista sinottica delle prove Sisal Hybrid	188
Figura 4. 47 - Vista sinottica della campagna Stell Hybrid con provini stagionati 1 mese	189
Figura 4. 48 - Vista sinottica Steel Hybrid a 6 mesi di stagionatura	190

Figura 4. 49 - Provini con condizione d'esposizione immersione in acqua.....	195
Figura 4. 50 - Provini in esposizione in CAMERA UMIDA 20°-90% U.R.....	196
Figura 4. 51 - Provini in esposizione in LABORATORIO Prove Tecnologiche 20° 50%	196
Figura 4. 52 - Provini in esposizione per cicli Wet/Dry	197
Figura 4. 53 - Andamento circolare del ciclo Dry/Humid	198
Figura 4. 54 - Elemento di ripartizione del carico per la prova a flessione su 4 punti	199
Figura 4. 55 - Pressa elettromeccanica INSTRON	200
Figura 4. 56 - Adattamento del set-up delle prove	201
Figura 4. 57 - Configurazione della prova a flessione su 4 punti con provino	201
Figura 4. 58 - Plancia di comando della INSTRON	202
Figura 4. 59 - Allestimento prova con i due LVDT	202
Figura 4. 67 - LVDT e distanze tra di blocchetti di contrasto e dall'intradosso	203
Figura 4. 61 - Provino vergine in regime di cicli carico/scarico con comportamento deflection softening	204
Figura 4. 62 - vergine in regime di cicli carico/scarico con comportamento deflection hardening	204
Figura 4. 63 - Precrack di provini a comportamento deflection hardening	205
Figura 4. 64 - Precrack di provini a comportamento deflection softening	205
Figura 4. 65 - Foto della zona fessurata dei provini	206
Figura 4. 66 - Multifessura nel tratto a momento costante	207
Figura 4. 74 - Provino con singola fessura e comportamento deflection softening	207
Figura 4. 68 - Microscopio ottico e presa della foto con ingrandimento 200x	208
Figura 4. 69 - A sinistra è il precrack, a destra è il risultato dopo 1 mese d'esposizione in acqua. A SX) ingrandimento 50x. A DX) ingrandimento 200x	210
Figura 4. 70 - Mappatura delle fessure tramite segni attorno al microscopio	211
Figura 4. 71 - Mappatura delle fessure tramite CAD	212
Figura 4. 72 - Misurazione dell'ampiezza di fessura	212
Figura 4. 73 - Cinematica di apertura di fessura durante la prova a flessione	213
Figura 4. 74 - Controllo del peso per i provini della campagna Sisal Hybrid	214
Figura 5. 1 - Andamento del ritiro autogeno	217
Figura 5. 2 - Variazione di massa nel ritiro autogeno	218
Figura 5. 3 - Andamento del ritiro globale.....	219
Figura 5. 4 - Variazione di massa nel ritiro globale.....	220
Figura 5. 5 - Rapporto tra variazione di massa e contrazione assiale	221
Figura 5. 6 - Andamento del ritiro da essiccamento	222
Figura 5. 7 - Umità interna al composto in provini sigillati e lasciati ad essiccare	223
Figura 5. 8 - Prove meccaniche dei provini per il ritiro	224
Figura 5. 9 - Prova a flessione su 4 punti, distanze dei punti di contatto dalla mezzeria.....	226
Figura 5. 10 - Provino "verGINE" con fibre parallele, con solo fibre Steel [87].....	228
Figura 5. 11 - Andamento del provino "Vergine" con fibre parallele e mix design Steel + Sisal.....	229
Figura 5. 12 - Comportamento del provino "verGINE" con fibre solo Steel ed ordinamento ortogonale.....	230
Figura 5. 13 - Andamento del provino "Vergine" con fibre ortogonali e mix Steel + Sisal	230
Figura 5. 14 - Andamento del provino "verGINE", fibre ortogonali, mix Steel + Sisal e stagionatura 6 mesi	231
Figura 5. 15 - Provino Sisal Non-Saturated, fibre ortogonali.....	231
Figura 5. 16 - Provino Sisal Non-Saturated, fibre paralleli.....	231
Figura 5. 17 - Provino Sisal Saturated, fibre ortogonali	232
Figura 5. 18 - Provino Sisal Saturated, fibre parallele.....	232
Figura 5. 19 - Provino Sisal + Eucalyptus, fibre ortogonali.....	233
Figura 5. 20 - Provino Sisal + Eucalyptus, fibre parallele	233
Figura 5. 21 - Provino Sisal + Nanopulp, fibre ortogonali.....	234

Figura 5. 22 - Provino Sisal + Nanopulp, fibre parallele	234
Figura 5. 23 - Media dei valori di tensione massima per provini softening	235
Figura 5. 24 - Media dei valori di tensione massima per provini hardening	236
Figura 5. 25 - Disposizione dei provini in funzione del taglio	237
Figura 5. 26 - Andamento dei valori massimi di tensione per provini softening con diverse modalità di taglio	238
Figura 5. 27 - Andamento dei valori massimi di tensione per provini hardening con diverse modalità di taglio	238
Figura 5. 28 - Andamento del grafico tensione - apertura di fessura per provini Steel + Sisal con fibre ortogonali	239
Figura 5. 29 - Andamento dei grafici tensione - apertura di fessura per provini Steel + Sisal con fibre parallele	239
Figura 5. 30 - Andamento dei provini Steel + Sisal fibre ortogonali, con taglio lastra differente	240
Figura 5. 31 - Andamento dei provini Steel + Sisal fibre parallele, con taglio lastra differente	240
Figura 5. 32 - Traslazione del grafico post-trattamento	245
Figura 5. 33 - Punti rappresentativi delle curve Pre-fessurazione e Post-trattamento, provino ortogonale	245
Figura 5. 26 - Punti rappresentativi delle curve Pre-fessurazione e Post-trattamento, provino parallelo	247
Figura 5. 35 - Rappresentazione grafica dell'indice SHSG	249
Figura 5. 36 - Rappresentazione dell'indice SHSG [3/1] e [3/2]	250
Figura 5. 37 - Identificazione dell'indice TRI - Toughness Recovery Index - 4 -	251
Figura 5. 38 - Formula bar del foglio di calcolo per trovare il valore prossimo all'85% di tensione massima nel tratto discendente	252
Figura 5. 39 - Formula bar del foglio di calcolo per limitare i valori alla sola parte del tratto discendente prima dello scarico	252
Figura 5. 40 - Raffigurazione grafica dell'andamento del recupero all'85% della tensione di picco	253
Figura 5. 41 - Raffigurazione per il calcolo dell'indice - 6 - $\Delta\sigma$	254
Figura 5. 42 - Rappresentazione grafica dell'indice - 7- ΔCOD	255
Figura 5. 35 - Andamento dell'indice SHSG per provini T e II in funzione delle esposizioni, 3 mesi terapia	256
Figura 5. 44 - Andamento indice DRI [2] in funzione delle esposizioni, 3 mesi di terapia	257
Figura 5. 45 - Andamento indici SHDG [3/1] e [3/2] in funzione delle esposizioni, 3 mesi di terapia	258
Figura 5. 46 - Andamento indice TRI [4] in funzione delle esposizioni, 3 mesi di terapia	259
Figura 5. 47 - Andamento indici 85% [5/1] e [5/2] in funzione delle esposizioni, 3 mesi di terapia	260
Figura 5. 40 - Andamento degli indici $\Delta\sigma$ [6] e ΔCOD [7] in funzione delle esposizioni. 3 mesi di terapia	261
Figura 5. 49 - Andamento nel tempo dell'indice [1], a SX i provini T, a DX i provini II	262
Figura 5. 50 - Andamento nel tempo dell'indice DRI [2]	263
Figura 5. 51 - Andamento nel tempo dell'indice SHDG [3]	264
Figura 5. 52 - Andamento nel tempo dell'indice TRI [4]	265
Figura 5. 53 - Andamento nel tempo dell'indice di recupero all'85% [5]	266
Figura 5. 54 - Andamento nel tempo dell'indice $\Delta\sigma$ [6]	267
Figura 5. 55 - Andamento nel tempo dell'indice ΔCOD	268
Figura 5. 56 Grafici di paragone con i mix Steel a 3 mesi di esposizione	269
Figura 5. 57 - Grafici di paragone con i mix Steel a 6 mesi di esposizione	270
Figura 5. 58 - Mappatura in prefessurazione di provino condizione WATER 6 mesi	273
Figura 5. 59 - Foto della zona a momento costante, provino WATER a 6 mesi	273
Figura 5. 60 - Formazione di una nuova fessura, provino T condizione WATER 6 mesi	274

Indice delle Tabelle

Tabella 2. 1 - Classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici [3]	29
Tabella 2. 2 - Proprietà meccaniche di fibre di sisal trattate e non [40]	74
Tabella 3. 1 - Elenco degli elementi raffigurati in Fig. 3.1 [1]	98
Tabella 3. 2 - Fattori che influenzano il self-healing	110
Tabella 3. 3 - Valori di tensione massima e recupero di tensione in ECC con SAP	125
Tabella 4. 1 - Mix Design HPRCCs.	148
Tabella 4. 2 - Parametri rappresentativi dei mix design.	148
Tabella 4. 3 - Composizione chimica cemento.	149
Tabella 4. 4 - Composizione chimica della loppa granulata d'altoforno	149
Tabella 4. 5 - Caratterizzazione delle fibre utilizzate	153
Tabella 4. 6 - Quantità di fibre in rapporto al Volume.....	161
Tabella 4. 7 - Differenti combinazioni di fibre e loro percentuale sul volume	161
Tabella 4. 8 - Mix design realizzati per la campagna del ritiro.....	163
Tabella 4. 9 - Protocollo di miscelazione per campagna ritiro.....	163
Tabella 4. 10 - Mix design impiegati per la campagna self-healing	177
Tabella 4. 11 - Fasi di miscelazione del calcestruzzo HPRCCs.....	178
Tabella 4. 12 - Mix design, nome lastre e data del getto	184
Tabella 4. 13 - Informazioni provini Steel Hybrid - Lastre A-1, A-2, A-3	191
Tabella 4. 14 - Informazioni provini Steel Hybrid - Lastre E-1, E-2, E-3, E-4	192
Tabella 4. 15 - Informazioni provini Steel Hybrid - Lastre F-1, F-2, F-3	193
Tabella 4. 16 - Informazioni provini Sisal Hybrid - Lastre D-1, D-2, B-1, C-1.....	194
Tabella 4. 17 - Indicazione delle esposizione per i cicli Dry/Humid	197
Tabella 4. 18 - Valori del fattore correttivo β in funzione della distanza dalla lama di carico	208
Tabella 5. 1 - Mix design per la campagna ritiro	216
Tabella 5. 2 - Andamento percentuale del ritiro autogeno nel tempo	218
Tabella 5. 3 - Andamento percentuale del ritiro globale nel tempo	220
Tabella 5. 4 - Risultati delle prove meccaniche.....	223
Tabella 5. 5 - Dati di output dello strumento di analisi.....	225
Tabella 5. 6 - Esempio di tabella per l'analisi dei dati	225
Tabella 5. 7 - Tabella riassuntiva completa per provini ortogonali.....	241
Tabella 5. 8 - Tabella riassuntiva completa per provini paralleli	242
Tabella 5. 9 - Valori dei punti discreti per la realizzazione del grafico, prefessurazione.....	244
Tabella 5. 10 - Valori discreti per la realizzazione del grafico, post-trattamento	244
Tabella 5. 11 - Confronto delle immagini al microscopio, condizione Wet&Dry.....	271
Tabella 5. 12 - Confronto delle immagini al microscopio, condizione WATER.....	272
Tabella 5. 13 - Confronto delle immagini al microscopio, condizione 90%.....	275
Tabella 5. 14 - Confronto delle immagini al microscopio, condizione 50%.....	275
Tabella 5. 15 - Indice Empiric Crack Closure per 3 mesi di esposizione	276
Tabella 5. 16 - Indice Empiric Crack Closure per 6 mesi di esposizione	276

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

1.1 Il progetto di ricerca EnCoRe

La nascita di questa tesi deve il merito al progetto di portata sovranazionale chiamato EnCoRe. L'acronimo sta per ENvironmentally-friendly solutions for CONcrete with REcycled and natural components, che reso in italiano viene identificato come: soluzioni ambientalmente sostenibili per calcestruzzi con componenti riciclati e naturali. I temi affrontati nel progetto hanno riguardato la realizzazione di calcestruzzi con un livello di impatto ambientale ridotto, grazie appunto all'utilizzo di materiali e componenti che provengono da scarti, riusi, sottoprodotti e da elementi di origine naturale. Il tema del progetto suscita interesse sia per le tecnologie costruttive sia per l'ingegneria strutturale, dove si confrontano appunto diversi ambiti della ricerca scientifica in un crogiolo di informazioni per meglio analizzare le tematiche affrontate per poi successivamente produrre diverse soluzioni e per migliorare sia la compatibilità ambientale sia la sostenibilità della produzione di calcestruzzo nel settore dell'industria. Tuttavia sono necessari ulteriori ricerche per meglio indirizzare gli sforzi verso interessi sempre più stringenti come l'utilizzo e il riuso di materiali di scarto nella produzione di normali calcestruzzi. In particolare la ricerca si è sviluppata analizzando nel dettaglio i seguenti tre punti:

1. Studio dei comportamenti fisici e meccanici del calcestruzzo con aggregati riciclati.
2. Studio del possibile contributo che deriva dall'utilizzo di aggregati riciclati.
3. Studio di fattibilità e possibili applicazioni per calcestruzzi con fibre naturali.

Questa ricerca è caratterizzata da un possibile grande impatto su due grandi settori: la gestione dei rifiuti speciali nelle aree urbane ed in distretti industriali e l'industria delle costruzioni. I fattori che hanno influenzato l'indirizzamento della ricerca verso queste tematiche sono stati diversi, ne segue una breve lista dei più significativi:

- Una grande richiesta di edifici residenziali e commerciali come risulta dall'andamento demografico e dai processi di urbanizzazione che stanno avvenendo in tutto il mondo.
- Una maggiore richiesta di edifici con caratteristiche di minore impatto ambientale, la riduzione di emissioni di CO₂ e l'impiego di materiali che siano rinnovabili.
- Una forte necessità di miglioramento dei processi di smaltimento per sfridi, scarti e rifiuti sia per l'industria delle costruzioni sia per altri processi industriali.

“Il calcestruzzo è uno dei materiali da costruzione più utilizzati nel mondo e nella sola Europa se ne consuma l'equivalente di un metro cubo pro capite ogni anno”, così dice Enzo Martinelli, uno degli autori e sviluppatori del progetto EnCoRe in una intervista fatta e rilasciata da Euronews. L'obiettivo finale è quello di poter realizzare un particolare tipo di calcestruzzo definito “green concrete”.

1.2 Lavoro di ricerca sviluppato al PoliMi

Il progetto EnCoRe è di portata sovranazionale, con l'adesione di diverse università da diverse parti del globo. Il nucleo principale è in Italia, più precisamente nella sede di Salerno facente capo il Prof. Enzo Martinelli. Il Politecnico di Milano ha aderito alla chiamata per lo sviluppo di queste tematiche e più precisamente ha preso in carico lo sviluppo di guide linea per la realizzazione di calcestruzzi fibrorinforzati con l'uso di fibre naturali – NFRC (Natural Fiber Reinforced Concrete). L'utilizzo e l'impiego di fibre naturali in materiali con base cementizia presenta diversi vantaggi se confrontato con l'uso di altre tipologie di fibre di natura industriale, siano esse metalliche o polimeriche: le fibre naturali sono biodegradabili, leggere, rinnovabili, presentano buone caratteristiche meccaniche, sono relativamente abbondanti in natura e sono spesso dei sotto-prodotti dei processi relativi all'industria agricola. Per paesi a prevalente economia rurale, dove lo sviluppo industriale è arretrato, e/o per paesi in via di sviluppo queste tipologie di fibre rappresentano una interessante fonte di risorse, anche economiche. Le fibre naturali hanno un ottimo bilanciamento delle emissioni di CO₂ nell'ambiente, dovuto al fatto che la loro produzione deriva dalla coltivazione di piante che necessitano di energia solare mentre l'utilizzo di fonti fossili è richiesto solo per i processi estrattivi e produttivi. Si è visto che un ettaro di terreno coltivato a piante di *Juta* assorbe 15 tonnellate di CO₂ dall'atmosfera e immette 11 tonnellate di O₂ durante il loro ciclo vita. Inoltre i loro scarti di produzione aiutano la fertilizzazione del terreno, riducendo i costi dei fertilizzanti. Il bilancio energetico ha segno positivo: per la produzione di 1 kg di tessuto per la realizzazione di shopping bag con le fibre di *Juta* si utilizzano 80 MJ in meno rispetto alla stessa quantità di prodotto utilizzando 1 kg di poliidrossialcanoati (PHA) [31].

La realizzazione di NFRC al Politecnico di Milano è stata sviluppata grazie alla collaborazione con l'Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil. I materiali studiati sono compositi a matrice cementizia con l'uso di diverse fibre naturali, con o senza l'aggiunta di una percentuale di fibre d'acciaio. Si sono quindi realizzati provini che hanno al loro interno solo fibre naturali, un mix di fibre naturali di diverse dimensioni, sia macroscopiche sia micro/nanoscopiche, ed una ulteriore miscela, la più importante sviluppata e studiata all'interno di questa tesi, che ha al suo interno sia fibre naturali sia fibre d'acciaio in percentuale volumetrica uguale. Il comportamento di questi materiali è caratterizzato dalla capacità delle fibre di controllare lo sviluppo e l'apertura delle fessure a seguito dell'applicazione di un carico. Le fessure, tipicamente di piccola ampiezza, sono state analizzate per valutare la loro variazione prima e dopo l'esposizione dei provini in un determinato ambiente. In particolare si è analizzata la capacità autoriparante di questi compositi cementizi fibrorinforzati, ossia se in funzione del tipo e della durata di esposizione essi erano in grado di promuovere effetti di autochiusura e autoguarigione delle fessure. Tale capacità deriva dalla sinergia fra l'effetto di controllo della apertura di fessura esercitato dalle fibre e la particolare composizione del materiale, che si

caratterizza per elevati quantitativi di cemento e legante e bassi rapporti acqua/legante. In tal modo all'interno di un provino rimangono, anche dopo lunghe stagionature, significative quantità di legante non idratato che, a seguito della formazione delle fessure, possono venire a contatto con l'umidità ambientale o con l'acqua e quindi subire un effetto di idratazione ritardata, dando luogo a prodotti che vanno a risigillare le fessure. Si è inoltre analizzato l'andamento del ritiro autogeno e igrometrico di questi particolari compositi, rapportandolo ad un mix di controllo che non avesse al suo interno le fibre, ma mantenendo inalterate le altre componenti: le fibre naturali, infatti, possono creare un reticolo poroso all'interno della matrice cementizia che può ampliare gli scambi tra interno della matrice con l'ambiente esterno e quindi influenzare gli effetti del ritiro in maniera significativa.

1.3 Lavoro svolto nella presente tesi

L'utilizzo di fibre naturali è molto antico e andagini storiche mostrano che già popolazioni come gli Egizi utilizzavano paglia e crini di cavallo come rinforzo nei mattoni ed in altre applicazioni. Le fibre naturali sono state studiate, in parte, ma non ancora del tutto comprese alla perfezione. Lo sviluppo di nuove tecnologie, di nuovi strumenti di analisi e di nuove teorie ha portato ad una maggiore conoscenza degli elementi che vengono impiegati nel settore delle costruzioni. Grazie a questo sviluppo, si hanno dettagli sulle fibre naturali più ampi rispetto a qualche decennio fa: una ricerca documentale è stata riportata nel Capitolo 2 che analizza e mette in luce gli aspetti principali delle fibre, dalla loro produzione e coltivazione, dal processo estrattivo per poi passare attraverso le proprietà morfologiche, fisiche e chimiche andando a completare lo studio mediante l'analisi delle proprietà meccaniche. Malgrado non sia ancora possibile formulare una precisa caratterizzazione meccanica delle fibre, sono stati riportati diversi valori trovati in letteratura, cercando di coprire maggiormente quello che è un settore estremamente variabile. In particolare sono stati studiati i calcestruzzi, da quello tradizionale a quello realizzato su misura per particolari applicazioni a controllo fessurativo, analizzando quello che è stato il processo tramite il quale si è arrivati alla realizzazione di nuovi materiali. Lo scopo è quello di analizzare le componenti che sono state utilizzate nella realizzazione dei materiali impiegati in questa ricerca, così da capire quali possano essere i punti di forza e quelli che possono ancora essere migliorati. Nel Capitolo 3, invece, viene analizzato in dettaglio il fenomeno del self-healing in materiali a base cementizia, i meccanismi che stanno alla base di questo processo e si cerca di rispondere alle più semplici domande che ci si pone di fronte a tematiche mai incontrate prima: come, dove, perché. Vengono analizzati nel dettaglio i meccanismi che promuovono e incentivano lo sviluppo di prodotti del self-healing, sia autogeno, ossia che avviene internamente grazie a materiali già presenti nel composto cementizio senza che ne vengano aggiunti altri appositamente, sia tramite aggiunte ingegnerizzate per incentivare e migliorare il

prodotto finale. Nel Capitolo 4 si trova l'indagine sperimentale dell'autore della tesi e viene data la descrizione di tutto il lavoro che è stato eseguito: si inizia fornendo la descrizione della procedura di miscelazione dei composti cementizi per la realizzazione sia di provini per le analisi del self-healing, sia quelle per i provini utilizzati per le misurazioni del ritiro. Si passa alla caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei materiali utilizzati e si conclude esponendo le indagini che sono state utilizzate. Nel Capitolo 5 si entra nel dettaglio delle prove, dallo sviluppo dei dati di output, all'analisi degli effetti delle varie tipologie di esposizione della terapia. Si analizzano e si discutono i risultati ottenuti a seguito delle prove a flessione che forniscono i dati e l'avvenuta o meno autoguarigione, passando da una attenta analisi al microscopio che fornisce una visione dei fenomeni che sono avvenuti sulla/e fessura/e dei provini valutandone l'ampiezza prima e dopo il periodo di esposizione. Vengono mostrati inoltre i risultati ottenuti tramite le misurazioni del ritiro e se ne analizza l'andamento nel tempo. A seguire, nel Capitolo 6, si discutono brevemente le conclusioni già presentate man mano nella stesura dei diversi paragrafi del capitolo precedente, riassumendole e identificando quello che potrebbero essere sviluppi futuri.

CAPITOLO 2: FIBRE NATURALI E CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI

2.1 Calcestruzzi tradizionali, fibrorinforzati e ad alte prestazioni

2.1.1 Evoluzione tecnologica

2.1.1.1 Storia del calcestruzzo

Il calcestruzzo è uno dei principali materiali da costruzione ed ha una lunga e ricca tradizione. Il suo nome deriva dal latino “*calcis structio*” che letteralmente significa “struttura a base di calce” che differisce di significato dall’“*opus caementicium*” utilizzato da Marco Vitruvio Pollione nel suo *De Architectura*. Nel suo trattato, infatti, il termine *caementum* (dal verbo *caedo* che significava tagliare a pezzi) stava ad indicare il rottame di pietra utilizzato per il confezionamento del calcestruzzo. Il termine conservò il suo significato fino al tardo Medioevo con il termine di cemento che mutò di valore identificando l'intero conglomerato, cioè l'attuale calcestruzzo. Solo alla fine del XVIII secolo con lo sviluppo tecnologico ed un maggiore studio dei materiali si è poi ritornato ad identificare il cemento con valore di legante idraulico e il conglomerato veniva identificato con il proprio termine di calcestruzzo.

Non è facile identificare un periodo storico che fosse il precursore dell'uso del conglomerato: si sono infatti riscontrate tracce di utilizzo finanche in civiltà antiche tra cui gli Assiri e gli Egizi. Anche i Greci conoscevano questa tecnica costruttiva, siccome i resti archeologici dell'acquedotto di Argo e il serbatoio di Sparta ne riportavano traccia. Furono i romani a dare grande impulso all'utilizzo di questa tecnica, andando a sviluppare edifici ancora adesso in buono stato di conservazione anche grazie alla scoperta della pozzolana. Grazie alla sua struttura amorfa costituita principalmente da silice accompagnata da calce, e a contatto con l'acqua si comporta come ottimo legante idraulico con prestazioni meccaniche superiori alla calce stessa. Con la caduta dell'Impero Romano si registrò un declino nelle qualità delle costruzioni e la maniera di realizzare il calcestruzzo come facevano i Romani venne dimenticata perché fu abbandonato l'impiego della pozzolana. Il declino continuò per tutto il Medioevo fino a quando nel risorgimento si rilessero antichi libri latini, come il *De Architectura* di Vitruvio. Si scoprirono i vecchi segreti del costruire e, soprattutto in Francia nel Settecento, si ripresero l'arte del ben costruire opere in calcestruzzo. Una pietra miliare nella storia del calcestruzzo è quella fornita dall'utilizzo della calce idraulica che segna la svolta dall'uso di calcestruzzo romano a quello moderno. L'ingegnere britannico John Smeaton a metà dell'Ottocento nella realizzazione del faro di Eddystone, come ritratto nella Fig. 2.1 ad opera del pittore John Lynn, utilizzò al posto della miscela calce-pozzolana, la prima calce idraulica da lui ottenuta dalla cottura di calcare contenente una discreta quantità (circa 11%) di impurezze argillose. Il passaggio successivo si vede, dopo la fioritura di brevetti inglesi e francesi, iniziative industriali tra la fine del Settecento e l'inizio dell'Ottocento, con la realizzazione

del cemento Portland che segna anch'esso uno spartiacque, così anche lo studio dei processi industriali per la realizzazione del cemento idraulico.



Figura 2. 1 - Il faro di Eddystone costruito dall'ingegnere britannico John Smeaton

Un incremento nella diffusione del calcestruzzo è stata registrata con l'avvento del calcestruzzo armato. Malgrado le elevate resistenze a compressione ottenute, il conglomerato non forniva adeguate resistenze a trazione. Questa caratteristica ne ha limitato ampiamente lo sviluppo per decenni. La data di nascita del calcestruzzo armato non è di facile individuazione, ma viene posta nel XIX secolo, grazie alla rivoluzione industriale che portò ad una eccezionale produzione dei due materiali costituenti: il cemento e l'acciaio. L'impiego dei materiali uniti permise la realizzazione di numerosi studi, realizzazioni e brevetti. Un sistema che divenne di utilizzo frequente fu quello del francese Hennebique che brevettò un sistema di una trave armata con ferri tondi filanti sulla faccia inferiore che in prossimità degli appoggi venivano rialzati per far fronte a momenti negativi. La caratteristica che cambiò fu l'utilizzo di ferri piatti sagomati a U che disposti a collegare le armature tese con il calcestruzzo compresso, avevano la funzione di staffe atte ad assorbire gli sforzi di taglio.

2.1.1.2 Fattori evolutivi

Nei tempi odierni si guarda al presente, sapendo quello che c'è stato nel passato e cercando di non utilizzare tutte le risorse come se non ci fosse un domani. Lo sviluppo

sostenibile appunto prevede un miglioramento delle qualità di vita attuali in maniera tale che non vengano compromesse quelle delle generazioni a venire.

L'evoluzione dell'uso dei materiali è andata di pari passo con quella dei progressi tecnologici dell'uomo che grazie a sforzi nel settore della ricerca e della sperimentazione ha potuto aumentare la conoscenza dei materiali e quindi utilizzarne le relative proprietà a suo vantaggio. Per trasformare le materia prima in prodotti finiti e facilmente lavorabili, la vera rivoluzione è stata quella industriale che tramite energia termica è riuscita ad operare le trasformazioni necessarie nel materiale. La facilità con cui era possibile attingere alle fonti primarie di materiale ha portato ad un uso eccessivo, se non addirittura sconosciuto, delle risorse a disposizione dall'ambiente con conseguenze che stanno manifestandosi nei giorni nostri, spesso in maniera preoccupante. Per questo, negli ultimi anni, la ricerca è indirizzata alla minimizzazione nell'uso di risorse naturali tramite aumento delle prestazioni e dell'efficacia strutturale nell'uso dei materiali da costruzione. Lavorando sia a livello di microstruttura, con l'utilizzo di polimeri, cariche, additivi, sia a livello macrostrutturale, si arriva alla sintesi di nuovi materiali compositi. Si parte quindi dallo stabilire un livello di prestazione richiesto, sia esso termico, meccanico, acustico, di qualsiasi altra natura e anche loro combinazioni, il prodotto finale sarà il risultato ottenuto dalla combinazione di tre fattori:

- Materie prime presenti in natura;
- L'energia necessaria per ottenere le materie prime attraverso processi estrattivi e trasformativi per fornire le caratteristiche desiderate;
- La tecnologia utilizzata, rappresenta il tramite la l'utilizzo di energia e le risorse naturali.

Quello che continua ad interessare maggiormente sono le qualità finali del prodotto, piuttosto che le tecnologie e le risorse che hanno concorso alla realizzazione del materiale stesso [1].

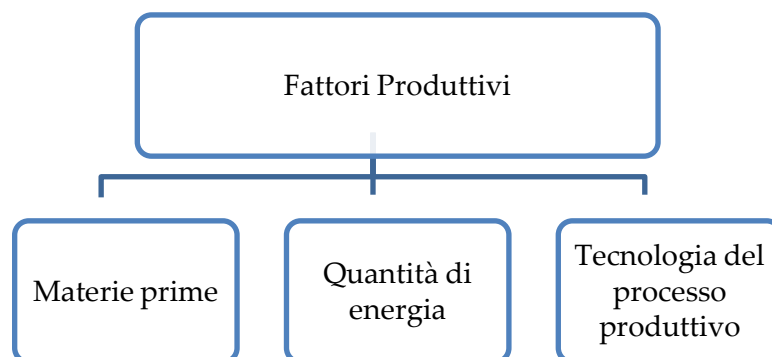


Figura 2. 2 - Combinazione di fattori che influenzano il prodotto finale [1]

La quantità di materiale richiesta nel mondo delle costruzioni è notevolmente elevata ed è per questo motivo che si prediligono materiali poveri in larga maggioranza, con l'impiego di materiali caratterizzati da livelli prestazionali più elevati qualora ve ne fosse esplicita richiesta oppure in situazioni di speciali necessità. Il nuovo materiale si riesce ad affermare quando supera quello preesistente sia in termini economici che prestazionali, nonché deve essere disponibile localmente, malgrado quest'ultima categoria si ricollega a quella economica. L'impiego su larga scala, lo sviluppo tecnologico alza il tetto di conoscenze, andando a portare miglorie lungo tutto il percorso evolutivo [2].

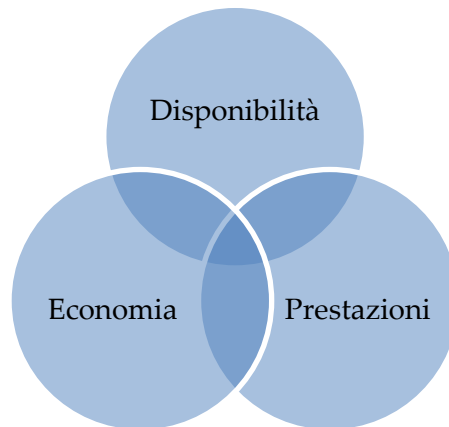


Figura 2. 3 - Diagramma della scelta dei materiali [2]

2.1.1.3 Il calcestruzzo “moderno”

Il calcestruzzo è un materiale complesso, in quanto la variazione della combinazione qualitativa e quantitativa tra i diversi componenti può dare risultati notevolmente differenti tra di loro che però hanno la necessità di essere stabiliti progettualmente. Si possono fornire elevate spazialità architettoniche, formare volumi particolari, riducendo il rapporto volume/resistenza ma elevando così i costi; se invece l'aspetto economico ha carattere predominante allora si può optare per un materiale resistente che soddisfi le esigenze base a costi contenuti. Lo sviluppo tecnologico e l'aumento di conoscenze in materia, andato di pari passo con l'avanzamento industriale, ha comportato la realizzazione di elementi in calcestruzzo precompresso e prefabbricato in stabilimento. Le crescenti conoscenze comportano una sempre più ampia gamma di applicazioni possibili: centrali nucleari, ponti di grandi luci, costruzioni in ambiente marino, ecc. I limiti imposti in materia di sicurezza sono dettati da normative e da standard costruttivi e realizzativi. Vengono espressi criteri basati su elementi probabilistici anziché deterministici: la resistenza meccanica si valuta in base al valore medio caratteristico, l'interesse è quindi per un valore costante ed omogeneo. I criteri probabilistici hanno anche aumentato i controlli e irrigidito i metodi con cui vengono eseguiti: si cerca di verificare la rispondenza dei materiali ai requisiti di progetto consentendo un loro migliore sfruttamento, nei limiti consentiti dalla sicurezza delle opere. Conoscendo il comportamento del materiale, si riesce ad utilizzarlo e sfruttarlo nelle situazioni più vantaggiose: ciò comporta quindi una

minore incertezza delle sue caratteristiche e comportamento, limitando quindi i valori che devono essere utilizzati a favore di sicurezza. I criteri progettuali che stanno alla base della corretta scelta del tipo di calcestruzzo sono sostanzialmente due, a cui si vuole aggiungere un terzo che acquista sempre più rilievo:

- Resistenza meccanica;
- Lavorabilità;
- Durabilità.

2.1.2 Materiali

A seguire si indicano i vari materiali che si possono utilizzare nella realizzazione di composti come calcestruzzi tradizionali, fibrorinforzati ed ad alte prestazioni.

2.1.2.1 Cemento

Il cemento è un legante idraulico, cioè un materiale inorganico finemente macinato che, quando mescolato con acqua, forma un impasto inizialmente plastico e lavorabile che in seguito rapprende ed indurisce. Comparato con leganti non idraulici, come il gesso e la calce, che assorbono acqua anche dopo l'indurimento, il cemento è più duraturo e produce elevate resistenze a compressioni in calcestruzzi e malte. L'elemento base per la realizzazione dei cementi è il cemento Portland, ottenuto tramite macinazione del prodotto di cottura di una miscela di argilla, calcare e sabbia. La sua finezza misurata dalle dimensioni delle particelle può variare tra i 10 e 50 μm con un valore medio di 15 μm . Le principali materie prime che compongono il cemento sono:

- Calce (CaO)
- Silice (SiO₂)
- Allumina (Al₂O₃)

Si fa spesso riscontro di una piccola percentuale di magnesia (MgO), ma anche di alcuni alcali e sporadicamente anche ossidi di ferro. I processi produttivi, mostrati in Fig. 2.4, sono riassunti come segue:

- 1) I materiali grezzi CaO, SiO₂, Al₂O₃, sono miscelati con i restanti materiali minori, sia in forma asciutta sia in forma umida, chiamata liquame.
- 2) La miscela viene fatta entrare nella parte superiore di un forno rotante leggermente inclinato.
- 3) Il materiale si sposta a velocità controllata da una estremità all'altra.
- 4) Si raggiunge il punto di fusione del materiale, chiamato punto di clinkering sui 1500° C. Tale temperatura che viene mantenuta fino a quando il composto non formi dei pellet di materiale. Essi vengono chiamati clinker e sono prevalentemente costituiti da:
 - Silicato tricalcico – C₃S

- Silicato bicalcico – C_2S
- Alluminato tricalcico – C_3A
- Fase ferrica – C_4AF

5) I prodotti vengono raffreddati e trasformati in polvere.

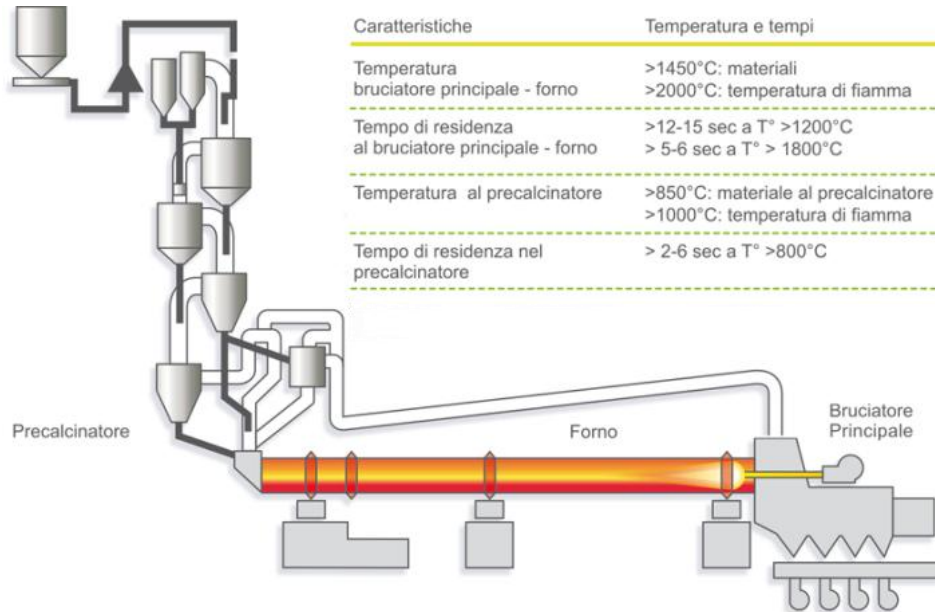


Figura 2. 4 - Processo produttivo del cemento Portland

I differenti processi che stanno alla base dell'idratazione del cemento sono la presa e l'indurimento. Gli alluminati hanno una velocità di idratazione molto elevata, anche troppo, tant'è che deve essere rallentata attraverso l'aggiunta di gesso al clinker, e sono quindi responsabili del processo di presa. L'idratazione dei silicati, invece, fornisce elementi di indurimento e di sviluppo di resistenza meccanica attraverso la formazione di silicati di calcio idrati (C-S-H o gel di cemento). Durante l'idratazione vengono prodotti anche dei cristalli esagonali di idrossido di calcio (Portlandite) che forniscono all'ambiente carattere fortemente alcalino, apportando anche una minima quantità di resistenza meccanica. La resistenza meccanica si sviluppa nella fase successiva alla presa e cresce all'aumentare dell'idratazione della pasta. Ad essa viene associata la diminuzione della porosità del materiale, prima velocemente e successivamente lentamente.

La normativa europea distingue tre classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici, come riportati in Tab. 2.1 adattata dalla norme UNI EN 197-1 (2011):

Classe di resistenza		Resistenza a compressione [MPa]			
		2 giorni	7 giorni	28 giorni	
32,5	L*	-	≥12,0	≥32,5	≤52,5
	N	-	≥16,0		
	R	≥10,0	-		
42,5	L*	-	≥16,0	≥42,5	≤62,5
	N	≥10,0	-		
	R	≥20,0	-		
52,5	L*	≥10,0	-	≥52,5	-
	N	≥20,0	-		
	R	≥30,0	-		
L* è riferita a cementi di tipo III					

Tabella 2. 1 - Classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici [3]

Risulta necessario effettuare scelte progettuali che soddisfino i diversi criteri che si vogliono ottenere: la scelta della tipologia di cemento influisce sulla classe di resistenza a maturazione, ma diverse specifiche progettuali possono richiedere uno sviluppo delle resistenze più o meno veloce nel tempo, laddove una particolare condizione di getto può indirizzare la scelta su un'altra tipologia. Si ricorda come un aumento della quantità di cemento per mantenere rapporti acqua/cemento bassi, comporta un innalzamento della temperatura del calcestruzzo dovuto alle reazioni d'idratazione. Tali fenomeni possono risultare pericolosi se non propriamente controllati, in quanto vi è la possibilità che si vengano ad alterare la monoliticità e l'omogeneità del getto, con possibili ripercussioni sulla durabilità del manufatto.

Più fini sono le particelle del cemento e maggiore risulta l'area superficiale, a parità di volume, che entra in contatto con l'acqua d'impasto. Risulta quindi che cementi fini iniziano l'idratazione più velocemente, con fasi di presa e indurimento più rapide [4].

2.1.2.2 Aggiunte minerali

Per poter garantire uno maggiore sviluppo delle prestazioni da parte del cemento, si possono effettuare aggiunte minerali al clinker di Portland. Si tratta prevalentemente di materiali con caratteristiche pozzolaniche che di per sé non possiedono proprietà leganti, ma le acquistano qualora entrino in contatto con altri elementi, prodotti dall'idratazione del cemento. Stando a Bapat [5], possono essere aggiunti diversi elementi al composito cementizio, ognuno delle quali presenta particolari caratteristiche e sviluppa peculiari proprietà. Quello che sta alla base delle aggiunte è, appunto, il migliorare le prestazioni, la riduzione dell'inquinamento, così come la riduzione dell'utilizzo di materie prime, affinché infatti si possano ridurre i costi di produzione. Molte delle aggiunte provengono da scarti industriali mentre altri sono sottoprodotti di produzione. Le aggiunte possono essere principalmente di due classi:

- Aggiunte di tipo I: non reagiscono con i prodotti che si ottengono dalla reazione di idratazione del cemento con l'acqua
- Aggiunte di tipo II: presentano una caratteristica pozzolanica, reagendo con i prodotti di idratazione, appunto, del cemento.

Aggiunte di tipo I

Stando alla norma UNI EN 12620 (2008) sono principalmente costituite da polveri calcaree o da micronizzati lapidei. Si tratta principalmente di filler, materiali estremamente fini, più fini delle particelle di cemento, che vanno a riempire i vuoti interstiziali. Il loro compito quindi è quello di aumentare la compattezza dell'impasto, aumentando quindi sia la resistenza a compressione sia la resistenza alla penetrazione degli agenti aggressivi dall'esterno, diminuendo la porosità del composto.

Aggiunti di tipo II

Queste tipologie di aggiunte presentano caratteristiche pozzolaniche. Tra quelle più frequentemente incontrate si ricordano:

- Ceneri volanti (Pulverised Fuel Ash – PFA)
- Fumi di silice (Silica Fume – SF)
- Loppa d'altoforno (Blast Furnace Slag – BFS)

Le ceneri volanti si presentano in forma di particelle pressochè sferiche (5-90 μm) spesso cave, la cui forma migliora la lavorabilità degli impasti e ne incrementa la coesione. La loro attività pozzolanica contribuisce in modo non trascurabile alla resistenza finale del calcestruzzo.

Il fumo di silice si presenta come silice amorfa in forma di microsfele di diametro pari a circa 0,1 μm . Data l'elevata finezza, riesce perfettamente prendere posizione nei vuoti interstiziali presenti tra i grani di cemento, ottenendo un impasto meno poroso, più densificato e quindi con caratteristiche meccaniche migliori e meno permeabile. Consente anche di ridurre il fenomeno di bleeding, consentendo quindi una riduzione del rapporto acqua/cemento.

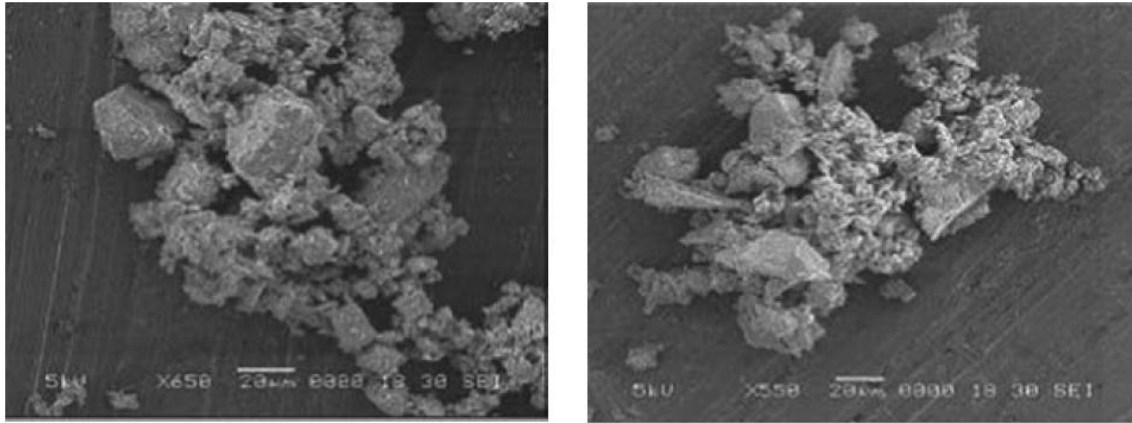


Figura 2. 5 - Immagini al SEM di cemento (a sx) e di loppa granulata d'altoforno (a dx) [5]

La loppa d'altoforno possiede le proprietà idrauliche se contiene pozzolana. Tra le varie aggiunte è l'elemento che richiede una minor quantità di acqua ed additivo superfluidificante per garantire gli stessi livelli di fluidità. Nelle fasi di produzione della ghisa tramite l'altoforno, si vengono a formare grandi quantità di scoria liquida, con composizione chimica contenente ossidi di calcio, silicio e alluminio combinati tra loro, e composizione mineralogica simile al clinker. La loppa acquista le caratteristiche idrauliche quando viene bruscamente raffreddata all'uscita dell'altoforno così da formare granuli. Le sue proprietà idrauliche sono considerate latenti: hanno quindi bisogno di un attivatore come per esempio l'idrossido di sodio, idrossido di potassio o solfato di calcio. Questi attivatori sono parte dei prodotti di idratazione del clinker del cemento Portland. Soltanto in presenza di questi attivatori la loppa presenta le caratteristiche idrauliche.

2.1.2.3 Aggregati

Gli aggregati sono una larga categoria di materiali minerali granulati utilizzati nelle costruzioni e possono essere naturali, artificiali o riciclati da altri materiali precedentemente utilizzati, sempre nel mondo delle costruzioni. Rappresentano una buona soluzione alla riduzione della quantità di pasta cementizia in quanto rappresentano una buona parte del volume dell'impasto del calcestruzzo. I criteri progettuali che governano la scelta della tipologia del dosaggio degli impasti possono essere di diversa natura: si devono tenere in considerazione le possibili reazioni chimiche alcali-aggregati. La loro dimensione può pregiudicare diversi aspetti e quindi devono essere scelti con cura: la loro dimensione può comportare problemi di lavorabilità, non solo per via della minore fluidità d'impasto, ma anche per l'assorbimento dell'acqua libera da parte dell'aggregato stesso. Inoltre bisogna essere in grado di riempire i vuoti che si vengono a formare nell'impasto, di dimensioni elevate. Una distribuzione granulometrica adeguata deve prevedere l'uso di aggregati di diverse dimensioni per ottenere un migliore riempimento dello spazio.

2.1.2.4 Acqua

L'acqua è necessaria per poter garantire una corretta idratazione del cemento nell'impasto. Deve essere accuratamente dosata per poter mantenere i rapporti acqua/cemento da progetto. Secondo le normative vigenti, è possibile utilizzare acqua potabile anche senza controlli.

2.1.2.5 Additivi

Lo sviluppo tecnologico ha portato alla realizzazione di particolari additivi chimici che possono aumentare e migliorare un particolare caratteristica del calcestruzzo. Quello più largamente utilizzato è il superfluidificante, le cui qualità principali sono le seguenti:

- Riduzione del rapporto a/c a parità di fluidità richiesta;
- Raggiungimento di a/c particolarmente bassi;
- Riduzione della richiesta d'acqua a parità di slump test o di spandimento.

I superfluidificanti sono polimeri idrosolubili, per lo più poli-naftalen-solfonati, poli-melamminsolfonati, poli-carbossilati o poli-acrilati. Gli ultimi due sono relativamente più recenti e generalmente più efficaci. Il loro effetto migliora la dispersione, quindi facilita il movimento, delle particelle solide attraverso due diversi fenomeni, come identificato in Fig. 2.6:

- Repulsione elettrostatica;
- Allontanamento per impedimento sterico.

Risultati migliori si ottengono tramite gli additivi di ultima generazione che migliorano le componenti di scorrimento grazie ad un ramo sterico con catene laterali che allontanano maggiormente i due elementi, come da Fig. 2.6.

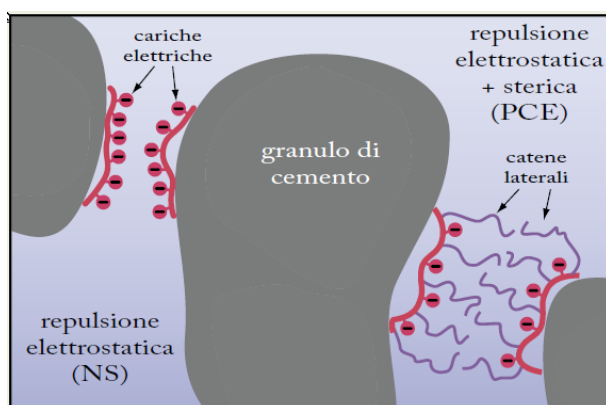


Figura 2. 6 - Repulsione elettrostatica ed elettrostatica e sterica [3]

I più comuni effetti collaterali nell'utilizzo di additivi superfluidificanti mantenendo costanti il rapporto a/c sono la tendenza all'essudazione e alla segregazione e l'eccessiva sensibilità alle minime variazioni di contenuto d'acqua. Invece, se si utilizza l'additivo per diminuire la quantità d'acqua a parità di altri fattori, si dovrà vigilare affinché l'impasto

non diventi troppo viscoso e non sia caratterizzato da uno scorrimento eccessivamente lento. I vantaggi di un corretto uso dell'additivo superfluidificante comprendono anche alcuni importanti miglioramenti a parità di resistenza e fluidità, come conseguenza di una contemporanea riduzione dell'acqua e del cemento, ovvero:

- Riduzione del ritiro igrometrico;
- Riduzione dei gradienti termici;
- Riduzione dell'effetto di creep e altre deformazioni che sono tempo dipendenti.

Altri additivi infine possono essere utilizzati come aggiunte all'impasto. Tra questi, si possono elencare i seguenti:

- Aeranti: consentono di inglobare microbolle di aria che migliora la resistenza ai cicli di gelo/disgelo
- Acceleranti: riducono i tempi di idratazione ed indurimento
- Ritardanti: aumentano i tempi di idratazione ed indurimento
- Antiritiro: Shrinkage Reducting Admixture, (SRA) che consentono una maturazione più "protetta", attraverso il rallentamento dei fenomeni capillari che portano alla perdita d'acqua per evaporazione e al conseguente ritiro.

2.1.3 Calcestruzzo tradizionale

Il calcestruzzo tradizionale è quello che viene usualmente confezionato per opere civili che non abbiano richieste di particolare rilevanza. La sua composizione prevede l'uso di cemento, più o meno fine, acqua ed aggregati di più o meno grossolana fattezze e dimensione. È un tipico materiale da costruzione edile, di facile lavorabilità e basso costo, impiegato comunemente per le tipiche realizzazioni strutturali, che però può arrivare a poter essere sfruttato per generare forme e sviluppi disparati, talvolta anche opere scultoree. Può essere utilizzato con degli additivi, che di norma non devono superare il 5% in massa la quantità di cemento, in funzione della lavorabilità e categoria di esposizione, resistenza, e durabilità richieste. Viene sempre accompagnato da barre di rinforzo per sopperire alla ridotta resistenza a trazione che caratterizza il calcestruzzo. Le barre sono di acciaio che ha, invece, una ottima capacità di resistenza a trazione e ha inoltre una duttilità molto elevata. Trovano posizione sia longitudinalmente, sia trasversalmente come "staffa" in grado di formare una gabbia entro cui far correre quelle longitudinali. La sinergia tra due materiali così eterogenei è spiegata tenendo presenti due punti fondamentali:

- Tra l'acciaio ed il calcestruzzo si manifesta un'aderenza che trasmette le tensioni dal calcestruzzo all'acciaio in esso annegato. Quest'ultimo, convenientemente disposto nella massa, collabora sopportando essenzialmente gli sforzi di trazione, mentre il calcestruzzo sopporta quelli di compressione.
- I coefficienti di dilatazione termica sono pressochè uguali.

Per migliorare l'aderenza delle barre, si sono applicate delle nervature che aumentino l'adesione e la superficie di contatto tra i due materiali, aumentando la forza necessaria per l'estrazione della barra dal conglomerato.

2.1.4 Calcestruzzo fibrorinforzato

Le fibre sono state utilizzate fin da tempi antichi come rinforzo in materiali fragili: è noto infatti che già popoli come Egizi e Babilonesi hanno utilizzato paglia per migliorare le prestazioni dei mattoni cotti al sole, crini di cavallo per rinforzare gli intonaci. Nel calcestruzzo fibrorinforzato (Fiber Reinforce Concrete – FRC), assieme agli elementi che normalmente si utilizzano nel conglomerato, come acqua, cemento, aggregati di diversa forma e dimensione, additivi, si aggiungono fibre che hanno lo scopo di rinforzare il composto. Gli incrementi non sono soltanto della tensione massima raggiunta, ma piuttosto si hanno comportamenti che risultano in una migliore tenacità alla frattura, intesa come lavoro di deformazione per giungere a rottura del materia, di duttilità, di resistenza alla fatica, all'assorbimento di energia all'urto, alla capacità di resistere ai carichi dopo la fessurazione, all'aumento della resistenza all'usura e alla durabilità. Il materiale si comporta in maniera differente in base alla variazione del tipo di matrice, ma anche e soprattutto in base alla tipologia di fibre impiegate nella miscela e al loro dosaggio.

In funzione del dosaggio, appunto, si possono ottenere due generi di comportamento del materiale con la presenza e la formazione di singola fessura, Fig. 2.7 (a), oppure con alti dosaggi di fibre, è possibile fare riscontro di un comportamento incrudente con la formazione di fessure multiple, Fig. 2.7 (b) [3]. Normalmente il comportamento (a) si verifica quando si ha una percentuale di fibre che sia inferiore al 2% in volume, mentre superando tale quota si possono instaurare fenomeni multifessurativi, con aumento della resistenza.

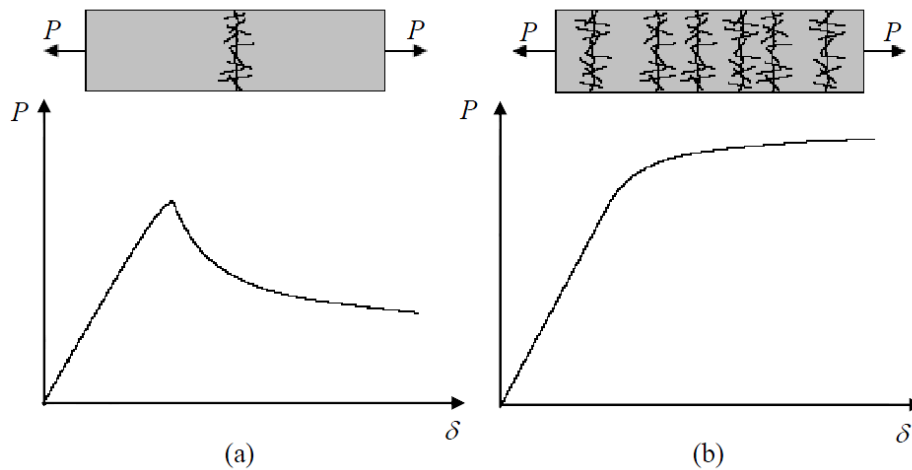


Figura 2.7 - Effetto del dosaggio sul comportamento del FRC. Basse percentuali di fibre (a), alte percentuali (b) [4]

Gli aggregati che vengono impiegati nella realizzazione delle calcestruzzo fibrorinforzato devono essere studiati attentamente. La loro dimensione caratterizza la dispersione delle fibre all'interno della matrice: una dimensione maggiore degli aggregati significa una minore omogeneità di dispersione delle fibre nell'impasto, come in Fig. 2.8. Stando a questo fenomeno, un ottimale comportamento delle fibre nell'impasto si realizza quando la dimensione massima degli aggregati sia un valore compreso tra $\frac{1}{5} \div \frac{1}{3}$ la lunghezza delle fibre impiegate [1].

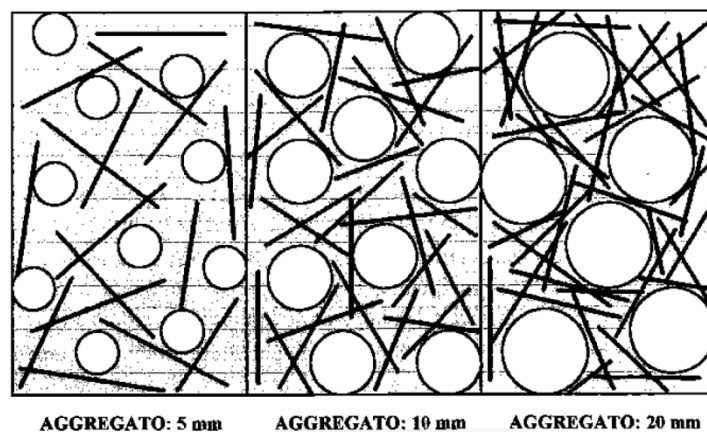


Figura 2.8 - Dispersione delle fibre in matrici con diversa dimensione degli aggregati [1]

2.1.4.1 Fibre

Le fibre che compongono i compositi cementizi fibrorinforzati possono essere suddivise in due famiglie in base al modulo di elasticità del materiale di cui sono costituite:

- Fibre rigide: il loro modulo di Young è maggiore di quello della matrice cementizia, tra le quali si trovano:
 - Acciaio, Kevlar, Carbonio, Amianto, Vetro, ecc.

- Fibre flessibili: il loro modulo elastico è minore di quello della matrice in cui sono disperse, tra cui le seguenti:
 - Poliacrilonitrile, Cellulosa, Nylon, Polipropilene, ecc.

Le fibre con basso modulo di elasticità, riducendo le microfessurazioni dovute al ritiro, migliorano la durabilità. Le fibre ad alto modulo di elasticità migliorano la resistenza del materiale composito e quindi la capacità di resistere alle sollecitazioni [1].

I principali parametri che influenzano le caratteristiche tecniche del calcestruzzo fibrorinforzato sono il tipo di fibra, la forma, il rapporto d'aspetto e il relativo dosaggio. La forma delle fibre è generalmente finalizzata ad aumentare la resistenza allo sfilamento e può essere di diversi tipi:

- fibre lisce;
- fibre con asperità al contorno (twisted);
- fibre con ancoraggi alle estremità (hooked);
- fibre con asperità e ancoraggi.

L'energia assorbita aumenta all'aumentare del rapporto d'aspetto, definito come rapporto tra lunghezza della fibra sul suo diametro, come indicato nella Fig, 2.9.

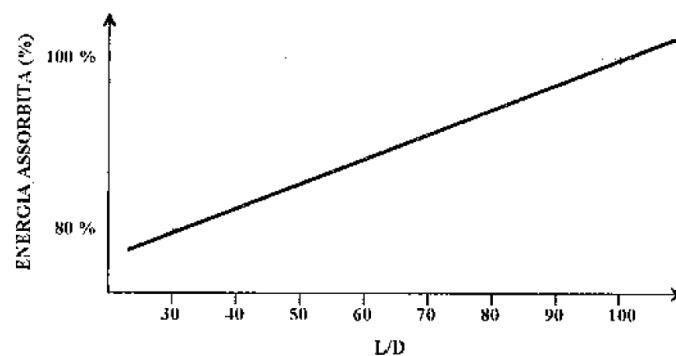


Figura 2. 9 - Influenza del rapporto d'aspetto di una fibra con l'energia assorbita [1]

Il dosaggio delle fibre rappresenta il fattore predominante nel comportamento dell'elemento ed influisce direttamente sui parametri meccanici e le prestazioni tecniche del composito fibrorinforzato. Il dosaggio viene sia espresso in quantità di peso (kg/cm^3 di fibra nell'impasto) sia in quantità volumetriche in funzione del volume complessivo del calcestruzzo.

2.1.5 Calcestruzzi ad Alte Prestazioni

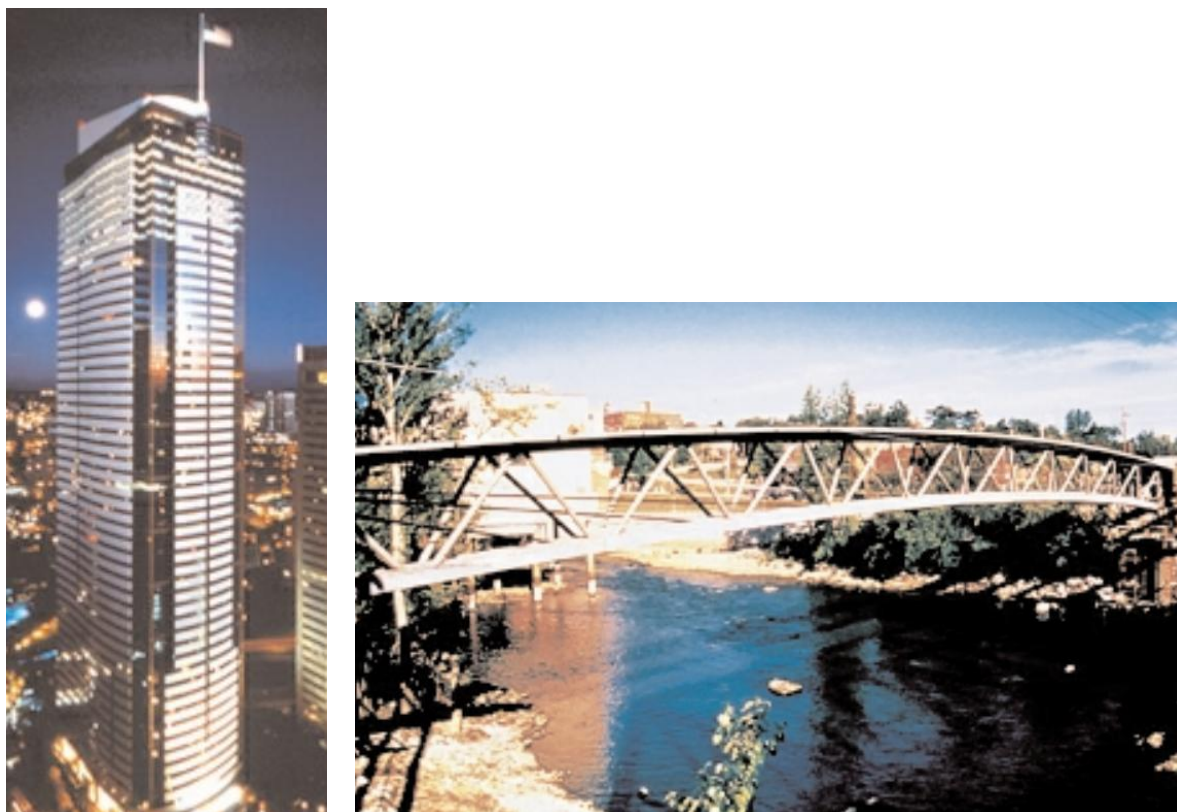


Figura 2.10 - A sx, Two Union Square Building, Washington USA. A dx Sherbrooke Bridge in Quebec. Entrambi realizzati con HPC

I calcestruzzi ad Alte Prestazioni (HPC – High Performance Concrete) sono tipi di conglomerati che acquistano capacità e qualità elevate per poter garantire livelli prestazionali superiori a quelli che si ottengono con i conglomerati tradizionali, con complessità di realizzazione, sia progettuale sia in opera, maggiore. Dalla loro definizione risulta pertanto che la prestazione che deve essere garantita elevata non risulta essere per forza quella della resistenza a compressione, ma calcestruzzi ad elevate resistenza alla compressione risultano rientrare nella categoria di calcestruzzi ad alte prestazioni.

I calcestruzzi ad alte prestazioni presentano caratteristiche che possono essere sviluppate in base alla particolare tipologia e ambiente d'uso. Tra le varie proprietà che possono risultare migliorate, troviamo:

- elevata resistenza a compressione;
- migliorare le prestazioni allo stato fresco;
- autocompattamento – Self-compacting concrete;
- rapido sviluppo della resistenza;
- incremento del modulo di elasticità;
- alta resistenza all'abrasione;
- aumento della durabilità nel tempo;
- diminuzione della permeabilità e diffusione;

- aumento della resistenza agli agenti chimici;
- aumento della resistenza ai cicli gelo/disgelo;
- riduzione del fenomeno della segregazione.

La possibile realizzazione di questi tipo di materiale è dovuta ad una attenta e dettagliata scelta e miscelazione di componenti. Questi devono essere di qualità adeguate e con caratteristiche che riescano a soddisfare e garantire i livelli prestazionali richiesti. Tipicamente questi conglomerati hanno un rapporto acqua/cemento che varia tra 0,2 e lo 0,45. Minore è il rapporto, minore è la porosità capillare, maggiore la resistenza meccanica, la durabilità e minore la permeabilità del composto. L'utilizzo di additivi superfluidificanti ha reso possibile raggiungere livelli di rapporti acqua/cemento anche estremamente ridotti, mantenendo fluido e lavorabile l'impasto.

2.1.5.1 Resistenza a compressione

Per una più corretta valutazione ed impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni è meglio poter guardare oltre alle resistenze di laboratorio su cubi a 28, valutando anche quelle con a 56 e 91 giorni andando a prediligere quelli che hanno carichi di rottura più elevati al 91esimo giorno. L'utilizzo di aggiunte pozzolaniche, anche in quantità elevate, comporta uno sviluppo della resistenza meccanica in archi temporali maggiori. Per calcestruzzi ad alta resistenza, è bene che il materiale riesca a sviluppare una resistenza di almeno 30 MPa dopo 7 giorni per provini cubici.

L'andamento del grafico sforzo-deformazione per elementi ad alte prestazioni in compressione uniassiale si caratterizza con un comportamento che, al crescere del carico di rottura ultimo, si presenta con proprietà di elasto-fragilità. Nel dettaglio:

- il legame si presenta sempre più elastico lineare, fino a circa l'80% della tensione di rottura;
- il ramo post picco è sempre meno pronunciato, fino ad annullarsi per resistenze molto alte.

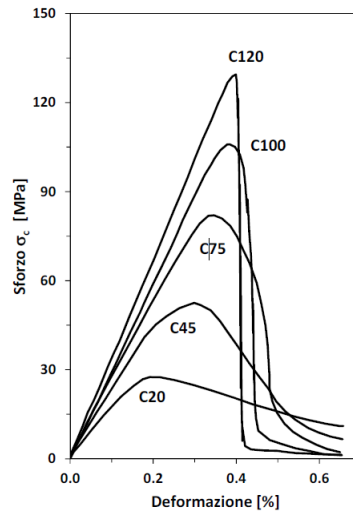


Figura 2. 11 Legame sforzo-deformazione in compressione uniassiale per diverse classi di calcestruzzo

A livello micromeccanico, la principale differenza rispetto ai calcestruzzi ordinari risiede in un ritardo nello sviluppo della microfessurazione all'interfaccia tra pasta cementizia e aggregati che è meno porosa rispetto ai calcestruzzi ordinari, quindi più resistente. Nei calcestruzzi ordinari, appunto, si forma una microfessurazione più pronunciata nell'interfaccia pasta/aggregato a causa di una maggiore differenza di grandezza fra pasta e aggregato e di una minore compattezza della pasta stessa. A livello macroscopico, questo si traduce in scorrimenti plastici che si traducono in un ramo post-picco più "morbido".

2.1.5.2 Modulo di Young

Il modulo di Young a compressione nei calcestruzzi ad alte prestazioni, come per quelli ordinari, presenta valori crescenti con la resistenza a compressione con diverse formulazioni e modalità di calcolo già presenti in letteratura. La sostanziale differenza che intercorre nei moduli elastici tra calcestruzzi tradizionali e quelli ad alte prestazioni è che nei primi la tipologia di inerte utilizzato non influenza l'andamento del modulo di elasticità. Negli HPC, invece, l'elasticità è significativamente dipendente dal tipo di aggregato utilizzato poiché la loro matrice cementizia presenta elevati valori di resistenza meccanica. Di fatto, la dimensione nominale degli aggregati per essere ottimale deve essere compresa tra 9,5 mm e 12,5 mm, così come attestato in diversi studi, per poter garantire una migliore resistenza alla compressione. Non solo deve essere adeguata la resistenza dell'aggregato stesso, ma bisogna anche poter garantire un livello di coesione o adesione tra pasta cementizia e aggregato che sia adeguato poiché ricoprono importanti fattori nella determinazione finale della resistenza del materiale. Le forme e la geometria dell'aggregato influiscono anch'esse nella determinazione dei parametri meccanici, pertanto necessitano di criteri progettuali che tengano in considerazione i molteplici aspetti, con il fine di migliorare la coesione tra pasta ed aggregato e quindi migliorarne le prestazioni.

2.2 Calcestruzzi Fibrorinforzati ad Alte Prestazioni (HPFRCC)

L'acronimo HPFRCC deriva dall'inglese High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite, ovvero composto cementizio fibrorinforzato ad alte prestazioni. La nascita di questo prodotto è nata dal limite incontrato nello sviluppo degli elementi fibrorinforzati in calcestruzzo (FRC) a causa della loro composizione: la ridotta lavorabilità nei composti con volumi crescenti di fibre ha, infatti, ne ha impedito la sua entrata nella categoria High Performance e, parallelamente, lo sviluppo dei materiali HPC risultava limitato per via della loro scarsa resistenza a trazione e per la loro elevata fragilità in compressione. Per mitigare queste due caratteristiche, si sono studiate soluzioni "su misura" (tailored) che vedessero sia l'impiego di fibre, sia elevate prestazioni. Si sono avuti studi e sviluppi che hanno dato alla luce materiali differenti, come il SIFON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) in grado di raggiungere una quantità di fibre pari al 12-13% del volume complessivo, dieci volte superiore alla quantità contenuta in normali FRC, arrivando a resistenze a compressione di 120-140 MPa.

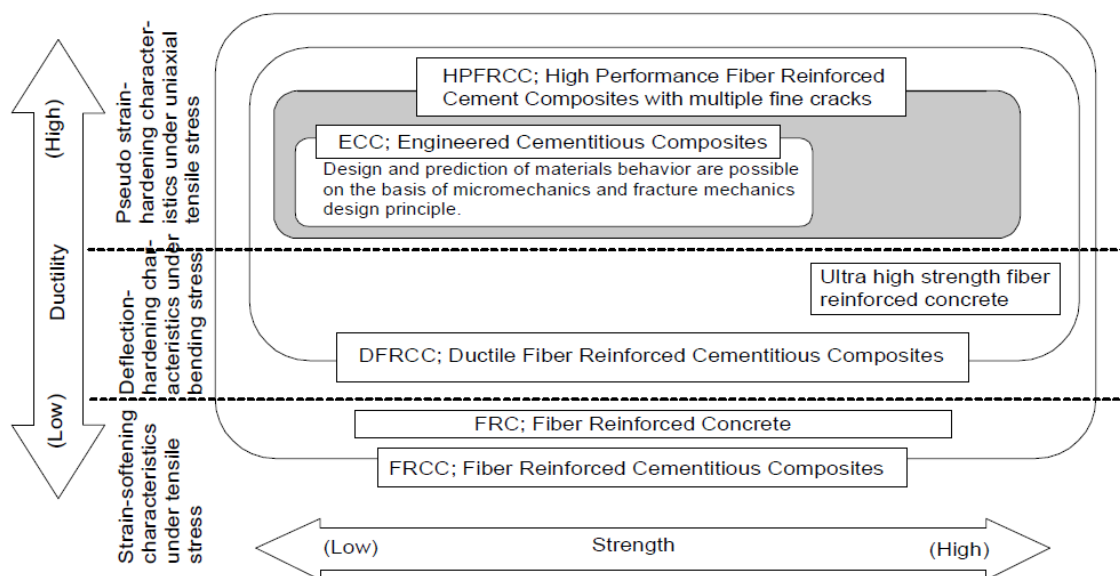


Figura 2. 12 - Classificazione dei composti fibrorinforzati [6]

2.2.1 Comportamento degli HPFRCC

L'utilizzo, come visto in precedenza, di elementi fini nell'impasto cementizio, le aggiunte di additivi superfluidificanti, la possibilità di ridurre i rapporti acqua/cemento fino a valori molto bassi, l'impiego di fibre d'acciaio sottili hanno reso possibile lo sviluppo di quelli che vengono chiamati HPFRCC. Questi materiali sono caratterizzati da un'eccellente capacità di deformazione a trazione e sviluppano una fessurazione multipla che fornisce al composto un comportamento incrudente sotto sforzi di trazione.

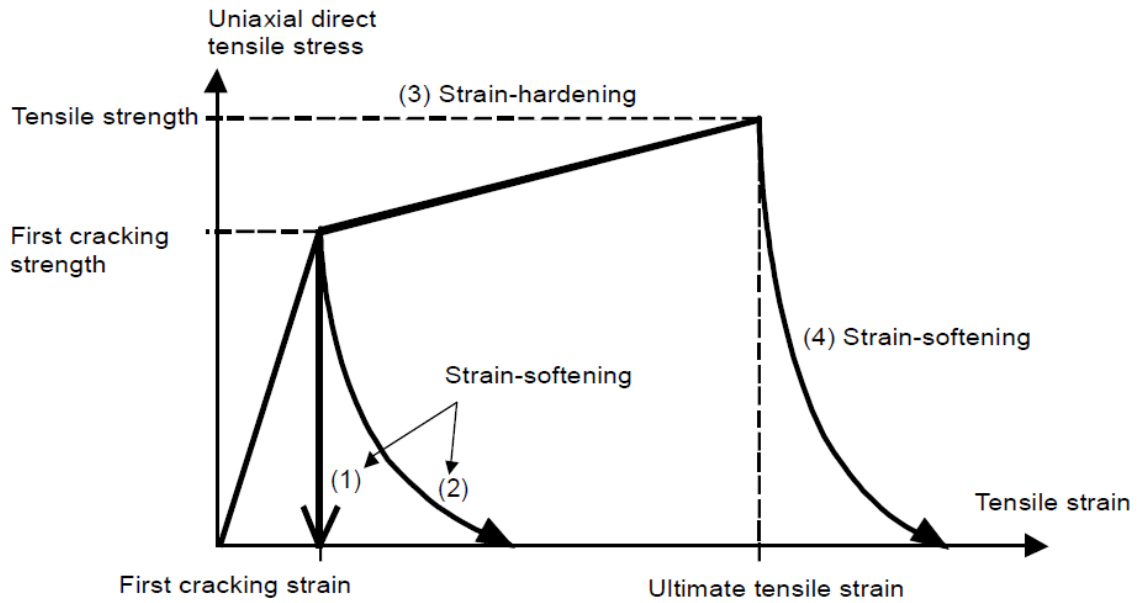


Figura 2.13 - Concetto di 'strain-hardening' e 'strain-softening' sotto sforzi assiali di trazione

Come visto, i composti FRC seguono i due andamenti tipici (1) e (2) dopo la formazione della prima fessura, senza ottenere nel ramo post-fessura valori di tensione più elevati, così come valutato per elementi cementizi. Il materiale HPCFRCC, invece, aumenta la propria tensione massima a seguito della formazione della prima fessura, seguendo il comportamento descritto dalla curva (3) in Fig. 2.13.

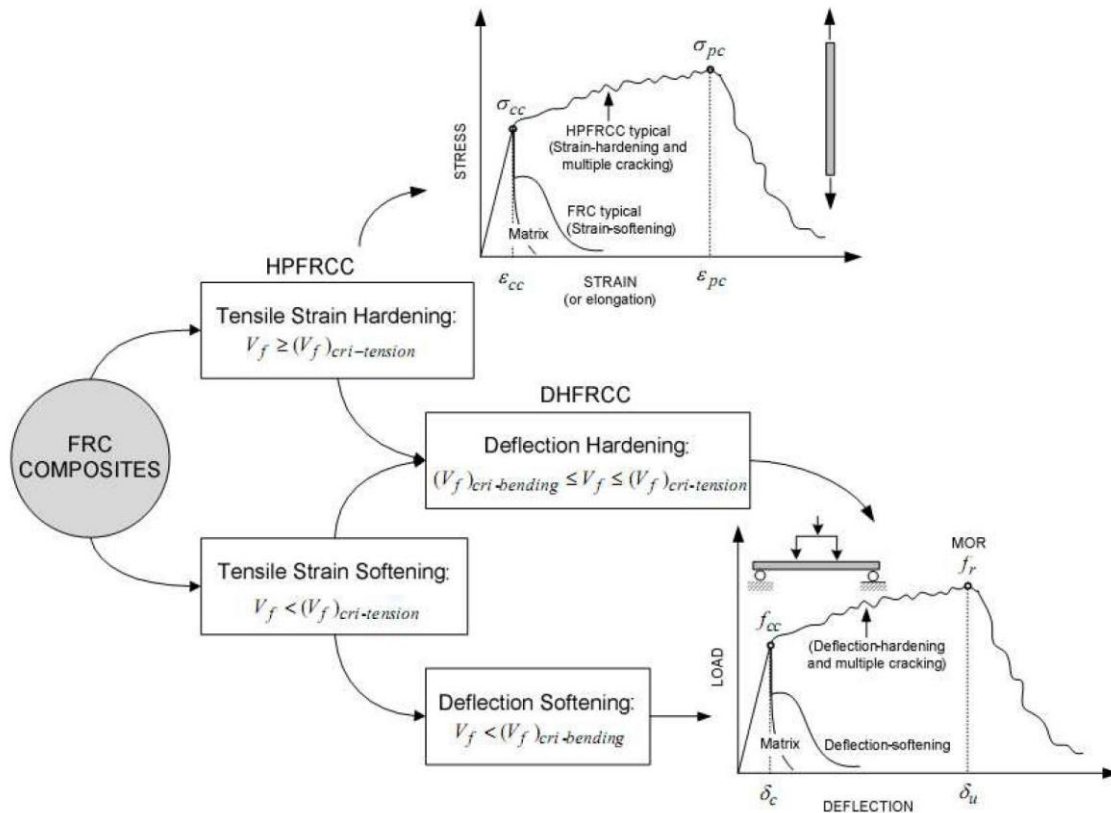


Figura 2. 14 - Classificazione degli FRC basata sulla risposta sforzo-deformazione pre prove a trazione e a flessione [7]

Come spiegato nel paragrafo relativo agli HPC, la categoria High Performance è utilizzata per distinguere materiali con particolari prestazioni da quelli convenzionali, non soltanto la resistenza a compressione. Quello che fornisce attenzione sono per esempio i guadagni che si hanno in termini di resistenza, duttilità, tenacità, durabilità, rigidezza, resistenza termica, ma anche costo finale del materiale e dell'elemento strutturale prodotto, in funzione soprattutto della vita utile attesa. La valutazione 'high performance' per alcune delle sopracitate qualità deve essere fatta in funzione del comportamento secondo quanto identificato nella Fig. 2.14. Il comportamento a trazione diretta del materiale può essere *strain-hardening* (incrudente) oppure *strain-softening* (degradante). Stando a Naaman e Rehindart [7] si definiscono materiali HPFRCC quelli che hanno un comportamento di tipo *strain-hardening*. In base al comportamento flessionale, invece, si fanno le uguali distinzioni, andando a valutare l'andamento del diagramma carico-spostamento determinato in una prova a flessione. Si hanno quindi due comportamenti tipici: *deflection hardening* e anche *deflection softening*.

2.2.2 Elevata duttilità

“Gli High Performance Fiber Reinforced Cement Composites sono una classe di compositi FRC caratterizzati da un comportamento *strain-hardening* a trazione dopo la prima fessurazione, accompagnato da una fessurazione multipla fino a livelli relativamente alti

di deformazione” [8]. Viene oggi ampiamente riconosciuto che l’uso di questi materiali possa significativamente migliorare ad esempio il comportamento delle struttura sotto azioni sismiche, così come la resistenza ad urti ed esplosioni. La loro particolare caratteristica è quella di poter sviluppare un comportamento incrudente. Il significato pratico di questa loro peculiarità è nella formazione di una microfessurazione estesa lungo tutta la lunghezza dell’elemento sollecitato a trazione o nella parte all’intradosso quando inflesso. La resistenza a sopportare gli sforzi aumenta, così come aumenta la deformazione ultima.

Il passaggio successivo è stato quello di riuscire a controllare l’ampiezza di fessurazione. Si è perciò sviluppato una nuova tipologia di materiale cementizio. Gli Engineered Cementitious Composites (ECCs), una tipologia di materiale che rientra nella categoria degli HRPFRCCs, come da Fig. 2.12, rappresentano un nuovo elemento che può offrire una soluzione al problema della durabilità delle strutture. Questa tipologia di composto può ottenere una deformazione ultima di circa 300 ÷ 500 volte superiore in riferimento a calcestruzzi tradizionali (3 ÷ 7 % di deformazione contro lo 0,1 % del calcestruzzo tradizionale), mantenendo l’apertura di fessura entro valori molto bassi, sull’ordine di 80 μm . Per queste caratteristiche, Mustafa Sahmaran e Victor C. Li [9], si chiedono se questo particolare tipo di materiale può essere accettato come calcestruzzo senza fenomeni fessurativi (*crack-free concrete*). Gli HRPFRCC hanno un comportamento di *strain-hardening* con la formazione di multi fessure di piccole dimensioni che possono portare una quantità maggiore di carico dopo la loro formazione, consentono al materiale cementizio di comportarsi come un metallo duttile.

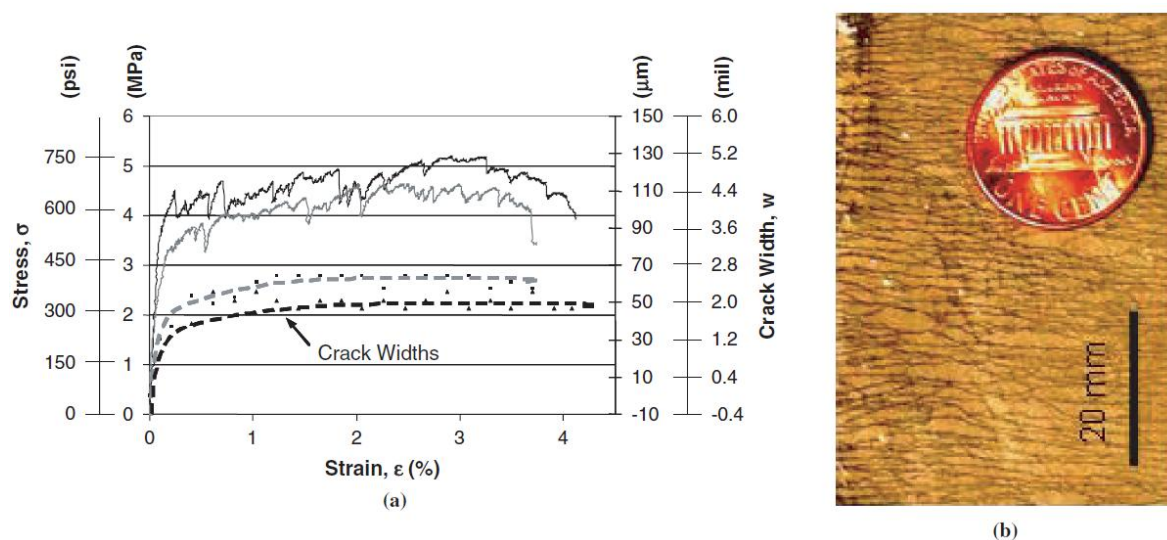


Figura 2. 15 - ECC: (a) andamento sforzo-deformazione e (b) sviluppo delle microfessure [9]

Non si ha un particolare mix design per questo tipo di materiali, ma ogni “ingrediente” che lo compone viene accuratamente scelto per poter essere utilizzato al meglio delle sue caratteristiche. Infatti, la realizzazione è “tailored”, ovvero fatta su misura, così come sono

fatte su misura le fibre impiegate. Il loro volume utilizzato V_f è di solito pari almeno al 2%. Gli ECC quindi non hanno un contenuto di fibre al loro interno particolarmente elevato, ma la loro composizione, attentamente progettata su basi micromeccaniche, consente di migliorare la coesione tra matrice e fibre che consente di governare efficacemente la redistribuzione degli sforzi a seguito della formazione della prima fessura.

I vantaggi che si ottengono da queste caratteristiche sono innumerevoli: una riduzione dell'apertura di fessura, o meglio ancora, la formazione di molteplici fessure al posto che la propagazione e l'accrescimento di una singola fessura rende il materiale molto meno permeabile all'ingresso di agenti aggressivi, come si può vedere in Fig. 2.16.

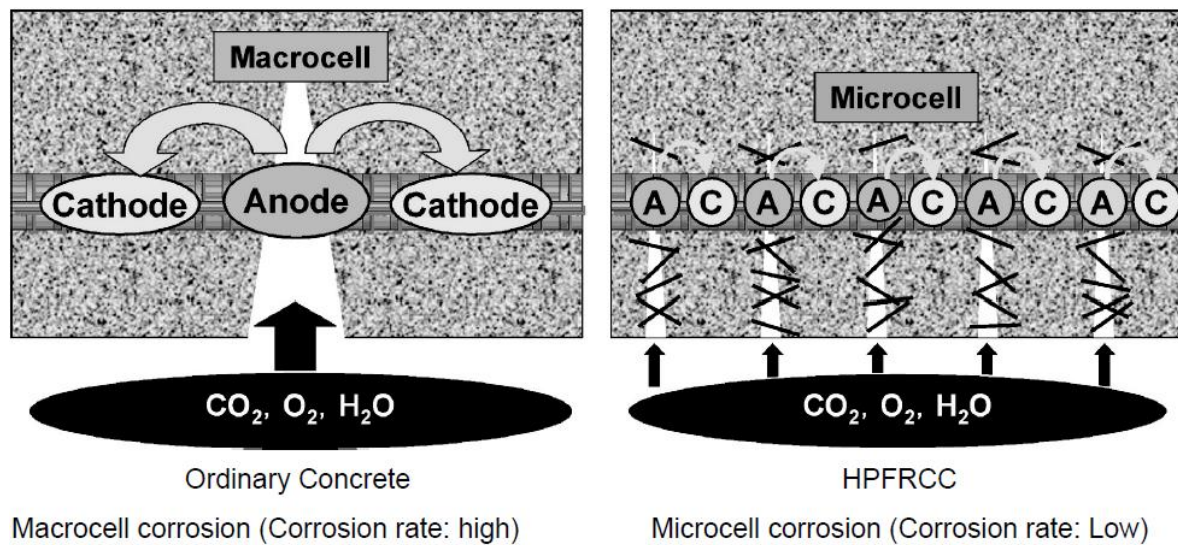
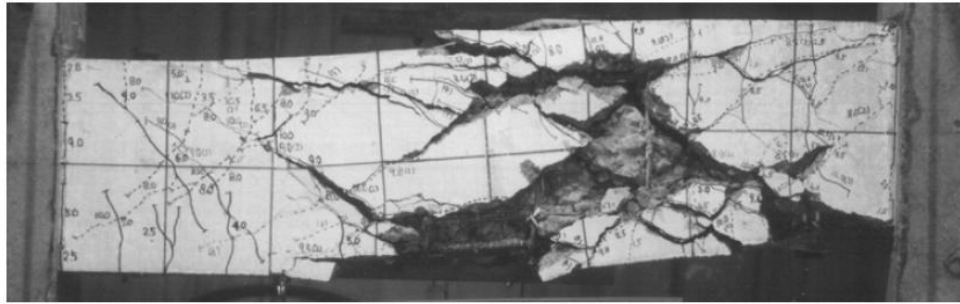


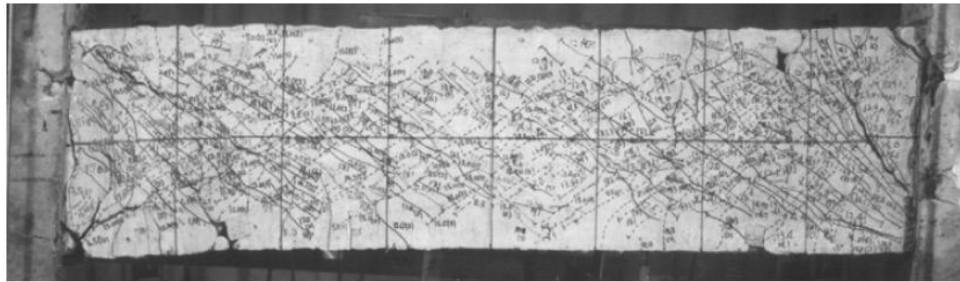
Figura 2. 16 - Andamento della corrosione in funzione della tipologia di fessura [6]

Questo particolare materiale può trovare particolari applicazioni in campi dove sono fatte esplicite richieste di duttilità. Fukuyama *et al.* hanno sperimentato l'utilizzo degli ECC come apparati sismo-resistenti, dove, dall'immagine Fig. 2.17, si nota una notevole differenza tra il comportamento a taglio di una trave normalmente armata e l'uso di materiale con elevata duttilità.

Un altro importante fattore è la capacità di poter sfruttare le potenzialità di self-healing autogeno: come verrà meglio spiegato nel Capitolo 3, la particolare composizione chimica del composto e le sue proprietà fisiche possono influire favorevolmente sullo sviluppo dei prodotti tipici del self-healing autogeno in diversi tipi di ambienti, come visto in Fig. 2.18.

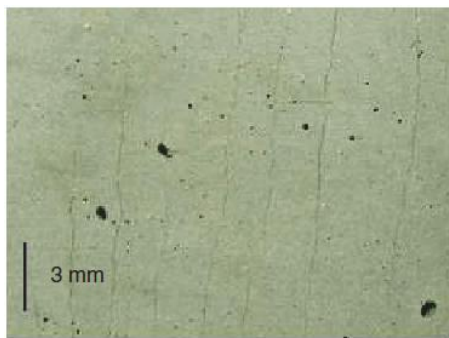


Reinforced Concrete Shear Beam

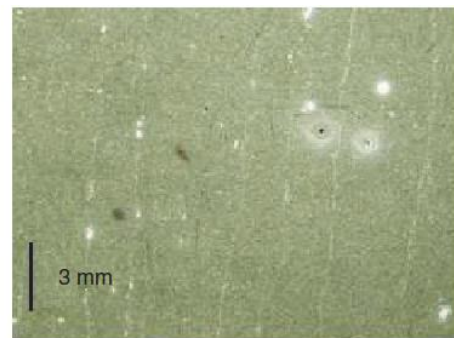


ECC Shear Beam

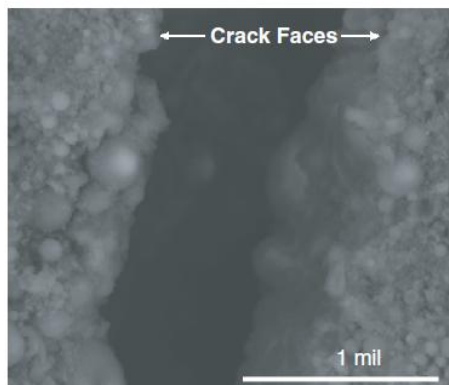
Figura 2. 17 - Applicazione degli ECC come trave a taglio [14]



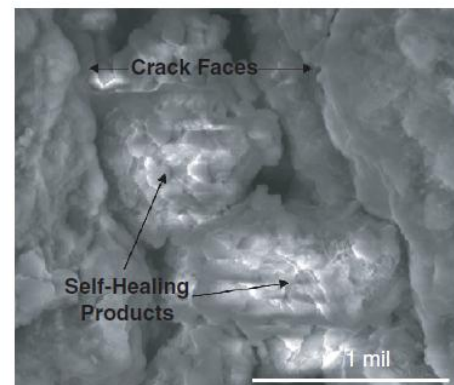
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2. 18 - Effetto del self-healing sull'ECC prima (a, c) e dopo (b, d) [9]

2.3 Fibre naturali -NFRC (Natural Fiber Reinforced Concrete)

Una sempre maggiore consapevolezza nei confronti delle tematiche ambientali ha numerose ricerche scientifiche verso la realizzazione, lo sviluppo e lo studio di materiali alternativi a quelli già esistenti ed attualmente in uso. Si sono indirizzate le indagini verso le fibre naturali, che spesso sono sotto prodotti dell'industria agricola, hanno un basso costo di produzione e nel loro ciclo-vita e presentano un bilancio di emissione in ambiente di gas serra, come la CO₂, che può risultare essere addirittura negativo, consumandone più di quello utilizzato nella loro produzione. A differenza delle fibre sintetiche, le fibre naturali offrono un approccio economico e sostenibile che può essere utilizzato per ridurre i costi di costruzione dei materiali. Inoltre, il bisogno di sostenibilità ha spinto il settore della ricerca in due direzioni: quella di cambiare le proprietà intrinseche dei materiali, utilizzando aggiunte pozzolaniche come la loppa d'altoforno, oppure quella di apportare modifiche estrinseche, come l'utilizzo di fibre per migliorare le proprietà del materiale.

L'unione di fibre naturali per apportare modifiche al materiale era già stata affrontata da diverso tempo. Un sempre più stringente bisogno deriva dal dover rimpiazzare le fibre di amianto nella produzione di elementi a matrice cementizia con l'aggiunta di fibre. L'utilizzo di fibre ad alto contenuto tecnologico ed energetico (PVA, Carbonio, Kevlar, PPE ecc.) spesso non è possibile in nazioni in via di sviluppo, oppure può non essere economicamente vantaggioso il loro utilizzo per realizzazioni su larga scala. Le fibre naturali, quindi, si pongono come soluzione a basso contenuto di energia, largamente disponibili e con costi di produzione molto modesti [11].

2.3.1 Sviluppi di elementi cementizi rinforzati da fibre naturali

Questi particolari elementi fibrorinforzati hanno lo scopo di poter garantire le stesse migliori prestazioni che si ottengono dall'aggiunta di fibre di produzione industriale alla matrice cementizia, come è stato detto in precedenza. Una migliore resistenza a sforzi di trazione, una maggiore duttilità, si cerca di aumentare le prestazioni del materiale.

L'utilizzo su larga scala degli elementi fibrorinforzati nel settore delle costruzioni risulta essere per il momento limitato per via della ridotta conoscenza che si ha delle fibre e delle loro caratteristiche. La mancanza di informazioni incentiva l'utilizzo di metodi tradizionali e già collaudati [10]. Una ulteriore limitazione è quella che gli elementi di cui sono composte le fibre naturali, in particolare la lignina, quando entrano a contatto con ambienti alcalini tipici delle matrici cementizie, possono portare portare a processi di degradazione che portano ad una riduzione della resistenza del materiale, come sottolineato da Gram [12]

2.3.1.1 Degradazione da ambiente alcalino

Il cemento Portland viene largamente utilizzato nel settore delle costruzioni perché è composto da una elevata quantità di clinker, circa 95%. Le reazioni di idratazione con l'acqua portano all'aumento del pH contenuto nei vuoti e nei pori capillari della matrice cementizia, fino ad arrivare ad elevati valori di circa 11/12 pH. Il limitato utilizzo di fibre naturali in matrici cementizie è anche in parte causato da una riduzione di durabilità delle fibre stesse a contatto con un ambiente fortemente alcalino, come quello della pasta cementizia. La riduzione di durabilità è vista come una minore resistenza di "pull-out" (sfilamento) causata da un indebolimento delle fibre per via dell'attacco alcalino, dalla mineralizzazione delle fibre provocata dalla migrazione di prodotti di idratazione verso il lumen ed i vuoti cellulari, e da una variazione di volume dovuta all'assorbimento di liquidi. Questi fattori dipendono dal tipo di fibra, dalla composizione chimica della matrice cementizia, dalla sua porosità e dall'ambiente di stagionatura [13].

La degradazione delle fibre naturali in composti a base cementizia è dovuta alla presenza di soluzione alcalina presente nei vuoti capillari della pasta cementizia. Si dissolve la lignina e l'emicellulosa presente tra le lamelle delle fibre e quindi si ottiene un indebolimento generale del collegamento tra le singole cellule. Un altro fenomeno è quello dell'idrolisi alcalina di molecole di cellulosa che causa la degradazione delle catene molecolari e porta ad una riduzione del grado di polimerizzazione e quindi ad una resistenza a trazione minore [12], come mostra appunto Fig. 2.19.

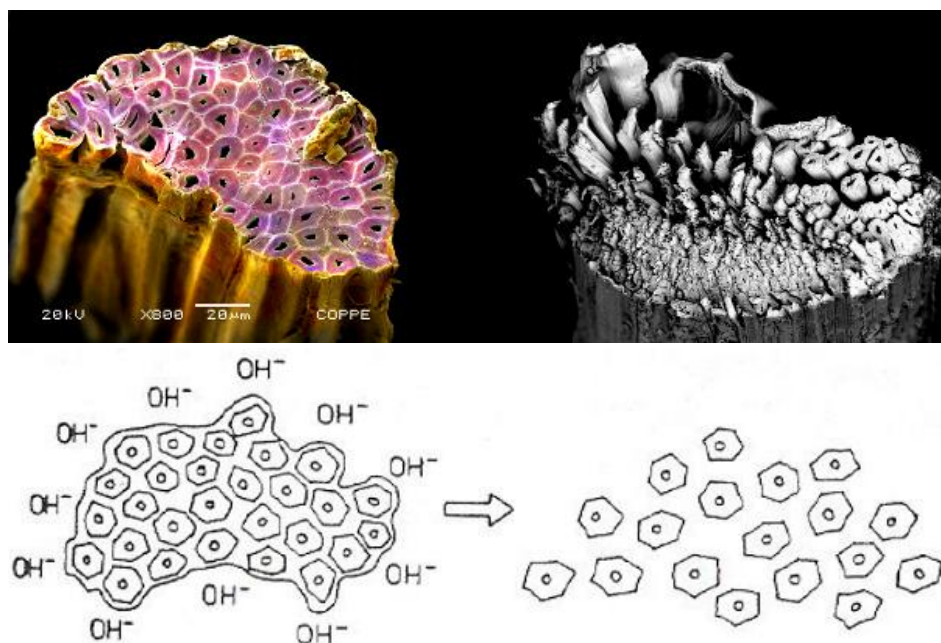


Figura 2. 19 - Immagine e schema di una decomposizione in ambiente alcalino di una fibra di Sisal [12]

Oltre alla perdita di proprietà meccaniche, i compositi cementizi che hanno al loro interno fibre di origine vegetale acquistano fragilità con il tempo. Questo, stando a Toledo Filho *et al.* [13] è dovuto al fatto che si ha un trasporto di prodotti di idratazione, più precisamente

di idrossidi di calcio, che conduce ad una mineralizzazione delle fibre. Successivamente, stando allo studio di Almeida *et al.* [14], avvengono due meccanismi di degradazione delle fibre secondo quanto attribuito da analisi termogravimetriche: la mineralizzazione delle fibre prodotta dalla precipitazione di carbonato di calcio e la degradazione di lignina ed emicellulosa tramite l'assorbimento di ioni calcio e gruppi ossidrilici. Si veda Fig. 2.20.

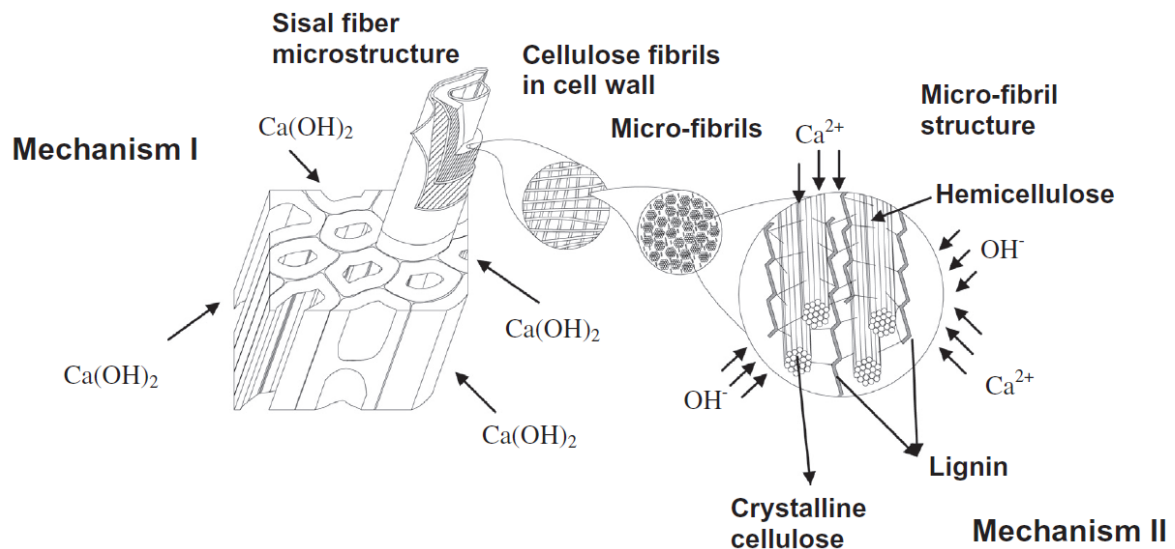


Figura 2. 20 - Meccanismo di degradazione in ambiente alcalino di una fibra naturale (sisal) [14]

2.3.1.2 Migliorare la durabilità

La riduzione di prestazioni delle fibre, l'aumento della fragilità dei composti cementizi in cui sono state usate, la perdita di resistenza, la perdita di durabilità degli elementi così composti ha portato allo studio di soluzioni per aumentare la durabilità sia delle fibre sia del materiale composito in cui sono state inserite [12, 13, 15].

I primi approcci che sono stati utilizzati per migliorare la durabilità delle fibre in compositi cementizi sono stati, fra i tanti, l'uso di agenti bloccanti, di agenti idrorepellenti, da soli o in coppia, il sigillamento dei pori della matrice, la riduzione dell'alcalinità della matrice grazie ad aggiunte pozzolaniche e combinazioni di agenti sulle fibre e modifiche alla matrice. I trattamenti sulle fibre sono stati studiati da Gram [12] e sono stati utilizzati varie strategie, tra cui: silicato di sodio, solfito di sodio, solfato di magnesio, composti a base di ferro o rame, sali solfitici e a base di bario. Tutti questi comportano riduzione dagli effetti di degradazione, ma non migliorano la durabilità delle fibre in elementi cementizi. Il trattamento delle fibre invece con agenti ritardanti comporta solo un rallentamento nel tempo della mineralizzazione delle fibre senza che questa venga completamente esclusa. La chiusura dei pori tramite sigillamento grazie a polveri di zinco nella matrice allo stato fresco ha portato a buoni risultati, senza però escludere il processo di degradazione.

Si ottengono buoni e validi risultati [15] in funzione del cambiamento della matrice cementizia. La sostituzione di parte del cemento Portland con altri elementi pozzolanici,

come fumi di silice e loppa d’altoforno, può portare alla riduzione dell’alcalinità della pasta cementizia così come può ridurre la quantità di idrossido di calcio e di conseguenza ridurre il processo che porta alla degradazione del materiale. Risultati marcatamente migliori si ottengono quando le fibre vengono immerse in fumi di silice prima di venire inserite nella matrice cementizia. Le proprietà a lungo termine erano in questo caso molto simili a quelle ottenute a 28 giorni.

2.3.2 Tipologia

2.3.2.1 Struttura delle fibre vegetali

Le proprietà fisiche e meccaniche derivano principalmente dalla struttura delle pareti cellulari. In Fig. 2.21 si mostra la suddivisione microscopica di una fibra naturale.

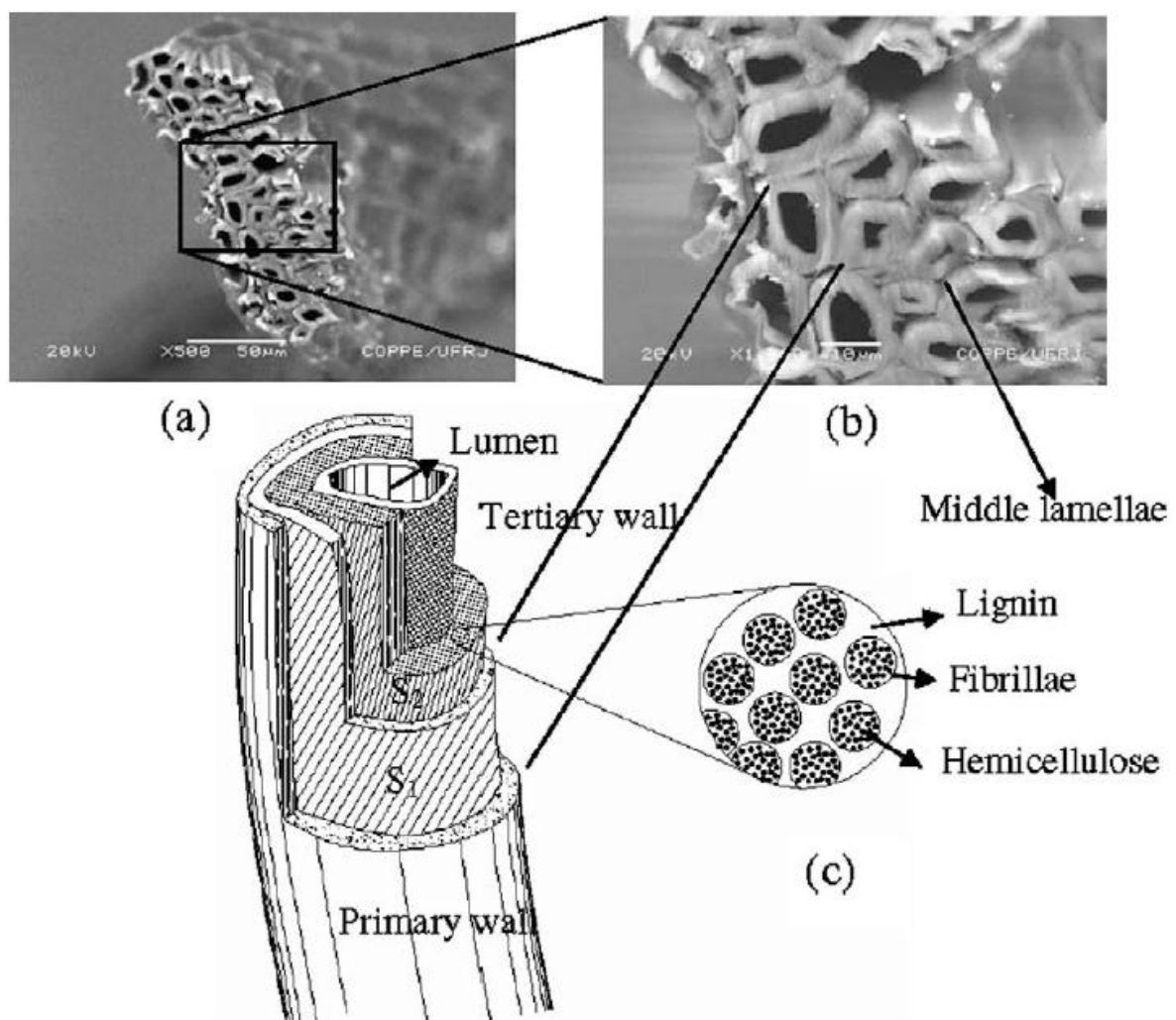


Figura 2. 21 - Microstruttura cellulare: (a, b) sezione trasversale di una fibra che mostra lumen e lamella di congiunzione. (c) disegno schematico che mostra i diversi strati [16]

Fin dai primissimi studi di Kerr e Bailey nel 1934 tramite luce polarizzata di sezioni trasversali di fibre vegetali, si è largamente accettata la costruzione a tre strati delle pareti cellulari. Lo strato S₁ è lo strato sottile nella parete secondaria che mostra birifrangenza

nella sezione trasversale [17], lo strato S_2 ha dimensioni maggiori ed è situato in mezzo e non presenta birifrangenza, mentre lo strato S_3 mostra anch'esso una tipica birifrangenza. Le microfibrille negli strati S_1 ed S_3 sono generalmente orientate quasi perpendicolarmente all'asse della fibra, mentre nello strato S_2 sono orientate secondo un angolo acuto sempre rispetto all'asse. Studi successivi, grazie anche allo sviluppo di tecnologie più avanzate, come il microscopio elettronico a trasmissione, hanno permesso di identificare e capire meglio l'ordinamento delle fibre: nella parte primaria, le microfibrille sono vagamente legate e ordinate, mentre quelle nella parete secondaria mostrano un ordinamento molto più schematico e regolare [17]. La Fig. 2.22 mostra un ipotetico andamento delle fibrille dentro i vari strati che compongono le pareti. La forma più tipica in cui vengono trovate le fibrille sono eliche a forma di S o di Z.

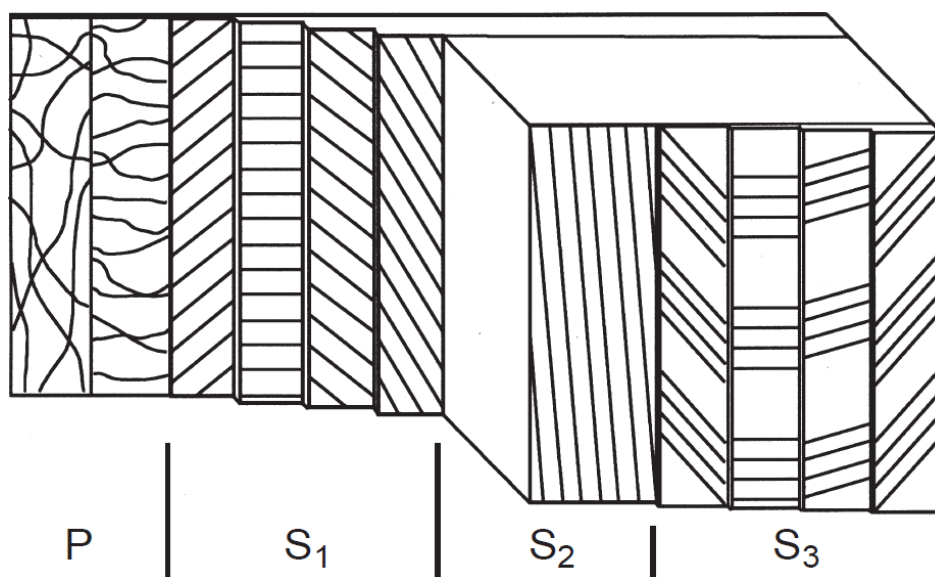


Figura 2. 22 - Modello ipotetico di orientamento delle microfibrille all'interno delle pareti cellulari. P = parete Primaria; S.. = strati della parete Secondaria [17]

L'elemento di cui sono composte le microfibrille è la cellulosa, che in forma di lunghe catene poste parallelamente fra di loro (spesse da pochi a circa 20 nm, e lunghe qualche μm), forma appunto dei fasci uniti da forti legami a idrogeno che normalmente sono difficili da dissolvere, legati assieme da una matrice di emicellulosa, che cementifica i fasci rendendoli solidali in fibrille.

Parallelamente alla cellulosa e alla emicellulosa, vi è anche la lignina, che è un polisaccaride. Essa è infatti composta da lunghe catene di unità fenilpropaniche, ripetuta moltissime volte. La lignina svolge la funzione di legare e cementare tra loro le fibre per conferire ed esaltare la compattezza e la resistenza della pianta. La lignina è anche conosciuta come materiale incrostante, poiché ricopre per intero le fibre. Per poter estrarre la cellulosa, quindi, deve essere attaccata la lignina per disintegrarne le molecole e allontanarne i frammenti mediante dissoluzione. La lignina permette lo svolgimento di

importanti funzioni nella economia della pianta: permette il trasporto di acqua, nutrienti e prodotti del metabolismo cellulare. Fornisce inoltre rigidità alle pareti cellulari e permette la connessione tra le diverse cellule, creando una struttura molto resistente agli urti, alle compressioni e alle flessioni. La lignina si deposita nella parete secondaria delle cellule vegetali e porta notevoli contributi alla solidità e rigidità dell'elemento.

I tipi di fibre differiscono l'un l'altro per diversi fattori. Possono differire la quantità di cellule per ogni fibra, la dimensione delle cellule e lo spessore delle loro pareti e l'area della sezione trasversale. Tutti questi fattori caratterizzano ogni particolare fibra vegetale, tant'è che ognuna presenta caratteristiche meccaniche proprie e diverse: per questi motivi, le fibre vegetali hanno differenti valori di resistenza alla trazione e modulo di Young. Le forme geometriche non regolari delle fibre, inoltre, concorrono ad una difficile valutazione delle caratteristiche meccaniche delle fibre.

2.3.2.2 Agave sisalana - Sisal

Le fibre di *Sisal* sono largamente usate e trovano impieghi in gomitoli, fili, corde, cordoni, tappeti e in molte altre tipologie di prodotti che prevedono l'uso di materiali a fibre. Negli ultimi due decenni queste fibre hanno trovato impieghi come rinforzi in materiali a base polimerica o cementizia. Possono essere impiegate in forme e lunghezze differenti: fibre lunghe o corte oppure anche tessuti. Le fibre vengono estratte dalle foglie della pianta, che prima della fioritura, può arrivare a produrre 200 ÷ 250 foglie. La percentuale estraibile di fibre da ogni singola foglia è dell'ordine del 4% in peso della foglia verde.



Figura 2. 23 - Pianta di Agave Sisalana (sx) e dettaglio della foglia con indicate le fibre al suo interno (dx)

La foglia contiene diversi tipi di fibre al suo interno, Fig. 2.23. Si riscontrano di 3 tipi differenti: le fibre strutturali, le fibre ad arco e le fibre xilema. Le prime si trovano lungo il perimetro della fibra e forniscono alla foglia la sua caratteristica rigidità. Non si trovano quasi mai in forma circolare, ma più spesso hanno un contorno che può essere visto come un "ferro di cavallo", Fig. 2.24 (a) [19]. Queste fibre hanno una elevata importanza commerciale perché tendono a non rompersi e disperdersi quasi mai durante il processo di estrazione delle fibre.

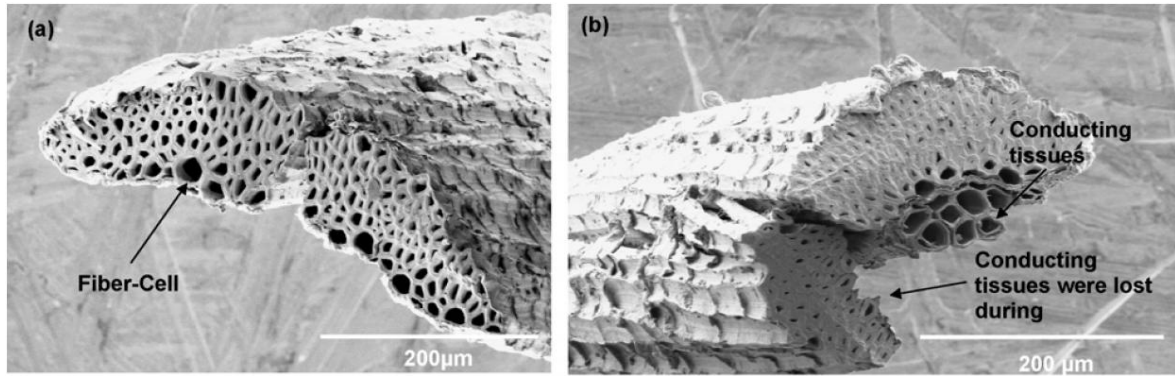


Figura 2. 24 - Tipologie di fibre nella foglia di *Sisal*: (a) strutturale, (b) ad arco [18]

Nella Fig. 2.24 (b) invece si osservano le fibre ad arco. Esse crescono in associazione al tessuto connettivo della pianta e normalmente si incontrano nel mezzo della foglia stessa, Fig. 2.23. Nutman, nel 1936, analizzò queste tipologie di fibre: esse percorrono l'intera pianta in tutta la sua lunghezza, dalla base alla cima, e presentano una buona resistenza meccanica. Le fibre xylema invece, crescano accanto a quelle ad arco e sono connesse ad esse tramite tessuto connettivo. Dato il sottile spessore delle pareti cellulari, sono di solito rotte o comunque perse durante il processo di estrazione.

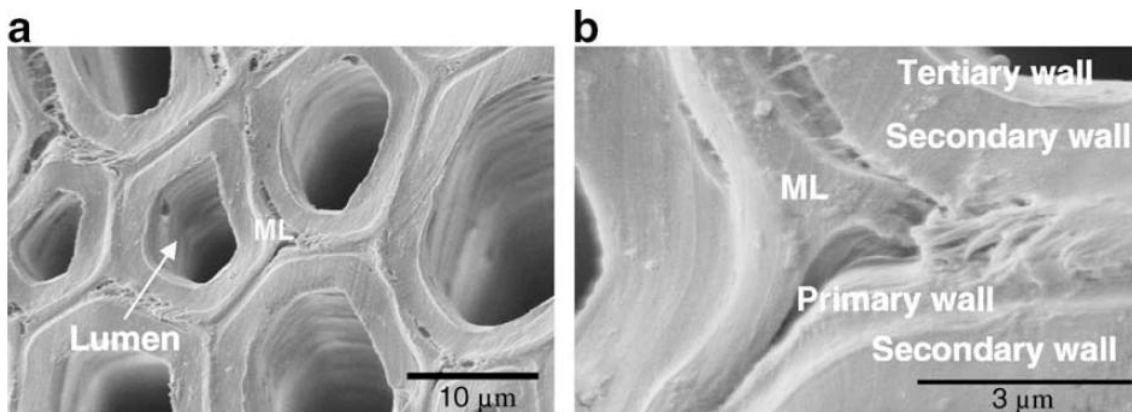


Figura 2. 25 - Microstruttura della fibra di *Sisal*: (a) fibra cellulare con lumen, (b) dettaglio della divisione della parete cellulare [19]

Nella Fig. 2.25 (a) si mostra la microstruttura delle fibre di *Sisal*. Ognuna è composta da una quantità di cellule individuali che misurano circa 6-30 μm di diametro. La singola cellula è composta da una parete primaria, più esterna, una spessa parete secondaria, una terziaria che definisce il lumen, quest'ultimo di dimensione variabile, ma spesso ben delineato. Le cellule sono tenute unite da quella che viene definita ML (Middle Lamellae) che è costituito da emicellulosa e lignina. Le pareti sono formate da numerosi strati di fibrille dallo spessore di 20 nm , a loro volta composte da microfibrille di catene di cellulosa dello spessore di 0,7 nm e di lunghezza di qualche micron, tenute assieme dalla emicellulosa. Nella parte secondaria, sono organizzate in spirali. [19].

Le proprietà meccaniche delle fibre di *Sisal* sono state oggetto di studio da diversi autori, però la letteratura non ne consente una precisa ed univoca definizione. I problemi legati al calcolo della sezione trasversale rappresentano una problematica relativa all'analisi dei dati raccolti, che possono cambiare in funzione del set-up dello strumento di analisi, come la lunghezza dell'ancoraggio della fibra nella macchina di carico. Diversi autori come Rao e Rao [20], Munawar *et al.* [21] e d'Almeida *et al.* [22] hanno eseguito prove di trazione diretta sulle fibre naturali, ma ognuno con tecniche e metodi differenti, ottenendo valori che differiscono anche notevolmente tra loro, e quindi difficilmente paragonabili. Silva *et al.* [18, 19, 23], invece hanno predisposto una metodologia di analisi e test di laboratorio in cui in l'area trasversale delle fibre veniva analizzata tramite FESEM – field emission scanning electron microscope, ovvero microscopio elettronico a scansione, le cui immagini venivano successivamente studiate tramite studi di post-processing. In questo modo si limitavano le variazioni dimensionali dell'area trasversale. Per l'analisi delle quantità meccaniche misurate dallo strumento di analisi, minori incertezze derivano da una maggiore risoluzione e misurazione del carico e dello spostamento. La resistenza a trazione non risulta variare in funzione della lunghezza di ancoraggio con lo strumento di analisi, così come non si registrano variazioni del modulo elastico, mentre si nota una differenza nella deformazione a rottura [18, 23].

I valori meccanici risultano:

- Resistenza a trazione: 395 ± 112 MPa [19]; 484 ± 135 MPa [24]; $400 \div 700$ MPa [50]
- Modulo di Young: 18 GPa [19]; $19,5 \pm 4,5$ GPa [24]; $7 \div 22$ GPa [50]
- Deformazione a rottura: $2,6 \div 5,2$ % [19]; $3,3 \pm 1,6$ % [24]; $3,64 \div 5,1$ % [50]

Prima dello sviluppo della rottura, si registrano delaminazioni nelle tra le varie parti delle fibre, Fig. 2.26, che si riflette uno scostamento del grafico tensione/deformazione, più precisamente in una piega attorno ai 100 MPa come mostra Fidelis *et al.* [24].

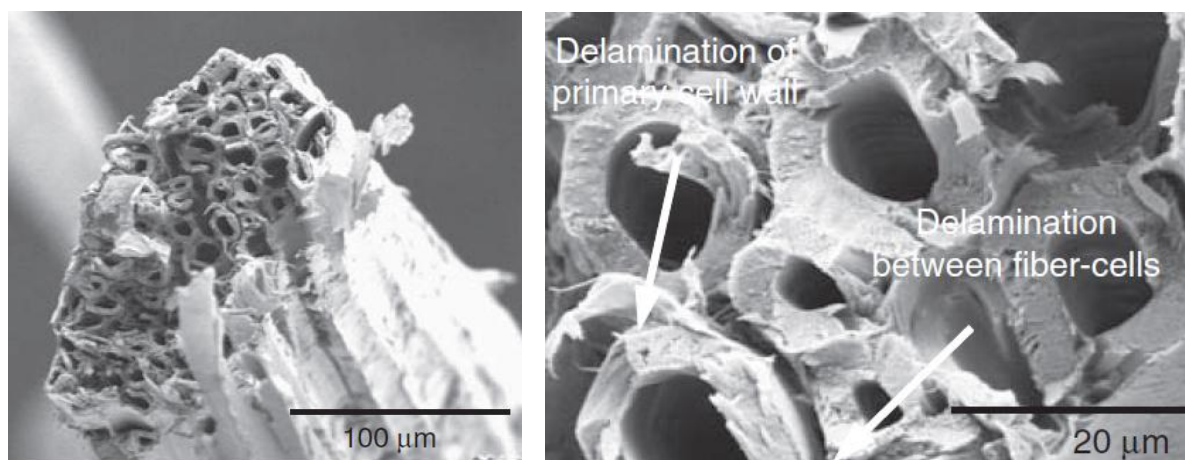


Figura 2. 26 - Delaminazione delle pareti cellulari prima della rottura [23]

La rottura per fatica, invece [18], ha portato alla luce un meccanismo di danno differente da quello che si è ottenuto tramite rottura assiale. La Fig. 2.27 mostra un allineamento delle microfibrille che compongono le pareti cellulari e, a livelli di ingrandimento maggiori, si notano rotture interne nelle pareti stesse, con in alcuni casi addirittura asportazione di parte di essa.

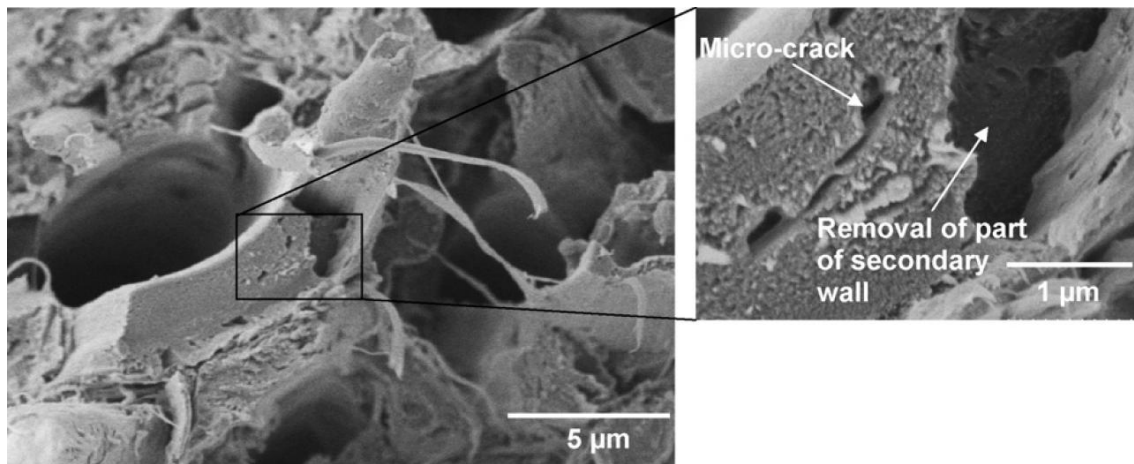


Figura 2.27 - Immagine della rottura avvenuta per fatica [18]

Inoltre, seguendo quello che gli autori sostengono [18] si nota una variazione del volume a seguito del carico a rottura per fatica. Il carico limite è stato identificato essere pari a 320 MPa, dove al di sotto del quale tutte le fibre testate sono sopravvissute ad una quantità pari a 10^6 cicli, mentre con valori superiori si ottengono risultati abbastanza divergenti, come da Fig. 2.28 a sx. Le fibre che hanno passato il test di fatica sono state successivamente portate a rottura per prove di trazione. Queste fibre hanno registrato un aumento del modulo di Young all'aumentare della massima tensione di fatica, come da Fig. 2.28 a dx. Gli autori attribuiscono questo fenomeno all'allineamento della struttura delle cellule e delle fibrille che la compongono per i valori intermedi di tensione [18].

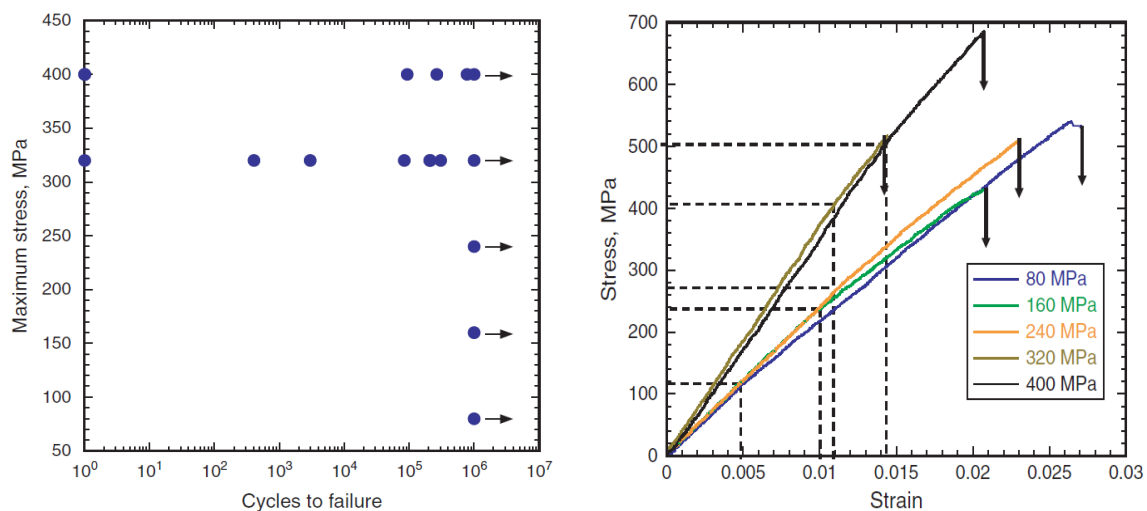


Figura 2.28 - Valori di tensione a fatica e cicli (sx) e diagramma sforzo-deformazione per le fibre che hanno superato la prova a fatica (dx) [18]

2.3.2.3 *Attalea funifera* - Piassava



Figura 2. 29 - Pianta di *attalea funifera* a dx e fibre *piassava* a dx. Immagine cortesia da fao.org

La *piassava* è una fibra a carattere rigido che viene estratta dalle foglie di un albero a palma endemico della foresta pluviale del Brasile, Fig. 2.29 a sx. La zona di crescita spontanea è situata vicino alla zona costiera, a circa 60 km nell'entroterra, ed è concentrata principalmente lungo il $13^{\circ} \div 17^{\circ}$ S di latitudine. La sua crescita è incentivata da un clima con temperature medio-alte, di circa 24°C , ed elevata umidità relativa, maggiore dell'80%. Le fibre si presentano lunghe fino a 4 metri con uno spessore medio di circa 1,1 mm. Vengono raccolte una volta l'anno. La procedura vede la separazione del picciolo; le fibre sono quindi tagliate e meccanicamente seprate l'un l'altra per poi venire raccolte in base alla loro lunghezza, Fig. 2.29 a dx. Il rendimento di ogni pianta è di circa $8 \div 10$ kg di fibra annuo. L'industria ne ricava elementi come scope, spazzole ed altri prodotti con setole al pari di quelli appena elencati. La loro produzione, però, non comporta l'utilizzo di una quantità circa pari al 20% delle fibre estratte, lasciando una grande avanzo di fibre inutilizzabili. Lo scarto non deriva da una minore prestazione delle fibre, da un processo estrattivo che danneggi le fibre o le comprometta, ma dal semplice fatto che non tutte le fibre raggiungono una lunghezza adeguata per trovare impiego nelle sopracitate produzioni. Tali fibre ancora in ottime condizioni possono trovare il loro utilizzo come rinforzi di matrici in elementi compositi [22].

Indagini al microscopio, Fig. 2.30, mostrano che sulla superficie della fibra sono presente protuberanze parenchimatice. La protuberanza in dettaglio, Fig. 2.30 (d), è stata oggetto di analisi spettroscopica (EDS) [22] che ha dimostrato essere una particella ricca di silicio (Si).

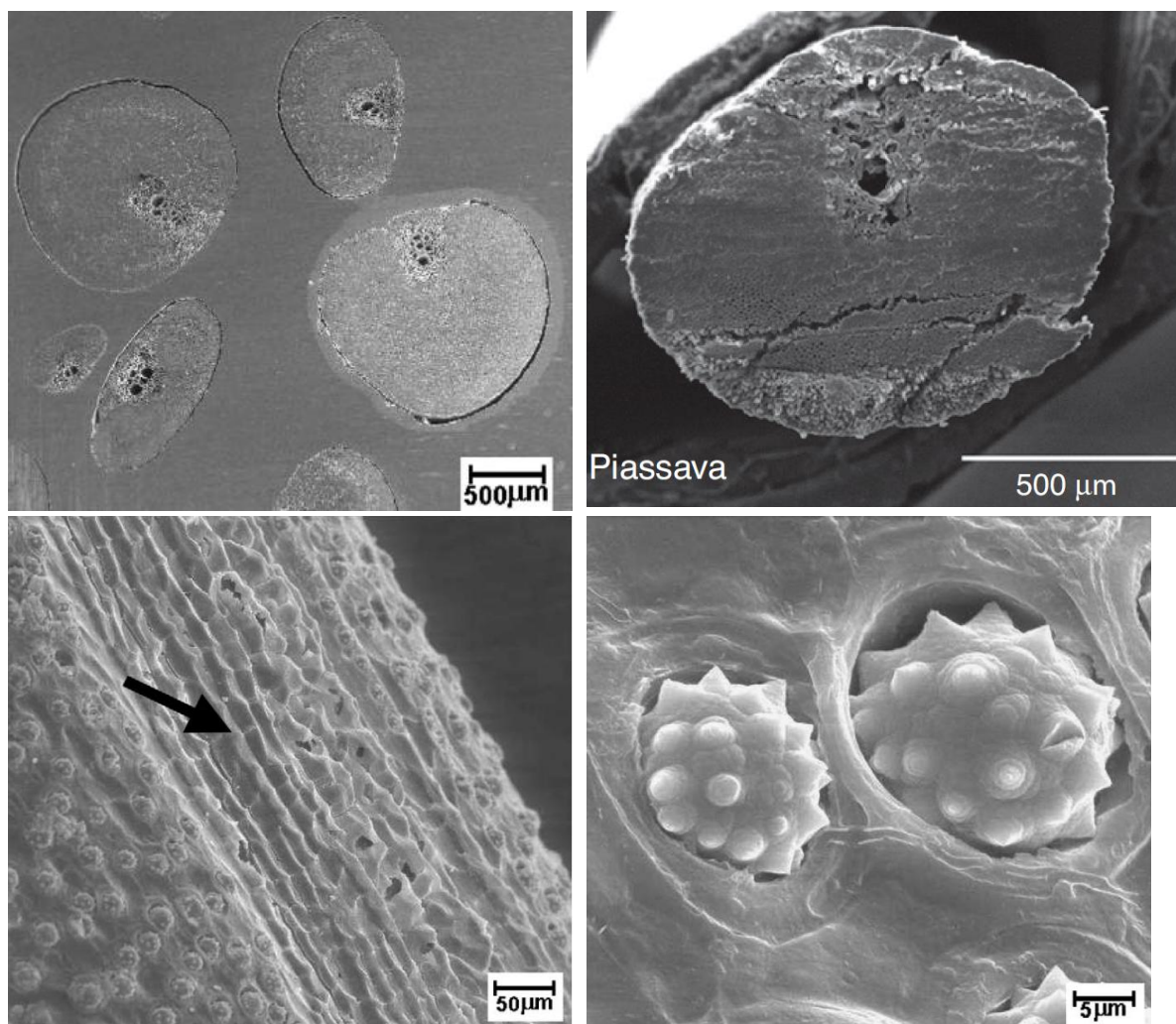


Figura 2.30 - Immagini al microscopio delle fibre, con dettaglio delle protuberanze (basso dx) [22, 24]

Le proprietà meccaniche delle fibre di *piassava* possono essere qui di seguito elencate:

- Resistenza a trazione: 131 ± 36 MPa [24], 133 ± 13 MPa [22]
- Modulo di Young: $3,8 \pm 0,9$ GPa [24]; $1 \div 5$ GPa, in funzione della lunghezza dello strumento, più corto più rigido [22]
- Deformazione a rottura: $11,4 \pm 3,6$ % [24]; $(21,9 \pm 4,3) \div (7,8 \pm 3,9)$ più lunga la fibra, minore la deformazione [22]

La composizione chimica, fornita da [22], ci fornisce i seguenti valori: lignina pari a 48,4%, mentre la cellulosa è pari al 31,6%. Le fibre di *piassava* registrano il valore più alto di lignina al confronto di altre fibre, come *coir*, la fibra del guscio esterno della noce di cocco.

La limitata capacità tensionale e la relativamente bassa rigidità, però, non hanno escluso l'utilizzo della fibra come rinforzo in elementi compositi. Si è visto [22] che in matrici di poliestere essa fornisce una elevata resistenza alla flessione, facendo registrare valori più elevati rispetto ad altre fibre utilizzate. Questo può essere dovuto alle protuberanze ricche di silice che potrebbero migliorare il legame con la matrice di materiali compositi.

2.3.2.4 Cocos nucifera - Coir



Figura 2. 31 - Cocos nucifera a sx e imballaggio di Coir a dx, da [wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org/).

Il suo nome ha una etimologia che deriva dalla lingua malayalam parlata principalmente nello stato dell'India meridionale del Kerala. "Kayar" ha poi trovato il corrispettivo inglese di *Coir* che identifica la fibra presente nel guscio esterno della noce di cocco. La pianta, in Fig. 2.31 a sx, ha sede praticamente su molti dei litorali in zone calde e la sua distribuzione attuale è prevalentemente situata tra il 22esimo parallelo nord e sud. Anche se è possibile trovarla anche a diverse latitudini, la sua valenza commerciale però riceve scarse attenzioni. La sua presenza è anche registrata nell'entroterra, anche se le piante che crescono sui litorali si è visto forniscono una quantità e una qualità maggiore di frutti. La sua grande estensione deriva anche dal fatto che le noci possono germogliare anche dopo aver trascorso 110 giorni immerse in ambiente marino, nel quale periodo possono percorrere anche fino a 5000 km [25].

Il frutto raccolto immaturo contiene delle fibre di colore bianco, mentre le fibre hanno colore ocra/marrone quando raccolte pienamente mature, a causa di un deposito di lignina sulle pareti cellulari. Il processo di estrazione della fibra bianca immatura prevede l'immersione della parte fibrosa in acqua di fiume fino a 10 mesi per far sì che le fibre vengano allentate le une con le altre da microrganismi. A seguire le fibre vengono sbattute a mano per separarle e poi asciugate al sole. Il loro impiego è nell'industria tessile per la realizzazione di spaghi e cordame. Le fibre marroni anch'esse vengono immerse in acqua, stagna o a lento scorrimento, affinché si ammorbidiscano. Tramite il processo chiamato

“macinatura ad acqua”, le lunghe fibre setose vengono divise da quelle più corte che successivamente vengono setacciate per rimuovere le impurità. Il processo vede l’essiccazione al sole per poi imballarle, come in Fig. 2.31 a dx [26].

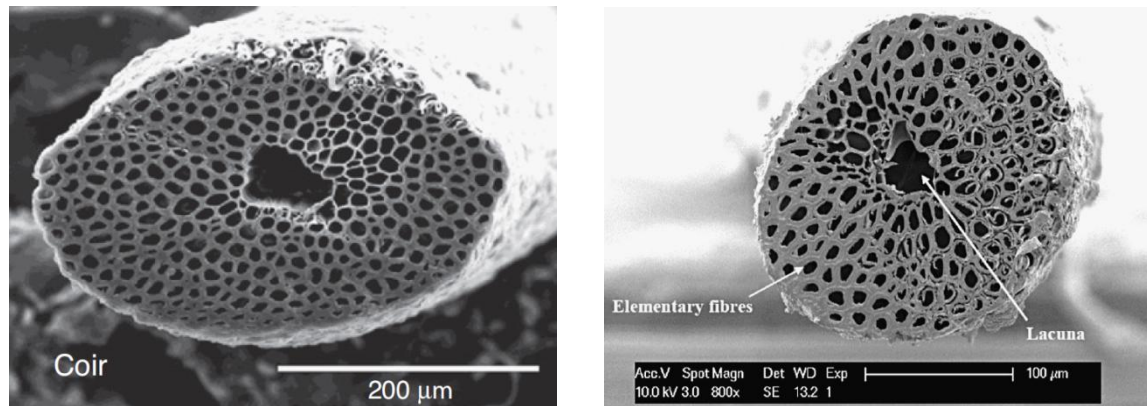


Figura 2. 32 - Immagini al microscopio delle fibra *coir* [24, 27]

La composizione chimica della fibra di *coir* è la seguente: pectina 3%, emicellulosa 0,25%, lignina 45,84%, cellulosa 43,44%, polveri varie 2,22%, parti solubili in acqua 5,25%.

La morfologia ha le seguenti caratteristiche: ogni cella misura $0,8 \div 1 \text{ mm}$ in lunghezza e un diametro di $10 \div 20 \text{ }\mu\text{m}$. Le fibre setose sono di norma lunghe tra i 10 e i 30 *cm* e presentano una cavità nel mezzo ($331 \div 2008 \text{ }\mu\text{m}^2$, $1,8 \div 4,6\%$ di volume). Le fibrille presentano un angolo formato con l’asse della cellula di circa $41 \div 45^\circ$. Il lumen ha grandi dimensioni e la cellula è composta da un numero elevato ($200 \div 300$) di celle elementari e il diametro medio risulta essere $213 \div 248 \text{ }\mu\text{m}$ come viene mostrato nella Fig. 2.32. La sua densità varia, seppur lievemente con la lunghezza della fibra, ma è verosimilmente calcolata come essere pari a $1,01 \text{ g/cm}^3$ mentre la fibra marrone ha una densità pari a circa $1,29 \text{ g/cm}^3$, mentre la porosità ha valori compresi tra 27% e 46,3% [24, 26, 27]

Le proprietà meccaniche delle fibra *coir* possono essere qui di seguito elencate:

- Resistenza a trazione: $131 \div 175 \text{ MPa}$ [26]; $206,6 \pm 39,8 \text{ MPa}$ [27]; 90 ± 35 [24]
- Modulo di Young: $4 \div 6 \text{ GPa}$ [26]; $4,9 \pm 0,9 \text{ GPa}$ [27]; $2,6 \pm 0,7 \text{ GPa}$ [24]
- Deformazione alla rottura: $15 \div 40 \%$ [26]; $(41 \pm 10,7 \%) \div (33,5 \pm 5 \%)$ [27]; $18,8 \pm 9,1$ [24]

2.3.2.5 *Ananas erectifolius* - *Curaua*

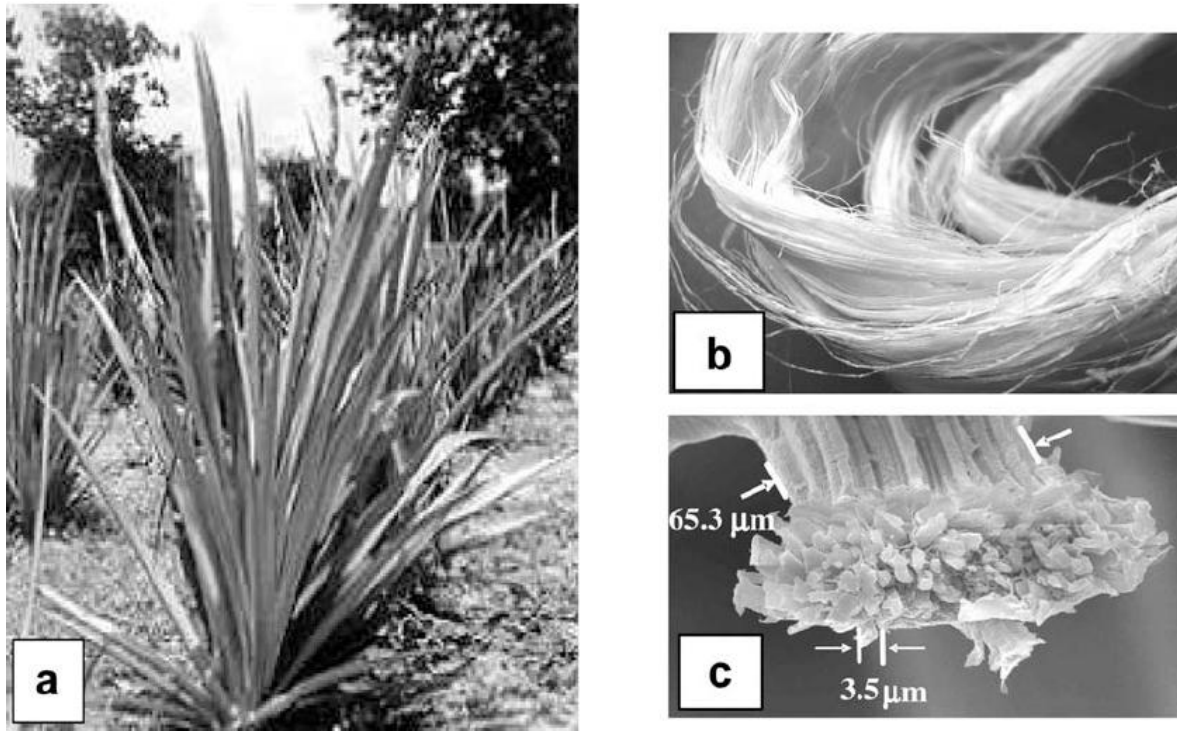


Figura 2. 33 - (a) *Ananas erectifolius*, (b) fibre di *Curaua* e (c) immagine al microscopio a scansione elettronica del termine della fibra [28]

Le regione di appartenenza di questa pianta è il bacino Amazonico, dove già la popolazioni pre-colombiane avevano utilizzato questa particolare fibre in diversi modi e con vari scopi. La pianta, Fig. 2.33 (a), è possibile trovarla anche negli stati limitrofi come: Colombia, Venezuela, Suriname con nomi che variano anch'essi da regione a regione. Si trovano, tra i tanti: kurowa, caroa, ananas selvatico ecc. Gli antichi usi prevedevano l'impiego come corde per archi, reti da pesca, amache e veniva anche utilizzata come merce di scambio per la tapioca che veniva coltivate da tribù diverse. La prima piantagione con uso commerciale è sorta nello stato di Parà nel bacino del fiume Rio delle Amazzoni.

La pianta, Fig. 2.33 (a), è formata da foglie rigide, piatte ed erette di circa $1 \div 1,5$ m di lunghezza, 40 mm di larghezza e 5 mm di spessore. Ogni pianta può arrivare a produrre una quantità di foglie per anno pari a circa $50 \div 60$ con un peso di circa 150 g ciascuna. Le foglie, una volta raccolte dalle piante, vengono poi processate meccanicamente per estrarre le fibre al loro interno. Il processo prevede l'uso di macchinari abbastanza rudimentali equipaggiati con coltelli rotanti che rimuovono la mucillagine presente nelle foglie. A seguire, le fibre vengono mercirizzate in taniche di acqua per le successive 36 ore per poi essere nuovamente lavate per rimuovere la mucillagine residua. Sono successivamente asciugate al sole, amalgamate con del polipropilene e arrotolate in balle. Ogni pianta fornisce una quantità di $3 \div 8$ % di fibre in peso rispetto alla foglia verde.

Dall'utilizzo iniziale come amache, reti da pesca ecc. l'industria ha iniziato la produzione di parti interne di autoveicoli dove ad esempio la Mercedes Benz ne utilizza una quantità pari a circa 300 tonnellate annue [29, 30].

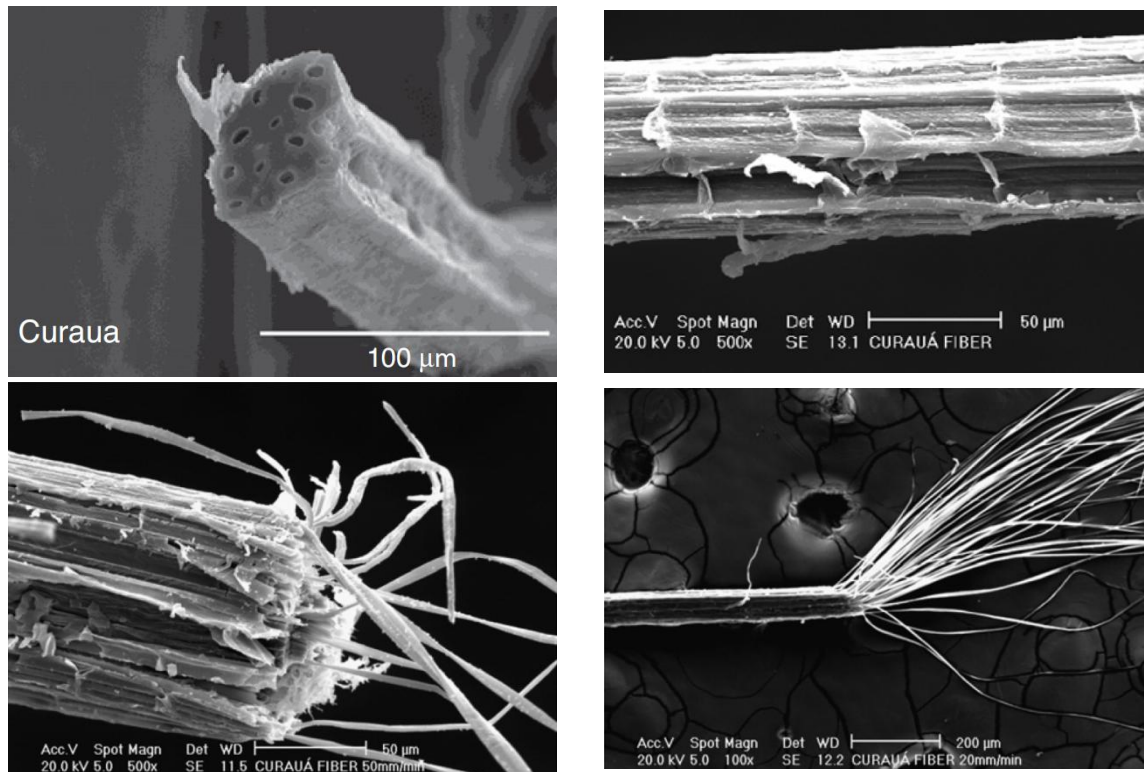


Figura 2. 34 - Fibre di *curaua* al microscopio a scansione elettronica [24, 30]

La composizione chimica delle fibre di *curaua* è la seguente: cellulosa 73,6%, 9,9% di emicellulosa, 7,5% di lignina e lo 0,9% di polveri. Con queste caratteristiche la fibra di *curaua* presenta un grado di cristallizzazione pari al $67 \div 75,6\%$ [29].

Ogni fibra tecnica contiene poche celle (10 ÷ 20) che hanno lo spessore di circa $10 \mu m$. Lo spessore della parete cellulare invece misura una quantità media di $3,5 \mu m$. La peculiarità di questa fibra è avere un lumen di dimensioni ridotte rispetto ad altre fibre naturali, ed inoltre ha una parete cellulare molto spessa. Questo, stando a diversi studi [24], comporta caratteristiche meccaniche più elevate rispetto a fibre che hanno spessori di parete più contenute. La sezione trasversale di ogni fibra misura $0,004 \pm 50\% mm^2$ così come riportato da [24] e mostrato in Fig. 2.34

Le proprietà meccaniche possono subire, al pari di ogni altra fibra naturale, variazioni in funzione della morfologia. Si è però visto [30] che i valori di tensione massima di trazione e di modulo di elasticità aumentano al diminuire del diametro della fibra. Questo non influisce nella deformazione a rottura. A seguire diversi valori registrati:

- Resistenza a trazione: $173 \div 223 MPa$ [30]; $543 \pm 260 Mpa$ [24]; $500 \div 1150 MPa$ [29]
- Modulo di Young: $34 \div 96,1 GPa$ [30]; $63,7 \pm 32,5 GPa$ [24]; $30 \div 80 GPa$ [29]

- Deformazione a rottura: $4,40 \div 4,94$ % [30]; $1,0 \pm 0,2$ % [24]; $2,0 \div 4,0$ % [29]

2.3.2.6 *Corchorus capsulari* - *Juta*



Figura 2. 35 - Pianta *corchorus capsulari* e fibra di *Juta* ad asciugarsi al sole. Immagini [wikimedia.org](https://www.wikimedia.org).

Il suo particolare aspetto serico con riflessi lucenti e dorati le dà il soprannome de “la fibra d’oro”. Il suo volume di produzione a livello mondiale è molto elevato ed è secondo solo alla produzione del cotone. Documenti storici hanno fatto emergere che nei villaggi poveri dell’India la *Juta* veniva usata come indumento e in forme di contenitori al cui interno venivano stivate le semenze. Il suo sviluppo di deve in parte alla Compagnia delle Indie che nel 17esimo secolo ha iniziato a commerciare questa pianta. Infatti il luogo di produzione privilegiato è la foce del Gange, nella regione del Bengala: al Bangladesh viene attribuita la qualità migliore di *Juta* sul mercato. Infatti la pianta di *Juta* necessita di un terreno alluvionale e con acqua in superficie. La zona climatica che meglio si adatta alla sue condizioni di coltivazioni (calda e umida) è fornita dalla zona monsonica durante la stagione dei monsoni. Temperature di $20 \div 40^{\circ}$ C ed umidità relativa di 70%-80% sono l’ideale per la corretta coltivazione della pianta. La pianta necessita di una irrigazione di circa 5-8 cm di acqua alla settimana, mentre la richiesta durante la semina aumenta. I fusti della pianta giunti a maturazione vengono tagliati e messi in ammollo in acqua per circa tre settimane. Successivamente la corteccia macerata viene staccata e lavata, asciugata e poi imballata, come da Fig. 2.35. Se ne ricava una quantità di fibre in proporzione del 4-8% della massa della pianta verde. Gli usi attuali impiegano le fibre per la produzione di

imballaggi per alimenti e semenze (caffè, cereali ecc.) per via della elevata traspirabilità, tappeti ed altri elementi setosi. Inoltre la fibra è biodegradabile al 100% ed è considerata una delle più economiche, resistenti, eco-friendly sia in termini di utilizzo di energia che di emissione di gas inquinanti fra tutte le altre fibre di origine naturale. Si è visto che un ettaro di piante di *Juta* assorbe 15 tonnellate di CO₂ dall'atmosfera e immette 11 tonnellate di O₂ durante il loro ciclo-vita. Inoltre gli scarti decomposti aiutano la fertilizzazione del terreno, riducendo i costi dei fertilizzanti. La produzione di 1 kg di tessuto per la realizzazione di shopping bag utilizza 80 MJ meno rispetto ad 1 kg di poliidrossialcanoati (PHA) [31].

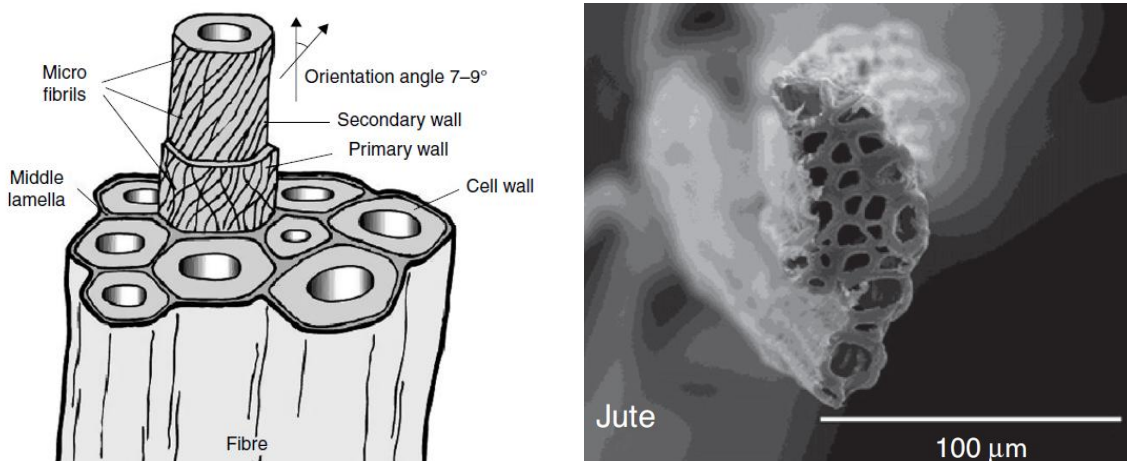


Figura 2.36 - Fibra di *Juta* schematica (sx) e al microscopio a scansione (dx) [32, 24]

La composizione chimica della fibra di *Juta* è la seguente: cellulosa 61 ÷ 71%; emicellulosa 13,6 ÷ 20,4%; lignina 12 ÷ 13%. La sua composizione chimica comporta parametri meccanici differenti e la qualità della fibra, così come la variazione del numero di celle di cui è composta [31, 32].

Le celle strutturali della singola fibra di *Juta*, come Fig. 2.36 mostra, possono essere in numero compreso tra 8/9 ÷ 20/25, dove le fibrille nello strato S₂ della seconda parte cellulare seguono un angolo di 7/9° rispetto all'asse della cella. La loro lunghezza è di circa 2,5 mm e la larghezza è circa 10 ÷ 25 µm. La densità vera delle fibre è di 1,46 g/cm³ mentre l'area trasversale risulta essere 0,004 ± 0,001 mm² [24, 31, 32].

Seguono le proprietà meccaniche:

- Resistenza a trazione: 249 ± 89 MPa [24]; 389 ÷ 800 MPa [31]; 0,29 ÷ 0,48 N/tex¹ [32]
- Modulo di Young: 43,9 ± 12,3 GPa [24]; 10 ÷ 30 GPa [31]; 17 ÷ 30 N/tex [32]
- Deformazione a rottura: 0,6 ± 0,2 % [24]; 1,5 ÷ 1,8 % [31]; 1,0 ÷ 1,8% [32]

¹ 1 tex = $\frac{1 \text{ g}}{1 \text{ km}}$; densità lineare, 1 tex equivale a un grammo al chilometro

Una ulteriore definizione delle proprietà meccaniche delle fibre di *Juta* da parte di [31] sono la resistenza a trazione specifica ($302 \div 574 \text{ MPa/g*cm}^{-3}$) e il modulo di Young specifico ($8 \div 20,5 \text{ GPa/g*cm}^{-3}$), con i valori misurati che vengono rapportati alla densità del materiale.

2.3.2.7 Cannabis sativa - Canapa Indiana



Figura 2. 37 - Canapa indiana in piantagione (sx) e fibre imballate (dx), da [wikimedia.org](#).

La storia della pianta di canapa indiana è molto antica: nata in India e in Persia nei successivi 6000 anni è stata coltivata in tutte le zone tropicali, subtropicali e temperate del mondo. La sua coltivazione ha subito un brusco e drastico rallentamento dovuto al proibizionismo che ha di fatto diminuito notevolmente la sua produzione in molti paesi. Oggigiorno se ne hanno grandi coltivazioni in Cina, Corea del Nord, e Canada anche se quest'ultima la utilizza principalmente come semenza e non come tessile. Si sono registrati grandi coltivazioni lungo tutta la penisola italiana. Il suo utilizzo come fibra ha trovato grande spunto nella industria navale dove veniva utilizzato per la realizzazione di cime e scotte. Le sue fibre inoltre venivano utilizzate per la realizzazione di tele da pittura, tant'è che il nome inglese *canvoas* (tela) deriva appunto dalla parola *cannabis* (dal latino *cannapaceus*, Oxford Dictionaries). La sua è una funzione polivalente: non si limita alla estrazione della fibra, ma se ne ricavano anche sostanze oleose e può anche essere utilizzata come mangime per animali: la semenza contiene circa una quantità di olio pari al 35% e una quantità di proteine pari al 25%. Le piante hanno un alto tasso di resa fibrosa: alcune varietà ne producono il corrispettivo del 12÷15% in peso, mentre altre possono arrivare fino al 33%, ma ci possono essere notevoli differenze nella procedura di coltivazione di queste particolari piante. Infatti non è facile riuscire a fornire un particolare processo di coltivazione data la grande varietà di specie che possono essere utilizzate per l'estrazione delle fibre. Il tasso di resa rimane comunque molto alto, con la media del 20% in peso di foglia verde. Gli utilizzi odierni vedono le fibre di *canapa* in

molti settori. Henry Ford negli anni 40 realizzò un prototipo di auto costruita interamente di un materiale plastico derivante dalla *canapa* e dalla soia ed alimentata ad etanolo. Oggi se ne utilizzano le fibre in diversi settori: l'industria automobilistica ne estrude elementi e semilavorati per le parti interne di autoveicoli, l'olio prodotto dai semi può essere utilizzato come bio-combustibile, la fibra come elemento tessile e talvolta come blocchi e mattoni di canapa nell'industria edile [33, 35].

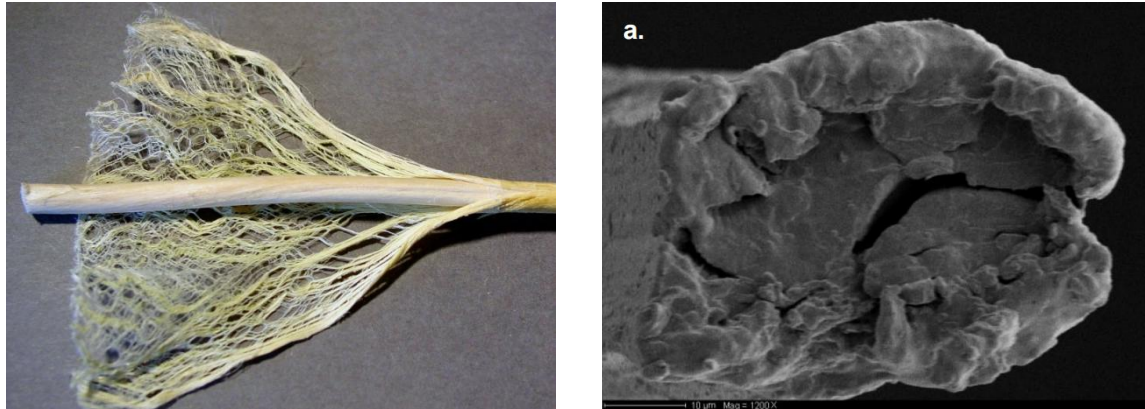


Figura 2. 38 - Fibre di *canapa*: estrazione dal fusto ligneo (sx); fibra elementare (dx) [34, 36]

L'estrazione delle fibre dalla pianta avviene tramite processi meccanici, Fig. 2.38 a sx, anche se sono registrati ancora oggi decorticazioni manuali. Il processo vede il taglio del gambo e una parte di esso, per poi riuscire a dividere la parte fibrosa dallo stelo.

La composizione chimica della *canapa* è la seguente: si hanno valori di cellulosa di 70,2÷76,12%, emicellulosa di 12,28÷22,4%, la lignina è presente per lo 3,7÷5,65%. Le proprietà chimiche della fibra sono influenzate dal tipo di trattamento che viene utilizzato per la separazione della singola fibra dal fascio di cui è composta. Così come le qualità della fibra è differente, esistono molti modi per estrarre le fibre, tra cui processi a base di acqua, a base chimica, a base meccanica, a base enzimatica o a condensazione [33, 36].

Le fibre elementari (celle), in Fig. 2.38 a dx, sono unite l'un l'altra tramite della pectina che forma così il fascio di fibra tecnica, composta in lunghi filamenti. Le celle hanno una tipica forma geometrica poligonale che non si mantiene uniforme in lunghezze e in spessore nella lunghezza della fibra stessa. Il diametro misura valori compresi tra 10÷50 μm [33] mentre [34] identifica valori medi di 20÷60 μm quando [35] riporta il diametro della cella singola pari a 10÷15 μm ; la lunghezza è pari a circa 8÷14 mm . Si registra una densità 1,249 g/cm^3 [36], mentre [35] riporta valori di 1500 kg/cm^3 . La cavità centrale viene misurata tra i valori di 0,5÷10 μm , mentre il lumen ha una sezione trasversale di 70÷130 μm e stando a diversi autori, ha un rapporto di 9% - 13÷16% dell'area totale trasversale. Lo spessore dello strato S₂ ha valori medi del 90% rispetto allo spessore delle pareti.

Le proprietà meccaniche sono le seguenti:

- Resistenza a trazione: 250÷1250 MPa [35]; 277±191 MPa [34]; 640 MPa [37]
- Modulo di Young: 9,5±5,8 GPa [34]; [35] lineare stando a Hooke; 24,7 GPa [37]
- Deformazione a rottura: 1,6% [35]; 2,3± 0,8% [34]; 2% [37]

2.3.2.8 Micro e nano elementi a base di cellulosa

Finora ad ora sono state analizzate fibre naturali che hanno dimensioni macrometriche, con dimensioni longitudinali e rapporti di forma molto elevati. Questi elementi possono essere classificati al pari delle fibre di PVA o acciaio che vengono già utilizzate in elementi fibrorinforzati. Si stanno però cercando di studiare come rinforzi non solo elementi con dimensioni macrometriche, ma ci si spinge verso dimensioni sempre più piccole, andando a studiare e valutare le caratteristiche di elementi singoli e con dimensioni nanometriche. La Fig. 2.39 mostra la dimensione sempre più minuscola degli elementi che vengono utilizzati, da fibre di piante a cellule e suoi sottocomponenti.

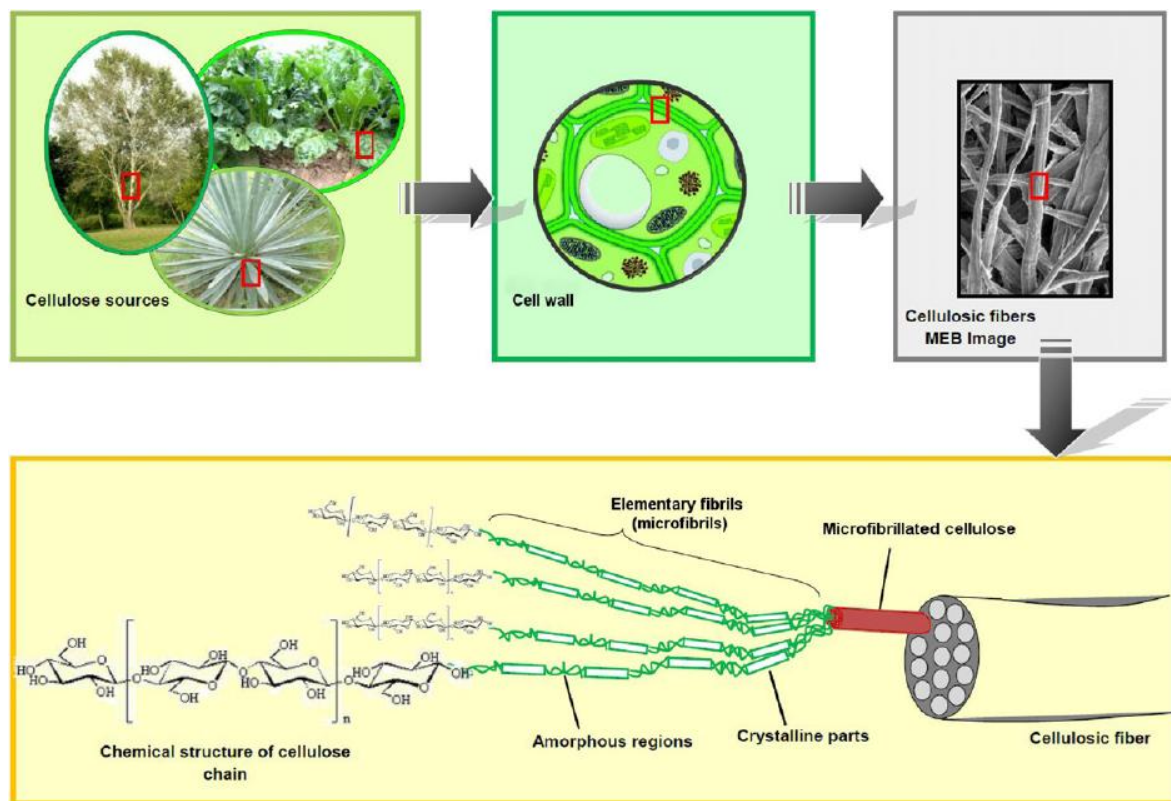


Figura 2. 39 - Passaggio dalla macroscala alla nanoscala, le fibre naturali e le loro fibrille [41]

Indipendentemente dalla fonte, che sia questa da fibre nelle pareti cellulari di vegetali, sia da animali marini (tunicati o urocordati), alghe, funghi o invertebrati o batteri, la cellulosa si presenta con una struttura a fibra longilinea di colore bianco e inodore che ha una densità di circa $1,5 \text{ g/cm}^3$ [41]. La sua composizione è la seguente: è una catena di omopolisaccaride di glucosio unita da un legame $\beta(1-4)$ glicosidico con un grado di polimerizzazione pari a 10000 in natura, mentre la cellulosa presente nel cotone ha un grado di polimerizzazione più alto, pari a circa 15000. La struttura base è quella formata

dal cellubioso, ovvero l'unione dei due monomeri di glucosio, che contiene 3 gruppi ossidrilici, che si aggregano fino a formare fasci di microfibrille. I fasci formano una lunga catena di microfibrille che hanno diametro che varia da 2 fino a 20 nm e lunghezza fino a qualche decina di micron. Queste microfibrille in una matrice di emicellulosa, formando lunghi fasci, sono unite tra loro grazie a legami a idrogeno che poi in unione in una matrice composta da lignina ed emicellulosa formano le pareti cellulari. Si è legata la resistenza a trazione delle fibre naturali con l'angolo d'inclinazione dei fasci di microfibrille con l'asse della fibra, ma una maggiore relazione tra resistenza meccanica e fibra si ha con la sua composizione chimica: una quantità maggiore di cellulosa comporta valori più elevati di resistenza a trazione. Il modulo di Young risulta essere molto elevato: si sono registrati valori pari a $139 \pm 3,5$ GPa [42]: dalla chimica teorica deriva una formulazione, però, che vede il modulo di Young del nanocristallo di cellulosa con valori superiori a quelli dell'acciaio e simili a quelli del Kevlar. I materiali nanometrici hanno la caratteristica di base di avere una quantità di difetti molto minore, se non addirittura nulla. In questo caso, operando con fibre naturali, si vuole ottenere una separazione degli elementi base che compongono la fibra naturale così da poter eliminare i macro difetti che la compongono, e in tale modo poter utilizzare solo la parte di microfibrilla altamente cristallina e quasi priva di difetti. Inoltre, si è visto come le nanoparticelle possono essere utilizzate come rivestimento, come pellicole o inserite in una matrice per essere utilizzate come barriere, mantenendo proprietà come la permeabilità all'ossigeno, all'aria, al vapore, resistenza alle sostanze oleose [41].

Si è visto inoltre [43] che con l'aggiunta di nanocristalli di cellulosa in paste cementizie si può "fare di più con meno". Cao *et al.* hanno utilizzato nanocristalli di forma allungata, tipicamente $0,05-0,5 \mu m$ in lunghezza e $3-5 nm$ in spessore, che possono essere estratti dalle piante e dagli alberi. Tali cristalli hanno proprietà particolari, come un alto rapporto di forma l/d , elevato modulo elastico ed elevata resistenza alla trazione, bassa densità e possono essere dispersi in acqua mescolati con una pasta cementizia, portando a miglioramenti riguardo specialmente la microfessurazione e una migliore adesione tra fibra e matrice dato, appunto, grazie alle loro dimensioni nanometriche. Gli autori, nella ricerca, però non forniscono le migliori del materiale grazie ad un fenomeno di "bridging": infatti le nanoparticelle possono essere utilizzate come elemento capace di fermare la propagazione della fessura con un effetto ponte. Sono state effettuate prove meccaniche per valutare se tramite l'uso di CNC (Cellulose NanoCrystals) si hanno miglioramenti dal punto di vista meccanico. Tramite la miscelazione di una quantità modesta di CNC nella pasta cementizia si è registrato un miglioramento di valori circa pari al 20-30% rispetto a campioni di controllo senza CNC. Gli autori forniscono una spiegazione tramite un maggiore grado di idratazione delle particelle di cemento. Questo fenomeno lo attribuiscono sia ad una maggiore stabilizzazione sterica che garantisce una maggiore dispersione delle particelle di cemento, valutata reologicamente tramite una

minore tensione allo scorrimento, sia ad un fenomeno di “corto-circuito”, dove i CNC forniscono un canale preferenziale all’acqua per raggiungere le parti anidre di cemento. I risultati maggiori si sono ottenuti con valori di 0,2% in volume di CNC, mentre aumentandole, la resistenza diminuisce, dovuta alla creazione di una zona di minore resistenza [42].

2.3.3 Caratterizzazione delle proprietà meccaniche

2.3.3.1 Variazione dei valori in base alla presenza di difetti

Le fibre naturali sono caratterizzate da una ampia dispersione delle loro caratteristiche meccaniche che generalmente vengono attribuite a diversi fattori: i metodi utilizzati per le prove meccaniche e il successivo calcolo dei dati dagli strumenti, la loro morfologia, la struttura e la composizione delle fibre, maturità della pianta, posizione delle fibre nella pianta, preparazione delle fibra (processo di “retting” e trattamenti vari), condizioni ambientali e igrometriche, precedenti di carico. Stando alla teoria di Griffith, con una dimensione maggiore delle cricche si ottengono resistenze alla rottura più basse. Con diametri maggiori è più probabile incontrare difetti che possano far scaturire una cricca e quindi una maggiore probabilità di rottura prematura. [37]. Diversi studi condotti [37, 38] hanno valutato l’effetto dei difetti e delle dislocazioni lungo la superficie della fibra a suffragare la sopracitata teoria, Fig. 2.40. Questo può validare la teoria di Griffith, andando a rendere la fibra più fragile all’aumentare del diametro.

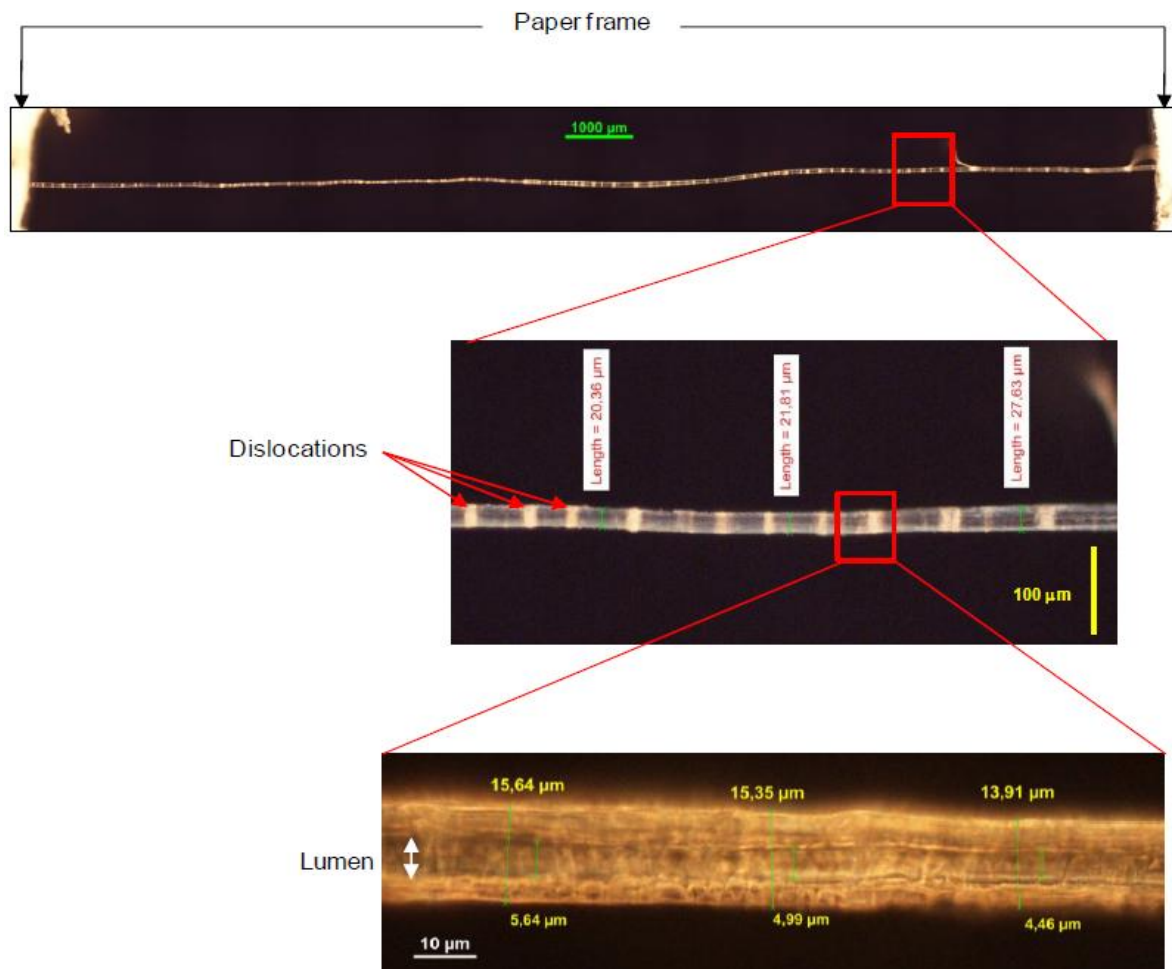


Figura 2. 40 - Immagine alla luce polarizzata della fibra di *canapa*. I tratti più luminosi sono i difetti [37]

La resistenza a trazione è stata misurata variare anche in base alla possibile rotazione della fibra attorno al proprio asse. Se agli estremi viene permesso di ruotare, i dati misurati risultano minori di quelli che si ottengono con gli estremi bloccati. I set-up di laboratorio però non permettono una libera rotazione della fibra, così come non è improbabile riuscire a garantire un bloccaggio completo della fibra al supporto. Ulteriore chiarificazione è sulla dimensione del lumen. Il lumen si presenta come un cavo e quindi che non possiede nessuna proprietà meccanica. Facendo variare il volume del lumen da 2 a 44 μm , e mantenendo il diametro a 50 μm , si è notata una variazione di modulo elastico pari a 11%: quando la dimensione del lumen aumenta, il modulo elastico diminuisce. La variazione delle proprietà meccaniche dipende da fattori morfologici e strutturali della fibra stessa.

Oltre alle variazioni legate alle caratteristiche morfologiche delle fibre, deve essere messo a punto un set-up di prova che sia *ad hoc* con dispositivi che hanno a disposizione una cella di carico capace di leggere le minime variazioni della forza applicata, uno strumento che riesca a misurare i minimi spostamenti e in definitiva uno svolgimento che non presenti dei rumori di fondo.

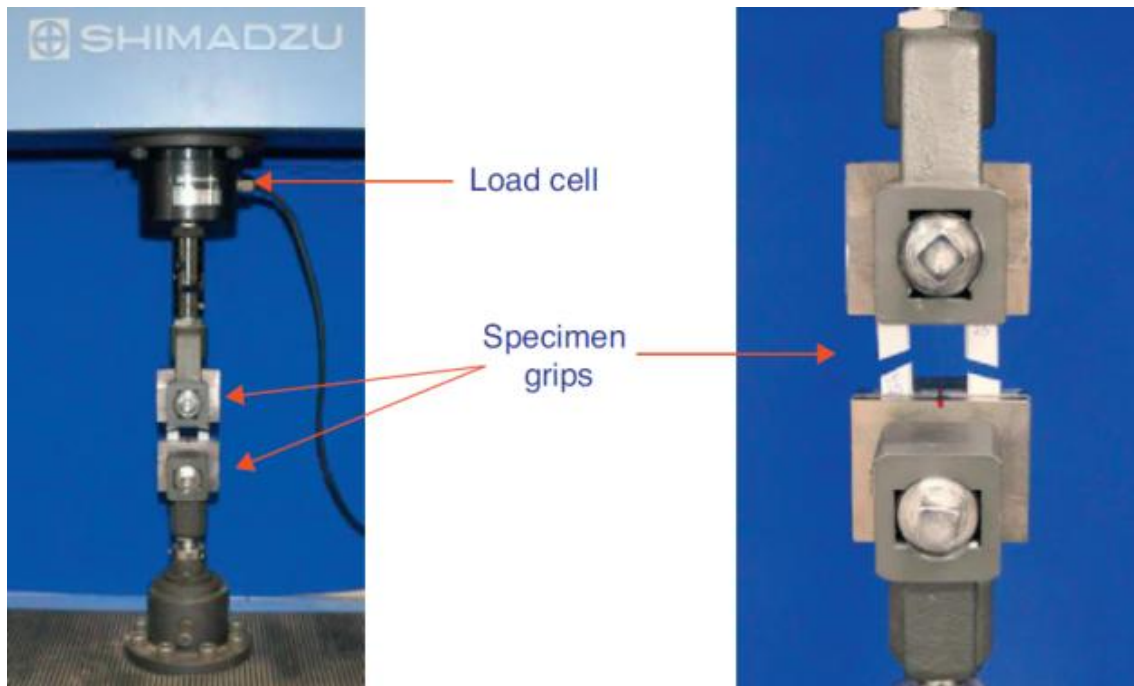


Figura 2. 41 - Set-up delle prove a trazione delle fibre naturali [24]

In Fig. 2.41 si mostra il tipico set-up delle prove a trazione diretta per le fibre naturali. La fibra, come anche mostrato al microscopio sotto luce polarizzata in Fig. 2.40, viene inserita in una cornice di carta e poi fissata con del nastro isolante o con altro materiale simile. Vengono provate le fibre con una differente lunghezza misurando lo spostamento effettuato dallo strumento di analisi. A seguire viene mostrata la funzione che regola i diversi valori (Eq.2.1):

$$\frac{\delta_t}{F} = \left(\frac{1}{EA} \right) l + c \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Dove:

- E modulo di Young della fibra
- A area della sezione trasversale della fibra
- l lunghezza libera del provino
- c adattamento della cella di carico per la prova
- δ_t spostamento misurato
- F forza applicata e misurata dallo strumento di analisi

Si è visto come il modulo di Young e la resistenza a trazione ultima non sono dipendenti della lunghezza del provino, mentre a maggiori lunghezze si registrano minori deformazioni a rottura. Questo può essere compreso sulla base della teoria di Griffith esposta in precedenza. Negli ultimi anni si è cercato di quantificare la distribuzione dei difetti lungo la fibra, in maniera tale di rendere la fibra stessa, per sua natura varia in forma e dimensione, più omogenea nelle sue caratteristiche per poter studiarla come

elemento pressochè uniforme in forma, dimensione e proprietà. Si è perciò studiata una distribuzione statistica di Weibull che metta in relazione la resistenza a trazione della fibra con la probabilità di rottura della fibra stessa per ottenere una misura della variabilità della sua resistenza. La relazione è la seguente (Eq. 2.2):

$$P(\sigma) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Dove σ è la tensione di una fibra per una data probabilità di sopravvivenza, m il modulo di Weibull mentre σ_0 è definito come la resistenza caratteristica che corrisponde a $P(\sigma) = 1/e = 0,37$. All'aumentare del valore del modulo di Weibull m si hanno una variazione minore dei valori di tensione. Per fornire la variabilità della tensione della fibra si utilizza una formula estimativa che varia in funzione del numero di fibre che vengono analizzate (Eq. 2.3):

$$P(\sigma_i) = 1 \frac{i}{N+1} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Dove $P(\sigma_i)$ è la possibilità che la fibra resista alla tensione i -esima esercitata sulla fibra, mentre N è il numero totale delle fibre analizzate. Unendo (Eq. 2.2) con la (Eq. 2.3) si ottiene la (Eq. 2.4):

$$\ln \ln \left[\frac{N+1}{N+1-i} \right] = m \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

La relazione tra i due fattori può essere resa graficamente, come si vede in Fig. 2.40, dove risulta m una linea retta in funzione di $\ln \ln \left[\frac{N+1}{N+1-i} \right]$ e di $m \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)$. In linea generale, all'aumentare della lunghezza del provino si registrano valori di m minori. Un m minore comporta una variazione minore dei valori di tensione [19].

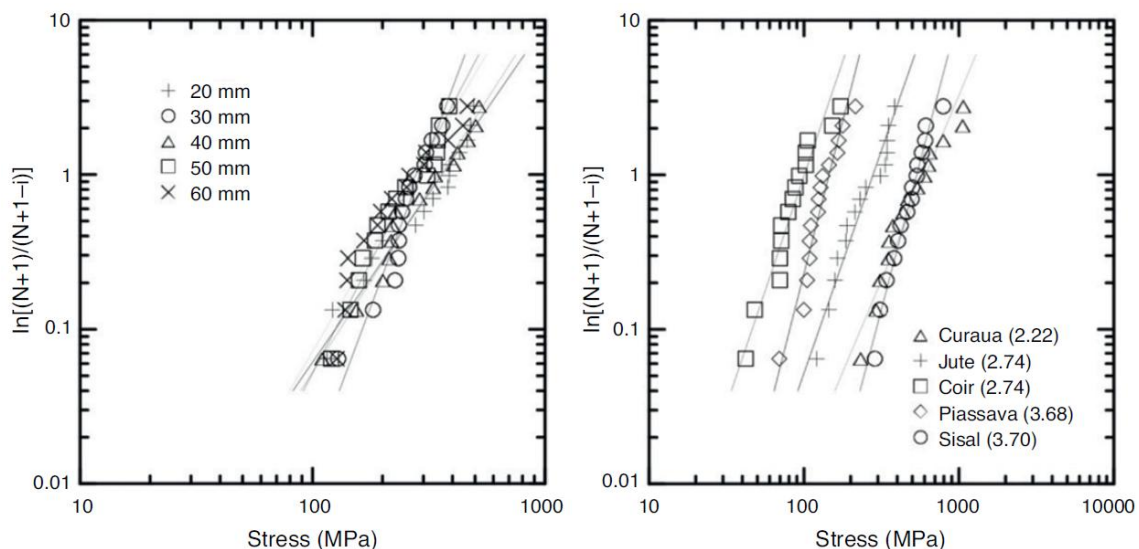


Figura 2. 42 - Andamento del modulo di Weibull m [27]

Le varie linee con pendenze m diverse hanno un punto di intersezione indifferente dalla loro pendenza. Avere una resistenza media ma con un modulo di Weibull differente può essere spiegato come segue: il difetto “medio” controlla la resistenza media della fibra, ma il numero di difetti controlla il modulo di Weibull. La media dei difetti sulla lunghezza quindi rimane la stessa, ma in provini più lunghi ha un valore più omogeneo tra i vari provini, mentre l’incertezza aumenta al diminuire delle dimensioni della fibra [19].

2.3.3.2 Variazione in funzione della morfologia delle fibre

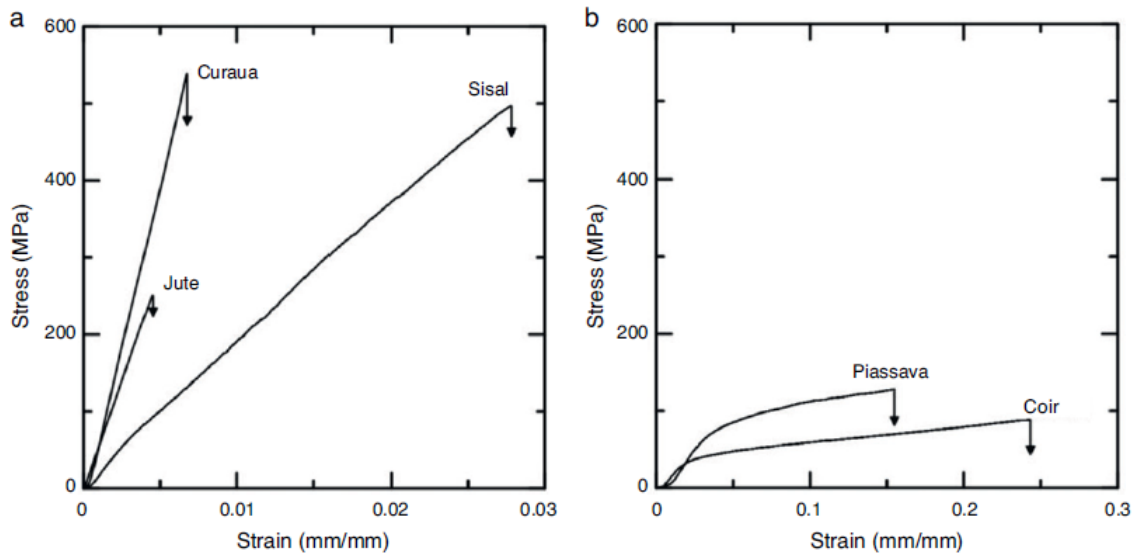


Figura 2. 43 - Due comportamenti tipici delle fibre naturali (a) alte prestazioni e (b) basse prestazioni [27]

Oltre alla caratterizzazione meccanica in funzione dei difetti e alla loro presenza lungo il campione analizzato, Fidelis *et. al* [24] hanno voluto mostrare l’effetto della morfologia delle fibre sulla variazione delle proprietà meccaniche. La morfologia della fibra è molto varia, non solo è differente tra una tipologia di fibra e l’altra, Fig. 2.41, ma anzi può variare anche all’interno della fibra stessa. Diversi fattori, anche in questo caso, devono essere tenuti presenti durante la caratterizzazione meccanica. La forma può essere simile fra le fibre ma si hanno valori diversi dell’area interna del lumen, del numero dei lumen, del numero e delle dimensione delle pareti cellulari con particolare interesse per il secondo strato S_2 della parete secondaria e l’area totale sezionale.

Gli autori hanno visto che in linea generale, al diminuire delle dimensioni del lumen si registrano aumenti della dimensione della parete secondaria, così come di pari passo si registra un aumento della resistenza misurata e del modulo di Young calcolato. Questo però, continuano, non mette in relazione la resistenza a trazione con l’area totale delle fibre, che presentano valori più o meno dispersi senza una particolare correlazione, Fig. 2.42 (a). Al contrario, un altro studio [30] relativo alla fibra di *curaua* mette in relazione l’area della sezione corrente della fibra con la resistenza a trazione: viene indicato che ad una minore area corrisponde una tensione maggiore, come indicato nella Fig. 2.44 (b). Gli autori [27] sostengono che la relazione tra resistenza a trazione e morfologia delle fibre è

più complessa, andando a mettere a confronto anche la composizione chimica delle fibre stesse. Per esempio la fibre di *sisal* hanno una quantità maggiore di cellulosa ($\approx 73\%$) rispetto alle fibre di *juta* ($\approx 65\%$). Gli autori quindi sostengono che non solo si hanno differenze con la morfologia, ma anche che questa inoltre varia al variare della composizione chimica della fibra stessa [24].

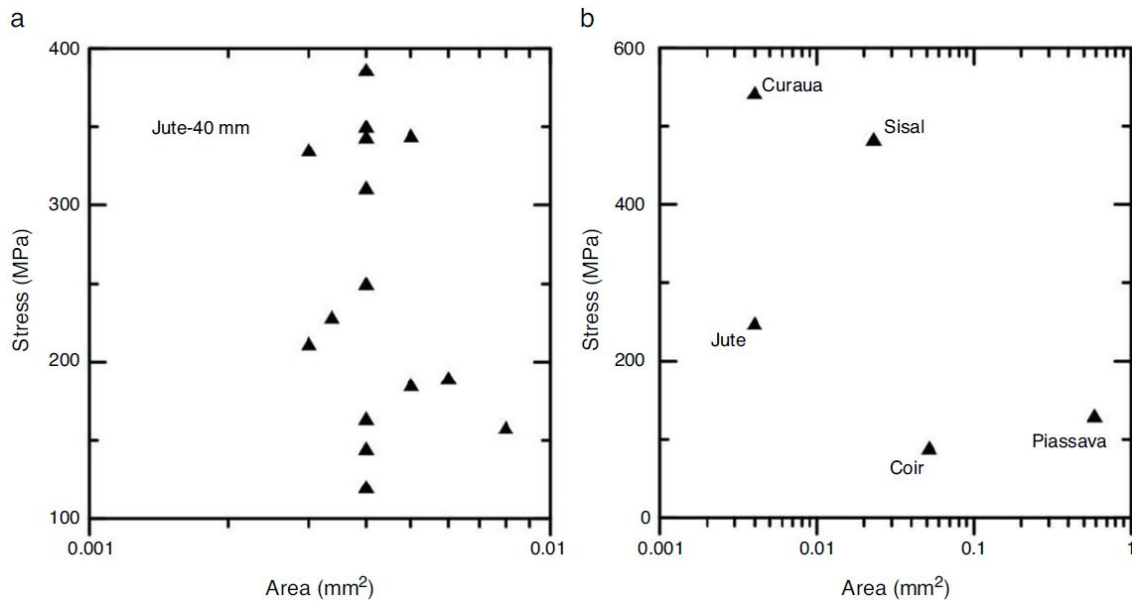


Figura 2. 44 - Dispersione dei valori di resistenza a trazione per la fibra di *juta* e l'area sezionale (a); valori di resistenza in rapporto di area per varie tipologie di fibre (b) [27]

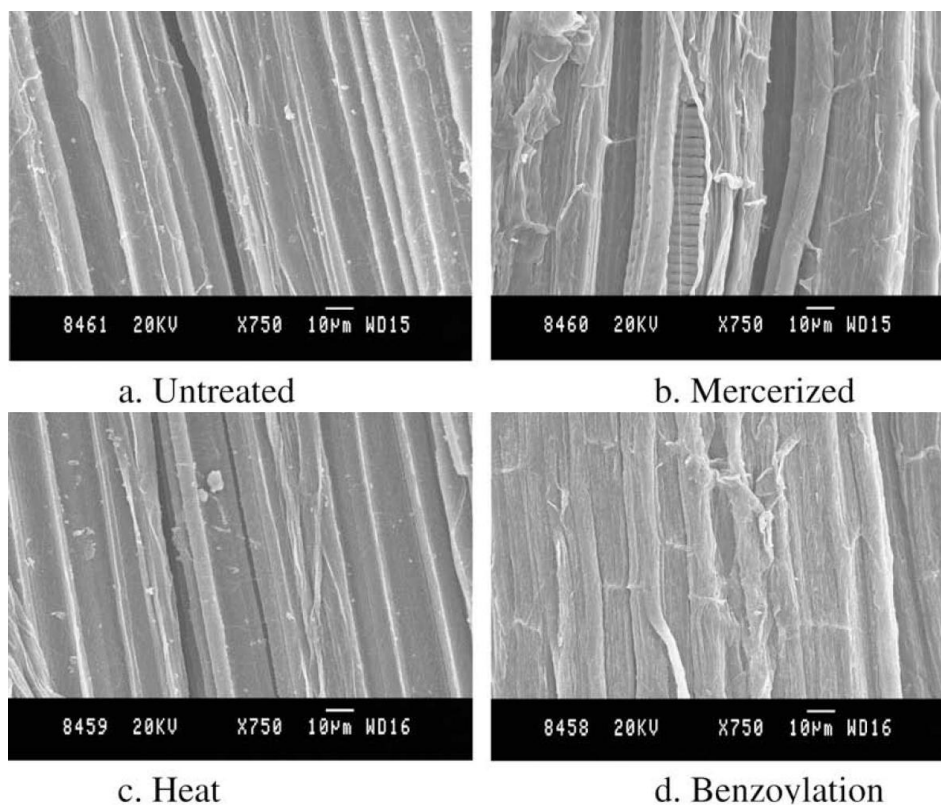
2.3.3.3 Trattamenti superficiali

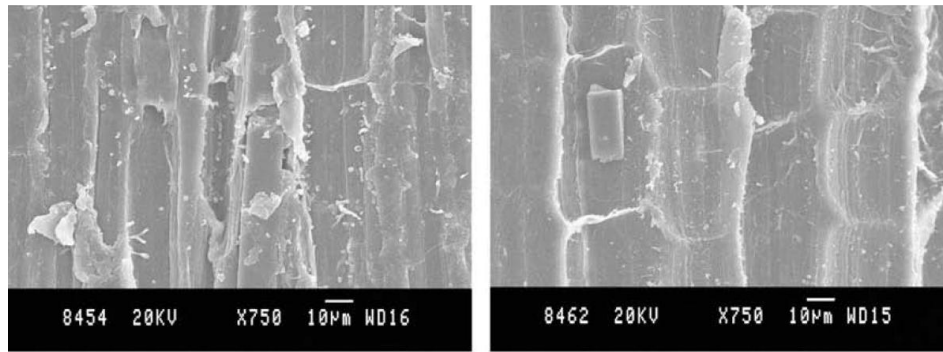
Le fibre naturali sono un mezzo poroso capace di variare notevolmente le proprie dimensioni. Le proprietà meccaniche, dipendenti dalle dimensioni delle fibre, quindi sono suscettibili a tali cambiamenti. La limitazione alle variazioni di volume può portare ad una definizione dei parametri meccanici in maniera più univoca e svincolata da variabilità igrometriche come il contenuto d'acqua o di umidità e con la temperatura. Inoltre, una maggiore stabilità volumetrica migliora anche l'adesione delle fibre nel mezzo in cui sono state collocate, sia essa cementizia o polimerica. Streekumar *et al.* [38] hanno apportato trattamenti superficiali alle fibre di *Sisal* inserite in una matrice di poliestere e successivamente hanno condotto prove di trazione e flessione sui composti. I risultati hanno mostrato un miglioramento rispetto al campione di controllo, così come si sono registrati valori minori di quantità di acqua assorbita a seguito di trattamenti attuati sulle fibre. I trattamenti in questione sono stati:

- l'ammollo in soluzione alcalina con 5% di NaOH per 30 minuti e poi lavaggio con acido cloridrico in soluzione fino a togliere ogni traccia alcalina e poi asciugatura in forno a 70° C;
- un trattamento termico 100° C in un forno per 4 ore;

- ammollo in una soluzione 0,02% di KMnO_4 /acetone e poi lavaggio con acqua distillata; impregnazione di NaOH, con 50 ml di cloruro di benzoile per 15 minuti, successivo lavaggio in acqua mentre a seguire immersione in una soluzione di etanolo per 1 ora;
- utilizzo di silane allo 0,6% in soluzione di acqua/etanolo in rapporto 6:4 in immersione per 90 minuti e successiva asciugatura prima in aria e poi in forno per un'ora.

Gli autori affrontano il discorso dell'adesione delle fibre alla matrice cementizia sia in maniera tale da poter migliorare le caratteristiche meccaniche del composto, sia di diminuire la quantità di acqua assorbita. I risultati ottenuti mostrano un miglioramento rispetto alla condizione di fibra non trattata, sia attraverso le prove meccaniche con aumento della tensione di picco e del modulo di Young, sia attraverso una minore permeabilità della fibra. L'energia d'impatto assorbita, però, risulta essere maggiore nei provini con fibre senza trattamento [38]. In Fig. 2.45 si mostrano le immagini al microscopio a scansione elettronica delle fibre di *Sisal* dopo essere state trattate con le diverse soluzioni sopra descritte.





e. Permanganate

f. Silane

Figura 2. 45 - Effetto del trattamento chimico sulle fibre di *Sisal* [38]

In letteratura si sono riscontrati diversi trattamenti per migliorare l'adesione tra fibre e matrice. Una caratteristica da tenere in considerazione è l'eliminazione di impurità sulla superficie delle fibre, rendendole più liscia e con meno protuberanze, in maniera da migliorare l'area di contatto tra la fibra e la matrice. Cicli di asciutto/bagnato in acqua o in acidi acetici sono stati utilizzati per promuovere una variazione volumetrica così come si vengono a modificare, seppur in quantità minore, le proprietà meccaniche delle fibre e degli elementi rinforzati con le fibre. Questo è dovuto ad un processo di irrigidimento della struttura polimerica di cui sono composte le fibre: il processo prende il nome di "hornification" [39]. Le catene di polisaccaridi di cui sono composte le catene cellulari, dopo un processo di asciugatura, trovano posto le une più vicine alle altre, risultando quindi in una contrazione di volume e quindi in un valore di "impaccamento" migliore. Aumentando i cicli si riducono in questo modo i vuoti capillari e anche il lumen subisce una contrazione rispetto alla sua area iniziale. Nella Fig. 2.46 si nota infatti attraverso immagini al microscopio elettronico, come l'effetto dell'"hornification" influisce sulle dimensioni delle fibre. Il processo non è reversibile: anche se posti di nuovo a contatto con ambiente umido, non si verifica un completo ritorno alle volumetrie iniziali. L'intero processo di "hornificazione" non risulta solamente in una maggiore stabilità dimensionale delle fibre tra lo stato asciutto e lo stato bagnato, ma inoltre si registrano guadagni nei valori meccanici, una diminuzione dell'area trasversale della fibra e anche in una maggiore adesione tra matrice e fibra. La tabella a seguire mostra infatti i valori registrati per le delle fibre di *Sisal* prima e dopo il trattamento dell'"hornificazione", Tab. 2.2:

	Resist. trazione [MPa]	Def. trazione [mm/mm]	a Modulo Young [GPa]	Resist. adesione [MPa]	Resist. all'attrito [MPa]	Rigidezza di legame [N/mm]
Normali	447,20	0,030	19,3	0,30-0,32	0,18	9,31-33,83
Hornificate	470,25	0,043	17,6	0,42-0,43	0,27	20,6-47,29

Tabella 2. 2 - Proprietà meccaniche di fibre di *sisal* trattate e non [40]

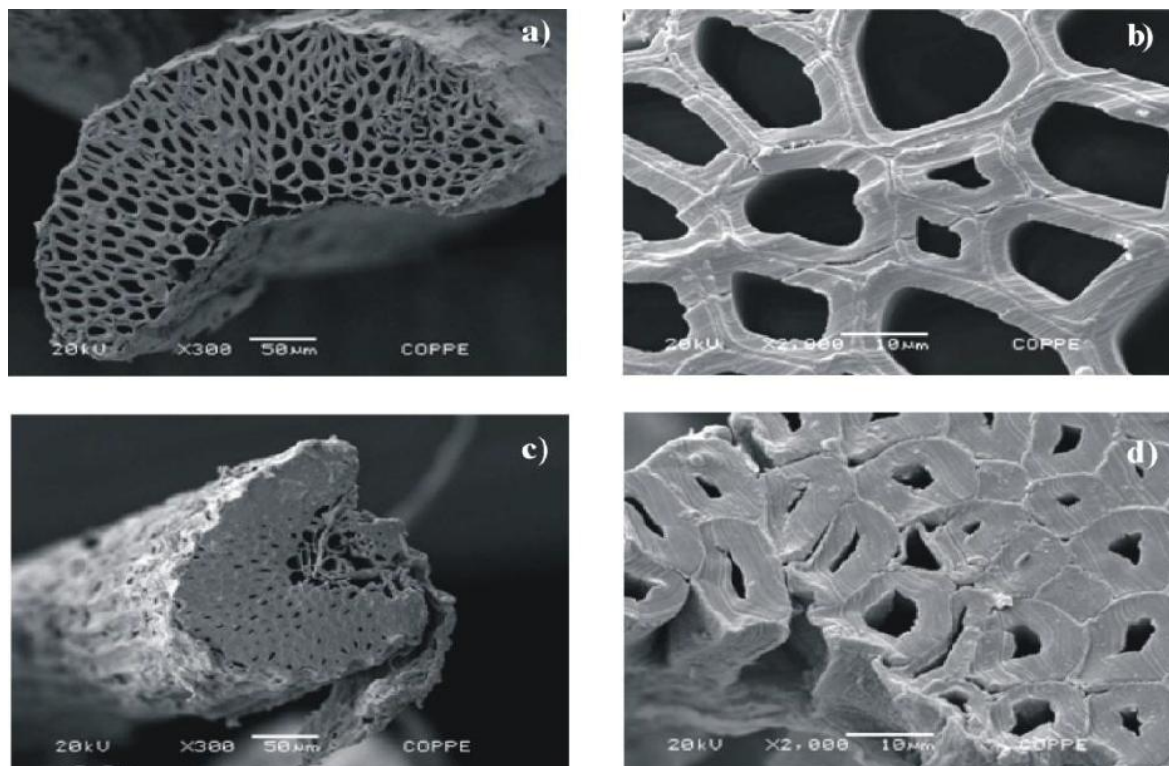


Figura 2. 46 - Sezione trasversale delle fibre di *sisal* prima (a, b) e dopo (c, d) del processo di "hornification" [40]

2.3.4 Elementi a matrice cementizia

I rinforzi forniti dalle fibre negli elementi cementizi possono lavorare sia a livello macroscopico sia a livello microscopico. A livello microscopico le fibre fermano lo sviluppo di microfessure, risultando in una maggiore resistenza alla compressione mentre a livello macroscopico le fibre controllano l'apertura di fessura, aumentando la capacità del materiale ad assorbire energia. L'abilità delle fibre di controllare questi due fenomeni dipende principalmente da:

- Numero di fibre
- Distribuzione e allineamento delle fibre
- Adesione e forza di interazione tra fibre e matrice

Un numero elevato di fibre aumenta la possibilità che le microfessure vengano intercettate e, se adeguatamente rigide ed adese nella matrice, possono prevenire che la microfessura possa ampliarsi e generare una macro fessura. Una distribuzione irregolare delle fibre nella matrice può portare ad un possibile "effetto sterico" in cui aumentano i pori capillari, comportando quindi una maggiore propensione allo sviluppo di microfessure, data la maggiore presenza di difetti. La presenza della fibre è quindi bilanciata da una

maggior presenza di pori e da un effetto di ponte tra nello sviluppo delle fessure. Alle fibre viene richiesto di garantire una minore fragilità del materiale, che come visto nella Fig. 2.11, all'aumentare della resistenza a compressione corrisponde una sempre più marcata fragilità. La resistenza a compressione aumenta all'aumentare della minore presenza di difetti nella matrice, ad una compattezza maggiore e ad un "impacchettamento" più alto, un rapporto acqua/cemento minore, una minore dimensione degli aggregati ecc.. Per poter meglio moderare il comportamento post picco si aggiungono le fibre, che consentono un aumento della tenacità e della duttilità del materiale. Anche le fibre naturali possono essere impiegate nella realizzazione e produzione di materiali ad elevate prestazioni (HPFRCCs) dove, come detto in precedenza, la posizione delle fibre in funzione della distribuzione degli sforzi può influenzare il comportamento. Le fibre possono essere effettivamente governate all'interno della matrice in base ad una modalità di getto in base alle caratteristiche della matrice allo stato fresco, come elevata fluidità e/o auto compattamento [47].

2.3.4.1 Risposta tensione-deformazione in trazione

Il comportamento a trazione dei materiali fibrorinforzati è un parametro di fondamentale rilevanza progettuale. Diversi esperimenti, sia diretti che indiretti, sono stati impiegati per la sua identificazione sperimentale, ma fino a questo momento non è stato redatto alcuno standard tecnico a riguardo: non si hanno dimensioni dei provini, calibrazioni degli strumenti, ipotesi e condizioni al contorno oggettive. A seguire si forniscono gli elementi relativi alle più recenti indagini in materiali con esclusivo riferimento a composti cementizi rinforzati con fibre naturali.

Diversi provini con diverse dimensioni sono stati analizzati da diversi autori, sia per prove dirette che indirette. Silva *et al.* [45] hanno utilizzato provini prismatici sottili, con dimensioni di 400x50x12 mm con una matrice cementizia e il rinforzo di fibre di *Sisal*. Dei fogli di alluminio sono stati incollati alle estremità e le pinze idrauliche sono state impostate ad un livello di tensione pari a 1,37 MPa per evitare concentrazione degli sforzi e mantenere stabile il provino durante lo svolgimento della prova. La Fig. 2.49 mostra il set-up utilizzato dagli autori durante le prove. Sono state analizzate la tensione, lo spostamento della testata della macchina di prova e la deformazione. Una indagine ottica è stata eseguita dagli autori, grazie all'impegno di macchina fotografica impostata per raccogliere immagini ogni 60 secondi per poi processare le immagini tramite uno strumento di MATLAB e studiare l'apertura delle fessure in funzione dello sforzo applicato. Lo studio è stato condotto tramite il conteggio dei singoli pixel a cui è stata fornita una dimensione fissata, per poi sommarli ed ottenere quindi l'effettiva apertura durante l'intero svolgimento della prova, come da Fig. 2.50.

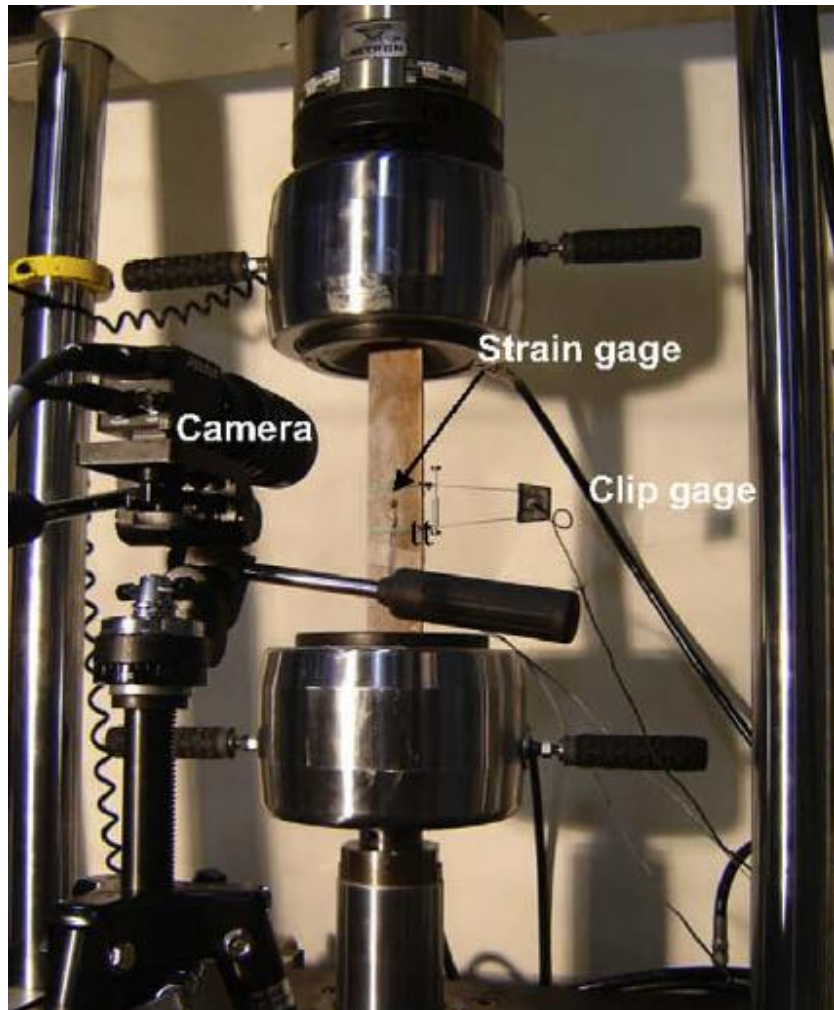


Figura 2. 47 - Set-up per le prove a trazione dirette dei provini con fibre naturali [45]

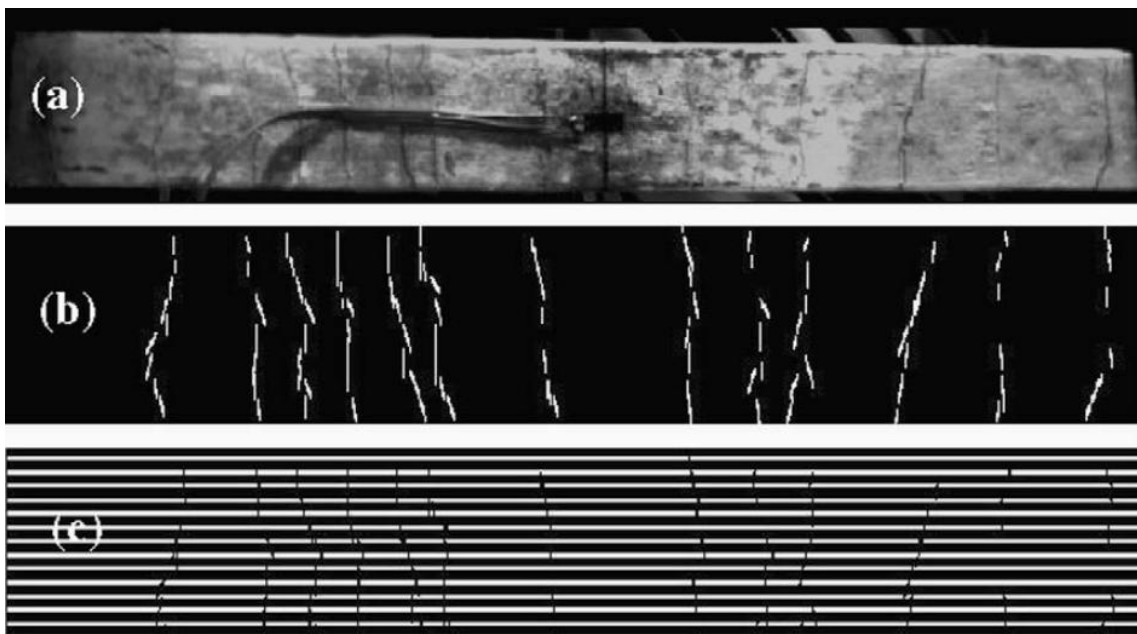


Figura 2. 48 - Analisi delle immagini (a) provino, (b) traccia delle fessure, (c) apertura di fessura [45]

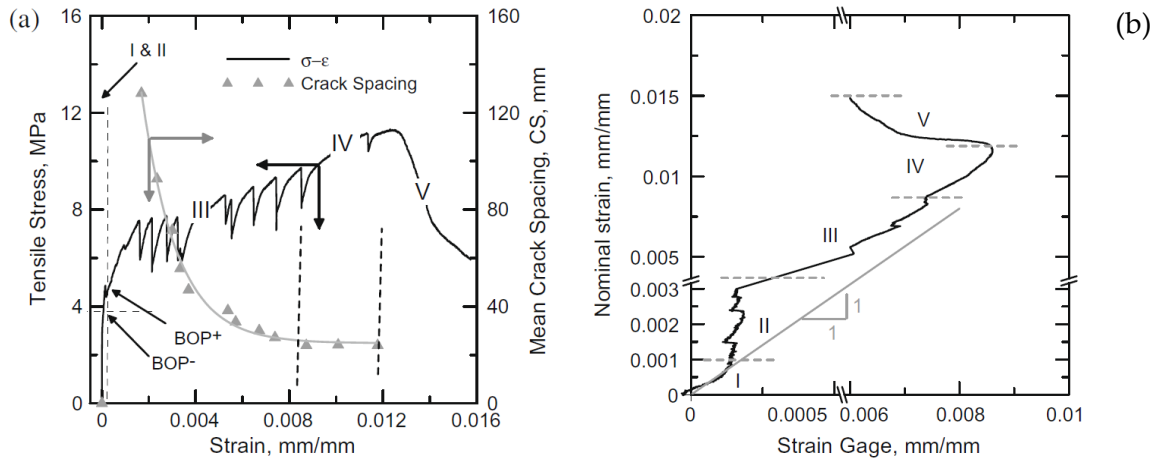


Figura 2. 49 - Risposta tensionale del composto con fibre di *Sisal*: tensione-deformazione e apertura di fessura (a), relazione tra deformazione della prove e della macchina (b) [45].

La Fig. 2.51 a sinistra viene mostrata una tipica risposta tensionale per elementi fibrorinforzati con fibre di *Sisal*. Per la misura della deformazione del provino sono stati utilizzati due metodologie differenti: la prima prevede lo studio della deformazione localizzata nel centro del provino tramite variazione della resistenza elettrica di un clip passante per la zona in tensione, la seconda è quella classica che si calcola dividendo lo spostamento della testata della macchina per la lunghezza nominale del provino. Il confronto tra deformazione localizzata (in mezzo) e globale (in testa) permette l'identificazione di diverse zone che corrispondono a differenti comportamenti del provino che sono indicati tramite numeri romani, come segue:

- I. Formazione della fessura
- II. Propagazione – perdita di linearità
- III. Multifessurazione lungo il provino
- IV. Apertura delle fessure esistenti
- V. Localizzazione

La parte a destra (b) della Fig. 2.51 mostra la relazione che intercorre tra deformazione misurata in mezzo e quella misurata in testa. La zona I è quella del tratto lineare elastico, infatti come si può vedere dal grafico l'andamento delle due deformazioni è in rapporto 1:1. Segue quindi una deviazione dalla linearità alla formazione della prima fessura, anche se il carico che il materiale può portare rimane costante dato l'effetto ponte che esercitano le fibre longitudinali. Le prove a trazione presentano durante il loro svolgimento la formazione di momenti parassiti dovuti a una non perfetta simmetria. Questi momenti parassiti generano tensioni di compressione e di trazione che vanno a sommarsi all'azione di trazione che viene esercitata sul provino e quindi ottenendo una zona più tesa e sollecitata di un'altra. Questo fenomeno viene evidenziato dalla presenza di un "punto di piegatura" (BOP – Bend Over Point, nel grafico $\sigma-\epsilon$) che ha il suo inizio con la formazione della prima fessura. Successivamente, altre fessure iniziano a propagarsi lungo il provino

più o meno a intervalli regolari. La deformazione della zona centrale rimane relativamente costante, il che indica uno stadio di deformazione regolare attraverso la propagazione di fessure lungo la lunghezza del provino. Questa viene identificata come la zona II che termina quando la prima fessura passa attraverso tutto lo spessore del provino e indica anche il termine del punto di flessione (BOP), dove il livello tensionale esercitato sul provino arriva a valori di rottura per anche la zona “sporcata” dal momento parassita dove viene esercitata la tensione di compressione. La fase a seguire è caratterizzata dalla formazione di fessurazioni distribuite lungo tutto il provino. In questa fase di omogeneizzazione, all’aumentare della deformazione compete una formazione di fessure multiple con una ampiezza minore con un andamento esponenziale come presentato empiricamente attraverso l’Eq. 2.10. La deformazione misurata nella zona centrale rimane costante mentre diverse fessure si formano lungo tutta la sezione. L’andamento della loro ampiezza viene analiticamente analizzata come funzione di tre parametri:

$$S(\varepsilon_i) = S_1 + S_0 \cdot e^{-\alpha (\varepsilon_i - \varepsilon_{mu})} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Dove:

- $S(\varepsilon_i)$ indica l’apertura di fessura in funzione della deformazione
- ε_{mu} rappresenta la deformazione media misurata al punto di flessione (BOP)
- ε_i raffigura un parametro indipendente di deformazione nel provino
- S_0 e α sono costanti come lunghezza iniziale del provino e tasso di formazione delle fessura come funzione della deformazione
- S_1 mostra il valore di saturazione dell’ampiezza di fessura

La rigidità delle fibre di *Sisal*, utilizzate nella realizzazione dei provini, è abbastanza elevata per permettere un efficace effetto ponte in maniera tale da mantenere assieme i due lembi della fessura controllandone l’ampiezza ed evitare quindi l’allargamento. Questo incentiva il fenomeno e lo sviluppo di una zona multifessurata. La rigidità influisce sul tasso di riduzione dell’apertura di fessura, e se non in maniera completa e totale, di sicuro almeno uno fra i parametri utilizzati. La zona III quindi mostra una ricca formazione di nuove fessure. Si arriva ad ottenere una distribuzione costante di fessure nella zona IV, oltre la quale non si evidenziano ne formazione di nuove fessure, ma invece si nota un aumento della deformazione del provino sotto carico che comporta una allargamento delle fessure già presenti. A questo punto il provino è completamente fessurato ed inizia il fenomeno dello sfilamento. Si arriva a valori asintotici del valore medio di apertura di fessura, corrispondenti alla saturazione del valore S_1 . Il meccanismo è quello di un continuo allargamento delle fessure ed accompagnato fenomeni di pull-out (estrazione delle fibre). Il punto terminale è raggiunto nella zona V dove si vede la localizzazione di una fessura di maggiori dimensioni e il conseguente sfilamento delle fibre.

Al termine della prove i valori registrati sono stati i seguenti:

- Deformazione a rottura: 1,53% misurata alla testa dello strumento, con valori individuali che variano da 1,15% a 2,20%. Si identificano le fibre di *Sisal* capaci di ottenere una distribuzione di fessure lungo il provino.
- Tensione media a rottura: 12 MPa con valori compresi tra 10,56 MPa e 14,70 MPa.
- Modulo di Young: 37,17 GPa, calcolata con riferimento alle deformazione al centro del provino

I valori riportati consentono agli autori [45] di poter utilizzare gli elementi cementizi rinforzati con fibre di *Sisal* con queste proprietà meccaniche come elementi strutturali.

2.3.4.3 Comportamento flessionale

Per poter analizzare il comportamento flessionale di elementi cementizi con fibre naturali (NFRCC – Natural Fiber Reinforced Cementitious Composite) Silva *et al.* hanno realizzato provini prismatici di dimensioni 400x50x12 mm laminati a compressione con 5 strati di fibre di *Sisal*. Gli elementi sono stati realizzati tramite getto di malta cementizia, con l'aggiunta del 5% sul volume fine di wollastonite, in un cassero in acciaio. L'aggiunta delle fibre di *Sisal* è avvenuta in maniera manuale, adagiando uno strato alla volta fino ad un totale di 5 strati. Le fibre sono state disposte in maniera longitudinale. Per poter garantire una migliore permeazione dell'impasto tra gli strati delle fibre, il provino è stato fatto vibrare per compattare il composto. Dopo le procedure di getto, il provino è stato compresso sulla faccia libera con una tensione di 3 MPa per 5 minuti.

I provini sono stati provati a flessione su 4 punti, in controllo di spostamento della testata della macchina applicando una velocità pari a 0,5 mm/min, due estensimetri posizionati nel centro del provino, sia all'intradosso che all'estradosso, hanno consentito di calcolare la deformazione e l'andamento dell'asse neutro durante lo svolgimento della prova. Sono state misurate il carico applicato sul provino, lo spostamento della macchina di prova e la deformazione, quest'ultima tramite LVDT. Il set-up della prova è rappresentato in Fig. 2.52. Per poter ottenere un confronto visivo, è stato utilizzato uno specchio posto sotto il provino e una macchina fotografica che riprendesse le aperture di fessura nel tempo. Per il processamento delle foto si è utilizzato la stessa procedura vista nel paragrafo precedente, vedi Fig. 2.50.

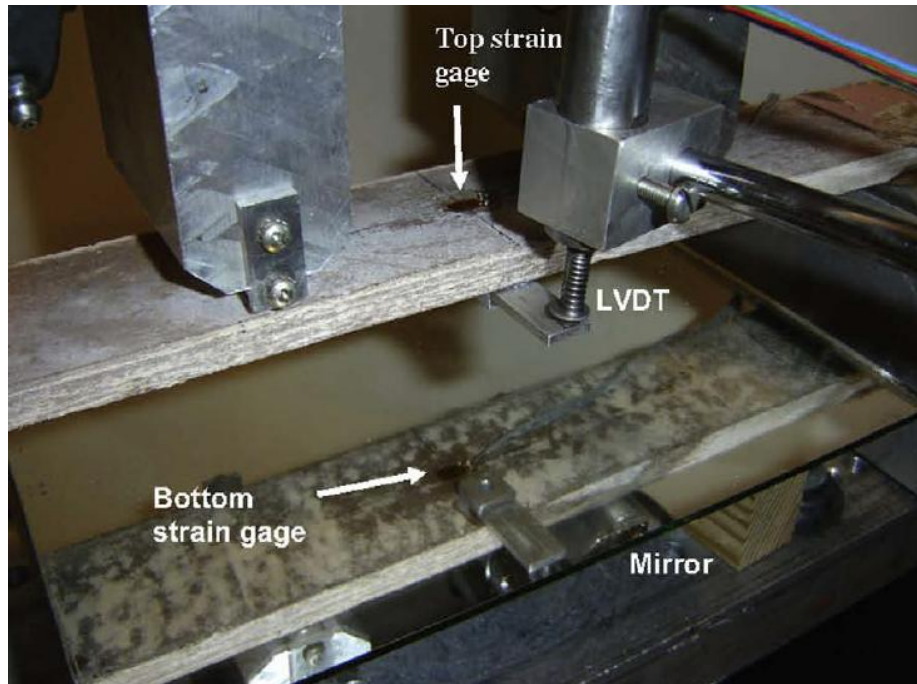
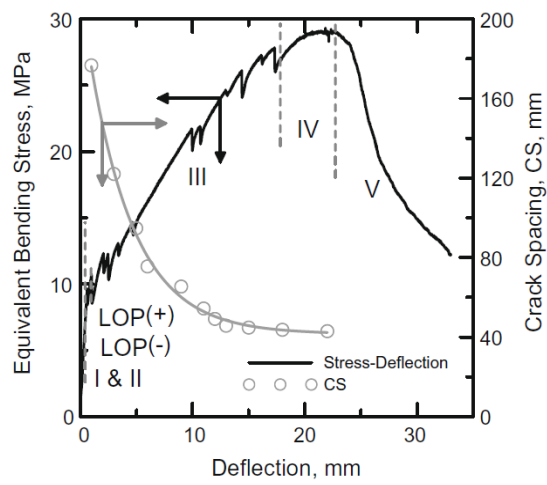
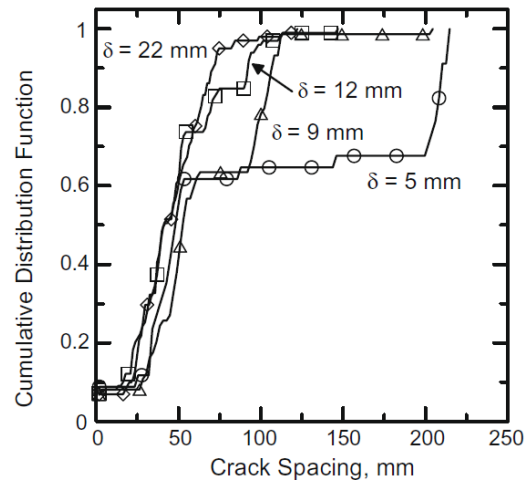


Figura 2. 50 - Set-up per la prova a flessione di provini laminati con fibre di Sisal [45]



(a)



(b)

(c)

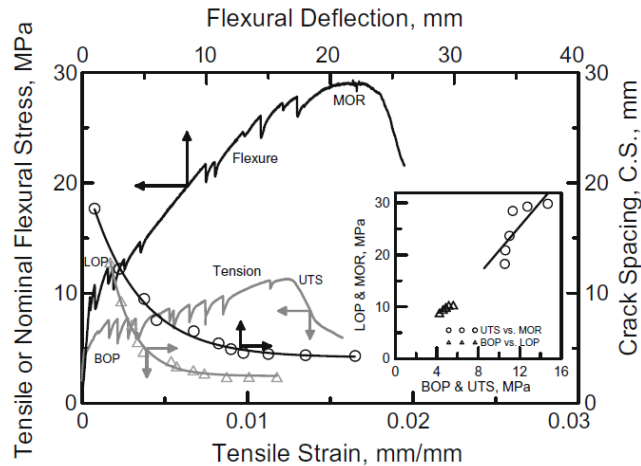


Figura 2.51 - Comportamento flessionale di fibre di *Sisal* in un sistema composito: (a) tensione ed apertura di fessura / spostamento; (b) paragone tensione/trazione; (c) funzione di distribuzione cumulativa [45]

La Fig. 2.53 (a) mostra il tipico comportamento flessionale di elementi fibrorinforzati con fibre di *Sisal* e le misurazioni ottenute per la apertura di fessura. Seguendo lo stesso discorso fatto per le prove a trazione, il comportamento viene diviso in 5 zone distinte. La zona I corrisponde al tratto lineare elastico dove fibre e matrice rispondono in maniera lineare entrambe. Al posto del BOP (Bend Over Point), nel caso della flessione abbiamo il limite di proporzionalità (LOP – Limit Of Proportionality) che delimita la zona II, dove si ha una graduale perdita di linearità nella curva sforzo-deformazione. A seguire, la zona III è caratterizzata da una marcata formazione di fessure multiple che può essere esplicitata da un decadimento esponenziale come visto nell'Eq. 2.10. L'apertura di fessura decresce rapidamente, per poi arrivare asintoticamente al termine della zona IV. La zona V invece è quella caratterizzata da un comportamento *softening* a causa della localizzazione del danno in quanto una fessura amplia le proprie dimensioni.

La risposta flessionale e tensionale con la loro rispettiva distribuzione di fessure sono state messe in confronto in Fig. 2.53 (b). L'inserito mostra invece la relazione tra LOP (limite di proporzionalità) con BOP (punto di piegatura) e il modulo di rottura (MOR – Modulus Of Rupture) con la resistenza a trazione ultima (UTS – Ultimate Tensile Stress). Si nota come sotto carichi flettenti la formazione della fessura avviene dopo livelli tensionali doppi rispetto a quelli registrati in trazione pura. I risultati dalle prove a flessione hanno mostrato un effetto irrigidimento tensionale, mentre la normalizzazione del carico flettente con un modulo di sezione elastica può portare a risultati di resistenza a trazione apparente che risulta essere maggiore fino a 2,8 volte la resistenza a trazione. I valori riportati per MOR sono circa due volte quelli registrati per UTS mentre la saturazione delle fessure è doppia in prove a flessione rispetto a quelle in trazione.

La Fig. 2.53 (c) mostra invece la funzione di distribuzione cumulativa dell'apertura di fessura per flessione a 4 livelli di spostamento dopo aver passato il punto di perdita di proporzionalità (LOP). All'aumentare della freccia, la variabilità misurata nell'apertura di

fessura diminuisce. Le fessure che si formano hanno quindi dimensioni molto simili. Al raggiungimento della saturazione, si ottiene una completa omogeneizzazione di ampiezza delle varie fessure.

La rigidezza è stata calcolata come l'area sottesa alla curva sforzo-deformazione sia per quelle derivanti dalle prove a trazione sia quelle di flessione. Si sono registrati valori elevati pari a $45,95 \text{ kJ/m}^2$ per le prove a trazione e $22,13 \text{ kJ/m}^2$ per quelle a flessione. I valori dimostrano elevata capacità deformativa del materiale composito con fibre di *Sisal*. La rigidezza relativa alla prima formazione di fessura è stata calcolata essere pari a 1,70 e 0,48 kJ/m^2 , la prima per la trazione la seconda per la flessione che rapportate al valore totale rappresentano valori di 27 e 46,1 (Rigidezza totale / rigidezza della prima fessura) [45].

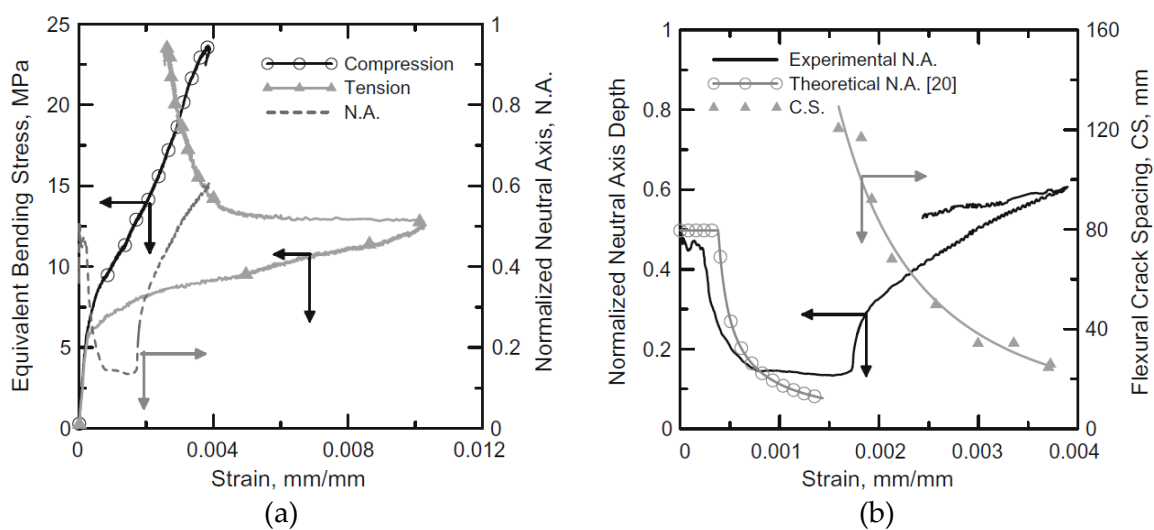


Figura 2.52 - Computazione dell'asse neutro: (a) deformazione intradosso/estradosso per prova a flessione; (b) apertura di fessura vs. asse neutro [45]

La deformazione a compressione ed a trazione analizzata durante le prove a flessione a 4 punti sono state messe in grafico nella Fgi. 2.54 (a). Un comportamento distinto per le sollecitazione può essere facilmente individuabile dopo la formazione della prima fessura. Per il comportamento nella zona di compressione si identificano 3 zone differenti. La prima è il tratto elastico lineare che è segue lo stesso andamento del comportamento di trazione ed è rappresentato dalla stessa rigidezza ($29,55 \text{ GPa}$). La zona II inizia alla formazione della prima fessura ed è rappresentata da un aumento di rigidezza all'aumentare della fessurazione all'estradosso. Nella figura non viene riportata, ma la zona III è quella rappresentata dallo scarico. Il comportamento in trazione è stato identificato tramite 5 differenti zone. La prima rappresenta la zona lineare elastica, mentre la zona II è quella successiva alla formazione della prima fessura, dove si registra una diminuzione del modulo di elasticità, da $29,55$ a $0,50 \text{ GPa}$. Una riduzione della deformazione a trazione viene registrata nella zona III e IV dovuta alla vicinanza delle fessure all'estensimetro e agli effetti di diffusione del taglio del carico (shear lag effect) che risultano in una degradazione della matrice.

L'acquisizione delle deformazioni in trazione e in compressione può essere utilizzata per trovare la profondità dell'asse neutro normalizzata per lo spessore d . Nella parte elastica l'asse neutro normalizzato si trova stabile a $0,5d$ come dalla teoria lineare. Quando si perde linearità e si fessura la sezione, si registra un drastico cambiamento dell'asse neutro che arriva ad essere $0,18d$ ed è intesa una redistribuzione di tensioni di trazione lungo tutta la sezione. Assumendo l'ipotesi che le sezioni rimangano piane senza ruotare, la sezione è tesa per l'82% della sua altezza mentre il resto è in compressione fino a valori deformativi pari a $0,002 \text{ mm/mm}$. All'aumentare delle fessure e della deformazione della sezione, le due zone tese e compresse continuano ad aumentare la propria deformazione fino a valori pari a $0,004 \text{ mm/mm}$. Assunzioni semplificative che non tengono conto del reale andamento dell'asse neutro possono comportare in eccessive sovrastime della resistenza del materiale [45].

2.3.5 Applicazioni ed approcci progetturali

2.3.5.1 Laminati con fibre di Sisal

Per il momento l'unica pubblicazione riguardo l'applicazione di NFRCC è stata riportata da Silva *et al.* [49] che vede l'utilizzo di fibre di Sisal in una matrice a base cementizia che viene compressa con una tensione di 3 MPa per migliorare la coesione tra matrice e fibre. Sono stati prodotti dei laminati corrugati dove le fibre di Sisal sono state inserite manualmente e successivamente fatte vibrare all'interno del composto. Il risultato finale è stato un provino di dimensioni $400 \times 400 \times 12 \text{ mm}$ per investigare l'influenza del corrugamento delle lastre sul comportamento flessionale. Le prove sono state fatte tramite set-up flessionale di tre punti. Si trovano le immagini di realizzazione dei provini nella Fig. 2.55, mentre quella successiva, la Fig. 2.56, mostra il tipico comportamento dell'elemento corrugato con anche le foto dell'avvenuta rottura. L'effetto delle fibre, a confronto con elementi prodotti senza fibre, mostra un aumento nei parametri meccanici, sia come rigidità iniziale, con valori di calcolata alla prima fessura che vedono $1,24 \text{ kN}$ per elementi senza fibre e $3,91 \text{ kN}$ con elementi con fibre di Sisal, sia per il comportamento a rottura, con valori pari a $6,81 \text{ kN}$ e $10,26 \text{ kN}$ rispettivamente per provini senza e con fibre. Entrambi mostrano un comportamento multi fessurativo, ma con andamenti di fessurazione differenti. Nell'elemento di controllo le fibre sono distribuite in maniera omogenea e tutte trasversali, mentre con un materiale fibro rinforzato si è notato che sono presenti anche fessure longitudinali. La formazione di questo tipo di fessura, che corre parallela alle fibre, è dovuta ad una difficoltà nell'applicare un carico uniformemente distribuito sul provino corrugato.

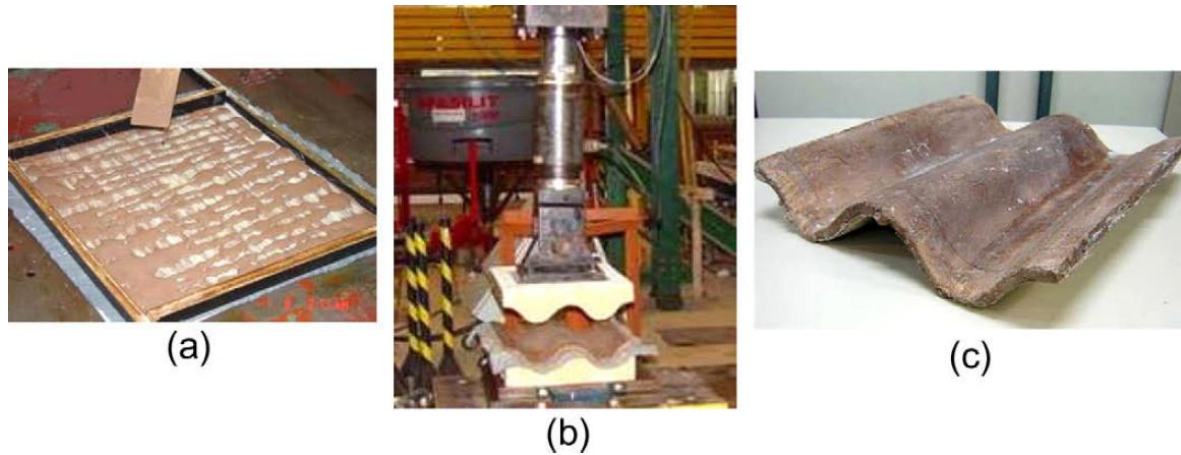


Figura 2.53 - Procedura di realizzazione di provini corrugati (a) getto, (b) pressione del getto nello stampo, (c) provino finito [49]

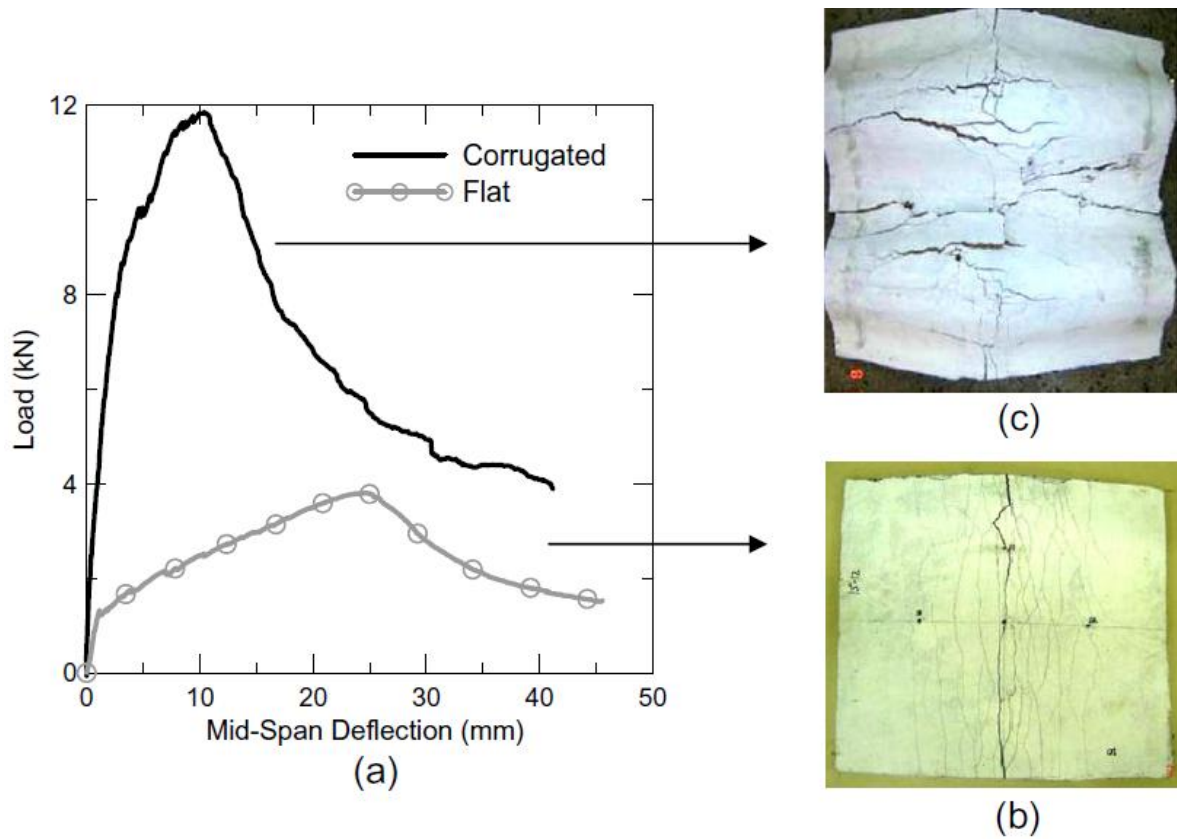


Figura 2.54 - Effetto delle fibre sui provini corrugati (a) in funzione del diagramma forza-spostamento e le relative rotture (b) e (c).[49]

Lo studio conclude che per questo tipo di applicazioni semi-strutturali l'impiego di laminati con fibre di *Sisal* in matrice cementizie e con bassi valori di idrossidi può aumentare le caratteristiche del materiale.

2.3.5.2 Durabilità

Come precedentemente anticipato, il problema delle fibre naturali nella matrice altamente alcalina dei composti a base di cemento porta ad un progressivo invecchiamento delle fibre che si può tradurre in una riduzione delle proprietà meccaniche. Il processo è dovuto ad una mineralizzazione delle fibre che è il risultato di una trasmigrazione dei prodotti di idratazione, in maniera preponderante l'idrossido di calcio (Ca(OH)_2) all'interno della fibra naturale.

Per poter garantire una maggiore durabilità del composto, diversi studi [12 - 16] hanno identificato una possibile soluzione nell'eliminare o contrastare l'insorgenza dell'idrossido di calcio nella matrice. L'utilizzo di materiali ad elevata attività pozzolanica può diminuire questo processo, andando ad utilizzare una quantità al posto del cemento fino al 50% della massa. Per caratterizzare la durabilità della matrice cementizia, sono stati eseguiti dei processi di stagionatura accelerata tramite bagni a temperatura elevata ($T = 60^\circ\text{C}$) per una durata complessiva di 6 mesi. Sono stati realizzati delle matrici con una miscela di Metacaolino (MK) al 30% e 20% di polvere derivanti mattoni di argilla (CWCCB – Calcinated Waste Crushed Caly Brick). Si è notato come a 28 giorni, una matrice con 50% di MK è libera da idrossidi di carbonio (CH). La matrice presentava un mix design di 1:1:0,4 relativamente a matrice cementizia:sabbia:acqua in funzione del peso. Prove a flessione su 4 punti sono state effettuate dopo il periodo di 6 mesi, sia per matrici con solo cemento portland (PC) sia con la miscela di ingredienti capaci di ridurre la quantità di CH liberi. Come si osserva dalla Fig. 2.57 (sx), il secondo mix design non ha avuto effetti negativi dalla stagionatura: comportamento multifessurativo, con rigidezza pari a 28 kJ/m^2 e modulo di rottura (MOR – Modulus Of Rupture) a 23,25 MPa. Questi valori sono in linea con quelli che si sono ottenuti con lo stesso mix design, ma senza essere stato stagionato per 6 mesi nel bagno termale con acqua calda, così come mostra Fig. 2.57 (dx) I provini, invece, con PC mostrano un comportamento con la formazione di una singola fessura e andamento fragile dopo il raggiungimento del picco di tensione. Il confronto tra non stagionato e stagionato è il seguente: valori di rigidezza rispettivamente $18,12 \text{ kJ/m}^2$ e $0,66 \text{ kJ/m}^2$ mentre MOR pari a 21,08 MPa e 6,06 MPa [49].

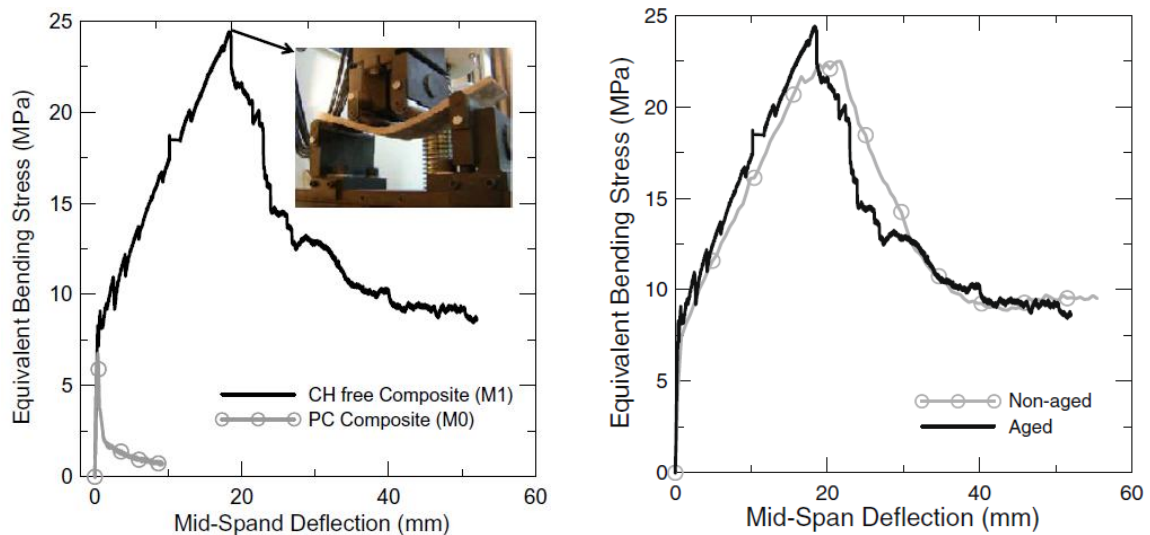


Figura 2.55 - Effetto della stagionatura per provini senza CH e con matrice di PC (sx); confronto tra provino senza CH prima e dopo la stagionatura (dx) [49]

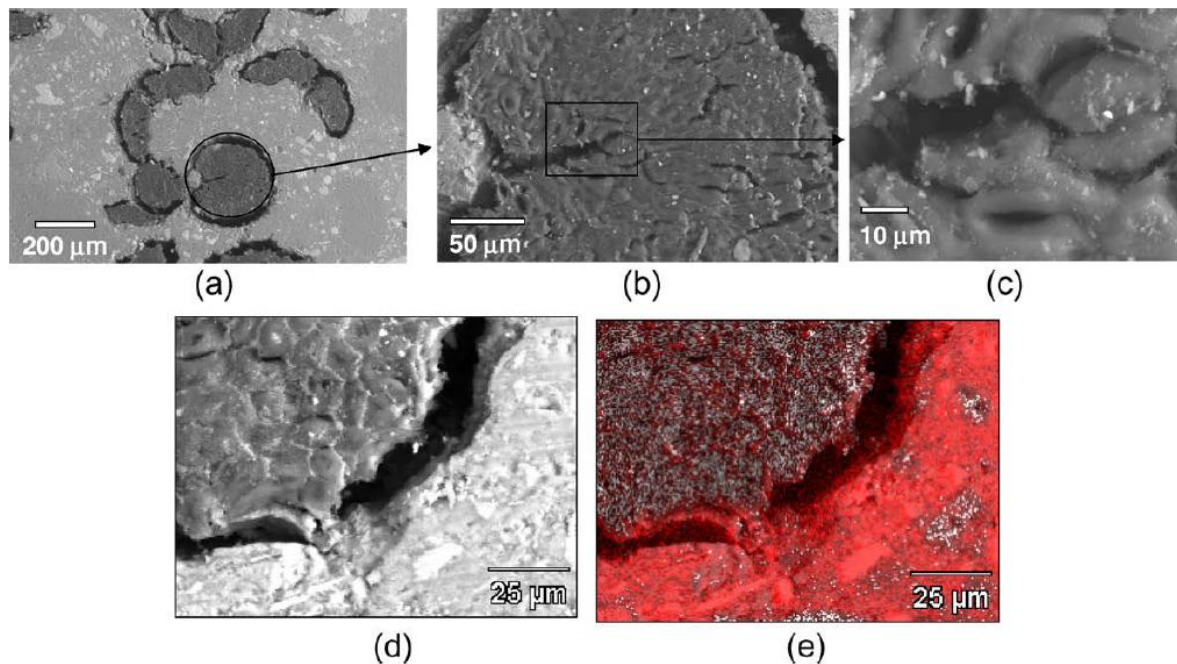
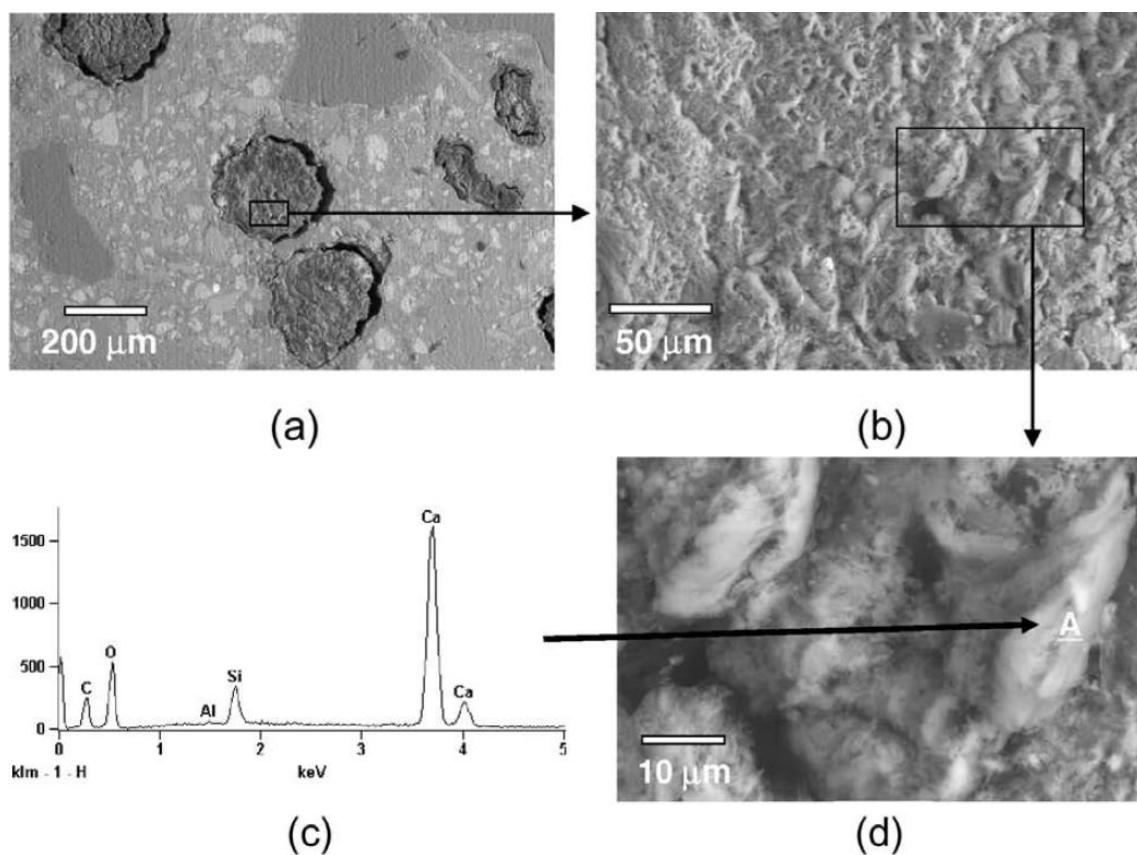


Figura 2.56 - Indagini al microscopio di elementi senza CH: (a) veduta complessiva, (b) fibra di *Sisal*, (c) dettaglio della fibra, (d) EDS mappatura della regione, (e) mappatura di ioni carbonio sull'interfaccia fibra-matrice [46]

Una indagine al microscopio è stata condotta per valutare la composizione e la degradazione delle fibre. La Fig. 2.58 mostra le immagini a microscopio elettronico per provini senza CH stagionati. La struttura della fibra rimane intatta senza particolari evidenze di mineralizzazione (a, b, c). Una indagine spettroscopica era stata condotta sull'interfaccia tra la fibra e la matrice per verificare se c'è stata una mobilitazione di ioni calcio dalla matrice verso la fibra. Con il colore rosso si mostra che la migrazione non è stata significativa, (d, e). L'immagine nella Fig. 2.59 mostra le fibre nella matrice con cemento portland. Si riscontra una notevole mineralizzazione delle fibre di *Sisal* come si

nota nelle immagine (a), (b), (d). L'indagine spettroscopica è stata condotta all'interno della fibra di *Sisal* che mostra una elevata concentrazione di ioni Calcio, Fig. 2.59 (c) e (d). Così come una elevata concentrazione di ioni calcio sono presenti lungo l'interfaccia tra fibra e matrice, Fig. 2.59 (e) (f).

Le analisi della microstruttura mostrano che nei provini con cemento Portland le parete cellulari sono mineralizzate per via dell'elevata concentrazione di ioni calcio sulle loro superfici. Parallelamente, nelle fibre inserite nella matrice senza cemento Portland ma con una miscela di Metacaolino e mattoni calcinati, si registrano irrisoni valori di ioni calcio sulle pareti, così come la fibra non risulta essere deteriorata, [49]. L'aggiunta di MK e CWCCB hanno portato ad una sostenibile caratterizzazione di elementi che siano CH liberi, migliorando la resistenza di formazione di prima fessura e mantenendo la stessa tensione i rottura ultima dopo un periodo di stagionatura accelerato. Queste comporta una soluzione al problema della veloce degradazione delle fibre naturali nei composti a matrici cementizie [49].



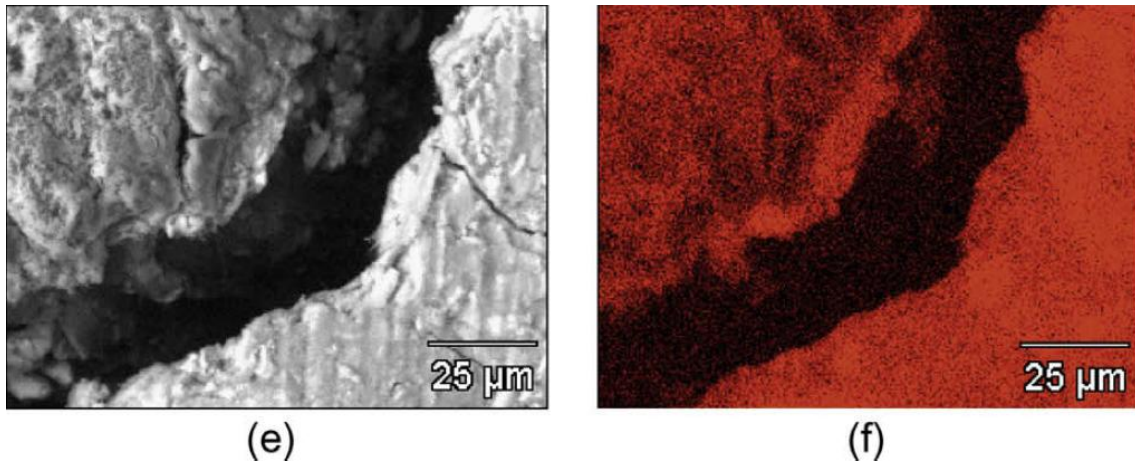


Figura 2. 57 - Immagini SEM per elemento con PC: (a) veduta d'insieme, (b) fibra di *Sisal*, (c) analisi spettroscopica, (d) regione analizzata da EDS, (e) regione mappata EDS, (f) quantificazione degli ioni calcio nell'interfaccia matrice-fibra [49]

Toledo Filho *et al* [46] hanno controllato le prestazioni della durabilità degli stessi composti come prima analizzati però attraverso una esposizione di cicli asciutto-bagnato. Per la situazione di asciutto è stata impiegata una camera con un flusso d'aria controllato meccanicamente (FAFC – Forced Air Flow Chamber), come in Fig. 2.60. Il suo utilizzo è stato giustificato dal fatto che è possibile mantenere controllati i parametri e i valori termogrometrici in maniera tale che possano essere concordi con quelli che si incontrano nelle reali situazioni ambientali esterne. Nello studio condotto la camera climatica è stata impostata con una temperatura di 36 ± 1 °C e vento a $0,5$ m/s. Ricordo come lo studio sia stato condotto abbiano entrambi sede in Brasile, dove tali condizioni possono facilmente verificarsi. Per poter definire la lunghezza d'esposizione, tramite prove di saturazione del provino si è arrivati ad utilizzare un ciclo lungo 3 giorni, di cui 1 in immersione in acqua mentre i restanti 2 giorni dentro la FAFC. Le prestazioni del materiale sono state valutate tramite prove a flessione su 4 punti con uno spostamento della testata applicato con una velocità pari a $0,5$ mm/min. La geometria dei provini è di $400 \times 100 \times 12$ mm dove la freccia analizzata avveniva tramite un trasduttore LVDT.

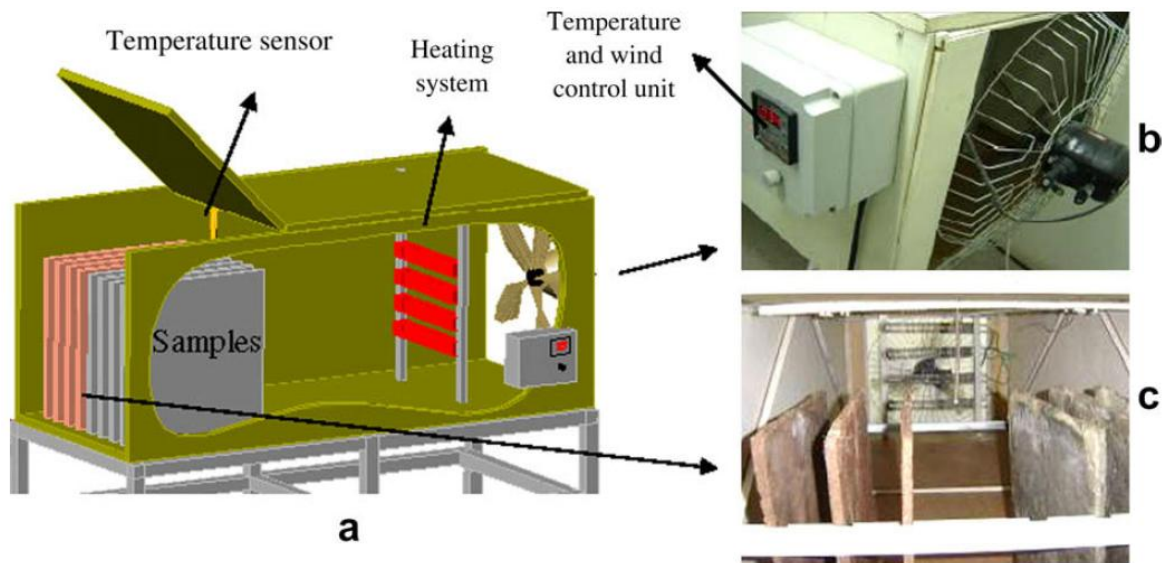


Figura 2. 58 - Forced Air Flow Chamber (FAFC): (a) schema funzionale, (b) unità di controllo dei parametri termoigrometrici, (c) provini durante l'esposizione [46].

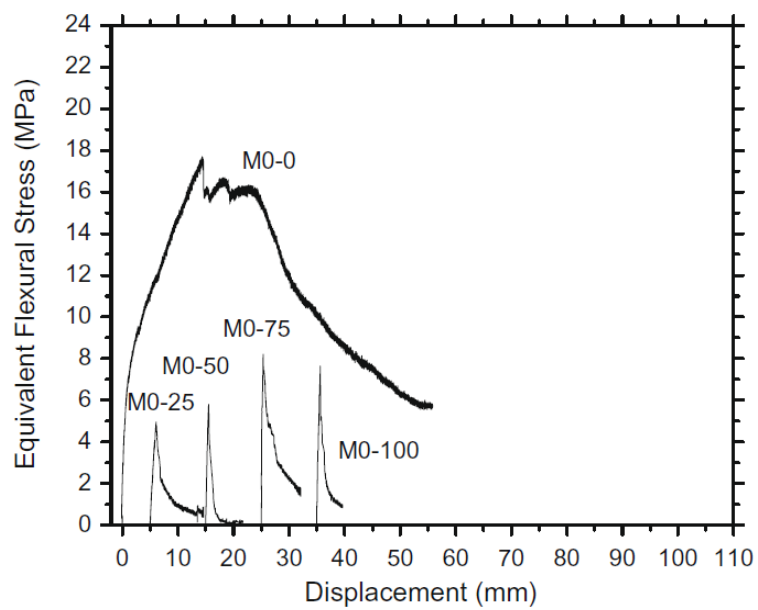
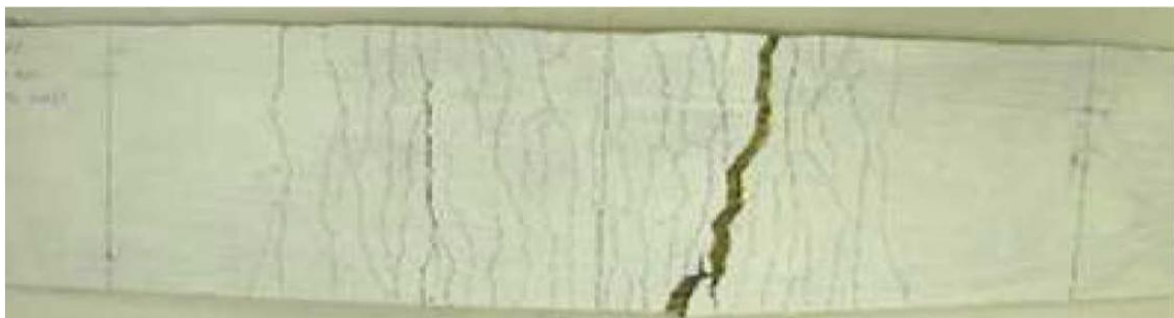


Figura 2. 59 - Andamento del grafico sforzo-spostamento dei provini da zero cicli (M0-0) fino a 100 cicli (M0-100) [46]



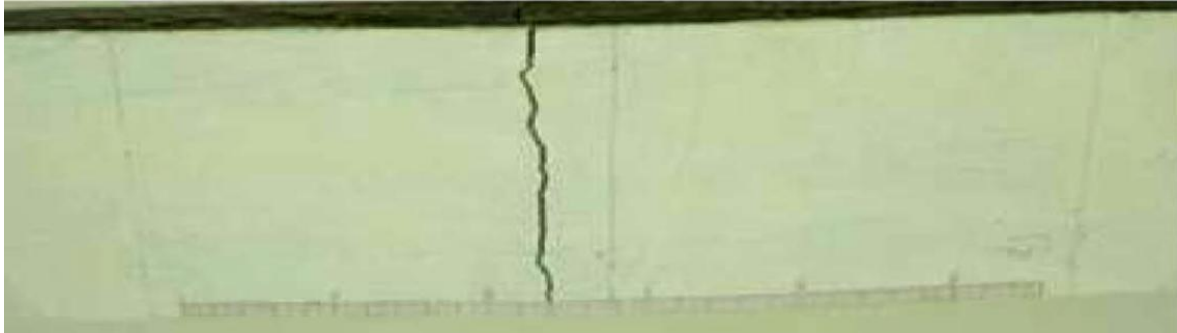


Figura 2.60 - Provini senza cicli wet&dry (in alto), e provini con wet&dry (basso) [46]

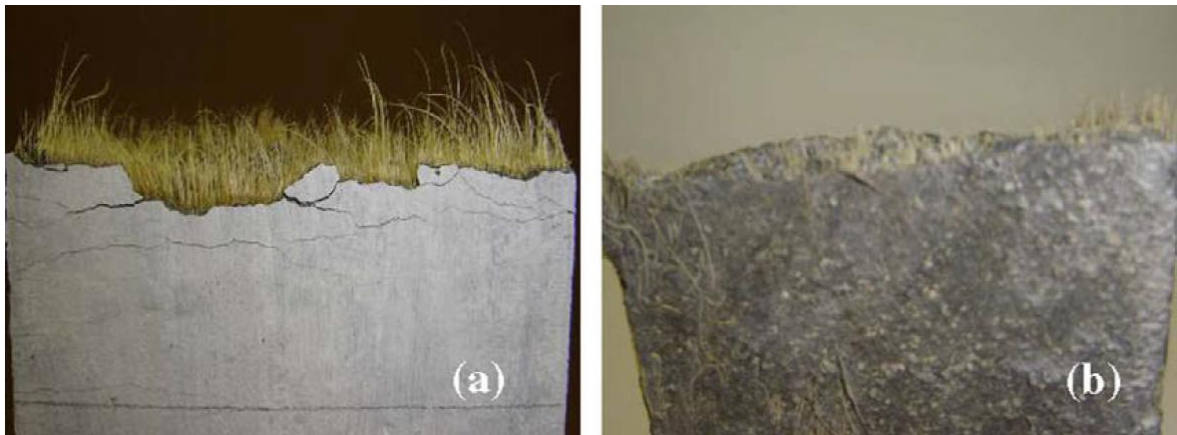


Figura 2.61 - Superficie di frattura per provini non condizionati (a) e dopo 25 cicli (b). Si nota la lunghezza di estrazione delle fibre [46]

La Fig. 2.59 mostra il tipico diagramma sforzo-spostamento ottenuta per i composti di paragone sia senza esposizione in cicli asciutto/bagnato, sia per una quantità di cicli che varia fino al 100. Lo sforzo per la formazione della prima fessura (FCS – First Crack Strength) mostra una decrescita già da minima quantità di cicli asciutto/bagnato. La Fig. 2.62 mostra la fessurazione tipica per componenti con neanche un ciclo (alto) e con 25 cicli di asciutto/bagnato (basso). Si nota facilmente che il composto senza essere stato condizionato si comporta in maniera multifessurativa con andamento *hardening* sotto carichi flettenti, mentre tutti i provini che hanno subito i cicli di asciutto/bagnato mostrano una sola fessura con comportamento fragile. La superficie di rottura mostra lo strappamento delle fibre nelle due condizioni, senza cicli e con 25 cicli. Varie visualizzazioni affermano che si ha una lunghezza delle fibre al pull-out di 63 mm per i provini utilizzati con 25/100 cicli.

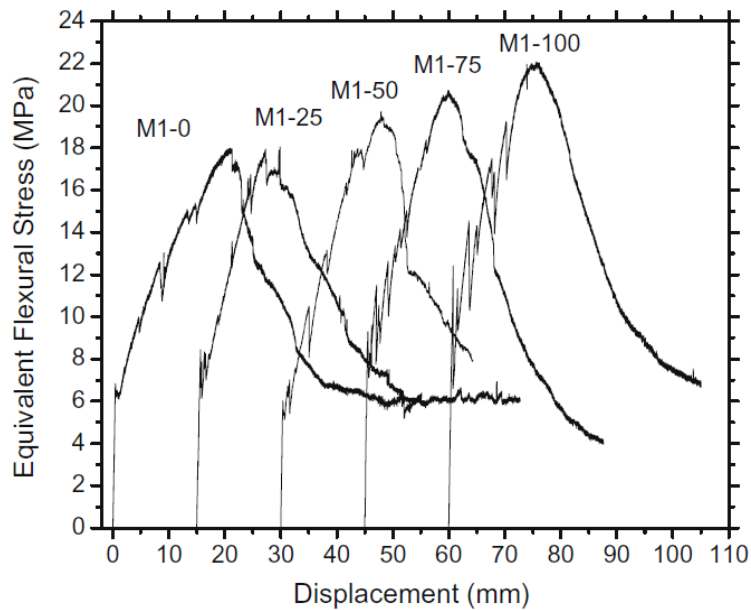


Figura 2. 62 - Andamento dei cicli wet&dry per provini senza CH [46]

La Fig. 2.62 mostra un tipico esempio di diagramma sforzo-spostamento per composti con l'utilizzo di matrice priva di CH dove si nota che la multifessurazione ed il comportamento *hardening* è confermato anche dopo 100 cicli di condizionamento. Inoltre, si nota un aumento della resistenza alla formazione alla prima fessurazione di circa il 65% dopo 100 cicli. I risultati ottenuti indicano come una aumento del valore di FCS si sia registrato in elementi contenente pozzolanica. Questo comportamento può essere correlato ad una duplice azione che combina la mineralizzazione delle fibre di *Sisal* ed un effetto ritardato di reazioni pozzolaniche. La mineralizzazione delle fibre risulta essere incentivata all'aumentare della quantità di CH, che trova una riduzione della sezione omogeneizzata di composti con cemento Portland. Le reazioni pozzolaniche possono inoltre contribuire all'aumento della resistenza alla formazione della prima fessura, in base al fatto che la loro idratazione utilizza i prodotti dell'idratazione del cemento, producendo una idratazione latente e ritardata. La resistenza di picco si registra migliore del 29% all'aumentare dei cicli espositivi. Riguardo al parametro di rigidità flessionale si è notata una lieve riduzione che però rimane nei valori di deviazione standard. Si nota, inoltre, che il tratto post picco mostra una tendenza ad esser più fragile, denotando una pendenza maggiore del tratto al progredire dei cicli espositivi. Questo, stando agli autori, è attribuibile ad una migliore coesione che si instraura tra le fibre e la matrice, anche se le fibre non risultano deteriorate a fine processo.

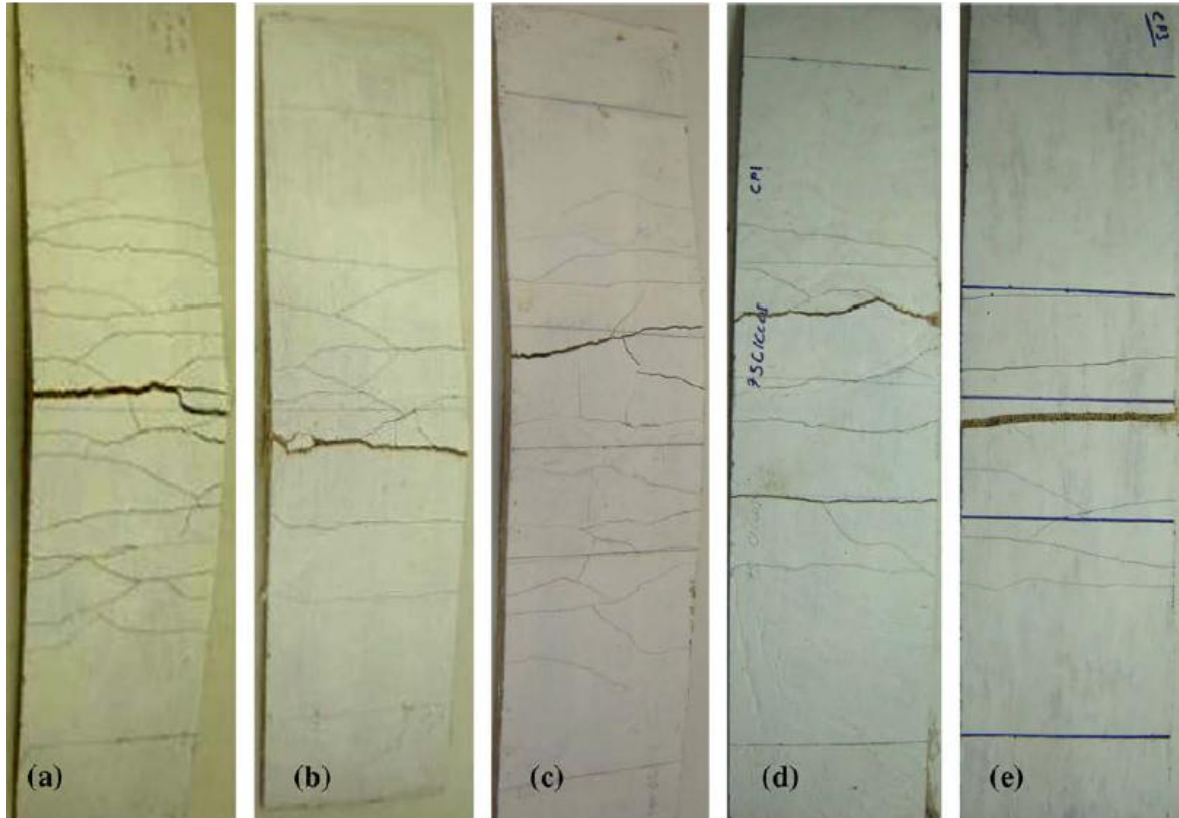


Figura 2. 63 - Fessurazione in provini senza CH, senza cicli wet&dry (a), 25 cicli (b), 50 cicli (c), 75 cicli (d), 100 cicli (e) [46]

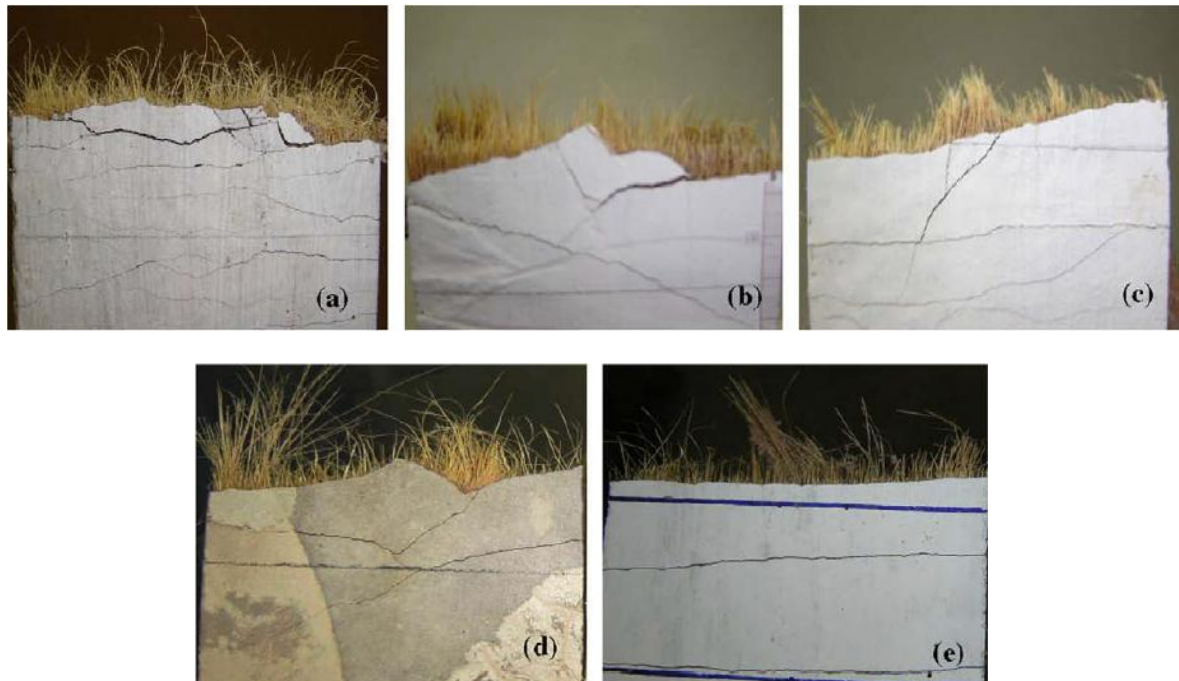


Figura 2. 64 - Superficie di rottura dei provini senza CH, senza wet&dry (a), passando per 25 (b), 50 (c), 75 (d) e 100 cicli (e) [46]

Le Fig. 2.63 e 2.64 mostano la fessurazione avvenuta nei provini privi di CH, si nota come anche a tempi di esposizioni prolungati, la vita delle fibre sia rimasta inalterata, così come mostrato nel suo comportamento flessionale. La flessibilità della fibre era rimasta intatta, così come si è potuto vedere nell'immagine 2.64.

La Fig. 2.73, invece, mostra le analisi al microscopio di composti con cemento Portland dopo 25 cicli di asciutto/bagnato. La cavità presente in (a) e (b) è il risultato dopo aver preparato i provini con le fibre all'analisi. Il risultato indica che le fibre hanno perso la loro resistenza e flessibilità a causa di un'attacco ad opera dell'idrossido di calcio. I segni sono evidenti nella parte (c). Lo stesso comportamento è stato osservato per i successivi cicli di asciutto/bagnato.

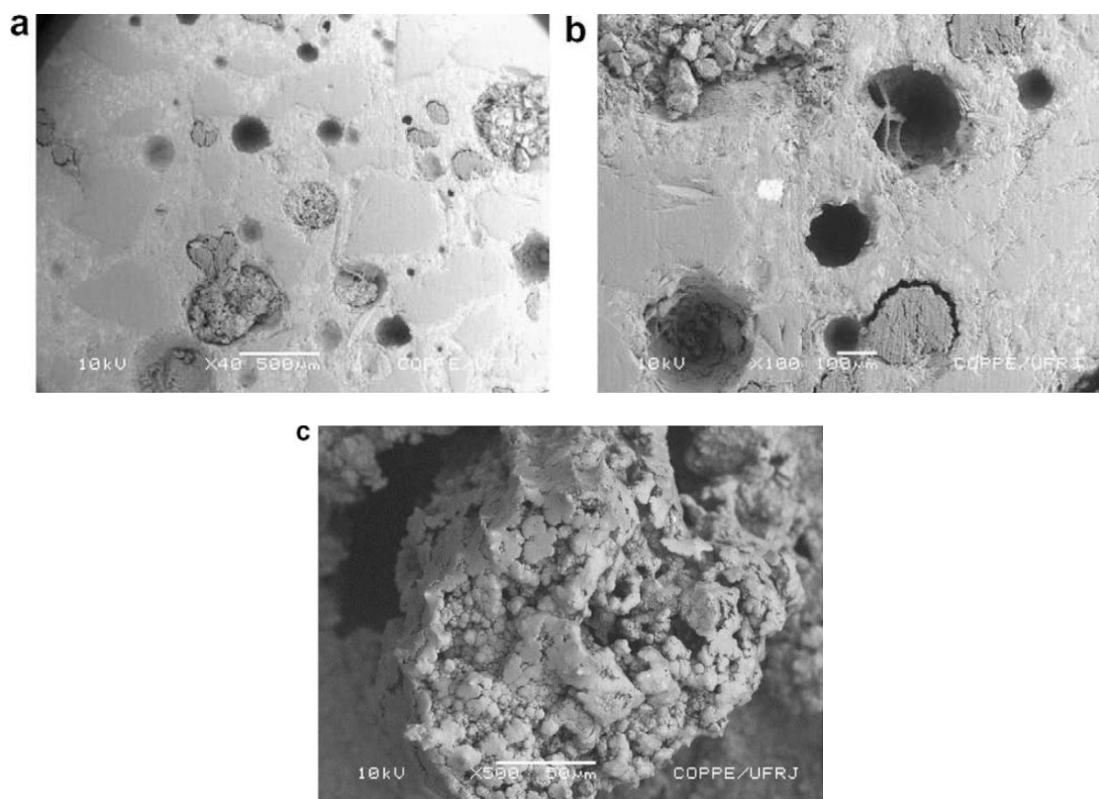


Figura 2. 65 - Immagini al microscopio di elementi cementizi con cemento Portland (a) visione d'insieme, (b) inquadratura della fibra, (c) ingrandimento della fibra.

CAPITOLO 3: SELF-HEALING IN MATERIALI CEMENTIZI

3.1 Cos'è il Self-healing?

Un piccolo taglio sul dito viene “trattato” applicando un cerotto. L'applicazione del cerotto, tuttavia, è solamente una piccola protezione che ha lo scopo di lasciare il corpo indisturbato a lavorare per riparare il danno diminuendo le interferenze con l'ambiente esterno. Il corpo, successivamente, lavora per ripristinare le originali funzioni della parte danneggiata e deteriorata: un vasto insieme di elementi concorrono in tale processo che porta alla chiusura della ferita, alla sua cicatrizzazione e al successivo ripristino delle capacità originali. Tale processo, che è comune per piante e animali, non è di solito fatto riscontro nei materiali prodotti dall'uomo. La scienza del self-healing dei materiali si pone come obiettivo quello di assottigliare la differenza di comportamento tra questi due tipi di materiali.

Il danno può verificarsi quando il carico supera il limite di resistenza del materiale oppure quando il limite di resistenza del materiale viene ridotto a causa di un degrado ambientale. A danno avvenuto segue la riduzione di prestazione del materiale, e ciò comporta la diminuzione delle capacità di resistere ad azioni future, nonché il peggioramento della prestazione del materiale. La perdita di capacità resistente deve essere ripristinata per mantenere la struttura al suo livello di prestazione prestabilito: se il ripristino è avvenuto tramite il materiale in sé, allora si parla di self-healing. Se altrimenti c'è bisogno di un intervento esterno (umano) si parla di “riparazione”.

Una commissione tecnica del Japan Concrete Institute ha studiato l'argomento del self-healing in maniera estesa e ha pubblicato nel 2009 un resoconto dello stato dell'arte su questa materia [50]. La cura autogena è un fenomeno comune visto nel corpo umano. Danni o ferite sono curate automaticamente senza alcun serio intervento. Tale funzione curante è anch'essa fatta riscontro in materiali cementizi. Il calcestruzzo è un materiale con una lunga storia e il fenomeno del self-healing autogeno, benché noto da tempo, non è stato ancora ben quantitativamente e qualitativamente appreso, così come le limitazioni e i potenziali benefici. Ci sono diversi approcci al recupero autogeno del calcestruzzo e possono essere divisi in diversi gruppi in base al loro principale meccanismo di ripristino. Per dare un'visione più chiara e più ampia, la commissione tecnica ha proposto una chiarificazione in termini attraverso un diagramma di Venn, come mostrato in Fig. 3.1.

Si considera **U** come l'intero insieme di tutte le migliorie che possono avvenire nel calcestruzzo danneggiato. Questo miglioramento non sta a significare il completo recupero del calcestruzzo danneggiato. Fintanto che una certa caratteristica è migliorata dopo l'avvenuta cura, la funzione cura è inclusa nell'insieme **U**. Ne segue che se una proprietà migliora dopo il meccanismo di cura, come per esempio la permeabilità, le altre non è necessariamente detto che migliorino.

Si prendono due sottoinsiemi **X** e **Y** che rappresentano due meccanismi principali di self-healing all'interno dell'insieme **U**. Usando gli insiemi e il diagramma di Venn, ogni termine tecnico è definito come segue:

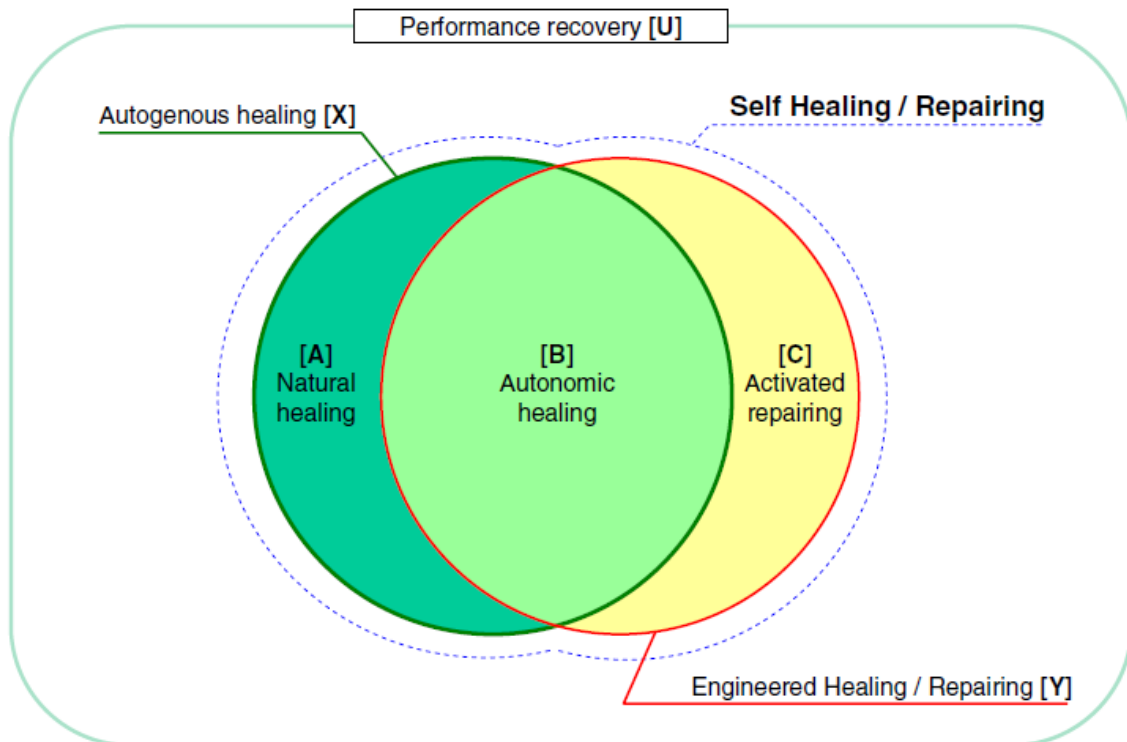


Figura 3 1 Diagramma di Venn in accordo con JCI-TB075 [50]

- X** Healing Autogeno: il naturale processo di riempimento e chiusura delle fessure senza intervento esterno alcuno.
- Y** Healing ingegnerizzato / Ripristino: metodo artificiale e intenzionale indirizzato a riempire e chiudere le fessure. I materiali o dispositivi curanti sono introdotti in anticipo nel materiale.
- X ∪ Y** Self-healing / Ripristino: processo di riempimento e chiusura delle fessure che avviene automaticamente in situ, senza l'intervento pratico dell'uomo.
- [A] = X ∩ Y^c** Healing naturale: fenomeno naturale di chiusura e riempimento delle fessure come prodotto di reazioni chimiche (idratazione ritardata, carbonatazione, ecc.) oppure di chiusura meccanica (scorie e detriti). I prodotti di reazione sono funzioni intrinseche del calcestruzzo.
- [B] = X ∩ Y** Healing Autonomico: fenomeno di guarigione involontario. Particolari aggiunte come fly ash e agenti espansivi sono inizialmente incorporati nella miscela.
- [C] = X^c ∩ Y** Ripristino da attivazione: ripristino automatico derivato dall'uso di qualche sensore e attuatore. La funzione di guarigione è data da diverse sostanze che derivano dal calcestruzzo originario. Questo può essere

considerato come “materiale intelligente” oppure “smart system” per le strutture in calcestruzzo.

(X ∪ Y)^c Riparazione: ripristino generale che ha bisogno di lavoro pratico da parte di lavoratori e trattato in situ.

Esempi di approcci o metodi usati fino a questo momento per la funzione di healing sono dati dalla Tabella 3.1. Si trovano numerosi approcci in [C] = X^c∩Y, mentre in [A] = X∩Y^c ce ne sono in minor quantità.

Insieme	Terminologia	Esempi	Evoluzione del meccanismo
[A]	Healing Naturale	Idratazione ritardata Carbonatazione / precipitazione di prodotti chimici	Potenziabile
[B]	Healing Autonomico	Reazioni pozzolaniche di polveri ECC con polveri Speciali agenti espansivi	
[C]	Ripristino da attivazione	Micro capsule Materiale curante in pipette dentro il calcestruzzo Uso di dispositivi di ripristino della forma Combinazione di dispositivi con tecniche di controllo	Ingegnerizzato

Tabella 3.1 - Elenco degli elementi raffigurati in Fig. 3.1 [50]

Successivamente, i termini sono stati in ulteriore analisi discussi da una commissione tecnica della RILEM [51], le cui conclusioni vengono di seguito riportate. Uno tra gli obiettivi della commissione è stato quello di semplificare la visione e le definizioni da parte dallo State of Art della commissione giapponese.

- Self-healing: qualunque processo compiuto dal materiale che coinvolge il recupero e quindi il miglioramento della prestazione del materiale dopo un’azione che riduce tale prestazione
 - Autogeno: il self-healing è autogeno quando il processo di recupero usa componenti del materiale stesso, anche se il materiale non è stato progettato per soddisfare il self-healing (materiali di uso generico)
 - Autonomico: il self-healing è autonomico quando il processo di recupero usa componenti che normalmente non si dovrebbero riscontrare in quel tipo di materiale (aggiunte ingegnerizzate). Le aggiunte sono proprio indirizzate ad implementare il processo di self-healing.

Il lavoro della commissione tecnica della RILEM ha quindi cercato di evitare problematiche interpretative in un campo di ricerca che si sta sviluppando in questi anni. Per la commissione tecnica della RILEM, l'aggiunta intenzionale di cemento nel mix design per aumentare la quantità di grani non idratati rimane nella categoria del self-healing autogeno. Per quanto riguarda la terminologia usata dalla JCI, l'aggiunta intenzionale di cemento sposta il tipo di self-healing da naturale ad un self-healing autonomo. La commissione RILEM ha pensato che ciò avrebbe ulteriormente complicato la problematica interpretativa dei termini [51].

3.2 Perché il Self-healing nei materiali cementizi?

La rapida crescita della popolazione mondiale e il boom economico di paesi emergenti sono due delle principali ragioni per un aumento della domanda di edifici e infrastrutture. Per rispondere a questi nuovi bisogni è richiesto l'uso di una grande quantità di risorse, materiali ed energia. La questione adesso è quella di cercare di rispondere ai nostri bisogni, senza però compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni. La bassa qualità nei materiali usati nella realizzazione di edifici e infrastrutture può portare ad una richiesta di manutenzione prematura. Questo problema coinvolge anche le strutture dove si sono utilizzati materiali di alta qualità: il deterioramento nel tempo avviene a prescindere dal tipo di materiale utilizzato. Risulta quindi una sfida importante quella di realizzare materiali in grado di contrastare il deterioramento nel tempo in modo del tutto autonomo. Questo estenderebbe la vita utile di una struttura, mitigando quindi la pressante richiesta di materiale e risorse che possono essere utilizzate per le nuove costruzioni [67].

Accanto alla scarsità dei materiali, ci si pone un'ulteriore problematica di tipo ecologica: le emissioni di gas serra. Si stima che si produce circa una tonnellata di CO₂ per ogni tonnellata di cemento Portland prodotto. La domanda annuale di calcestruzzo ha raggiunto valori da 0.5 a 1.0 m³ pro capite [51]. Nel Regno Unito si è stimato che l'industria delle costruzioni e delle opere civili è responsabile della produzione del 50% di CO₂ [52]. Il settore delle costruzioni consuma una grande quantità di energia e risorse, la produzione industriale di cemento è responsabile del 5 ÷ 8 % dell'emissione globale di CO₂. Vista la rapida crescita di Cina, India e altri paesi in via di sviluppo, la quantità di emissioni è prevista in crescita [76]. Accanto ad una tematica ambientale, si affianca una economica. Si è stimato che su 600.000 ponti negli Stati Uniti uno su quattro ha bisogno di seri interventi manutentivi e di ammodernamento [52]. Nei Paesi Bassi, invece, il 50% dei viadotti, condotti, ponti e tunnel necessita di ulteriori analisi strutturali per valutare la capacità portate degli elementi nel loro stato attuale. Accanto a questi che possono essere definiti costi diretti di manutenzione e riammodernamento, viaggiano di pari passo costi

indiretti. Tali sono le derivazioni dovuti a ritardi, ingorghi nel traffico, interruzioni di servizi e deficitazioni nel normale svolgimento delle attività lavorative [52]. Non sono facili da stimare, ma van Breugel dichiara che possono addirittura essere 10 volte maggiori quelli diretti (il 30 ÷ 50% del traffico nei paesi industrializzati è dovuto ad attività legate alle costruzioni).

I passi da compiere nell'industria delle costruzioni possono quindi essere così riassunti:

- Ridurre il consumo di risorse
- Preferire l'uso di risorse, energia e materiali, rinnovabili
- Ottimizzare il ciclo vita delle strutture, utilizzando materiali affidabili e facilmente riparabili
- Ridurre i costi di manutenzione aumentando la vita di servizio delle strutture

Lo spunto preso dalla scienza dei materiali è quello dello sviluppo di un materiale proattivo nel degrado dovuto all'invecchiamento e alla perdita di prestazione [52]. Usando materiali con capacità autoriparante, è possibile estendere la vita utile degli edifici e delle infrastrutture, andando a ridurre nel contempo i costi e gli interventi manutentivi. La richiesta di risorse materiali ed energia viene quindi ridotta grazie ad una riduzione nella domanda di nuovi edifici, così come una minor richiesta di interventi di manutenzione.

3.2.1 Bilancio di emissioni e sostenibilità

L'intrinseca capacità autoriparante del calcestruzzo aumenta all'aumentare della quantità di cemento nell'impasto, quindi al diminuire del rapporto acqua/cemento. Da questo punto di vista, le infrastrutture con maggiore contenuto di cemento al loro interno hanno una maggior tendenza ad attivare processi di self-healing rispetto a quelli che presentano un contenuto di cemento non idratato minore [52]. Dal punto di vista della sostenibilità, è preferibile limitare l'utilizzo di cemento, senza dover aggiungere alla miscela quantità di cemento maggiori di quelle che bisognerebbe avere per soddisfare strutturalmente i requisiti prestazionali [76]. A questo punto si instaura un compromesso: con meno cemento nella matrice, si produce meno CO₂, ma si riduce al tempo stesso la capacità di autoripararsi. "Se le miscele con poca quantità di cemento sono richieste per caratteristiche di sostenibilità, di conseguenza, il self-healing dovrebbe essere realizzato preferibilmente attraverso il self-healing *ingegnerizzato*" [52].

3.2.2 Gestione del danno

3.2.2.1 Damage Prevention Paradigm - DPP

La resistenza di un materiale, nella concezione più ampia del termine, è la capacità di sostenere un danno senza disintegrarsi e formare nuove superfici. La tecnologia si è

spesso spinta nella direzione di creare e sviluppare nuovi materiali che riescano a resistere a livelli di sollecitazione sempre più elevate, lavorando sull'aumento della resistenza e/o della rigidità del materiale. La visione attuale nella realizzazione di nuovi materiali è quella che prevede un maggior innalzamento della resistenza, lavorando sulla posticipazione del danno. Sono introdotti nel mercato quindi materiali che vengono definiti ad "alta resistenza" arrivando anche a quelli ad "ultra resistenza". Si tenta quindi di ritardare la formazione del danno, migliorando le prestazioni meccaniche. Tale visione progettuale viene identificata come "Damage Prevention Paradigm" [52]. I materiali cementizi sono ottimi per resistere a sforzi di compressione: calcestruzzi normali sono in grado di resistere a tensioni da 20 a 60 MPa. Usando un basso rapporto acqua/cemento, la resistenza a compressione può arrivare fino a valori di 150 ÷ 200 MPa. Materiali cementizi sono stati prodotti fino al punto di avere una resistenza a compressione pari a 800 MPa [52]. La natura del calcestruzzo fa sì che la sua resistenza a trazione sia decisamente inferiore a quella a compressione. Di fatto, il calcestruzzo è un materiale fragile che presenta la formazione di microfessure lungo tutto la sua estensione prima ancora di applicare qualsiasi tipo di carico. Tant'è che la formazione di fessure nel calcestruzzo è un fenomeno accettato fintanto che la loro ampiezza non ecceda un valore limite. Tale caratteristica è inerente agli elementi strutturali in calcestruzzo e non è considerata una forma di danno. Fessure troppo grandi possono ridurre la capacità di resistere alla corrosione delle armature, e questa è una delle principali forme di degrado della struttura in calcestruzzo [57]. Anche se quasi impossibili da evitare, le microfessure non presentano una minaccia all'integrità del calcestruzzo stesso. Ovviamente, il fatto che sia *accettato* non significa che sia *desiderabile*. Le microfessure soprattutto, se collegate assieme a formare una lunga connessione, possono mettere a rischio il calcestruzzo poiché si riduce la tenuta dell'elemento allo scambio di sostanze con l'ambiente esterno. Il calcestruzzo quindi può deteriorare più velocemente, portando ad un degrado prematuro. Le microfessure, malgrado non si pongano come problema riguardo alla *sicurezza*, rimangono indesiderabili da un punto di vista *funzionale* e di durabilità, senza considerare la perdita *estetica* dovuta alla loro presenza [52].

3.2.2.1 Damage Control Paradigm - DCP

Accanto al "Damage Prevention Paradigm" appena visto, si propone la filosofia costruttiva del "Damage Control Paradigm". Questa via di costruire identifica la formazione del danno, o la degradazione del materiale, come il punto di partenza da cui si instaurano i processi di auto-guarigione e auto-riparazione intrinseci del materiale. Siccome la formazione di fessure, anche se di micro dimensioni, è difficilmente contrastabile in elementi cementizi, tali strutture si prestano bene a questa filosofia di costruire.

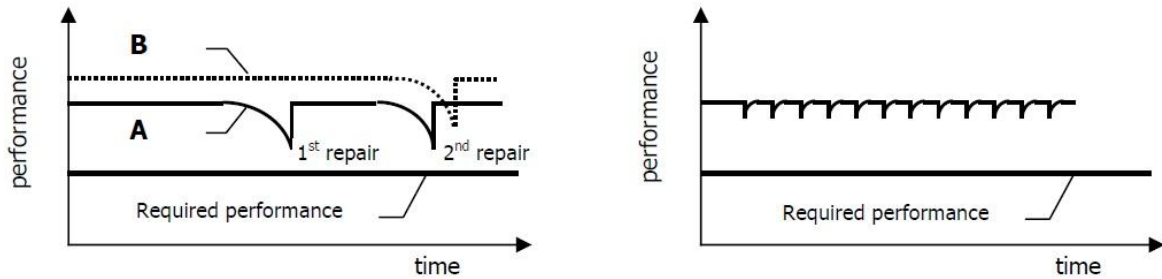


Figura 3.2 SX: struttura con DPP con materiale bassa qualità (A) e alta qualità (B) [52]
DX: struttura con DCP con material con Self-healing [52]

In Fig. 3.2 sono messi a confronto i due paradigmi costruttivi: a sinistra il Damage Prevention (DPP) con materiale di bassa qualità (curva A) e alta qualità (curva B), mentre a destra il Damage Control (DCP). Nel DPP una vita utile della struttura può essere ottenuta attraverso l'impiego di un materiale con qualità migliori, come per esempio migliorando la resistenza e diminuendo la permeabilità. Il deterioramento si verifica più lentamente ritardando la necessità della prima opera manutentiva. Comunque sia, alla formazione del primo danno, il tasso di degrado è relativamente alto e l'intervento di manutenzione sarà subito necessario. Al contrario nel DCP, la formazione del primo danno porta all'attivazione della funzione auto-riparante e auto-guarente del materiale. Ciò consente al materiale di tornare ai livelli di prestazione attesi prima della formazione del danno [52].

Schematicamente, la Figura 3.3 riporta anche un paragone economico sui due paradigmi costruttivi.

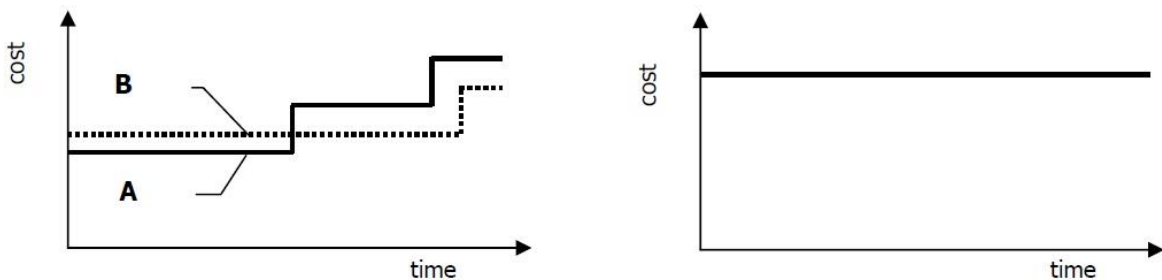


Figura 3.3: SX: DPP costi nel tempo in base al numero di manutenzioni [52]
DX: DCP costi nel tempo con materiale self-healing (senza interessi e inflazioni) [52]

Nella figura di sinistra si mostra l'aumento del costo nel tempo di due strutture realizzate con materiale di bassa qualità (curva A) e alta qualità (curva B), entrambe realizzate con Damage Prevention Paradigm. In quella di destra si mostra il costo nel tempo di un materiale con capacità auto-riparanti in funzione del tempo, costruito secondo il

paradigma di Damage Control. Anche se schematico, il paragone dei due sistemi di costruzione mostra come un costo iniziale più elevato può a lungo termine essere vantaggioso in termini economici [51, 52, 76]. In questa categorizzazione non sono stati considerati i costi indiretti, che se sommati, avrebbero comunque dato ragione ad usare il DCP. Nella figura di destra, è schematizzato un *ideale* materiale auto-riparante, poiché la potenziale auto-guarigione e auto-ripristino sarà limitato. Van Breugel indica con non realistico il fatto che per costruzioni realizzate con materiali auto-riparanti secondo il DCP siano del tutto superflui ispezioni, monitoraggio e manutenzione [52]. Comunque sia, il mondo delle costruzioni può già iniziare a beneficiare di questi aspetti: se il tempo senza necessità di manutenzione e il momento della prima riparazione è posticipato, allora si ha comunque un guadagno, sia in termini economici sia in termini ecologici [76].

3.3 Come avviene il Self-healing?

3.3.1 Chiusura della fessura

Il fenomeno di chiusura di fessura autogeno viene attribuito a due principali fenomeni: la precipitazione del carbonato di calcio CaCO_3 e l'idratazione continuata della pasta cementizia. Il secondo fenomeno necessita di acqua all'interno della fessura, il primo di acqua e CO_2 . Tale testimonianza è stata ampiamente esplicitata nella letteratura. Edvardsen indica con la precipitazione del carbonato di calcio il solo fenomeno di chiusura di fessura [53]. La Fig 3.3 ne raffigura il risultato.

La precipitazione del carbonato di calcio è un processo chimico governato principalmente da quattro fattori:

- la concentrazione di calcio
- la concentrazione di anidride carbonica dissolta
- il pH nell'acqua
- la presenza e la disponibilità di siti di nucleazione

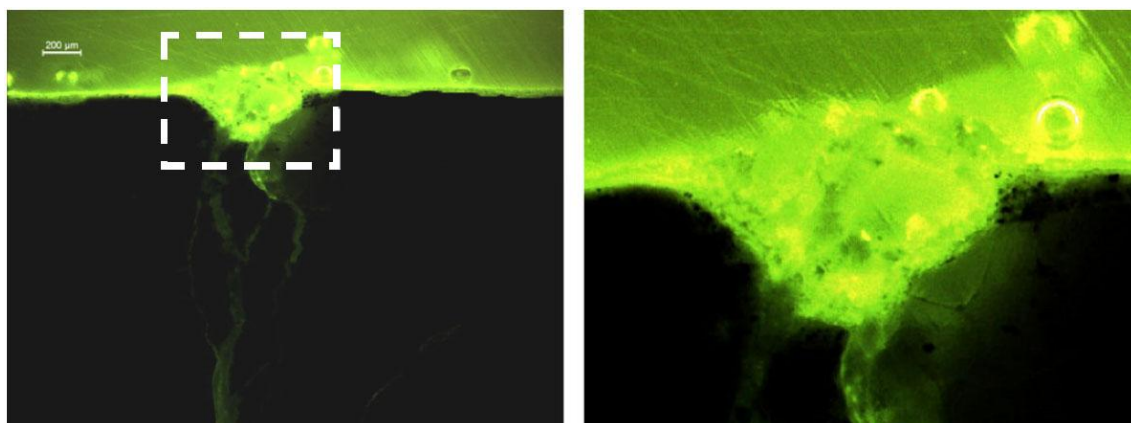
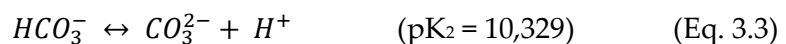
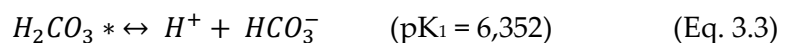
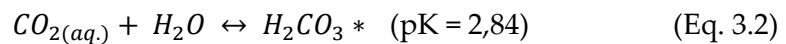
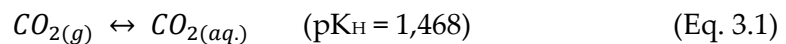


Figura 3 2 Precipitazione di carbonato di calcio [54]

Edvardsen [53] ha condotto un esaustivo studio sulla precipitazione e formazione del carbonato di calcio come prodotto del self-healing autogeno del calcestruzzo attraverso la misura della riduzione del flusso d'acqua passante attraverso una fessura. Il sistema di riferimento al quale si deve la formazione di prodotti del self-healing è composto da tre parti coinvolte nel processo: calcestruzzo – acqua – fessura.

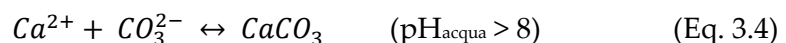
- nel calcestruzzo si ha rilascio di ioni calcio da parte della matrice cementizia
- in acqua si ha dissoluzione di ioni carbonato da parte dell'anidride carbonica CO₂ disciolta in acqua

La presenza degli ioni carbonato CO₃²⁻ dipende principalmente dal pH della soluzione acquosa e dalla concentrazione del carbonio inorganico disciolto in acqua (DIC – dissolved inorganic carbon). Quest'ultima dipende da diversi fattori ambientali, tra i quali: temperatura, salinità, e pressione parziale di CO₂. Le reazioni di equilibrio e le costanti che governano la dissoluzione di CO₂ in acqua (25° C e 1 atmosfera) sono le seguenti:



con $H_2CO_3^* = CO_{2(aq)} + H_2CO_3$ [51].

La precipitazione e il deposito dei cristalli di carbonato di calcio CaCO₃ dipendono soprattutto dall'indice di saturazione Ω della calcite come rapporto tra la concentrazione di ioni e la costante di solubilità. Una volta superato il limite di saturazione, si ha precipitazione del composto seguendo le successive relazioni:



Analisi termodinamiche hanno concluso [53] che si hanno circostanze più favorevoli alla precipitazione dei cristalli come segue:

- aumento della temperatura dell'acqua
- aumento del valore di pH nell'acqua
- riduzione della pressione parziale di CO₂ nell'acqua

Le condizioni più favorevoli allo sviluppo di precipitati sono di conseguenza un alto valore di pH e un'alta concentrazione di ioni Ca²⁺. Queste due condizioni sono meglio realizzabili nell'area di contatto tra la pasta cementizia indurita e l'acqua passante nella fessura rispetto alle condizioni di contorno che si hanno nell'area a contatto tra aggregato e acqua. Quando CO₂ dissolta in acqua penetra la pasta di cemento indurita andrà a dissolvere ulteriori ioni carbonio inizialmente da Ca(OH)₂ e successivamente dal CSH. Così facendo, il pH dell'acqua che normalmente ha valori da 5.5 a 7.5, subirà un aumento.

Quello che si nota in Fig. 3.4 [54], schematizzando ciò che è stato osservato mediante indagini al microscopio con luce polarizzata e indagini petrografiche, è la formazione di carbonato di calcio lungo il percorso della fessura. La precipitazione e la formazione di carbonato di calcio è stata inoltre osservata all'interno della fessura stessa, seppur in quantità limitata: l'acqua calandosi nella fessura riesce a reagire con entrambi i lembi producendo cristalli al suo interno. Malgrado questo, la formazione di cristalli più evidente è quella che si verifica sulla bocca della fessura. Questo è dovuto alla differenza di concentrazione di ioni reagenti, come schematicamente indicato in Fig.3.5. L'acqua nella fessura contiene un'alta concentrazione di ioni carbonio, mentre al di fuori della zona fessurata la sua concentrazione è minore a causa di una maggior diluizione. L'altra parte dei reagenti, gli ioni carbonato CO₃²⁻ e bicarbonato HCO₃⁻ vengono rilasciati in quantità minime dalla matrice e quindi è l'acqua la principale fonte di questi ioni. La concentrazione degli ioni carbonato e bicarbonato sarebbe al massimo uguale a quella contenuta in acqua. Il punto di incontro tra le due zone a concentrazione maggiore è quindi la bocca della fessura, a contatto sia con una maggior quantità di acqua esterna, sia con quella dentro la fessura. Quello è il luogo quindi che è presente la maggior concentrazione di ioni, ed è quindi lì che si verifica la precipitazione del carbonato di calcio [54].

L'effetto che avviene in contemporanea alla precipitazione è quello del rigonfiamento della matrice cementizia tramite idratazione ritardata della pasta cementizia [55]. Se la fessura è di piccole dimensioni e in situazioni dove si utilizzano calcestruzzi a controllo

fessurativo tipo ECCs, HPFRCCs, si può arrivare a chiusura completa della fessura e ad un successivo recupero delle capacità meccaniche.

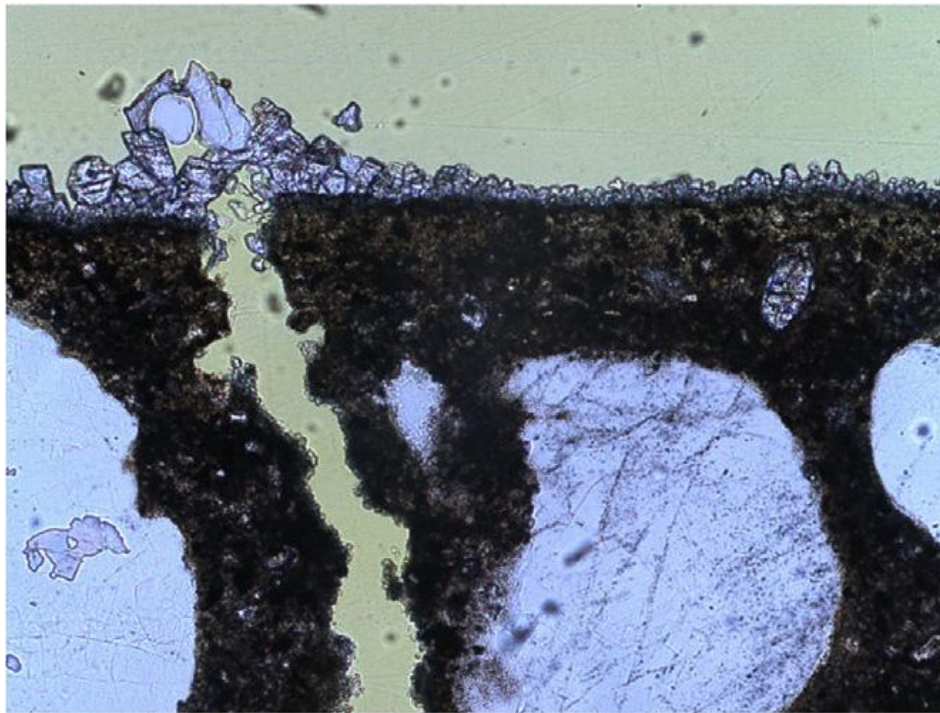


Figura 3 3 Formazione e nucleazione di carbonato di calcio [55]

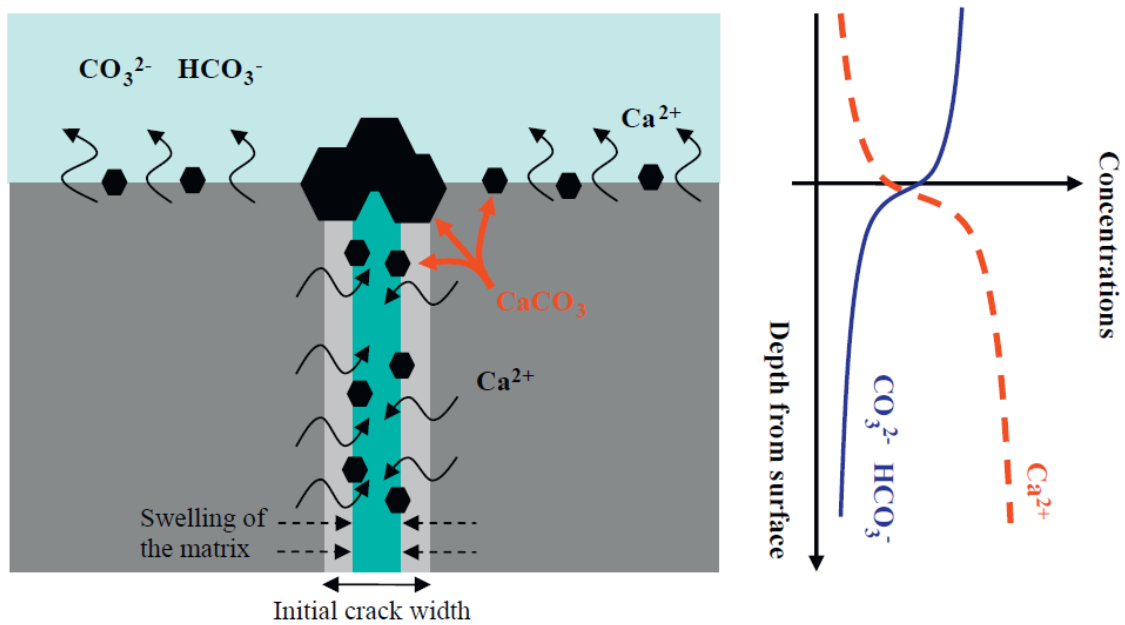


Figura 3 4 Schematizzazione della precipitazione del carbonato di calcio [55]

3.3.2 Recupero meccanico

Accanto al fenomeno della precipitazione del carbonato di calcio, un altro fenomeno che si verifica è l'idratazione continuata della pasta cementizia. Yang [56] notò che provini fessurati, anche a seguito di un adeguato self-healing, tendevano a ripresentare le stesse fessure piuttosto che formarne altre quando venivano posti sotto sforzo. Questo è principalmente dovuto alla natura del carbonato di calcio, molto più fragile dei prodotti di idratazione, come il CSH. Tuttavia, si è fatto riscontro in più situazioni, sempre riportate da Yang [56, 59], che il comportamento in particolari casi può portare ad un completo recupero delle proprietà meccaniche, dopo il periodo di cura, con formazione di nuove fessure anziché ampliamento di quelle già esistenti. Fig. 3.6. La RILEM [51] spiega che "dopo che si è formata la prima fessura, l'energia che serve per ingrandirla è maggiore di quella che serve per formare una nuova fessura".

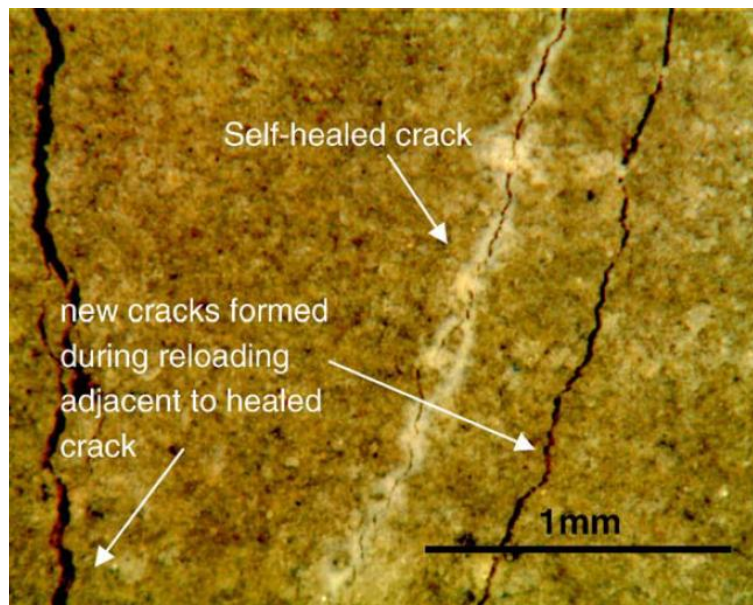
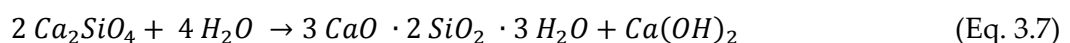
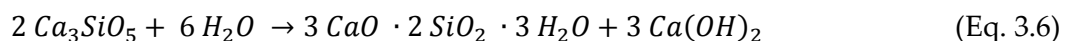


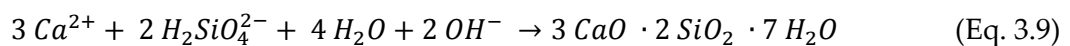
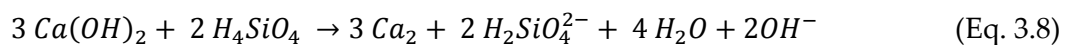
Figura 3 5: nuove fessure formatesi dopo il periodo di cura. Da notare i prodotti bianchi del self-healing sulla fessura curata, mentre quelle nuove non presentano nulla. [56]

Il recupero delle capacità meccaniche del calcestruzzo danneggiato avviene in maniera autogenica attraverso la formazione e la produzione di C-S-H (calcio silicato idratato), un prodotto dell'idratazione del cemento che fornisce resistenza alla pasta cementizia idratata [51]. La produzione del gel C-S-H si verifica quando l'alite (C_3S) e la belite (C_2S) reagiscono con l'acqua per formare il C-S-H e l'idrossido di calcio (CH / portlandite). Le equazioni sono le seguenti:



Siccome l'alite contiene una quantità maggiore di calcio reattivo, essa reagisce più rapidamente e quindi fornisce la resistenza iniziale, mentre la belite reagisce più lentamente e fornisce la resistenza più avanti nel tempo [58]. Durante il processo di idratazione alcuni grani di cemento non reagiscono e rimangono anidri. Il risultato è quindi un naturale incapsulamento di materiale reattivo più o meno uniformemente disperso nella matrice [51]. Durante la fase fessurativa del calcestruzzo, queste particelle vengono esposte, e successivamente esse possono entrare in contatto con agenti esterni, come l'acqua per esempio. Quando ciò accade, allora il processo di idratazione prende di nuovo atto e si ha una espansione volumetrica.

L'idratazione ritardata di particelle di cemento non reagito è presente in tutti i leganti a base di cemento Portland. Per materiali che contengano una quantità significati di aggiunte di materiale alluminosilicato, come per esempio cenere volante, loppa di altoforno, fumo di silice, la reazione pozzolanica può inoltre fornire un maggiore contributo alla capacità di self-healing del materiale. In ambienti alcalini, le specie silicate possono dissolversi dal materiale pozzolanico per creare acido silicico (H_4SiO_4 / SH). L'acido silicico può reagire con la portlandite dissolta, e il quale risultato è la formazione di C-S-H e acqua:



Il C-S-H così prodotto durante la reazione pozzolanica può curare piccole fessure nella stessa maniera come avviene normalmente durante la produzione di C-S-H dalla reazione di idratazione di cemento non idratato [51].

Siccome il tasso di reazioni pozzolaniche viaggia di pari passo con il valore di pH, la formazione è più lenta rispetto a quella che si ottiene tramite la reazione del cemento non reagito. In provini fessurati, è verosimile che le reazioni pozzolaniche di self-healing avvengano in una scala temporale più estesa. L'aggiunta quindi di materiale pozzolanico può garantire lo sviluppo di prodotti di self-healing anche a lungo termine, anche quando "il cemento non reagito è stato consumato" [51].

3.3.3 Self-healing autogeno

3.3.3.1 Cause del self-healing autogeno

Il self-healing autogeno è stato definito in precedenza come il processo di auto-guarigione e auto-ripristino dove vengono utilizzati materiali e componenti che sono presenti nel calcestruzzo anche se la sua composizione non viene specificatamente proposta per il self-healing [51]. Il termine “autogeno” deriva dal greco *autoghenes* composta da *auto-* ‘auto’ e *ghénos* ‘nascita’ sta a significare che si genera da sé. Questa definizione è completamente appropriata per spiegare cosa avviene nel calcestruzzo quando il fenomeno del self-healing prende atto. Neville [57] prende spunto dal mondo delle saldature definendo il fenomeno autogeno “formato da, oppure, che coinvolge la fusione di due estremità unite, senza aggiungere nessun materiale di riempimento”. Un esempio di self-healing autogeno è la diminuzione di ampiezza di una fessura nel tempo. Le cause possono essere molteplici, e la Fig. 3.7 [51] ne esemplifica quali possono essere le cause principali, che possono avvenire separatamente o in contemporanea [55].

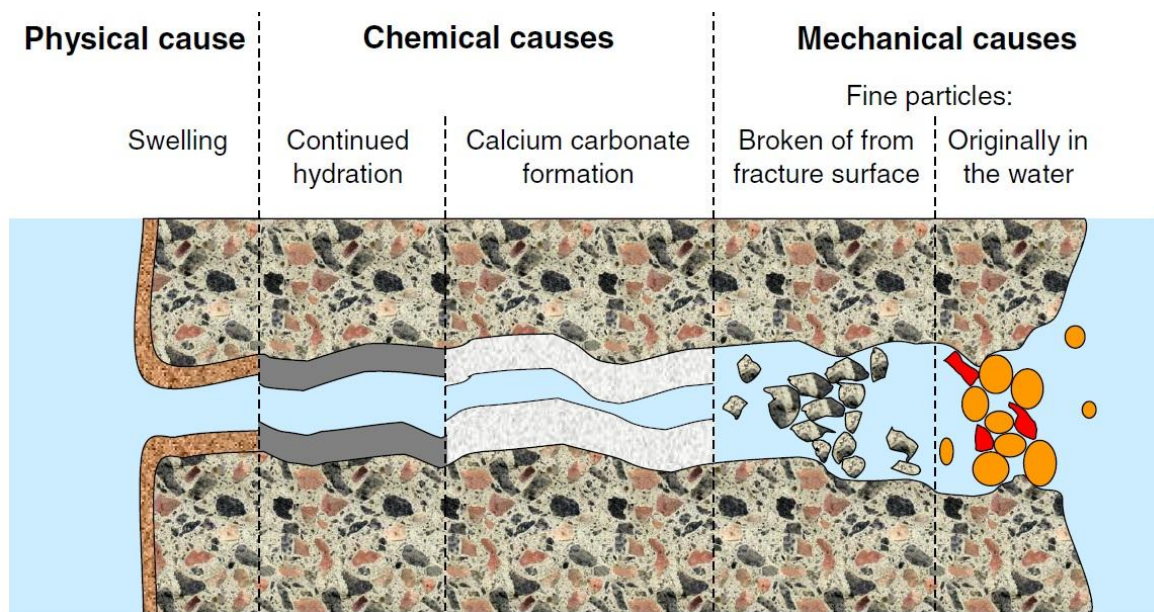


Figura 3 6 Cause di Self-healing Autogenico [51]

La causa fisica è dovuta al rigonfiamento/crescita della pasta idratata di cemento (HCP che sta per l'inglese Hydrated Cement Paste). Questo fenomeno si verifica quando l'acqua è assorbita da HCP e raggiunge lo spazio lasciato vuoto tra i vari elementi costituenti della pasta cementizia. Questo è un effetto marginale del processo di chiusura della fessura ed è stato stimato influire per meno del 10%, sulla base di uno studio che ha aumentato del flusso d'acqua passante attraverso la fessura [51].

Accanto a cause fisiche, sono presenti due fenomeni chimici. Il primo è l'idratazione continuata del cemento che non ha reagito in prima istanza a causa di mancanza di acqua. Questo fenomeno si verifica principalmente in calcestruzzi che sono stati fessurati in giovane età [57]. Quando le particelle di cemento non idratate entrano in contatto con l'acqua, iniziano ad idratarsi e i prodotti di reazione crescono nello spazio libero entro la fessura. I prodotti di idratazione occupano circa il doppio dello spazio degli originali parti non idrate. Il recupero delle caratteristiche meccaniche avviene principalmente tramite questo processo [51, 58].

Il secondo processo chimico che si instaura è la formazione di carbonato di calcio e la crescita di cristalli sui bordi della fessura. Gli ioni Calcio dall'acqua nei pori (Ca^{2+}) reagiscono con gli ioni carbonati presenti in acqua (CO_3^{2-}) per formare il prodotto $CaCO_3$ che precipita nella fessura. La reazione dipende da temperatura, pH, e della concentrazione degli elementi reagenti. Il meccanismo è stato studiato in dettaglio da Edvadsen [53]. L'autrice sostiene che "tutte le indagini chimiche e mineralogiche sulle superfici delle fessure hanno dimostrato che la formazione del prodotto cristallino $CaCO_3$ è praticamente la causa esclusiva di healing autogeno" [53]. Questo fenomeno riguarda principalmente la chiusura di fessura. I depositi di carbonato di calcio si formano principalmente sulla bocca [54] della fessura e non influiscono sul recupero meccanico dato che il carbonato di calcio non ha grandi capacità meccaniche [56], ma solo sulla riduzione del flusso d'acqua nel tempo, aumentando comunque la durabilità del calcestruzzo.

Si possono inoltre verificare due fenomeni fisici. Essi sono: la presenza di piccole particelle in acqua che entrano nella fessura, e il distaccamento di piccole parti dei bordi della fessura. Questi effetti sono di minore importanza e difficilmente quantificabili in termini matematici.

Queste cause qui riportate sono influenzate dal tipo di calcestruzzo, dal tipo di acqua a contatto con la fessura e anche dalla geometria della fessura stessa. La seguente Tabella 3.2 ne riassume schematicamente i fattori.

Calcestruzzo	Acqua	Fessura
Tipo di cemento	Pressione	Spessore
Tipo di additivi	Gradiente di pressione	Lunghezza
Tipo di aggregato	Durezza	Passante o non passante
Età	pH	Derivazione da primaria
	Temperatura	Quantità

Tabella 3. 2 - Fattori che influenzano il self-healing

3.3.3.2 Condizioni di sviluppo del Self-healing autogenico

“I primi studi hanno identificato come la presenza di acqua e le ampiezze di fessura ristrette come i due più importanti criteri per il self-healing autogeno. Senza acqua, il self-healing autogeno non può avvenire chimicamente; senza fessure di piccole dimensioni, i prodotti del self-healing si creeranno sui lati della fessura, ma non saranno in grado di chiuderla” [51]. Di seguito vengono elencati e successivamente analizzati i principali fattori che influiscono sul self-healing autogeno:

- Ampiezza e stabilità di fessura
- Presenza di acqua in soluzione
- Presenza di specie chimiche
- Tipo di aggregati

Ampiezza e stabilità di fessura - uso di elementi fibrorinforzati

Una caratteristica di primaria importanza è riuscire a mantenere la dimensione delle fessure al di sotto di opportuni valori di soglia. Victor Li e Yingzi Yang [56, 59], dall'università del Michigan, hanno sviluppato un particolare tipo di calcestruzzo a controllo fessurativo, chiamato ECC. La sigla sta per Engineered Cementitious Composite che, riesce a contenere l'ampiezza delle fessure durante l'applicazione del carico. Questa caratteristica si sposa alla perfezione con lo sviluppo del self-healing autogeno. Negli studi [56, 59], infatti, si sostiene che il comportamento autogeno è completo sotto regime di cicli asciutto-bagnato quando l'ampiezza di fessura rimane al di sotto di 50 μm , mentre parziale recupero si ha quando la fessura è compresa tra 50 ÷ 150 μm . Apertura di fessure più ampie significano maggior esposizione agli elementi reagenti e più spazio per la formazione di prodotti di riempimento della fessura. Anche se una fessura di maggior ampiezza ha una superficie esposta maggiore, ciò non porta a risultati migliori. Gli autori hanno raggiunto la conclusione che fessure più ampie di 150 μm non portano ad alcun recupero in regime di cicli di asciutto/bagnato [56]. Fessure più piccole infatti necessitano di meno prodotti di reazione e quindi il processo è facilitato.

Oltre a garantire un'ampiezza di fessura limitata, le fibre negli elementi cementizi hanno ulteriori vantaggi. Nello sviluppo e nella realizzazione di elementi fibrorinforzati si è valutato l'impiego di fibre a base metallica e polimerica [56, 59, 79]. Quelle metalliche a contatto con l'acqua instaurano processi corrosivi che portano alla degradazione delle fibre stesse [77]. Tale processo però non influenza negativamente su larga scala, ma invece ricopre solo una parte marginale [51]. Altri tipi di fibre di normale uso sono quelle in alcool polivinilico (PVA) a base polimerica che vengono di norma impiegati realizzazioni

di ECC [72]. La microstruttura di queste fibre incentiva la formazione dei prodotti di self-healing autogeno. Infatti la fibra polimerica attrae una quantità maggiore di ioni calcio dalla matrice cementizia grazie al gruppo ossidrilico di cui è composta [51].

Inoltre, la fessura ha la necessità di rimanere stabile longitudinalmente, senza 'traslare'. I lembi della fessura quindi non debbono essere spostati e l'"adattamento della fessura" [57] non deve essere disturbato. La fessura quindi deve essere in condizioni stabili e non deve subire variazioni nel tempo. Ter Heide [51] sostiene che le fessure a flessione riescono a recuperare, mentre quelle passanti non possono completamente guarire proprio a causa di questa mancanza di 'adattamento' (lack-of-fit, ndt). In verità, uno stato tensionale di compressione esercitato sul calcestruzzo può portare a risultati migliori, poiché l'applicazione della forza tende ad avvicinare i lembi della fessura. Neville [57] ha osservato che condotti e tubi di ampio diametro in calcestruzzo lasciati in clima arido e secco, che presentavano fessure da ritiro di elevata ampiezza, e successivamente messi in funzione con acqua a temperatura molto minore di quella esterna, hanno dimostrato che la contrazione termica ha un effetto positivo sulla chiusura di fessure.

Si è inoltre visto che se la fibra è passante da un lembo all'altro della fessura si possono instaurare dei moti turbolenti nella zona sottostante nella direzione del flusso d'acqua. Dalla teoria della fluidodinamica si sa che i moti turbolenti non consentono il trasporto di massa. Di conseguenza, si ha la presenza di una zona con velocità stagnante nei pressi della fibra. Questo fatto favorisce un rapido deposito dei cristalli e si viene a formare una zona a componente fibra/prodotti self-healing che può sviluppare un effetto ponte tra un lembo e l'altro [51].

Presenza di acqua

Un altro elemento cardine per lo sviluppo del processo di self-healing è la presenza di acqua. Neville affermò infatti che "fintantoché la condizione di asciutto persiste, la fessura rimane 'così com'è' o diventa addirittura più ampia. [...] La fessura [ne] deve essere inondata" [57]. L'acqua è un elemento indispensabile per la formazione dei prodotti del self-healing autogeno. L'idratazione dell'HCP (pasta di cemento idratata) avviene in presenza di acqua ed è l'acqua stessa che viene usata anche come veicolo adibito al trasporto di massa. Non ha importanza se è stazionaria o in flusso [61]. È stato dimostrato che anche se le condizioni di umidità relativa ambientale dell'ordine del 95% sono la formazione dei prodotti di self-healing rimane limitata rispetto a quelli che si avrebbero in presenza di acqua [70]. L'interpretazione della limitata estensione del fenomeno in ambiente umido è che solo una quantità limitata di carbonatazione può avvenire in aria poiché è disponibile solo il biossido di carbonio disciolto negli strati superficiali a contatto

con la fessura. La sua quantità quindi è limitata e in forma gassosa non reagisce con l'idrossido di calcio. [70].

Un'ulteriore analisi condotta [71] ha dimostrato che la temperatura dell'acqua influisce sullo sviluppo dei prodotti di reazione del self-healing. Si ha infatti che temperature dell'acqua dell'ordine dei 40°C incentivano lo sviluppo del processo autogenico. Tale circostanza è stata anche sostenuta da Edvardsen [53]. Le sue considerazioni termodinamiche sulla formazione di carbonato di calcio hanno inoltre evidenziato che si hanno circostanze favorevoli con un leggero aumento del pH dell'acqua e una riduzione della pressione parziale di CO₂. Il tipo di acqua (durezza), però, non influenza sul processo di formazione del carbonato di calcio.

Si è anche visto [56] che un regime ciclico di asciutto e bagnato su ECC porta a risultati interessanti sia da un punto di vista di riduzione del flusso d'acqua passante attraverso la fessura, sia un recupero delle capacità meccaniche del materiale, che quindi mantiene una buona percentuale di duttilità residua.

Presenza di specie chimiche

Come visto, la presenza della sola acqua è necessaria per lo sviluppo dei prodotti dell'idratazione ritardata, mentre per ottenere la precipitazione e la crescita dei cristalli di CaCO₃ è necessario che il biossido di carbonio CO₂ si leghi con l'idrossido di calcio Ca(OH)₂ affinché la carbonatazione abbia luogo [53].

Il calcestruzzo è un composto formato da una matrice cementizia e da aggregati, miscelati con acqua. Il cemento è un composto granulare al cui interno possono essere aggiunti elementi attivi o aggiunte chimiche. Tali addizioni sono principalmente [78]:

- loppa di altoforno
- cenere volante

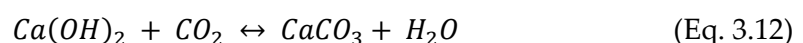
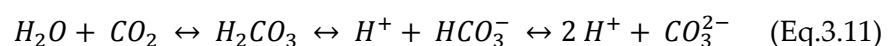
La prima ha caratteristiche idrauliche latenti, mentre la seconda presenta comportamento pozzolanico. Le loro reazioni si attivano dopo diverso tempo dal getto: questo significa che hanno uno sviluppo lento delle loro caratteristiche e che la resistenza all'inizio è inferiore a quella del solo cemento Portland. Entrambi usano l'idrossido di calcio per attivare il proprio processo di legame. Ciò significa che il loro processo di idratazione avviene dopo che il clinker si è idratato. Questo è un fattore da tenere in considerazione

per quanto riguarda le prestazioni di self-healing. Quando si forma una fessura in un elemento di calcestruzzo, le particelle anidre di questi leganti possono di nuovo idratarsi: viene consumato Ca(OH)_2 per formare prodotti di idratazione. Il consumo di idrossido di calcio però può portare ad una minore precipitazione di carbonato di calcio. Siccome però la loppa di altoforno e la cenere volante reagiscono più lentamente del clinker, il lasso di tempo dove è possibile avere leganti non reagiti viene aumentato rispetto all'uso di calcestruzzi con solo cemento portland. Il tempo disponibile è legato principalmente da due fattori [78]:

1. lo spazio disponibile per la formazione dei prodotti di idratazione
2. la presenza di elementi necessari alle reazioni di idratazione
 - a. legante non reagito
 - b. idrossido di calcio Ca(OH)_2

Le reazioni di idratazione ritardate avvengono anche quando non si è formata la fessura nel calcestruzzo. Risulta infatti che i leganti riempiono i fori del calcestruzzo e poi, una volta terminato lo spazio disponibile, fermano la loro idratazione. Solo grazie alla formazione di fessura e quindi all'esposizione dei materiali reagenti all'acqua si può effettuare un secondo processo di idratazione [81].

Il biossido di carbonio è un elemento necessario allo sviluppo e alla formazione di carbonato di calcio nella fessura. Bisogna che il CO_2 sia presente in acqua. Se così è, allora ci sarà un equilibrio tra CO_2 legati, semi-legati e liberi, i quali possono essere divisi in CO_2 complementare e CO_2 in eccesso. Quello che avviene in questo caso è che il biossido di carbonio in eccesso è il responsabile della formazione del carbonato di calcio dall'idrossido di calcio [51].



Dimensione degli aggregati

Il tipo di aggregati può influire sulla quantità di self-healing ottenuta in maniera autogena. In figura 3.8 viene riportato, in maniera schematica e semplificata, la dimensione della fessura in funzione della dimensione degli aggregati. A parità di

ampiezza, infatti, risulta che si hanno volumi maggiori tramite l'utilizzo di aggregati di piccole dimensioni, che creano una situazione più frastagliata e distanza tra un lembo e l'altro maggiore. L'idealizzazione consiste nel considerare gli aggregati di una unica dimensione, senza considerare la curva passante. Si nota come con aggregati piccoli, la fessura risulta più ampia, mentre con aggregati di dimensioni maggiori la fessura a parità di ampiezza risulta avere dimensioni minori [51]. Ciò è preferibile a causa di una conseguente minore richiesta di materiale di riempimento, e quindi il processo di self-healing autogenico è incentivato.

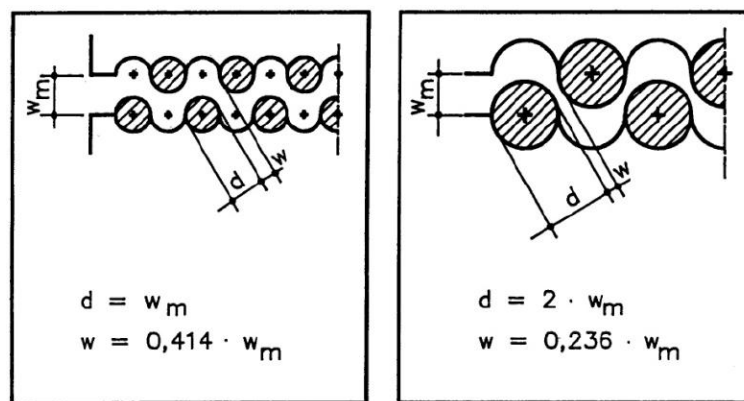


Figura 3 7: Dimensionalizzazione della fessura idealizzata in funzione della dimensione degli aggregati

Gli ioni calcio reagenti e quindi i prodotti di self-healing provengono dalla matrice cementizia. Quando la fessura passa accanto ad un aggregato di grosse dimensioni, la parte reagente è solamente la matrice cementizia dall'altro lato della fessura. Il self-healing in quel luogo è meno evidente a causa del fatto che i prodotti di reazione provengono solo da un lato della fessura. La Fig. 3.9 mostra infatti la diversa densità di prodotti self-healing nella fessura quando questa passa attraverso alla matrice cementizia e quando invece passa accanto ad un aggregato [62]. Il differente tasso di crescita è dovuto anche alle differenti condizioni al contorno tra le due interfacce cemento/acqua e aggregato/acqua. Si hanno condizioni più favorevoli nella situazione cemento/acqua poiché si ha un valore di pH più elevato e una concentrazione di ioni calcio Ca^{2+} più elevata rispetto alla situazione aggregato/acqua [53].



Figura 3.8: formazione e crescita differente dei prodotti di self-healing tra pasta cementizia e aggregati [62]

3.3.4 Self-healing ingegnerizzato

Il self-healing ingegnerizzato è stato definito come il processo tramite il quale il recupero e la guarigione di una fessura è attribuibile all'uso di componenti e materiali che altrimenti non si avessero nel calcestruzzo (aggiunte ingegnerizzate). Quindi il calcestruzzo è di conseguenza studiato per ottenere prestazioni di self-healing. Lo studio e lo sviluppo di particolari tipi di calcestruzzi con la capacità di self-healing vede l'utilizzo di materiale e addirittura dispositivi che vengono attivati una volta che viene formata una fessura. La strategia più comune è quella di inserire nella matrice elementi fragili che possono essere portati a rottura una volta che il danno si propaga lungo il materiale. Questo meccanismo è chiamato comunemente incapsulamento ed è la strategia più comune usata. Si sono visti e studiati metodi innovativi negli ultimi decenni. Nel seguito si dà una breve descrizione e modalità di funzionamento dei principali metodi di self-healing ingegnerizzato.

3.3.4.1 Fibre cave

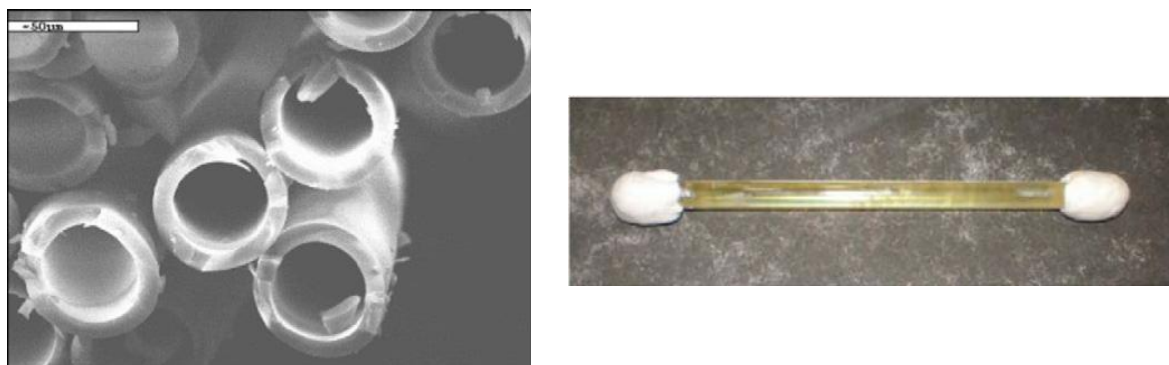


Figura 3.9 a SX: fibre cave al microscopio; a DX fibra di vetro con estremità sigillata [63]

L'uso delle fibre cave, in Fig. 3.10, a volte riferite come pipette o tubi cavi in base al loro diametro, è quello di immagazinare al loro interno qualche tipo di componente funzionale

che poi verrà immesso nella matrice cementizia. Qualora si verificasse un danno, una fessura, o un'altra forma di deterioramento sotto uno stimolo esterno, le fibre cave inserite nel calcestruzzo rilasciano il materiale di cui sono riempite. Tale sistema autonomico fa riferimento al sistema circolatorio degli esseri viventi: i condotti venosi una volta "rotti" rilasciano parti e componenti (piastrine) che hanno la funzione di riparare il danno appena subito. Questo tipo di self-healing ingegnerizzato ha mostrato idoneità in molti casi in cui è stato studiato [63]. Per avere una facile osservazione del fenomeno, Pang e Bond [63] hanno mescolato al materiale self-healing una particolare vernice fluorescente per monitorare il processo di chiusura della fessura. Fig 3 11

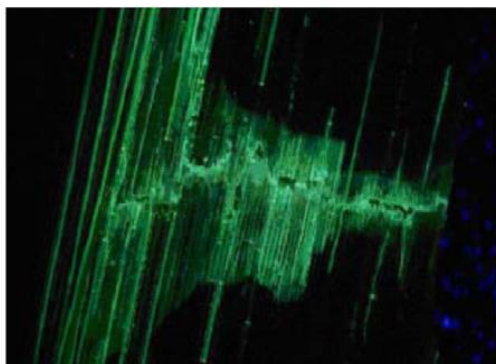


Figura 3 10 Monitoraggio fuoriuscita del materiale di riempimento delle fibre cave [63]

Uno dei primi ad usare questo tipo di soluzione fu Dry [64] che adottò il concetto di un approccio biologico al self-healing: 'la perdita di sangue' nel calcestruzzo. Questa sua idea comprendeva l'uso di un contenitore di matrice fragile al cui interno era immagazzinato il liquido predisposto al processo di recupero. Il contenitore era distribuito lungo il provino di calcestruzzo, e una volta prodotto il danno, il contenitore si sarebbe fessurato e di conseguenza avrebbe rilasciato il liquido al suo interno. Il liquido di ripristino era resina epossidica oppure cianoacrilato, mentre il contenitore cavo poroso era di polipropilene. Una tematica affrontata è quella dei contenitori: devono essere fragili e rompersi qualora si verifici la fessura, ma devono resistere a tutte le fasi preparatorie (getto). Gli esperimenti condotti da Dry hanno evidenziato anche un recupero del 20% del carico a flessione una volta completata la chiusura della fessura [64].

Accanto al modo attivo descritto da Dry, si pongono i lavori di Mihashi *et al.* [66] e di Joseph *et al.* [67]. Una rappresentazione schematica del set-up utilizzato per questi tipi di esperimenti è raffigurati in figura 3.12:

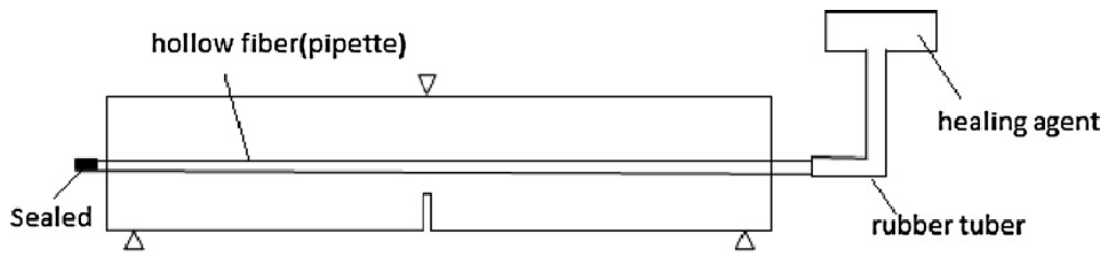


Figura 3 11 Schema rappresentativo del set-up utilizzato da Mihashi [63]

Fibre o pipette cave sono state posizionate dentro la matrice cementizia: una estremità è sigillata, mentre l'altra è a connessa con un serbatoio al cui interno è fatto immagazzinamento dell'agente curante. Negli esperimenti di Mihashi [66] i provini di calcestruzzo sono stati preparati con pipette di vetro cave con diametro esterno di 2 mm e interno di 0.8 mm. Sono stati usati diversi tipi di agenti curanti, come soluzione alcalinica-silicata, diluita al 27% e non. E' stato inoltre valutato l'effetto di una resina epossidica a due componenti mescolata a bassa viscosità. Una volta preparato il provino, viene applicato il carico fino ad arrivare ad una apertura di fessura (Crack Mouth Opening Displacement – CMOD) di 0.03 – 2 mm, seguita successivamente dalla rimozione del carico. In questa fase il provino è lasciato a riposo per il tempo affinché l'agente curante faccia il suo lavoro. I risultati confrontati con il provino senza agente curante hanno evidenziato un recupero del rapporto di resistenza compreso tra 1.1 e 1.5. Si sono avuti però risultati migliori quando l'agente curante veniva preparato a mano e iniettato direttamente sulla fessura. Ciò è dovuto ad una preparazione più meticolosa dell'agente curante che necessitava di una lavorazione migliore: la miscelazione dei due liquidi non è avvenuta in maniera corretta nel sistema di pipette, mentre preparato manualmente ha ottenuto la dovuta lavorazione. Si è visto però che una soluzione con pipetta di diametro esterno di 4 mm e interno di 3 mm con l'uso di etil cianoacrilato conduce a risultati migliori. Questo porta ad un miglioramento di rigidità, carico di picco e duttilità.

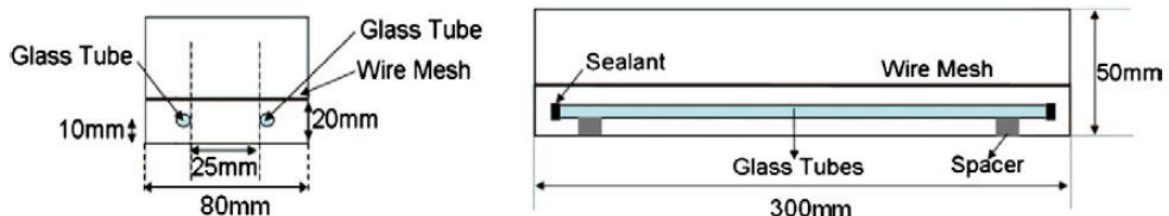


Figura 3 12 Schema di set-up di travetti con tubi e pipette [63]

Diverse conclusioni sono state fatte per questo tipo di set-up:

- si predilige l'uso di tubi in vetro al posto del perspex/pexiglass per via della miglior inerzia chimica del vetro;
- resine epossidiche con minor viscosità possono rimanere all'interno del condotto anche una volta che questo sia rotto a causa della pressione negativa alle terminazioni del tubo;
- l'utilizzo di due componenti non è particolarmente consigliabile poiché essi devono essere miscelati assieme per essere efficaci;
- il diametro più conveniente è quello esterno di 6 mm e interno di 4 mm;
- i tubi e le pipette devono essere protetti dal getto di calcestruzzo in qualche modo, tramite rivestimento in malta o con un reticolo di cavi.

I risultati ottenuti con questo metodo si sono rivelati soddisfacenti in termini di chiusura e recupero meccanico anche dopo soli 4 giorni dalla prefessurazione [63].

Un innovativo sistema di self-healing con auto diagnosi è stato studiato da Nishiwaki *et al* [66, 68, 70], come mostrato nella Fig. 3.14: esso è formato da un agente guarente contenuto in un tubo di natura organica protetto da una pellicola non resistente al calore. Il composto di auto diagnosi lavora sulla differenza di conduzione elettrica prima e dopo la formazione di fessura. Quando si verifica un cambiamento nella resistenza elettrica, è verificata la formazione di fessura. A seguito viene riscaldato il condotto che scioglie l'agente curante: una resina epossidica a bassa viscosità che si scioglie grazie al calore generato e penetra nella fessura da curare.

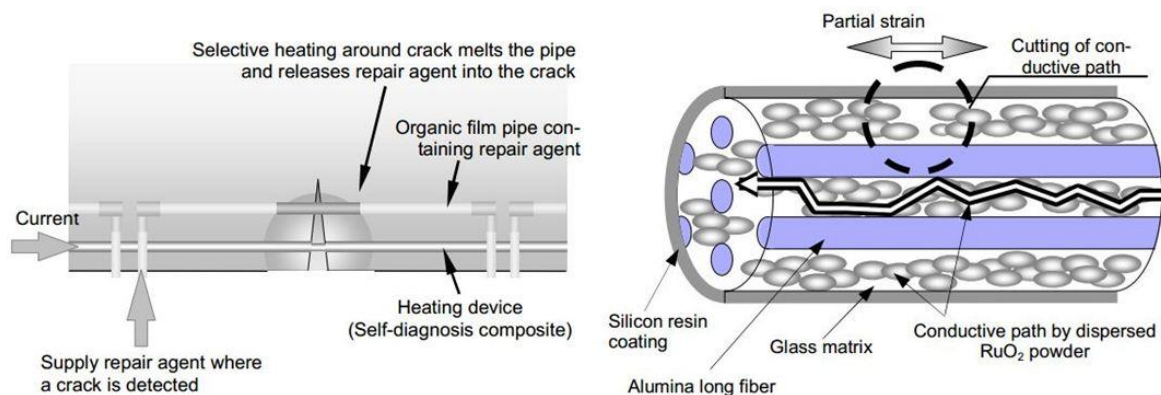


Figura 3 13 SX, schema di funzionamento del provino con autodiagnosi, a DX sezione del condotto autodiagnostico [68]

3.3.4.2 Microincapsulamento

Così come visto per le fibre cave, anche l'incapsulamento prende spunto da fenomeni naturali. L'incapsulamento infatti è presente in natura, sia in macro che in micro scala. La macro scala prevede lo stoccaggio di materiale come possono essere le uova, la micro scala può arrivare a immagazzinare il materiale entro le cellule, per esempio. White *et al* [71] hanno presentato su Nature nel 2001 uno studio riguardo al self-healing tramite micro-incapsulamento di materiale curante. Fig 3.15-3.16. L'agente curante è rilasciato alla propagazione della fessura all'interno della matrice. La polimerizzazione invece è attivata grazie al contatto dell'agente curante con un catalizzatore, anch'esso integrato nel materiale. Il recupero di rigidità così studiato è stato dell'ordine del 75%.

Le capsule devono essere specificatamente studiate e progettate:

- Se troppo poco resistenti: possono rompersi durante le fasi di preparazione.
- Se troppo resistenti: possono non rompersi durante la formazione di fessura e staccarsi dalla matrice.

Il legame di connessione tra capsula e matrice deve essere quindi più resistente della resistenza a rottura della capsula stessa, ma essa deve essere abbastanza resistente da non rompersi durante le fasi di preparazione del getto. Si è studiata quindi l'interazione tridimensionale tra capsula e matrice [71]. Lo studio è stato condotto modellando un campo di sforzi σ applicato ad un punto infinito. La Fig. 3.17 dimostra i conseguenti stati tensionali applicati all'intorno della capsula stessa.

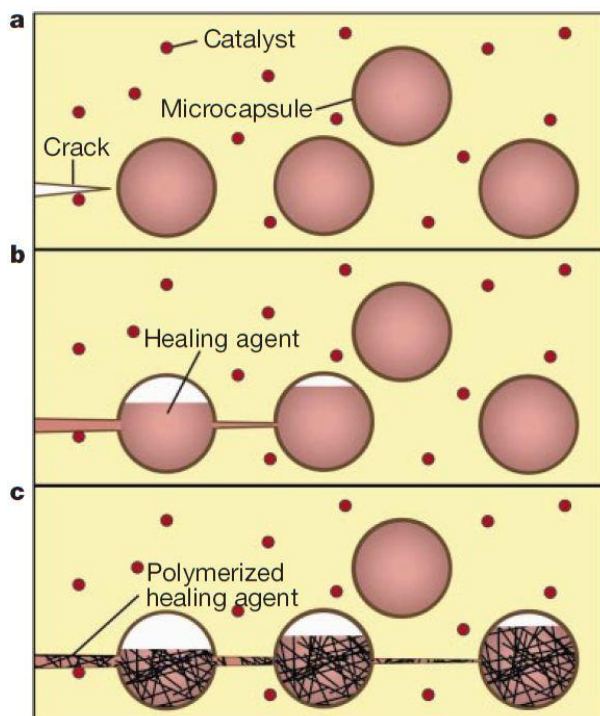


Figura 3 14 a) fessura nella matrice. b) rilascio per capillarità di agente curante. c) contatto dell'agente con catalizzatore

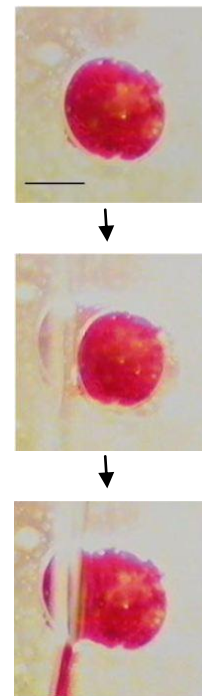


Figura 3 15 Sequenza temporale della rottura della microcapsula

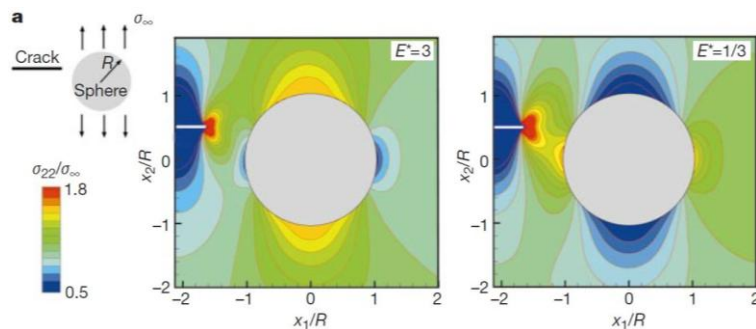


Figura 3 16: distribuzione di tensioni lungo i bordi della capsula

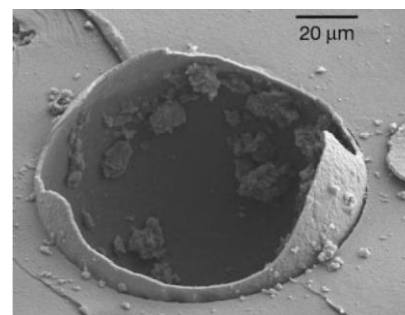


Figura 3 17: immagine microscopio SEM della capsula rotta

Cailleux e Pollet [51] invece hanno studiato l'introduzione nella matrice cementizia di capsule sferiche contenenti 'olio di legno' (tung-oil, ndt), Ca(OH)_2 , entrambi in Fig. 3.19, in forma di microcapsule sferiche gelatinose. L'olio di legno è un fluido oleoso che si indurisce dopo un periodo in cui viene lasciato esposto all'aria, viene prodotto dalla spremitura di semi delle noci della pianta *Vernicia fordii* (tung tree in inglese). Anche in questo caso, si è notato che la tematica di rottura delle capsule durante le fasi di preparazione sia un elemento da prendere in considerazione nella realizzazione di elementi preposti al self-healing. Malgrado la perdita di qualche elemento durante la realizzazione del getto, si è potuto notare un ripristino di caratteristiche meccaniche dopo prove di flessione grazie all'utilizzo dei materiali incapsulati [51].

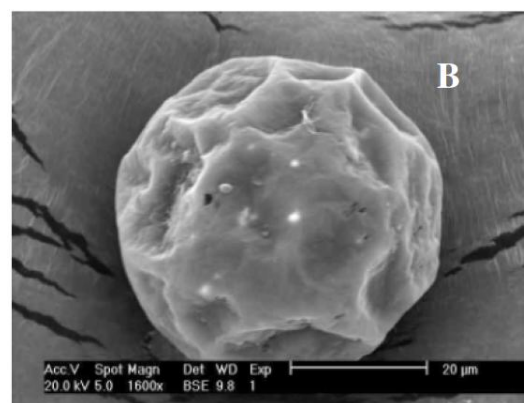
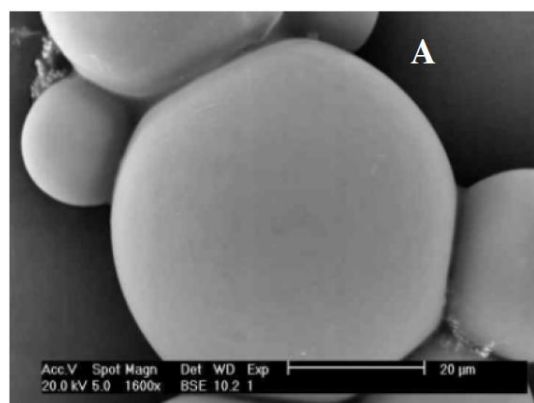


Figura 3 18: microcapsule riempite con 'olio di legno' (A) e con Ca(OH)_2 (B) [51]

Xia Hua [72] dell'università di Delft ha studiato un tipo di incapsulamento di Super Absorbent Polymers (polimeri superassorbenti) nel calcestruzzo ECC. I micropolimeri sono stati poi incapsulati a loro volta in diverse soluzioni (Fig. 3.20) per evitare il rilascio di acqua prima che si verifichi la fessura. In questo caso si è passati ad un incapsulamento

di grandi dimensioni: le capsule hanno ora diametro di 5 mm e 8 mm. I risultati sono duplici: da una parte, elementi di questa grandezza influenzano il comportamento meccanico del materiale in maniera non indifferente, dall'altra possono immagazzinare una quantità maggiore di acqua, che serve come agente curante.



(A) Saturated SAP particles



(B) Shaped by cement cover



(C) Sealed by paraffin wax



(D) Sealed by epoxy-cement paste

Figura 3 19: tipo di incapsulamento dei polimeri superassorbenti [51, 72]

3.3.4.3 Polimeri Super Assorbenti (SAP – Super Absorbent Polymer)

Okamoto *et al* [63] hanno condotto studi per la brevettazione di applicazioni con in incapsulamento di acqua nella produzione di lastre cementizie grazie a polimeri superassorbenti (SAP – Super Absorbent Polymer), Fig. 3.21, capaci di assorbire una quantità di acqua fino a 500 volte il loro peso. L'incapsulamento di elementi nel calcestruzzo ha applicazioni anche nel campo della resistenza al fuoco, al gelo e ai cicli gelo/disgelo, riduzione del calore di idratazione, ecc. Nelle letteratura si incontrano anche soluzioni che prevedono l'impiego di capsule contenenti resine epossidiche e anche

silicato di sodio [63]. Dopo che viene formata una fessura, i SAP entrano a contatto con un ambiente umido e tramite un gradiente di umidità rilasciano l'acqua al loro interno [51].

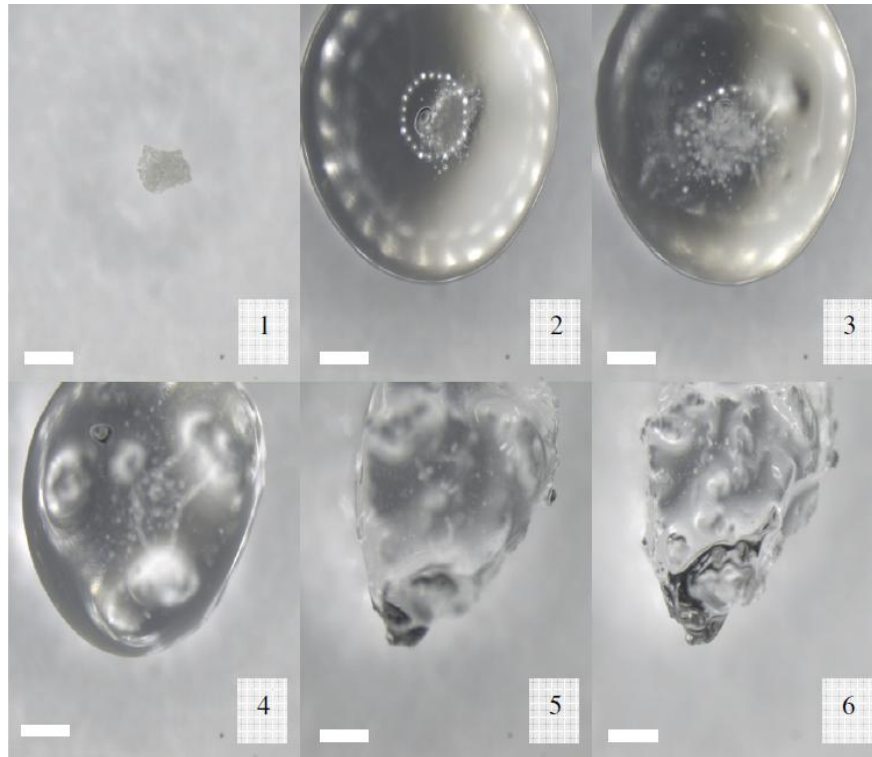


Figura 3 20: fase di accumulo di acqua nei SAP - la barra in basso a sinistra misura 500 μm [51]

Snoeck *et al* [79] hanno dimostrato come queste particelle riescano a chiudere la fessura. La Fig. 3.22 dimostra come il flusso d'acqua passante attraverso una fessura è drasticamente ridotto. La parte in alto dimostra il flusso d'acqua attraverso la fessura in un provino senza SAP al suo interno. Si nota come in 60 secondi, tutta l'acqua presente nella testata sia passata attraverso la fessura. Nei due altri provini, si nota come dopo 480 secondi ciò non è ancora avvenuto completamente. Questo indica che la fessura si è in qualche modo richiusa e che l'acqua non può scorrere attraverso di essa. La piccola differenza tra il provino centrale e il provino in basso sta nel fatto che sono stati usati SAP con capacità di assorbimento minori nella figura in basso. Entrambi i mix sono stati progettati con una quantità di SAP pari al 1% del peso di cemento.

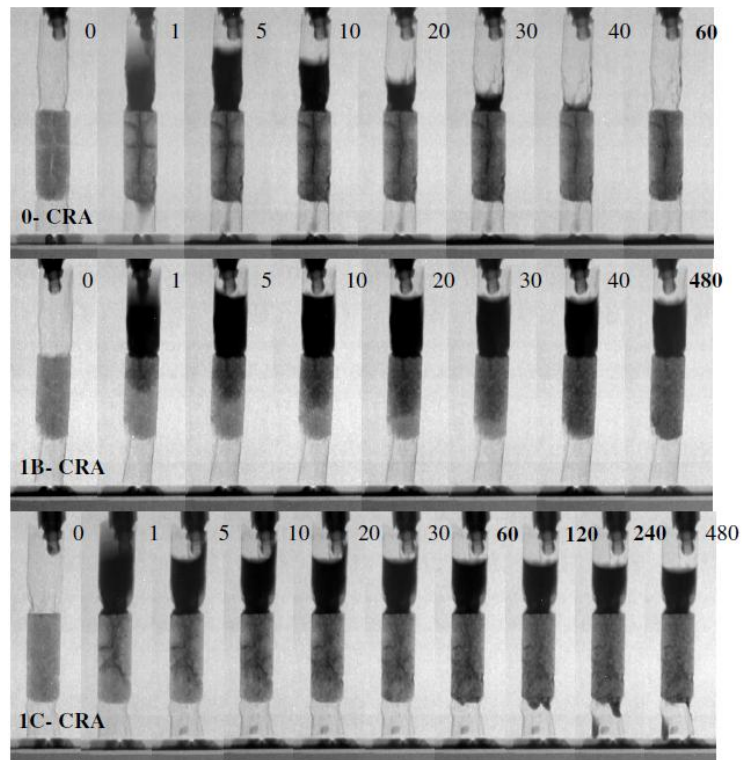


Figura 3 21: chiusura di fessura in provini senza SAP (in alto) e con due diversi tipi di SAP (centro e basso). I numeri in alto indicano il tempo trascorso in secondi. [79]

Uno studio sul recupero delle proprietà meccaniche è stato poi condotto da Kim e Schlangen [51] dove si accompagnavano i SAP all'utilizzo degli ECC. I SAP rilasciano acqua al loro intorno gradualmente. Anche se si verificasse la formazione di una fessura molto dopo il completo rilascio di acqua da parte dei SAP, alla prima pioggia essi possono riacquistarne in parte per poi rilasciarne gradualmente in un secondo momento. Lo studio di Kim e Schlangen è stato guidato dal fatto che è poco verificabile una situazione reale in cui il materiale viene riposto sott'acqua per un periodo prolungato. I loro risultati dopo 28 giorni di cura evidenziano un miglioramento delle proprietà meccaniche del materiale sia dopo cicli di asciutto/bagnato pari a 1 h e 3 giorni, sia lasciati in aria se prefessurati giovani. Per quanto riguarda il recupero se lasciati stagionare fino a 28 giorni e con tempo e modalità di cura inalterate, il recupero è scarso per i cicli asciutto/bagnato mentre si perde capacità per i provini lasciati in aria. Tabella 3.3

Una importante considerazione è che durante il rilascio dell'acqua da parte dei SAP, essi diminuiscono di dimensione e di conseguenza si vengono a formare pori all'interno del materiale diminuendone la resistenza. Lopez-tendero *et al* [51] ha cercato di trovare la soluzione lavorando sull'attivazione del rilascio di acqua da parte dei SAP alla riduzione di pH.

	PVA 2%		PVA 2% & 0.5% SAP		PVA 2% & 1% SAP	
	Stress	Recovery	Stress	Recovery	Stress	Recovery
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
7 gg	8.25	-	7.14	-	8.84	-
35 gg – W&D	9.96	17.17	9.84	27.44	11.33	21.98
35 gg - Aria	8.51	12.72	7.55	15.72	9.63	13.44
28 gg	8.37	-	8.63	-	10.24	-
56 gg – W&D	9.59	3.06	10.24	5.43	11.83	8.2
56 gg - Aria	8.4	0.36	8.55	-0.94	8.96	-14.29

Tabella 3. 3 - Valori di tensione massima e recupero di tensione in ECC con SAP

3.3.4.3 Materiali/leghe a memoria di forma (Shape Memory Material/Alloy)

Come detto sopra, l'applicazione di una tensione di compressione a materiali cementizi che presentano fessure è un incentivo nel processo di guarigione del materiale. Seguendo questa caratteristica, si è studiato l'uso di materiali a memoria di forma [73]. Il concetto base di questo fenomeno è che quando si verifica la formazione di fessura, il materiale che ha la situazione di equilibrio in una posizione predefinita più corta rispetto alla situazione fessurativa attuale, inizierà l'attività di accorciamento applicando quindi una forza di ritiro che nella migliore delle ipotesi conduce ad una chiusura completa della/e fessura/e. In figura 3.23 è raffigurato, in maniera schematica, il processo isteretico tra martensite e austenite, reversibile tramite riscaldamento. Applicando una deformazione anelastica al materiale, essa potrà essere recuperata tramite riscaldamento del materiale stesso sopra un certo valore. Si passa quindi da una configurazione martensitica ad una austenica. Successivamente, quando il materiale si raffredda, si ritorna ad una situazione martensitica, come quella di partenza. In Fig. 3.24 è rappresentata la frazione di martensite in funzione della temperatura [73].

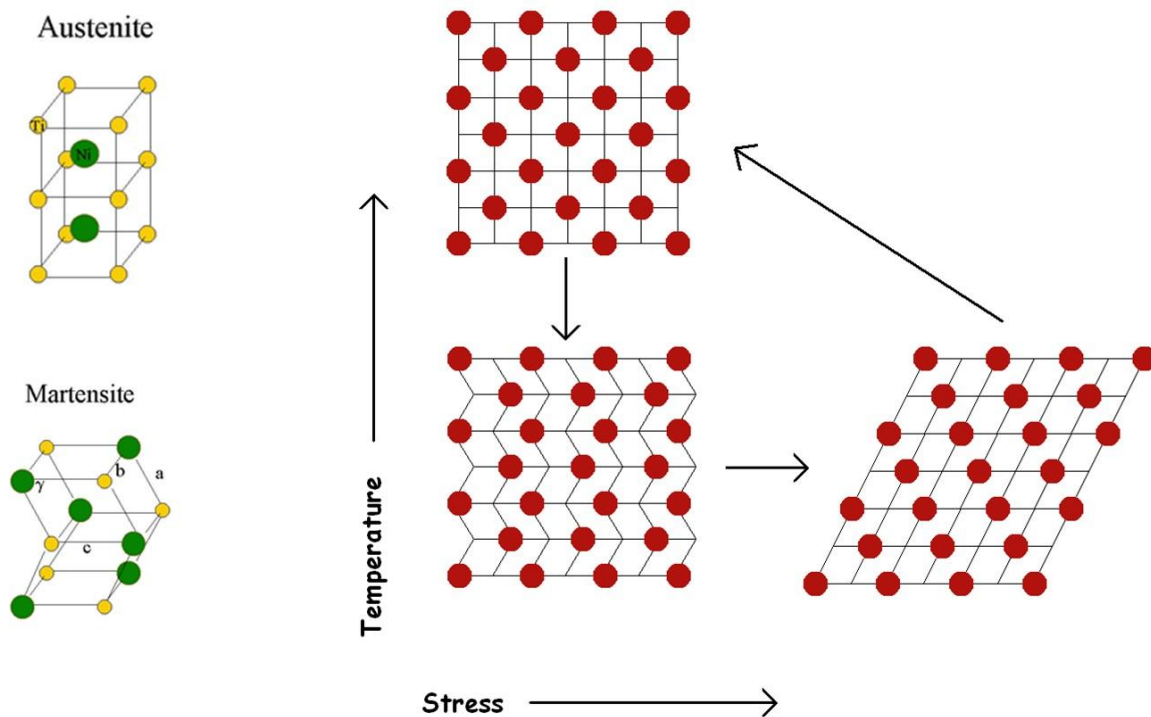


Figura 3 22: Funzionamento degli SMA, passaggio da una struttura martensitica a una austenitica tramite riscaldamento

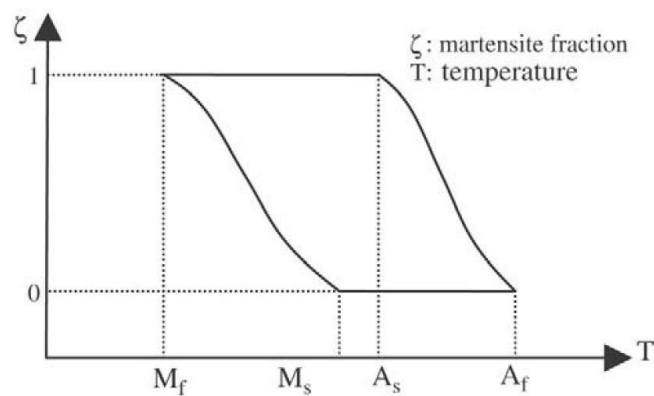


Figura 3 23: frazione di martensite in rapporto alla temperatura

Nel 1932, Chang e Read [63] hanno osservato una trasformazione reversibile in una lega oro e cadmio (AuCd), considerata la prima prova dimostrata nell'uso dei materiali a memoria di forma. Successivamente, la lega a memoria di forma (Shape Memory Alloy – SMA) più comune usata è stata il Nitinol la quale possedeva proprietà superiori termo-meccaniche e termo-elettriche. Due elementi che caratterizzavano il Nitinol erano: la

memoria di forma e la super-elasticità. Il primo fenomeno vedeva il ritorno alla posizione originaria tramite riscaldamento; il secondo invece consentiva il ripristino dell'avvenuta deformazione anelastica dopo la rimozione del carico.

Song e Mo [73] hanno lavorato alla realizzazione di un Calcestruzzo Rinforzato Intelligente (Intelligent Reinforced Concrete – IRC). Il materiale è composto di cavi SMA martensitici per il post-tensionamento. Attraverso il monitoraggio e il controllo della resistenza elettrica attraverso i cavi è possibile controllare una distribuzione delle tensioni dentro il materiale. Il recupero e la chiusura delle fessure, anche di grosse dimensioni, può avvenire tramite riscaldamento dei cavi SMA tramite passaggio di corrente elettrica. La corrente elettrica quindi funziona sia come strumento di controllo sia come strumento attuativo del recupero della forma originale. Fig.3.25.

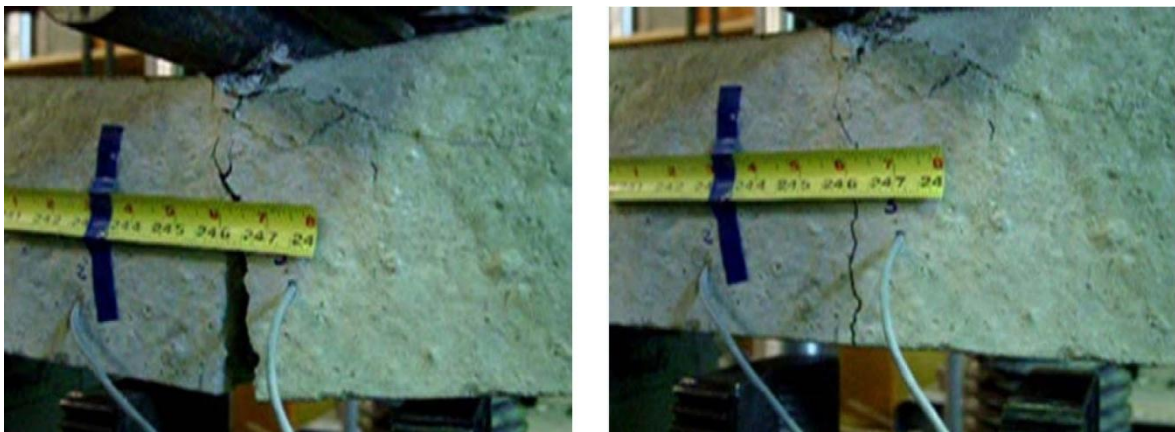


Figura 3 24: IRC prima del passaggio di corrente (a SX) e dopo il passaggio di corrente (a DX) [73]

Sono stati studiati anche gli effetti di memoria di forma con materiali polimerici [63]. Quelli che hanno dato risultati più convincenti sono calcestruzzi con fibre di polietilene tereftalato (PET) che possono garantire uno sforzo di ritiro fino a 34 MPa quando riscaldati fino a 90° C e lasciati raffreddare.

3.3.4.4 Agenti espansivi

E' stato fatto riscontro della formazione di prodotti come AFt, AFm, e CaCO₃ nelle fessure una volta che sono state messe a contatto con l'acqua. Stando a queste affermazioni, è stato studiato da Ahn *et al.* [62] l'uso di aggiunte chimiche, di agenti espansivi, di geo-materiali e combinazioni di essi e di come influenzano il processo di self-healing [63]. In una serie di esperimenti è stato sostituito il 10% del cemento con un agente espansivo composto da C₄A₃S, CaSO₄ e CaO. Dopo un mese di cura, una fessura di 0,22 mm è stata

quasi tutta ripristinata, mentre nella situazione senza agente espansivo non si è verificato nessun miglioramento significativo. Si è inoltre studiato l'utilizzo di un geo-materiale composto da silicio (SiO_2) per il 71.3% e Al_2O_3 per il 15.4%, utilizzato come agente espansivo. Si è riscontrata la formazione di geo-polimeri attraverso la polimerizzazione di specie singole di alluminati e silicati i quali si erano disciolti dalla fonte iniziale a pH elevato e in presenza di metalli alcalini. Inoltre l'aggiunta di elementi chimici come NaHCO_3 , Na_2CO_3 e Li_2CO_3 al normale composto cementizio migliora il processo di ricristallizzazione e quindi la precipitazione di particelle nel calcestruzzo. Ahn [62] conclude inoltre con una categorizzazione delle aggiunte al calcestruzzo di materiale inorganico, basata sulle caratteristiche di espansione (expansion), rigonfiamento (swelling) e precipitazione (precipitation). Fig. 3.26; come illustrato il self-healing è affetto da materiali alluminosilicati e da diversi materiali composti da calcio. Gli additivi chimici e minerali mostrano inoltre una capacità di rendere più veloce la formazione dei prodotti di self-healing con una buona stabilità chimica dei prodotti reagiti.

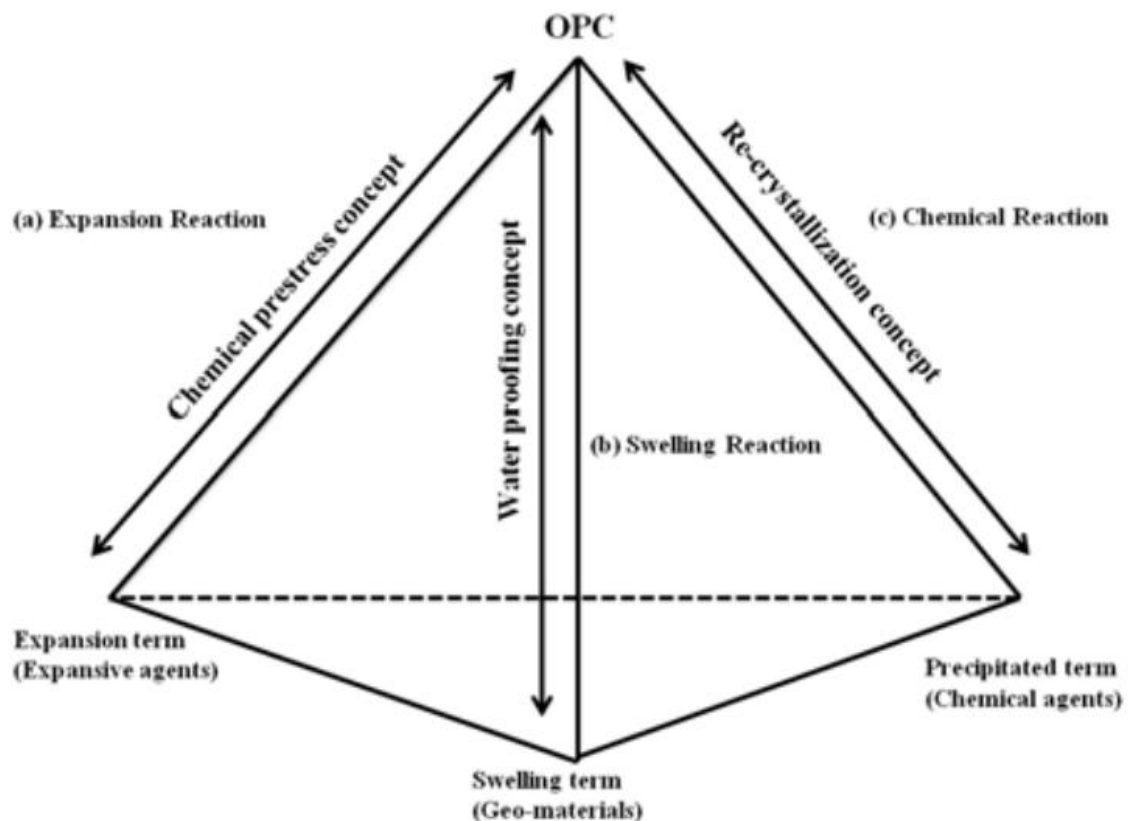


Figura 3 25: rapporto tra OPC (cemento Portland) e le reazioni necessarie allo sviluppo dei prodotti di self-healing; prodotti espansivi, prodotti di rigonfiamento, prodotti di precipitazione [62]

Altri studi condotti da Sisomphon [51] hanno fatto uso particelle di argilla espansa impregnata in una soluzione di sodio monofluorofosfato (Na_2FPO_3 , Na-MFP) e rivestito con loppa contenente uno strato di pasta cementizia per proteggere la matrice cementizia

a base di loppa di altoforno contro la carbonatazione. Fig.3.27 I e II. Quando il biossido di carbonio in forma gassosa (CO_2) si diffonde nella matrice, la carbonatazione danneggia la microstruttura e aumenta la porosità sia della matrice cementizia sia del rivestimento delle particelle di argilla espansa. Fig. 3.27 III. In presenza di umidità, la soluzione Na_2FPO_3 si diffonde nella matrice degradata per formare ioni fosfato e fluoridi (Fig. 3.27 IV). Questi ioni reagiscono con i prodotti dell'idratazione e della carbonatazione per stabilizzare formazioni amorfe, tipo apatite, risultando quindi in una matrice più densa e resistente. Fig. 3.27 V

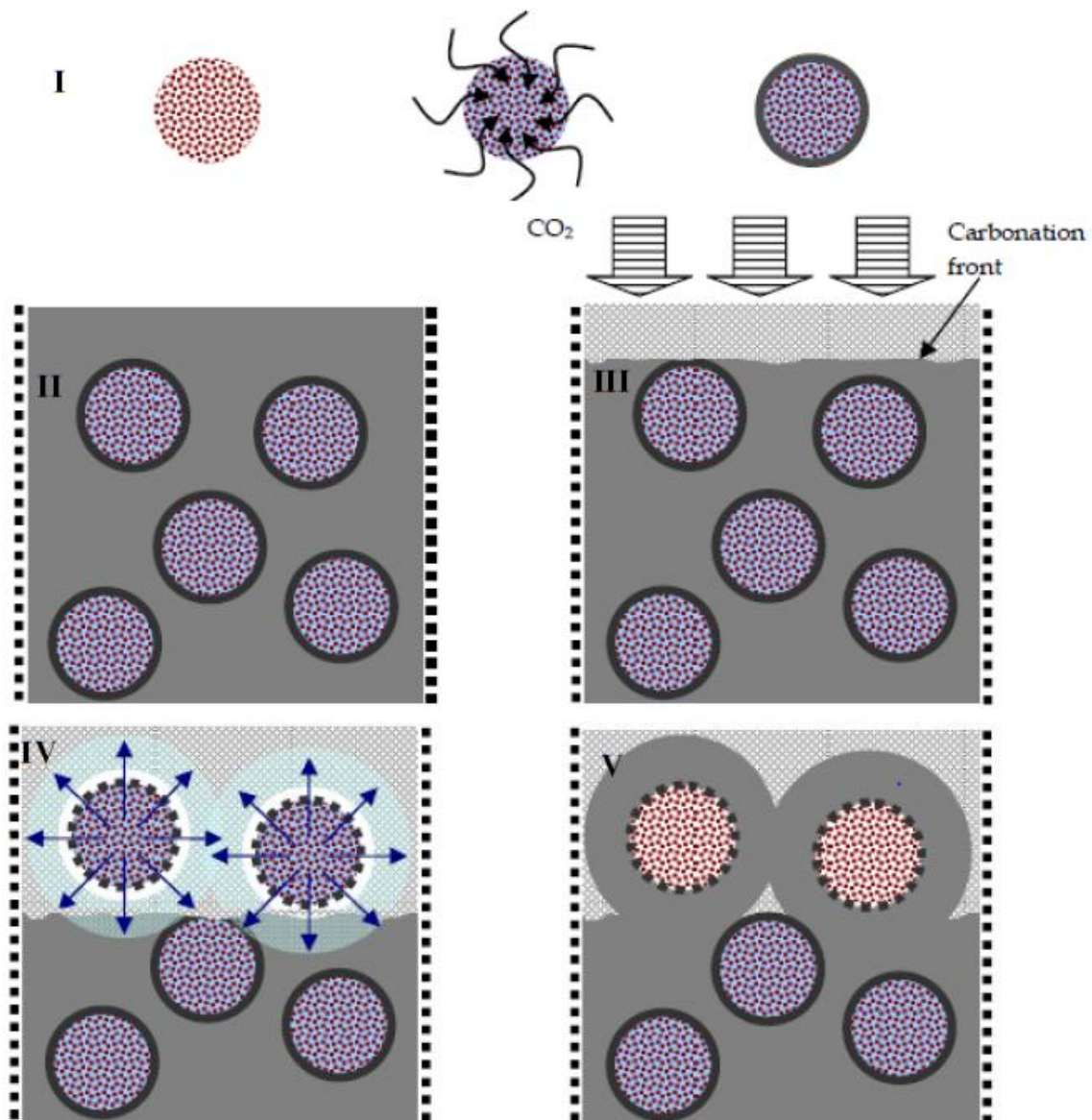


Figura 3 26: (I) Particelle impregnate e ricoperte con pasta cementizia (II) Inserite in matrice (III) Carbonatazione aumenta porosità (IV) Rivestimento particelle danneggiato da carbonatazione, rilascio di soluzione (V) Processo di healing prende luogo [51]

3.3.4.5 Nanoparticelle intelligenti

Andando a modificare la microstruttura del calcestruzzo è possibile alterare le proprietà intrinseche del materiale. Il processo di self-healing come abbiamo visto parte da una scala di misura microscopica (si parla infatti di ioni Ca^{2+}) e di conseguenza, modificare le caratteristiche in quella scala di misura corrisponde ad una alterazione profonda nel processo di self-healing stesso [52]. Aggiungendo materiale di dimensione nanometrica si produce un cambiamento nelle proprietà meccaniche del materiale ed una riduzione di permeabilità riguardo ad agenti pericolosi, incrementando quindi la durabilità del calcestruzzo.

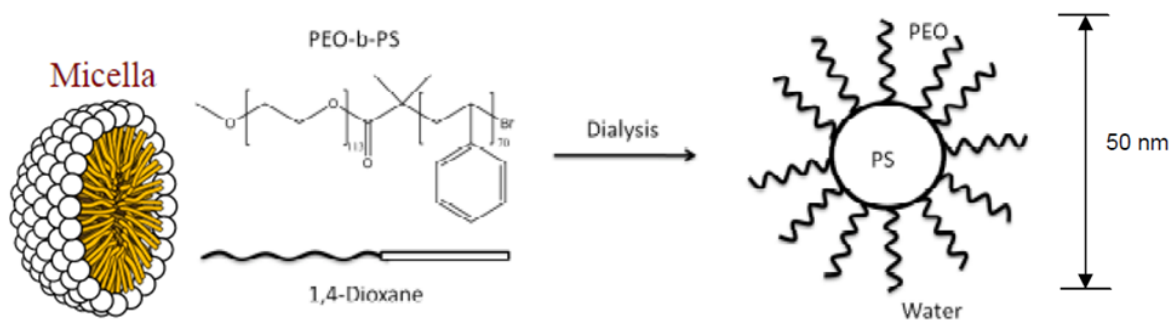


Figura 3 27:a SX una Micella [wikipedia], a DX la formazione di una micella a nucleo copolimero immerso in acqua [52]

Si è visto [52] che aggiungendo un particolare tipo di micella (un tipo di aggregato colloidale di molecole. Fig. 3.28) ad una composto di malta la permeabilità è ridotta di 3 ordini di grandezza rispetto a provini dove non è stata introdotta nessuna aggiunta. Un altro studio [52] propone di cambiare le condizioni di ambiente interno nel calcestruzzo. In pratica, le nano particelle hanno la capacità di modificare le proprietà chimiche quando entrano in contatto con un particolare agente chimico. Le nano particelle trasportano un agente 'attivo': il CaO . All'ingresso nel calcestruzzo di agenti aggressivi esterni, come il biossido di carbonio oppure cloruri, le nano particelle rilasciano il materiale al loro interno così da ripristinare l'ambiente alcalino all'interno del calcestruzzo.

3.3.4.6 Aggiunte microbiotiche

Nell'ultima decade si è cercato di sviluppare un metodo di sviluppo sostenibile per aumentare la durabilità del calcestruzzo e per migliorare il consolidamento di elementi decorativi in pietra e calcare. Questo è stato reso possibile dall'impiego di speciali batteri che hanno la capacità di indurre e incentivare la precipitazione di carbonato di calcio. Essi infatti possono alterare le caratteristiche chimiche per rendere l'ambiente un luogo in cui è

favorita la precipitazione. Inoltre, alcuni tipi di batteri urolitici, possono funzionare da siti su cui avviene la nucleazione del carbonato di calcio. Infatti a causa della presenza di diversi gruppi carichi negativamente sulla parete della cellula, a pH neutrale, far sì che ioni carichi positivamente (es. Ca^{2+}) siano attratti e possano formare legami con la parete della cellula stessa. Di conseguenza, tali ioni possono successivamente reagire con anioni (carbonati) per formare un sale insolubile (carbonato di calcio). L'anione (carbonato) in questa reazione può essere il prodotto del metabolismo del batterio [51]. La precipitazione dei cristalli di carbonato di calcio indotta da agenti microbici è stata studiata per migliorare la durabilità di elementi cementizi. Due diverse tipologie sono state studiate: la prima consiste nel 'biodeposito' ovvero la precipitazione di uno strato protettivo sulla superficie, la seconda nella generazione di un legante indotto biologicamente chiamato la 'biocementificazione'.

Boquet [51] è stato uno tra i primi a dimostrare l'abilità di batteri del suolo di far precipitare carbonati di calcio in condizioni di laboratorio, tra i quali *Bacillus cereus* e *Pseudomonas aeruginosa* mostrarono la formazione di cristalli. Adolphe [51], fu uno dei primi che usò la precipitazione di carbonato di calcio microbiologicamente indotta per la protezione di opere in pietra ornamentale. Il mezzo nutritivo era studiato per stimolare la produzione di carbonato attraverso un ciclo metabolico. Gli impieghi erano principalmente *in situ* e prevedevano il rivestimento dell'opera da proteggere con un primo strato di coltura batterica. Successivamente la coltura batterica veniva nutrita per un periodo limitato di tempo per creare uno strato di rivestimento in calcare. Impieghi di questo tipo sono usati per proteggere opere architettoniche e scultoree poiché non sono invasive e non alterano l'estetica della parte protetta [51].

Per quanto riguarda le fessure in elementi cementizi, si è studiato l'effetto dei batteri attraverso applicazioni di materiale direttamente sulla fessura. Un grande ostacolo per la crescita e la proliferazione dei batteri è stata l'elevata alcalinità dell'ambiente interno alla fessura (pH 12-13). Per superare questo problema, l'università di Ghent ha studiato l'introduzione dei batteri *Bacillus spaxicus* in sospensione in una soluzione a base di silice gel attraverso l'iniezione tramite siringa. I provini sono stati lasciati in un ambiente in cui i batteri potessero nutrirsi. Tale approccio ha portato alla formazione di cristalli di CaCO_3 all'interno della fessura, riducendone le dimensioni. Provini con batteri senza silice gel non hanno formato alcun cristallo [51].

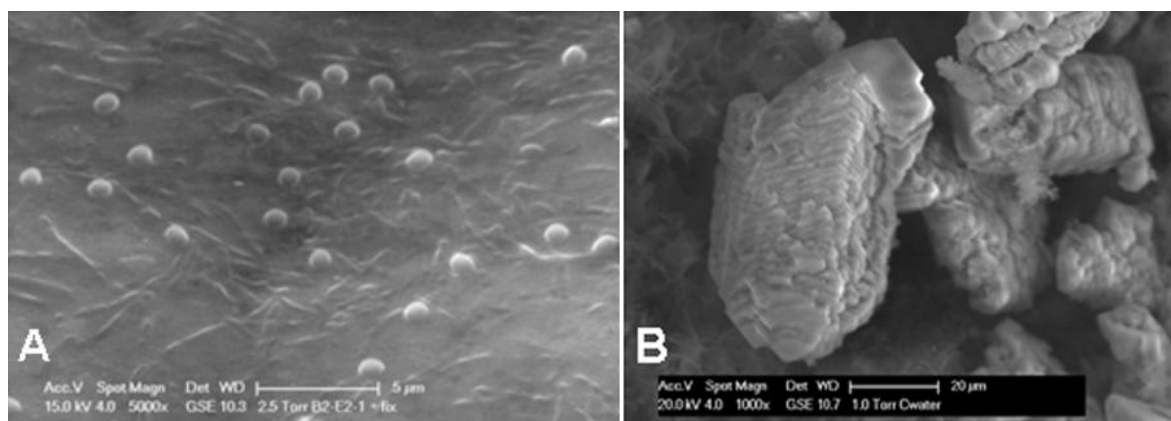


Figura 3 28: (SX) *Bacillus sphaericus* in spore e segmenti. (DX) Carbonato di calcio precipitato [51]

Accanto al fenomeno di ripristino manuale delle fessura, l'università TUDelft ha curato lo sviluppo di un metodo di recupero automatizzato. L'introduzione di due specie di batteri alcalino-resistenti nel calcestruzzo ha dimostrato che una volta che l'acqua penetra attraverso la fessura, si ha la germinazione delle spore batteriche e la successiva formazione di sali insolubili a base di carbonato di calcio. Una problematica sollevata da questa procedura è la bassa longevità delle spore batteriche all'interno del calcestruzzo. Infatti risultati apprezzabili si sono verificati solo su provini fessurati giovani (7 giorni), mentre per provini fessurati a 56 giorni i risultati non sono stati apprezzabili [51]. Per ovviare a questa problematica, si è studiato un metodo di incapsulamento dei batteri grazie ad elementi di argilla espansa che funzionano come riserva di particelle di agente curante, Fig. 3.30. Si è visto come la vita media delle spore batteriche sia aumentata da pochi giorni a diversi mesi.

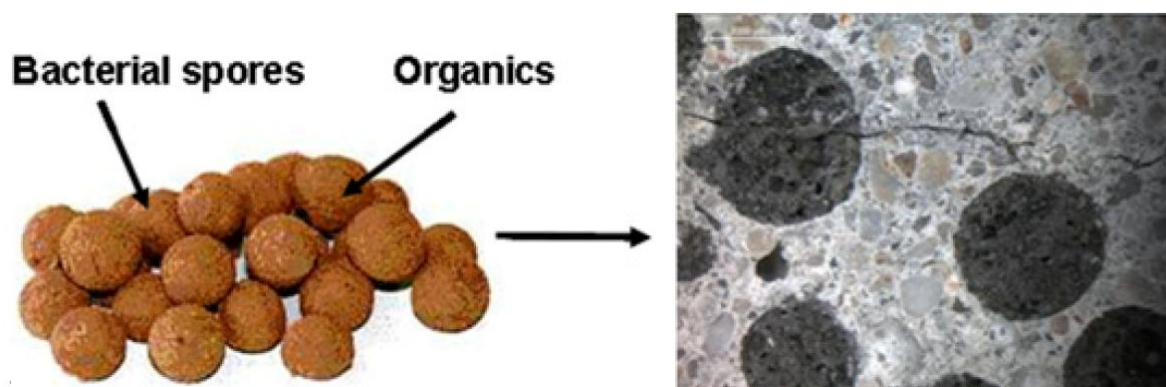


Figura 3 29: aSX: argilla espansa con spore batteriche e composto precursore organico. aDX: argilla espansa miscelata nel calcestruzzo [51, 63]

L'università di Ghent [51] ha anch'essa sviluppato diverse prove, andando a sviluppare diversi tipi di aggregati chimicamente stabili e inerti. È stato studiato l'impiego di due tipi di aggregati: anche in questo caso un'argilla espansa (argex) e un aggregato lavico. I contenitori sferici devono avere queste proprietà:

- capacità di immagazzinare al loro interno spore batteriche;
- resistenza meccanica sufficientemente elevata;
- adeguate dimensioni dell'aggregato;
- adeguata apertura superficiale dei pori.

L'aggregato poroso, andando a sostituirsi a parte degli inerti che vengono utilizzati normalmente negli elementi a base di cemento, possono mutare le proprietà meccaniche e il comportamento dell'elemento stesso. Infatti, una scelta dell'aggregato poroso deve soddisfare le richieste di resistenza meccaniche. Nel caso degli aggregati in particelle di lava si è notato un miglioramento nella resistenza meccanica a compressione rispetto ai provini di controllo, mentre quelli con argex hanno ottenuto resistenze minori, ma analisi dimensionali hanno stabilito una dimensione dei pori più adeguata per immobilizzare i batteri negli elementi in argex. Per valutare il self-healing, una frazione di sabbia dei provini è stata sostituita da un pari volume in aggregati porosi, sia contenente spore batteri da sole, sia spore batteriche in sospensione e nutrienti, sia assieme che in due separate aggiunte. I risultati non hanno mostrato differenza nella riduzione del flusso attraverso la fessura: si ha miglioramento sia in caso di solo nutrienti sia in caso di nutrienti e batteri. Si è quindi concluso che la precipitazione di carbonato di calcio non è direttamente imputabile all'uso di specie batteriche.

Per ovviare a questo problema, l'università di Ghent ha studiato un tipo di aggregato poroso derivante da sabbie diatomee, che presenta un'ottima soluzione in quanto totalmente inerte e inoltre molto stabile chimicamente. Fig. 3.31

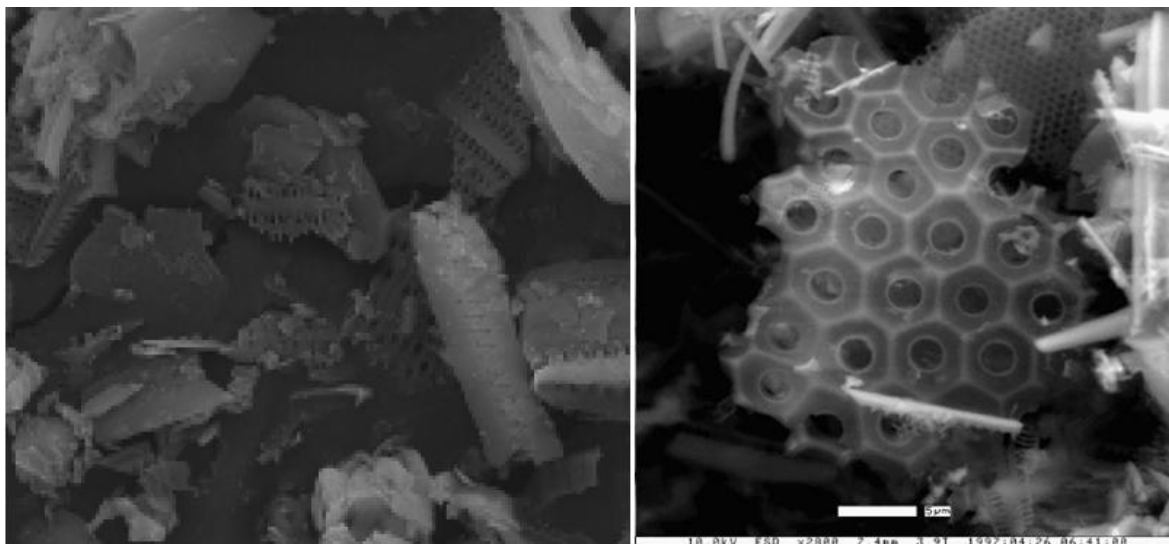


Figura 3 30: Sabbia diatomacea al SEM [51]

Provini creati con questo aggregato e fessurati con una ampiezza di 0.15-0.17 mm sono stati poi posti in soluzione acquosa e in soluzione a base di urea e $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ per 40 giorni. Si è potuto osservare che le fessure sono rimarginate grazie alla formazione di cristalli bianchi. Successive analisi SEM e EDAX hanno poi dimostrato trattarsi di precipitazioni di carbonato di calcio. Fig. 3.32

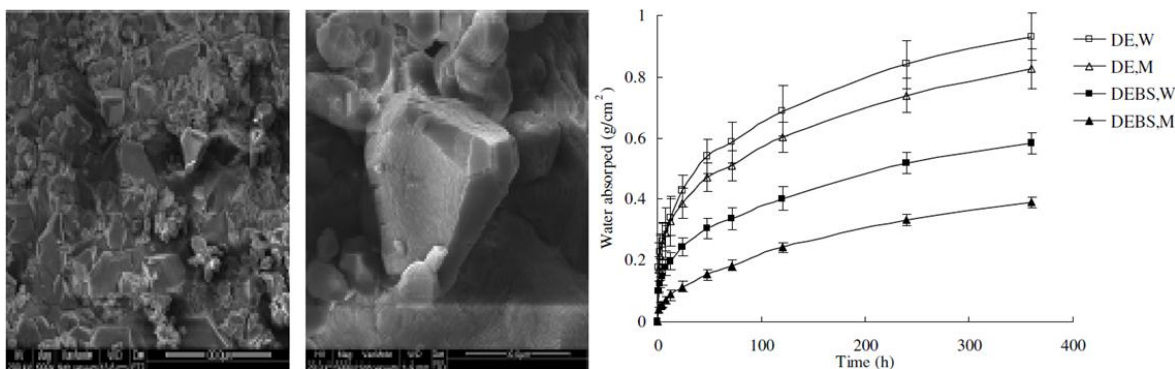
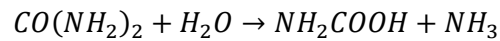


Figura 3 31: (SX) SEM dei carbonato di calcio a x1000 e x5000. (DX) Assorbimento capillare di acqua nel tempo [51]

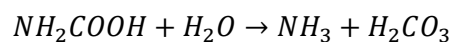
I provini sono poi stati analizzati tramite assorbimento capillare di acqua. Dopo essere stati lasciati in forno a 40°C e quindi privati di acqua al loro interno, si è poi valutato l'assorbimento di acqua nel tempo. La sigla BS significa che il provino conteneva sospensione batterica, W che è stato curato in acqua mentre M curato in soluzione di $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.

Nella ricerca condotta da Tittelboom [14], i batteri hanno il compito di produrre ureasi, un enzima che scompone l'urea ($CO(NH_2)_2$) in ammonio (NH_4^+) e carbonato (CO_3^{2-}) attraverso le seguenti reazioni chimiche:

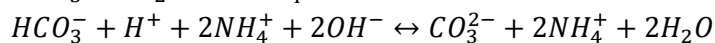
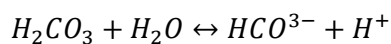
- 1) 1 mole di urea viene idrolizzata intracellularmente in 1 mole di carbammato (NH_2COOH) e 1 mole di ammoniaca (NH_3);



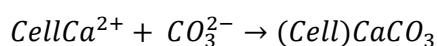
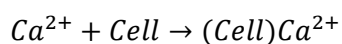
- 2) il carbammato spontaneamente idrolizza per formare una mole di ammoniaca e di acido carbonico (H_2CO_3);



- 3) questi prodotti quindi formano 1 mole di ione bicarbonato (HCO_3^-) e 2 moli di ioni ammonio ($2NH_4^+$) e idrossido ($2OH^-$); le ultime due reazioni danno luogo ad un aumento del pH, dovuto alla formazione di ione idrogeno (H^+) spostando l'equilibrio del bicarbonato, con conseguente formazione di ioni carbonato.



Poiché la parete cellulare dei batteri è carica negativamente, i batteri sono in grado di attirare cationi dall'ambiente, compresi ioni calcio (Ca^{2+}) caricati positivamente, che si depositano sulla superficie della parete cellulare. Gli ioni calcio (Ca^{2+}) reagiscono quindi con il carbonato (CO_3^{2-}) portando alla precipitazione di carbonato di calcio ($CaCO_3$) sulla superficie della parete cellulare.



Dove (*Cell*) indica che la reazione avviene sulla superficie della parete cellulare. I batteri, inducendo precipitazioni localizzate di $CaCO_3$, possono quindi riempire i vuoti creati dalla fessura. Alcune immagini ESEM della precipitazione di $CaCO_3$ sulla superficie delle fessure sono mostrate in Figura 3.33.

In definitiva, le problematiche con riferimento a questa tipologia di self-healing incontrate possono essere sintetizzate come segue:

- valori di pH pari a 12-13 sono elevati e molti batteri lo trovano un ambiente poco favorevole allo sviluppo.
- alcuni batteri hanno bisogno di ossigeno: ciò porta ad un miglioramento contro la corrosione di barre di armatura nel calcestruzzo.

- si ha bisogno spesso di un precursore che attivi lo sviluppo cellulare, nutrienti e compound.
- le spore batteriche quindi vanno stivate in particolare aggregati porosi.

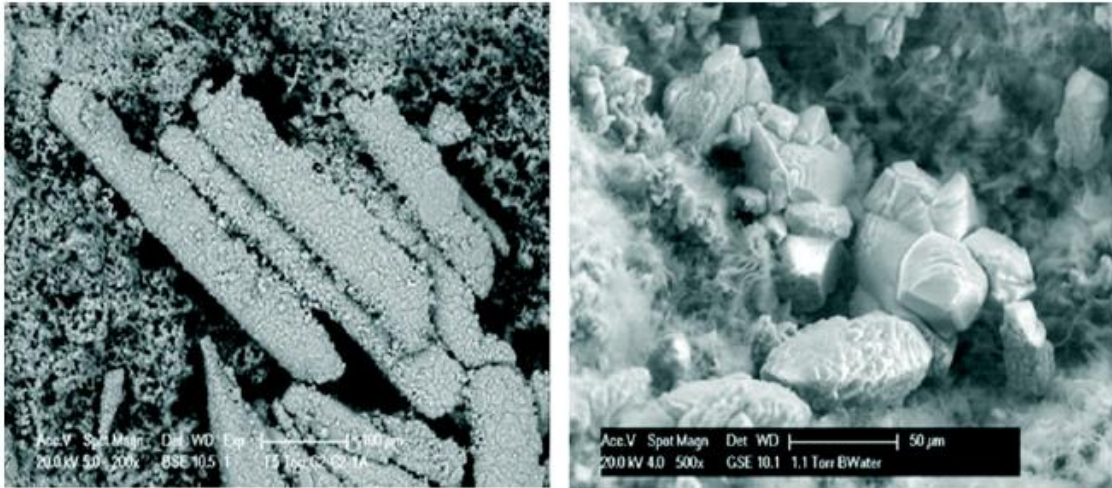


Figura 3 32: Precipitazione di cristalli di carbonato di calcio prodotti in calcestruzzi con batteri [63]

3.3.4.7 Riepilogo Self-healing autonomico

Strategia	Vantaggi	Svantaggi
Apporto esterno di materiale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Agente curante rilasciato a richiesta 2. Quantità di agente customizzabile 3. Efficacia con pluri eventi 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Difficoltà nel getto 2. Diminuzione delle caratteristiche meccaniche per via dell'incapsulamento
Incapsulamento interno	<ol style="list-style-type: none"> 1. Agente curante rilasciato in necessità 2. Quantità media di agente curante 3. Possibile efficacia con pluri eventi 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Difficoltà nel getto 2. Diminuzione delle caratteristiche meccaniche per via dell'incapsulamento 3. Possibile difficoltà nella fuoriuscita dell'agente curante
Microcapsule	<ol style="list-style-type: none"> 1. Agente curante rilasciato in necessità 2. Risposta a differenti danni contemporaneamente 3. Possibile efficacia con pluri eventi 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Difficoltà di creazione di capsule e getto 2. Quantità limitata di agente curante 3. Problematica nel legame capsula-matrice 4. Meno resistenza meccanica se troppe capsule
Agenti espansivi ed aggiunte minerali	<ol style="list-style-type: none"> 1. Buona efficacia curante 2. Buona compatibilità tra prodotti curanti e matrice 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Espansione non desiderata se non trattata correttamente 2. Cura può non verificarsi a richiesta 3. Non garantita la puliricità
Batteri	Attività biologiche, senza inquinamento e modo naturale	<ol style="list-style-type: none"> 1. Molti requisiti devono essere fatti riscontro 2. Misure protettive per proteggere i batteri 3. Recupero meccanico ed efficacia multipla è una problematica
Memoria di forma	<ol style="list-style-type: none"> 1. Macro fessure possono essere gestite 2. Buona quantità di recupero meccanico 3. Efficacia con pluri eventi 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Costo intensiva 2. Processo di healing tramite riscaldamento può condurre a incertezze

3.4 Quando avviene il Self-healing?

Malgrado il processo di self-healing autogeno sia conosciuto già dal lontano 1836, si è avuto solo nell'ultimo decennio uno studio approfondito sull'argomento. Nel 1836, infatti, l'accademia francese delle scienze notò cicatrici bianche su strutture di calcestruzzo adibite a tenuta dell'acqua, condotti sotterranei, tubazioni. Diversi autori, successivamente, analizzarono il processo, formando ipotesi riguardo ai prodotti di reazione che potevano essere quelli dovuti ad una idratazione ritardata del calcestruzzo e alla carbonatazione [53, 54, 55, 57, 60]. L'età dei calcestruzzi influenza i processi che si instaurano: in elementi giovani, i prodotti del self-healing sono quelli dell'idratazione continuata, mentre in calcestruzzi più stagionati si hanno dissoluzione e precipitazione di carbonato di calcio [52, 55, 57]. Yang *et al* [59] hanno indentificato una miglior ripresa della rigidità in calcestruzzi che sono stati lasciati stagionare fino a 90 giorni rispetto a quelli che sono stati prefessurati dopo solo 3 giorni.

Lo studio e lo sviluppo di soluzioni che tengano conto del self-healing come caratteristica del calcestruzzo ha avuto origine da poco tempo. Uno studio pionieristico prende atto nel 1992: il New York Times [88] pubblica con il titolo "il calcestruzzo ripara da solo le proprie fessure" ("Concrete Repairs Its Own Cracks" ndt). In esso viene esposta la tesi del Prof. Dry: attraverso l'impiego di fibre cave riempite di un apposito agente chimico e distribuite nella matrice cementizia si riuscirà ad ottenere un miglioramento delle caratteristiche di resistenza e durabilità dopo che si sia verificato un danno. Venne anche affermato che in tempo due anni la ricerca si sarebbe conclusa e successivamente si sarebbe potuto fare commercio di tale prodotto, ma van Bruegel [52] ha aggiunto nel 2012 che "non si sa ancora quando il calcestruzzo auto-riparante potrebbe diventare disponibile in commercio" ("but that it was not known yet when the self-repairing concrete would become commercially available" ndt).

Tale studio, associato anche allo sviluppo di capacità autoriparanti di materiali polimerici da parte di White *et al* pubblicato su Nature nel 2001 con il titolo 'self-healing autonomico di materiali polimerici' [71], ha portato ad un incremento nella ricerca verso materiali e strategie per sviluppare e/o incentivare il processo di guarigione e riparazione dei materiali. La Fig. 3.34 [81] mostra infatti l'andamento nel tempo del numero di articoli scientifici pubblicati su questo argomento. Si è infatti notato un notevole incremento nella quantità di studi realizzati sulle capacità di autoriparazione dei materiali negli ultimi anni, con trend ancora in salita. Inoltre si sono organizzati diversi eventi e conferenze sulla tematica del self-healing, in Olanda nel 2007 a Noordwijk, Chicago nel 2009, a Bath, UK, nel 2011 e a Ghent nel 2013 [51]. Infine molte tesi di PhD sono state pubblicate su questa materia, diversi libri ne analizzano gli elementi e qualche applicazione si può già trovare anche se nel mondo reale le applicazioni rimangono molto limitate.

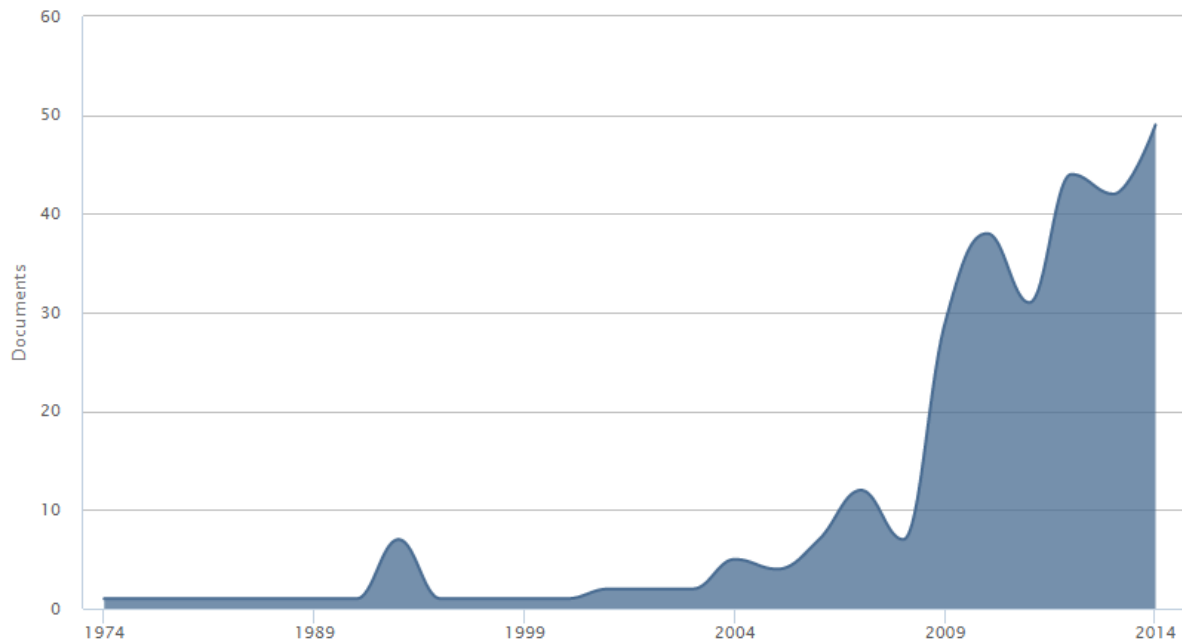


Figura 3 33: Quantità di articoli scientifici pubblicati negli anni, via scopus.com

Il processo di self-healing nei materiali si svolge tramite diverse fasi, come schematicamente illustrato in Fig. 3.31 [80].

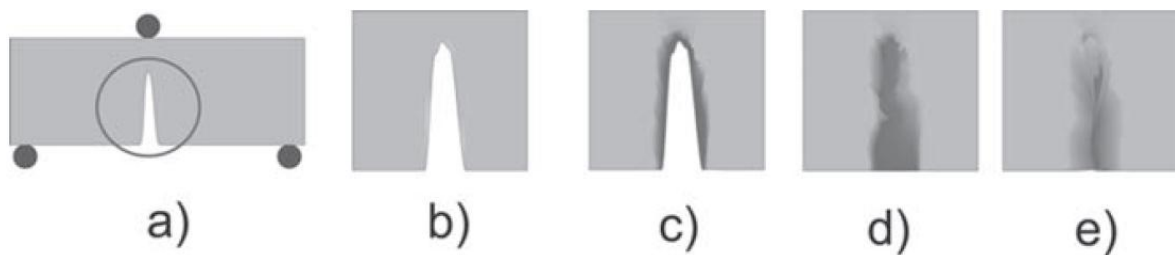


Figura 3 34: a) formazione di fessura con l'applicazione di un carico. b) stabilizzazione della fessura allo scarico. c) fase di trasporto indotta dalla fessura. d) chiusura della fessura grazie alla fase trasporto. e) cicatrizzazione [80]

Alla formazione di un danno di natura meccanica (a), il prerequisito per il processo di self-healing è la generazione di una fase mobile dove si verifica il trasporto di massa che da parti remote arriva alla fessura. La fase di trasporto deve essere in qualche modo attivata. La sua attivazione può avvenire in maniera spontanea oppure attraverso stimoli esterni (c). La fessura quindi accoglie il materiale di riempimento e può procedere con la

reazione di ricucitura (d). Nel miglior dei casi si ha un completo ripristino dei lembi della fessura, così come delle proprietà meccaniche (e).

La fase di trasporto si può facilmente affermare come quella più importante di tutto il processo di self-healing. La sua attivazione dipende dal tipo di strategia che si vuole usare per realizzare il self-healing: può essere passiva oppure attiva. Come si può facilmente intendere, il processo passivo ha l'abilità di reagire ad uno stimolo esterno senza l'intervento umano, mentre il processo attivo richiede un intervento per completare il processo di self-healing. Entrambe le modalità sono state studiate dal già più volte citato Dry [64] con sistemi passivi di chiusura di fessura tramite resine epossidiche, e sistemi attivi con polimeri di metilmetacrilato che sviluppano la polimerizzazione dopo aver ricevuto riscaldamento da fonte esterna. Fig. 3.36 e Fig.3.37

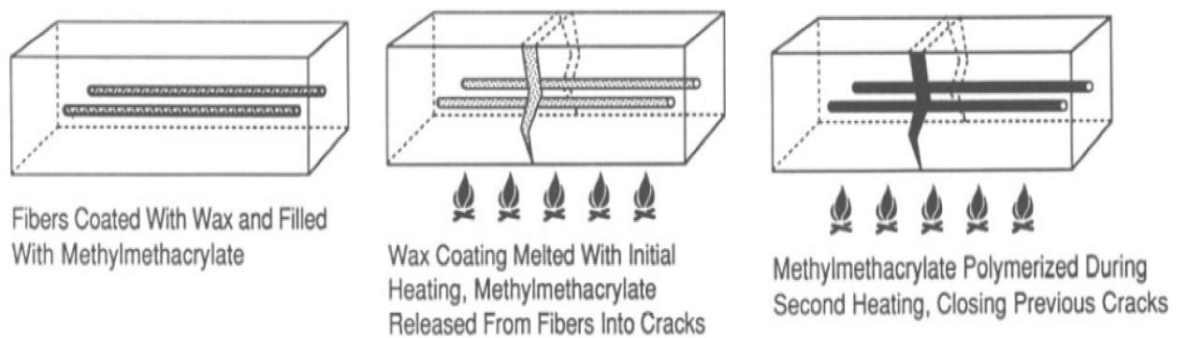


Figura 3 35: metodo di self-healing attivo: rilascio di metilmetacrilato in tubi di cera dopo un primo riscaldamento. Polimerizzazione di metilmetacrilato successivamente ad un secondo riscaldamento [65]

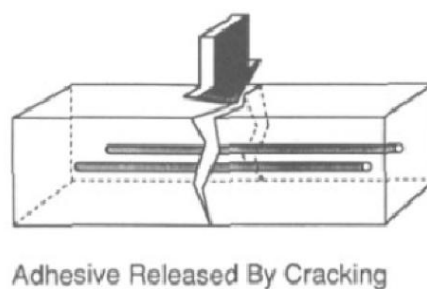


Figura 3 36: rilascio passivo illustrato attraverso la rottura fisica della fibra sotto carico [65]

Pertanto, la commissione tecnica della RILEM arriva a sostenere che “è molto più importante definire i livelli di attivazione” che ha poi portato alla definizione in letteratura di diversi termini come: materiali intelligenti, smart materials, smart structures. Se si considera una gerarchia piramidale, si hanno alla base i materiali basici,

così come sono di natura. Si passa poi ad una categoria di smart materials, dove aggiunte “ingegnerizzate” forniscono il materiale di una unica risposta benefica quando si verifica un cambiamento nell’ambiente circostante. Il livello massimo è quello di materiali intelligenti, dove il materiale ha la capacità autodiagnostica e quindi attiva diversi tipi di funzioni quando si verificano determinati cambiamenti ambientali. La differenza tra smart materials e materiali intelligenti è il grado di raccolta, di combinazione, e di gestione delle informazioni e la successiva attivazione di funzioni [51].

I fenomeni fessurativi nel calcestruzzo possono nascere anche spontaneamente. Infatti se per esempio lo sforzo conseguente a deformazioni di ritiro contrastanti supera la capacità resistente a trazione del materiale, si ha formazione di fessure. Prima ancora che si verifichi l’applicazione di un carico, possiamo trovarci in una situazione fessurata. Quando si ha il contatto del calcestruzzo con l’acqua, come visto in precedenza, si ha l’inizio del processo di self-healing autogeno. I calcestruzzi sono materiali che hanno un’intrinseca caratteristica di self-healing autogeno dato che circa il 20 – 30 % del cemento in calcestruzzi tradizionali non viene idratato durante il processo di idratazione. La quantità di cemento non reagita è maggiore all’aumentare della grossezza del cemento e al diminuire dal rapporto acqua/cemento [52]. Quando si verifica una fessura, l’acqua può entrare in contatto con i grani di cemento non reagiti e instaurare di nuovo un processo di idratazione, andando talvolta a chiudere la fessura. Si ha un processo di idratazione ritardata, dove le particelle anidre di cemento entrano a contatto con l’acqua che penetra all’interno della fessura. I prodotti sono quelli propri dell’idratazione del cemento, ma questo processo prende il nome di idratazione ritardata a causa, appunto, di un tempistica lontana dalla prima idratazione. La chimica che controlla il processo è quella della formazione del carbonato di calcio partendo dai ioni calcio Ca^{2+} e ioni carbonio CO_3^{2-} o bicarbonato HCO_3^- , dipendente dalla concentrazione di ioni disciolti in acqua. Gli studi di Edvardsen [53] hanno portato alla conclusione che la crescita del cristallo di carbonato di calcio avviene tramite la variazione di parametri ambientali, chimici e fisici, nella fessura del calcestruzzo. Vengono identificate due fasi differenti in cui si verifica l’accrescimento dei cristalli di carbonato di calcio:

- Controllo di superficie
- Controllo di concentrazione

La cinetica della prima fase è governata dalla concentrazione di ioni calcio direttamente a contatto della superficie della fessura con l’acqua. Fintantoché queste condizioni permangono, la crescita del cristallo avviene velocemente. Una volta che gli ioni vengono a esaurirsi sulla fessura, si instaura un gradiente di concentrazione tra l’interno della

matrice e l'esterno della fessura. Questo implica un moto di trasporto degli ioni dall'interno all'esterno. La velocità di accrescimento in questo caso è più ridotta: il periodo richiesto agli ioni per passare attraverso lo strato di matrice cementizia e lo strato di carbonato di calcio che si è già sviluppato sulla fessura risulta essere maggiore rispetto al periodo necessario alla formazione e all'accrescimento del reticolo cristallino stesso. Di conseguenza, il tasso di crescita del carbonato di calcio e il relativo tasso di self-healing autogenico è dipendente dalla velocità di diffusione degli ioni Ca^{2+} .

3.5 Dove avviene il Self-healing

Uno studio precedentemente condotto qui al Politecnico di Milano [87] in merito al self-healing di provini di HPFRCCs con fibre di acciaio ha dimostrato come il processo di self-healing riguarda solo ed esclusivamente la parte fessurata. Può risultare ridondante, ma si è voluto verificare che i recuperi in termini di resistenza e rigidità erano dovuti esclusivamente alla formazione di prodotti dovuti alla carbonatazione tramite il processo di self-healing autonomico. Si è fatto uso di indagini ultrasoniche sui provini in tre differenti fasi:

1. Prima della fessurazione
2. Dopo la fessurazione e prima dell'esposizione in ambiente controllato
3. Prima della prova a rottura del provino

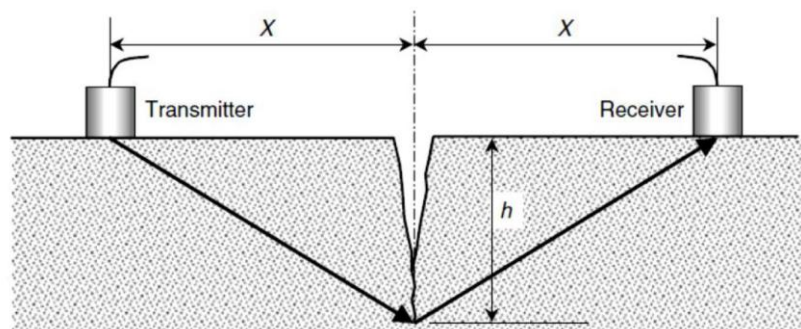


Figura 3 37: Deviazione dell'onda a seguito di una fessura [87]

Rilevazioni sono state effettuate sia in parti del provino soggetto a fessurazione, sia in parti di esso dove non si è verificata fessura alcuna. Si è notato che non si è avuto alcun tipo di variazione nei valori registrati durante le tre fasi nella zona del provino non soggetta a fessurazione, mentre in quella dove sono presenti fessure si sono verificate delle variazioni nei valori registrati. L'interpretazione della variazione della parte fessurata indica che si è verificata una effettiva chiusura della fessura: si è venuto a

formare del materiale di riempimento nella fessura in modo tale che l'onda sonora impiegasse meno tempo per fare il percorso trasmettitore-ricevitore. Dato che i tempi di percorrenza in zone non fessurate sono rimasti inalterati, si può affermare che i prodotti di self-healing autogenico si formano solo in presenza di fessure.

Differenti considerazioni possono essere fatte riguardo alle possibili destinazioni d'uso dei materiali self-healing. In particolare in situazioni dove durabilità e affidabilità giocano ruoli chiave nella applicazione, dove il posto da riparare è difficile da raggiungere o dove è meglio che non venga raggiunto, come siti di deposito di scorie nucleari. A seguire un elenco di dove è possibile e consigliato l'uso di materiali con caratteristiche di self-healing.

- Posti dove è difficile avere l'accesso ed effettuare una riparazione può essere costosa. Turbine eoliche in mezzo al mare, palazzi di altezza elevata, tubazioni marine ecc.
- Applicazioni dove affidabilità e sicurezza sono fattori chiave anche in caso di sovraccarico e circostanze non calcolate: barriere contro eventi naturali eccezionali, reattori nucleari e contenitori di scorie nucleari a lungo termine.
- Grandi e importanti infrastrutture con vita utile lunga: dighe, canali, tunnel
- Applicazioni dove le riparazioni possono risultare sconvenienti, come riparazioni stradali e di fornitura elettrica.
- Strumenti che hanno il compito di lavorare 24/7 così che il tempo in cui vengono spenti diventi minimo.

Siccome la realizzazione di materiali con caratteristiche di self-healing avviene principalmente con l'obiettivo di migliorarne la durabilità ed affidabilità nel tempo, van der Zwaag [75] tracciò sei caratteristiche con le quali si intende la creazione di un materiale con self-healing "robusto":

- Pervasività l'abilità di riuscire ad entrare in contatto con quanto più parti da curare. Pronta per l'attivazione come e quando serve
- Stabilità deve garantire il funzionamento durante tutto il ciclo vita della struttura
- Economicità il materiale deve rimanere fattibile economicamente, anche se abbiamo visto che un investimento iniziale maggiore può ripagare nel lungo tempo [52]
- Affidabilità permette il funzionamento anche in ambienti diversi

- Qualità i nuovi prodotti di self-healing devono essere di pari qualità a quelli presenti prima
- Ripetibilità fare in modo che il processo di self-healing si ripeta ogni volta che si verifichi la necessità

Visto che il self-healing dipende principalmente dal tempo di cura e dall'ampiezza di fessura [57], è stato studiato un particolare tipo di composto cementizio fibrorinforzato che tramite fibre appositamente studiate ("fatte su misura" – tailored, ndt) [75] riesce a controllare l'ampiezza di fessura entro certi valori, anche fino a 30 μ m, grazie all'utilizzo di fibre al suo interno. Lo sviluppo di particolari elementi con queste caratteristiche può incentivare i processi autogeni del self-healing in materiali cementizi, così come se ne farà riscontro nei capitoli successivi.

CAPITOLO 4: INDAGINE SPERIMENTALE

4.1 Elementi di valutazione

La campagna sperimentale posta in essere presso il Politecnico di Milano e sviluppata dall'autore della presente tesi ha visto la realizzazione di particolari compositi cementizi fibrorinforzati dove i principali elementi di indagine sono stati:

- valutazione meccanica di materiale HPFRCCs sia con solo fibre naturali, sia con fibre miste acciaio e naturali
 - elementi con solo fibre naturali
 - elementi con fibre miste acciaio e naturali
 - prove a compressione su prisma cubico
 - prove a flessione a 3 punti
 - prove a flessione a 4 punti
- valutazione del comportamento self-healing in materiale HPFRCCs con fibre solo naturali e con fibre miste acciaio e naturali tramite prove meccaniche e indagini ottiche
 - recupero della tensione massima
 - recupero della rigidità
 - recupero della durezza
 - recupero della duttilità di picco
 - recupero della parte degradante post picco
- valutazione del ritiro di materiale con fibre sia solo naturali sia solo acciaio
 - valutazione del ritiro autogeno
 - valutazione del ritiro totale
- valutazione di assorbimento di acqua in cicli di bagnazione in provini con solo fibre naturali, sia solo macrometriche sia miste macrometriche e micro/nanometriche
 - valutazione in ambiente esterno
 - valutazione in acqua per tempo limitato
 - valutazione in ambiente a umidità controllata

Il materiale studiato è un composto cementizio fibrorinforzato ad alte prestazioni (HPFRCCs – High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites). Sono stati proposti diversi mix design. Quello che viene fatto variare è principalmente il tipo di fibra che è stato utilizzato per la realizzazione dei diversi provini, mantenendo fissi i rapporti acqua/cemento, acqua/legante, e percentuali di fibra sul volume. Viene inoltre fatta oggetto di analisi la distribuzione e la dispersione delle fibre lungo i provini, andando a valutare i casi in cui esse sono disposte lungo l'asse longitudinale del provino e viceversa.

4.2 Mix design e Materiali d'impiego

4.2.1 Mix design HPFRCCs

Come detto in precedenza, si è utilizzato un tipo di calcestruzzo denominato HPFRCCs con mix design sviluppato durante precedenti ricerche dal Prof. Ferrara [89]. Il mix design usato per la realizzazione di tutti i tipi di provini è sempre lo stesso: varia il tipo di fibra impiegato. Sono stati realizzati anche provini con tipologie di fibre miste, utilizzando due tipi di fibre diverse nello stesso mix design mantenendo sempre inalterato il rapporto sul volume complessivo pari a 1,28 %. Il mix design realizzato viene di seguito riportato in Tabella 4.1.

Ingredienti	Quantità [kg / m ³]
Cemento – CEM I / 52.5 R	600
Loppa d'altoforno	500
Sabbia (0-2 mm)	982
Acqua	200
Additivo Superfluidificante	33 l/m ³
Fibre	VAR

Tabella 4. 1 - Mix Design HPFRCCs.

La quantità di fibre varia al variare della loro densità. Quello che rimane costante è il suo rapporto sul volume complessivo. Il mix design ha caratteristiche di seguito riportate nella Tabella 4.2:

Rapporto Acqua/Cemento (a/c)	0,33
Rapporto Acqua/Legante (w/b)	0,18
Percentuale di fibre sul Volume ²	1,28%

Tabella 4. 2 - Parametri rappresentativi dei mix design.

² Per fibre *Nanopulp* è stata utilizzata una percentuale diversa: 0,1% se in mix ibridi, altrimenti 0,2%.

4.2.2 Materiali usati

4.2.2.1 Cemento

Il cemento usato (Fig. 4.2) è di tipo I di classe 52,5 R ad indurimento rapido, che da scheda tecnica risulta essere composto dal 95-100 % di clinker secondo le UNI EN 197-1, mentre la restante parte è costituita da eventuali costituenti secondari. Segue composizione chimica in Tabella 4.3.

Costituente	[%]
C ₃ S	65 %
C ₂ S	11 %
C ₃ A	9 %
C ₄ AF	6 %

Tabella 4. 3 - Composizione chimica cemento.

4.2.2.2 Loppa d'altoforno

Le miscele presentano anche l'impiego di loppa granulata d'altoforno, come in Fig. 4.4. Le sue proprietà come visto nelle sezioni apposite forniscono vantaggi sia allo stato fresco e indurito, sia nello sviluppo di capacità autoriparanti. Nella Tab. 4.4 successiva è riportata la composizione chimica alla spettrofotometria della loppa impiegata durante la realizzazione dei getti. La granulometria nominale è di classe 12 μm .

Costituente	[%]
SiO ₂	39.0 %
Al ₂ O ₃	11.0 %
Fe ₂ O ₃	0.70 %
TiO ₂	0.55 %
CaO	37.50 %
MgO	8.30 %
K ₂ O	0.30 %
Na ₂ O	0.20 %
MnO	0.80 %
C	0.20 %
S	1.00 %

Tabella 4. 4 - Composizione chimica della loppa granulata d'altoforno

4.2.2.3 Aggregato

L'aggregato che è stato impiegato nei getti è una sabbia di diametro massimo di 2 mm, da Fig. 4.3. La curva granulometrica propria del materiale è riportata in Figura 4.1.

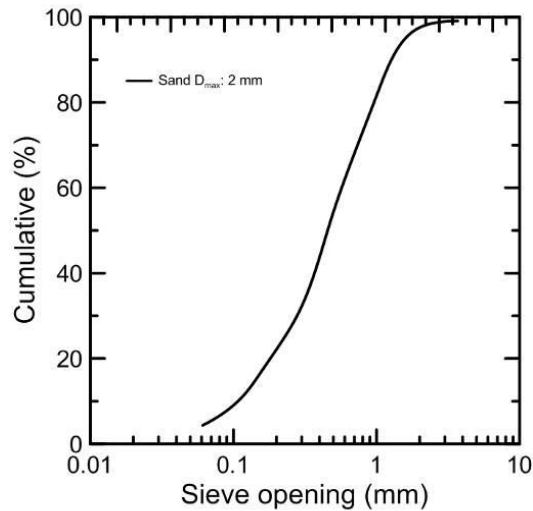


Figura 4.1 – Curva granulometrica della sabbia impiegata per il confezionamento della malta

4.2.2.4 Additivo superfluidificante

Il mix design presenta caratteristiche di bassi rapporti w/c e w/b, solo aggregati fini e fibre. Per garantire una classe di lavorabilità dell'impasto e per far sì che abbia carattere auto-compattante si è usato un additivo superfluidificante a base di polycarbossilati eteri di seconda generazione. Quello impiegato è il BASF Glenium Ace 30, come in Fig. 4.5, con un dosaggio pari a 33 litri per metro cubo di legante. In questo modo si è reso possibile la scasseratura già solo dopo un giorno di stagionatura. Qualora, durante la realizzazione dei provini si fosse notata una minore fluidità dell'impasto, si è proceduto all'aggiunta di una quantità maggiore di superfluidificante, pari ad un decimo di quello da progetto, al fine di migliorarne esclusivamente le proprietà reologiche. La fluidità del getto è una caratteristica necessaria per la realizzazione dei provini, soprattutto quelli destinati alle prove a flessione su 4 punti, per mantenere la capacità autocompattante del calcestruzzo. Tale capacità è richiesta poiché risulta necessario al getto di calcestruzzo di riempire in maniera autonoma l'intera cassaforma, senza l'intervento del vibratore. L'uso del vibratore comporterebbe una distribuzione di fibre all'interno del provino non omogenea, impedendo quindi di ottenere un orientamento preferenziale delle fibre stesse. Procedendo in questo modo si riesce a stabilire con una buona certezza la dispersione delle fibre all'interno del provino. Ciò porta alla realizzazione di lastre con fibre al loro interno disposte in maniera univoca. In base al successivo taglio, i provini si possono dividere in elementi composti da fibre ortogonali e da fibre parallele alla direzione della sollecitazione da applicare durante le prove. La direzione delle fibre è uno statement della campagna sperimentale.



Figura 4. 2 - Cemento durante la fase di pesatura



Figura 4. 3 – Aggregato utilizzato nei getti



Figura 4. 4 - Loppa d'altoforno

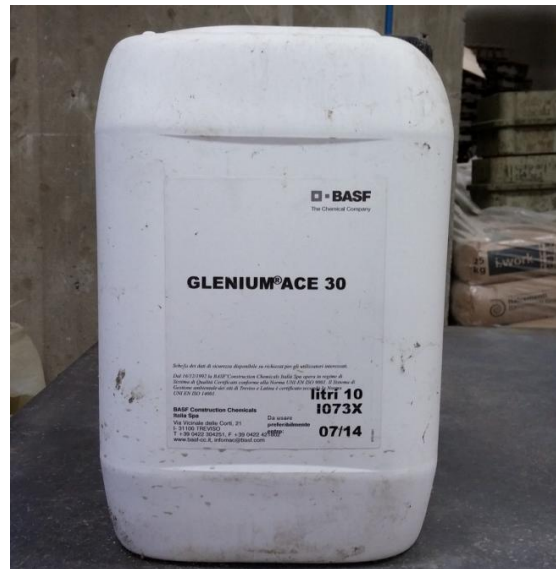


Figura 4. 5 - Superfluidificante

4.2.2.5 Fibre d'acciaio

Come detto nel capitolo 2, l'uso di fibre porta a numerosi vantaggi tra cui quello essenziale di garantire l'apertura controllata delle fessure. Nella realizzazione dei provini sono state impiegate fibre d'acciaio lisce ad alta percentuale di carbonio, con dimensione

longitudinale l_f pari a 13 mm e diametro d_f pari a 0,16 mm e aventi quindi un rapporto di forma, come l_f/d_f , pari a 81, prodotte dalla Bekaert® (OL 13/0.16). Fibre di queste dimensioni vengono classificate come microfibre. Come dichiarato dal produttore, la resistenza a trazione minima della singola fibra è pari a 2000 MPa. Le fibre sono ricoperte con una rivestimento in ottone (Fig. 4.6).



Figura 4. 6 - Microfibre d'acciaio rivestite in ottone

4.2.2.6 Fibre Naturali

L'incentivo ad usare le fibre di origine naturale deriva dalla volontà di migliorare le caratteristiche di comportamento del calcestruzzo potenziandone le prestazioni meccaniche, come ogni tipo di calcestruzzo fibrorinforzato. L'uso di fibre di origine vegetale però contribuisce al migliorarne le componenti di sostenibilità: si ha infatti grande disponibilità di fibre vegetali in quanto hanno un basso costo e, dato che vengono prodotte in natura, hanno anche una bassa energia di produzione. Le fibre naturali impiegate nella ricerca sono diverse:

- *Agave sisalana*, comunemente chiamata *Sisal*
- *Cellulosa* in sospensione in soluzione acquosa, chiamata normalmente *Nanopulp*
- Fibre di *Eucalyptus* di dimensioni micrometriche
- Fibre di *Cellulosa* in polvere, anch'esse di dimensioni nanometriche, chiamate *Nanopowder*

Le fibre di *Nanopulp* e di *Eucalyptus* nello studio qui riportato sono state prodotte da SUZANO®, mentre le fibre di *Nanopowder* sono prodotte dalla compagnia SIGMA®. Le fibre di *Sisal* provengono dallo stato di Bahia in Brasile.

La caratterizzazione delle fibre utilizzate è riportata nella Tab. 4.5 seguente:

Fibra	Densità [kg/dm ³]	Cellulosa [%]	Emicellulosa [%]	Lignina [%]	Dim. Long. [mm]	Cross seccion [mm ²]
<i>Nanopulp</i>	1,4	96,5	-	-	-	-
<i>Nanopowder</i>	1,5	98,7	-	-	-	0,015
<i>Eucalyotus</i>	1,68	84,5	14,5	-	0,8	0,019
<i>Sisal</i>	1,01	60,5	25,7	12,1	25	0,023
<i>Steel</i>	7,85	-	-	-	13	0,75

Tabella 4.5 - Caratterizzazione delle fibre utilizzate

❖ *Sisal*

Nel settore della produzione di fibre, quelle naturali compongono una percentuale pari al 65%, sia esse di origine vegetale sia di altra origine, mentre il restante 35% di produzione deriva dalle fibre prodotte dall'uomo (acciaio, PVA, PP ecc.). Le fibre di *Sisal* si attestano al sesto posto come produzione mondiale. La produzione annuale è di circa 240 mila tonnellate nel 2007. Il Brasile da solo ne produce più di 113000 tonnellate. Le fibre di *Sisal* sono ottenute dalla pianta di *Agave sisalana*, pianta grassa originaria della penisola dello Yucatan, Messico. L'estrazione delle fibre dalle foglie della pianta prende il nome di *decorticazione*, processo nel quale le foglie vengono schiacciate e sbattute da ruote rotanti dotate di spuntoni non aguzzi così da non compromettere l'integrità della singola fibra estratta. Quando ne è rimasta solo la fibra, si procede all'essiccazione che può essere sia naturale esposta al sole, sia artificiale. L'essiccazione è un processo fondamentale perché la qualità delle fibre dipende in grande parte dalla quantità di umidità al loro interno. Si ottengono risultati migliori con asciugature artificiali, ma nei luoghi di produzione (spesso paesi in via di sviluppo) non sempre si riescono a trovare macchinari adibiti a tale compito.

La pianta di *Sisal* ha forma di cespuglio con foglie longilinee le quali quando sono giovani presentano spine lungo il bordo. Può essere alta fino a 2 metri e ha vita nominale di 7-10 anni (Fig. 4.7). Ogni pianta di *Sisal* produce 200 ÷ 250 foglie, ognuna delle quali contiene approssimativamente dai 700 ai 1400 fasci di fibre unite assieme. Questi fasci si presentano in dimensioni che vanno da 0,5 m a 1 m e costituiscono soltanto il 4 % del peso della pianta (Fig. 4.8). Le foglie al loro interno sono composte tre tipi di fibre: fibre strutturali, fibre ad arco e fibre xilema, Fig. 4.9.



Figura 4.7 - Pianta giovane di *Sisal*



Figura 4.8 - Fibre di *Sisal* pronte all'uso

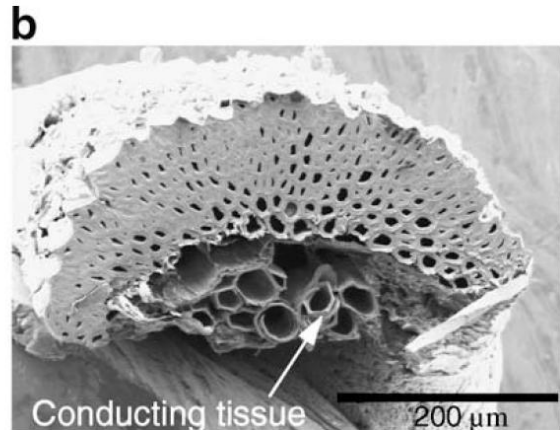
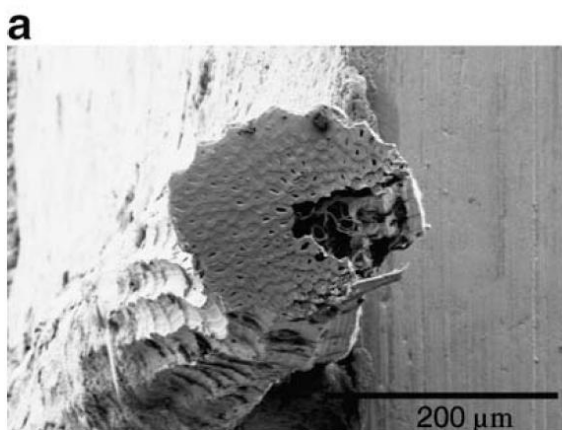


Figura 4.9 - Differenti tipi di fibre: fibre strutturali (a) a forma di zoccolo di cavallo e fibre ad arco (b)

L'uso delle fibre di *Sisal* nella campagna sperimentale ha visto il loro impiego sia con caratteristiche igrometriche in equilibrio con l'ambiente, sia sature e impregnate d'acqua. Nelle immagini seguenti si mostrano le fibre prima e dopo l'aggiunta di acqua (Fig. 4.10 e 4.11). Per avere un assorbimento completo delle fibre, è consigliabile lasciarle in soluzione per almeno un ora.



Figura 4. 10 - Fibre di *Sisal* asciutte



Figura 4. 11 - Fibre di *Sisal* sature d'acqua

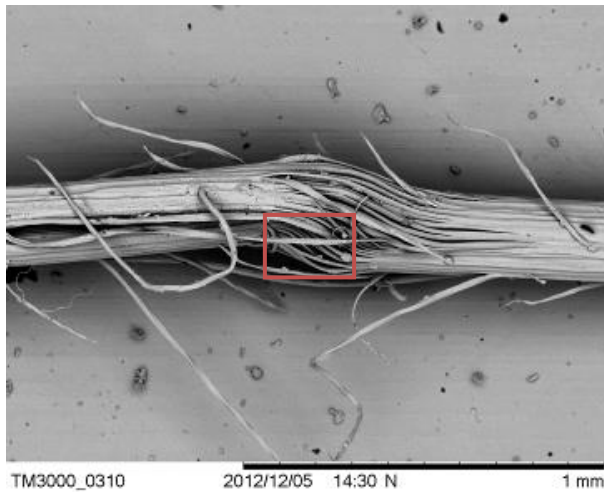


Figura 4. 12 - Fibra di *Sisal* al SEM

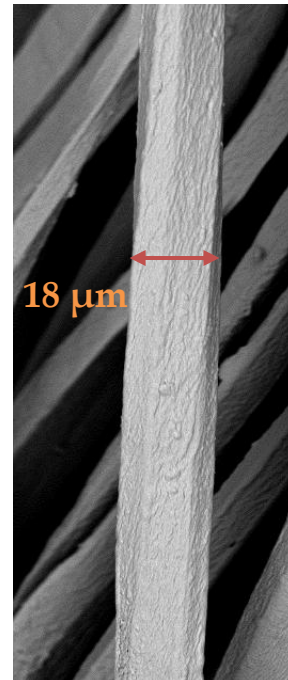


Figura 4. 13 - Fibra strutturale di *Sisal*

La fibra tecnica presenta al suo interno un numero variabile di cellule fibrose, in numero variabile tra 100 e 200. Queste cellule hanno dimensioni pari a 18 μm di lunghezza e presentano un diametro variabile tra i $6 \pm 30 \mu\text{m}$. Fig. 4.12 / 4.13. La valutazione meccanica delle fibre di *Sisal* [90] ha portato a dei risultati come seguono:

- Resistenza alla trazione: $350 \pm 600 \text{ MPa}$
- Modulo di Young: $8-9 \pm 19 \text{ GPa}$
- Deformazione a rottura: $2,5 \pm 5 \%$

❖ *Eucalyptus*

Un altro tipo di fibra utilizzato è quella proveniente da piante di *Eucalyptus*. Queste fibre sono di un colore bianco candido, privo di altre tonalità. Sono presenti nella forma compatta: mattonella bianca compressa di fibre, robusta e resistente. Per poterne disperdere meglio le singole fibre, bisogna far leva sui piani deboli della mattonella. Successivamente si può sgretolare il pezzo in dimensioni minori per ottenere un composto di fibre soffice al tatto. Fig. 4.14 e Fig. 4.15.

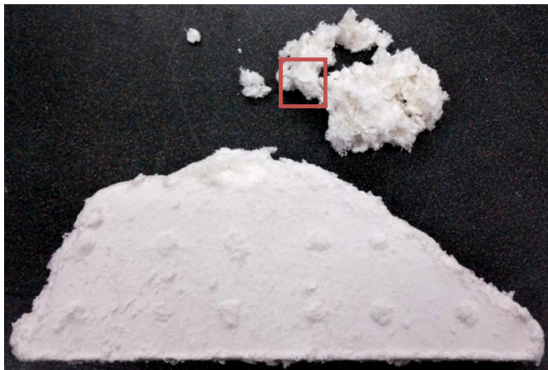


Figura 4.14 - Fibre di *Eucalyptus*, sia in mattonella (basso), sia sgretolata (alto)



Figura 4.15 - Dettaglio della fibra sgretolata

In base a quanto indicato dalla società produttrice Suzano, la densità delle fibre di *Eucalyptus* è pari a $1,68 \text{ g/cm}^3$ e l'umidità naturale è pari allo 8,8 % in massa. La lunghezza delle fibre, sempre stando alle dichiarazioni ufficiali, è di $0,8 \text{ mm}$ mentre il diametro dell'asse maggiore è stato determinato tramite una sequenza di immagini di microscopia elettronica a scansione. Si sono prese 10 immagini con diametri casuali e se ne è ricavato il valore medio. Fig. 4.16.

L'immagine successiva (Fig. 4.17), invece, mostra la sezione della fibra di *Eucalyptus*. Si nota la sezione trasversale si osservano molteplici importanti fattori:

- Lumen singolo
- Pareti esterne molto spesse
- Forma della singola fibra ellissoidale

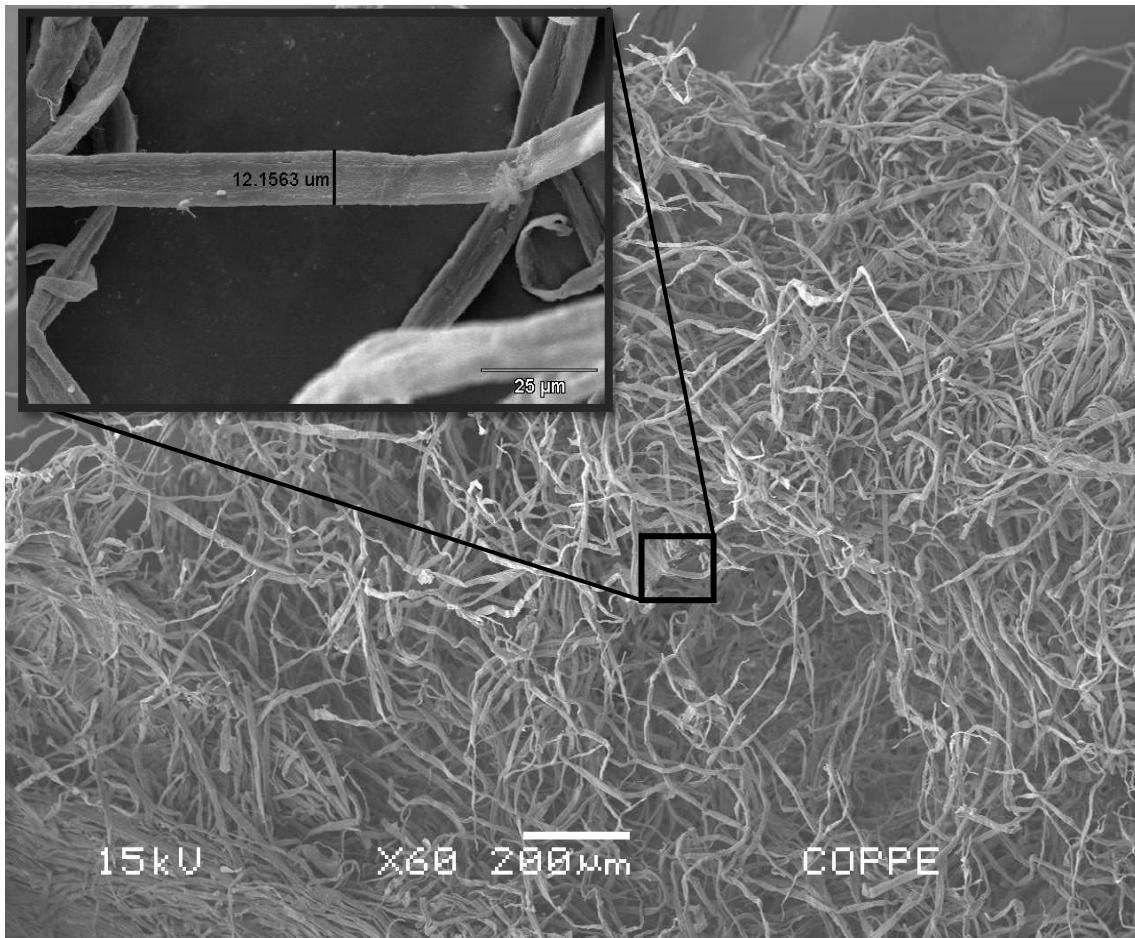


Figura 4. 16 - Immagine al microscopio a scansione elettronica per la misurazione del diametro delle fibre di *Eucalyptus*. Dettaglio per lo studio condotto.

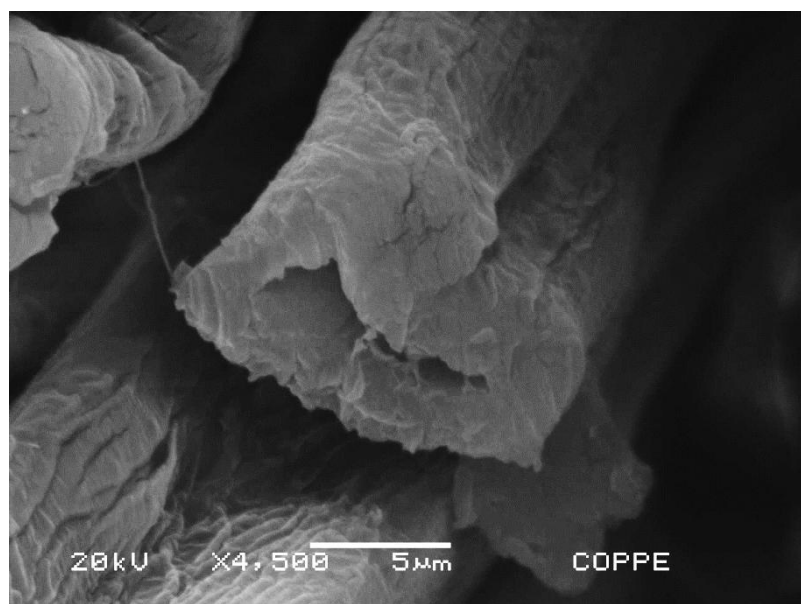


Figura 4. 17 - Sezione trasversale della fibra di *Eucalyptus*

Il rapporto di forma di questo tipo particolare di fibra è molto alto e quindi sviluppano bassi valori di percolazione, anche perché si ha uno sviluppo della struttura a forma di rete, griglia. Inoltre sono particolarmente idrofile, con una capacità di ritenzione idrica elevata e caratteristiche meccaniche notevoli: presentano un modulo elastico di circa 150 GPa.

Siccome l'elevata compattezza della mattonella di fibre non facilitava lo sgretolamento e quindi ad una migliore suddivisione delle fibre, si è adoperata una via che prendesse in considerazione l'aumento della dispersione delle fibre. Infatti le fibre prima dell'utilizzo e il getto nel calcestruzzo, sono state bagnate e lasciate in ammollo per qualche minuto. In questo caso l'assorbimento di acqua è pressoché istantaneo e non necessita di tempi lunghi. Successivamente le fibre vengono fatte passare al setaccio (Fig. 4.18) per eliminare l'acqua libera e non andare ad alterare i rapporti a/c del mix design.



Figura 4. 18 - Fibre di *Eucalyptus* passate al setaccio dopo essere state sgretolate

❖ *Nanopulp*

Le fibre di *Nanopulp* possono essere presenti in diversi modi: hanno da una parte le fibre in sospensione dentro una soluzione acquosa (Fig. 4.19), e da un'altra parte le stesse fibre sotto forma di fogli di cellulosa. Quello che accomuna le due forme sono i processi ai quali sono state sottoposte. La forma solida a fogli, infatti, è la soluzione acquosa di *Nanopulp* prima versata su un vassoio e poi lasciata in un forno a temperatura di 80 ° C ad asciugare.

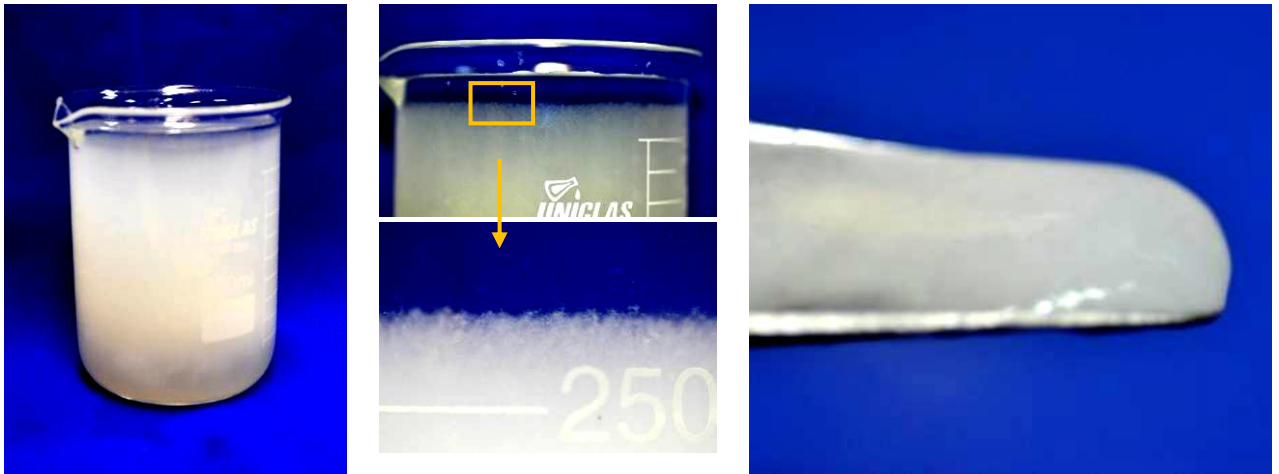


Figura 4. 19 - Sospensione acquosa delle fibre di *Nanopulp*

A seguire le foto per la realizzazione di fogli di *Nanopulp*, Fig. 4.20.



Figura 4. 20 - Realizzazione di un foglio di *Nanopulp*

Per meglio capire la dispersione delle fibre sia nella soluzione sia poi successivamente nel foglio essiccato, si è fatta una scansione al microscopio, come mostrato in Fig. 4.21. Spicca il casuale ordinamento delle fibre senza direzione preferenziale; misure dirette indicano come dimensione dello spessore delle fibrille valori compresi tra $5 \pm 30 \mu m$.

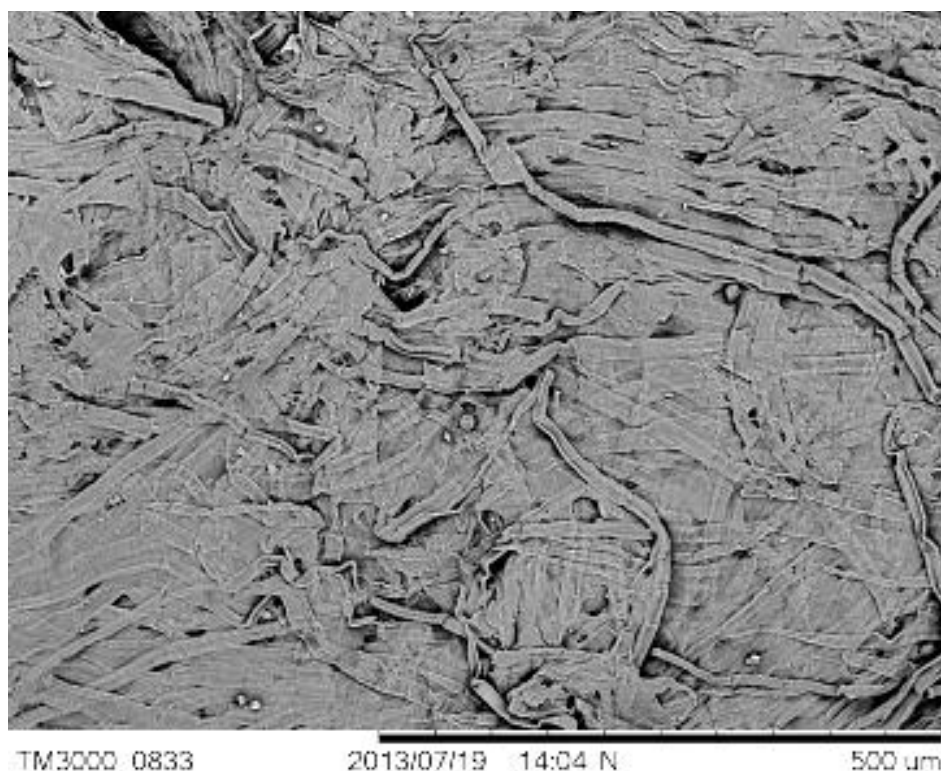


Figura 4. 21 - Scansione al microscopio di un foglio di *Nanopulp*

Stando alla società produttrice Suzano, le fibre di *Nanopulp* hanno un diametro nominale compreso tra 20 e 50 *nm* ed una densità pari a 1,4 *kg/dm³*. La concentrazione delle parti solide è dell'ordine di 1,5 % per litro di sospensione. Questo valore sta ad indicare che si hanno 15 grammi di *Nano fibers* per litro.

Le fibre utilizzate per la ricerca sono quelle in forma acquosa. La presenza di fibre in sospensione acquosa, però, modifica il mix design da utilizzare. Infatti si ha presenza di acqua libera assieme alle fibre e tale acqua altera i rapporti acqua/cemento. Per mantenere i rapporti a/c costanti per tutta la ricerca, si è quindi dovuto rettificare la quantità di acqua per l'idratazione del cemento. La quantità di fibre presenti in un litro di soluzione è abbastanza modesta, quindi il rapporto utilizzato è 1 a 1. Per tale caratteristica, risulta quindi impossibile ottenere un mix design che abbia al suo interno una percentuale di fibre *Nanopulp* che sia maggiore del 0,2% sul volume. Come si vedrà successivamente nel paragrafo relativo alla miscelazione, le fibre andranno aggiunte durante l'apposita fase che normalmente è l'ultima. In questo caso, però, parte dell'acqua che serve al cemento per l'idratazione è assieme alle fibre. Quindi si procede a miscelare le fibre prima ancora di aver aggiunto la sabbia. La prematura presenza di fibre nell'impasto comporta una perdita di lavorabilità del composto allo stato fresco. Per mantenere un livello di compattezza e lavorabilità adeguato, si consiglia di aggiungere una quantità maggiore di superfluidificante. Nella ricerca è stato aggiunto, ulteriormente a quello normalmente previsto, in quantità pari ad un decimo di quello di progetto.

❖ Mix di fibre

Nella Tab. 4.6 di seguito vengono quindi descritte la quantità da utilizzare nei mix design per una quantità di fibre sul volume pari a 1,28% sul Volume.

Fibre al 1,28 % sul Volume	Quantità [kg/m ³]
Acciaio	100
Sisal	14,1
Eucalyptus	21,4
Nano Cellulosa (Acq.) – 0,2 % sul Volume	186
Nano Cellulosa (Polvere)	17,8

Tabella 4. 6 - Quantità di fibre in rapporto al Volume

Avendo a disposizione tutte queste fibre di diversa forma e dimensione, si è arrivati a realizzare una quantità di mix design diversi che prevedono l'uso di fibre da sole o mescolate tra di loro. Di seguito (Tab 4.7) si tracciano le varie combinazioni di fibre prese in considerazione che hanno poi effettivamente sono state realizzate e studiate.

Fibre	% sul Vol
Steel	1,28
Sisal Saturo	1,28
Sisal NON-Saturato	1,28
Steel + Sisal Non-Saturo	0,64 + 0,64
Sisal Non-Sat. + Eucalyptus	0,64 + 0,64
Sisal Non-Sat. + Nano Cellulosa (Acq.)	1,18 + 0,1
Sisal Non-Sat. + Nano Cellulosa (polvere)	0,64 + 0,64

Tabella 4. 7 - Differenti combinazioni di fibre e loro percentuale sul volume

4.3 Campagna ritiro

Accanto alla campagna per valutare il self-healing in funzione delle condizioni d'esposizione e la durata della terapia, si è svolta una campagna che andasse ad indagare sull'effetto delle fibre sul ritiro del calcestruzzo. Le indagini svolte analizzano la variazione dimensionale di provini primastici lungo il loro asse longitudinale. Le misurazioni della lunghezza vengono poi accompagnate da analisi relative la variazione del peso del provino perso nel tempo, così da metterle entrambe in relazione per poter meglio analizzare il fenomeno.

4.3.1 Mix Design e realizzazione provini

Sono stati considerati per la campagna del ritiro tutti i mix design che sono rappresentati nella Tab. 4.8. Inoltre i materiali e le loro proprietà utilizzate per la realizzazione dei provini sono identificati dal §4.1. Oltre a quello già elencato, è necessario fare una aggiunta di mix design. Tale mix design ha la particolarità di non presentare fibre al suo interno, né naturali né, tantomeno, d'acciaio. Al suo posto, però, a compensare la mancanza di fibre, si è dovuto aggiungere una quantità di sabbia tale da sopperire a questa mancanza. Questo mix design viene quindi chiamato *Reference* per il suo scopo intrinseco di fornire un confronto con altri mix design che presentano le fibre, al fine di fornire un metodo di paragone univoco e poter valutare l'effetto delle fibre. I mix design che hanno trovato un reale e concreto sviluppo durante la campagna self-healing sono i seguenti:

- I. *Reference*
- II. *Steel*
- III. *Sisal*
 - a. Presaturato in acqua
 - b. Condizioni termogravimetriche ambientali
- IV. *Eucalyptus*
- V. *Nano pulp*

Costituente	Dosaggio [kg/m ³]				
	I.	II.	III.	IV.	V.
Cemento	600	600	600	600	600
Loppa d'altoforno	500	500	500	500	500
Acqua	200	200	200	200	14
Superfluidificante	33	33	33	33	33
Sabbia	1000	982	982	982	982
<i>Sisal</i>			14,1		
<i>Eucalyptus</i>				21,4	
<i>Nanopulp</i>					
<i>Steel</i>		100			186

Tabella 4. 8 - Mix design realizzati per la campagna del ritiro

4.3.1.1 Miscelazione

La realizzazione dei mix design è stata effettuata tramite un rigido protocollo di miscelazione. Haist e Ferrara [96] hanno condotto indagini reologiche su HPRFCCs con fibre d'acciaio in diversa qualità. Il protocollo di miscelazione adottato nella campagna è il seguente, il quale prende spunto da quello utilizzato da Haist e Ferrara. Tab. 4.9:

Passaggio	Attività	Velocità	Tempo
Fase 1	Mescolamento cemento e loppa	50 rpm	1 min
Fase 2	Aggiunta acqua e superfluidificante ³	50 rpm	1 min
Fase 3	Miscelazione della pasta cementizia	50 rpm	5 min
Fase 4	Aggiunta aggregato fine durante il moto	50 rpm	2 min
Fase 5	Miscelazione della malta	100 rpm	5 min
Fase 6	Aggiunta delle fibre	50 rpm	2,5 min
Fase 7	Miscelazione del composto HPRFCC	100 rpm	5 min
	TOTALE		21,5 m

Tabella 4. 9 - Protocollo di miscelazione per campagna ritiro

In verità, il protocollo adottato in questa ricerca ha subito una modifica rispetto all'originale [96]: nella Fase 6 aggiunta di fibre, originariamente il protocollo adottato da Haist e Ferrara prevedeva l'aggiunta con la mescolatrice a 100 rpm. Nel nostro caso, invece, le fibre se aggiunte a velocità elevata non riuscivano ad essere inglobate nella pasta cementizia durante la miscelazione. Per evitare problematiche relative alla sicurezza, per limitare gli sprechi di materiale e per poter riuscire a realizzare un composto che fosse omogeneo e rispettoso delle caratteristiche attese, si è limitata la velocità di rotazione della pala mescolatrice.

³ Fibre *Nanopulp* vengono introdotte in questa fase assieme all'acqua libera

La mescolatrice che è stata utilizzata per la realizzazione dei getti è una mescolatrice planetaria della Controls con pala singola in acciaio inossidabile (Fig. 4.22). Ha la possibilità di ruotare a 7 velocità. Le due interessate dalla ricerca erano quelle indicate sul bordo della mescolatrice con un colore azzurro. La capienza massima del recipiente è di 1,2 litri di materiale.

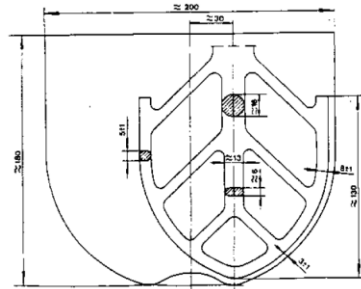


Figura 4. 22 - Mescolatrice planetaria [99]



Figura 4.23- Miscelatrice orbitale e recipiente



Figura 4.24 - Fase 1 della miscelazione



Figura 4.25 - Miscelazione del composto HPFRCC

Qui sopra sono mostrate alcune foto della fase di miscelazione del materiale. Fig. 4.23/24/25. Si nota, nell'ultima immagine, che la miscelazione è avvenuta a "bagnomaria" (Fig 4.27). La mescolatrice è dotata di un motore potente, ma il composto HPFRCC risultava lo stesso difficile da mescolare. Questo generava forze di attrito interne che andavano a scaldare il calcestruzzo allo stato fresco facendo salire la temperatura della

miscela, soprattutto quando ad essa venivano aggiunti aggregati fini e successivamente le fibre. Il maggiore calore risultava in una evaporazione dell'acqua di impasto, già limitata. Il risultato era un composto estremamente asciutto e farinoso, difficilmente adatto ad essere gettato dentro i casseri. La Fig. 4.26 mostra calcestruzzo fresco mescolato senza essere raffreddato a bagnomaria. Le maggiori difficoltà si avevano all'aggiunta degli aggregati e successivamente delle fibre dentro il composto. La procedura, quindi, ha previsto l'utilizzo di un ausilio indiretto per tenere sotto controllo l'aumento della temperatura del composto in fase di realizzazione. I primi espedienti usati sono stati: l'uso di acqua a temperature basse, lo strofinamento di garze inzuppate d'acqua tutt'attorno al recipiente durante la miscelazione, per poi arrivare in ultimo all'utilizzo di una bacinella ricolma d'acqua. Si è assunto come l'aumento di calore potesse ridurre l'acqua disponibile all'idratazione, già relativamente bassa, portando il rapporto a/c al di sotto di quello stabilito di progetto pari a 0,3. Valori minori di a/c avrebbero reso impossibile poter effettuare il getto.



Figura 4. 26 - Risultato dopo una miscelazione senza raffreddamento indiretto



Figura 4. 27 - Miscelazione a bagnomaria

4.3.1.2 Realizzazione dei provini

A differenza della campagna self-healing, la procedura di getto per i provini è decisamente più semplice per la campagna ritiro. Le modalità realizzative non permettono di considerare l'allineamento delle fibre all'interno del provino. In questo caso la dispersione delle fibre non è stata oggetto di valutazione. Le fibre sono state considerate uniformemente disperse in maniera del tutto casuale e senza direzione principale.

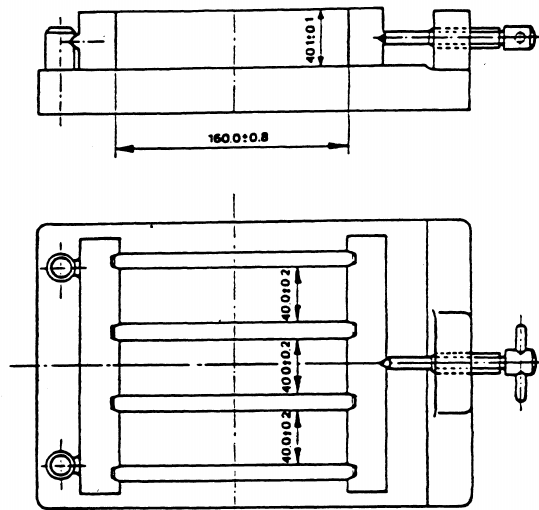


Figura 4. 28 - *Three gang* cassero per la realizzazione dei provini [99]

Tutte le procedure sono state eseguite come le norme prestabiliscono [97, 98, 99]. Il getto viene colato dentro a dei casseri metallici composti da tre scompartimenti a se stanti di dimensioni di $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ (Fig. 4.28) alle cui terminazioni sono presenti dei perni metallici avvitati al bordo del cassero stesso. La procedura del getto inizia dopo aver predisposto il cassero con adeguato disarmante in modo tale che lo scasseramento possa avvenire senza problematiche. Particolare attenzione deve essere posta a non usare il disarmante sui perni metallici alle due estremità, questo potrebbe compromettere le misure del ritiro. Una volta applicato il disarmante si procede con la prima colata della malta dentro il cassero, avendo cura di riempirlo di una quantità pari a circa il 50% del suo volume complessivo. Successivamente si procede a premere con una apposita lamella metallica il composto dentro il cassero sulle estremità con i perni in modo tale da garantirne una migliore adesione con il materiale stesso. Successivamente, si pone il cassero su una tavola vibrante, che viene fatta vibrare 60 volte in un minuto con una cadenza al secondo. Successivamente si versa un'ulteriore quantità di materiale nel cassero, avendo cura di riempirlo fin sopra l'orlo. Successivamente il cassero viene fatto vibrare nuovamente, poi si rimuove la parte metallica di invito al getto, e tramite lamella metallica, si procede con l'eliminazione della parte in eccesso del materiale. Dato che il materiale utilizzato è particolarmente coeso e resistente, la procedura è risultata molto laboriosa. La lamella veniva posta a metà del cassero e poi veniva "segata" via la parte in avanzo. Tale operazione doveva essere effettuata in maniera lentamente, altrimenti si correva il rischio che si asportasse anche del materiale che era dentro il cassero. A seguire si copriva il cassero con un vetro su cui si era applicato del disarmante, e si lasciava stagionare in camera umida (20° C e 90% U.R.) per le successive 24 ore. Dopo $24 (\pm 1)$ ore si è proceduto allo scasseramento, avendo cura di segnare l'esatto tempo trascorso per la maturazione in quanto influisce sulle misurazioni da ritiro [97, 98, 99].

Per ogni getto si è realizzata una quantità di materiale che fosse pari a 1,1 litri che andavano poi successivamente utilizzati sia per le prove reologiche, reometro e mini slup test, e per la realizzazione di 3 provini. Il volume di ogni provino è di 0,256 litri di materiale e ogni forma quindi necessita di una quantità pari a 768 cm³. Ne consegue che ogni forma ha avuto il suo getto, non era possibile riuscire a riempire due forme per intero e creare quindi 6 provini con una sola miscelazione.

La procedura di scasseramento è particolarmente sensibile: non bisogna alterare la stabilità del pernino metallico e del suo intorno affinché le successive misurazioni non vengano alterate. Una mancata stabilità del pernino lo rende instabile e può generare un continuo, seppur minimo, spostamento che porta a misurazioni imprecise e variabili.

Per scasserare si procede innanzitutto a svitare le teste dei bulloni che legano i pernini metallici al cassero. Deve essere utilizzata cautela in questa fase, data la precoce maturazione del provino e quindi della bassa resistenza meccanica sviluppata. Una volta svitati con cura, si procede alla rimozione delle parti metalliche che compongono il cassero. La campagna prevede lo studio e l'analisi del ritiro sia autogeno sia da essiccamento. I provini che sono destinati allo studio del ritiro autogeno vengono ricoperti con più fogli di alluminio in maniera tale che lo scambio di umidità con l'esterno sia il più limitato possibile.



Figura 4. 29 - Provini prismatici 40x40x160 per le misurazioni a ritiro autogeno (sopra) e totale (sotto)

Successivamente, tutti i provini sono stati identificati con una faccia principale e indicazioni su quale deve essere la parte alta in modo tale che le misurazioni non potessero avere vizi di forma, come si nota nella Fig. 4.29.

4.3.2 Analisi del ritiro

Il ritiro è una variazione di volume che subisce il calcestruzzo durante la fase di presa e di indurimento causata dalla progressiva eliminazione dell'acqua contenuta nella pasta cementizia. Tale fenomeno è indipendente dal carico, poiché avviene anche in assenza di carichi applicati e determina una contrazione del getto quando la maturazione avviene in aria. Questo fenomeno è tanto più marcato quanto più è rapida la perdita d'acqua dalla massa di calcestruzzo.

Per ogni mix design si sono realizzati 6 provini prismatici, metà utilizzati per misurare il ritiro autogeno e l'altra metà per quello totale, come visto in Fig. 4.29. Per meglio misurare il ritiro da essiccamento, tutti i provini sono stati lasciati in camera secca a temperatura e umidità controllata con temperatura ambientale di $20 (\pm 1)^\circ\text{C}$ e umidità relativa $50 (\pm 5)\%$.

La durata delle analisi è stata di 28 giorni. In questo arco temporale sono state fatte misurazioni riguardo la variazione lineare del provino lungo la sua dimensione longitudinale e contemporaneamente è stato misurato il peso del provino. Le misure sono state prese quotidianamente e più nello specifico si è seguito quanto segue:

- $1^\circ / 2^\circ$ giorno: misure ogni 30 minuti
- $3^\circ / 5^\circ$ giorno: misure prese ogni ora
- $6^\circ / 10^\circ$ giorno: misure misure ogni 4 ore
- $11^\circ / 28^\circ$ giorno: due misure al giorno

Si ha una variazione dimensionale maggiore all'inizio del periodo di prova, tant'è che per ottenere risultati più precisi si sono scelti intervalli di misurazione molto ravvicinati tra di loro, così da poter ottenere una variazione lineare minore e una successiva migliore analisi e comprensione degli effetti.



Figura 4.30 - Estensimetro lineare per la misurazione del ritiro assiale

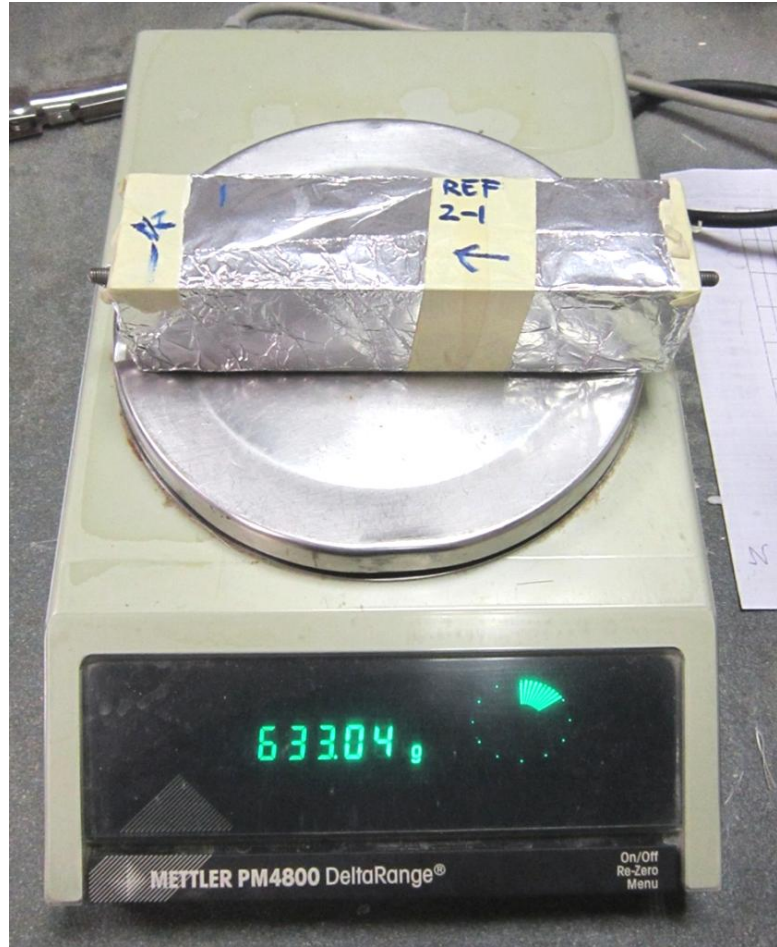


Figura 4.31 - Bilancia di precisione

Tramite estensimetro digitale, come quello in Fig. 4.30, è stato possibile misurare la variazione assiale dovute al ritiro, sia autogeno che da essiccamento. Lo strumento di analisi forniva la variazione rispetto ad un valore di riferimento fornito da un distanziatore di calibrazione a misura nota. Questo distanziatore è l'elemento nero nella Fig. 4.30. La sua dimensione longitudinale è pari a $160000 \mu m$ e quindi tutte le misurazioni non riportavano il valore assoluto, ma un valore relativo a quello di riferimento. Lo strumento quindi ha un fattore di scala di $0,001 mm$ così da poter misurare la variazione anche di un singolo *micron*. La variazione viene effettuata in funzione del primo valore che viene misurato, all'incirca 24 ore dopo la miscelazione. Le formule utilizzate per misurare la contrazione sono le seguenti:

$$\Delta L_i(t) = L_i(t) - L_0 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Dove con:

- $\Delta L_i(t)$ Variazione lineare lungo l'asse longitudinale del provino nel tempo
- $L_i(t)$ Misurazione all'istante *i-esimo* della lunghezza del provino
- L_0 Lunghezza di riferimento presa all'istante $t=0$

In questo modo si ottiene una variazione di lunghezza nel tempo. Accanto al valore assoluto misurato come contrazione, si è proceduto alla misura degli effetti deformativi avvenuti lungo tutta la lunghezza del provino. Per ottenere la deformazione si è quindi diviso il $\Delta L(t)$ per la lunghezza totale iniziale del provino, ottenendo quindi:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta L_i(t)}{L_{tot}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

La posizione dei provini nell'apparato di misura deve essere la stessa per ogni misura. Per garantire ciò, un segno che indichi l'allineamento da adottare deve essere segnato durante la prima misura. Inoltre, prima di prendere nota del valore, è buona prassi far ruotare il provino sui perni metallici una volta inserito dentro lo strumento di misura. Se questo non produce nessuna variazione nella misura, o al più una variazione di $\pm 0,001 \text{ mm}$ vuol dire che la misura può essere registrata come corretta. Se invece la misura ha una variazione più ampia rispetto al range di valori accettabili, vuol dire che lo strumento di misura ha bisogno di essere verificato, oppure che i perni metallici nel provino sono disallineati. Quest'ultima è la più comune causa di eccessivo movimento quando il provino viene fatto ruotare.

Per la variazione del peso è stata utilizzata una bilancia di precisione con scarto di misura pari al centesimo di grammo, Fig. 4.31. Subito dopo aver preso le misure dimensionali, è consigliabile misurare anche la variazione di massa dei provini durante i test. Le variazioni di massa vengono calcolate in riferimento alla massa iniziale del provino, sempre considerata in rapporto a quella iniziale per valutarne la percentuale.

$$m_i(t) = \frac{M_i(t) - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Di seguito è fornita una immagine (Fig. 4.32) che mostra l'andamento in grafico relativo alle misurazioni da ritiro. Si hanno nel grafico sia le misurazioni avute per provini dentro fogli di alluminio per misurare la componente autogena, sia le misurazioni derivanti i provini adibiti alle misurazione del ritiro totale. Successivamente verrà calcolato il ritiro da essiccamento come differenza tra quello globale e quello autogeno, e indicato il rapporto tra lo strain rate da essiccamento e la perdita d'acqua. Inoltre nel capitolo successivo verranno anche ulteriormente analizzati l'andamento delle prove e i loro risultati.

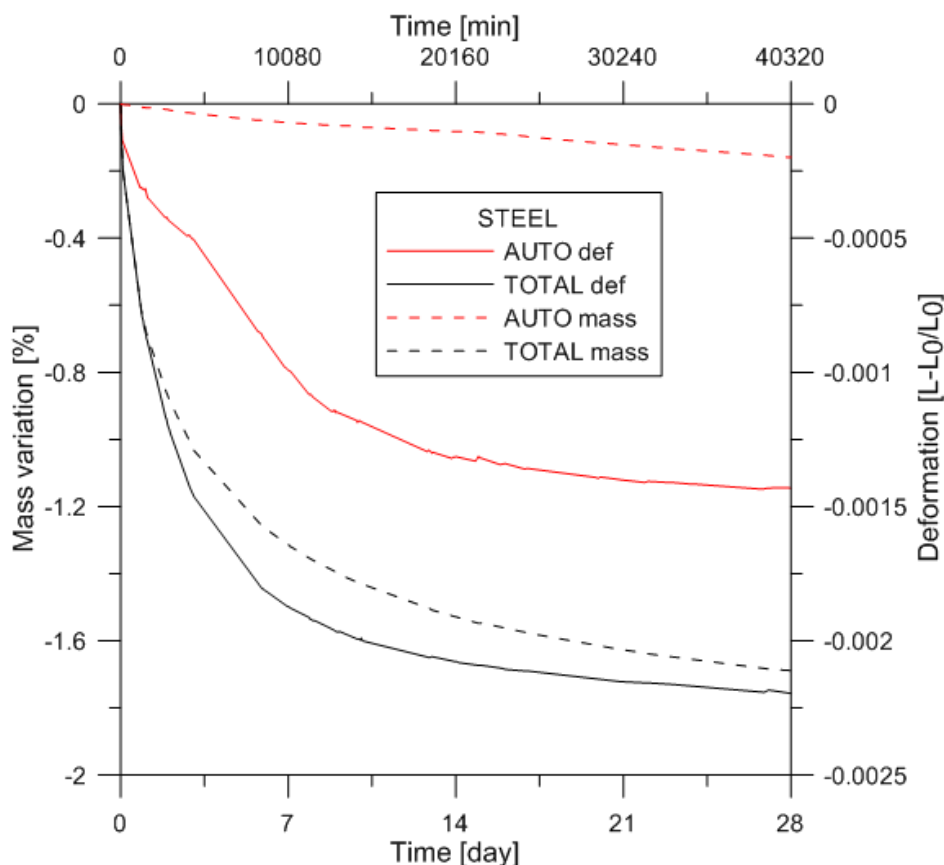


Figura 4. 32 - Grafico del ritiro con fibre Steel

4.3.3 Prove meccaniche

Stando alla normativa UNI 196-1 [99], si possono effettuare prove meccaniche con i provini a prisma rettangolare di $40 \times 40 \times 160$. Al termine delle indagini di ritiro i provini sono stati studiati per le loro resistenze a flessione su 3 punti e poi successivamente a compressione, su i due monconi residui dalle prove a flessione.

La prova a flessione prevede l'appoggio del provino su due appoggi, il quale poi viene soggetto alla pressione da parte di una incudine nel mezzo della sua lunghezza. Per la prova a compressione, invece, si carica il provino tramite una incudine quadrangolare di dimensioni note, pari a $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$.

Si sono avute tempistiche di maturazioni differenti nel corso delle prove meccaniche: si sono utilizzati provini con maturazione di 28 giorni, generalmente quelli utilizzati per il ritiro totale, mentre quelli utilizzati per analizzare il ritiro autogeno sono stati fatti maturare per un periodo più lungo, 85/90 giorni, così da poter confrontare una variazione dovuta ad una maggiore idratazione. I provini testati sono 30: si sono quindi ottenuti 30 risultati per le prove a flessione mentre si sono avuti 60 monconi per le prove a compressione.

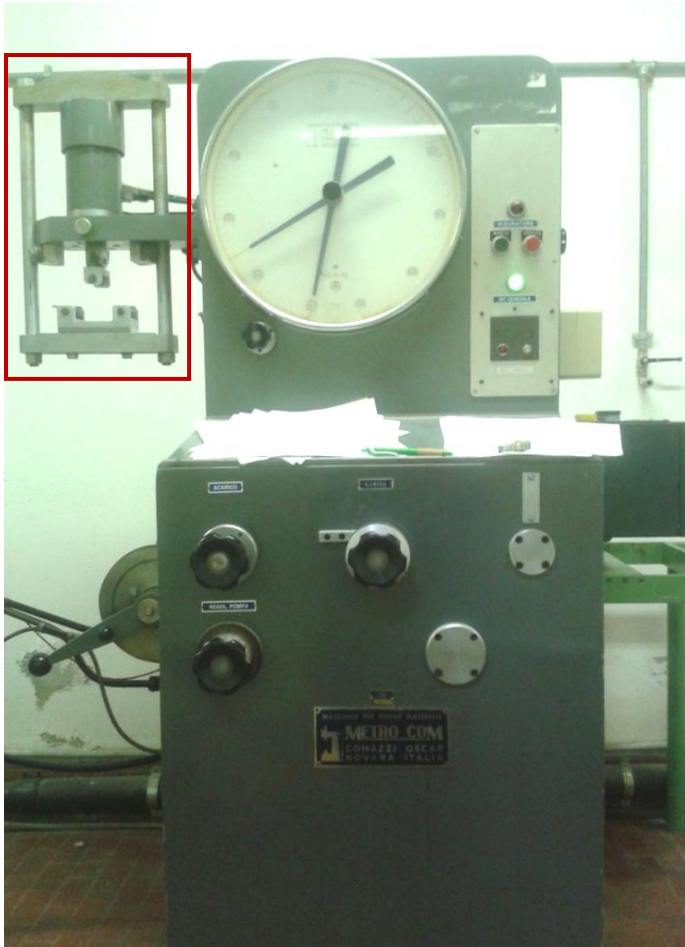


Figura 4. 33 - Foto della pressa idraulica MetroCom



Figura 4. 34 - Telaio per flessione 3 punti

Lo strumento utilizzato è una pressa idraulica, Fig.4.33, della MetroCom che presenta un telaio per le prove a flessione su 3 punti per provini prismatici e una pressa quadrata per le prove a compressione. Lo strumento è stato realizzato secondo quanto specificato nel Regio Decreto del 1939 [100]. I carichi vengono espressi in *kg* anziché in *kN*, così come gli appoggi dello strumento su cui viene posato il provino hanno distanze che si prestano comode per i calcoli per trovare le tensioni interne, espresse infatti in *kg/cm²*, come in Fig. 4.35.

PROVINI RITIRO FERRARA

MARCA	DIMENS. PROVINO			D.M. SEZIONE	FLESSIONE		COMPRESS. 1		COMPRESS. 2	
	Lung.	Larg.	Alt.		totale	unitaria	totale	unitaria	totale	unitaria
	cm	cm	cm		cm ²	kg	kg/cm ²	kg	kg/cm ²	kg
NS 1	76	4	4		525		16050		15300	

Figura 4. 35 - Risultati delle prove meccaniche per i provini post-ritiro

I provini vengono prima provati a flessione, Fig. 4.36/38. Dalla prova a flessione si arriva a rottura del materiale, e successivamente i due tronconi del provino vengono staccati e posti sotto una pressa per condurre una prova a compressione, Fig. 4.37/39.

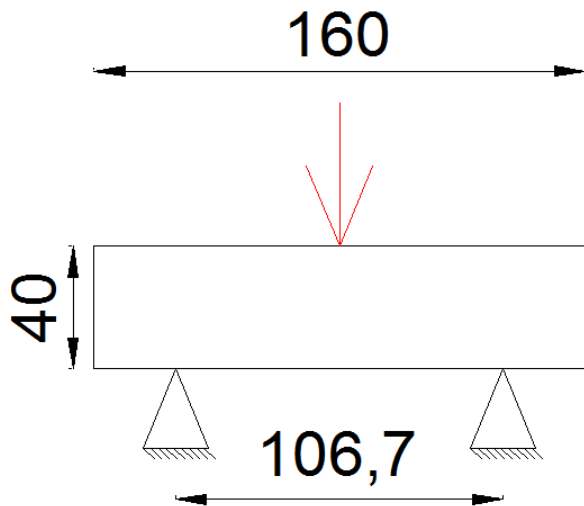


Figura 4. 36 - Schema della prova a flessione su 3 punti

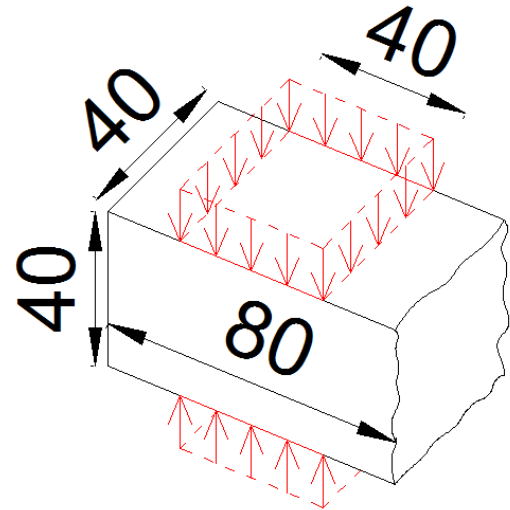


Figura 4. 37 - Schema delle prove a compressione

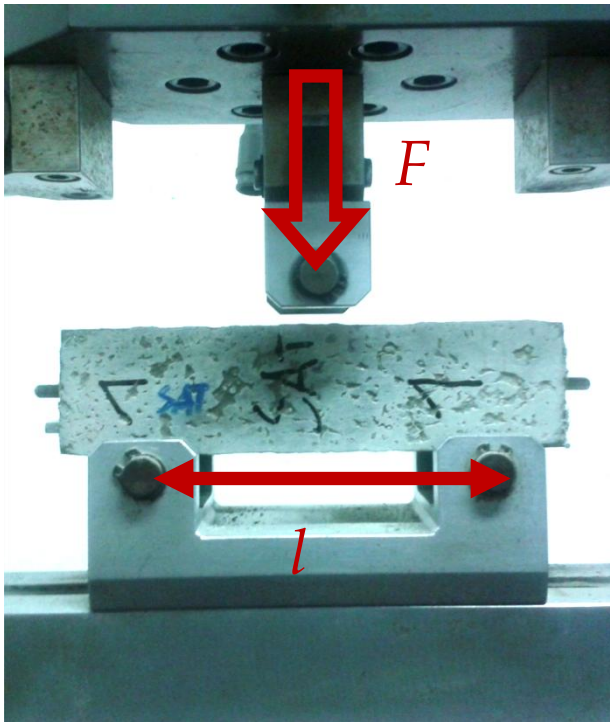


Figura 4. 38 - Prova a flessione su 3 punti



Figura 4. 39 - Prova a compressione semplice

Per calcolare le tensioni che si sono esercitate sul provino alla sua rottura per flessione si è dovuto convertire i *kg* di carico in *kN*, successivamente si determina la tensione resistente del provino stando alle seguenti formule [99]:

$$R_{flex} = \frac{M_{max}}{W} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$W = \frac{1}{6} a^3 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$M = \frac{1}{4} * F * l \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Dove:

- R_{flex} mostra la resistenza a flessione
- W è il modulo della sezione
- a rappresenta la dimensione dell'elemento, pari a 40 mm
- F è la forza esterna applicata dallo strumento di analisi
- l corrisponde alla lunghezza dell'interasse tra i due appoggi

Per quanto riguarda invece le prove a compressione, è stato calcolato lo sforzo come la forza applicata (passando sempre da kg a kN) per unità di area:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{Area} = \frac{F_c}{40 * 40} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Nel capitolo successivo verranno mostrati i risultati delle prove condotte, con enfasi riguardo le modalità di rottura in base alla presenza di macro fibre e la resistenza ottenuta.

4.4 Campagna Self-healing

Il self-healing autogeno è stato uno dei principali elementi di valutazione dell'intera campagna di ricerca. Sono stati gettati numerosi provini, con diversi mix design, e la ricerca prevede un lavoro che continua nel tempo. Le valutazioni effettuate prevedono l'esecuzione di prove meccaniche e accompagnate da indagini al microscopio. Il principale elemento di analisi è stato il recupero di diverse proprietà meccaniche (resistenza massima, rigidità, duttilità, durezza ecc.) dopo un periodo di cura. Tramite prove a flessione su 4 punti prima e dopo questo periodo di cura, è stato possibile valutarne se e come sia avvenuto un miglioramento nella proprietà meccaniche. L'entità di questo recupero è stata oggetto di analisi. Accanto alle prove meccaniche, si è inoltre valutata l'ampiezza della/e fessura/e sia all'inizio del periodo di cura sia al suo termine. In alcuni casi è stata condotta una analisi più approfondita con immagini prese in tempi diversi durante il periodo di cura. Un altro metodo di indagine per un tipo particolare di mix design (*Sisal Hybrid*) ha visto inoltre l'andamento della quantità di acqua assorbita durante cicli di bagnazione alternati ad esposizioni in ambienti chiusi.

Le variabili che sono state tenute in considerazione durante la campagna sperimentale sono le seguenti:

- Ampiezza e numero di fessure
 - 0,5 mm
 - 0,5 mm dopo aver raggiunto la resistenza di picco
- Direzione delle fibre

- Ortogonali all'asse longitudinale del provino
 - Paralleli all'asse longitudinale del provino
- Tempo di esposizione, periodo di cura
 - 3 mesi
 - 6 mesi
 - 12 mesi
- Tipologia di esposizione
 - Acqua
 - Camera umida (20° C e 90% U.R.)
 - Camera secca (20° C e 50% U.R.)
 - Cicli asciutto/bagnato giornalieri
 - Cicli asciutto/bagnato particolari
- Tempo di maturazione
 - 1 mese di stagionatura dei provini in camera umida
 - 6 mesi di stagionatura dei provini in camera umida
- Assorbimento relativo di acqua in provini con solo fibre naturali in diversi ambienti
 - Quantità di acqua in ambiente umido
 - Quantità di acqua in completa immersione
 - Quantità di acqua in ambiente interno

4.4.1 Realizzazione dei provini

Per la campagna di self-healing si è proceduto alla realizzazione di numerosi provini di calcestruzzo fibrorinforzato. Controllando la dispersione delle fibre dentro la matrice del calcestruzzo si potrebbe ottenere una riduzione di costo mantenendo le stesse prestazioni. Questo è possibile riuscendo a distribuire le fibre all'interno della matrice in direzione parallela agli sforzi di trazione, così da poterne sfruttare meglio le proprietà di rinforzo. Studi precedentemente condotti [89, 91], indicano come un attento getto del calcestruzzo allo stato fresco possa governare la dispersione delle fibre al suo interno.

La campagna self-healing condotta fino a questo momento ha visto la realizzazione di diversi mix design. Ne sono stati realizzati in 5 forme diverse dove si cambiano solo le fibre usate e la loro percentuale sul volume totale:

- I. *Steel + Sisal* (100 provini)
- II. *Sisal*
 - Presaturato (10 provini)
 - Asciutto (10 provini)
- III. *Sisal + Eucalyptus* (10 provini)
- IV. *Sisal + Nanopulp* (10 provini)

La Tabella 4.10 di seguito ne descrive il mix design.

Costituente	Dosaggio [kg/m ³]			
	I.	II.	III.	IV:
Cemento	600	600	600	600
Loppa d'altoforno	500	500	500	500
Acqua	200	200	200	107
Superfluidificante	33	33	33	33
Sabbia	982	982	982	982
<i>Sisal</i>	7,05	14,1	7,05	7,05
<i>Eucalyptus</i>			10,7	
<i>Nanopulp</i>				93
<i>Steel</i>	50			

Tabella 4. 10 - Mix design impiegati per la campagna self-healing

4.4.2.1 Getto

Il getto è stato fatto con i materiali sopra descritti. Propedeutica al getto c'è la parte di preparazione dei materiali: setacciare la sabbia, pesare i materiali e sistemare le fibre. Successivamente si procede con la vera e propria miscelazione del calcestruzzo. La miscelatrice usata è della Controls (Fig. 4.40 in alto) e può miscelare fino a 40 litri con velocità costante, sita nel laboratorio del D.I.C.A. del Politecnico di Milano – Sala getti e taglierine. Sono stati miscelati i componenti per una quantità di calcestruzzo che fosse di 10 litri, a cui è stata fatta aggiunta del 10% per ottenere un risultato finale che non avesse meno materiale di quello prestabilito, compensando le perdite di materiale durante il getto. La miscelazione ha visto due particolari sviluppi in base al tipo di fibra usata: nel caso di *Nanopulp* le fibre sono in soluzione acquosa, la quale acqua è necessaria anche per la corretta idratazione del cemento in fase di getto. A seguire la Tabella 4.11 con la sequenza seguita per la miscelazione e la tempistica dei vari passaggi.

Passaggio	Attività	Tempo
Fase 1	Miscelamento cemento e loppa	1 min
Fase 2	Aggiunta acqua e superfluidificante ⁴	1,5 min
Fase 3	Miscelazione della pasta cementizia	5 min
Fase 4	Riposo	1 min
Fase 5	Aggiunta aggregato fine	2,5 min
Fase 6	Miscelazione della malta	5 min
Fase 7	Riposo	1 min
Fase 8	Aggiunta delle fibre	3 min
Fase 9	Miscelazione del composto HPRFCC	10 min
	TOTALE	30 min

Tabella 4. 11 - Fasi di miscelazione del calcestruzzo HPRFCCs

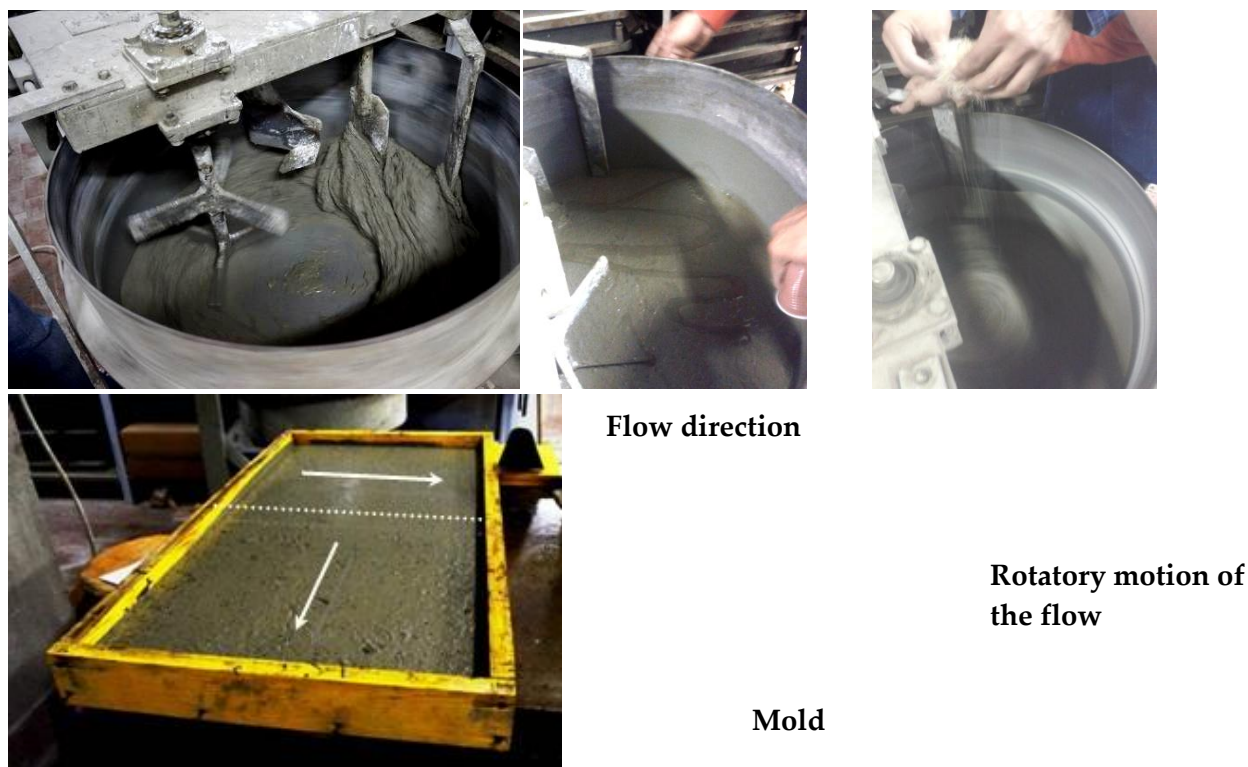


Figura 4. 40 - IN ALTO: da SX - miscelazione del getto - aggiunta di superfluidificante - aggiunta di fibre
IN BASSO: da SX – cassero con calcestruzzo allo stato fresco – principio di allineamento delle fibre [3]

Sfruttando la pluriennale conoscenza dei tecnici, prima di mescolare i leganti si è messo sul fondo della miscelatrice un sottilissimo strato di sabbia. La giusta quantità è relativa, non si ha una dose specifica: l'importante è che formi uno strato di separazione tra i

⁴ Aggiunta di fibre *Nanopulp*, nei mix che ne prevedono l'impiego.

leganti e il fondo della miscelatrice onde migliorare il mescolamento una volta che viene aggiunta l'acqua d'impasto.

Le fasi devono essere monitorate visivamente durante tutta la procedura di miscelazione per garantire un corretto svolgimento. Qualora nelle fasi di riposo si fosse notata una non perfetta ed omogenea miscelazione dei componenti, allora si sarebbe dovuto far passare un giro di cazzuola lungo tutto il perimetro della miscelatrice. Qualora anche con la sistemazione manuale della miscelazione si fosse notata una bassa fluidità d'impasto, come detto in precedenza, è stata valutata volta per volta l'aggiunta all'occorrenza di una quantità di superfluidificante pari al 10% di quello di progetto. Il controllo di fluidità viene fatto sia visivamente – come il composto si comporta durante la rotazione delle pale dentro la miscelatrice, sia manualmente durante la Fase 7 di Riposo tramite cazzuola.

Le fibre hanno la necessità di venire aggiunte con particolare perizia: se immesse al composto in quantità eccessive senza essere prima setacciate, o comunque divise cercando di separarle singolarmente, possono creare accumuli indesiderati di materiale. Questo fenomeno però non è stato evidenziato in nessun getto.

A miscelazione ultimata, inizia la fase del getto: di fondamentale importanza per la corretta realizzazione di provini e la giusta disposizione delle fibre al loro interno. Affinchè le fibre siano disposte correttamente, ottenendo quindi una direzione preferenziale, dentro la matrice cementizia, bisogna garantire una corretta fluidità del composto allo stato fresco e una metodologia di getto particolare. Il calcestruzzo deve essere colato in un punto sul bordo del cassero e tramite una leggera pendenza fatto percorrere lungo tutto il cassero. La velocità di fuoriuscita del calcestruzzo fresco dalla miscelatrice deve essere bassa, così come la velocità di propagazione del getto stesso dentro il cassero. La pendenza è stata realizzata alzando il lato a monte con uno spessore posto sotto il cassero stesso. Il processo di allineamento delle fibre può essere visto nella Fig. 4.40 in basso a destra. Il getto, soggetto ad una lieve pendenza, avrà un moto rotatorio promosso dalla gravità. La parte superiore del composto fresco andrà a depositarsi sulla parte inferiore del cassero tramite rotazione. In questo modo le fibre al suo interno seguiranno la rotazione ed andranno ad allinearsi parallelamente alla direzione del getto nella zona a diretto contatto con il cassero. Affinchè ciò porti ai risultati sperati, è necessario che la velocità di propagazione del getto sia molto bassa, altrimenti il calcestruzzo fresco a contatto con il cassero andrà a spostarsi per gravità verso il fondo del cassero stesso, disperdendo le fibre prima allineate. Fattore cardine quindi è la corretta viscosità del calcestruzzo che provvede anche a garantire una omogenea distribuzione in spessore del materiale [89, 93, 96].

Al cassero di dimensioni 1000 x 500 x 30 *mm* deve essere applicato del disarmante prima del getto per facilitare le procedura di scasseramento. Ogni cassero può contenere una

quantità di 15 litri, mentre i getti realizzati prevedono l'uso di solo 11 litri di materiale. Come detto, la struttura era stata pensata per 10 litri, a cui si è aggiunto il 10% "per la pentola" di materiale. Data la particolare configurazione di miscelazione e l'accurata metodologia di getto, si è preferito usare tutto il materiale dentro la miscelatrice in un singolo cassero piuttosto che dividerlo in più casseri. I fattori che hanno guidato questa scelta sono i seguenti:

- Semplicità esecutiva
- Sicurezza per le persone coinvolte nel getto
- Maggior controllo nelle fasi di getto
- Risparmio di materiale

La miscelatrice usata, infatti, prevede il sollevamento della vasca di miscelazione (la ciotola) per poter versare il materiale contenuto al suo interno nel cassero, tramite inclinazione. La vasca di miscelazione in metallo ha di suo una massa non indifferente quando già di per sé il contenuto di 11 litri di calcestruzzo hanno un peso dell'ordine di 26 kilogrammi. Per salvaguardare la corretta realizzazione dei provini, della salute degli operanti, operando al contempo un maggior controllo sulle fasi di getto si è quindi optato per la realizzazione di una singola lastra per getto. Questa quindi avrà dimensioni di 1000 x 500 x 22 *mm* circa.

Successivamente al getto, le lastre sono state conservate sotto un telo di polietilene per un giorno e scasserate nelle 24 ore successive. La stagionatura è avvenuta in stanza a parametri ambientali controllati di 20 ± 1 ° C umidità relativa pari a 95 ± 5 % per due periodi: 1 mese e 6 mesi.

Per la campagna sperimentale del self-healing sono stati realizzati in totale una quantità 154 litri di calcestruzzo che equivalgono ad un numero di lastre e getti di 14.

4.4.2.2 Taglio e nomenclatura provini

Una volta che il materiale abbia maturato abbastanza resistenza e rigidità si è proceduto con il taglio delle lastre per la realizzazione dei provini. Da ogni lastra si sono ricavati 10 provini, ciascuno con dimensioni di 500 x 100 x 22 *mm*. Le lastre vengono tagliate con lama circolare (Fig. 4.41). Il taglio porta via con sé del materiale (nominalmente 0,5 cm per taglio), quindi le dimensioni effettive del singolo provino sono nell'intorno di quelle sopra riportate. Si è misurata una dimensione media di (misurata solo per i provini *Steel+Sisal*) pari a 498,9 x 95,9 x 20,2 *mm*. Per il calcolo degli sforzi nel singolo provino si sono usate le dimensioni realmente misurate e non quelle nominali.



Figura 4. 41 - Taglio delle lastre con lama circolare (SX) e provini tagliati (DX)

La realizzazione del taglio avviene con lo scopo di ottenere due tipologie di provini al cui interno le fibre siano orientate in un caso parallelamente all'asse degli sforzi, mentre nell'altro caso in maniera perpendicolare a tale asse. Questo avviene sapendo che le fibre all'interno della lastra seguono l'andamento del flusso del getto. Tagliando le lastre come indicato nella Figura 4.42 si possono quindi ottenere i risultati desiderati. Nella parte a sinistra dell'immagine è raffigurata la teorica dispersione delle fibre al propagarsi del getto. Le linee tratteggiate blue con frecce indicano l'allineamento medio delle fibre dentro la matrice cementizia, mentre quelle circolari rappresentano il presunto andamento del getto nel cassero. In figura è anche indicato il taglio dei provini. Ciò porta alla realizzazione di provini di uguale dimensione, ma con caratteristiche completamente differenti: al loro interno le fibre sono disposte in maniera differente. Tale assunzione è stata studiata in precedenza e si è potuto valutarne la correttezza [89, 91, 92, 93] Si vengono a creare da una singola lastra 10 provini. Ogni lastra è stata tagliata come in Fig. 4.49 e si sono quindi ottenuti:

- 5 provini con dispersione di fibre ortogonali all'asse longitudinale del provino (provini T)
- 5 provini con dispersione di fibre paralleli all'asse longitudinale del provino (provini II)

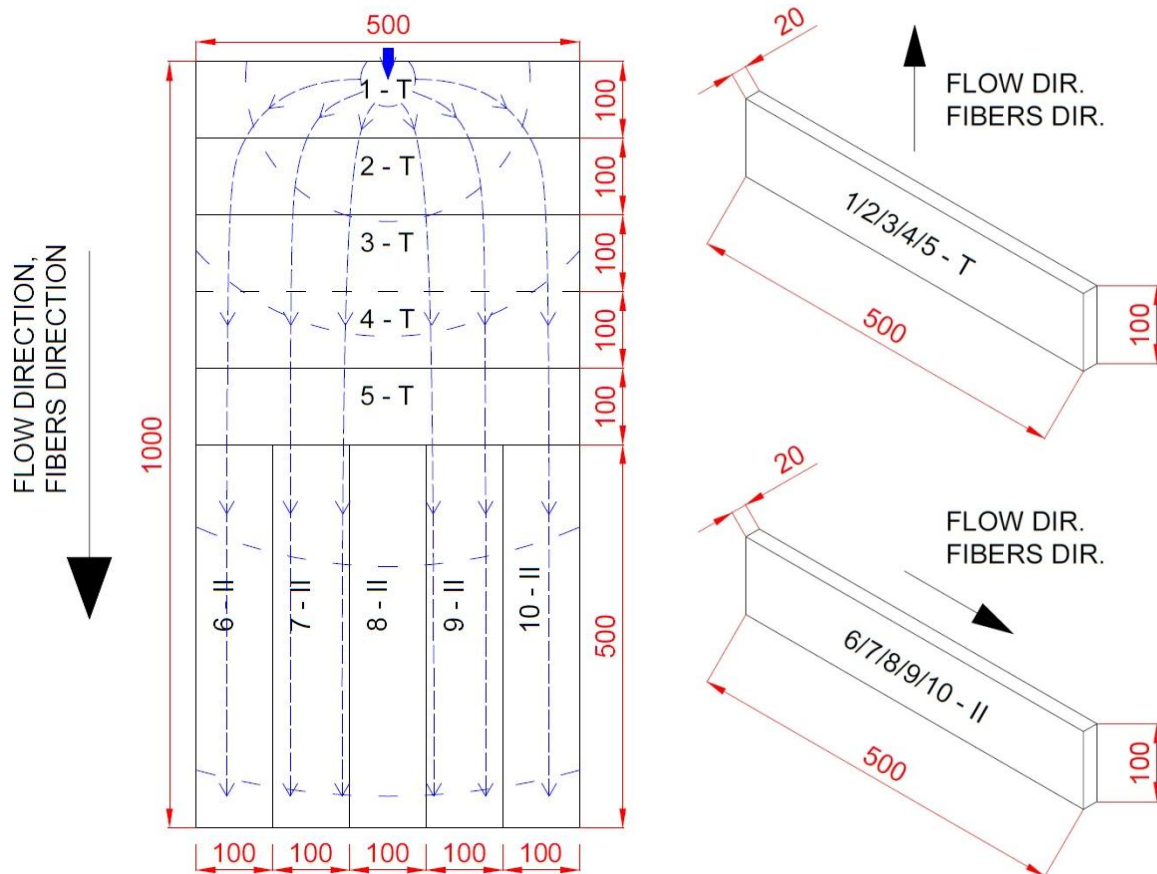


Figura 4. 42 - Distribuzione del getto nella lastra, dispersione delle fibre e taglio dei provini

Le fibre disperse in maniera differente all'interno del provino portano a due comportamenti diversi a seguito di prove a flessione. Nella maggior parte dei casi, come vedremo meglio in seguito, i provini con fibre parallele (II) avranno un comportamento a carattere incrudente (*deflection hardening*) mentre quelli con fibre ortogonali (T) seguono un andamento degradante (*deflection softening*). Malgrado la sequenza di getto sia stata corretta in tutte e 14 le realizzazioni, si è però potuto notare un "effetto di bordo" in uno dei provini. Il provino in questione è uno del mix design *Steel+Sisal* e in particolare 1 - T. Questo particolare "effetto di bordo" è un fenomeno che si verifica quando le fibre non riescono ad allinearsi durante il getto a causa di una velocità di dispersione più alta o se il calcestruzzo viene gettato in una posizione meno prossima al bordo. Le fibre non completamente allineate possono portare a comportamenti non desiderati: nel caso in particolare non si è ottenuto un effetto degradante (*deflection softening*), ma di tipo incrudente (*deflection hardening*).

La realizzazione di 14 lastre in un arco temporale limitato, il taglio dei 140 provini tutti di dimensioni e forma uguali ma con la fondamentale differenza del mix design e della

disposizione delle fibre al loro interno ha necessitato che ogni singolo provino fosse identificato tramite sigla univoca.

La sigla è composta da elementi alfanumerici ed è divisa in tre parti. La parte iniziale vuole indicare il mix design e la presenza o meno di fibre d'acciaio accanto a quelle naturali oppure se sono interamente naturali. La parte centrale è quella particolare della singola lastra, mentre la parte finale indica il singolo provino, il suo orientamento delle fibre e la posizione nella lastra. A seguire viene fornita un esempio di nomenclatura dei un singolo provino

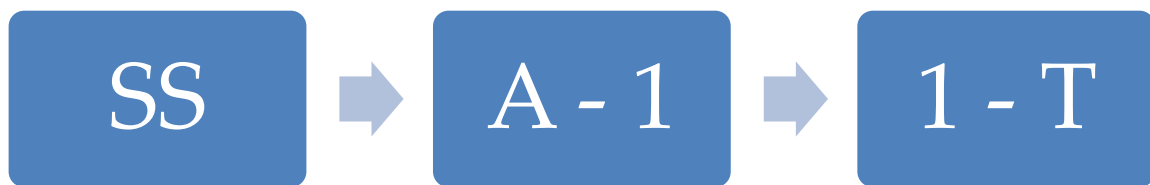


Figura 4. 43 - Esempio di nomenclatura dei provini

- I. SS Indica il mix design della lastra:
 - SS: *Steel+Sisal*
 - 100 provini
 - NS: *Sisal Non-Saturated*
 - 10 provini
 - SAT: *Sisal presaturated*
 - 10 provini
 - EU: *Sisal+Eucalyptus*
 - 10 provini
 - NP: *Sisal+Nanopulp*
 - 10 provini
- II. A - 1 La lettera indica la singola lastra, il numero indica la progressione seriale
 - A - 1/3
 - B - 1
 - C - 1
 - D - 1/2
 - E - 1/4
 - F - 1/3
- III. 1 - T Indica l'effettiva posizione nella lastra (cfr. Fig 4.49)
 - 1/5 - T
 - 6/10 - II

La Tabella 4.12 di seguito fornisce le indicazioni riguardo le lastre: dalla data di getto al comportamento atteso dei provini.

Mix Design	Sigla lastra	Comportamento	Data getto	Stagionatura
SS	A-1/3	Hardening Softneing	+ 16/10/2013	1 mese
	E-1/4	Hardening Softneing	+ 24/10/2013	1 mese
	F-1/3	Softening	17/12/2013	6 mesi
NSAT	D-1	Softening	11/10/2013	1 mese
SAT	D-2	Softening	11/10/2013	1 mese
EUC	B-1	Softening	15/10/2013	1 mese
NP	C-1	Softening	15/10/2013	1 mese

Tabella 4. 12 - Mix design, nome lastre e data del getto

Le lastre create per le campagna self-healing seguono un andamento progressivo: dalle lastre A alle lastre F. La progressione delle lettere indica l'andamento dei tagli delle lastre e quindi alla creazione dei provini. La prima lastra tagliata è la lastra A - 1 e l'ultima è la F - 3.

A seguito del getto, le lastre sono state conservate in camera umida a stagionare per un periodo di 1 mese

A taglio compiuto e prima dell'inizio delle prove, i provini sono stati marcati con delle linee. Queste linee con le dimensioni in Fig. 4.44 indicano le distanze che si hanno tra i vari elementi della pressa. Le linee centrali indicano dove devono essere applicate la lame di carico, mentre la linee presso i bordi corti indicano le basi di appoggio, da una parte un vincolo a cernaiera, l'altro a carrello.

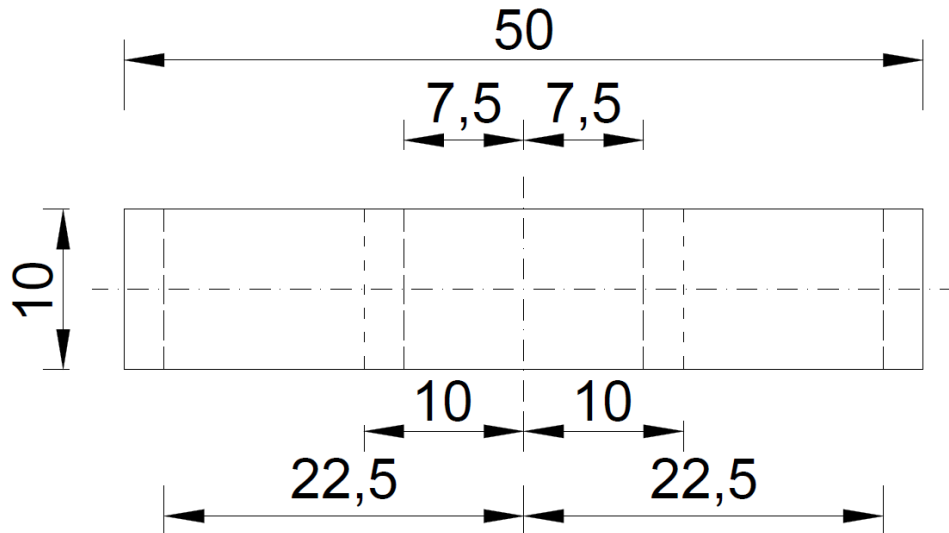


Figura 4. 44 - Tracciamento delle linee sui provini

- Le linee più lontane dalla mezzeria, di misura 22,5 cm, sono le linee di appoggio del provino durante l'esecuzione delle prove a flessione
- Le linee distanti 10 cm dalla mezzeria identificano le zone dove devono essere installati i blocchetti di contrasto per gli estensimetri
- I due tratti centrali di distanza 7,5 cm dal centro indicano dove le lame di carico per la prova di flessione a 4 punti devono essere applicate

Durante le prove è doveroso verificare che il provino sia correttamente posizionato e quindi che tutte le linee combacino sia con gli appoggi sia con le lame di carico. Per migliorare la precisione ed evitare aleatorietà nello svolgimento della prova, una più precisa misurazione della distanza *effettiva* della lama di carico dal bordo del provino veniva eseguita manualmente su entrambi i lati del provino con una squadretta.

4.4.2 Programma delle prove

La campagna self-healing prevede tre fasi:

1. Prefessurazione (140/140 provini)
2. Terapia (140/140 provini)
3. Post-trattamento (73/140 provini)

Alla data odierna, e quindi facente parte della presente tesi, si trovano i dati relativi a tutti i provini analizzati e testati. Tutti i 140 provini sono stati gettati e successivamente prefessurati. Tutti i provini prefessurati hanno iniziato la loro terapia e 73 di questi hanno concluso il ciclo. Si sono raccolti dati riguardanti il recupero delle proprietà meccaniche di 73 provini che hanno avuto sia le prove in prefessurazione e anche in post-trattamento.

4.4.2.1 Suddivisione provini e le relative terapie

Questa sezione di campagna sperimentale è volta a valutare la capacità di self-healing autogeno su provini di *Steel+Sisal*, e provini di *Sisal*, *Sisal+Eucalyptus*, *Sisal+Nanopulp* che prenderanno il nome di *Sisal Hybrid*. Questa classificazione è necessaria perché vengono adottate sia esposizioni differenti, ma anche gli elementi di indagine non propriamente identici. Quello che li accomuna è la stessa procedura con il quale l'estensione del self-healing viene valutata: tramite prove meccaniche e indagini al microscopio. Le prove meccaniche scandiscono il tempo di cura: una volta stagionato il materiale si procede a fessurarlo. A fessurazione avvenuta inizia il periodo di terapia in cui si lascia il calcestruzzo in esposizione in un particolare ambiente per un periodo di tempo definito in precedenza. Dopo lo scadere del periodo di cura prefissato viene di nuovo effettuata una prova meccanica che viene confrontata con quella effettuate in precedenza, ovvero tra la situazione prima e dopo l'esposizione. Elementi di valutazione sono: tempo di maturazione del calcestruzzo, periodo di esposizione, tipologia di esposizione, comportamento *hardening* oppure *softening*, direzione delle fibre. A seguire uno schema di come è stata suddivisa la campagna sperimentale per la valutazione del self-healing, Fig.4.45.

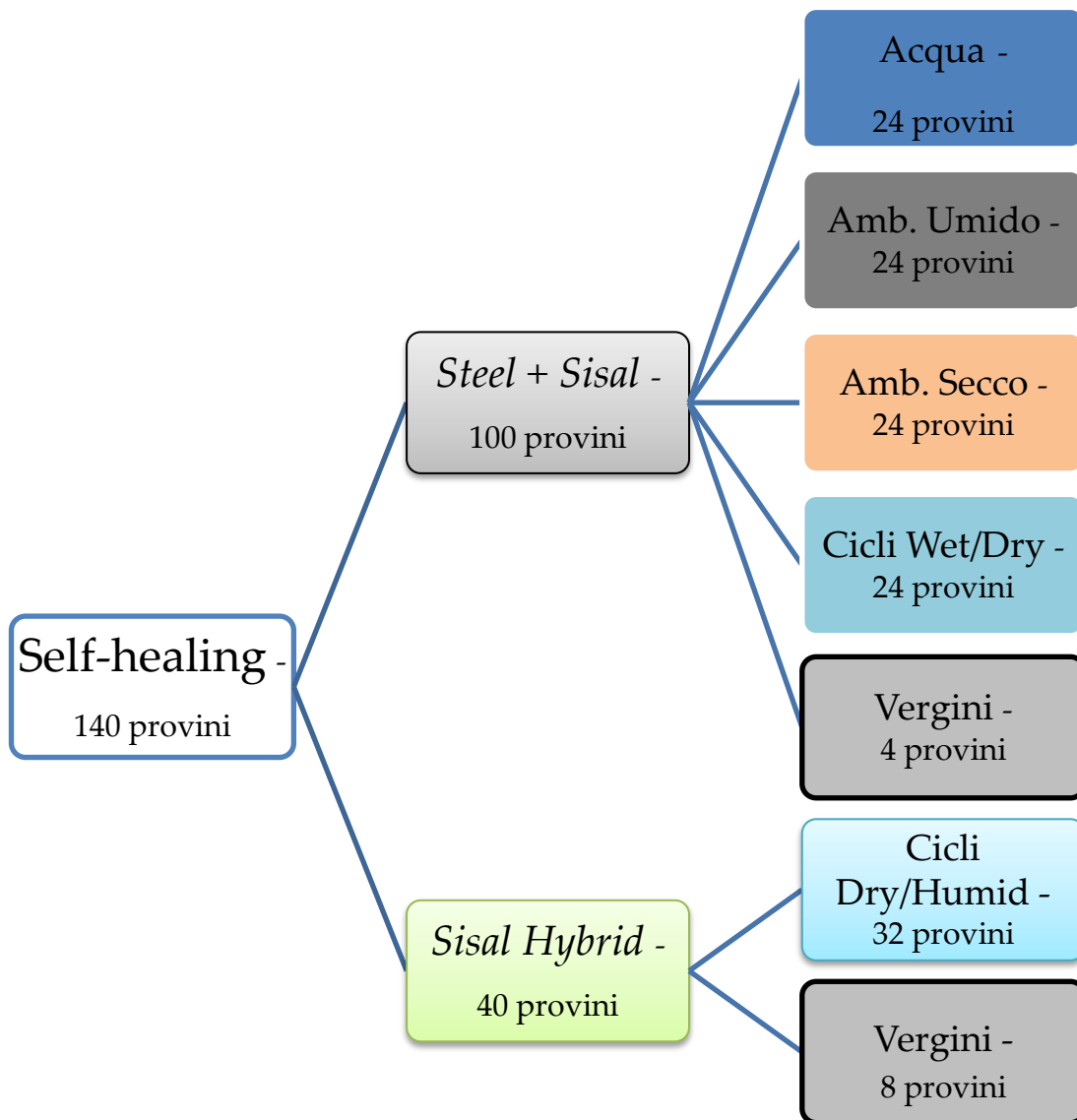


Figura 4. 45 - Vista sinottica della campagna self-healing

I provini definiti “Vergini” sono quelli che non vengono usati per valutare la quantità di self-healing, ma sono portati a rottura per studiarne il comportamento meccanico monotono. A seguire altri schemi sinottici per avere un dettaglio maggiore della programmazione delle prove, in Fig. 4.46 e Fig. 4.47.

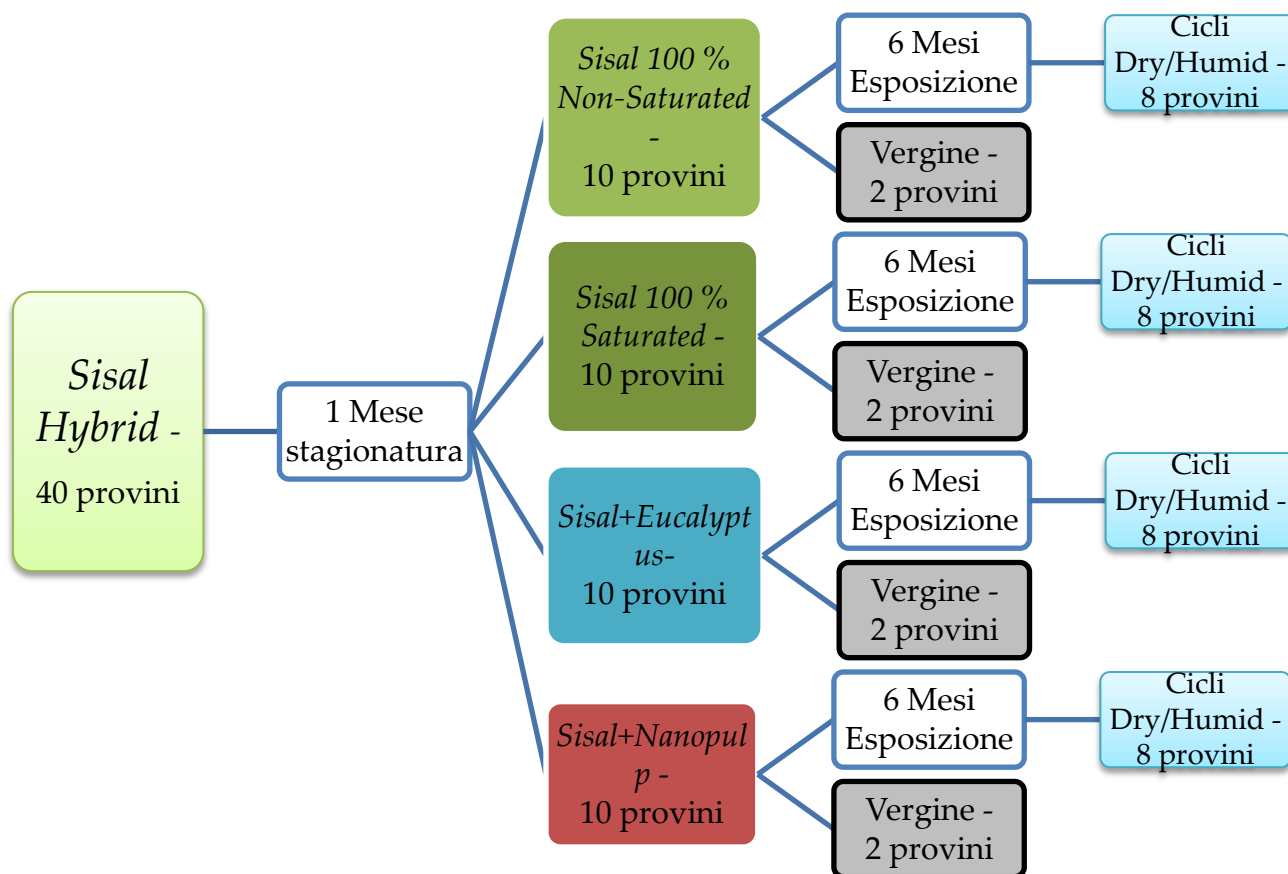


Figura 4. 46 - Vista sinottica delle prove *Sisal Hybrid*

Come si può notare, i provini per la campagna *Sisal Hybrid* sono stati tutti prefessurati dopo aver avuto una stagionatura adeguata di un mese in camera umida. Tutti e 4 i mix design presenti nella campagna *Sisal Hybrid* hanno seguito lo stesso percorso. Si è valutato il comportamento meccanico al variare delle fibre naturali utilizzate. Hanno seguito un percorso espositivo diverso da quelli della campagna *Steel Hybrid*, che andiamo qui di seguito a descrivere in Fig 4.47

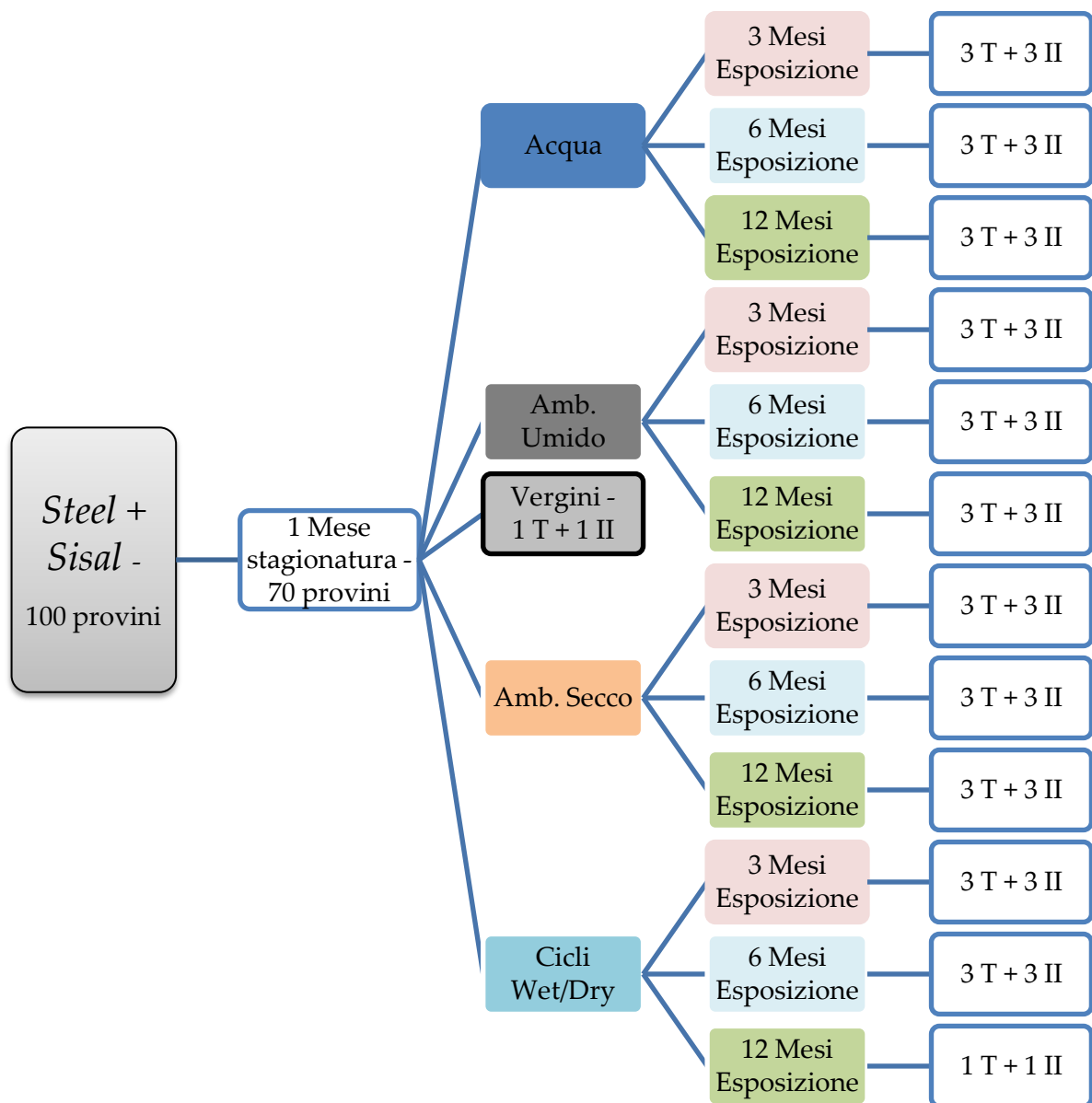


Figura 4. 47 - Vista sinottica della campagna *Steel Hybrid* con provini stagionati 1 mese

La campagna *Steel Hybrid* prevede due tempi di maturazione del calcestruzzo. Qui sopra è raffigurata la campionatura di quelli lasciati stagionare un mese. Si hanno in totale 70 provini, di cui 2 utilizzati per studiarne il comportamento da "Vergini". Si è voluto operare in maniera da ottenere valori medi per ogni singolo risultato: sono stati quindi utilizzati 3 provini per tipologia di esposizione e arco temporale, sia per ordinamento di fibre ortogonale che parallelo, volendo evitare risultati sfalsati e aleatorietà.

I restanti 30 provini della campagna *Steel Hybrid* sono stati lasciati stagionare per 6 mesi in ambiente umido. Seguono lo stesso programma che è stato utilizzato per quelli lasciati maturare 1 mese: acqua, ambiente umido, ambiente secco, cicli asciutto/bagnato. I periodi di esposizione in terapia sono però di 6 mesi e 12 mesi. La differenza sostanziale è che questi ultimi hanno praticamente tutti comportamento *deflection softening*. Ne sono

comunque stati utilizzati 3 provini per tipologia e tempo di esposizione. Anche in questo caso, numero 2 provini sono stati utilizzati con comportamento "Vergine". Di seguito ne viene fornito lo schema sinottico.

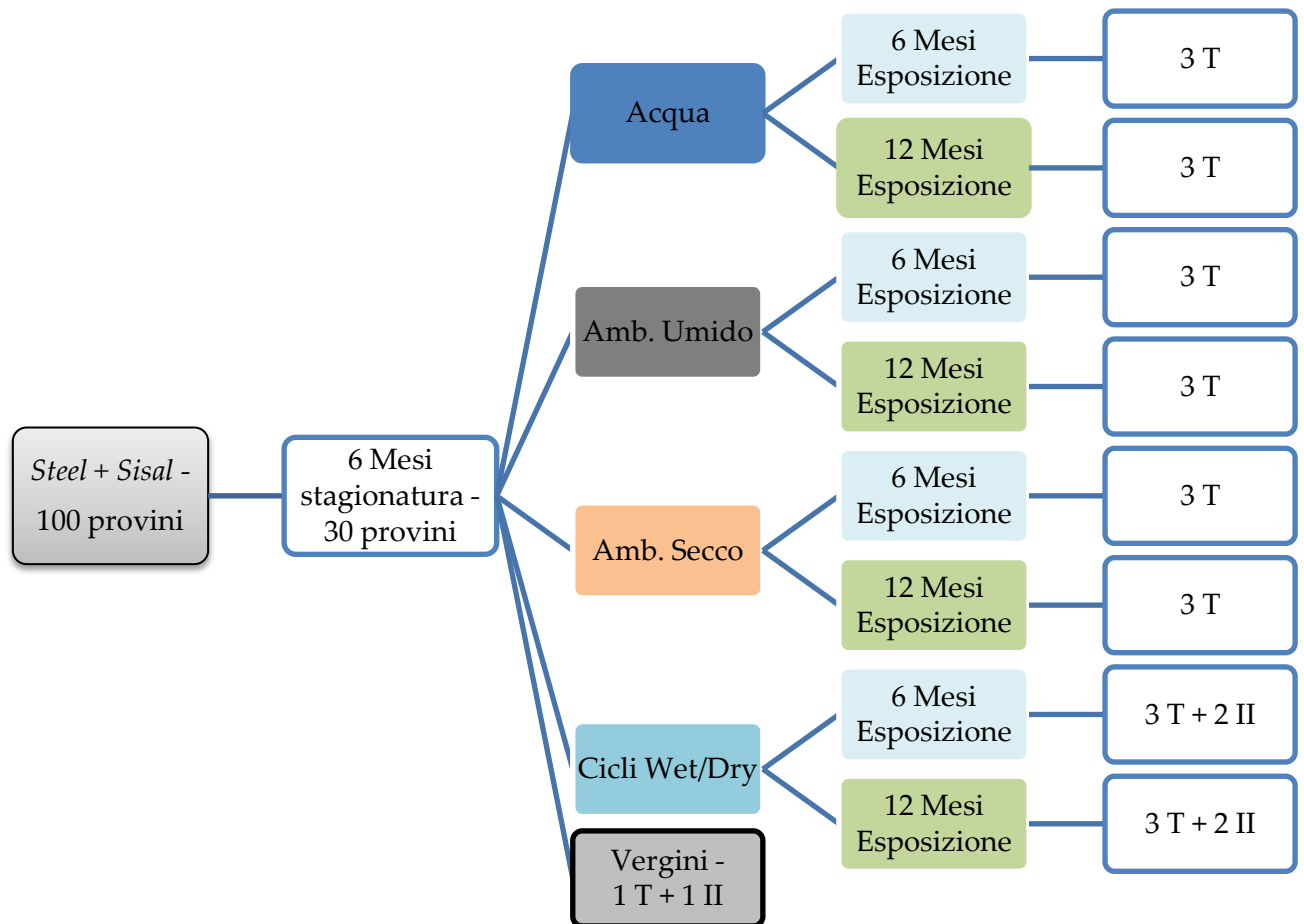


Figura 4. 48 - Vista sinottica Steel Hybrid a 6 mesi di stagionatura

4.4.2.2 Suddivisione provini per lastra

Le tabelle a seguire hanno lo scopo di identificare ogni singolo provino, la sue caratteristiche, le sue dimensioni, la sua data di getto, di prefessurazione e – se presente, la data di fine terapia e il suo luogo di stoccaggio.

In sequenza si trovano tabelle della campagna *Steel Hybrid*, partendo da quelli maturati 1 mese e portati a termine della terapia a 3 mesi, passando da quelli a 6 mesi e per finire quelli a 12 mesi. Si trovano poi quelli maturati 6 mesi, Tab. 4.13/14/15.

Al loro seguito fa capolino la tabella con la campagna *Sisal Hybrid*, Tab 4.16

Lastra Getto	Provino	Prefessurazione	Largh.	Sp.	Alt.	C.O.D.	Esposizione	Durata	Termin
A-1 16/10/2013	1-T	14/11/13	50,40	2,27	9,43	Rottura	//	//	
	2-T	20/11/13	50,20	2,10	9,50	0,5 mm	Acqua	3 m	14/5/14
	3-T	20/11/13	50,10	2,05	9,52	0,5 mm	Acqua	3 m	12/5/14
	4-T	20/11/13	50,20	2,00	9,50	0,5 mm	Acqua	3 m	12/5/14
	5-T	20/11/13	50,10	2,00	9,85	0,5 mm	Umido	3 m	13/5/14
	6-II	26/11/13	49,80	2,06	9,40	0,5 D.P.	Acqua	3 m	12/5/14
	7-II	26/11/13	49,80	1,96	9,45	0,5 D.P.	Acqua	3 m	13/5/14
	8-II	26/11/13	49,1	2,23	9,70	0,5 D.P.	Acqua	3 m	14/5/14
	9-II	26/11/13	49,1	2,37	9,73	0,5 D.P.	Umido	3 m	13/5/14
	10-II	14/11/13	48,9	2,25	9,60	Rottura	//	//	//
A-2 16/10/2013	1-T	29/11/13	50,10	2,35	9,52	0,5 mm	Umido	3 m	14/5/14
	2-T	29/11/13	50,10	2,32	9,50	0,5 mm	Umido	3 m	13/5/14
	3-T	29/11/13	50,10	2,20	9,50	0,5 mm	Secco	3 m	15/5/14
	4-T	29/11/13	50,10	2,36	9,43	0,5 mm	Secco	3 m	15/5/14
	5-T	26/11/13	50,20	2,02	9,83	0,5 mm	Secco	3 m	15/5/14
	6-II	26/11/13	49,90	1,85	9,47	0,5 D.P.	Umido	3 m	14/5/14
	7-II	26/11/13	49,90	1,81	9,50	0,5 D.P.	Umido	3 m	13/5/14
	8-II	27/11/13	49,80	1,75	9,48	0,5 D.P.	Secco	3 m	15/5/14
	9-II	26/11/13	49,90	1,85	9,45	0,5 D.P.	Secco	3 m	15/5/14
	10-II	26/11/13	49,90	1,90	10,17	0,5 D.P.	Secco	3 m	15/5/14
A-3 16/10/2013	1-T	27/11/13	50,20	1,97	9,37	0,5 mm	Wet/Dry	3 m	15/5/14
	2-T	27/11/13	50,10	1,95	9,45	0,5 mm	Wet/Dry	3 m	14/5/14
	3-T	27/11/13	50,20	1,95	9,42	0,5 mm	Wet/Dry	3 m	15/5/14
	4-T	27/11/13	50,00	1,95	9,47	0,5 mm	Acqua	6 m	28/5/14
	5-T	27/11/13	50,00	1,96	10,02	0,5 mm	Acqua	6 m	29/5/14
	6-II	27/11/13	49,90	2,28	9,47	0,5 D.P.	Wet/Dry	3 m	14/5/14
	7-II	27/11/13	49,80	2,17	9,43	0,5 D.P.	Wet/Dry	3 m	14/5/14
	8-II	27/11/13	49,80	1,95	9,40	0,5 D.P.	Wet/Dry	3 m	15/5/14
	9-II	27/11/13	49,80	1,88	9,50	0,5 D.P.	Acqua	6 m	29/5/14
	10-II	27/11/13	50,00	1,88	10,30	0,5 D.P.	Acqua	6 m	29/5/14

Tabella 4. 13 - Informazioni provini *Steel Hybrid* - Lastre A-1, A-2, A-3

Lastra	Provino	Prefe	Largh	Sp.	Alt.	C.O.D.	Esposizione	Durata	Termin	
E-1 24/10/2013	1-T	04/12/13	50,20	2,73	9,50	0,5 mm	Acqua	6 m	29/5/14	
	2-T	04/12/13	50,40	2,32	9,60	0,5 mm	Umido	6 m	30/5/14	
	3-T	04/12/13	50,30	2,32	9,63	0,5 mm	Umido	6 m	30/5/14	
	4-T	04/12/13	50,20	2,08	9,68	0,5 mm	Umido	6 m	30/5/14	
	5-T	04/12/13	50,30	2,00	9,63	0,5 mm	Secco	6 m	30/5/14	
	6-II	06/12/13	49,40	1,72	9,58	0,5 D.P.	Acqua	6 m	04/6/14	
	7-II	06/12/13	49,40	1,84	9,60	0,5 D.P.	Umido	6 m	04/6/14	
	8-II	06/12/13	49,30	1,77	9,58	0,5 D.P.	Umido	6 m	06/6/14	
	9-II	06/12/13	49,10	1,97	9,60	0,5 D.P.	Umido	6 m	04/6/14	
	10-II	06/12/13	49,20	2,07	9,60	0,5 D.P.	Secco	6 m	06/6/14	
E-2 24/10/2013	1-T	04/12/13	50,30	1,90	9,45	0,5 mm	Secco	6 m	30/5/14	
	2-T	04/12/13	50,20	1,85	9,60	0,5 mm	Secco	6 m	06/6/14	
	3-T	04/12/13	50,20	1,85	9,58	0,5 mm	Wet/Dry	6 m	29/5/14	
	4-T	04/12/13	50,20	1,90	9,65	0,5 mm	Wet/Dry	6 m	28/5/14	
	5-T	04/12/13	50,00	1,97	9,62	0,5 mm	Wet/Dry	6 m	29/5/14	
	6-II	06/12/13	49,50	2,24	9,60	0,5 D.P.	Secco	6 m	30/5/14	
	7-II	06/12/13	49,40	2,05	9,63	0,5 D.P.	Secco	6 m	30/5/14	
	8-II	06/12/13	49,40	1,98	9,60	0,5 D.P.	Wet/Dry	6 m	04/6/14	
	9-II	06/12/13	49,30	1,95	9,60	0,5 D.P.	Wet/Dry	6 m	04/6/14	
	10-II	06/12/13	49,30	1,97	9,50	0,5 D.P.	Wet/Dry	6 m	04/6/14	
E-3 24/10/2013	1-T	04/12/13	50,20	2,00	9,57	0,5 mm	Acqua	12 m	in corso	
	2-T	04/12/13	50,20	2,03	9,65	0,5 mm	Acqua	12 m	in corso	
	3-T	04/12/13	50,20	2,05	9,65	0,5 mm	Acqua	12 m	in corso	
	4-T	04/12/13	50,10	2,05	9,65	0,5 mm	Umido	12 m	in corso	
	5-T	04/12/13	50,20	2,03	9,60	0,5 mm	Umido	12 m	in corso	
	6-II	11/12/13	49,60	2,18	9,50	0,5 D.P.	Acqua	12 m	in corso	
	7-II	11/12/13	49,40	2,08	9,60	0,5 D.P.	Acqua	12 m	in corso	
	8-II	11/12/13	49,30	2,13	9,67	0,5 D.P.	Acqua	12 m	in corso	
	9-II	11/12/13	49,30	2,03	9,60	0,5 D.P.	Umido	12 m	in corso	
	10-II	11/12/13	49,30	1,97	9,68	0,5 D.P.	Umido	12 m	in corso	
E-4 24/10/2013	1-T	04/12/13	50,30	2,13	9,58	0,5 mm	Umido	12 m	in corso	
	2-T	04/12/13	50,30	2,07	9,63	0,5 mm	Secco	12 m	in corso	
	3-T	04/12/13	50,20	2,08	9,60	0,5 mm	Secco	12 m	in corso	
	4-T	04/12/13	50,30	2,08	9,60	0,5 mm	Secco	12 m	in corso	
	5-T	04/12/13	50,30	2,00	9,67	0,5 mm	Wet/Dry	12 m	in corso	
	6-II	provino rovinato								
	7-II	11/12/13	49,60	2,00	9,65	0,5 D.P.	Umido	12 m	in corso	
	8-II	11/12/13	49,40	1,99	9,60	0,5 D.P.	Secco	12 m	in corso	
	9-II	11/12/13	49,40	1,90	9,60	0,5 D.P.	Secco	12 m	in corso	
	10-II	11/12/13	49,30	1,90	9,66	0,5 D.P.	Wet/Dry	12 m	in corso	

Tabella 4. 14 - Informazioni prognosi Steel Hybrid - Lastre E-1, E-2, E-3, E-4

Lastra Getto	Provino	Prefessurazione	Largh.	Sp.	Alt.	C.O.D.	Esposizione	Durata	Termin e
F-1 17/12/2013	1-T	09/06/14	50,30	2,15	9,53	0,5 mm	Wet/Dry	12 m	in corso
	2-T	09/06/14	50,30	2,15	9,55	0,5 mm	Acqua	6 m	in corso
	3-T	09/06/14	50,20	2,08	9,58	0,5 mm	Acqua	6 m	in corso
	4-T	09/06/14	50,20	2,20	9,60	0,5 mm	Umido	12 m	in corso
	5-T	09/06/14	50,20	2,04	9,53	0,5 mm	Umido	12 m	in corso
	6-T	09/06/14	49,50	1,77	9,42	0,5 mm	Secco	12 m	in corso
	7-T	09/06/14	49,50	1,65	9,53	0,5 mm	Secco	12 m	in corso
	8-T	09/06/14	49,50	1,64	9,53	0,5 mm	Secco	6 m	in corso
	9-T	09/06/14	49,50	1,62	9,53	0,5 mm	Secco	6 m	in corso
	10-T	11/06/14	49,50	1,52	9,50	0,5 mm	Secco	6 m	in corso
F-2 17/12/2013	1-T	11/06/14	50,30	2,00	9,42	0,5 mm	Wet/Dry	12 m	in corso
	2-T	11/06/14	50,00	2,00	9,52	0,5 mm	Wet/Dry	12 m	in corso
	3-T	11/06/14	50,00	1,92	9,57	0,5 mm	Secco	12 m	in corso
	4-T	11/06/14	50,00	1,90	9,61	0,5 mm	Umido	6 m	in corso
	5-T	11/06/14	50,00	1,88	9,50	0,5 mm	Umido	6 m	in corso
	6-T	11/06/14	50,30	1,70	9,52	0,5 mm	Wet/Dry	12 m	in corso
	7-T	11/06/14	50,30	1,72	9,58	0,5 mm	Acqua	12 m	in corso
	8-T	11/06/14	50,10	1,80	9,60	0,5 mm	Wet/Dry	6 m	in corso
	9-T	11/06/14	50,10	1,77	9,60	0,5 mm	Umido	12 m	in corso
	10-T	12/06/14	50,00	1,80	9,67	0,5 mm	Acqua	6 m	in corso
F-3 17/12/2013	1-T	12/06/14	50,40	2,13	9,59	0,5 mm	Wet/Dry	6 m	in corso
	2-T	12/06/14	50,30	2,13	9,53	0,5 mm	Acqua	12 m	in corso
	3-T	12/06/14	50,10	1,99	9,50	0,5 mm	Acqua	12 m	in corso
	4-T	12/06/14	50,00	1,96	9,55	0,5 mm	Umido	6 m	in corso
	5-T	12/06/14	50,00	1,85	9,58	Rottura	//	//	//
	6-T	12/06/14	49,80	1,90	9,48	0,5 mm	Wet/Dry	12 m	in corso
	7-T	13/06/14	49,80	1,82	9,53	0,5 mm	Wet/Dry	12 m	in corso
	8-T	13/06/14	49,80	1,78	9,60	0,5 mm	Wet/Dry	6 m	in corso
	9-T	13/06/14	49,80	1,71	9,60	0,5 mm	Wet/Dry	12 m	in corso
	10-T	13/06/14	49,80	1,68	9,70	Rottura	//	//	//

Tabella 4. 15 - Informazioni provini Steel Hybrid - Lastre F-1, F-2, F-3

Lastra	Provino	Prefe	Largh	Sp.	Alt.	C.O.D.	Esposizione	Durata	Termin
D-1 11/10/13	1-T	19/11/13	50,20	2,18	9,70	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	26/5/14
	2-T	19/11/13	50,30	2,03	9,70	0,5 mm	rovinato		
	3-T	12/11/13	50,20	1,90	9,60	Rottura	//	//	//
	4-T	19/11/13	50,20	2,13	9,70	0,5 mm	rovinato		
	5-T	18/11/13	50,30	2,10	9,70	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	28/5/14
	6-II	18/11/13	49,30	2,23	9,65	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	28/5/14
	7-II	18/11/13	49,10	2,25	9,68	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	26/5/14
	8-II	19/11/13	49,10	2,23	9,70	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	26/5/14
	9-II	18/11/13	49,10	2,37	9,73	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	28/5/14
	10-II	12/11/13	48,90	2,25	9,60	Rottura	//	//	//
D-2 11/10/13	1-T	15/11/13	50,30	1,92	9,50	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	28/5/14
	2-T	15/11/13	50,10	2,03	9,63	0,5 mm	rovinato		
	3-T	18/11/13	50,10	2,00	9,67	0,5 mm	rovinato		
	4-T	12/11/13	50,10	2,07	9,60	Rottura	//	//	//
	5-T	18/11/13	50,10	2,17	9,67	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	26/5/14
	6-II	12/11/13	49,40	2,33	9,60	Rottura	//	//	//
	7-II	18/11/13	49,40	2,27	9,70	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	27/5/14
	8-II	15/11/13	49,40	2,33	9,50	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	26/5/14
	9-II	18/11/13	49,30	2,27	9,60	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	27/5/14
	10-II	18/11/13	49,20	2,20	9,53	0,5 mm	Dry/Humid	6 m	27/5/14
B-1 15/10/13	1-T	13/11/13	50,00	1,80	9,60	Rottura	//	//	//
	2-T	19/11/13	50,10	2,03	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		20/5/14
	3-T	19/11/13	50,20	2,02	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		21/5/14
	4-T	19/11/13	50,10	2,28	9,50	0,5 mm	Dry/Humid		21/5/14
	5-T	19/11/13	50,10	2,22	9,70	0,5 mm	rovinato		
	6-II	19/11/13	49,20	2,30	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		21/5/14
	7-II	19/11/13	49,20	2,37	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		21/5/14
	8-II	19/11/13	49,20	2,33	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		16/5/14
	9-II	19/11/13	49,20	2,25	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		16/5/14
	10-II	13/11/13	49,10	2,19	9,43	Rottura	//		
C-1 15/10/13	1-T	13/11/13	50,20	2,28	9,50	Rottura	//		
	2-T	20/11/13	50,30	2,20	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		16/5/14
	3-T	19/11/13	50,20	2,07	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		16/5/14
	4-T	20/11/13	50,20	2,05	9,72	0,5 mm	rovinato		
	5-T	20/11/13	50,20	2,07	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		21/5/14
	6-II	20/11/13	49,50	1,98	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		16/5/14
	7-II	19/11/13	49,40	1,88	9,70	0,5 mm	rovinato		
	8-II	20/11/13	49,40	1,93	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		21/5/14
	9-II	20/11/13	49,40	1,90	9,70	0,5 mm	Dry/Humid		21/5/14
	10-II	13/11/13	49,20	1,86	9,57	Rottura	//		

Tabella 4. 16 - Informazioni provini Sisal Hybrid - Lastre D-1, D-2, B-1, C-1

4.4.2.3 Condizioni di esposizione

I provini *Steel + Sisal* seguono regimi di esposizione differenti dai provini *Sisal Hybrid*. Di seguito si fa un resoconto delle diverse tipologie di esposizione utilizzate:

- Immersione in acqua
- Ambiente Umido
- Ambiente Secco
- Cicli Wet/Dry
- Cicli Wet/Humid

Le durate di esposizione variano anch'esse e sono normalmente suddivise in 3, 6 oppure 12 mesi di durata dell'esposizione. Ci si riferisce alle viste sinottiche in precedenza per una più completa visione d'insieme. Fig. 4.45/46/47/48.

Immersione in Acqua

Si è utilizzata una vasca d'acqua situata nel laboratorio prove tecniche a temperatura e umidità controllata. Fig. 4.49. L'acqua utilizzata è quella idrica cittadina, senza controllare temperatura o composizione chimica e pH.



Figura 4. 49 - Provini con condizione d'esposizione immersione in acqua

Ambiente Umido

Alcuni provini sono stati lasciati in ambiente a temperatura e umidità controllata. Tali condizioni igrometriche sono rimaste costanti per tutto il periodo di esposizione. Le prefissate condizioni sono: temperatura ambiente $20 (\pm 1)^\circ\text{C}$ e umidità relativa $90 (\pm 5)\%$. Fig. 4.50



Figura 4. 50 - Provini in esposizione in CAMERA UMIDA 20°-90% U.R

Ambiente Secco

Un'altra tipologia di esposizione è stata quella in ambiente controllato, ma con caratteristiche termoigrometriche più secche rispetto alla camera umida. Le caratteristiche di questo ambiente sono: temperatura ambientale di 20 (± 1)°C e umidità relativa 50 (± 5)%.

Fig. 4.51



Figura 4. 51 - Provini in esposizione in LABORATORIO Prove Tecnologiche 20° 50%

Cicli Wet/Dry

I provini sono stati soggetti a cambi di esposizione giornalieri: un giorno venivano lasciati immersi in acqua e il giorno seguente, alla stessa ora, venivano tolti dalla vasca d'acqua e lasciati in Ambiente Secco (temperatura 20° - U.R. 50%). I cicli sono stati tutti giornalieri.

Durante le chiusure per festività si è cercato di mantenere una media fra i giorni immersi e quelli in ambiente secco. I provini hanno passato tutti il Natale 2013 in immersione e poi successivamente hanno recuperato le giornate asciutte tra carnevale e Pasqua 2014. Fig. 4.52 mostra le vasche d'acqua e il bancale su cui venivano fatti asciugare i provini.



Figura 4. 52 - Provini in esposizione per cicli Wet/Dry

Cicli Dry/Humid

Questa condizione è stata usata solo ed esclusivamente per la campagna *Sisal Hybrid*. Tutti i provini per questa campagna – tranne quelli destinati alle prove monotone (provini vergini), sono stati esposti in questa condizione. Come i cicli Wet/Dry, anche per questi cicli Wet/Humid si ha una tipologia di esposizione dinamica. I cicli non sono giornalieri, ma sono scanditi da tempistiche differenti:

- 2 ore di immersione in acqua
- 2/3 giorni in ambiente umido
- 2/3 giorni in ambiente secco

Il ciclo ideale si conclude dopo due settimane. Ogni due settimane tutti i provini hanno avuto lo stesso tempo di esposizione in tutti gli ambienti. A seguire una vista sinottica della scaletta del cambio di esposizione. Tab. 4.17 e Fig. 4.53

	L	M	M	G	V	S	D	L	M	M	G	V	S	D
Ciclo 1.	90 %													
Ciclo 2.	Dry													

Tabella 4. 17 - Indicazione delle esposizione per i cicli Dry/Humid

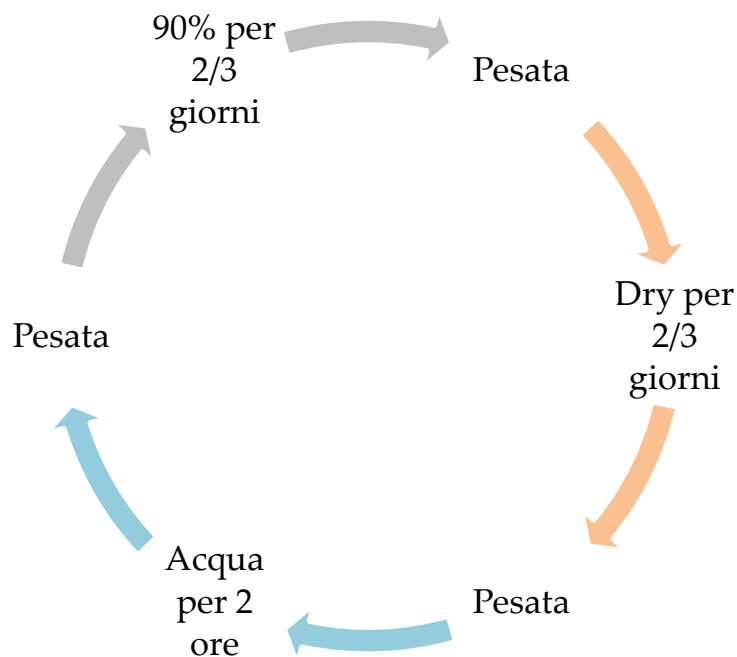


Figura 4. 53 - Andamento circolare del ciclo Dry/Humid

Ad ogni cambio di esposizione i provini sono stati pesati e la variazione del loro peso è stata oggetto di valutazione nei riguardi del self-healing. La durata totale dell'esposizione è stata 6 mesi.

4.4.3 Prove sperimentali

Lo scopo della campagna sperimentale del self-healing è quello di riuscire a studiare la variazione di alcuni parametri meccanici tra cui la resistenza, la rigidità e la duttilità a seguito di un determinato periodo di cura in una particolare condizione di esposizione. La variazione e la caratterizzazione di questi parametri meccanici è stata ottenuta tramite diversi tipi di prove, sia distruttive sia non distruttive.

Le prove distruttive hanno la caratteristica di effettuare misurazioni dirette dei valori meccanici che si vogliono ottenere. Al termine delle prove, però, il materiale testato non può essere in alcun caso utilizzato poiché, come dice il nome stesso delle prove, si ottengono informazioni tramite il danneggiamento e distruzione del materiale studiato. Queste prove però rimangono l'elemento cardine su cui si basa ogni tipo di caratterizzazione meccanica e la sicurezza attesa del materiale.

Le indagini non distruttive legano un particolare elemento intrinseco del materiale con un valore misurabile senza che il materiale studiato possa essere alterato in forma, dimensione, contenuto. Il materiale analizzato deve risultare immutato dopo aver condotto tale prova. Le prove non distruttive non forniscono una caratteristica meccanica direttamente, ma legano una caratteristica meccanica ad un elemento d'indagine che si

andrà in seguito a stimare. Non presentano alcun grado di invasività e sono semplici da eseguire. Il loro risultato però non può essere sostituito interamente da quello ottenuto da prove distruttive. Queste prove però si accompagnano estremamente bene se utilizzate con carattere di complementarietà. Accanto ai valori diretti misurati dalle prove meccaniche distruttive si possono ottenere valori aggiuntivi da quelle non distruttive.

Per la campagna self-healing si sono utilizzate entrambe le tipologie di prove: sia distruttive sia non distruttive. La campagna può essere scandita in due tempistiche a sé stanti: la prefessurazione e il post-trattamento.

- Prefessurazione:
 1. Prova meccanica a flessione su 4 punti
 2. Mappatura delle fessure tramite fotografia della zona fessurata del provino
 3. Indagine al microscopio della/e fessura/e
- Post-trattamento:
 1. Indagine al microscopio
 2. Prova meccanica a flessione su 4 punti

4.4.3.1 Prove a flessione

Le prove a flessione su 4 punti sono state effettuate tramite una pressa elettromeccanica tipo INSTRON 8562, come quella in Fig. 4.55. Ogni provino, tranne quelli denominati "Vergini" devono subire due cicli di carico: uno per la prefessurazione che segna l'inizio del periodo espositivo, l'altro al termine della terapia e che segna quindi il termine del suo ciclo vitale. Si è eseguita la prova su 4 punti mediante un elemento ripartitore del carico su 4 punti (lama di carico) in Fig. 4.54. Siccome il bordo del provino può risultare irregolare, sono stati applicati due elementi lignei sulle lame di carico per migliorarne le zone di contatto con il provino stesso.

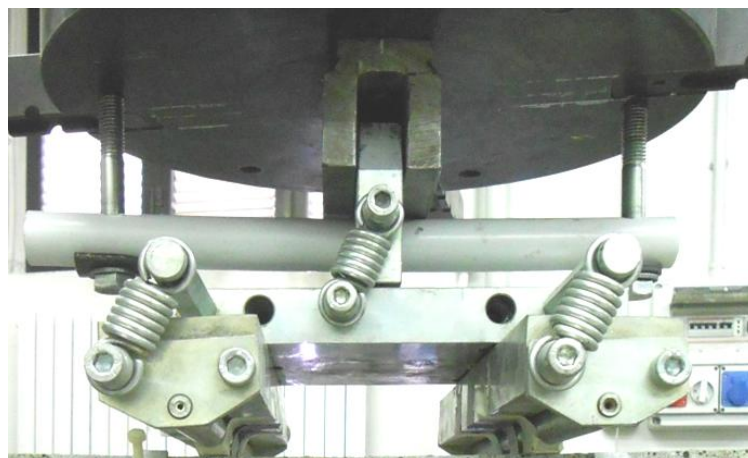


Figura 4. 54 - Elemento di ripartizione del carico per la prova a flessione su 4 punti



Figura 4.55 - Pressa elettromeccanica INSTRON

Le prove sperimentali condotte sono state eseguite in conformità alle normative che si hanno in merito di prove a flessione su 4 punti per provini di altezza limitata (inferiore a 150 mm) o con comportamento incrudente: sia le linee guida CNR-DT-204 [93] sia la norma UNI 11188 [94].

Si è adoperato un set up di prove su 4 punti poiché in questo caso è infatti possibile avere una distribuzione del momento costante sul provino nella zona centrale tra le due lame di carico e al contempo non si hanno sforzi di taglio in quella zona. Svolgendo le prove con set up di flessione a 3 punti si creerebbe una zona a momento costante, mentre con un intaglio si arriverebbe ad una zona con sforzi più concentrati. Entrambe le condizioni sono sfavorevoli alla realizzazione di multi fessurazione nel provino.

Le figure 4.56 e 4.57 mostrano il set up utilizzato per le prove a flessione su 4 punti: la prima indica la schematizzazione adottata, mentre la seconda mostra la situazione che è stata realmente realizzata.

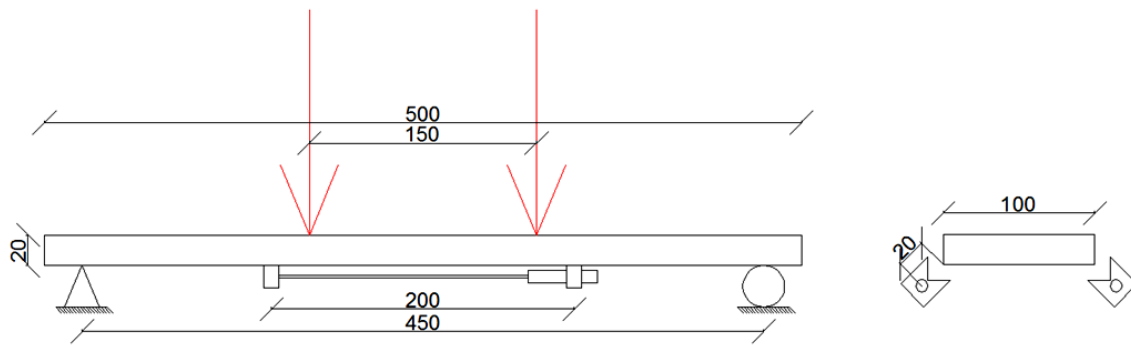


Figura 4. 56 - Adattamento del set-up delle prove

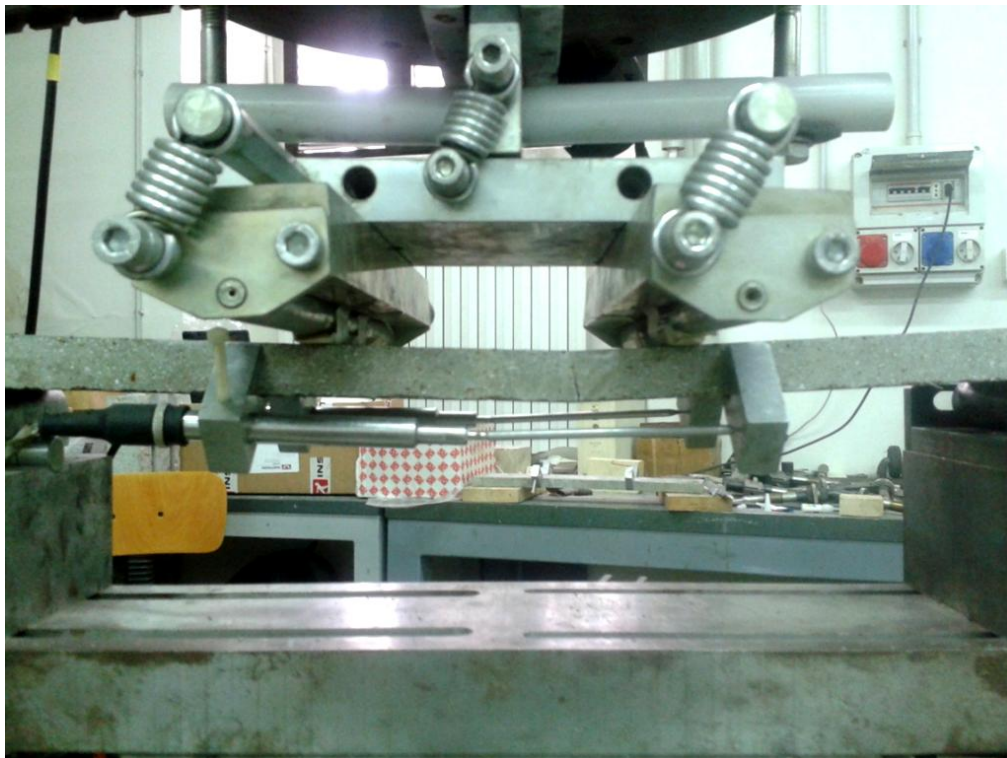


Figura 4. 57 – Configurazione della prova a flessione su 4 punti con provino

Il provino viene posizionato sulla base d'appoggio in modo tale che le linee di tracciamento combacino sia con gli elementi d'appoggio sia con le lame di carico. Il posizionamento del provino inoltre prevede che la superficie di estradosso sia quella a pelo libero durante il getto: in questo modo [89] per effetto della segregazione statica, gli strati inferiori del getto sono più ricchi di fibre rispetto agli strati superiori. In questo modo la parte più resistente del provino è quella all'intradosso. Per una miglior coerenza nella realizzazione delle prove, inoltre, tutti i provini sono stati posizionati nello stesso verso: i provini sono stati nominati prima di essere stati tagliati e posizionati sulla

macchina di prova in modo tale che il nome compaia sempre nello stesso verso. Procedendo in questo modo si è cercato di evitare aleatorietà nella realizzazione delle prove, realizzandole sempre seguendo la stessa identica procedura per ogni provino testato.

Le prove sono state effettuate tramite controllo di posizionamento, ovvero si impostava la pressa in maniera tale da poterne controllare il suo spostamento verso l'alto. Si sono adottate due velocità con cui la base si spostava verso l'alto:

- 1 $\mu\text{m}/\text{sec}$ per le prove nella campagna *Sisal Hybrid*
- 5 $\mu\text{m}/\text{sec}$ per la camagna *Steel Hybrid*

Le differenze sostanziali nelle due velocità adottate stanno nel fatto che i provini *Sisal Hybrid* si presentavano molto più fragili rispetto a quelli con all'interno fibre d'acciaio. Se ne parlerà più ampiamente nel capitolo di appartenenza. Le varie impostazioni vengono controllate tramite plancia di comando (Fig. 4.58), mentre i dati forniti dalla macchina passavano presso un elaboratore UPM 60 ed un computer. Grazie ad un programma appositamente realizzato in Lab View è stato possibile controllare tutti i principali parametri in tempo reale, quali forza misurata sulla cella di carico posta sopra le lame di carico, lo spostamento impostato al provino nel tempo, due valori di *C.O.D.* (crack opening displacement – apertura di fessura), Fig. 4.59.



Figura 4. 58 - Plancia di comando della INSTRON

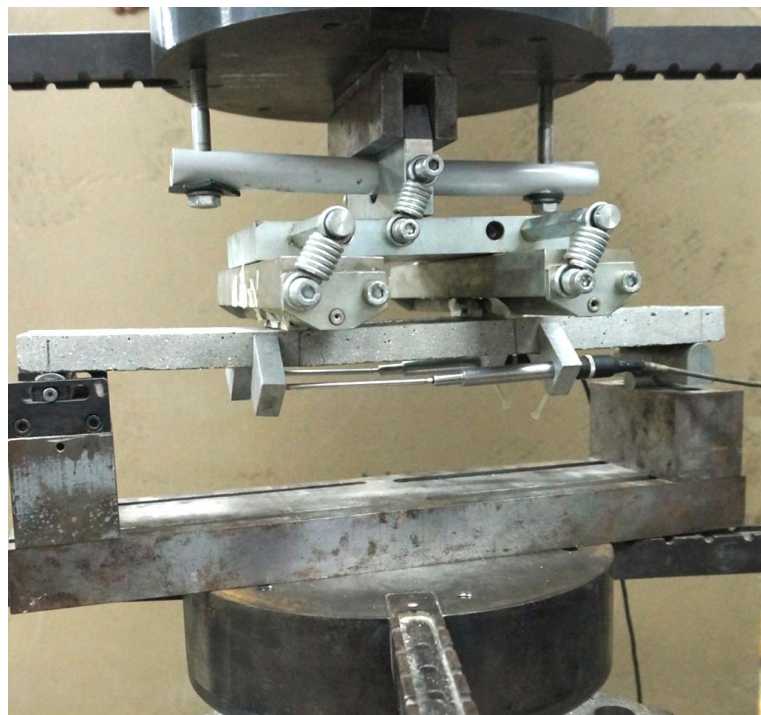


Figura 4. 59 - Allestimento prova con i due LVDT

LVDT (Linear Variable Differential Transformer – Trasduttore di spostamento Induttivo) è un dispositivo elettromagnetico usato per la misura di piccoli spostamenti. Se ne sono usati due, uno per lato (Fig. 4.60), in modo tale che i valori ottenuti fossero la media delle due singole misurazioni. L'apertura di fessura viene misurata quindi tramite due trasduttori LVDT che sono resi solidali al provino tramite blocchetti forati di alluminio e diligentemente incollati al provino lungo le linee precedentemente disegnate tramite colla cianoacrilata (il superattack). La misura di COD è un parametro che rappresenta l'allungamento della fibra all'intradosso, relativamente ad una lunghezza caratteristica di 200 mm e misurata appunto dai due LVDT distanziati di 14 mm dall'intradosso stesso (Fig. 4.60).

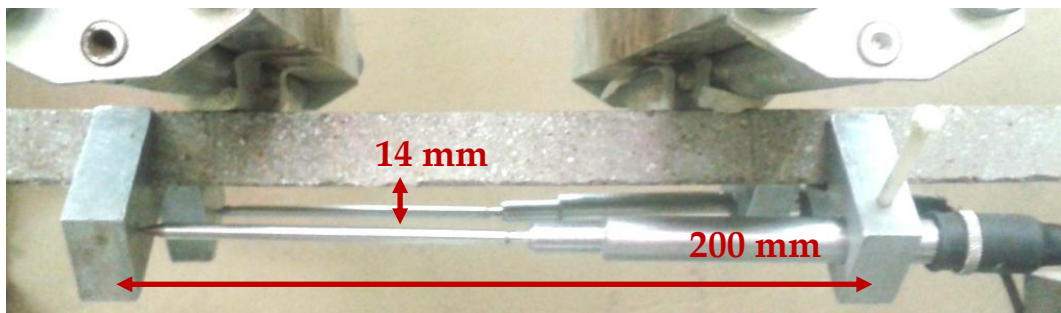


Figura 4. 60 - LVDT e distanze tra di blocchetti di contrasto e dall'intradosso

Si sottolinea che la misurazione tiene in considerazione sia la deformazione elastica del materiale, sia l'apertura di fessura vera e propria. Nel caso di provini che presentano comportamento *deflection hardening* e quindi con la formazione di più fessure contemporaneamente, la misura di C.O.D. è quella intesa globale, ovvero la somma di tutte le ampiezze delle fessure e non l'estensione della fessura singola.

Le misurazioni delle prove a flessione avvenivano in diretta tramite il programma appositamente sviluppato in LabView. Si otteneva la fine della prova quando i valori di C.O.D. raggiungevano i valori prestabiliti in precedenza. Per stabilire i valori limite, si sono utilizzati i provini "Vergini", portandoli a rottura. Così si è ottenuto un comportamento generale di massima dove poi si è potuto valutare una ottimale apertura di fessura. Inoltre i provini "Vergini" che hanno avuto comportamento multifessurativo con caratteristica di *deflection hardening* sono stati presi in considerazioni per valutare valori caratteristici con altri provini con comportamento simile. I valori di C.O.D. che si sono adottati sono prevalentemente due: uno per provini a comportamento incrudente (*deflection hardening*) e uno per provini a comportamento degradante (*deflection softening*). I valori sono rispettivamente:

- C.O.D. 0,5 mm dopo aver raggiunto il valore di resistenza massima, per provini a comportamento *hardening* (Fig. 4.63).
- C.O.D. 0,5 mm per provini T e comportamento *softening* (Fig.4.64);

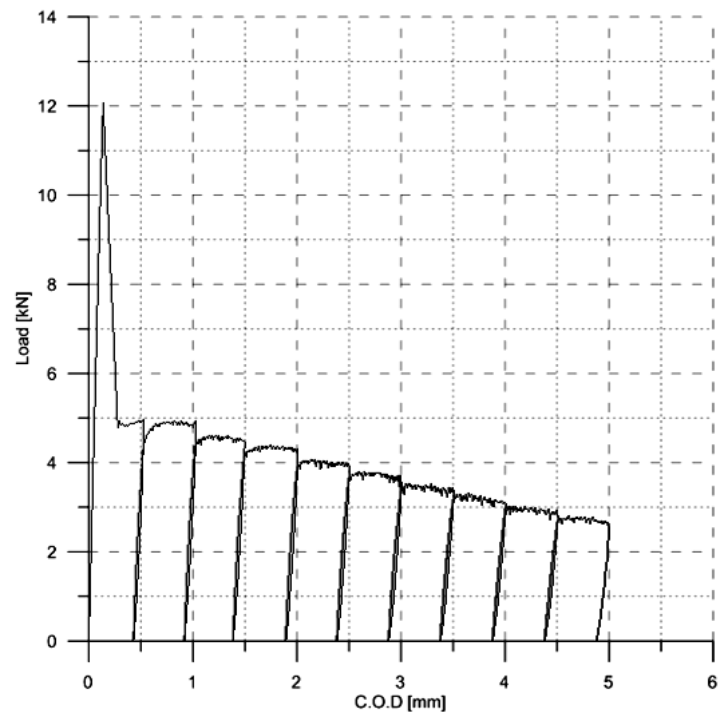


Figura 4. 61 - Provino vergine in regime di cicli carico/scarico con comportamento *deflection softening*

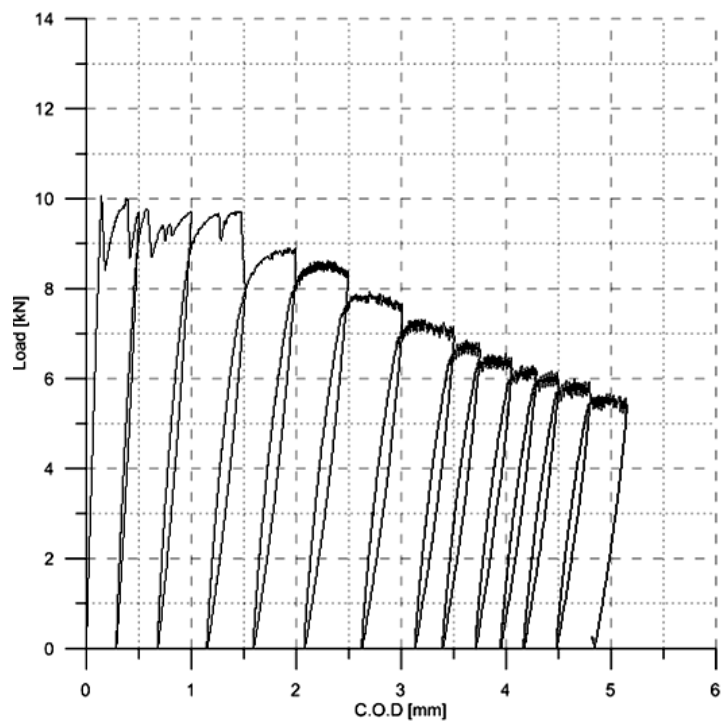


Figura 4. 62 - vergine in regime di cicli carico/scarico con comportamento *deflection hardening*

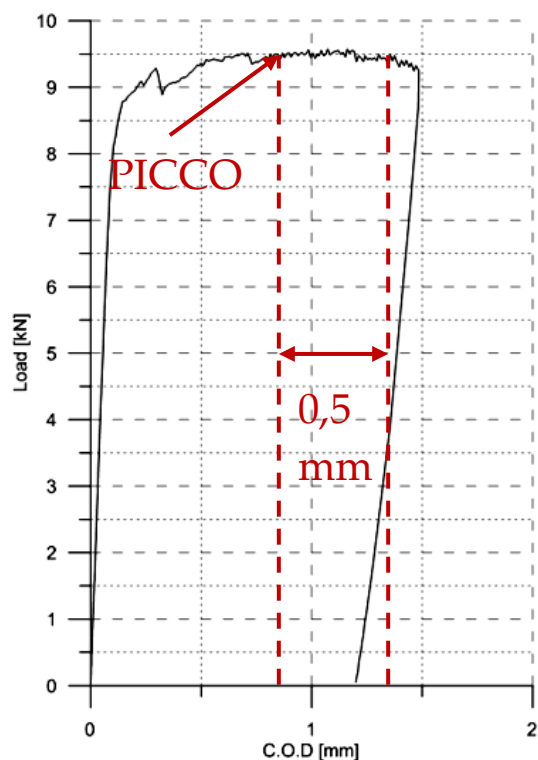


Figura 4. 63 - Precrack di provini a comportamento *deflection hardening*

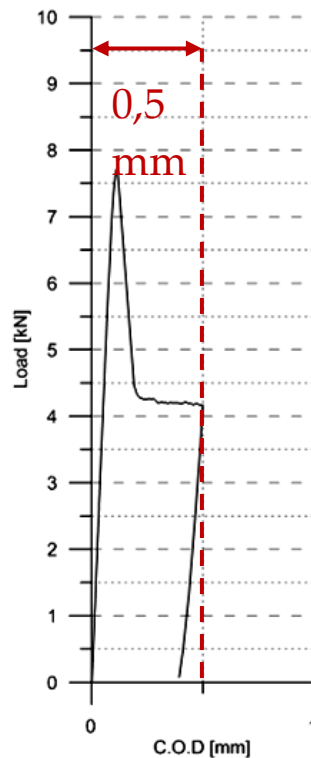


Figura 4. 64 - Precrack di provini a comportamento *deflection softening*

Lo stesso adattamento della macchina e le stesse modalità di esecuzione sono state adottate per le prove che vengono effettuate a fine del periodo di terapia. Il provino, però, non viene portato a 0,5 mm oppure a 0,5 mm dopo il picco, ma l'esecuzione delle prove e di conseguenza l'apertura delle fessure continua fino a quando non viene raggiunto almeno lo stesso valore di carico pari a quello che si era ottenuto durante la fase di scarico del provino nelle prove di prefessurazione. Le due prove forniscono i dati meccanici: le prove a fine trattamento ci mostrano se, come, quando e dove è avvenuto il self-healing nel calcestruzzo.

4.4.3.2 Indagini al microscopio e controllo fessurativo

Oltre ad indagare sulle caratteristiche meccaniche prima di ogni trattamento e dopo un periodo di esposizione in ambienti controllati, sono stati oggetto di analisi le fessure, sulle quali sono state condotte analisi ottiche tramite microscopio. Subito successivamente alla prefessurazione, nell'attimo quindi che intercorre tra la fine della prima prova a flessione e l'inizio della terapia, è stata condotta un'approfondita indagine al microscopio.

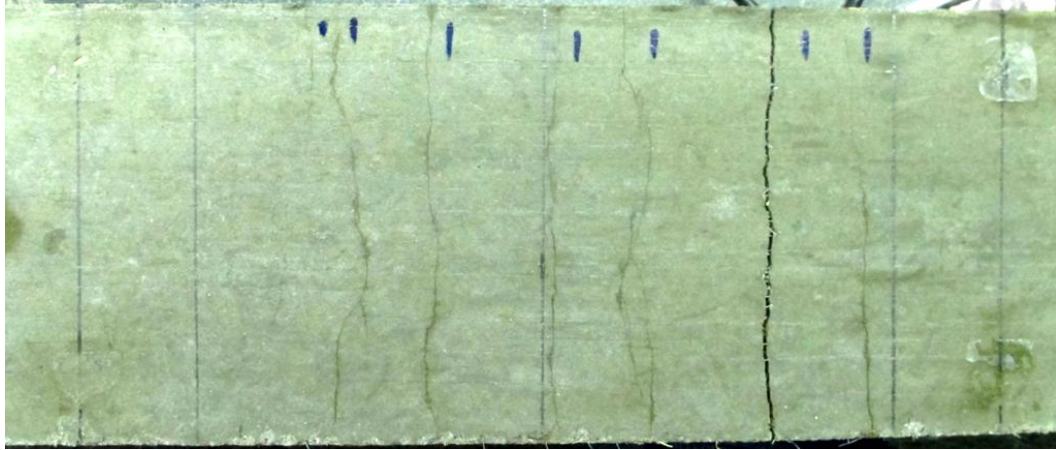


Figura 4. 65 - Foto della zona fessurata dei provini

Per la campagna *Steel + Sisal* le prime analisi confermano quanto spiegato nei capitoli di appartenenza: i provini che hanno al loro interno fibre disposte ortogonalmente alla direzione degli sforzi si comportano in maniera multifessurativa con caratteristica di *deflection hardening*. Questi provini sono stati tutti portati oltre il loro livello di tensione massimo. Questo comporta che una fessura subisca un progressivo ampliamento e propagazione. Invece i provini con fibre disposte ortogonalmente alla direzione degli sforzi invece hanno la formazione di una singola fessura con comportamento degradante (*deflection softening*). Questo però non si può affermare nella campagna *Sisal Hybrid*, i quali provini presentano tutti comportamento *deflection softening*, indipendentemente dall'orientamento delle fibre al loro interno, come vedremo nel capitolo relativo alla discussione dei dati.

Prima di iniziare l'indagine vera e propria è stata mappata la zona fessurata, come in Fig. 4.65. Le foto devono contenere per intero la sezione dove si sono verificate le fessure: significa che deve essere centrata sulla zona del provino soggetta a momento massimo. La zona in questione è quella tra le due lame di carico, Fig. 4.66. Nel caso di provini a caratteristica *deflection softening* non era necessario fotografare l'intera zona tra le due lame di carico, ma solo la zona dove si era formata la singola fessura, come in Fig. 4.67.



Figura 4.66 - Multifessura nel tratto a momento costante

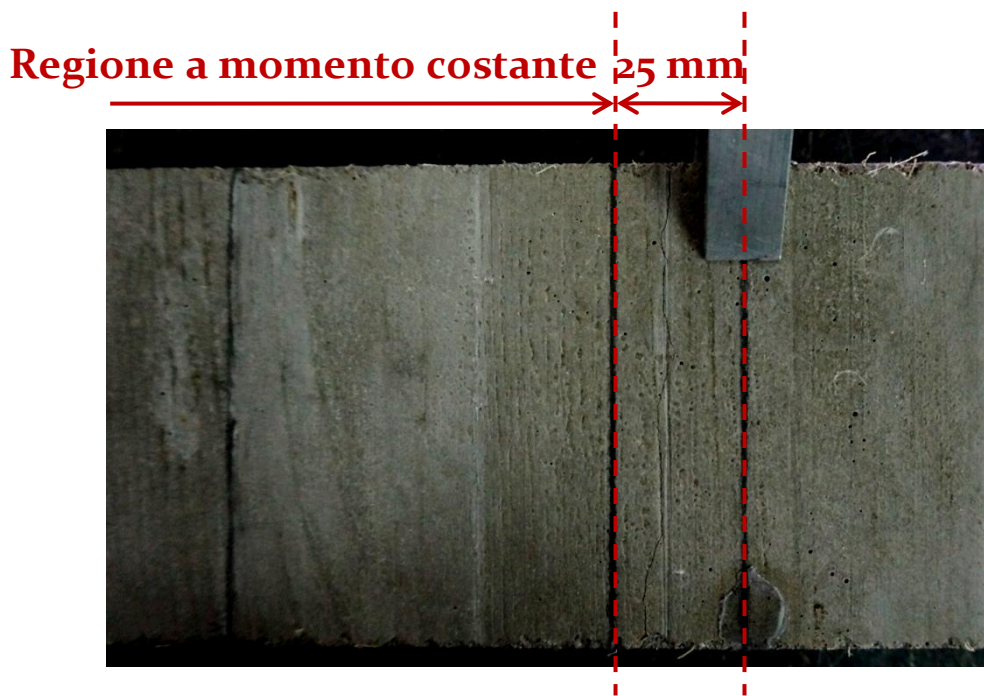


Figura 4.67 - Provino con singola fessura e comportamento *deflection softening*

Come si può notare dalla Fig. 4.74 è possibile e si è riscontrato in qualche occasione che la fessura si presenti al di fuori della zona dove si ha il momento massimo e costante. Può risultare quindi possibile che la fessura che si propaga non faccia parte della zona a momento costante. Idealmente, stando alla teoria di De Saint Venent, si ha momento inferiore ai lati della zona a momento costante, però le tensioni localizzate possono crescere portando alla formazione e propagazione di fessura. Questo è stato dimostrato da Timoshenko e Goodie [95], i quali propongono di considerare il contributo del carico concentrato nel calcolo della tensione tramite la formula che segue:

$$\sigma_{x,real} = \sigma_{x,ideal} + \beta(x) \cdot \frac{P}{h/2} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Dove i termini dell'equazione sono i seguenti:

- $\sigma_{x,real}$ Tensione di trazione reale lungo l'asse della trave (x)
- $\sigma_{x,ideal}$ Tensione di trazione ideale, calcolata secondo la teoria di De Saint Venant
- $\beta(x)$ Fattore correttivo in funzione della distanza fessura – lama di carico
- P Carico applicato per unità di spessore della trave
- h Altezza della trave

I valori del fattore correttivo β sono differenti in base alla distanza del punto considerato con la sede di applicazione del carico. In tabella vengono riportati i valori di β che ha un'influenza significativa anche a 22,50 mm di distanza dal punto del carico applicato.

Distanza punto-carico [mm]	$\beta(x)$
0	- 0,1332
3,75	+ 0,0137
7,50	+ 0,0868
11,25	+ 0,0640
11,50	+ 0,0421
22,50	+ 0,0220

Tabella 4. 18 - Valori del fattore correttivo β in funzione della distanza dalla lama di carico

Per le indagini al microscopio si è utilizzato un microscopio ottico ad acquisizione immagini digitale tramite porta USB, tipo DINO LITE in figura 4.68 con ingrandimenti di 50x e 200x.

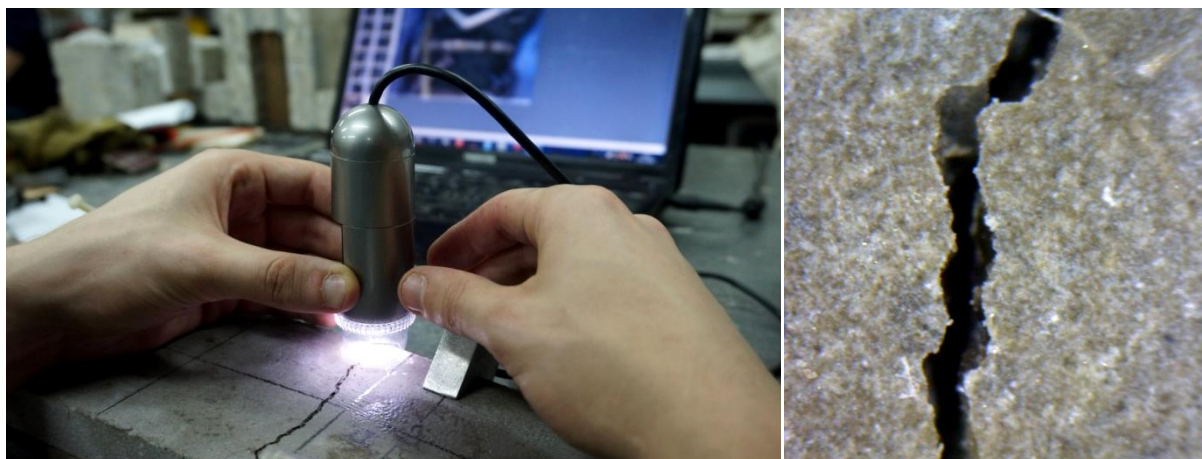


Figura 4. 68 - Microscopio ottico e presa della foto con ingrandimento 200x

L'indagine ha riguardato ogni singola fessura. Si è cercato di ottenere serie di foto con ingrandimenti al 50x che fossero il più ravvicinati possibili, senza avere discontinuità così da essere in grado poi di raccoglierle tutte assieme e fare la composizione che segue, Fig. 4.69. La parte a sinistra mostra infatti gli ingrandimenti a 50x, mentre nella parte a destra sono quelli ottenuti tramite ingrandimento a 200x. Il provino di modello è quello della campagna *Steel+Sisal*, con orientamento delle fibre come facilmente intuibile disposte ortogonali alla direzione degli sforzi di trazione. L'ampiezza della fessura risulta essere pari ad un valore misurati di C.O.D. di 0,5 mm. Si nota anche la differenza che intercorre tra i due ingrandimenti, tra il 50x a sinistra e a 200x a destra, andando ad ottenere un livello di dettaglio maggiore in quest'ultima.



Figura 4. 69 - A sinistra è il precrack, a destra è il risultato dopo 1 mese d'esposizione in acqua. A SX) ingrandimento 50x. A DX) ingrandimento 200x

Le fessure dopo il periodo di terapia di lunga durata, specialmente negli ambienti che presentano acqua in forma liquida, presentano la formazione dei prodotti di self-healing. Questi prodotti sono facilmente rintracciabili, poiché si presentano sotto forma di cristalli di carbonato di calcio che visivamente sono di un brillante bianco neve. Il problema riscontrato nell'indagine visiva al microscopio è che non risulta semplice riuscire a rintracciare le stesse fessure dopo che queste hanno cambiato forma e dimensione. Per ovviare a questo tipo di problematiche si sono adottate differenti strategie: la prima, fondamentale, è quella di segnare sul provino stesso con una matita il bordo del microscopio a contatto con la superficie, così da sapere dove si sono fatte le foto, come mostrato in Fig. 4.70. Per evitare troppi segni e troppe incomprensioni, i segni sono stati adottati solo per le immagini con ingrandimento al 200x. Quelle al 50x, come detto, sono state lungo tutta la fessura.

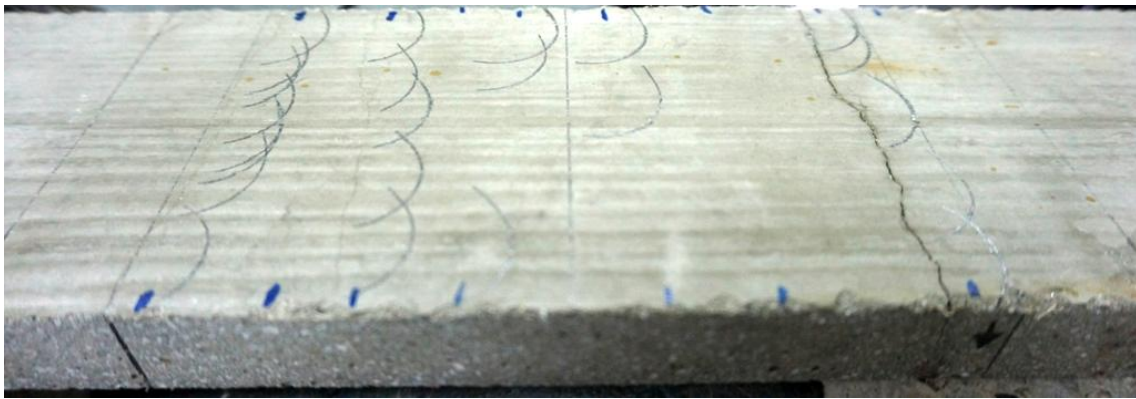


Figura 4. 70 – Mappatura delle fessure tramite segni attorno al microscopio

Oltre a questa strategia, si è adottato talune volte la possibilità di segnare digitalmente la sede delle fotografie. Tramite le fotografie scattate della zona tra le lame di carico, si è potuto modificarle e segnare con un semplice disegno il punto della presa immagine, Fig. 4.71.



Figura 4. 71 - Mappatura delle fessure tramite CAD

Tramite il software di utilizzo del microscopio e di acquisizione delle immagini, si è potuto misurare l'ampiezza delle fessure. La misura avviene manualmente. Il software non calcola i pixel dell'immagine dove è presente la fessura, ma tramite puntatore manuale si procede a tracciare una distanza tra i due lembi della fessura nella figura.

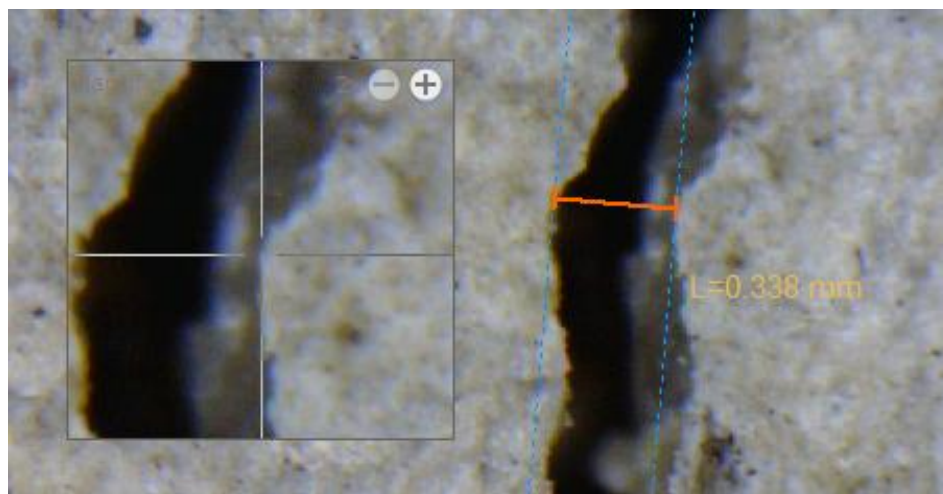


Figura 4. 72 - Misurazione dell'ampiezza di fessura

Inoltre è stata effettuata una singola misura dello sviluppo delle fessure su un provino con comportamento *deflection hardening* durante lo svolgimento della prova. Lo svolgimento dell'indagine ha visto protagonista la telecamerina di un cellulare, lasciata attiva durante la prova a flessione. Posta sotto il provino ha continuato a riprendere per tutto lo svolgimento della prova. Lo spostamento del provino nel tempo, però, ha fatto andare fuori fuoco la telecamera. Il post-processing per questa operazione è stato più complicato

del previsto e quindi non la si è ripetuta ulteriormente. Segue il grafico dello sviluppo fessurativo, in Fig. 4.73

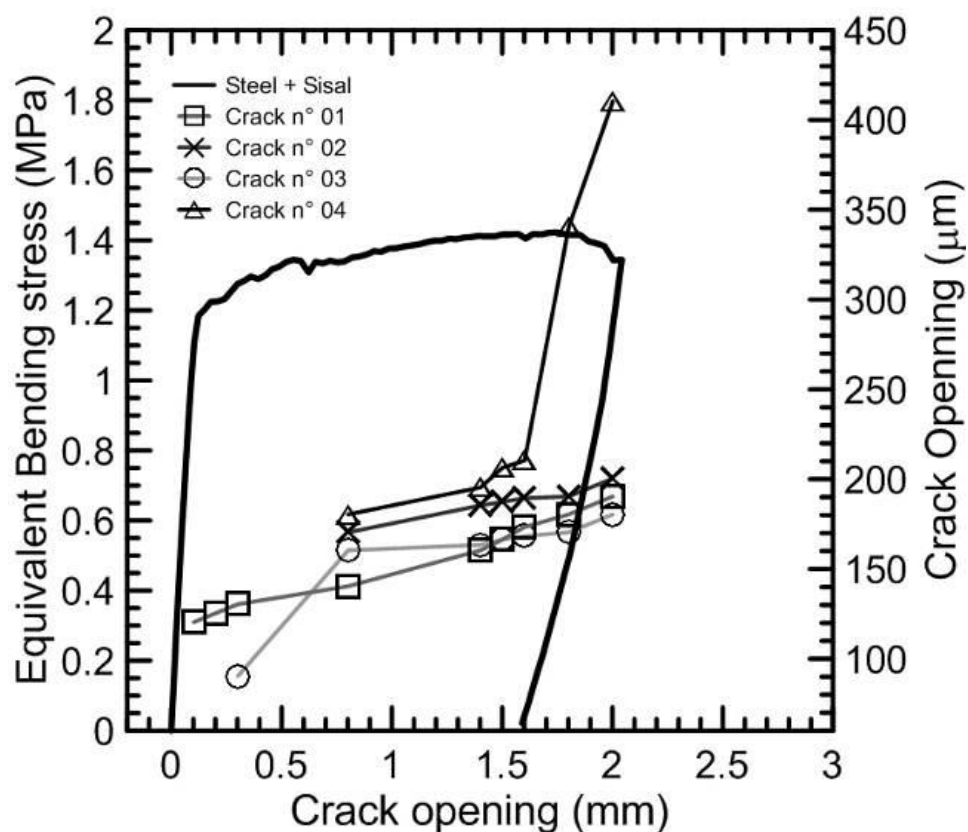


Figura 4.73 - Cinematica di apertura di fessura durante la prova a flessione

Nel capitolo riguardo l'analisi dei dati verranno mostrate le foto in paragone per ogni tipologia di esposizione e durata della terapia, inoltre verranno fatte conclusioni a riguardo e nelle appendici di appartenenza verranno mostrate con più precisione le fotografie. L'indagine al microscopio ha fornito per il momento una quantità di foto pari a poco più di 30.000 file per la campagna *Steel+Sisal* e più di 8.000 file invece per la campagna *Sisal Hybrid*, considerando sia la prefessurazione che le immagini post-trattamento.

4.4.3 Variazione di acqua assorbita

I provini per la campagna *Sisal Hybrid* hanno subito tutti quanti una esposizione diversa da quelli per la campagna *Steel+Sisal*. L'esposizione, come visto in precedenza, è dinamica, nel senso che si mutano le condizioni in cui il provino viene sottoposto nel tempo. I cicli prevedono la variazione tra: ambiente umido – 20° C e 90% U.R.; ambiente interno – locale interno al laboratorio, quindi condizioni climatiche mutevoli e non controllate; e immersione in acqua. Ad ogni passaggio tra un condizione e l'altra, il provino è stato

sottoposto a controllo del peso per valutare il suo assorbimento di acqua in funzione alle condizioni di esposizione.



Figura 4. 74 - Controllo del peso per i provini della campagna *Sisal Hybrid*

Oltre ad essere una condizione di esposizione per i provini, i cicli Wet/Humid sono considerati anche una delle indagini a cui i provini per la campagna *Sisal Hybrid* sono stati sottoposti. Ulteriormente alle prove meccaniche a flessione su 4 punti sia in prefessurazione che al termine della terapia e in aggiunta alle indagini ottiche, i provini sono stati oggetto di analisi mirata a controllare il loro peso nel tempo. Il controllo avveniva misurando tramite bilancia di precisione (marca CONTROLS) il peso del provino dopo ogni cambio di esposizione, come mostrato in Fig. 4.74.

Nel capitolo successivo si tratteranno in maniera più esaustive le considerazioni riguardo ai provini per la campagna *Sisal Hybrid*.

CAPITOLO 5: ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

5.1 Campagna ritiro

5.1.1 Mix design

I mix design che sono stati realizzati per questa parte della campagna sperimentale sono i seguenti, indicati nei loro componenti nella Tab. 5.1:

- VI. *Reference*
- VII. *Steel*
- VIII. *Sisal*
 - a. Presaturato in acqua
 - b. Condizioni termoigrometriche ambientali
- IX. *Eucalyptus*
- X. *Nano pulp*

Costituente	Dosaggio [kg/m ³]				
	I.	II.	III.	IV.	V.
Cemento	600	600	600	600	600
Loppa d'altoforno	500	500	500	500	500
Acqua	200	200	200	200	14
Superfluidificante	33	33	33	33	33
Sabbia	1000	982	982	982	982
<i>Sisal</i>			14,1		
<i>Eucalyptus</i>				21,4	
<i>Nanopulp</i>					
<i>Steel</i>		100			186

Tabella 5. 1 - Mix design per la campagna ritiro

5.1.2 Analisi del ritiro

Per ogni mix design si sono realizzati 6 provini: 3 per le valutazioni del ritiro autogeno, sia contrazione assiale che perdita di peso, e altrettanti 3 per le misure riguardo il ritiro da essiccamento, sia variazione dimensionale che scambio igrometrico. I risultati sono stati già analizzati da Ferrara *et al.* [101] e nei due paragrafi a seguire vengono fatte le medesime conclusioni, andando ad argomentare più nel dettaglio i risultati sperimentali.

5.1.2.1 Ritiro autogeno

Per ogni mix riportato nella Tabella 5.1 sono stati gettati 3 provini prismatici 40x40x160 mm che dopo il tempo di maturazione in camera umida (20° C e 90% U.R.) di 24 ore, sono stati involuppati in multipli fogli di alluminio per evitare variazioni igrometriche e termiche del provino. La valutazione così riprodotta è quella del ritiro autogeno, ovvero la contrazione assiale che avviene nel composto a seguito delle trasformazioni chimiche che hanno luogo nel provino. I prodotti dell'idratazione del cemento hanno dimensioni minori di quelli dei reagenti costituiti dall'acqua e dal cemento anidro, quindi durante le fasi di presa e indurimento si registra una contrazione dimensionale nel tempo. La contrazione dipende principalmente dal tenore di cemento.

A seguire si mostrano i risultati ottenuti in 28 giorni di misurazioni. Per ogni mix design sono state prese misurazioni di ogni provino più volte nel giorno, in funzione a quanto tempo è trascorso dal momento del getto. Per ogni mix sono state poi successivamente mediati i tre risultati ottenuti dai singoli provini. La Fig. 5.1 mostra l'andamento quindi del ritiro autogeno misurato per i mix design sopra menzionati.

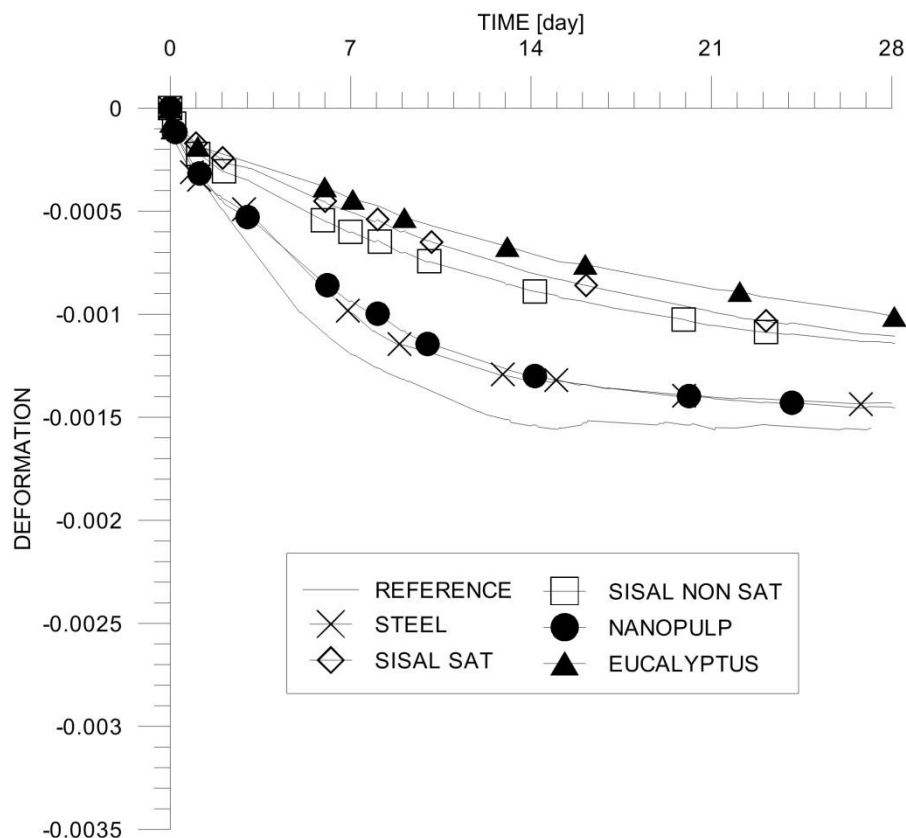


Figura 5.1 - Andamento del ritiro autogeno

Il ritiro autogeno risulta essere più marcato nel mix *Reference*, dove non si hanno al suo interno alcun tipo di fibre. Il mix *Steel* e quello con *Nanopulp* invece mostrano andamento del tutto simile, tanto da sovrapporsi in molti punti. Le fibre riducono quindi la quantità assoluta di contrazione autogena, misurando valori bassi per i mix con le fibre di *Sisal*, sia esse secche che saturate d'acqua. Il mix che riduce il ritiro autogeno è quello con all'interno le fibre di *Eucalyptus*.

Per validare i risultati sono stati pesati tutti i provini allo stesso tempo in cui venivano registrate le contrazioni dimensionali. Qualora la variazione complessiva del peso fosse stata minore dello 0,5 % allora si possono ritenere i risultati ottenuti come correttamente verificati. A seguire viene mostrato il grafico relativo alla perdita di peso dei provini per ritiro autogeno, Fig. 5.2

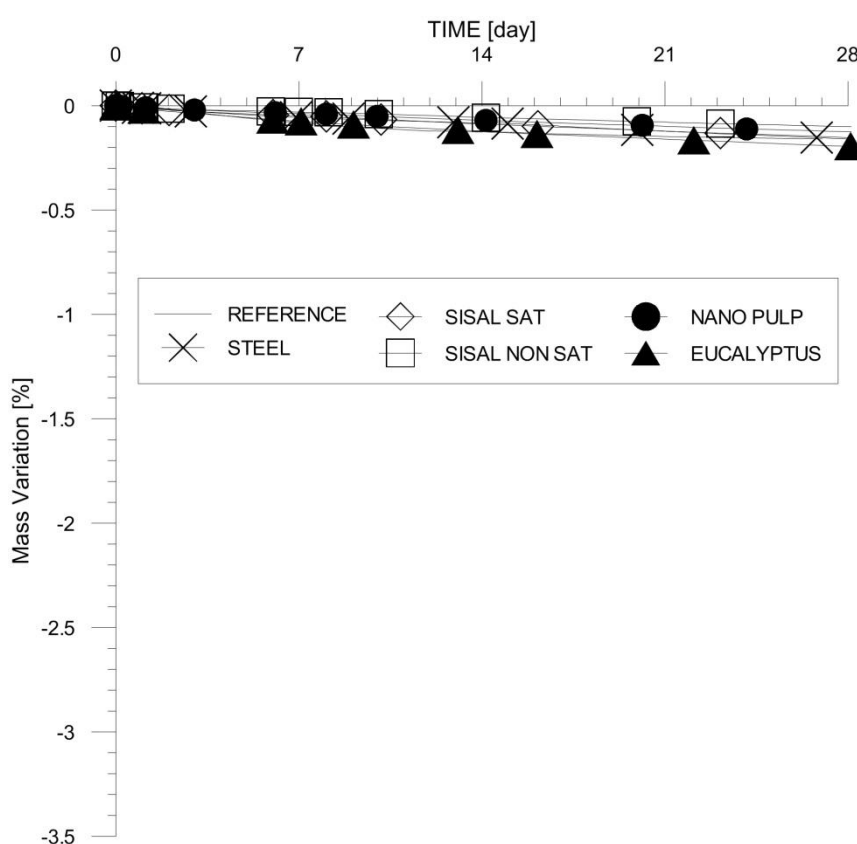


Figura 5. 2 – Variazione di massa nel ritiro autogeno

	<i>Reference</i>	<i>Steel</i>	<i>Sisal SAT</i>	<i>Sisal NonSat</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Nanopulp</i>
1ª Settimana	70,9 %	60,1 %	41,6 %	48,1 %	37,9 %	58,6 %
2ª Settimana	97,2%	90,3 %	72,5 %	74,5 %	66,4 %	87,0 %
3ª Settimana	98,3%	96,9 %	89,3 %	90,3 %	87 %	96,2 %
4ª Settimana	100 %	100 %	100%	100 %	100 %	100 %

Tabella 5. 2 – Andamento percentuale del ritiro autogeno nel tempo

La Tab. 5.2 mostra l'andamento del ritiro autogeno nel tempo in funzione del valore massimo registrato.

5.1.2.2 Ritiro globale

I provini per il ritiro totale hanno trovato posto, come visto nel Cap. 4, nella camera secca (20° C e 50% U.R.) così da valutare lo scambio igrometrico dell'interno dei provini con l'ambiente esterno. I risultati ottenuti misurano il ritiro totale sviluppato dal provino, che infatti subisce al suo interno sia quello autogeno, come visto e spiegato nel paragrafo precedente, che quello da essiccamento, dovuto alla migrazione dell'acqua contenuta nel conglomerato verso l'ambiente esterno. Di seguito viene mostrato, in Fig. 5.3, l'andamento del ritiro totale misurato.

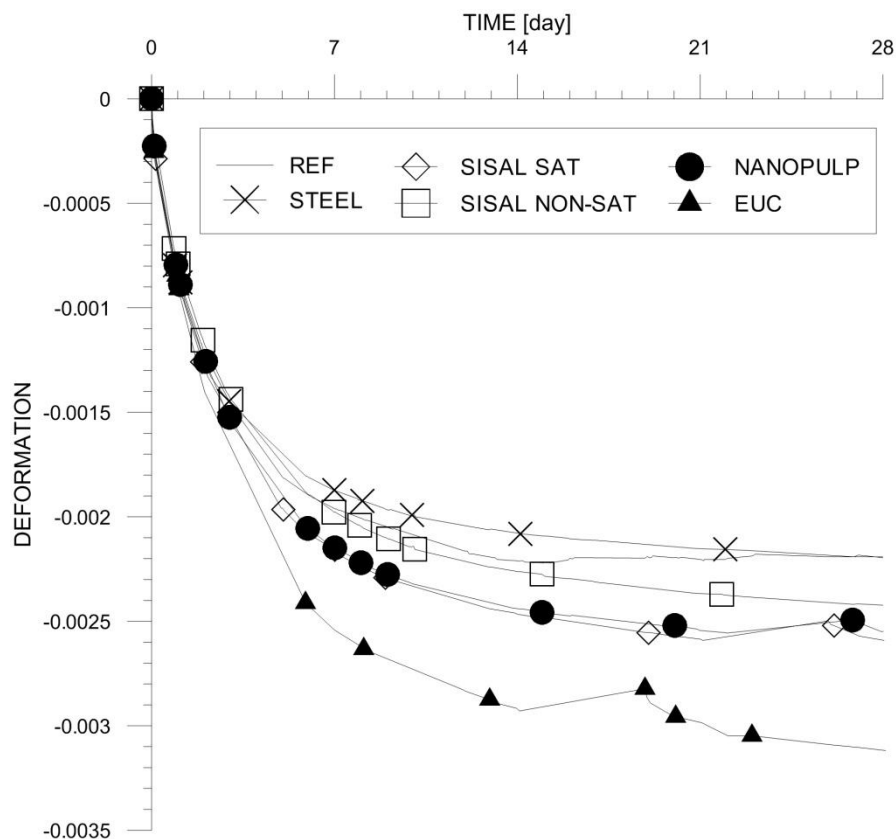


Figura 5.3 - Andamento del ritiro globale

L'andamento dei risultati mostra come il mix *Reference* e quello con le fibre *Steel* hanno registrato ritiri minori rispetto ai mix con le fibre naturali. Queste infatti mostrano ritiri più marcati, soprattutto quello con le fibre *Eucalyptus*. Le fibre naturali tendono a comportarsi come veicolo tra interno della matrice cementizia ed esterno, creando un

percorso preferenziale che metta in comunicazione i due ambienti. In questo modo si creano canali tramite i quali l'umidità interna al provino riesce a fuoriuscire, risultando in una contrazione maggiore. A suffragare questa tesi sono anche i risultati ottenuti dall'andamento della perdita di peso, come si può vedere in Fig. 5.4. Inoltre, nella Fig. 5.5 si mostra il rapporto che intercorre tra perdita di peso e ritiro.

	<i>Reference</i>	<i>Steel</i>	<i>Sisal SAT</i>	<i>Sisal NonSat</i>	<i>Eucalyptus</i>	<i>Nanopulp</i>
1ª Settimana	85,7%	82,5 %	80,6 %	77,8 %	77,4 %	80,4 %
2ª Settimana	98,8 %	93,8 %	94,1 %	92,4 %	92,3 %	94,9 %
3ª Settimana	98,9 %	97,9 %	99,2 %	97,5 %	95,6 %	98,7 %
4ª Settimana	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Tabella 5. 3 - Andamento percentuale del ritiro globale nel tempo

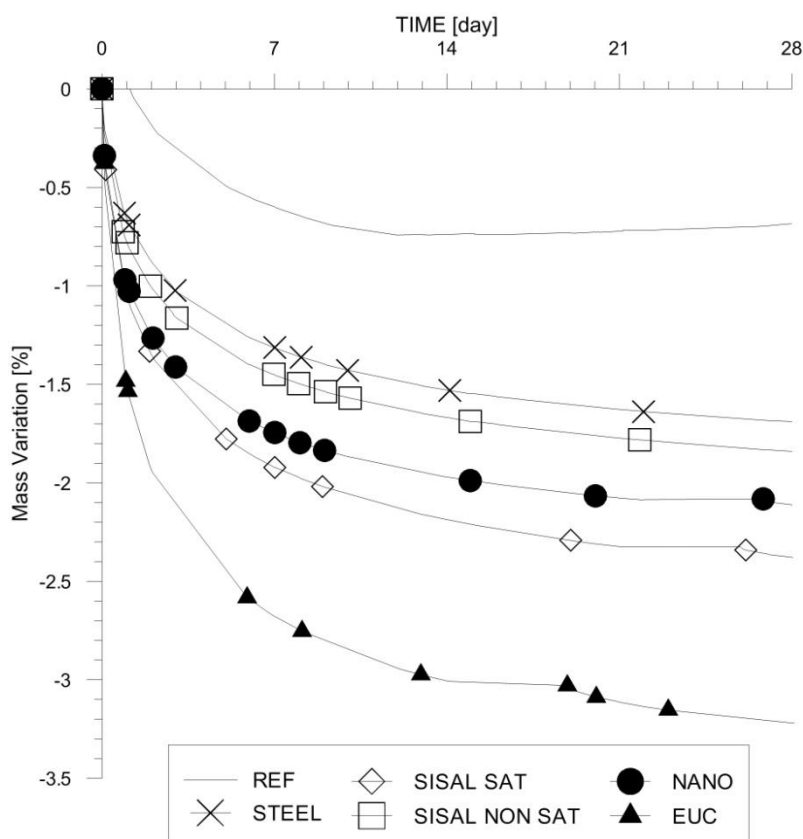


Figura 5. 4 – Variazione di massa nel ritiro globale

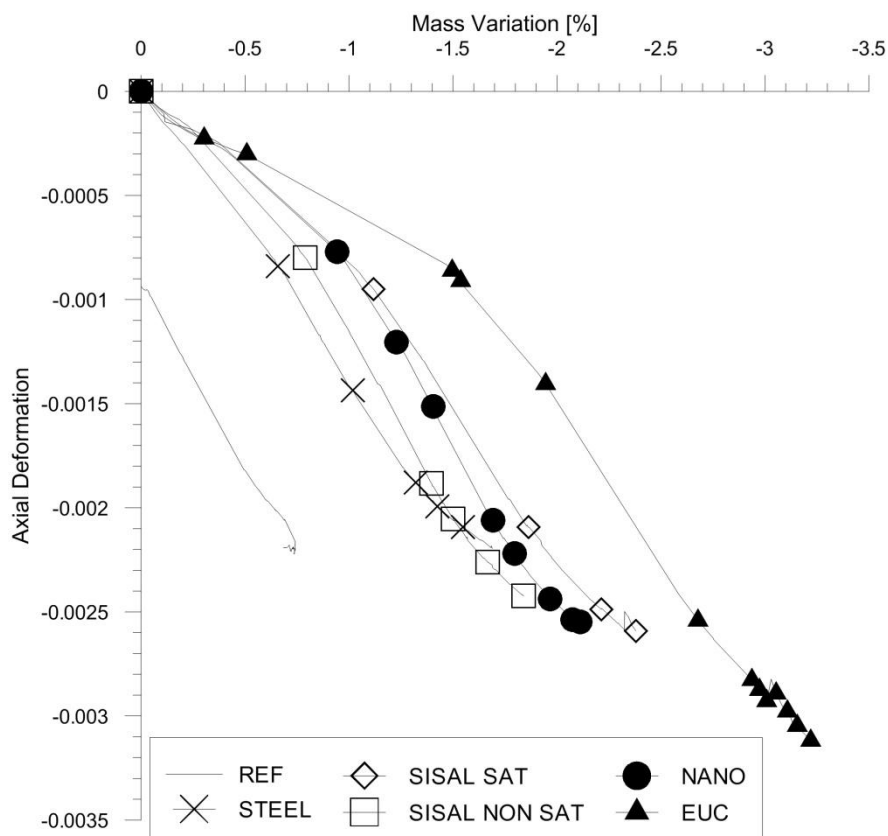


Figura 5.5 - Rapporto tra variazione di massa e contrazione assiale

I grafici mostrano come l'andamento del ritiro e la contrazione assiale siano collegati con la perdita di peso e quindi alla migrazione dell'umidità contenuta nel provino verso l'esterno. Aumentando la perdita di acqua si incentiva il ritiro a parità di altri fattori.

5.1.2.3 Ritiro da essiccamento

Ottenendo i due risultati dalle due serie di provini per il ritiro globale e quello autogeno, si può ricavare il ritiro da essiccamento come quello ottenuto sottraendo il ritiro autogeno da quello globale. Infatti nei provini utilizzati per la misurazione del ritiro globale avveniva al loro interno il processo di ritiro autogeno, ovvero il processo chimico proprio dell'idratazione del cemento. La Fig. 5.6 mostra l'andamento dei risultati così ottenuti.

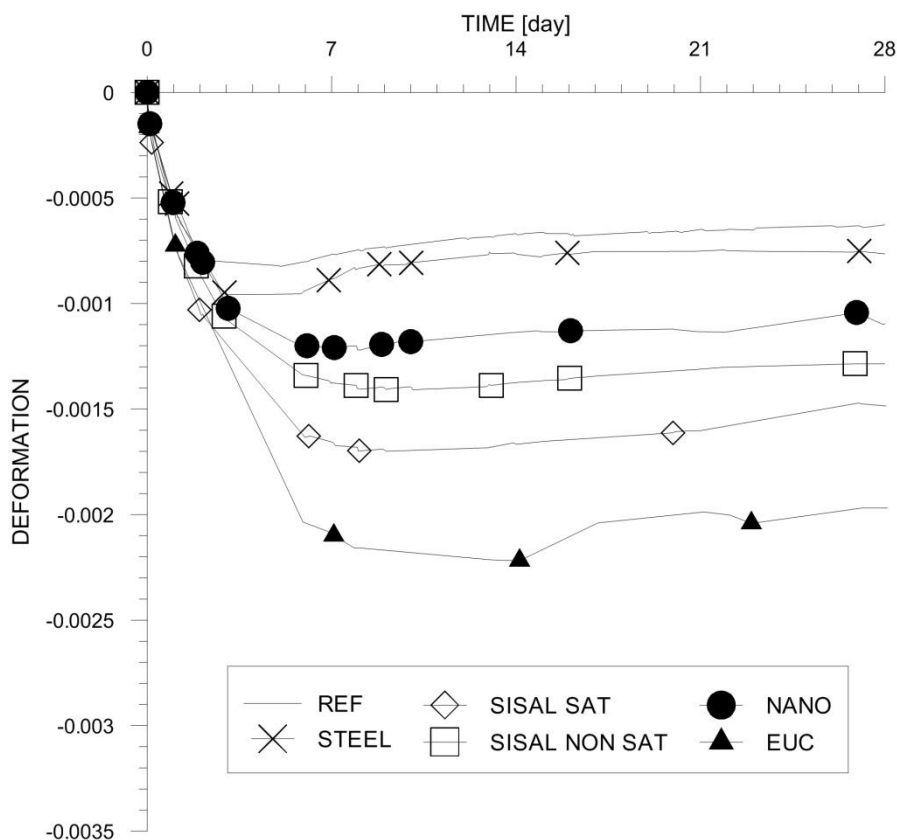


Figura 5. 6 - Andamento del ritiro da essiccamento

Il grafico mostra come la presenza di fibre naturali all'interno della matrice influisce sull'effetto del ritiro da essiccamento. Infatti si nota come il mix con le fibre di *Steel* non subisce grandi variazioni lineari nel tempo, così come il mix *Reference*, mentre i mix con fibre naturali mostrano un andamento più marcato del ritiro.

La tre foto di seguito, Fig. 5.7, mostrano come è influente la sigillatura del provino nei confronti della dispersione dell'umidità all'interno del composto. A sinistra si mostra un provino utilizzato per l'analisi del ritiro globale, in mezzo quello per il ritiro autogeno e destra si mettono in paragone i due pezzi. La parte centrale più scura mostra infatti una ridotta perdita di umidità grazie all'utilizzo di fogli di alluminio che ne hanno impedito la fuoriuscita verso l'ambiente esterno. I risultati ottenuti analizzando la variazione di massa per provini adibiti al ritiro autogeno mostrano infatti valori limitati, entro infatti lo 0,5%. Questo comporta la validazione tramite le normative [98]

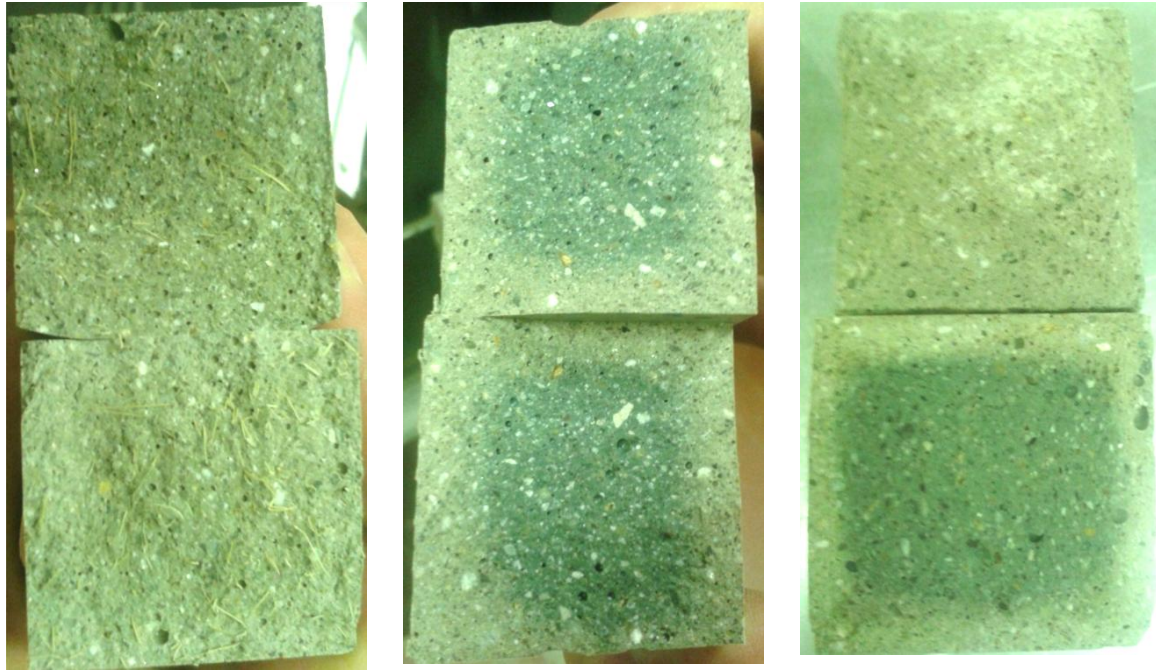


Figura 5. 7 - Umità interna al composto in provini sigillati e lasciati ad essiccare

5.1.3 Proprietà meccaniche

Al termine delle prove per ritiro, i provini sono stati oggetto di prove meccaniche distruttive. Come indicato nel Cap. 4, si sono svolte prove a flessione su ogni provino e successivamente una prova a compressione pura su ogni troncone del provino.

	<i>Reference</i> [MPa]	<i>Steel</i> [MPa]	<i>Sisal SAT</i> [MPa]	<i>Sisal NonSat</i> [MPa]	<i>Eucalyptus</i> [MPa]	<i>Nanopulp</i> [MPa]
Flessione DRY	-	22,73	13,20	14,71	14,14	14,22
Flessione AUTO	-	22,32	12,22	14,06	14,39	13,65
Comp. DRY	-	123,66	91,63	99,60	88,06	91,73
Comp. AUTO	-	142,35	115,28	109,81	101,13	117,88

Tabella 5. 4 - Risultati delle prove meccaniche

La Tab. 5.4 mostra i valori ottenuti dalle prove meccaniche. Come prevedibile si hanno valori più elevati per i provini che hanno avuto l'impiego per misurare il ritiro autogeno. Loro infatti non permettendo lo scambio di umidità con l'esterno hanno avuto una

quantità maggiore di acqua al loro interno per continuare l'idratazione del cemento e quindi migliorare le prestazioni.



Figura 5.8 - Prove meccaniche dei provini per il ritiro

La Fig. 5.8 mostra i provini dopo essere stati testati meccanicamente, a sinistra per la prova a flessione su 3 punti, mentre a destra dopo una prova a compressione pura di uno dei monconi del provino. Si nota come i mix con fibre macroscopiche (*Steel* e *Sisal*) mantengono i lembi uniti sotto flessione e il tronco a clessidra nella prova a compressione. Quello che accade nei mix con fibre di dimensioni minori (*Eucalyptus* – micrometriche, *Nanopulp*, nanometriche appunto) è differente. Sotto flessione si ha rottura netta e improvvisa con la separazione dei due tronconi, così come sotto compressione semplice. La parte fuori dall'incudine viene di fatto lanciata via dal resto del provino una volta raggiunto il carico di rottura. Questo indica che le fibre di dimensioni maggiori possono incentivare lo sviluppo di zona multifessurativa quando testate in una prova a flessione su 4 punti. Se ne riscontrerà, però, solo in mix che utilizzino parte di fibre di acciaio. Malgrado le dimensioni e la resistenza meccanica delle singole fibre di *Sisal* non si è visto lo sviluppo di multi-fessure in test a flessione su 4 punti.

5.2 Campagna self-healing

5.2.1 Considerazioni iniziali

5.2.1.1 Dati di output e loro sviluppo

Come spiegato nel capitolo precedente, la valutazione dell'estensione della capacità autoriparante del calcestruzzo passa principalmente dalla variazione del comportamento meccanico prima e dopo una esposizione in un ambiente controllato per un arco di tempo. Il comportamento viene analizzato secondo prove meccaniche a flessione su 4 punti. Prima di essere utilizzati per l'analisi, i dati di output devono opportunamente essere processati, per rendere ogni dato di uscita conforme agli altri.

I dati che vengono forniti dallo strumento di analisi sono i seguenti, Tab. 5.5:

Step	Tempo (s)	Stroke (mm)	Load (kN)	COD-MID-F (mm)	COD-MID-R (mm)
0	1	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabella 5.5 - Dati di output dello strumento di analisi

Dove si identifica con:

Step	rappresenta la sequenza con cui vengono raccolti i dati
Tempo	è il tempo effettivo della prova
Stroke	indica la posizione dell'attuatore, espresso in <i>mm</i>
Load	identifica il carico agente sul provino, espresso in <i>kN</i>
COD-MID-F/R	sono i valori registrati dagli LVDT durante lo svolgimento della prova

I dati di output che hanno bisogno di un modifiche sono quelli nelle ultime tre colonne della Tabella 5.5. Da quei valori si ricavano i due valori che andranno poi plottati nei grafici tensione/deformazione. Di seguito si mostrano parte della tabella di analisi dei dati. Tabella 5.6:

A-1-5-T						
H [m]	0,0200	W [m]	0,09850	POST	WATER	3 M
LOAD	COD AVG	COD-MID-F	COD-MID-R	M _{Centraline}	σ _N	COD.D
kN	mm	mm	mm	kNm	kNm/(m*m ²)	mm
0	0,003	0,004	0,002	0	0	0,430
0,002	0,0035	0,004	0,003	0,000125	0,019036	0,431
0,003	0,004	0,005	0,003	0,000188	0,028553	0,431
0,005	0,004	0,005	0,003	0,000313	0,047589	0,431
0,005	0,005	0,006	0,004	0,000313	0,047589	0,432
0,007	0,005	0,006	0,004	0,000438	0,066624	0,432

Tabella 5.6 - Esempio di tabella per l'analisi dei dati

Se ne spiega il contenuto come:

COD AVG: indica la media aritmetica tra i due valori di C.O.D. misurati dai due trasduttori, applicati come descritto nel Capitolo 4. La formula che lega i due valori è la seguente, espressa in *mm*:

$$COD\ AVG = \frac{(COD-MID-F)+(COD-MID-R)}{2} [mm] \quad (Eq. 5.1)$$

LOAD: è il carico misurato nella cella di carico posta in testa alla macchina, espresso in *kN*. Viene misurato come segue, con indicazione nella Fig. 5.9:

$$LOAD = \frac{P}{2} + \frac{P}{2} = P \text{ [kN]} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

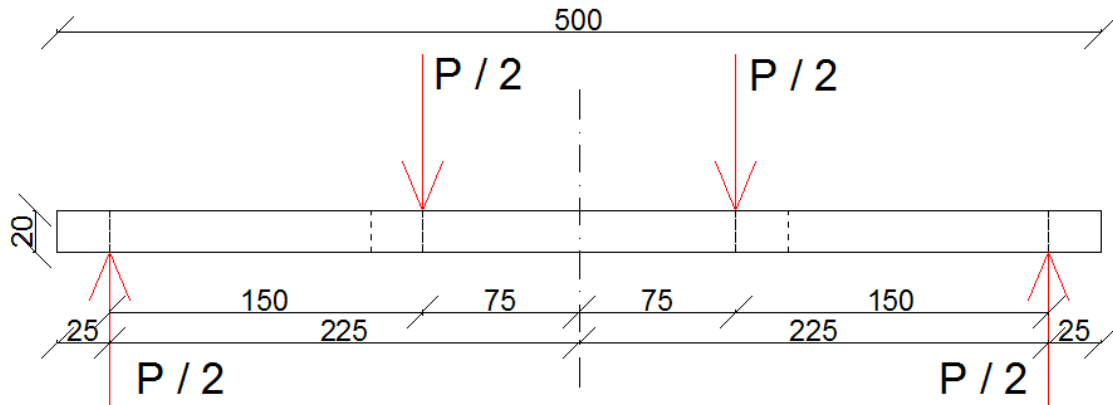


Figura 5.9 - Prova a flessione su 4 punti, distanze dei punti di contatto dalla mezzzeria

$$M_{Centraline} = \frac{P}{2} \cdot (0,15) \text{ [kNm]} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

$M_{Centraline}$: è il momento flettente calcolato in mezzzeria del provino, in riferimento alla Fig. 5.1, espresso in [kNm]

P è il carico totale applicato, come da Fig. 5.1

$(0,225 - 0,1)$ è la differenza tra la distanza dal centro della lama (0,1 m) e dell'appoggio (0,225 m)

$$\sigma_N = \frac{6 \cdot M_C}{b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

σ_N : si sono calcolate le tensioni nel provino secondo l'ipotesi di comportamento elastico di Eulero - Bernoulli, dove la sezione ruoti rimanendo piana. Si ha quindi lo studio della tensione nominale esercitata sul provino dovuta agli sforzi di flessione. Viene calcolata come segue, espressa in [MPa]

M_C : è il momento nella zona caricata centralmente, espresso in kNm

b : è lo spessore del provino (lettera W di Width in Tab. 5.2), in mm

h : è l'altezza del provino (lettera H di Height in Tab. 5.2), in mm

COD.D: le prove a flessione effettuate dopo il periodo di esposizione forniscono un nuovo valore di apertura di fessura. Lo strumento di analisi, però, non considera il provino con un valore di COD ottenuto in precedenza. Si deve quindi procedere a sommare i due valori manualmente: dall'ultimo valore misurato al termine della prima prova a flessione si sommano i valori di COD misurati dalla macchina durante la prova. Questi valori verranno meglio spiegati di seguito.

5.2.2 Validazioni

In prima istanza, data la grande varietà di mix design e di fibre utilizzate, si è ritenuto necessario ottenere funzioni di comportamento specifiche per ogni singolo mix. Sono stati presi due campioni per lastra, uno che avesse le fibre ordinate ortogonalmente all'asse longitudinale del provino e l'altro campione con fibre parallele. Quello che si ricercava era una legge di comportamento in funzione del mix design e delle fibre al suo interno.

Le successive analisi sono state volte alla validazione delle procedure adottate in fase di realizzazione. Sono state controllate le procedure di getto in base alle effettive risposte meccaniche fornite dal provino. Inoltre si è controllato che non si fossero macro difetti nei singoli provini, verificando che non avessero dei valori eccessivamente fuori media.

Si sono ricavati i grafici tensione normale (σ_N) – apertura di fessura (COD) per tutti i provini su cui si sono effettuate le prove a flessione su quattro punti. Le modalità di analisi tengono conto della rispettiva formazione di fessura singola o multipla.

5.2.2.1 Comportamento del mix design e ordinamento delle fibre

I mix design che sono stati effettivamente realizzati per la campagna self-healing sono in totale 5, si ricorda la quantità di fibre utilizzata nella parentesi:

- *Steel + Sisal* (0,64 % + 0,64%)
 - Fibre ortogonali (II), Fig. 5.11
 - Fibre parallele (T), Fig. 5.13/14
- *Sisal NON – Saturated* (1,28%)
 - Fibre ortogonali (T), Fig. 5.15
 - Fibre parallele (II), Fig. 5.16
- *Sisal Saturated* (1,28%)
 - Fibre ortogonali (T), Fig. 5.17
 - Fibre parallele (II), Fig. 5.18
- *Sisal + Eucalyptus* (0,64% + 0,64%)
 - Fibre ortogonali (T), Fig. 5.19
 - Fibre parallele (II), Fig. 5.20
- *Sisal + Nanopulp* (1,18% + 0,1%)
 - Fibre ortogonali (T), Fig. 5.21
 - Fibre parallele (II), Fig. 5.22

Per ogni mix, sono stati portati a rottura i cosiddetti provini “Vergini”. Sono stati presi due provini campione, uno per ciascun orientamento delle fibre, e portati a rottura per studiare il comportamento di quel particolare mix design con quell'orientamento di fibre.

Si nota, come già detto diverse volte, che il comportamento incrudente è accompagnato dalla presenza di multi fessurazione lungo la parte di provino centrata sotto le due lame di carico, dove appunto il momento è costante.

❖ Steel + Sisal

Fibre parallele (II)

Precedenti studi [87] hanno mostrato che in presenza di una quantità di fibre d'acciaio, le stesse utilizzate nella presente ricerca, pari ad 1,28% sul volume ed avendo disposto queste fibre secondo un andamento parallelo all'asse degli sforzi, si ottiene un comportamento *hardening* e la formazione e sviluppo di multi-fessure, Fig. 5.10. Solo uno dei mix design studiati presentava fibre d'acciaio, le stesse utilizzate nello sviluppo della ricerca precedentemente condotta [87]. La quantità utilizzata è peraltro 0,64% sul volume, l'altra parte è costituita da fibre di *Sisal*. Malgrado una perdita di resistenza nominale dovuta alla riduzione di fibre d'acciaio a favore di quelle di *Sisal*, i provini con fibre parallele hanno ottenuto lo sviluppo di una zona multi-fessurativa con comportamento tipico di *deflection hardening*, come si può notare in Fig. 5.11.

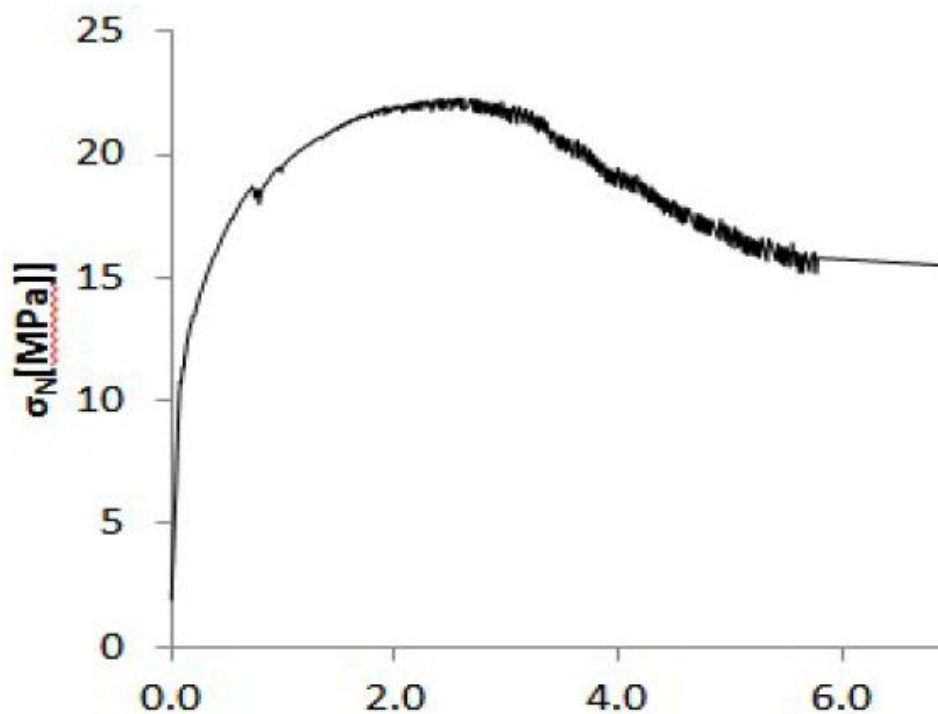


Figura 5. 10 - Provino "virgine" con fibre parallele, con solo fibre *Steel* [87]

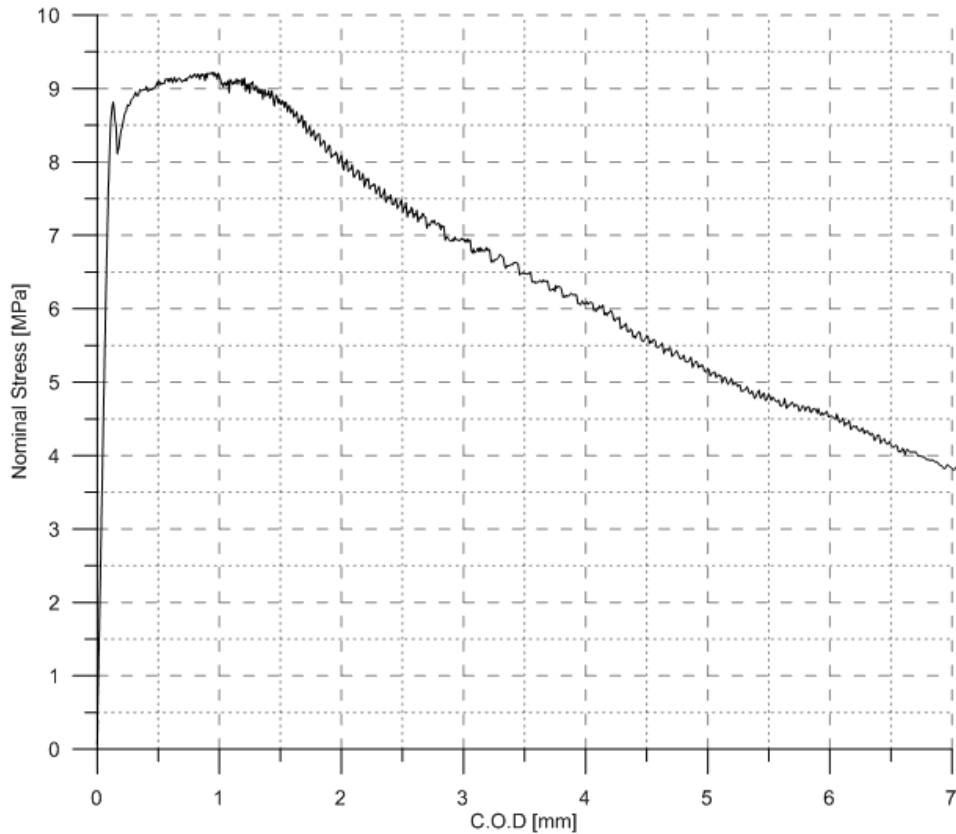


Figura 5.11 - Andamento del provino "Vergine" con fibre parallele e mix design Steel + Sisal

Fibre ortogonali (T)

Per quanto riguarda i provini con ordinamento di fibre ortogonali all'asse degli sforzi, il loro comportamento è stato quello tipico *deflection softening*, come già studiato in precedenza [87], Fig. 5.12. In questo caso, malgrado la presenza di fibre di Sisal, si sono comunque ottenuti validi risultati con tensione massima con poca differenza rispetto a quelli solo Steel, come si nota in Fig. 5.13. I due grafici, infatti, sono molto simili sia per quanto riguarda la tensione massima, sia per quella residua post fessura, sia il comportamento tipico.

Accanto ai provini fessurati a 1 mese di stagionatura, ci sono quelli che hanno avuto un periodo più lungo. La Fig. 5.14 mostra l'andamento tipico, sottoposto a cicli di carico/scarico. Si nota una tensione massima molto elevata. La stagionatura prolungata ha conferito una maggiore resistenza di picco al provino, portando a valori di tensione massima registrata pari a 12 MPa, quando per il provino a 1 mese di stagionatura si sono osservati valori di 6 MPa. Il composto, malgrado una prolungata stagionatura, non ha ottenuto miglioramenti nel tratto *softening*: la resistenza residua alla formazione della fessura risulta essere pressochè identica, così come la pendenza del tratto *softening*.

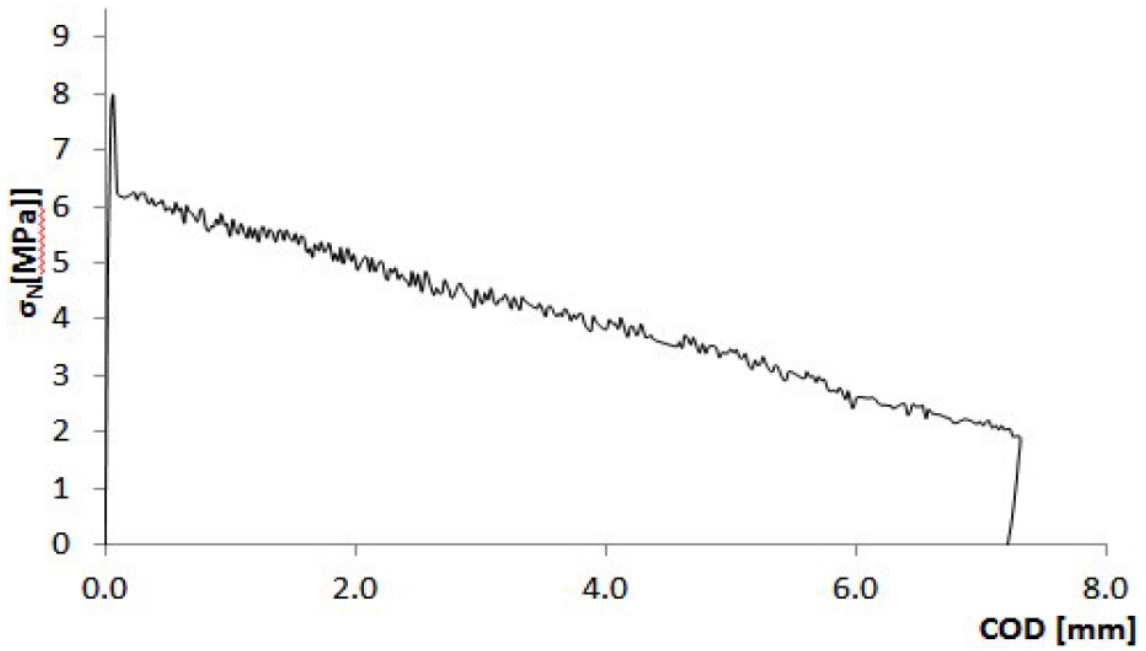


Figura 5. 12 - Comportamento del provino "vergine" con fibre solo *Steel* ed ordinamento ortogonale [87]

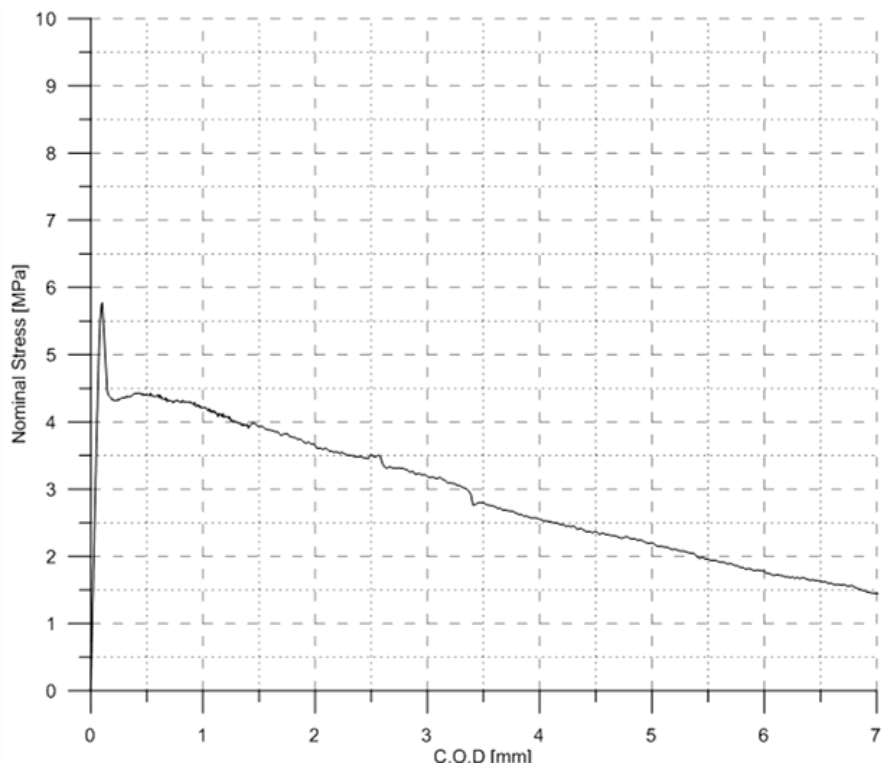


Figura 5. 13 - Andamento del provino "Vergine" con fibre ortogonali e mix *Steel + Sisal*

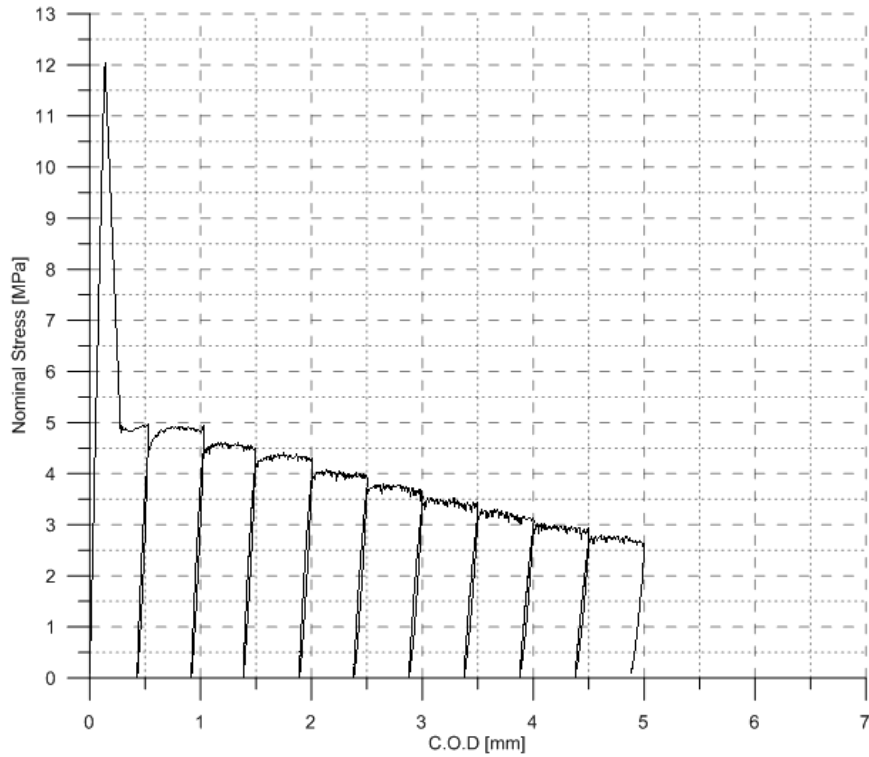


Figura 5. 14 - Andamento del provino "vergine", fibre ortogonali, mix Steel + Sisal e stagionatura 6 mesi

❖ Sisal NON-Saturated

Fibre parallele (II) e fibre ortogonali (T)

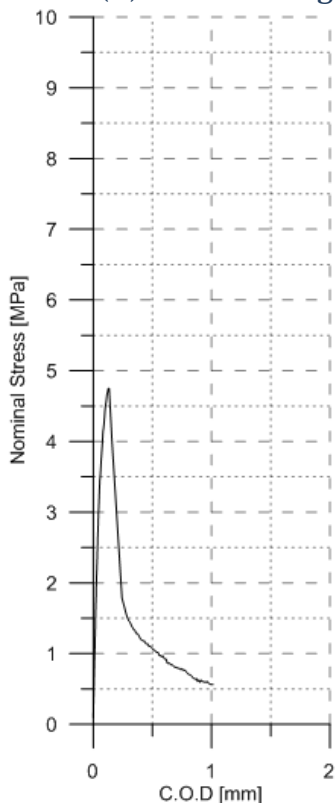


Figura 5. 15 - Provino Sisal Non-Saturated, fibre

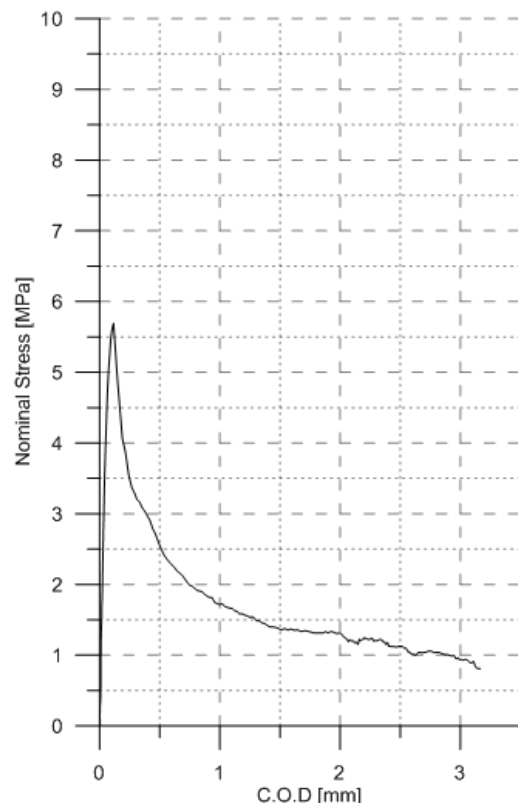


Figura 5. 16 - Provino Sisal Non-Saturated, fibre

Il comportamento dei provini con solo fibre di *Sisal* al 1,28% del volume, anche con ordinamento di fibre parallelamente all'asse degli sforzi, non riesce a far sviluppare una zona multifessurativa con comportamento *hardening*. Malgrado la tensione di rottura a trazione delle fibre di *Sisal* sia elevata, dell'ordine di 350 ± 600 MPa [24], non si innestano fenomeni di incrudimento. Inoltre la tensione massima registrata non è eccessiva: risulta minore di quella registrata nel mix idrido con anche le fibre d'acciaio, in linea con quello che ci si aspettava. Il comportamento è *softening* per entrambi le orientamenti delle fibre, anche se la tensione residua è maggiore nei provini con le fibre disposte parallelamente alla direzione delle tensioni di trazione.

❖ *Sisal Saturated*

Fibre parallele (II) e fibre ortogonali (T)

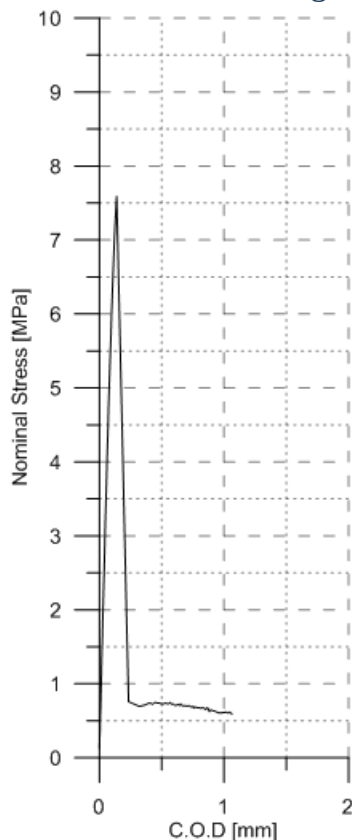


Figura 5.17 - Provino *Sisal Saturated*, fibre ortogonali

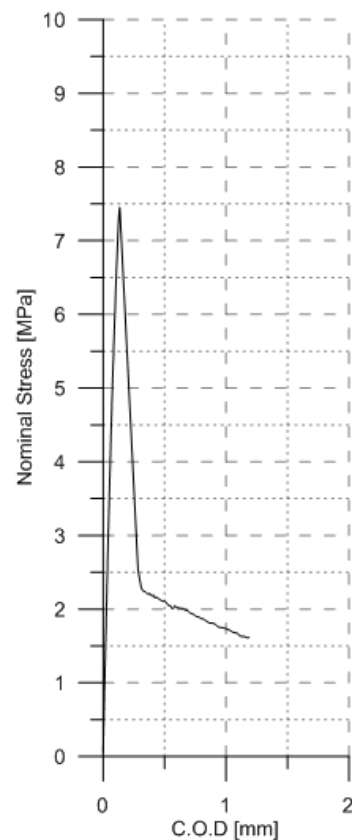


Figura 5.18 - Provino *Sisal Saturated*, fibre parallele

Esattamente come il mix design "gemello" con fibre asciutte, i provini con le fibre di *Sisal* utilizzate saturate d'acqua hanno avuto entrambi comportamento *deflection softening*. La sostanziale differenza sta nella tensione di picco, maggiore rispetto al mix asciutto, senza

però differenza tra fibre ortogonali o parallele. La tensione residua post-picco risulta essere maggiore con le fibre asciutte. È verosimile pensare che le fibre di *Sisal* asciutte riescano a garantire una maggiore aderenza con la matrice, che risulta essere minore nel caso di fibre *Sisal* sature d'acqua. Per quanto riguarda il comportamento generale, anche in questo caso le fibre disposte parallelamente all'asse degli sforzi di trazione mostrano un andamento migliore rispetto a quelle disposte perpendicolarmente.

❖ *Sisal + Eucalyptus*

Fibre parallele (II) e fibre ortogonali (T)

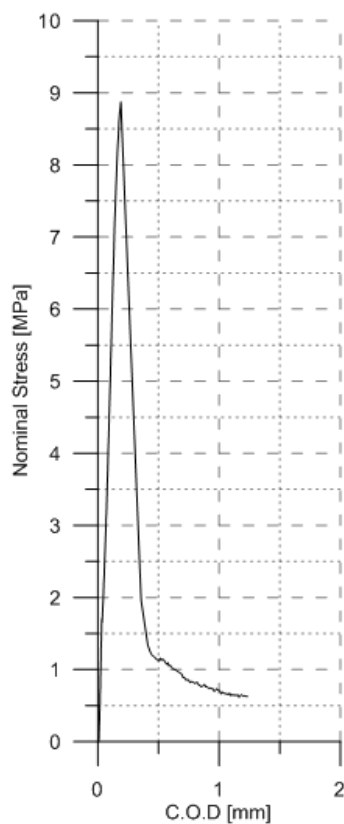


Figura 5. 19 – Provino *Sisal + Eucalyptus*, fibre ortogonali

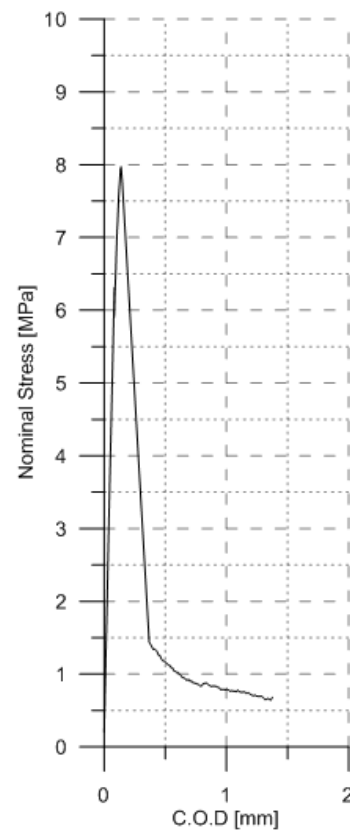


Figura 5. 20 - Provino *Sisal + Eucalyptus*, fibre parallele

Il mix design ibrido di *Sisal* con fibre di *Eucalyptus* presenta una eccessiva fragilità. Lo scarico di tensione dopo il picco è molto elevato: la matrice con fibre di *Eucalyptus* è molto coesa e porta e resistenze molto elevate, ma le fibre non tengono bene la tensione una volta che la matrice subisce la formazione della fessura, caratterizzando il comportamento in maniera fragile. La disposizione delle fibre all'interno della matrice non influenza particolarmente sul comportamento meccanico: in entrambi i casi, con fibre parallele o perpendicolari alla direzione degli sforzi, si registrano elevati valori di resistenza di picco,

un comportamento estremamente fragile, e una resistenza residua molto limitata, talvolta anche trascurabile.

❖ Sisal + Nanopulp

Fibre parallele (II) e fibre ortogonali (T)

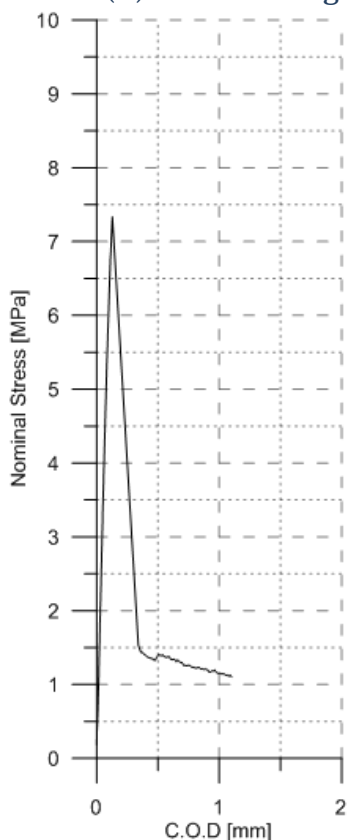


Figura 5. 21 - Provino *Sisal + Nanopulp*, fibre ortogonali

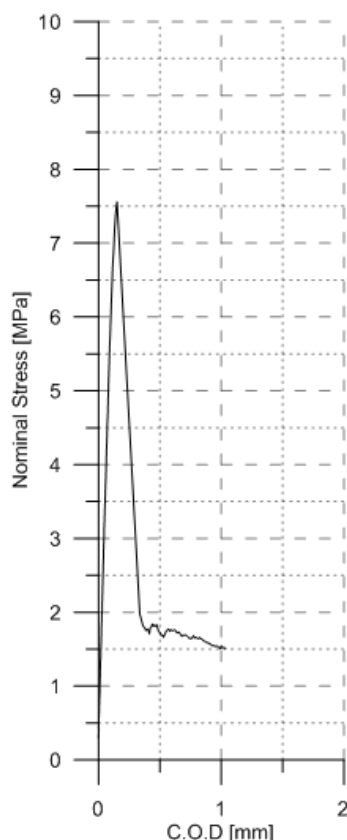


Figura 5. 22 - Provino *Sisal + Nanopulp*, fibre parallele

Analogamente ai provini *Sisal + Eucalyptus*, anche nel mix ibrido con *Nanopulp* si è ottenuto un comportamento fragile dei provini. Entrambe le disposizioni delle fibre non hanno permesso lo sviluppo di più fessure, con lo scarico di tensione elevato. Si nota, così come nei provini ibridi con fibre di *Eucalyptus*, che allo scarico competono valori di apertura di fessura molto elevati, prossimi all'apertura di riferimento stabilita a 0,5 mm. La tensione massima, anche in questo caso, è relativamente elevata: più elevata di quella con sole fibre di *Sisal*, così come maggiore di quella registrata con l'ibrido di fibre *Steel*.

Le fibre di dimensioni micrometriche così come quelle nanometriche, che sono state impiegate rispettivamente per i mix ibridi di *Sisal+Eucalyptus* e in *Sisal+Nanopulp*, hanno mostrato una resistenza di picco maggiore. La dimensione minore delle fibre consente una migliore compattezza della matrice, che risulta in una maggiore resistenza di picco. L'effetto dell'orientamento delle fibre influisce anch'esso seppur in maniera limitata.

5.2.2.2 Validazioni di provino

A seguito delle prove a flessione portate a rottura dei provini “vergini” si sono analizzati i risultati e si sono determinate le ottimali aperture di fessure. Per studiare il comportamento del materiale, si è condotta una analisi dei valori dei singoli provini, facendo quindi la media e valutando se era presente o meno una eccessiva dispersione dei valori registrati. Inoltre si è voluto analizzare l’andamento del provino in funzione della posizione nella lastra e la direzione dei getti del materiale.

I valori analizzati sono, tra gli altri:

- Tensione massima
- C.O.D. al massimo valore di tensione
- C.O.D. di prima fessura, solo per i provini a comportamento *deflection hardening*
- Rigidezza iniziale
- Rigidezza allo scarico
- C.O.D. di fine prova, ovvero l’ampiezza della fessura massima registrata
- C.O.D. residuo, l’apertura della fessura alla rimozione del carico. Questo valore verrà utilizzato per come punto di partenza per le prove post-trattamento per valore il recupero dovuto al self-healing.

Vengono di seguito riportati grafici e valori dei due lastre *Steel + Sisal*, tagliate in maniera differente. I valori e le misurazioni sono state eseguite anche per gli altri mix design realizzati, che vengono riportate in appendice.

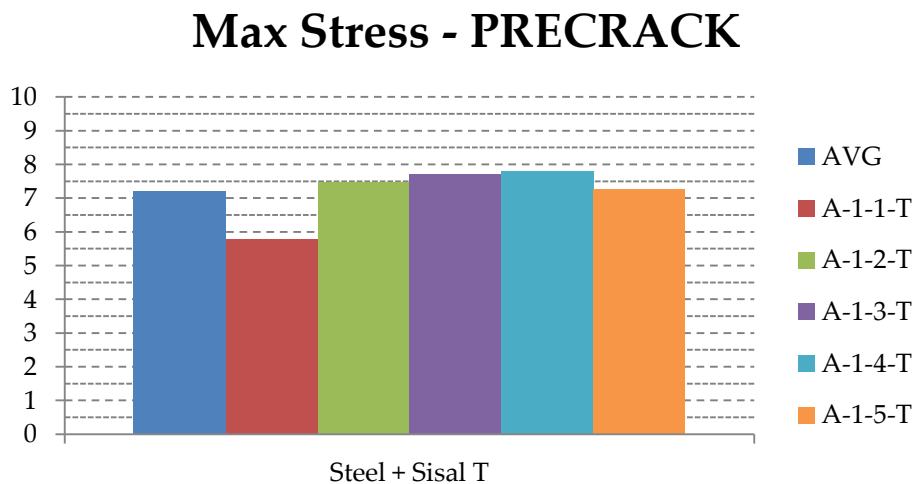


Figura 5. 23 - Media dei valori di tensione massima per provini *softening*

Max Stress - PRECRACK

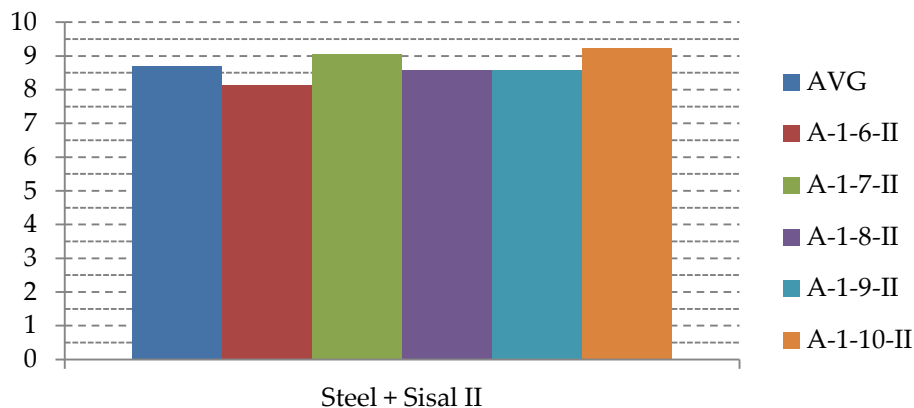


Figura 5. 24 - Media dei valori di tensione massima per provini *hardening*

I grafici a barre (Fig. 5.23 e Fig. 5.24) indicano i valori di tensione massima alla prefessurazione dei provini del mix *Steel + Sisal*, sia quelli con ordinamento delle fibre ortogonali (A-1-1/5-T, Fig. 5.23), sia quelli con ordinamento delle fibre parallele (A-1-6/10-II, Fig. 5.24). Generalmente non si notano variazioni eccessive tra i diversi valori misurati, se non nel solo caso 1 T. Si può dire che il comportamento meccanico dei provini è in funzione della loro posizione nella lastra. Come visto in precedenza nel Cap. 4, la Fig. 5.25 indica la posizione dei provini nella lastra in funzione del taglio. Può capire quanto segue:

- Il provino 1-T: può avere resistenze minore a causa della non completa ed omogenea dispersione delle fibre al suo interno. Come si può vedere nell'immagine 5.23 la sua tensione massima è minore rispetto alla media.
- Gli altri provini hanno comportamenti simili l'un l'altro, questo significa che la lastra è stata gettata in maniera corretta.

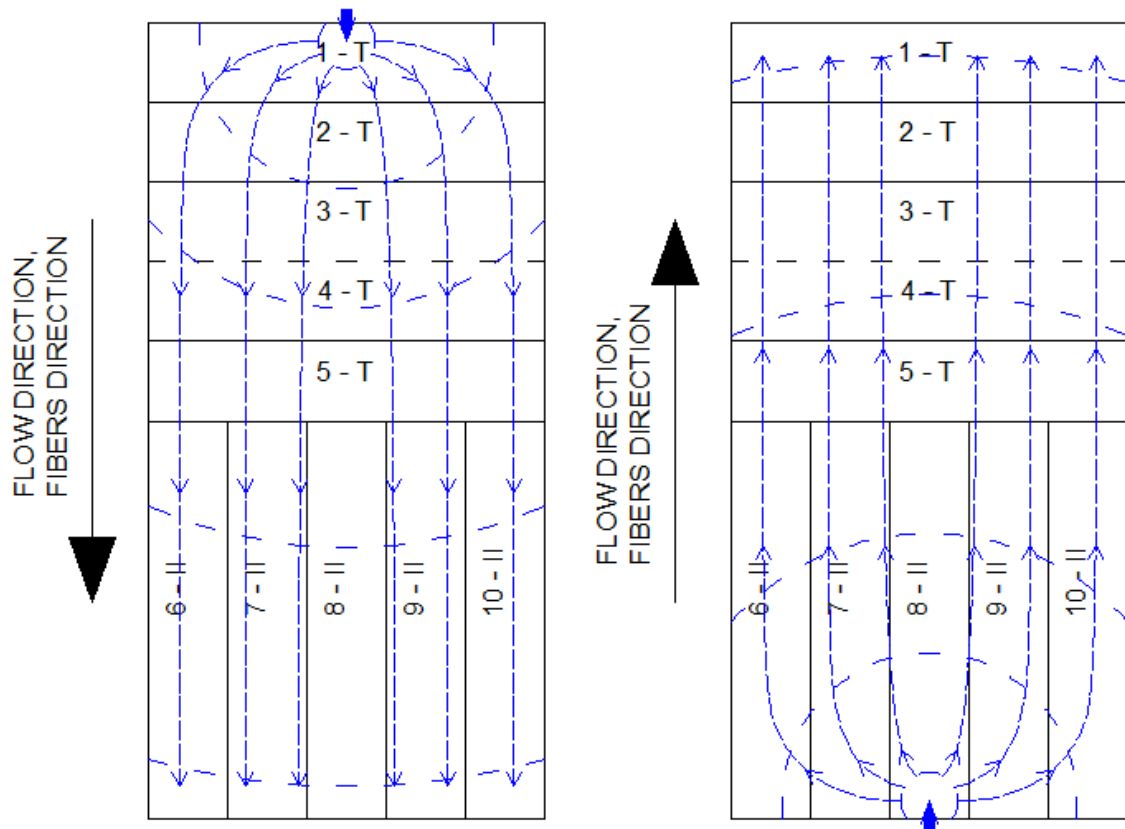


Figura 5. 25 - Disposizione dei provini in funzione del taglio

Qualora la lastra venisse tagliata nell'altro verso, quello dell'immagine 5.25 a destra, allora ci si aspetta comportamenti come seguono:

- I provini con fibre parallele che si trovano ai bordi della lastra (provini 6-II e 10-II) avranno resistenze minori rispetto agli altri.
- Il provino 1-T potrebbe avere comportamento non propriamente *softening* a causa degli "effetti di bordo". Le fibre rimbalzano sul bordo del cassero, spargendosi senza criterio.

Le immagini a seguire indicano il comportamento tipico del secondo taglio di lastra, così come è stato identificato per la lastra A-1, Fig. 5.26 e Fig. 5.27. Si mostra l'andamento dei provini ricavati dalla lastra E-4. Si vuole ottenere un ulteriore confronto tra i vari provini tramite il loro andamento nel grafico tensione – apertura di fessura.

Come mostrato nel grafico in Fig. 5.31, la curva E-1 in rosa-arancione, mostra il tipico effetto di bordo. La sua posizione terminale nella lastra non ha concesso un pieno sviluppo ed ordinamento delle fibre all'interno del provino, risultando in una maggiore disallineamento delle fibre. Il risultato è un comportamento differente da quello che ci si aspetta. Gli effetti di bordo risultano comunque già stati analizzati [87, 89] e quindi prevedibili e modesti.

Max Stress - PRECRACK

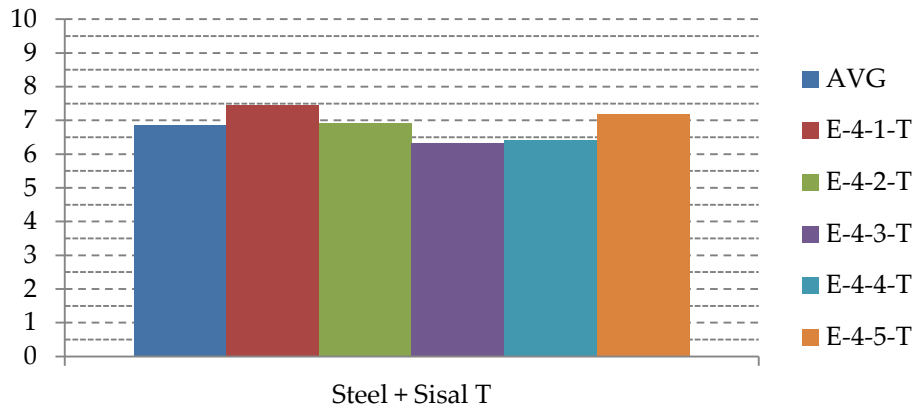


Figura 5. 26 - Andamento dei valori massimi di tensione per provini *softening* con diverse modalità di taglio

Max Stress - PRECRACK

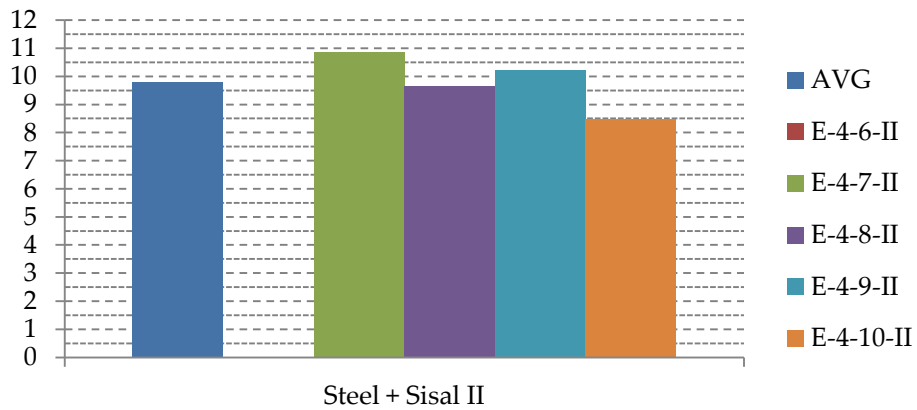


Figura 5. 27 - Andamento dei valori massimi di tensione per provini *hardening* con diverse modalità di taglio

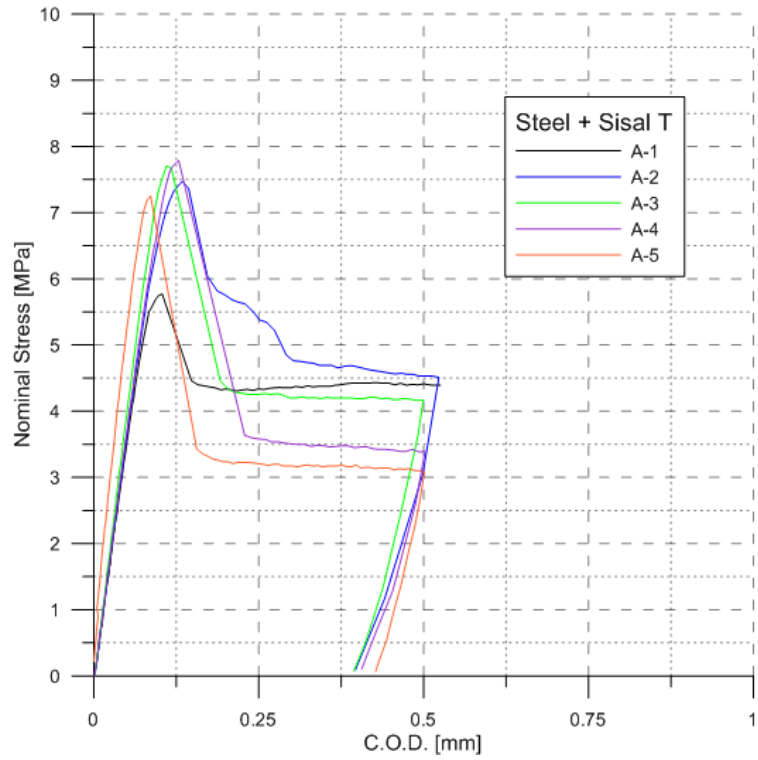


Figura 5.28 - Andamento del grafico tensione - apertura di fessura per provini *Steel + Sisal* con fibre ortogonali

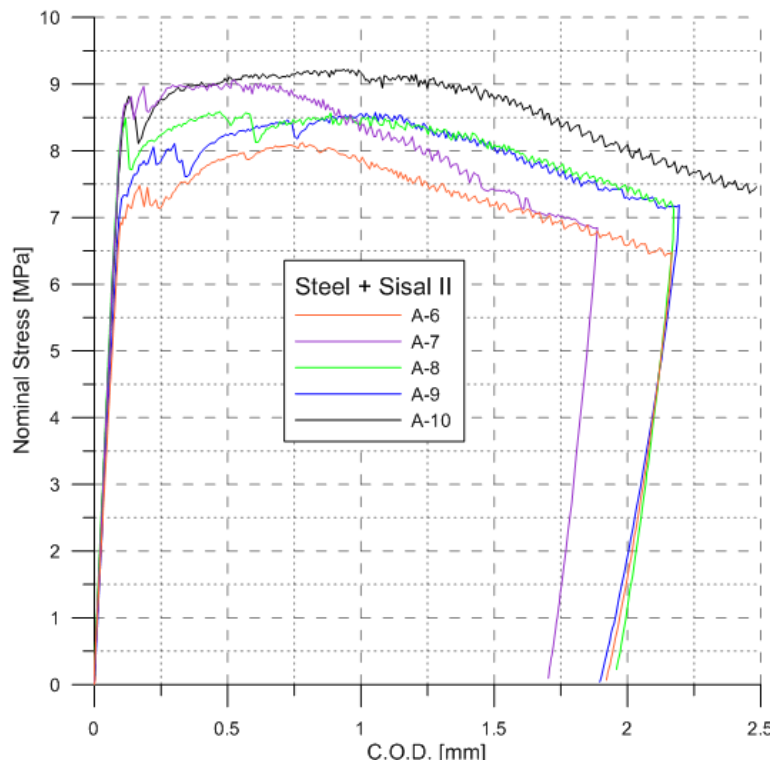


Figura 5.29 - Andamento dei grafici tensione - apertura di fessura per provini *Steel + Sisal* con fibre parallele

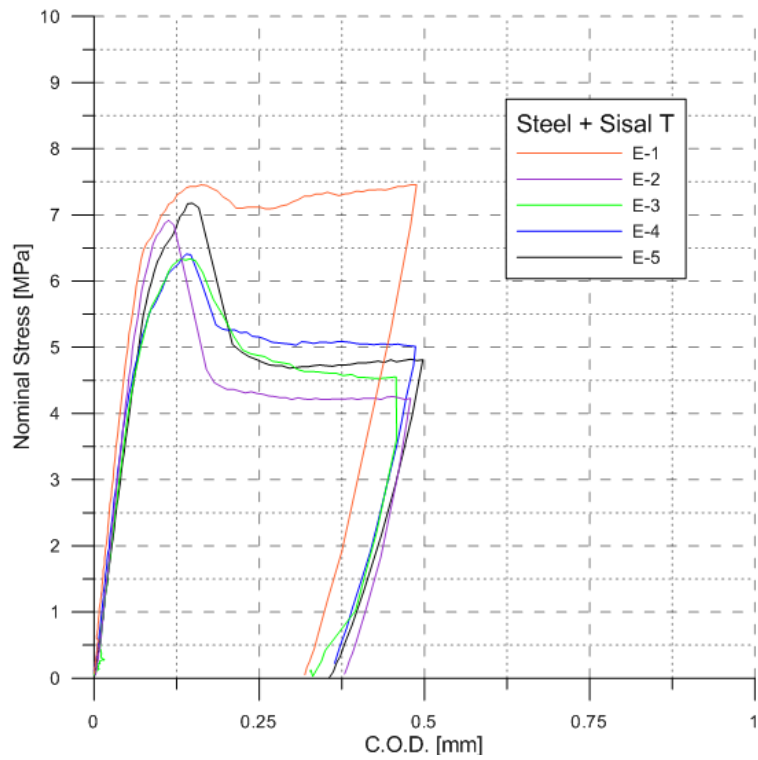


Figura 5.30 - Andamento dei provini *Steel + Sisal* fibre ortogonali, con taglio lastra differente

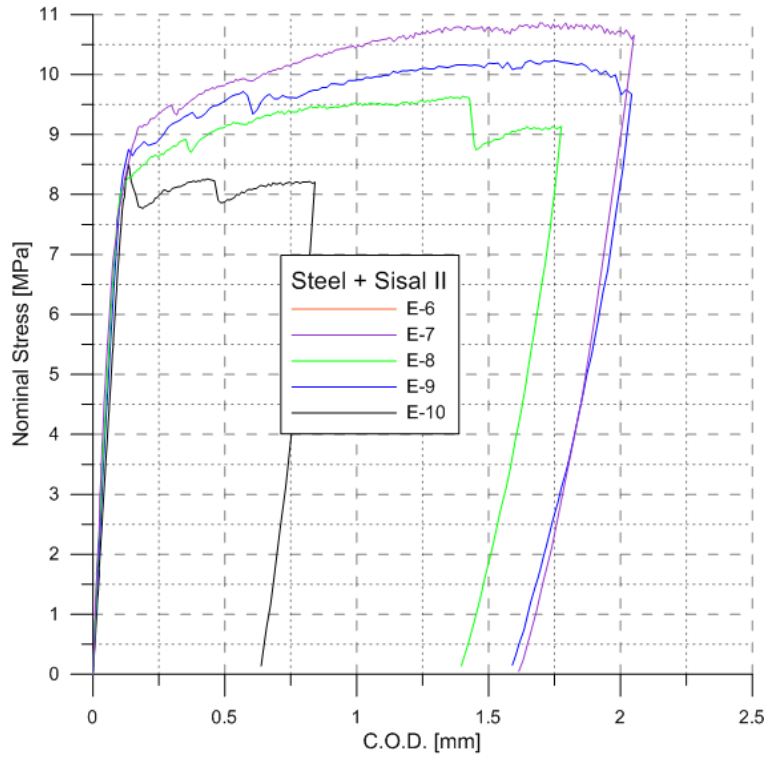


Figura 5.31 - Andamento dei provini *Steel + Sisal* fibre parallele, con taglio lastra differente

5.2.3 Indici di recupero

Di seguito verranno forniti gli indici da utilizzare per valutare l'effettivo andamento del recupero meccanico a seguito della terapia utilizzata dopo la prefessurazione. Si hanno indici diverse in base all'ordinamento delle fibre nel provino, ma si possono di seguito indentificare come segue:

1. Self-healing Stress Gain
2. Damage Recovery Index
3. Self-healing Ductility Gain
4. Toughness Recovery Index
5. 85% Stress Recover
6. Stress Difference Variation with same Crack Opening
7. Crack Opening Variation with same Stress Difference

5.2.3.1 Valori di riferimento e tabelle di utilizzo

Per ogni provino sono state realizzate tabelle che racchiudessero tutti i valori che vengono studiati. Se ne hanno di due categorie, in base a quello che si vuole ricercare. Le due tabelle sono rispettivamente per fibre ordinate ortogonalmente, in Tabella 5.7, e parallelamente, in Tabella 5.8.

Nelle tabelle si trovano tutte le informazioni relative al grafico tensione – apertura di fessura del provino, sia per quello con fibre ortogonali sia per quello con fibre parallele. Dato il cospicuo numero di informazioni in tabella, è bene riassumerla in diverse parti e in funzione dell'ordinamento delle fibre.

Fibre ortogonali

A-1-2-T	PEAK	COD	0,134	mm	K, Load		74,26
	PRE	Stress	7,474	M Pa	K, Unload		34,95
	UNLOAD	COD	0,523	mm	K, ReLoad		53,48
		Stress	4,511	M Pa	1	61,03	%
	Residual	COD	0,397	mm			
		Stress	0,090	M Pa			
	PEAK	COD	0,762	mm	EmCC	49,62	%
	POST	Stress	6,319	M Pa			

Tabella 5. 7 - Tabella riassuntiva completa per provini ortogonali

All'estrema sinistra si trova l'identificativo del provino, con mix design, progressivo, numero provino nella lastra e orientamento delle fibre al suo interno.

Alla sua destra si trovano i punti di interesse. Sono tutti identificati con due valori: COD [mm], Stress [MPa]. Essi sono, dall'alto:

- **PEAK PRE** Punto di tensione massima. Rappresenta la formazione di fessura.
- **UNLOAD** Punto di scarico del provino, massima ampiezza raggiunta
- **Residual** Punto finale della prova di prefessurazione, l'ultimo registrato.
- **PEAK POST** Punto di tensione massima, dopo il trattamento.

A seguire si trovano i valori di rigidezza. Vengono calcolati in maniera differente qualora siano in fase di carico oppure in fase di scarico.

- **(Re) Load Stiffness** Viene considerata la tangente tratto iniziale.
- **Unload Stiffness** Viene tracciata la retta secante tra **UNLOAD** e **Residual**.

Successivamente vengono identificati i due indici che sono oggetto di analisi per i provini con comportamento *deflection softening*:

SELF-HEALING STRESS GAIN Viene identificato tramite: 1

DAMAGE RECOVERY (IDR) Viene identificato tramite: 2

I due indici per valutare il recupero vengono spiegati nel paragrafo successivo, assieme agli altri che vengono utilizzati nei provini con ordinamento delle fibre parallele.

Fibre parallele

E-1-9-II	FIRST	COD	0,145	mm	K, Load		63,18
	CRACK	Stress	6,814	M Pa	K, Unload		17,38
	PEAK	COD	1,838	mm	K, ReLoad		26,30
	PRE	Stress	8,505	M Pa	1	723,81	%
	85%	COD	#N/A	mm	2	19,49	%
	Pre	Stress	#N/A	M Pa	3,1	64,19	%
	UNLOAD	COD	2,273	mm	3,2	85,03	%
		Stress	8,294	M Pa	4,1	83,55	%
	Residual	COD	1,798	mm	5,1	141,71	%
		Stress	0,040	M Pa	5,2	155,41	%
	PEAK	COD	3,360	mm	5,5	#N/A	%
	POST	Stress	9,824	M Pa	5,6	#N/A	%
	85% Post	COD	4,991	mm	6	79,75	%
		Stress	8,344	M Pa	7	127,47	%

Tabella 5. 8 - Tabella riassuntiva completa per provini paralleli

Esattamente come la tabella per i provini con fibre ortogonali, si inizia da sinistra con la sigla identificativa del provino. A seguire i punti di interesse:

- **FIRST CRACK** Punto in cui si verifica la prima fessura.
- **PEAK PRE** Punto di tensione massima. Rappresenta la formazione di fessura.
- **85% Pre** Punto pari all'85% della tensione di picco, nell'arco discendente.
- **UNLOAD** Punto di scarico del provino, massima ampiezza di fessura.
- Residual Punto finale della prova di prefessurazione, l'ultimo registrato.
- **PEAK POST** Punto di tensione massima, dopo il trattamento.
- **85% After** Come "85% Pre", ma misurata dopo il trattamento.

La parte centrale della tabella, così come un pezzo in basso a destra, è occupata dagli indici di recupero. In questo caso sono in quantità maggiore rispetto a quelli calcolati per i provini ortogonali. La descrizione di tali verrà fornita a breve.

La parte di destra è composta in tre parti: la parte superiore vede le rigidzze calcolata esattamente come nella tabella precedente.

Immediatamente sottostante si trovano due celle indicanti:

- **PRE Δ COD [mm]** è la differenza di apertura COD tra il picco e lo scarico
- **PRE Δ LOAD [kN]** è la differenza di tensione tra il picco e lo scarico

Così facendo si definisce un triangolo con i punti di tensione di picco e di scarico in prefessurazione, si misurano le dimensioni dei due cateti, e successivamente mantenendo fisso un valore si valuta l'ampiezza di quell'altro nel grafico di post-trattamento. Da qui la necessità di conoscere i due punti sul grafico di fine terapia, identificati anch'essi tramite COD, Stress e Load.

I due indici calcolati grazie ai due punti appena trovati si trovano nell'estremo in basso, identificati tramite il loro box con contorno rosso.

Nelle Appendici si trovano tutti i valori riportati ed analizzati per ogni provino che è stato prefessurato.

5.2.3.2 Valori di riferimento sui grafici

Si sono utilizzate le tabelle come quelle vista in precedenza. Siccome sono state effettuate due prove a flessione per provino, si hanno due tabelle, Tab. 5.9 e Tab 5.10, con i valori da mettere nel grafico. Sono i valori ricavati dallo strumento di analisi che, tramite il processo analizzato in precedenza, fornisce i punti discreti del grafico tensione-apertura di fessura, sia per le prove a prefessurazione, sia per quelle dopo il periodo di esposizione. I colori nella due colonne di destra di Tab. 5.10 indicano l'esposizione e la durata.

A-1-5-T					
H [m]	0,0200	W [m]	0,09850	PRE	
LOAD	COD AVG	COD-MID-F	COD-MID-R	M _{Centraline}	σ _N
kN	mm	mm	mm	kNm	kNm/(m*m ²)
0,002	0,001	0,001	0,001	0,000125	0,017902
0,004	0,002	0,002	0,001	0,000250	0,035804
0,010	0,003	0,003	0,002	0,000625	0,089509
0,018	0,004	0,004	0,003	0,001125	0,161117
0,030	0,005	0,005	0,005	0,001875	0,268528
0,036	0,006	0,006	0,005	0,002250	0,322234

Tabella 5. 9 - Valori dei punti discreti per la realizzazione del grafico, prefessurazione

A-1-5-T						
H [m]	0,0200	W [m]	0,09850	POST	WATER	3 M
LOAD	COD AVG	COD-MID-F	COD-MID-R	M _{Centraline}	σ _N	COD.D
kN	mm	mm	mm	kNm	kNm/(m*m ²)	mm
0	0,003	0,004	0,002	0	0	0,430
0,002	0,0035	0,004	0,003	0,000125	0,019036	0,431
0,003	0,004	0,005	0,003	0,000188	0,028553	0,431
0,005	0,004	0,005	0,003	0,000313	0,047589	0,431
0,005	0,005	0,006	0,004	0,000313	0,047589	0,432
0,007	0,005	0,006	0,004	0,000438	0,066624	0,432

Tabella 5. 10 - Valori discreti per la realizzazione del grafico, post-trattamento

Tutti i punti identificati nelle tabelle sono poi controllati se effettivamente erano posizionati giusti nel grafico. Per poter valutare il recupero, le prove a flessione devono essere confrontate tra di loro. Per farlo, si è traslata la prova di post-trattamento lungo l'asse delle ascisse fino ad incontrare il punto di COD Residual ottenuto in fase di prefessurazione. Nelle tabelle per il plottaggio, il valore utilizzato è identificato tramite COD.D, che utilizza la media dei due valori degli LVDT, a cui va sommato l'ultimo valore di COD della tabella di prefessurazione.

$$COD.D = COD_{Residual}^{Pre-Crack} + \left(\frac{COD_1^{Post} + COD_2^{Post}}{2} \right) \quad (Eq. 5.5)$$

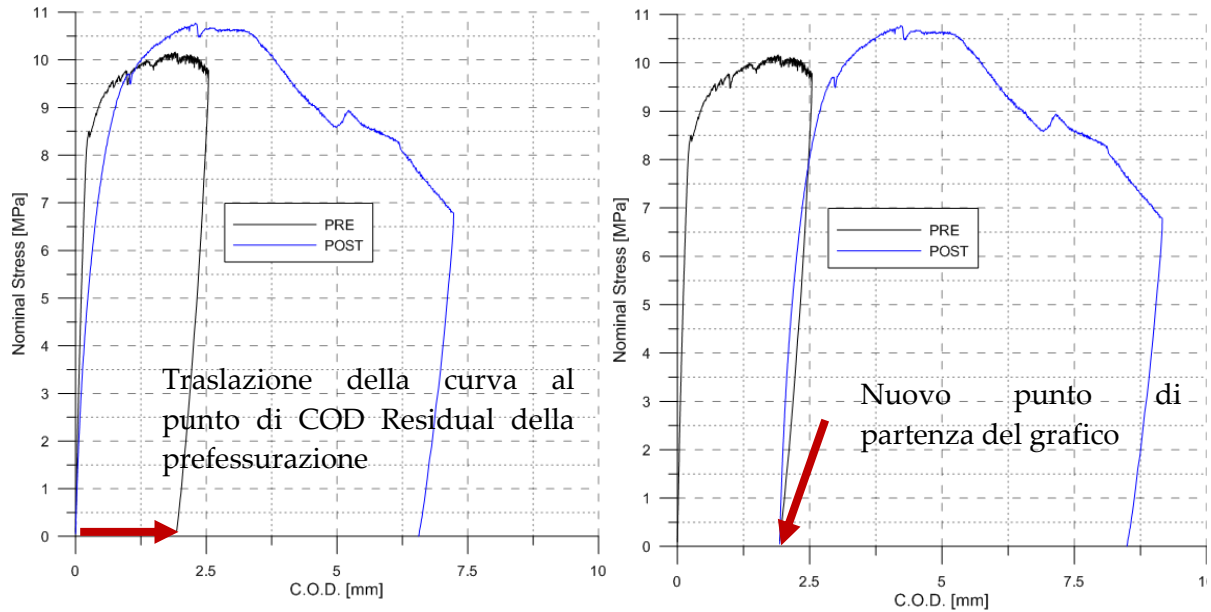


Figura 5.32 - Traslazione del grafico post-trattamento

Per comprendere meglio gli indici e per meglio esprimere la loro definizione, è necessario individuare per ogni provino rigidzze di carico e di scarico e alcuni punti rappresentativi. Questi punti vengono raffigurati nelle figure a seguire. Per ogni punto si conoscono i valori di COD e COD.D, nel caso di post-trattamento, e i valori di tensione.

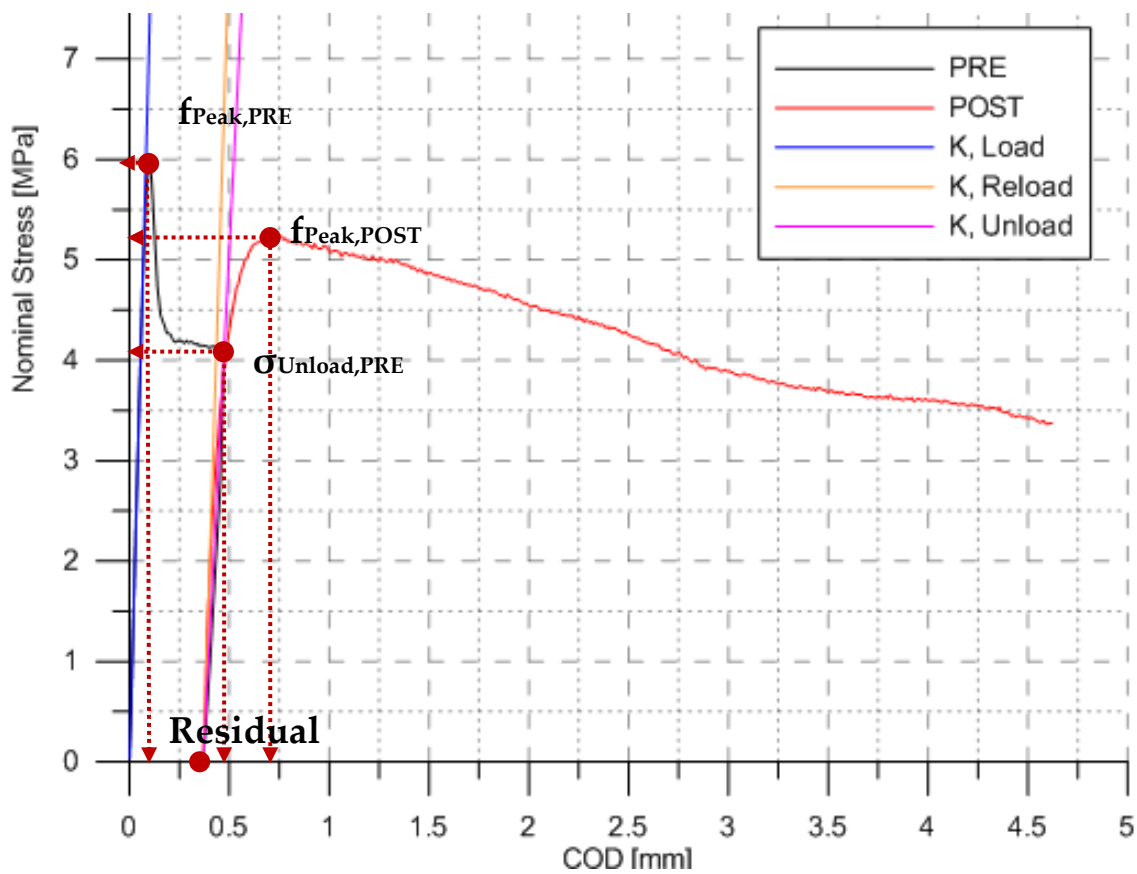


Figura 5.33 - Punti rappresentativi delle curve Pre-fessurazione e Post-trattamento, provino ortogonale

La Fig. 5.33 mostra il grafico ottenuto dall'analisi dei dati dalle tabelle Tab. 5.9 e Tab. 5.10. Gli assi rappresentano in x l'apertura di fessura, mentre in y la tensione nominale calcolata come prima definito. I punti sul grafico sono i punti di interesse come visto nella tabella riassuntiva per ogni provino con comportamento *softening*, come mostra Tab 5.7.

Di seguito vengono indicati i punti rappresentativi che sono oggetto di analisi e calcolo:

Provino Pre-fessurazione:

- Tensione di picco – $f_{\text{peak,PRE}}$ - - - - -> **PEAK PRE**
- Punto di scarico – σ_{unload} - - - - -> **UNLOAD**
- Valore residuo – **Residual** - - - - -> Residual

Provino Post-trattamento

- Starting point – **Residual** - - - - -> Residual
- Tensione di picco – $f_{\text{peack,POST}}$ - - - - -> **PEAK AFTER**

Vengono inoltre indicate le rigidezze con le tre semirette:

- Tensione di carico, tangente alla curva nel tratto iniziale -> **K, Load**
- Tensione di scarico, secante alla curva nel tratto di scarico -> **K, Unload**
- Tensione di carico, nel provino in Post-Trattamento - -> **K, ReLoad**

- Starting point
- Prima fessura – $\sigma_{1crack,PRE}$ - - - - -> **FIRST CRACK**
- Tensione di picco – $f_{peak,PRE}$ - - - - -> **PEAK PRE**
- 85% del valore di tensione massima – se raggiunto - - - - -> **85% Pre**
- Punto di scarico – σ_{unload} - - - - -> **UNLOAD**
- Valore residuo – **Residual** - - - - -> Residual

Provino Post-trattamento

- Starting point – **Residual** - - - - -> Residual
- Prima fessura – se presente, altrimenti - - - - -> **UNLOAD**
- Tensione di picco – $f_{peak,POST}$ - - - - -> **PEAK AFTER**
- 85% tensione massima, nel tratto discendente – $\sigma_{85%,POST}$ -> **85% After**

Si sono quindi identificati tutti i punti di interesse nei grafici, sia nel quanto riguarda il valore in x vale a dire l'apertura di fessura, sia per il valore in y ovvero la tensione in quel punto. Grazie a tutte queste informazioni, si è potuto studiare gli indici che verranno di seguito spiegati.

5.2.3.3 Definizione degli indici

il diverso comportamento dei provini *softening* oppure *hardening* marca un differente studio degli indici. Tutti gli indici qui sotto identificati vengono calcolati per i provini *hardening*, mentre per i provini *softening* si calcolano solo i primi due indici (SHSG e DRI).

Self-healing Stress Gain - 1 - SHSG

L'indice di recupero, espresso in percentuale, della tensione è un rapporto tra la differenza della resistenza a flessione nella prova post-trattamento e la tensione allo scarico, rispetto alla differenza tra la resistenza di picco in fase pre-fessurativa e la tensione allo scarico, come mostra Fig. 5.35:

$$SHSG = \frac{f_{peak,POST} - \sigma_{unload}}{f_{peak,PRE} - \sigma_{unload}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.6})$$

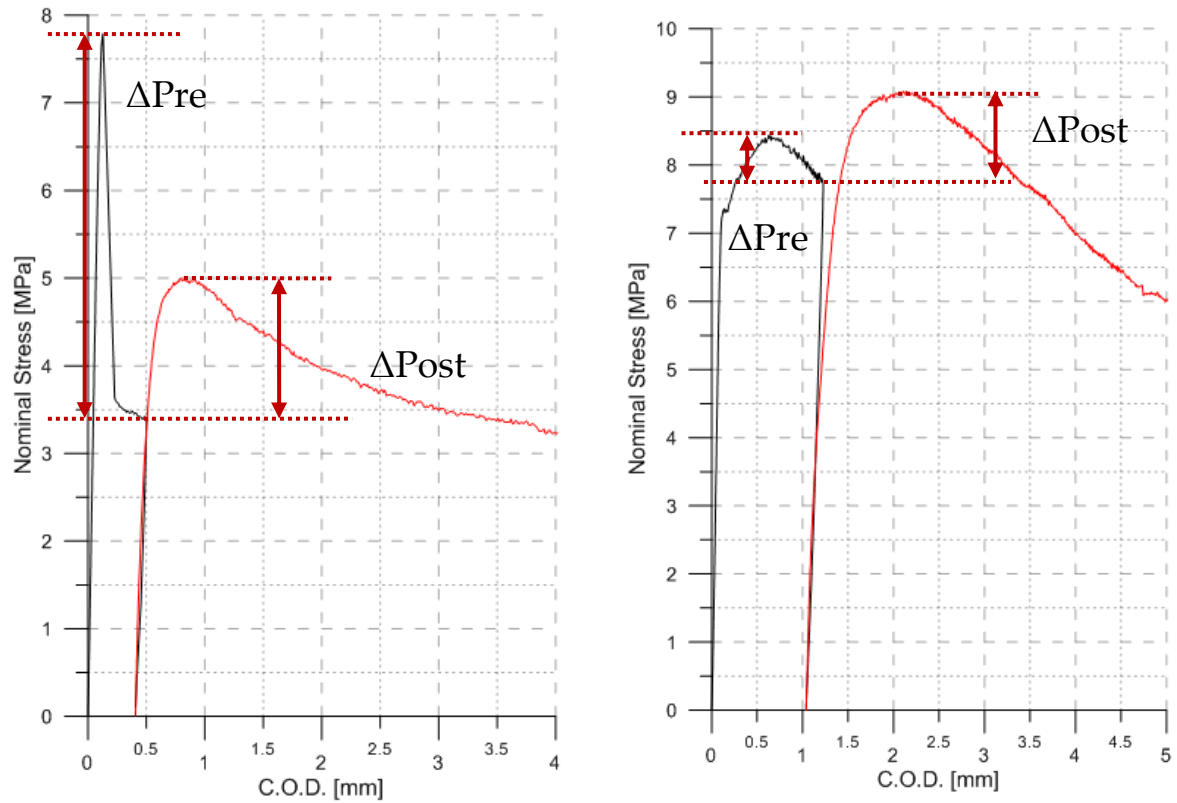


Figura 5.35 - Rappresentazione grafica dell'indice SHSG

I valori misurabili possono essere:

- $SHSG < 0$ quando la tensione di picco post-trattamento non supera il valore allo scarico
 $\rightarrow f_{peakPOST} < \sigma_{unload}$
- $SHSG < 100$ quando la tensione di picco post-trattamento è maggiore del valore di scarico
 $\rightarrow f_{peakPOST} > \sigma_{unload}$
- $SHSG > 100$ quando la tensione post è maggiore di quella in prefessurazione
 $\rightarrow f_{peakPOST} > f_{peakPRE}$

Damage Recovery Index - 2 - DRI

Vengono analizzate le rigidzze in fase di carico sia nella prefessurazione sia nel post-trattamento, messe in relazione con quella allo scarico. Anch'esso è un rapporto in percentuale, come segue:

$$DRI = \frac{K_{ReLoad} - K_{unload}}{K_{Load} - K_{unload}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Self-healing Ductility Gain - 3 - SHDG

Vengono identificate due modalità di calcolo differente, ma quello che si cerca di analizzare è la stessa caratteristica meccanica: la duttilità del provino, intesa come l'ampiezza di fessura necessaria per arrivare alla resistenza massima del provino, calcolata prima in funzione dell'ampiezza della prima fessura, e successivamente in funzione dell'ampiezza dal punto iniziale. A seguire le due formule:

$$SHDG [1] = \frac{COD @ f_{peak,POST} - COD @ \sigma_{unload}}{COD @ f_{peak,PRE} - COD @ \sigma_{1crack,PRE}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.8})$$

$$SHDG [2] = \frac{COD @ f_{peak,POST} - COD @ Residual}{COD @ f_{peak,PRE} - COD @ Starting Point} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.9})$$

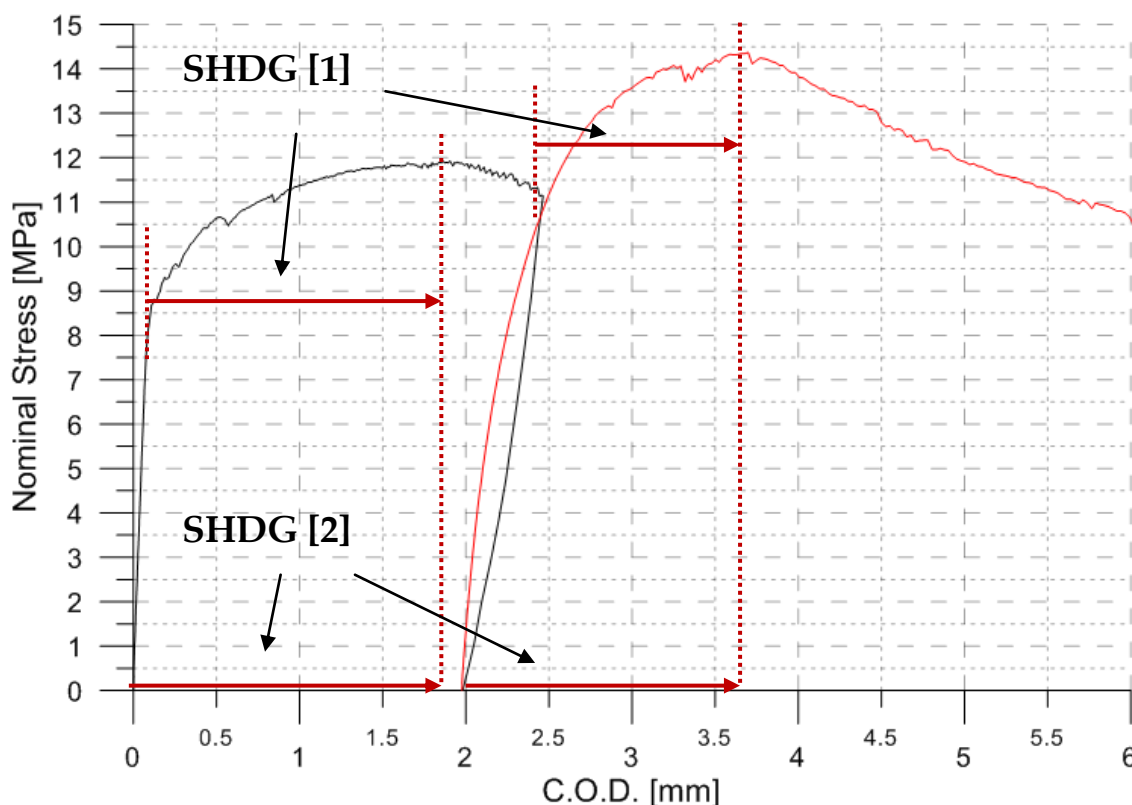


Figura 5. 36 - Rappresentazione dell'indice SHSG [3/1] e [3/2]

Toughness Recovery Index - 4 - TRI

Il recupero delle durezza viene calcolato come il rapporto tra l'area sottesa della curva in post-trattamento con quella calcolata in fase prefessurativa. I dati discreti forniti dallo

strumento di analisi hanno permesso di calcolare l'area dei singoli trapezi che compongono la curva e di sommarli in modo da ottenere l'area totale. L'approssimazione dei trapezi è data dal numero di step che intercorrono tra il punto di inizio prova e il punto di massimo. La Fig. 5.37 mostra l'area sottesa le due curve, di prefessurazione e post trattamento.

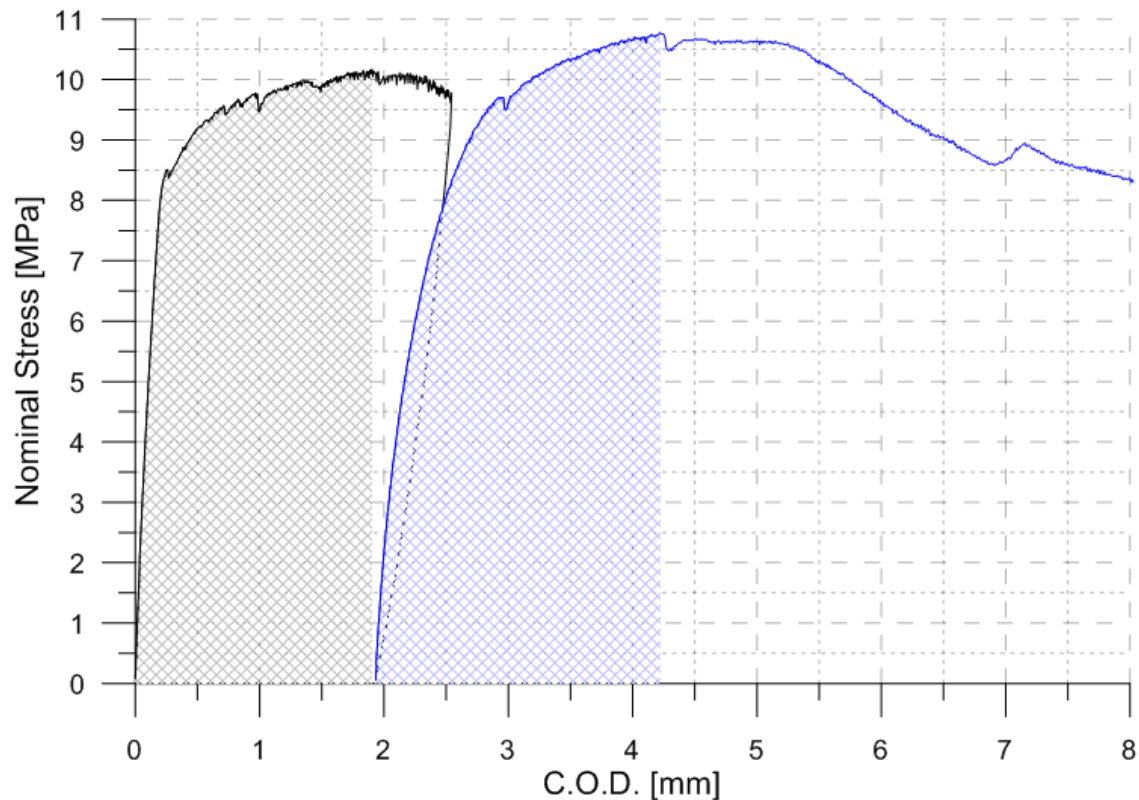


Figura 5. 37 - Identificazione dell'indice TRI - Toughness Recovery Index - 4 -

$$TRI = \frac{\sum_{Residual}^{PeakPOST} \left[\frac{(COD_f - COD_i) \cdot (\sigma_f - \sigma_i)}{2} \right]}{\sum_{Starting Point}^{PeakPRE} \left[\frac{(COD_f - COD_i) \cdot (\sigma_f - \sigma_i)}{2} \right]} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.10})$$

$$TRI [4] = \frac{Area POST}{Area PRE} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.11})$$

85% Stress Recover - 5 - 85%

Si è inoltre voluto studiare l'andamento del tratto discendente, quello a seguito del superamento della tensione di picco. Si è valutata la differenza di apertura di fessura che si registra tra il punto stimato all'85% della tensione e l'ampiezza alla formazione della

prima fessura, oppure dall'inizio della prova, mettendo poi in rapporto i due risultati post-trattamento e pre-fessurazione.

Siccome i dati forniti sono tutti discreti, non è detto che sia presente un valore che sia esattamente pari all'85% del massimo della tensione. Una volta trovata la formula da utilizzare nel foglio di calcolo, bisogna inoltre verificare che il valore ottenuto sia nel tratto discendente della curva. Si è quindi scritta una funzione che recitasse:

```
=IF(D8>INDEX($D$8:$D$5800;MATCH(MAX($C$8:$C$5800);$C$8:$C$5800;0));
INDEX(C8:$C$5800;MATCH(MIN(ABS(C8:$C$5800-$W$19*0,85));ABS(C8:
$C$5800-$W$19*0,85);0));"N")
```

Figura 5. 38 - Formula bar del foglio di calcolo per trovare il valore prossimo all'85% di tensione massima nel tratto discendente

- Colonna "D": valori di COD AVG
- Colonna "C": valori di Load
- Cella "W19": valore massimo di tensione post-trattamento

Questa formula così scritta trova tutti i valori più prossimi al valore da ricercare, senza limiti. Nella prefessurazione questo può portare ad ottenere valori che non rientrano nel tratto di curva competente alla prova, ma quelli registrati durante lo scarico del provino. Se non viene raggiunto il valore durante la prova, allora il programma prende quello più prossimo, anche se è nel tratto non competente. Per eliminare questo problema, si limita con una colonna accanto tramite la seguente formula.

```
=IF(AND(C8=AF8;C8>INDEX($C$8:$C$5800;MATCH(MAX($D$8:$D$5800);$D$8:
$D$5800;0))); "YES"; "N")
```

Figura 5. 39 - Formula bar del foglio di calcolo per limitare i valori alla sola parte del tratto discendente prima dello scarico

Alcuni provini non hanno avuto una variazione di tensione nel tratto discendente tale da raggiungere valori prossimi all'85%. In questi casi si è preso il corrispettivo del provino "vergine" in modo tale da poter garantire un confronto con il valore ottenuto in post-trattamento. Seguono le quattro formule che identificano l'indice:

$$85\% [1] = \frac{COD @ \sigma_{85\%POST} - COD @ \sigma_{unload}}{COD @ \sigma_{85\%VIRGO} - COD @ \sigma_{1crack,VIRGO}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.12})$$

$$85\% [2] = \frac{COD @ \sigma_{85\%POST} - COD @ Residual}{COD @ \sigma_{85\%VIRGO} - COD @ Starting Point_{VIRGO}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.13})$$

$$85\% [5] = \frac{COD @ \sigma_{85\%POST} - COD @ \sigma_{unload}}{COD @ \sigma_{85\%PRE} - COD @ \sigma_{1crack,PRE}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.14})$$

$$85\% [6] = \frac{COD @ \sigma_{85\%POST} - COD @ Residual}{COD @ \sigma_{85\%PRE} - COD @ Starting Point_{PRE}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.15})$$

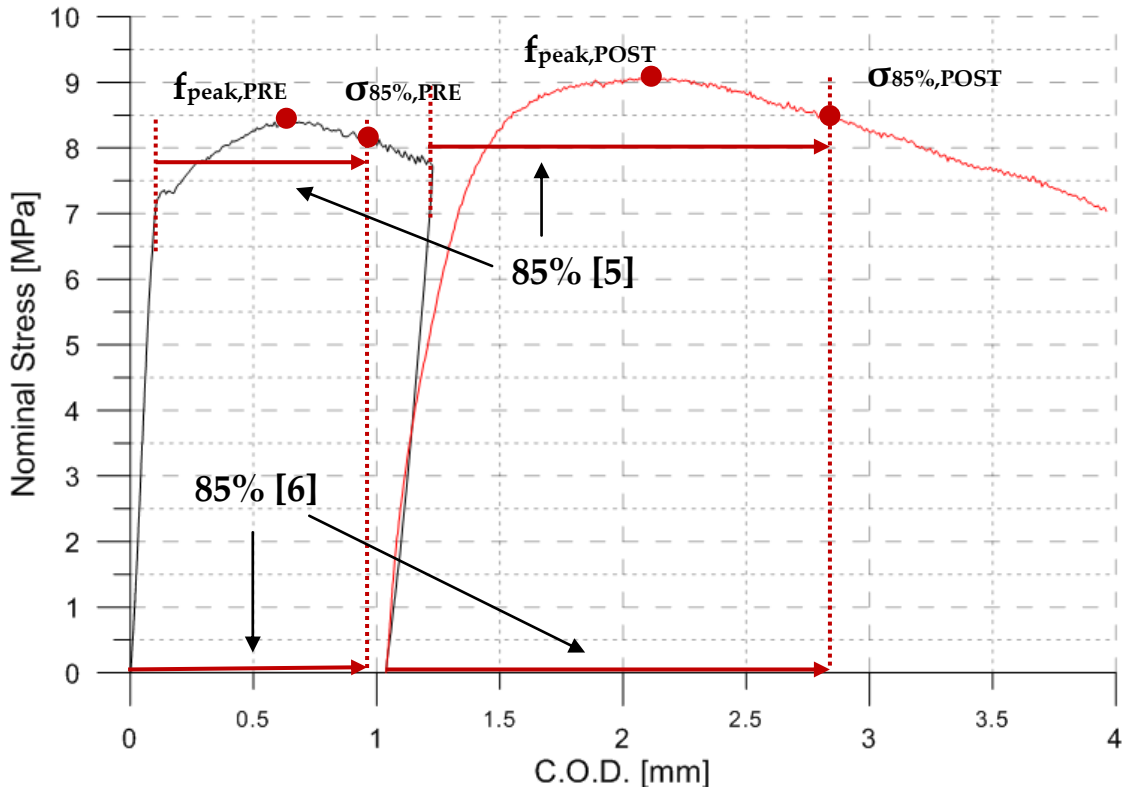


Figura 5. 40 - Raffigurazione grafica dell'andamento del recupero all'85% della tensione di picco

Stress Difference Variation with same Crack Opening - 6 - $\Delta\sigma$

Viene valutata la differenza tra la tensione registrata nel tratto compreso tra il massimo della tensione e lo scarico, in fase pre-fessurativa. Tale valore viene confrontato con la differenza di tensione ottenuta in post-trattamento tra il punto di massimo della tensione e un punto di tensione ignoto ottenuto mantenendo fissa la variazione di COD che intercorre tra i due punti. In altre parole: si valuta la differenza di tensione che si ha tra il picco e lo scarico in prefessurazione con quella che si ha tra il picco in post-trattamento con un valore misurato alla stessa distanza, come se il provino venisse scaricato nuovamente. Si valutano la differenza tra le due "escursioni tensionali", quello reale in prefessurazione e quello fittizio in post trattamento.

Trovato il nuovo punto, sia in termini di ascissa che di ordinata, si procede con la l'indice di recupero:

$$\Delta\sigma = \frac{f_{peak,POST} - \sigma @ (COD_{unload} - COD_{peak,PRE})_{POST}}{f_{peak,PRE} - \sigma_{unload}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.16})$$

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma_{POST}}{\Delta\sigma_{PRE}} \quad (\text{Eq. 5.17})$$

In base a come è formulato l'indice [6], sono auspicabili valori bassi. Infatti, una variazione di tensione maggiore in post trattamento rispetto a quella ottenuta in prefessurazione a parità di apertura di fessura significa che il tratto discendente ha una pendenza maggiore rispetto a quello prima della terapia. Infatti:

- $\Delta\sigma = 100\%$ si ha la stessa variazione di tensione
- $\Delta\sigma > 100\%$ si hanno differenze di tensione maggiori in post-trattamento
- $\Delta\sigma < 100\%$ si hanno differenze di tensione minori in post-trattamento

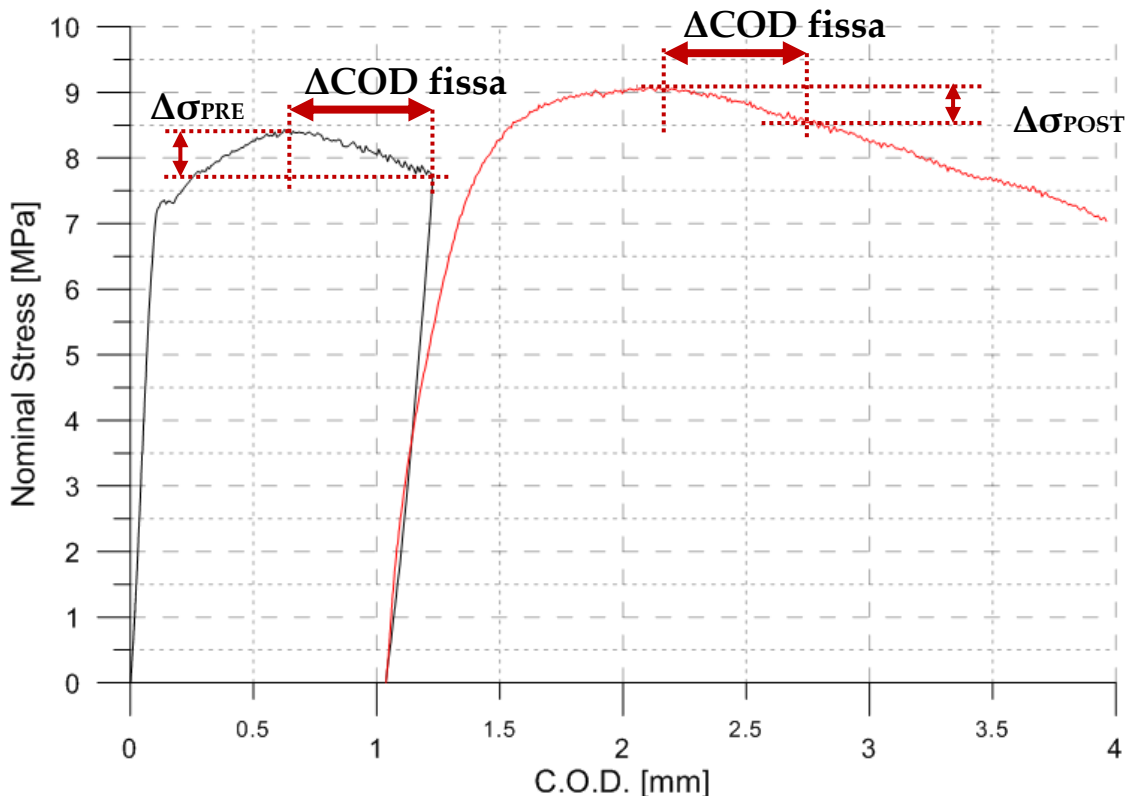


Figura 5. 41 - Raffigurazione per il calcolo dell'indice - 6 - $\Delta\sigma$

Crack Opening Variation with same Stress Difference - 7 - ΔCOD

Analogamente a quanto calcolato per l'indice - 6 - $\Delta\sigma$, si calcola un nuovo punto nella curva di post-trattamento che abbia una differenza di tensione con quella di picco che abbia lo stesso valore della variazione tra il picco in prefessurazione e lo scarico.

Viene definito l'indice come segue:

$$\Delta COD = \frac{COD @ \Delta\sigma_{POST} - COD @ f_{peak,POST}}{COD @ \sigma_{unload} - COD @ f_{peak,PRE}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5.18})$$

$$\Delta COD = \frac{\Delta COD_{POST}}{\Delta COD_{PRE}} \quad (\text{Eq. 5.19})$$

Valori superiori al 100% per questo indice rappresenta una caratteristica positiva, a differenza di quanto detto per l'indice calcolato allo stesso modo ma che valuta la tensione. Infatti se si verifica una variazione di apertura maggiore nel tratto post-trattamento rispetto a quella ottenuta in prefessurazione, mantenendo inalterata la differenza di tensione che intercorre tra i due punti allora vuol dire che si è verificato un miglioramento nel comportamento e nella capacità portante nel tratto *hardening* del provino.

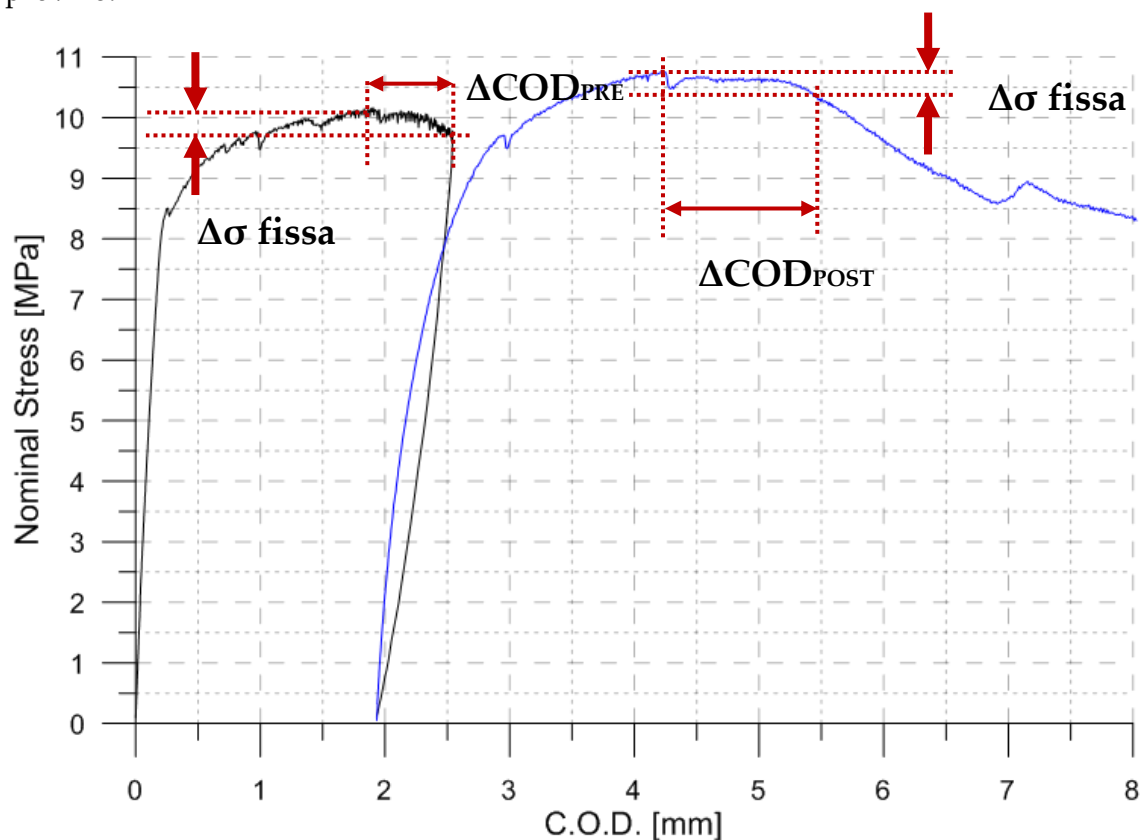


Figura 5. 42 - Rappresentazione grafica dell'indice - 7- ΔCOD

5.2.4 Analisi degli indici - Steel + Sisal

In virtù di una migliore comprensione dell'effetto del self-healing e del recupero meccanico, gli indici di recupero dovrebbero essere accompagnati sia dai valori sperimentali ottenuti dalle analisi, sia accompagnate dalle indagini al microscopio. In questo modo si ottiene una più ampia visione d'insieme, andando ad una profondità di conoscenza maggiore. I risultati analizzati in questo capitolo si riferiscono a quelli ottenuti dopo un periodo di esposizione pari a 3 e 6 mesi. Vengono messi in relazione sia in funzione del tempo dell'esposizione, sia in funzione delle differenti esposizioni, per analizzare in quale condizione ambientale si verifica il miglioramento.

5.1.4.1 Analisi in funzione delle condizioni di esposizione - 3 mesi

Nelle figure seguenti si mostra l'andamento degli indici sopra spiegati in funzione della tipologia di esposizione. Vengono mostrati in Appendice tutti quelli calcolati, con anche le diverse formule in base ai valori di riferimento considerato.

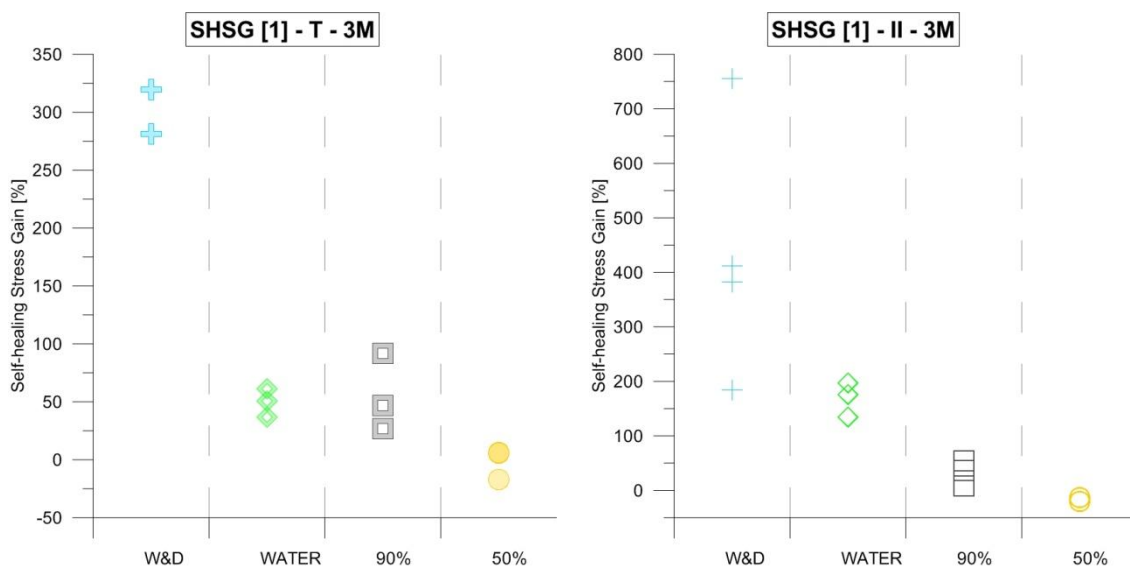


Figura 5. 43 - Andamento dell'indice SHSG per provini T e II in funzione delle esposizioni, 3 mesi terapia

La prima figura mostra l'andamento dell'indice *Self-healing Stress Gain* – SHSG (1), sia per fibre ortogonali che per fibre parallele per i provini lasciati in esposizione per un tempo di 3 mesi. Di seguito si trova il grafico relativo al recupero del danno, in funzione della rigidità dello scarico e del carico. Se ne ricava che:

- Comportamenti meccanici migliori e miglior recupero si hanno con fibre orientate parallelamente alla direzione degli sforzi.
- W&D: strabiliante recupero della tensione di picco (300% per T e 430% per II) e ottimo ripristino della rigidezza (34% e 46%, rispettivamente).
- WATER: ottimo recupero della tensione (170% fibre II) mentre mediocre per le fibre T (35%). Recupero della rigidezza ottimo in entrambi i casi (30% ca.).
- 90%: si è registrato un recupero migliore della tensione dei provini T (50% ca.), meglio di quello dei provini lasciati in acqua, mentre quelli con fibre II hanno registrato valori attorno a 32%. Comportamento differente per quanto riguarda rigidezza, in cui si è ribaltato il risultato: meglio con fibre II (15%) delle fibre T (9%). Si tratta di recuperi non eccezionali.
- 50%: come successo per 90%, si sono registrati valori migliori per provini T (-2%) rispetto a quelli II (-17%) per il recupero della tensione.

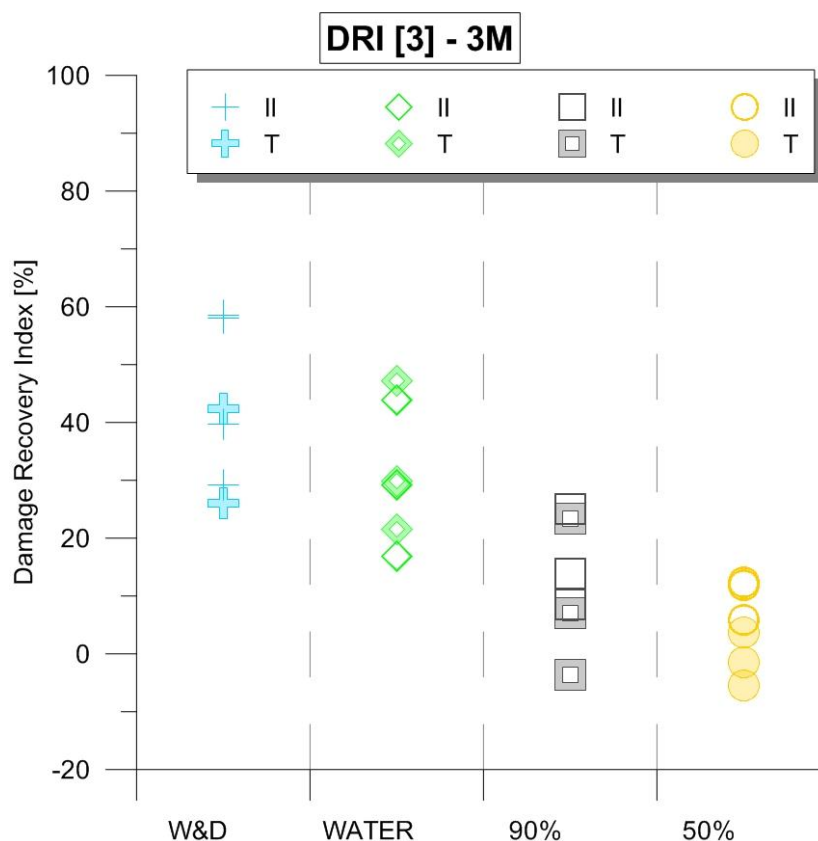


Figura 5.44 - Andamento indice DRI [2] in funzione delle esposizioni, 3 mesi di terapia

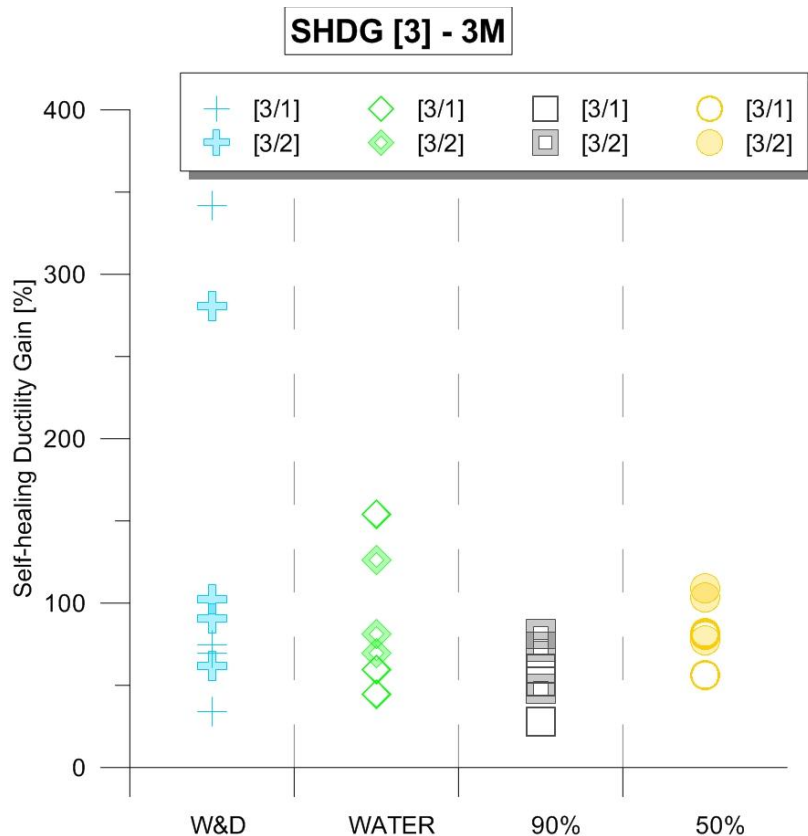


Figura 5. 45 - Andamento indici SHDG [3/1] e [3/2] in funzione delle esposizioni, 3 mesi di terapia

Le figure 5.44/45 mostrano l'andamento degli indici di recupero di duttilità. Si ricorda che l'indice [3/1] è in funzione dell'apertura della prima fessura, mentre il [3/2] si riferisce ai valori dall'inizio della prova. Se ne ricava quanto segue:

- f) I valori medi premiano la condizione di immersione in acqua, per la quale si è verificato il miglior recupero di duttilità. In un caso tra l'altro si ha avuto il superamento della duttilità registrata in prefessurazione.
- g) Si registrano alti recuperi di duttilità per i provini lasciati in ambiente secco (73 % [3/1] e 97% [3/2]), in un caso anche addirittura più elevati di quelli lasciati in acqua (93% [3/2]).
- h) Nessuno dei valori nell'ambiente umido ha dimostrato fornire un recupero di duttilità elevato.

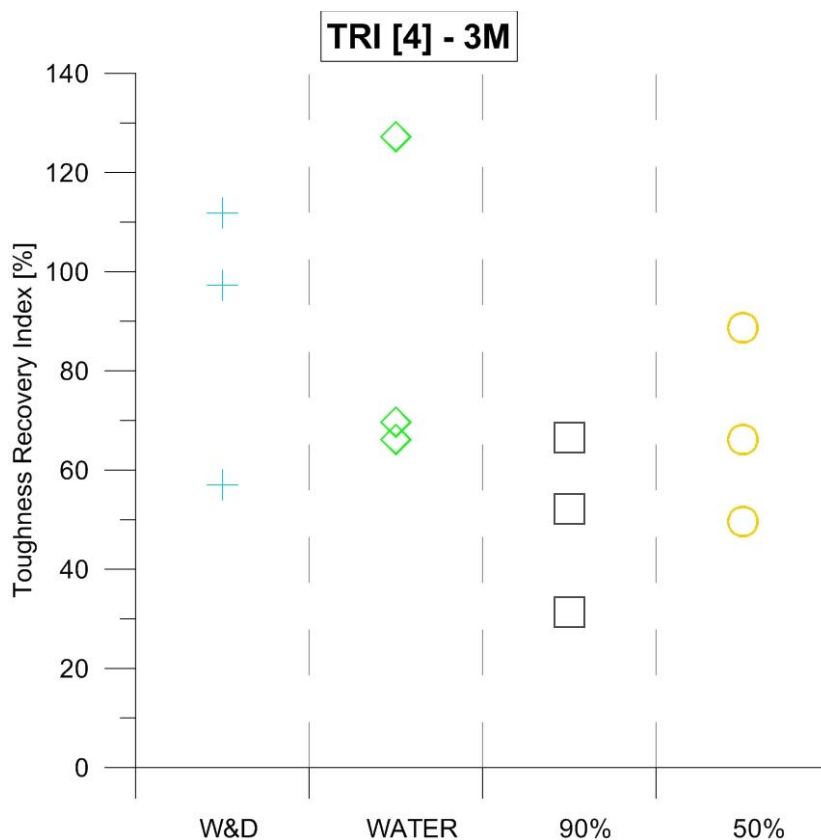


Figura 5.46 - Andamento indice TRI [4] in funzione delle esposizioni, 3 mesi di terapia

L'indice TRI – *Toughness Recovey Index* mostrato in Fig. 5.46, mette in relazione l'area della curva dal punto iniziale a quello di picco. Si crea quindi un'analisi tra la tensione massima e la duttilità. Si può dire che:

- i) Gli indici calcolati nelle varie esposizioni non presentano valori elevati. Hanno inoltre una lieve dispersione, soprattutto per i provini in immersione in acqua e anche quelli in cicli di asciutto e bagnato.
- j) La condizione W&D mostra due valori molto prossimi al 100%, che rappresenta una misurazione in post-trattamento registrata pari a quella in prefessurazione. Un terzo valore abbassa la media, che si attesta pari a 89%
- k) Anche in WATER si registrano buoni valori con un valore medio pari al 88%. Due provini hanno dato come risultato un valore che si attesta attorno al 70%
- l) La condizione al 50% ha mantenuto valori relativamente elevati, presentando una media pari al 69%.
- m) L'ambiente umido, invece, ha portato a valori prossimi al 50%

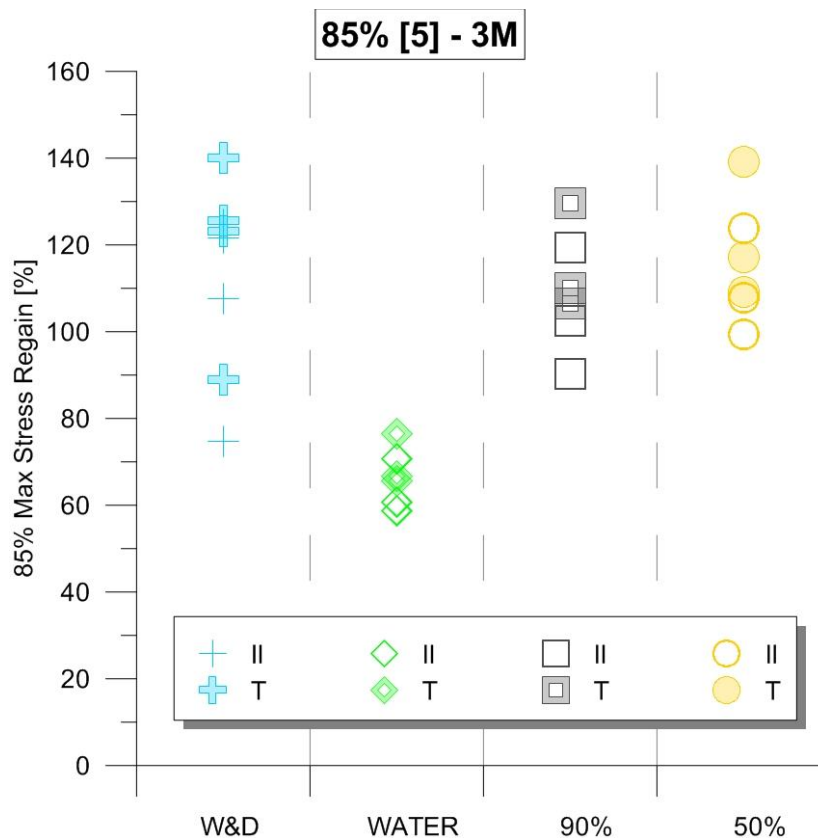


Figura 5.47 - Andamento indici 85% [5/1] e [5/2] in funzione delle esposizioni, 3 mesi di terapia

Come prima, l'indice [5/1] si riferisce a valori relativi alla prima fessurazione, mentre quello [5/2] fa riferimento a quelli dallo *Starting point*. Dalla valutazione dell'indice non si evidenziano ampie differenze tra i due indici, segue che:

- n) Non si verificano grandi dispersioni dei punti, sono infatti tutti prossimi al loro valore di media.
- o) Si hanno tutti valori superiori al 100%, tranne per i provini stivati nelle taniche d'acqua. Questo fatto viene attribuito ad una differenza di apertura di fessura tra lo scarico e il punto di massimo della tensione più elevato di quello che si doveva registrare. Gli altri provini hanno mantenuta inalterata la loro capacità portante nel tratto in decrescita, anzi aumentandola fino ad un valore massimo medio di circa 120%.

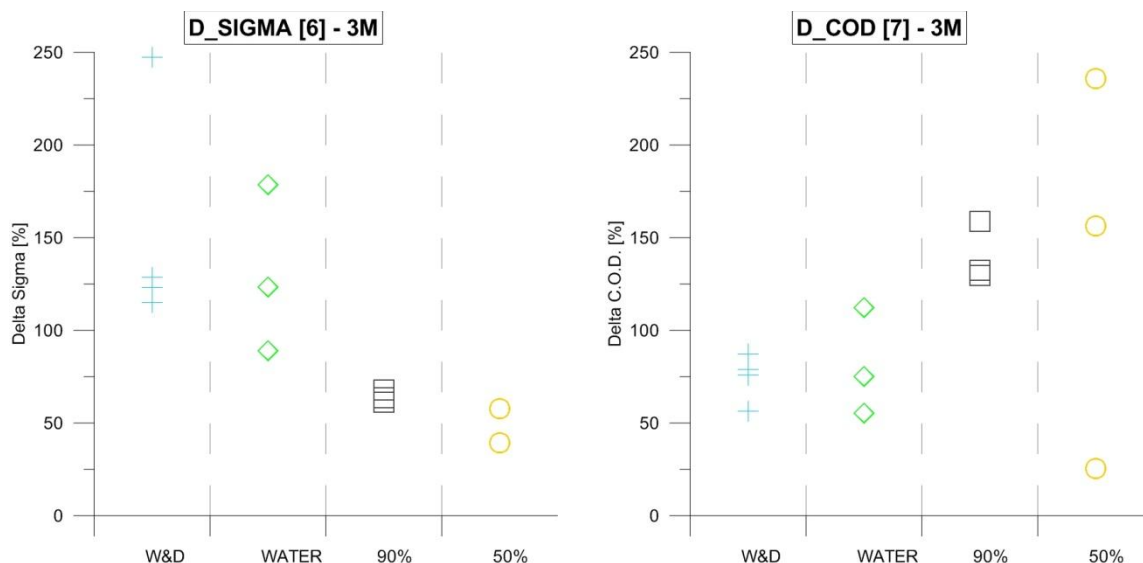


Figura 5. 48 - Andamento degli indici $\Delta\sigma$ [6] e ΔCOD [7] in funzione delle esposizioni. 3 mesi di terapia

Per quanto riguarda l'indice che raffigura la variazione di tensione in base alla differenza di apertura di fessura tra il picco e lo scarico in post-trattamento, come detto in precedenza valori elevati non sono segno di miglioramento delle capacità meccaniche, mentre bassi valori indicano una perdita di tensione minore rispetto a quella avuta in prefessurazione a parità di differenza di apertura di fessura.

- p) Valori elevati per l'esposizione in acqua erano attesi, seguendo la stessa logica spiegata nell'indice [5/1] e [5/2]: una capacità meccanica residua minore nel tratto discendente.
- q) Una ulteriore risorsa di duttilità in fase post-picco si è notata in provini in esposizioni che non prevede l'uso di acqua. Si può attribuire tale fattore al fatto che non hanno ottenuto grandi ripristini in termini di resistenza. Materiali resistenti sono meno duttili, così il mancato recupero della tensione ha portato ad un miglioramento della duttilità.

Indicativamente, nelle condizioni che dove si è mostrata un miglioramento delle proprietà in termini di guadagno duttile hanno poi dopo mostrato un andamento post-picco più fragile, e viceversa.

Per quanto riguarda gli indici in funzione delle condizioni per 6 mesi di durata della esposizione, si trovano in Appendice. I valori risultano essere in linea con quelli già analizzati in questo paragrafo. Nel paragrafo successivo, invece, si analizza la variazione nel tempo degli indici, che mostrano ovviamente sia a valori a 3 mesi sia quelli a 6 mesi.

5.2.4.3 Andamento degli indici in funzione del tempo

Di seguito vengono forniti gli stessi indici già calcolati e visti per le singole esposizioni, ma messi in relazione tra di loro in funzione del tempo.

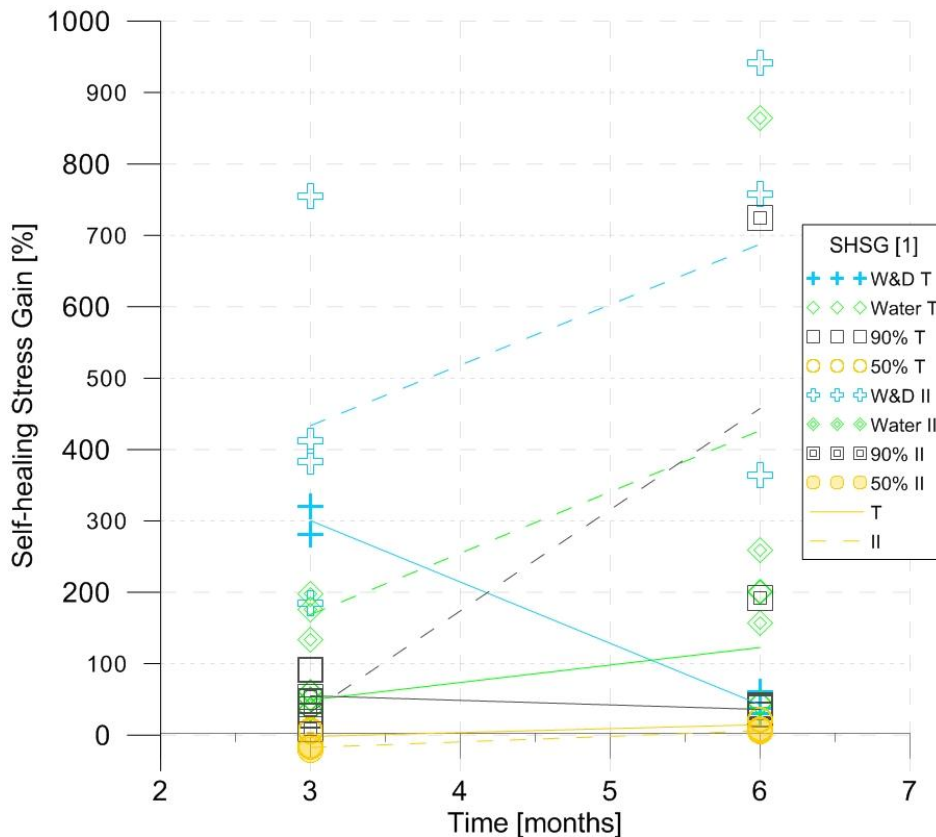


Figura 5. 49 - Andamento nel tempo dell'indice [1], a SX i provini T, a DX i provini II

La prima figura (Fig. 5.49) mostra la variazione nel tempo dell'indice di recupero della tensione massima. Si notano particolarità nei provini T; si ricorda che si ottengono valori superiori al 100% quando la tensione di picco post-trattamento è maggiore di quella registrata in prefessurazione. Segue che:

- i. Si è registrato un miglioramento all'aumento del tempo di durata delle condizioni di esposizione. Gli aumenti sono più o meno sensibili in base alla tipologia di esposizione.
- ii. La diminuzione nel tempo dell'indice per i provini W&D con fibre T è dovuta ad una incredibile risposta registrata a 3 mesi. I provini a 6 mesi non reggono il confronto con quelli che li hanno preceduti, malgrado i loro risultati sono in linea con quelli attesi.
- iii. Non si notano particolari cambiamenti per la condizione 90% e con fibre T, ma con fibre II si è registrato un vigoroso miglioramento.
- iv. SI sono registrati miglioramenti anche per i provini lasciati in ambiente secco, sia per i provini T che per quelli II.

- v. La terapia in acqua stazionaria sembra portare uguali migliorie per provini con fibre ortogonali e quelli con fibre parallele.

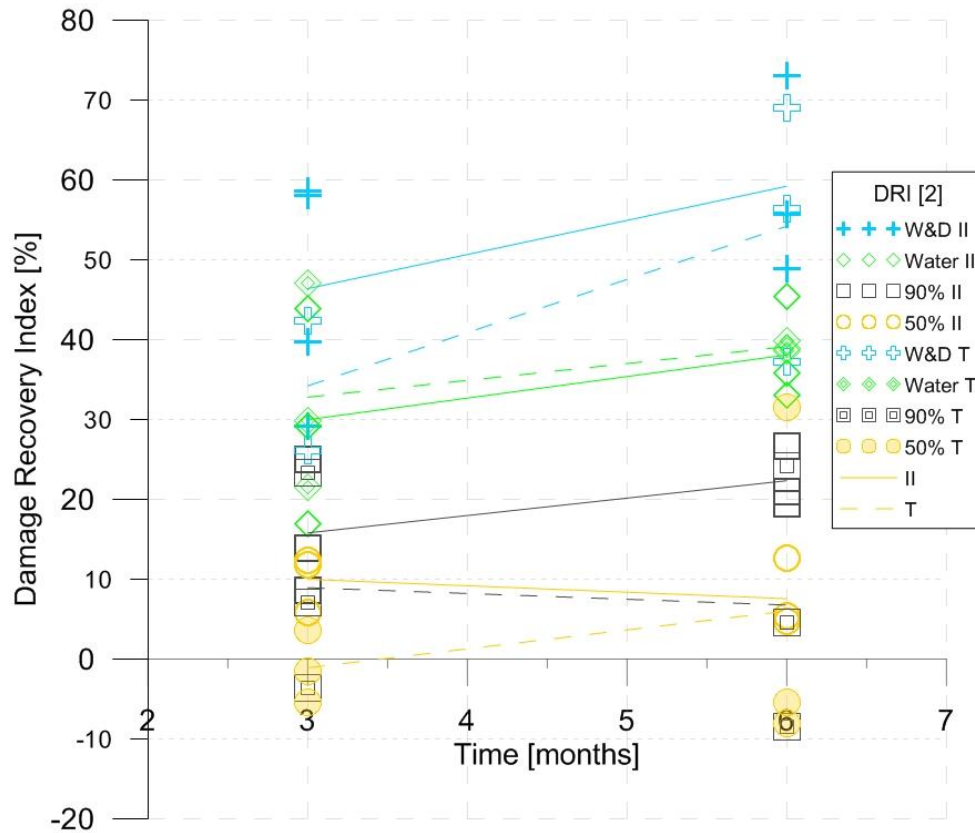


Figura 5.50 - Andamento nel tempo dell'indice DRI [2]

Nella figura 5.50 si mostra la variazione dell'indice in base ai due archi temporali cui è stata misurata. Si può dire che:

- vi. I valori registrati sono in linea con quello che ci si aspettava di trovare
- vii. Si hanno avuti miglioramenti all'aumentare del tempo di esposizione. L'assioma è valido per tutti i casi studiati, tranne per il 50% con fibre II e per il 90% con fibre T, che hanno pendenza negativa.
- viii. I risultati maggiori si sono registrati in presenza di acqua: W&D e WATER, con valori maggiori nella prima.
- ix. In WATER la variazione nel tempo è andata pressochè parallela tra i provini T e II.
- x. Per W&D invece si è registrato un miglioramento maggiore per provini T, ma i risultati in entrambi i casi sono stati molto buoni.

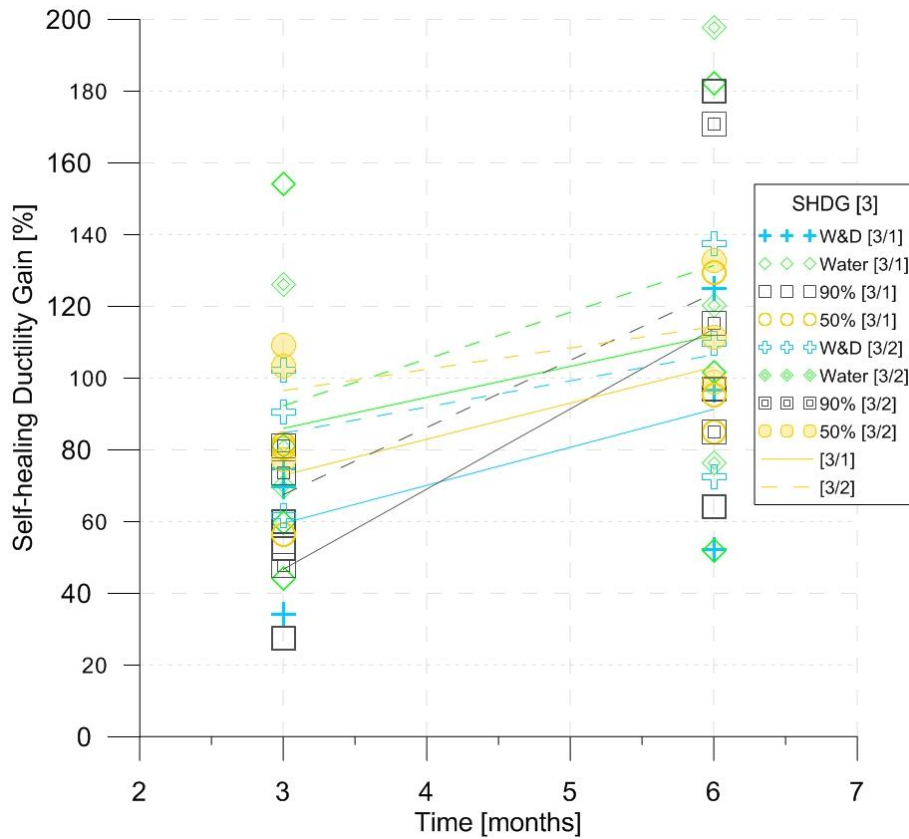


Figura 5. 51 – Andamento nel tempo dell'indice SHDG [3]

Viene mostrata nella Fig. 5.51 l'andamento dell'indice di duttilità, sia quello calcolato dalla prima fessurazione [3/1], sia invece quello calcolato dal punto iniziale della prova [3/2]. Si capisce che:

- xi. Tutti i provini hanno avuto un aumento di duttilità, qualcuno in maniera più evidente di altri.
- xii. A 3 mesi non è stata registrata una media superiore al 100% per nessuna condizione di esposizione.
- xiii. A 6 mesi si sono misurati valori più elevati rispetto a quelli ottenuti in precedenza.

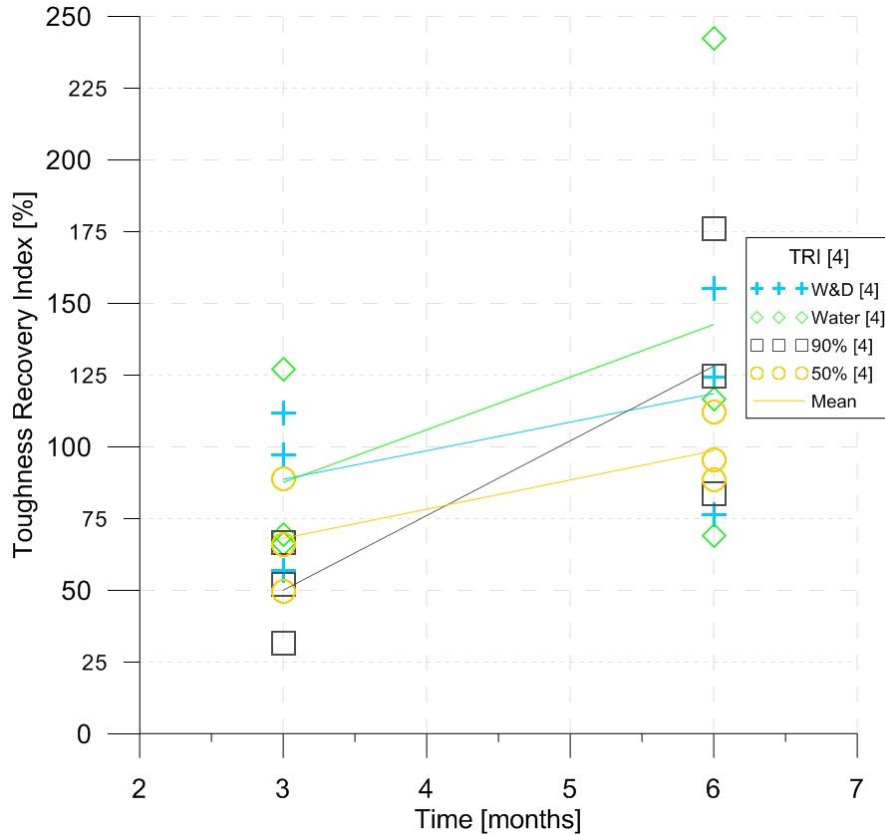


Figura 5.52 - Andamento nel tempo dell'indice TRI [4]

Nella Fig. 5.52 si mostra l'indice di recupero della durezza, calcolato come rapporto fra le aree sottese al grafico tensione – apertura di fessura del provino. Si evince che:

- xiv. Nei primi 3 mesi di esposizione, non si è potuto apprezzare un particolare miglioramento della durezza. I valori più alti sono stati quelli dei provini W&D e WATER, prossimi al 100%.
- xv. Si è notato un notevole miglioramento all'aumentare della durata dell'esposizioni. Questo fatto è importante poiché sottolinea un globale miglioramento della risposta all'aumentare del tempo di esposizione.
- xvi. Particolare guadagno si ottiene nella condizione al 90%, che ottiene una media superiore a quella ottenuta dai provini W&D.
- xvii. Il risultato migliore si ottiene con la condizione WATER che raggiunge valori superiori al 140%.

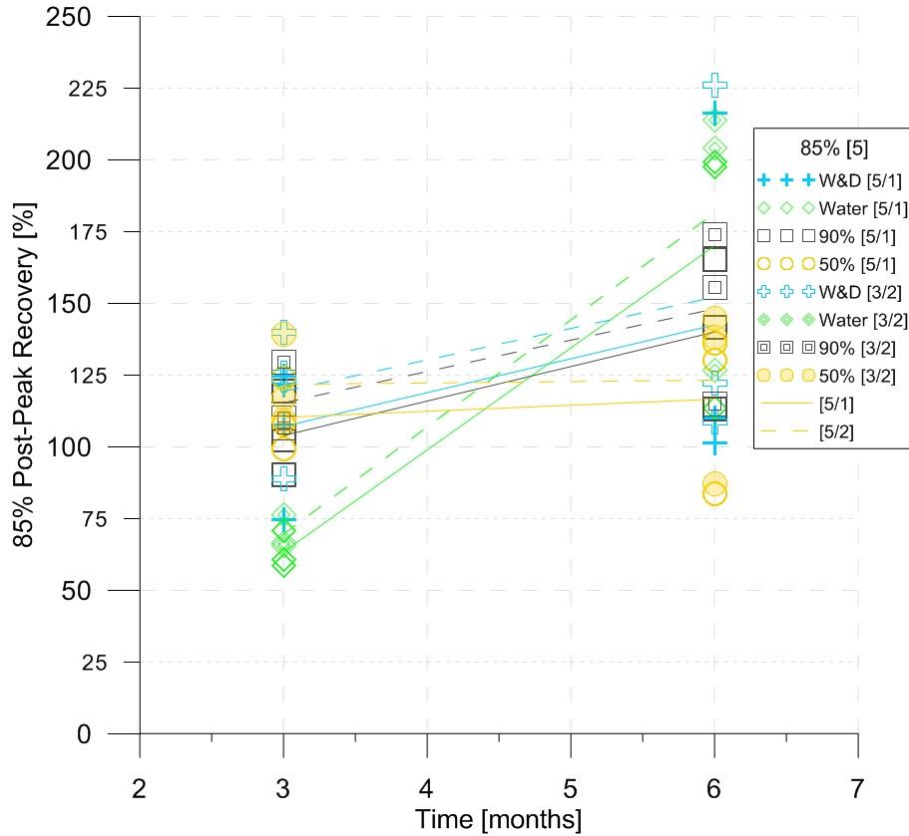


Figura 5.53 - Andamento nel tempo dell'indice di recupero all'85% [5]

Nella Fig. 5.51 riguardante l'andamento dell'indice di recupero relativo al livello tensionale pari all'85% di quella di picco, misurata nel tratto discendente, si può dire che:

- xviii. Tutti i valori sono migliorati all'aumentare della durata della terapia.
- xix. La misurazione avvenuta in funzione dello *Starting Point* è esattamente in linea con quella misurata alla formazione della prima fessura – *First Crack*.
- xx. Si sono misurati miglierie più marcate nei provini lasciati nella condizione WATER.
- xxi. La condizione 90% e W&D hanno dimostrato di ottenere lo stesso guadagno, mentre la condizione 50% ha mantenuto le sue stesse caratteristiche nel tempo, con una minima variazione in positivo.

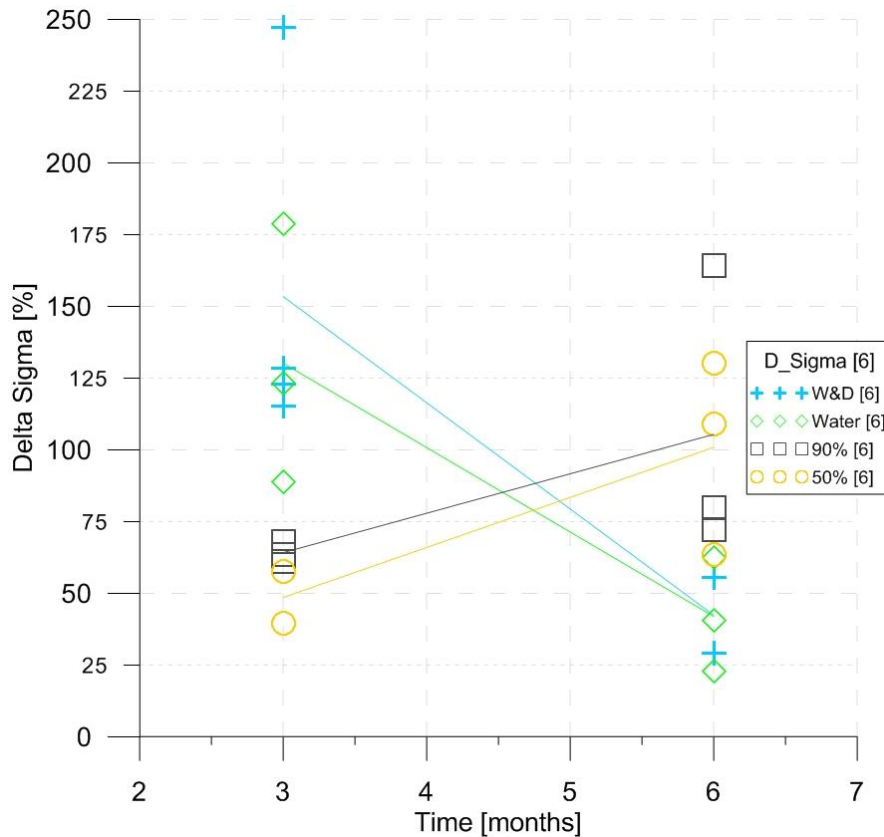


Figura 5.54 - Andamento nel tempo dell'indice $\Delta\sigma$ [6]

Si vuole ricordare ancora una volta che la misurazione dell'indice $\Delta\sigma$ [6] viene effettuata come ogni altro indice, rapportando la quantità misurata in post-trattamento con quella in prefessurazione. In questo caso si è misurato il salto di tensione tra il picco e una apertura di fessura mantenuta costante. Si sottolinea che un indice positivo significa uno scarto maggiore tra i due valori misurati, il che rende intendere un provino più fragile. Si nota dalla Fig. 5.54 quanto segue:

- xxii. Si nota una diminuzione dell'indice nei provini W&D e WATER, i quali misurano gli stessi valori dopo 6 mesi di terapia.
- xxiii. Questi valori sono minori del 100%, quindi si può dire che si ha un aumento nella tenacità post-picco, con diminuzione della fragilità
- xxiv. Si nota però un aumento nelle altre due condizioni (50% e 90%), ma i loro valori dopo 6 mesi rimangono sui valori prossimi al 100%, risultando quindi in uno scarto di tensione esattamente pari a quello avvenuto in prefessurazione

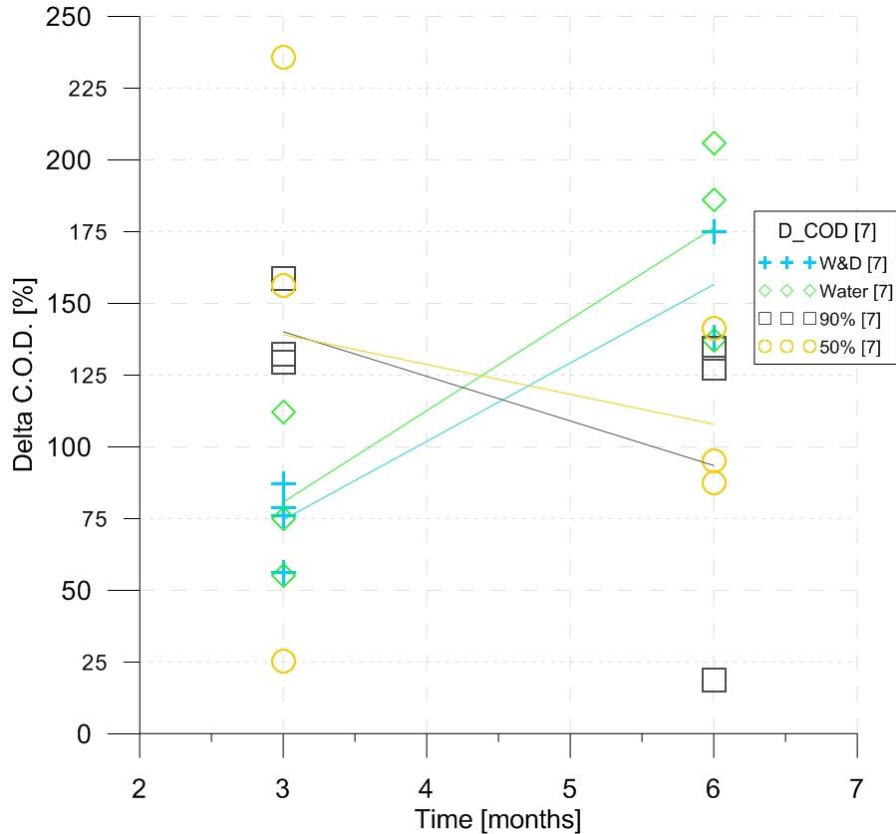


Figura 5.55 - Andamento nel tempo dell'indice Δ COD

Si ricorda anche per questo indice che, invece, un aumento nei valori calcolati Δ COD significano un miglioramento nella duttilità post-picco a parità di salto di tensione tra la prefessurazione e il post-trattamento. Dalla Fig. 5.55 si evince che:

- xxv. Un miglioramento molto evidente è stato misurato nella condizione WATER, con elevato scarto da quello misurato a 3 mesi.
- xxvi. Parallelamente, si hanno avuto miglorie simili anche per la condizione W&D.
- xxvii. Per le condizioni in camera umida (90%) e camera secca (50%) invece si è misurata una diminuzione nella duttilità post-picco in post-trattamento nel tempo. Da valori circa 140% si è arrivati nell'intorno del 100%. Valori in quell'intorno non segnano una variazione di duttilità, ma si è registrata una diminuzione nel tempo.

Nelle condizioni in cui è presente acqua, quindi sia per i provini lasciati in immersione sia quelli che hanno subito cicli di asciutto e bagnazione, si è mostrato un miglioramento globale delle proprietà meccaniche. All'aumentare del tempo di esposizione si verifica un generale aumento delle caratteristiche meccaniche registrate, esattamente in linea con i processi teorici spiegati nel capitolo 3 riguardo il processo di self-healing.

5.2.4.4 Paragone con solo fibre *Steel* con e senza l'ausilio di additivo cristallizzante

A seguire si mostrano i valori riportati da lavori precedenti [87] alla presente tesi dove si sono valutati gli effetti del self-healing per composti HPFRCCs con oppure senza additivo aerocristallizzante in una esposizione in acqua per 3 e 6 mesi. I grafici riportano poi accanto i valori misurati con il mix *Steel+Sisal*, come quelli visti nel paragrafo precedente. Si rammenta che i provini II hanno aperture di fessura diverse per provini solo *Steel*.

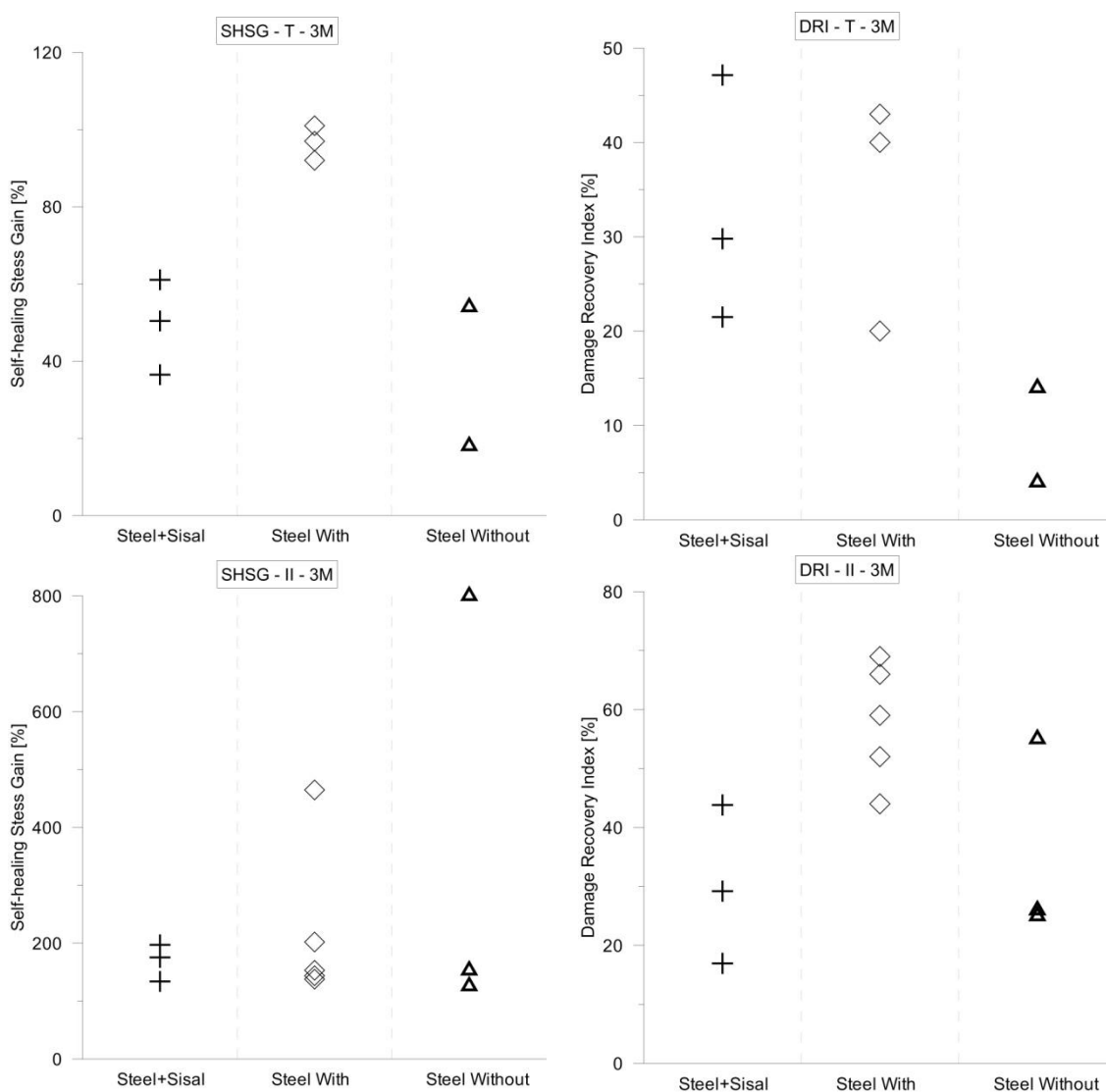


Figura 5.56 Grafici di paragone con i mix *Steel* a 3 mesi di esposizione

Nelle due immagini, Fig. 5.56 e 5.57, si mostrano i vari recuperi che si sono registrati con i diversi mix design. A sinistra si mostrano i recuperi tramite identificazione dell'indice SHSG (Self-Healing Stress Gain), così come identificato in precedenza, mentre a destra si mostrano i risultati ottenuti in riguardo al recupero di rigidità tramite indice DRI (Damage Recovery Index).

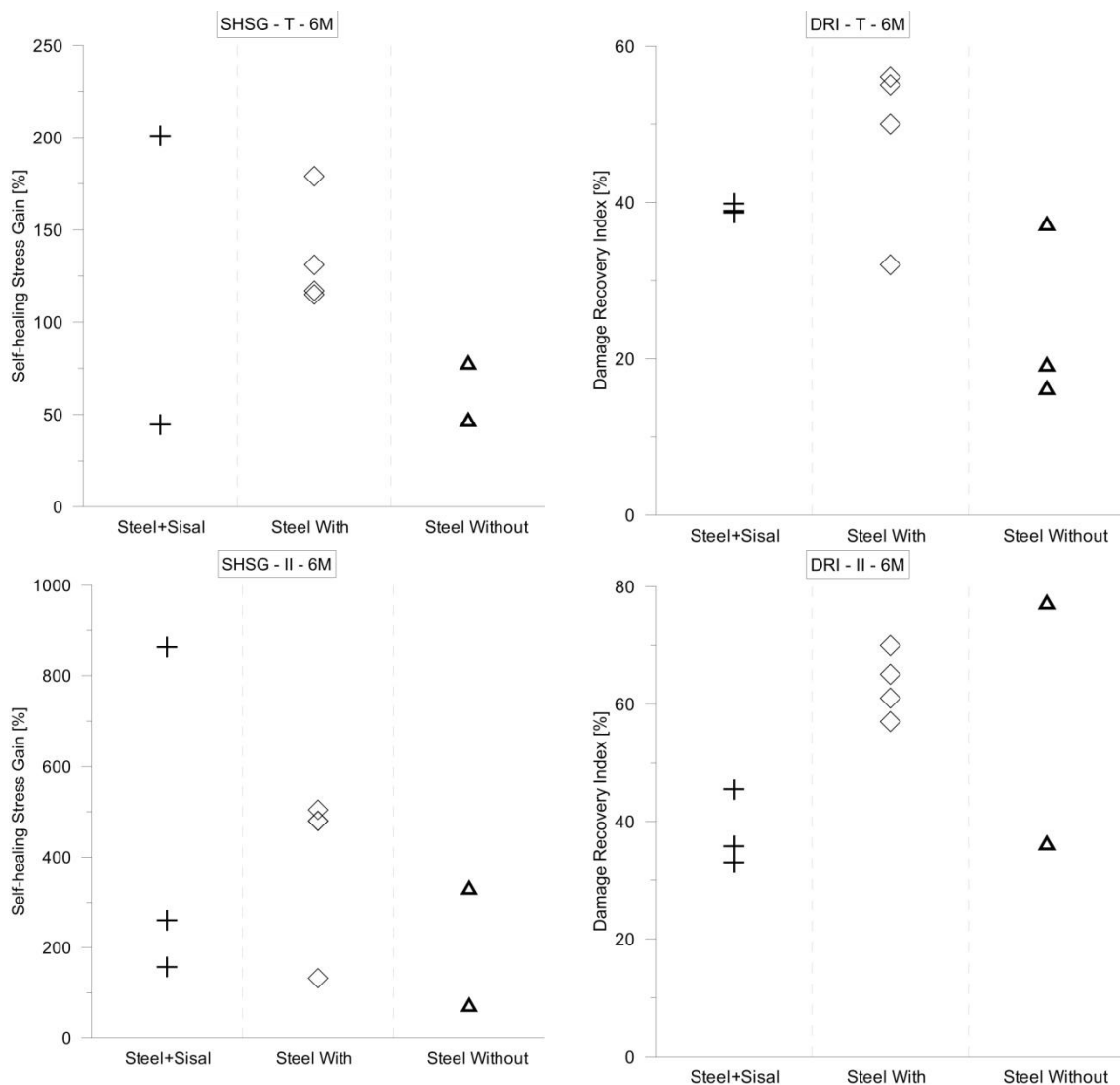


Figura 5.57 - Grafici di paragone con i mix Steel a 6 mesi di esposizione

Analizzando sia i risultati ottenuti per tutti e tre i mix design, sia per un tempo di esposizione pari a 3 mesi, sia per un tempo di esposizione di 6, si può affermare che i vari recuperi sono in linea con i risultati attesi, così come i valori di recupero mostrati dal mix ibrido *Steel+Sisal* può essere messo in relazione con quello ottenuto con le sole fibre di acciaio. Ulteriori verifiche sono necessarie per un migliore confronto fra le diverse tipologie di fibre, siano esse ibride o con l'aggiunta ingegnerizzata di additivi cristallizzante. In linea generale i risultati ottenuti possono essere intesi come una conferma dell'efficacia nell'uso di fibre naturali nei composti fibrorinforzati con caratteristiche di self-healing, promuovendo il recupero meccanico a seguito di un periodo di condizionamento in immersione in acqua.

5.2.5 Indagine al microscopio

Come descritto nel Cap. 4 è stata effettuata una indagine al microscopio. Di seguito viene mostrato un estratto dei risultati ottenuti, nelle Appendici se ne trovano di più.

5.2.5.1 Esposizione Wet&Dry







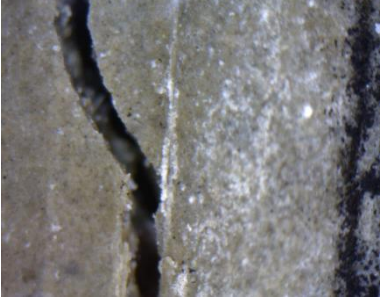

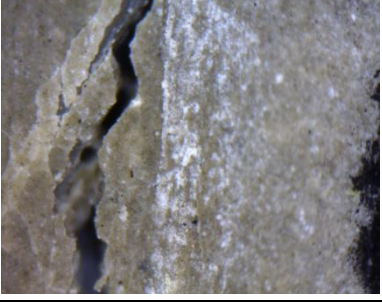

	PREFESSURAZIONE	POST-TRATTAMENTO	
50x			3 Mesi
200x			3 Mesi
50x			6 Mesi
200x			6 Mesi
200x			6 Mesi

Tabella 5. 11 - Confronto delle immagini al microscopio, condizione Wet&Dry

5.2.5.2 Esposizione WATER




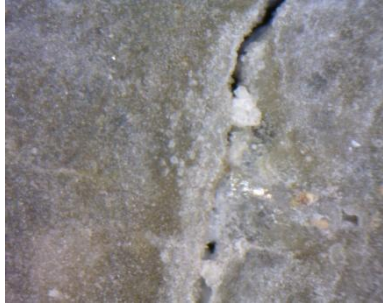


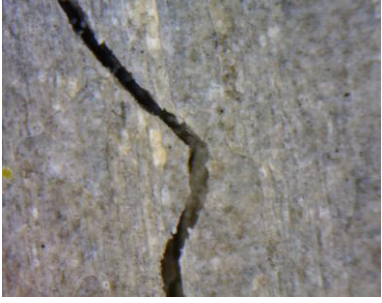

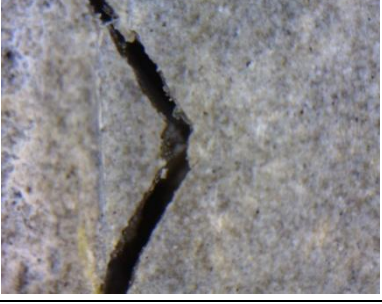

	PREFESSURAZIONE	POST-TRATTAMENTO	
50x			3 Mesi
200x			3 Mesi
50x			6 Mesi
200x			6 Mesi
200x			6 Mesi

Tabella 5. 12 - Confronto delle immagini al microscopio, condizione WATER

Sono state registrate singolarità e comportamenti particolari solo per la condizione WATER con esposizione a 6 mesi. Dopo la terapia, si è verificata la formazione di una

nuova fessura a seguito delle prove meccaniche in post-trattamento, anziché la degradazione di quella già formata in fase di prefessurazione. Questo rappresenta un fatto molto importante: è avvenuto il recupero meccanico, tale per cui la parte più fragile non risultava la fessura formata in precedenza, ma anzi una parte intatta della sezione del provino. I provini che hanno avuto questo comportamento sono stati 2/3 di quelli con fibre ortogonali, mentre in un provino con fibre parallele si è notato la propagazione di una fessura diversa da quella di dimensioni maggiori. Si vedano le Fig. 5.58/59/60.

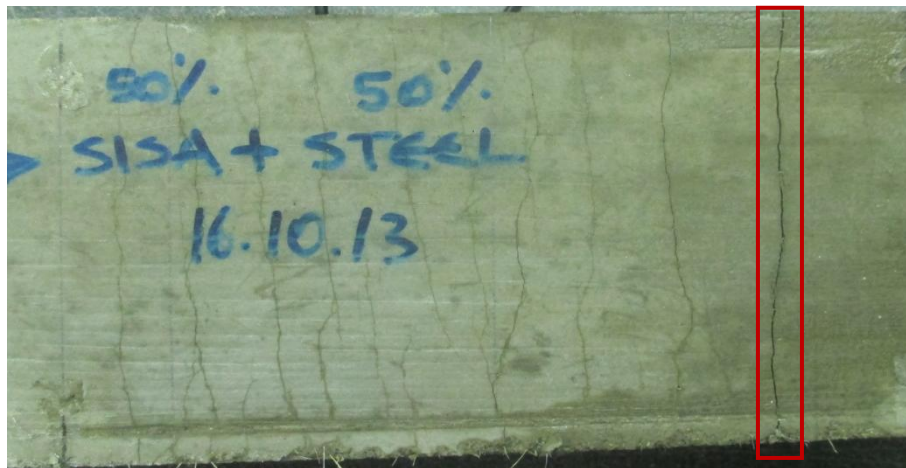


Figura 5.58 - Mappatura in prefessurazione di provino condizione WATER 6 mesi

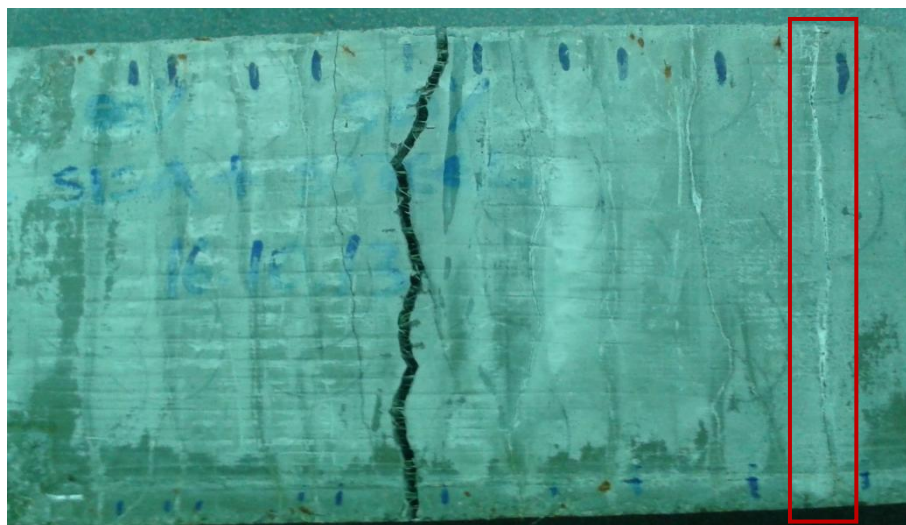


Figura 5.59 - Foto della zona a momento costante, provino WATER a 6 mesi



Figura 5. 60 - Formazione di una nuova fessura, provino T condizione WATER 6 mesi

5.2.5.3 Esposizione Camera Umidità - 90%

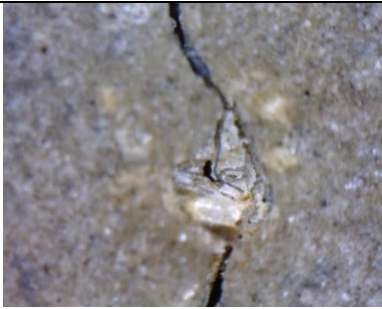
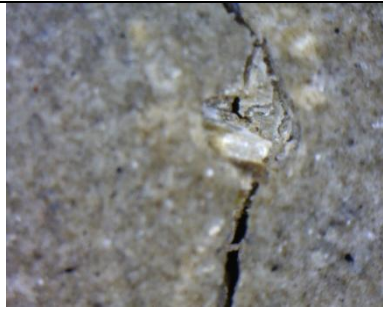




	PREFESSURAZIONE	POST-TRATTAMENTO	
200x			3 Mesi
50x			6 Mesi
200x			6 Mesi

Tabella 5. 13 - Confronto delle immagini al microscopio, condizione 90%

5.2.5.4 Esposizione Camera Umidità - 50%

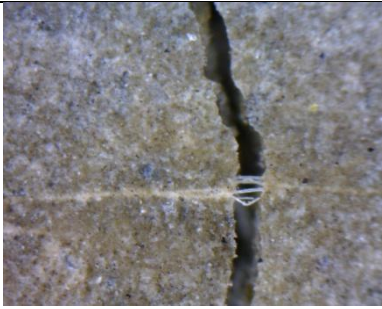
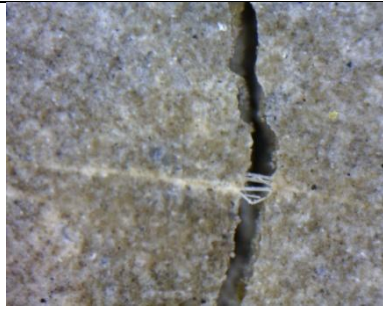

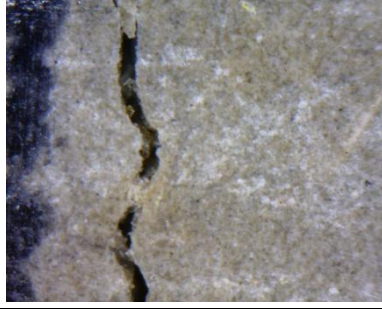
	PREFESSURAZIONE	POST-TRATTAMENTO	
200x			3 Mesi
200x			6 Mesi

Tabella 5. 14 - Confronto delle immagini al microscopio, condizione 50%

5.2.5.4 Empiric Crack Closure - EmCC

Dalla vasta e fornita indagine al microscopio si è potuto valutare la chiusura delle fessure attraverso la loro misurazione manuale tramite il software di utilizzo del microscopio ottico. Avendo a disposizione le fotografie della fessura prima e dopo l'esposizione, si può valutare quanto influisce l'esposizione con la formazione dei prodotti dell'idratazione del cemento durante la terapia.

L'indice considera solo i provini con fessura singola, ovvero quelli con fibre ortogonali, per via della difficoltà a calcolare le ampiezze delle singole fessure nei provini multifessurativi. Si analizzano le foto con 50x dove lungo tutta l'estensione della fessura, dall'inizio del provino alla fine, si calcola la parte che si è completamente rimarginata, se presente. Questo dato fornisce un valore di "Chiusura totale", ovvero quanta estensione della fessura si è completamente rimarginata. La parte che invece non si è richiusa completamente, è stata invece analizzata con le immagini con 200x. Misurando l'ampiezza della fessura prima e dopo l'esposizione si ottiene un valore che si identifica come "Riduzione lembi" che mostra l'effettiva diminuzione dell'ampiezza a seguito dell'avvenuto self-healing e quindi della formazione dei prodotti di idratazione lungo i bordi della fessura stessa. Seguendo l'equazione, si può calcolare il valore di Empiric Crack Closure (EmCC – Chiusura di fessura empirico):

$$EmCC = Chiusura\ Totale + (1 - Chiusura\ Totale \cdot Riduzione\ Lembi)$$

(Eq. 5.20)

Esposizione 3 Mesi	Wet & Dry	Water	90%	50%
Chiusura Totale – 50x	58%	64%	-	-
Riduzione Lembi – 200x	58%	53%	7%	5%
EmCC	82%	83%	7%	5%

Tabella 5. 15 - Indice Empiric Crack Closure per 3 mesi di esposizione

Esposizione 6 Mesi	Wet & Dry	Water	90%	50%
Chiusura Totale – 50x	53%	100%	-	-
Riduzione Lembi – 200x	71%	100%	8%	6%
EmCC	86%	100%	8%	6%

Tabella 5. 16 - Indice Empiric Crack Closure per 6 mesi di esposizione

CAPITOLO 6: CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

6.1 Commenti conclusivi

L'incipit del Capitolo 4 mette in mostra gli elementi che sono stati posti sotto valutazione nella presente campagna sperimentale:

- la validazione nelle procedure di getto per la corretta disposizione delle fibre nel provino e quindi lo sviluppo o meno di una zona multifessurata con comportamento di tipo incrudente (*deflection hardening*) oppure di un comportamento degradante (*deflection softening*)
- un effettivo recupero delle capacità meccaniche a seguito di un periodo di esposizione di 3 o 6 mesi
- una attenta indagine al microscopio che ne suffraghi la tesi e ne arricchisca il contenuto aggiungendo un indice tramite la visiva chiusura della fessura

Per il ritiro si è valutata l'estensione dell'accorciamento assiale e lo si è messo in relazione alla dispersione dell'umidità interna verso l'ambiente esterno, sia in situazioni in cui il provino non ha alcun vincolo al rilascio, sia quando invece il rilascio è impedito. La valutazione quindi è avvertita per il ritiro igrometrico e per il ritiro autogeno.

In funzione dei risultati ottenuti, si conclude quanto segue.

6.1.2 Effetto delle fibre naturali sul self-healing

- Le procedure di getto per le lastre sono state eseguite correttamente, così come dimostra l'andamento dei grafici tensione-apertura di fessura, dove si vedono due comportamenti differenti in funzione del tipo di orientamento delle fibre all'interno del provino: incrudente (*deflection hardening*) per provini con fibre disposte parallelamente all'asse degli sforzi, degradante (*deflection softening*) per fibre ortogonali.
 - L'aggiunta di una quantità pari al 0,64%, metà del totale, di fibre di *Sisal* al posto di fibre d'acciaio ha mantenuto il comportamento tipico *hardening* che si è registrato nelle ricerche condotte con l'utilizzo delle sole fibre d'acciaio, ovviamente con valori di tensione e deformazione differenti.
- All'aumentare del tempo di esposizione si registra un aumento sia dell'estensione dei prodotti del self-healing sulle fessure, valutata tramite analisi al microscopio e identificata tramite l'indice EmCC, sia tramite un miglioramento complessivo del comportamento del materiale, valutato tramite recupero delle prestazioni ed aumento degli indici nel tempo.
- I recuperi maggiori si sono verificati maggiormente per le condizioni in cui i provini erano a contatto con l'acqua, confermato sia dall'effettiva chiusura della fessura sia tramite recupero meccanico.
 - Si registra una correlazione tra effettiva chiusura di fessura, valutata con le indagini al microscopio, e gli indici di recupero meccanico.

- Il recupero meccanico migliore si è ottenuto con la esposizione a cicli di asciutto e bagnato. Si può pensare quindi che lo sviluppo di idrosilicati e precipitazioni di carbonato di calcio sia in quantità maggiore quando si alternano periodi di asciutto a periodi di bagnazione.
- Si sono registrate chiusure al 100% per i provini immersi in acqua per 6 mesi, tra cui 2/3 dei provini con fibre ortogonali agli sforzi si sono formate nella fase post-esposizione nuove fessure piuttosto che una riapertura di quelle formate in fase di prefessurazione. Si conclude che la sezione più fragile del provino non era la fessura ottenuta in prefessurazione, dove in essa è stato possibile migliorare la resistenza meccanica tramite formazione di prodotti di idratazione ritardata del cemento come il CSH.
- Un confronto è stato fatto con i risultati ottenuti con l'utilizzo delle sole fibre di acciaio, con o senza additivo cristallizzante, a 3 e 6 mesi in immersione in acqua.
 - L'utilizzo di fibre naturali può reggere il confronto con un materiale cui sono state fatte delle apposite aggiunte per incentivare lo sviluppo dei prodotti del self-healing, avendo ottenuto i risultati degli indici di recupero paragonabili.

6.1.2 Campagna *Sisal Hybrid*

- La presenza delle sole fibre naturali in percentuali pari allo 1,28%, siano esse di solo *Sisal* che ibridi con *Euclayptus* oppure *Nanopulp*, non ha consentito lo sviluppo di una zona multifessurata.
 - Malgrado si registra una maggiore tensione residua post-picco per fibre disposte parallele agli sforzi, l'orientamento delle fibre non viene considerato influente.
 - Il mix ibrido *Sisal+Euclayptus* mostra la resistenza maggiore: le microparticelle disperse nella matrice rendono il composto più coeso e compatto, aumentandone però la fragilità.

6.1.3 Campagna ritiro

In questa sezione si nota maggiormente l'effetto delle fibre naturali che funzionano da collegamento tra l'interno della matrice e l'ambiente esterno, creando una rete porosa all'interno della matrice cementizia [102].

- Si registrano valori di ritiro autogeno minori rispetto a quello misurati con il mix di riferimento, senza fibre. Questo significa che le fibre influiscono in maniera positiva sulla riduzione dell'estensione del ritiro autogeno.
 - L'acqua assorbita dalle fibre viene ceduta alla matrice contrastando così il ritiro autogeno.

- Le misurazioni ottenuti con provini lasciati in camera secca (20° C e 50% UR) hanno mostrato che il mix con le fibre di acciaio ritira meno di tutti, mentre il mix di riferimento mostra anch'esso un ritiro minore dei mix con le fibre naturali.
 - Le fibre hanno effetto contrario sul ritiro totale, in quanto il flusso del contenuto d'acqua dall'interno delle fibre verso l'ambiente esterno e la sua rispettiva variazione dimensionale comporta quindi una variazione maggiore rispetto a situazioni prive di fibre.
- I risultati meccanici ottenuti dalla rottura dei provini mostrano una elevata resistenza sia a flessione, provata su 3 punti, che a compressione. Si registrano valori maggiori, come prevedibile, con i provini con fibre di *Steel*, ma tutti gli altri mix hanno valori molto elevati, soprattutto per quanto riguarda la resistenza a compressione, raggiungendo valori di 140 MPa (*Steel*) e 88 MPa (*Eucalyptus*).

6.2 Sviluppi futuri

L'investigazione sperimentale presentata in questa tesi è parte di un progetto a più ampio respiro, dove altri aspetti ed altre analisi sono in corso di svolgimento mentre altre sono in programma per essere attuate. Ci si attende che le proprietà del self-healing possano contribuire a percorrere strade che concorrano a creare nuove possibili soluzioni "verdi", o comunque più verdi di quelle che sono state utilizzate nel settore dell'ingegneria strutturale.

Per poter percorrere questa strada, una maggiore conoscenza dei vari processi è necessaria. Il fenomeno del self-healing è conosciuto, ma ancora non inteso del tutto. Indirizzare analisi e studi in questa direzione può portare ad una migliore comprensione della chimica, della cinetica e della fisica del processo: lo studio delle varie reazioni nel tempo, la loro formazione e relative proprietà, sia a tempi di esposizione brevi, che in lunghe durate, così come il tempo di stagionatura. Interessanti risultati si potrebbero ottenere studiando il risultati dopo 1 mese di esposizione, o addirittura meno, anche solo due settimane.

Un interessante aspetto potrebbe essere quello di capire se è possibile ottenere più processi di self-healing, studiando i vari recuperi dopo esposizioni in terapia alternati ad eventi di carico. Si può ritenere di interesse anche la possibilità di analizzare il recupero mantenendo applicato un carico.

Ridurre le lacune nella conoscenza dei materiali può portare ad un migliore utilizzo delle risorse, ma anche ad una migliore produzione di prodotti che possono aumentare le capacità proprie autoriparanti. Continuare a dedicare sforzi per studiare i materiali da utilizzare nei compositi a base cementizia può portare alla realizzazione di prodotti "fatti su misura" che abbiano proprietà e caratteristiche migliori di quelli già presenti.

RINGRAZIAMENTI

Colgo l'occasione per ringraziare di cuore il Professor Liberato Ferrara per le sempre cortese disponibilità ed attenzione durante l'intero svolgimento della tesi. Assieme a lui, ci tengo a ringraziare Visar, che da quando è tornato in patria ho sempre un po' l'amero in bocca quando passo sotto il suo ufficio ed alzo gli occhi e non lo vedo. Un caloroso ed affettuoso saluto è rivolto al co-advisor di questa tesi, il dottorando Saulo, oltre ad essere una guida in laboratorio era un prezioso amico.

Saluto i compagni di viaggio: Silva, Giulia, Valeria, le socie dell'aula piola. Con loro saluto tutti i miei vecchi colleghi dell'università. Buona fortuna!

Per rimanere in ambito universitario, volevo ringraziare il nutrito schieramento di tecnici: da Tonino a Paolo (congratulazioni ancora per la creaturina!), da Massimo a Giovanni ed i suoi caffè. Ringrazio ma saluto anche calorosamente le ragazze del chimico: la Giovanna e la Sara.

In cima ai ringraziamenti metto la Silvietta, che ha insistito tanto per darmi una mano durante la stesura di questa tesi! Grazie molte! Scacco, la Po, la Bestets e chiunque abbia in qualche modo contribuito alla mia laurea è degno dei miei più sinceri e calorosi ringraziamenti! Un saluto a tutto "il Disagio" che elencare tutti quanti può essere difficile, ma vi voglio bene lo stesso. Un merito alla Fede, che con le sue uscite e domande inopportune lascia sempre un segno, e con lei tutta la compagnia delle merede. Un saluto anche alla Sofia, che malgrado le distanze e il tempo, sappiamo come rimanere buoni amici.

Un saluto a quei disgraziati di Boschini, Max, Ste e Marchino. Buon divertimento!

The last but not the least: la nerditi e i loro componenti. Un caloroso ringraziamento a tutti loro, Crotti, Legi, Mezza, il Re del Nord e anche Lollo! Grazie mille ragazzi! Che la scimmia sia con voi!

Per ultimi: i miei genitori, non per merito, ma perché alla fine viene il dolce! Un caloroso ringraziamento per tutto, ma tutto tutto! Grazie!

BIBLIOGRAFIA

- [1] Galbiati A., Granzini L., Macchia C. – *“I Calcestruzzi Fibrorinforzati – Produzione e applicazione”*, Maggioli Editore, Rimini (1996).
- [2] Gordon J. E. – *“The New Science of Strong Materials: Or Why You Don’t Fall Through the Floor”*, Harmondsworth; New York: Penquin Books (1978)
- [3] Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) – *“Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per l’impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni”*, CNR-DT 209-2012, Milano (2012)
- [4] Luca Bertolini – *“Materiali da costruzione”*, Vol. 1, Città Studi editore, Milano (2010)
- [5] Bapat Jayant D. – *“Mineral Admixtures in Cement and Concrete”*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL (2013)
- [6] Japan Society of Civil Engineers – *“Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)”*, Concrete Committee, Concrete Engineering Series (82), Japan, March 2008
- [7] Naaman A. E., Reinhardt H. W. – *“Proposed classification of HPFRCC composites based on their tensile response”*, Materials and Structures (2006), Vol. 38, pp. 547-555, Rilem 2006
- [8] Naaman A. E. – *“High Performance Fiber Reinforced Cement Composites”* High-Performance Construction Materials: Science and Applications, Caijun Shi Y L Mo editors, Engineering Materials for Technological Needs, 2008, Vol. 1
- [9] Sahmaran M., Li V. C. – *“Engineered Cementitious Composites – Can Composites Be Accepted as Crack-free Concrete?”*, Concrete Materials (2010), Vol. 10, pp 1-8
- [10] Arsene M-A., Savastano H Jr., Allameh S. M., Ghavami K., Soboyejo W. – *“Cementitious Composites Reinforced with Vegetable Fibers”*, Proceedings of the International conference on sustainable construction into next millennium: environmentally friendly and innovative cement based materials, Joao Pessoa, Brazil (2000)
- [11] Mohr B. J., El-Ashkar N.H., Kurtis K.E. – *“Fiber-Cement Composites for housing construction: State-of-Art Review”*, Cement and Concrete Research (2005), Vol. 27, Issue no. 4, pp. 435-448
- [12] Gram H. E. – *“Durability of natural fibers in concrete”*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo. 1:83, Stockholm (1983), pp. 255.
- [13] Toledo Filho R. D., Scrivener K., England G. L., Ghavami K. – *“Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites”*, Cement and Concrete Composites (2000), Vol. 22, pp. 127-143
- [14] Almeida Melo Filho J., Silva F. A., Toledo Filho R. – *“Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems”*, Cement & Concrete Composites (2013), Vol. 40, pp. 30-39

- [15] Toledo Filho R., Ghavami K., England G. L., Scrivener K. – “*Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability*”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 185-196
- [16] Toledo Filho R., Silva F. A., Fairbairn E. M. R., Melo Filho J. A. – “*Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates*”, *Construction Building Materials* (2009), Vol. 23, pp. 2409-2420
- [17] Abe H., Funada R. – “*Review – the orientation of cellulose microfibrils in the cell walls of tracheids in conifers. A model based on observation by field emission-scanning electron microscopy*”, *IAWA Journal* (2005), Vol. 26, Issue no. 2, pp. 161-174
- [18] Silva F. A., Chawla N., Toledo Filho R. D. – “*An experimental investigation of the fatigue behaviour of sisal fibers*”, *Materials Science and Engineering A* (2009), Vol. 516, pp. 90-95
- [19] Silva F. A., Chawla N., Toledo Filho R. D. – “*Tensile behaviour of high natural (sisal) fibers*”, *Composites Science and Technology* (2008), Vol. 68, pp. 3438-3443
- [20] Rao K. M. M., Rao K. M. – “*Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo*”, *Composites Structures* (2007), Vol. 77, pp. 288-295
- [21] Munawar S. S., Umemura K., Kawai S. – “*Characterization of the morphologica, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles*”, *Journal of Wood Science* (2007), Vol. 53, pp. 108-113
- [22] d’Almeida J. R. M., Aquino R. C. M. P., Montiero S. N. – “*Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (Attalea funifera) fibers*”, *Composites Part A: applied science and manufacturing* (2006), Vol. 37, pp. 1473-1479
- [23] Silva F. A., Chawla N., Toledo Filho R. D. – “*Mechanical Behaviour of natural sisal fibers*”, *Journal of biobased Materials and Bioenergy* (2010), Vol. 4, pp. 1-8
- [24] Fidelis M. E. A., Pereira T. V. C., Gomes O. F. M., Silva F. A., Toledo Filho R. D., - “*The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers*”, *Journal of Materials Research and Technology* (2013), Vol. 2, Issue no. 2, pp. 149-157
- [25] Ashman E. F., Dendy D. A. V., Jarman C. G., Little E. C. S., Timmins W. H: - “*Coconut palm products – Their processing in developing countries*”, Roma (1975), FAO.
- [26] Verma D., Gope P. C. – “*The use od coir/coconut fibers as reinforments in composites*”, *Biofiber Reinforcements in Composites Materials* (2015), Woodhead publishing, pp. 285-319
- [27] Tran L. Q. N. *et al.* – “*Investigation of microstructure and tensile properties of porous natural coir fibre for use in composites materials*”, *Industrial Crops and Products* (2014)
- [28] Spinacé M. A. S., Lambert C. S., Femoselli K. K. G., de Paoli M. A. – “*Charcterization of lignocellulosic curaua fibers*”, *Carbohydrate Polumers* (2009), Vol. 77, pp. 47-53

- [29] Souza S.F., Ferreira M., *et al.* – “*The use of curaua fibers as reinforcements in composites*”, *Biofiber Reinforcements in Composites Materials* (2015), Woodhead publishing, pp.700-721
- [30] Tomczak F., Satyanarayana K. G., Sydenstricker T. H. D. – “*Studies on lognocellulosic fiber of Brazil: Part III – Morphology and properties of Brizilian caraua fibers*”, *Composties Part A: applied science and manufacturing* (2007), Vol. 38, pp 2227-2236
- [31] Khan J. A., Khan M. A. – “*The use of jute fibers as reinforments in composites*”, *Biofiber Reinforcements in Composites Materials* (2015), Woodhead publishing, pp. 3-34
- [32] Roy S., Lutfar L. B. – “*Handbook of Natural fibres: types, properties and factors affecting breeding and cultivation. Bast fibres: jute*”, *Woodhead publishing Series in Textiles* (2012), Vol. 1, pp. 24-46
- [33] Horne M. R. L. – “*Bast fibres: hemp cultivation and production*”, *Woodhead publishing Series in Textiles* (2012), Vol. 1, pp. 114-145
- [34] Shahzad Asim – “*A study in physical and mechanical properties of hemp fibres*”, *Advanced in Materials Science and Engineering* (2013), Vol. 2013
- [35] Mizi Fan – “*Characterization and performance of elementary hemp fibres: factors influencing tensile strength*”, *BioResources* (2010), Vol. 5, Issue no. 4, pp. 2307-2322
- [36] Suardana N. P. G., Piao Y., Lim J. K. – “*Mechanical properties of hemp fibers and hemo/pp composites: effects of chemical surface treatment*”, *Materials Physics and Mechanics* (2011), Vol. 11, pp. 1-8.
- [37] Placet V., Trivuadey F. *et al.* – “*Diameter dependence of apparent tensile modulus of hemp fibres: a morphological, structural or ultrastructural effect?*”, *Composites Part A: applied science and manufacturing* (2012), pp. 275-287.
- [38] Sreekumar P. A. *et al.* – “*Effect of fiber surface modification on the mechanical and water absorption characteristics of sisal/polyester compositer fabricated by resin transfer molding*”, *Composites Part A* (2009), Vol. 40, pp. 1777-1784
- [39] Fernandes Diniz J. M. B., Gil M. H., Castro J. A. A. M. – “*Hornification – its origin and interpretation in wood pulps*”, *Wood Science Technology* (2004), Vol 37, pp. 489-494
- [40] Ferreira S. R. *et al.* – “*Effect of Sisal fiber hornification on the fiber-matrix bonding characteristics and bending behavior of cement based composites*”, *Key Engineering Materials* (2014), Vol. 600, pp. 421-432.
- [41] Lavoine N., Desleges I., Defresne A., Bras J. – “*Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: a review*”, *Carbohydrate Polymers* (2012), Vol. 90, pp. 735-764
- [42] Wu X., Moon R. J., Martini A., - “*Crystalline cellulose elastic modulus predicted by atomistic models of unifrom deformation and nanoscale indentation*”, *Cellulose* (2013), Vol. 20, pp. 43-55

- [43] Cao Y., Zavaterra P., Youngblood J., Moon R., Weiss J. – “*The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste*”, *Cement & Concrete Composites* (2015), Vol. 56, pp. 73-83
- [44] Desai T., Shah R., Peled A., Mobasher B., - “*Mechanical Properties of Concrete Reinforced with AR-Glass Fibers*”, *Brittle Matrix Composites* (2003), Vol. 7, pp. 233-232
- [45] Silva F. A., Mobasher B., Toledo Filho R. D. – “*Cracking mechanism in durable sisal fiber reinforced cement composites*”, *Cement & Concrete Composites* (2009), Vol. 31, pp. 721-730
- [46] Toledo Filho R. D., Silva F. A., Fairbairn E. M. R., Melo Filho J. A. – “*Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates*”, *Construction and Building Materials* (2009), Vol. 23, Issue no. 6, pp. 2409-2420
- [47] Ferrara L., Ozyurt N., di Prisco M. – “*High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of “casting-flow induced” fibre orientation*”, *Materials and Structures* (2011), Vol. 44, Issue no. 1, pp. 109-128
- [48] di Prisco M., Ferrara L., Lamperti M. – “*Duoble edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites*”, *Materials and Structures* (2013), Vol. 46, pp. 1893-1918
- [49] Silva F. A., Toledo Filho R. D., Melo Filho J. A., Fairbairn E. M. R. – “*Physical and mechanical propertiers of dubrable sisal fiber-cement composites*”, *Construction and Building Materials* (2010), Vol. 24, pp. 777-785
- [50] Igarashi, S., Kunieda, M., Nishiwaki, T. – “*Research activity of JCI technical committee TC-075B: Autogenous healing in cementitious materials*”. Proceedings of 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications (2009), ConMat 2009, Nagoya, Japan. Keynote Lecture, pp. 89-96
- [51] de Rooij M., Van Tittelboom K., De Belie N., Schlangen E. – “*Self-Healing Phenomena in Cement-Based Material*”, State-of-art report of RILEM TC 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials (2013), Vol. 11
- [52] van Breugel K. – “*Self-healing material concepts as solution for aging infrastructure*”, 37th Conference on Our World in Concrete & structures (2012)
- [53] Edvardsen C. – “*Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete*”, *ACI Materials Journal* (1999), Title no. 96-M56, pp. 448-454
- [54] Sisomphon K., Copuroglu O., Koenders E.A.B. – “*Self-Healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive*”, *Cement and Concrete Research* (2012), Vol. 34, pp. 566-574
- [55] Hearn N. – “*Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference?*”, *Materials and Structures* (1998), Vol. 31, pp. 563-567

- [56] Yang Y., Lepech M.D., Yang E.H., Li V.C. – “Autogenous healing of Engineered Cementitious Composites under wet-dry cycles”, *Cement and Concrete Research* (2009), Vol. 39, pp. 382-390
- [57] Neville A. – “Autogenous Healing: a Concrete Miracle?”, *Concrete International* (2002), Vol. 24, pp. 76-82
- [58] Bertolini Luca – “*Materiali da Costruzione*”, CittàStudi Edizioni, Milano, (2006)
- [59] Yang Y., Yang E., Li V.C. – “Autogenous healing of engineere cementitious composites at early age”, *Cement and Concrete Research* (2011), Vol. 41, Issue 2, pp. 176-183
- [60] Lauer K.R., Slate F.O. – “Autogenous healing of cement paste”, *American Concrete Institute Journal* (1956), Vol. 52, No. 6, pp. 1083-1097
- [61] Reinhardt H. W., Jooss M. – “Permeability and Self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width”, *Cement and Concrete Research* (2003), Vol. 33, pp. 981-985
- [62] Ahn T.H., Kishi T. – “Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures”, *Journal of Advanced Concrete Technology* (2010), Vol. 8, No. 2, pp. 171-186
- [63] Wu M., Johannesson B., Geiker M. – “A review: Self-Healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as self-healing material”, *Construction and Building Materials* (2012), Vol 28, pp. 571-583
- [64] Dry C. – “Alteration of matrix permeability, pore and crack structure by the time release of internal chemicals”, *Proceedings of advance in cementitious materials*, American Ceramic Society: Gaithersbury, Maryland (1990), pp. 729-768
- [65] Dry, C. – “Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for fibers into cement matrices”, *Smart Materials and Structures* (1994), Vol. 3, No. 2, pp. 118-123
- [66] Mihashi H., Kaneko Y., Nishiwaki T., Otsuka K. – “Fundamental study on development of intelligent concrete characterized by self-healing capability for strength”, *Transcript Japan Concrete Institution* (2000), Vol. 22, Issue 2, pp. 441-450
- [67] Joseph C., Jefferson A.D., Cantoni M.B. – “Issue relating to the autonomic healing of cementitious materials”, *Proceedings of first international conference on self-healing materials*, Noordwijk aan Zee, the Netherlands. Paper 61, Springer (2007)
- [68] Mihashi H., Nishiwaki T. – “Development of Engineered self-healing and self-repairing concrete – State of Art Report”, *Journal of Advanced Concrete Technology* (2012), Vol. 10, Issue 5, pp. 170-184
- [69] Homma D., Mihashi H., Nishiwaki T. – “Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites”, *Journal of Advanced Concrete Technology* (2009), Vol. 7, Issue 3, pp. 217-228
- [70] Nishiwaki T., Mihashi H., Jang B. et al. – “Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack”, *Journal of Advanced Concrete Technology* (2006), Vol. 4, Issue 2, pp. 267-275

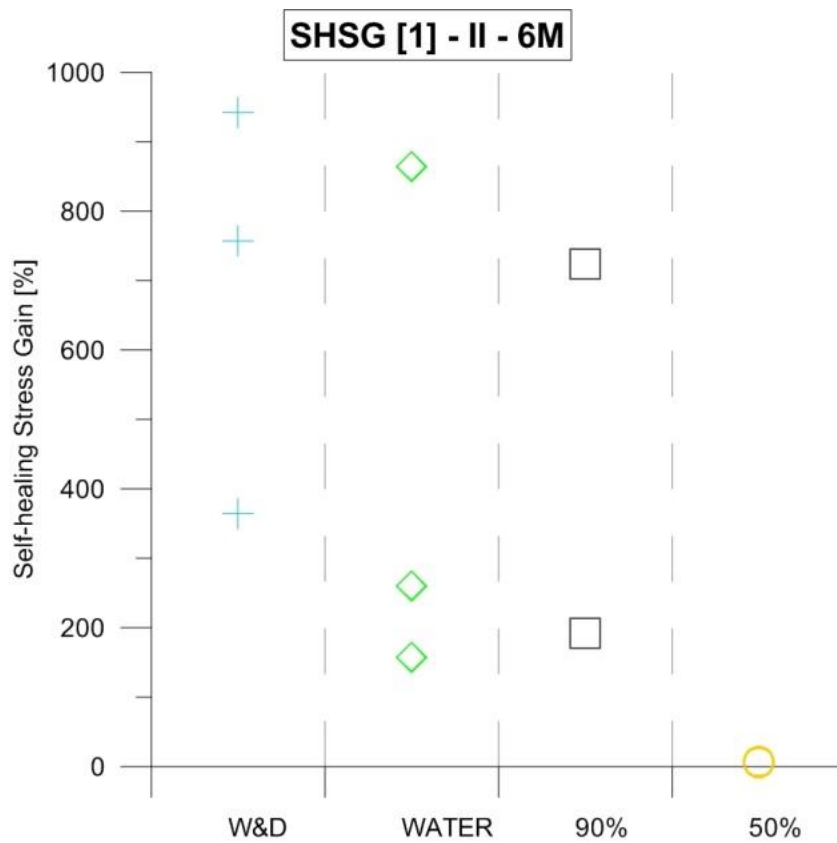
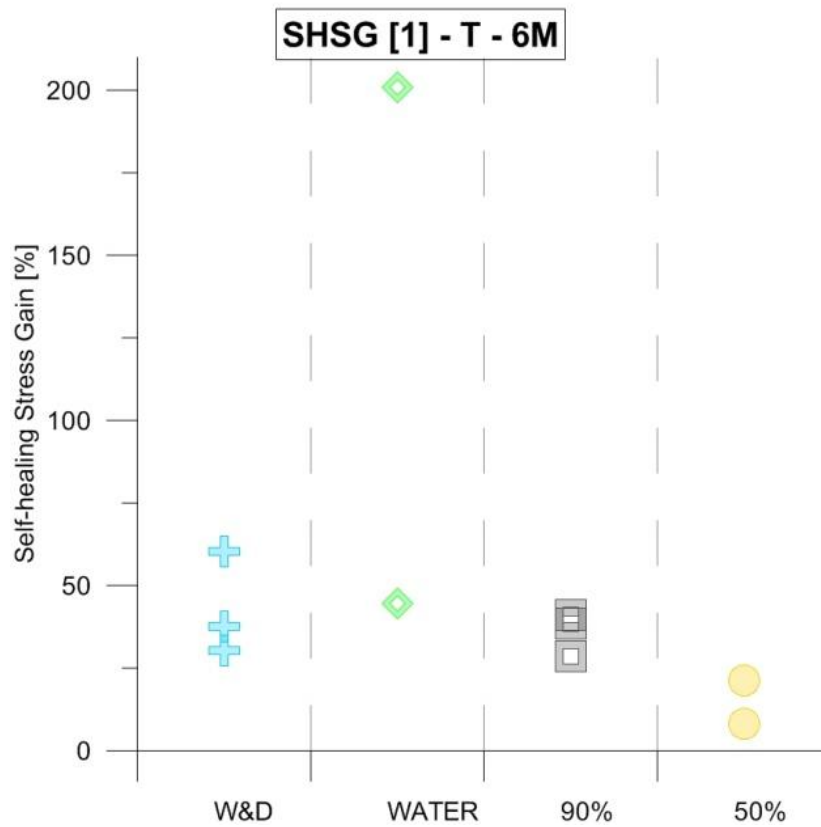
- [71] White S., Sottos N., Geubelle P. *et al.* – “Autonomic healing of polymer composites”, *Nature* (2001), Vol. 409, pp. 1804-1807
- [72] Xia Hua (2010) – “Self-healing of Engineered Cementitious Composites (ECC) in Concrete repair System”, Master of Science (MSc) Thesis, Delft University of Technology, the Netherland
- [73] Song G., Ma N., Li H.N. – “Applications of shape memory alloys in civil structures”, *Engineering Structures* (2006), Vol. 28, pp. 1266-1274
- [74] Turner L., – “The Autogenous Healing of Cement and Concrete: Its relation to vibrated Concrete and Cracked Concrete”, International Association for Testing Materials, London Congress, Apr. 1937, p. 344
- [75] van der Zwaag S. – “Self Healing Materials”, pp. 161-190, Springer, 2007
- [76] Wolfseher R. – “Economical aspects of repair and maintenance”, Proceedings 5th International Workshop on Materials Properties and Design: Durable reinforced concrete structures (1998), pp. 33-48
- [77] Toniolo G., Di Prismo M. – “Cemento Armato: Calcolo agli stati limite” Vol. 2A, Terza edizione, Edizioni Zanichelli, Bologna (2009)
- [78] Van Tittelboom K., Gruyaert E., Rahier H., De Belie N. – “Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation”, *Construction and Building Materials* (2012), Vol. 37, pp. 349-359
- [79] Snoeck D., Van Tittelboom K., Steuperaert S., Dubrueel P., De Belie N. – “Self-healing cementitious materials by the combination of microfibers and superabsorbent polymers”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (2012), Vol. 0, pp. 1-12
- [80] Hager M., Greil P., Leyens C., van der Zwaag S., Shubert U. – “Self-Healing Materials”, *Advanced Materials* (2010), Vol. 22, pp. 5424-5430
- [81] Van Tittelboom K., De Belie N. – “Self-healing in Cementitious Materials – a Review” , *Materials* (2013), Vol. 6, pp. 2182-2217
- [82] Jacobsen S., Marchand J., Boisvert L. – “Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete”, *Cement and Concrete Research* (1996), Vol. 26, Issue 6, pp. 869-881
- [83] Jacobsen S., Sellevold E. – “Self healing on high strength Concrete after deterioration bt freeze-thaw”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, Issue 1, pp. 55-62
- [84] Joseph C., Lark R. – “Potential application of self-healing materials in the construction industry”, Report for the Institution of Civil Engineers, Cardiff University (June 2009)
- [85] Qian S., Zhou J., De Rooij M. *et al* – “Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials”, *Cement and Concrete Research* (2009), Vol. 31, Issue 9, pp. 613-621

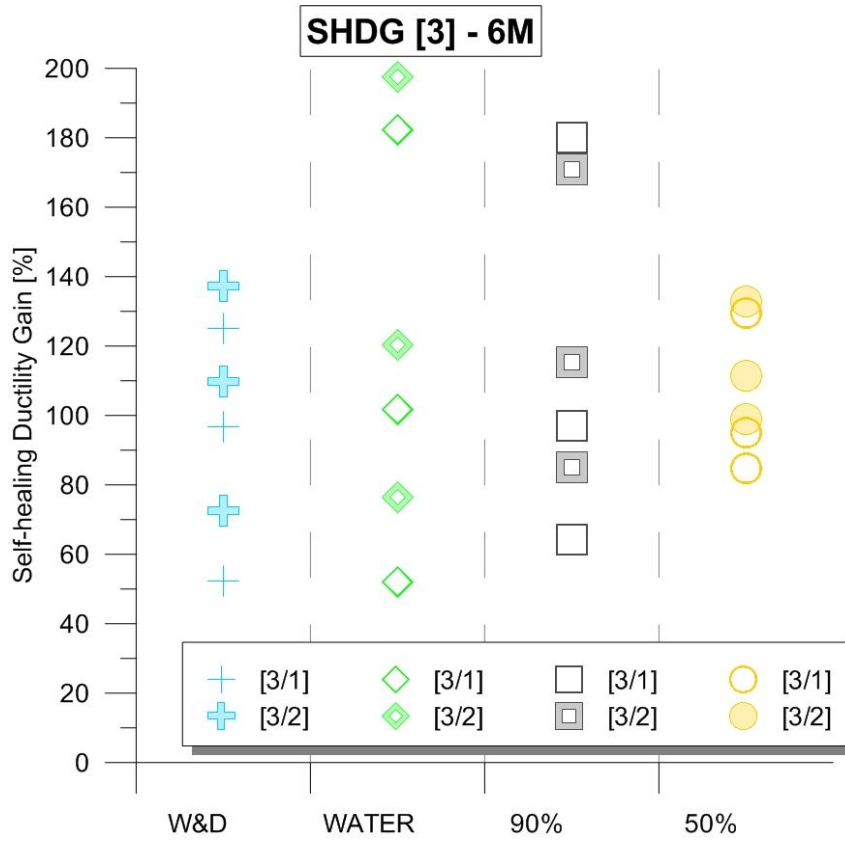
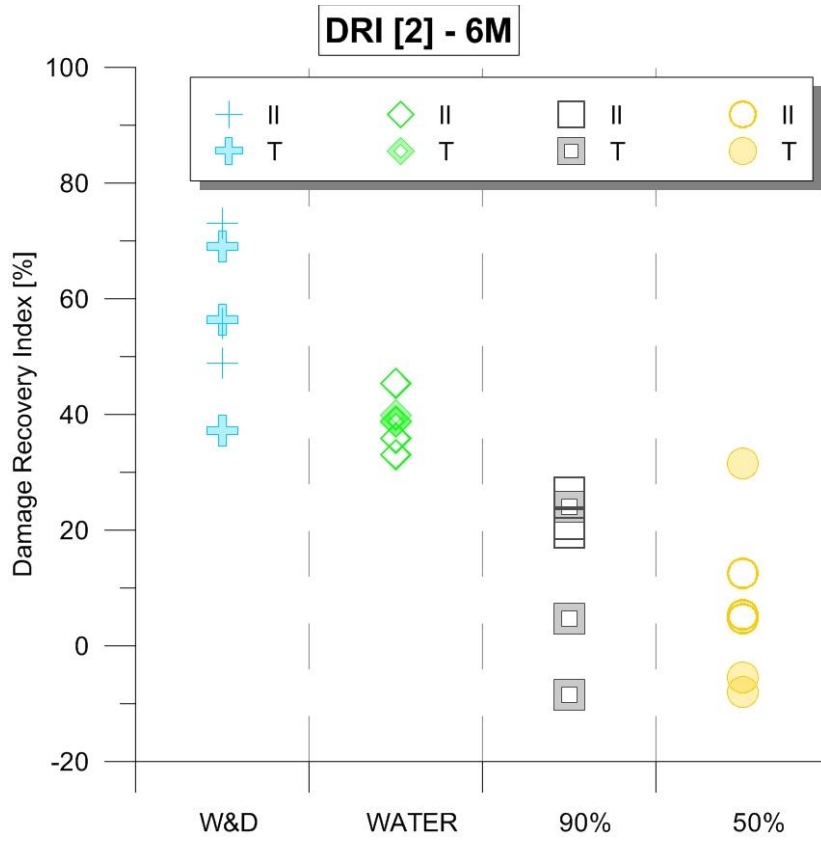
- [86] Qian S., Zhou J., Schangen E. – *“Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites”*, Cement and Concrete Research (2010), Vol. 32, Issue 9, pp. 686-693
- [87] Geminiani M., Gorleza R. (2012/13) – *“Capacità di autoriparazione di composite cementizi fibrorinforzati ad alte prestazioni”*, Tesi di Laurea Magistrale (MEng), Politecnico di Milano, Italia
- [88] Science Watch (1990) – *“Concrete repairs its own cracks”*, Available at: <http://www.nytimes.com/1992/09/22/science/science-watch-concrete-repairs-its-own-cracks.html> [05/2014]
- [89] Ferrara L., Ozyurt N., di Prismo M. – *“High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of ‘casting-flow induced’ fibre orientation”*, Materials and Structures (2011), Vol. 44, pp.109-128.
- [90] Silva F. A., Chawlan, Toledo Filho R.D. – *“Tensile Behaviour of Natural Sisal Fibers”*, Journal of Biobased Materials and Bioenergy (2010), Vol. 4, pp. 106-113
- [91] Claudio Farina (2010/11) – *“Elementi multistrato in composito fibrorinforzato ad alte prestazioni con anima in schiuma”*, Tesi di Laurea Magistrale (Meng), Politecnico di Milano, Italia
- [92] Ferrara L., Faifer M., Toscani S. – *“A magnetic method for non destructive monitoring of fibre dispersion and orientation in Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites – part 2: correlation to tensile fracture”* Materials and Structures (2012), Vol. 45, pp. 575-589
- [93] Consiglio Nazionale delle Ricerche (2006) – *“Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato”*, CNR-DT 204:2006
- [94] Ente Nazionale italiano per l’unificazione (2007) – *“Elementi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato con fibre d’acciaio – progettazione, esecuzione e controllo”*, UNI 11188:2007
- [95] Timoshenko S., Goodier J. – *“Theory of Elasticity, Engineering Mechanics Series”*, McGraw-Hill International Editors (1970)
- [96] Haist M., Ferrara L. – *“Rheological Characterization of high performance fiber reinforced cementitious composites”*, Proceedings of 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities (2012), Guimarães, Portugal.
- [97] European Committee for Standardization (2002) – *“Product and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods. Part 4: determination of shrinkage and expansion”*, EN 12617-4:2002
- [98] Ente Nazionale italiano per l’unificazione (1973) – *“Cement and mortar. Hydraulic shrinkage determination. Laboratory test.”*, UNI 6687:1973
- [99] Ente Nazionale italiano per l’unificazione (2005) – *“Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength”*, UNI EN 196-1:2005

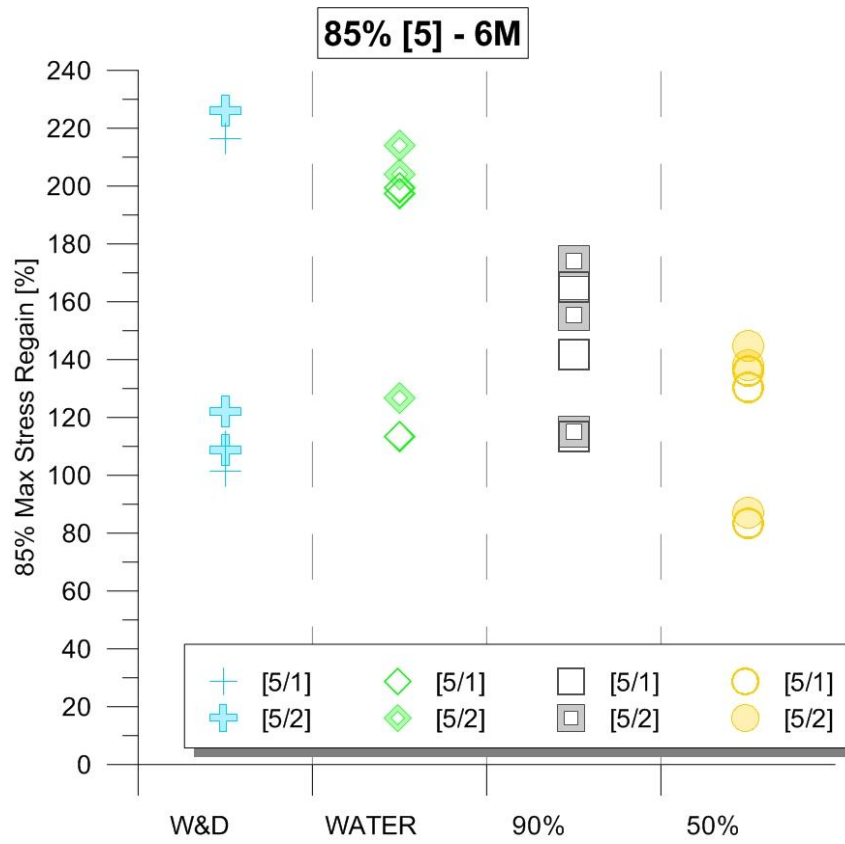
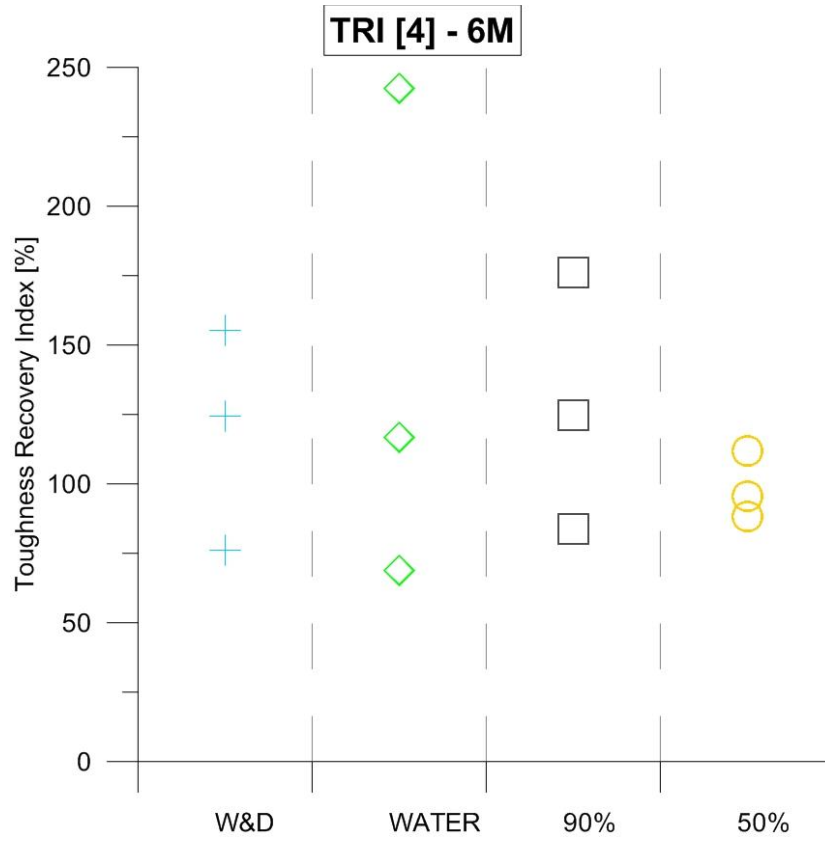
- [100] Regio Decreto, Legge 16 Novembre 1939 – XVIII, n. 2229 – *“Norme per l’esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato”*, Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale, n. 92 del 18 Aprile 1940
- [101] Ferrara L., Ferreira S. R., Della Torre M., Krelani V., Silva F. A., Toledo Filho R. D. – *“Effect of nanopulp on autogenous and drying shrinkage of cement based composites”*, Proceedings of the 5th International Symposium on Nanotechnologies in Construction, Chicago (2015)

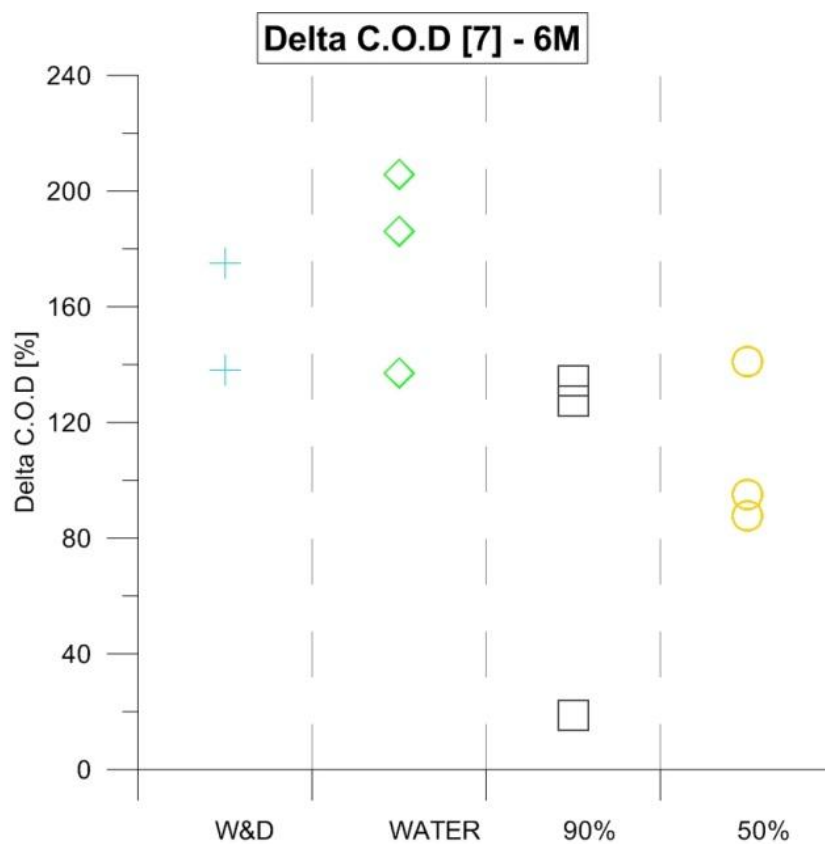
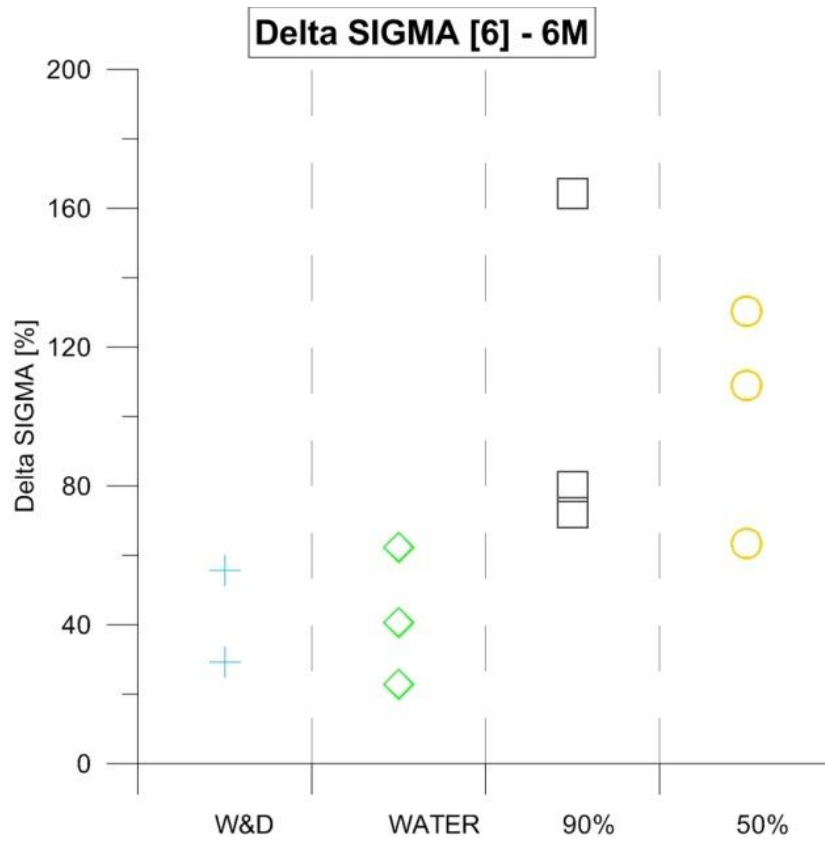
APPENDICE A

A seguire si mostrano i grafici relativi a 6 mesi di esposizione in funzione delle condizioni









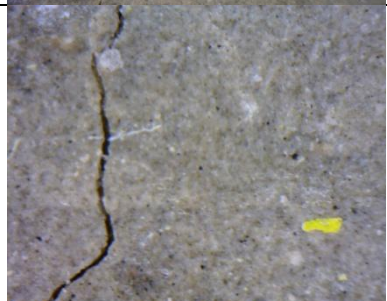





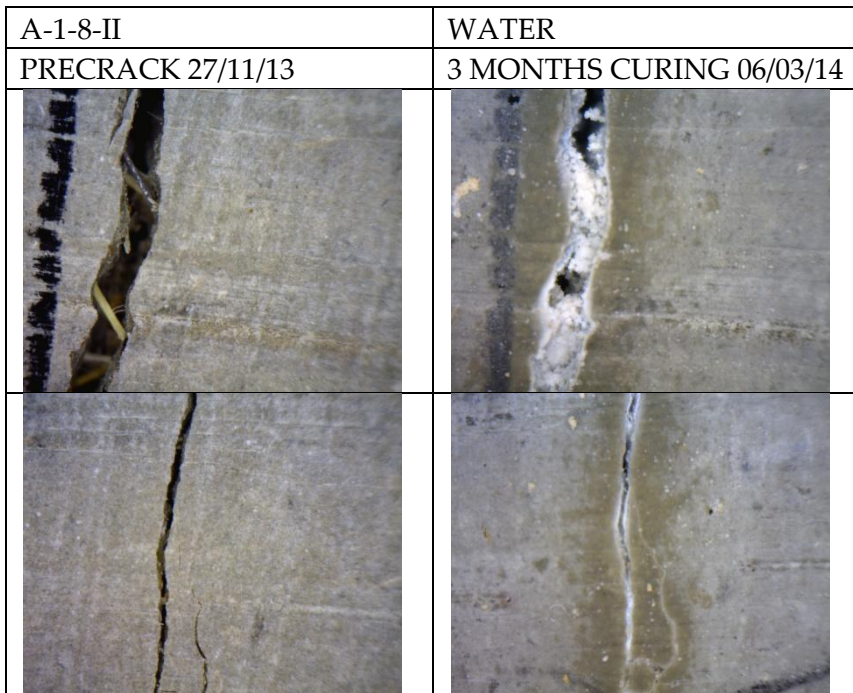
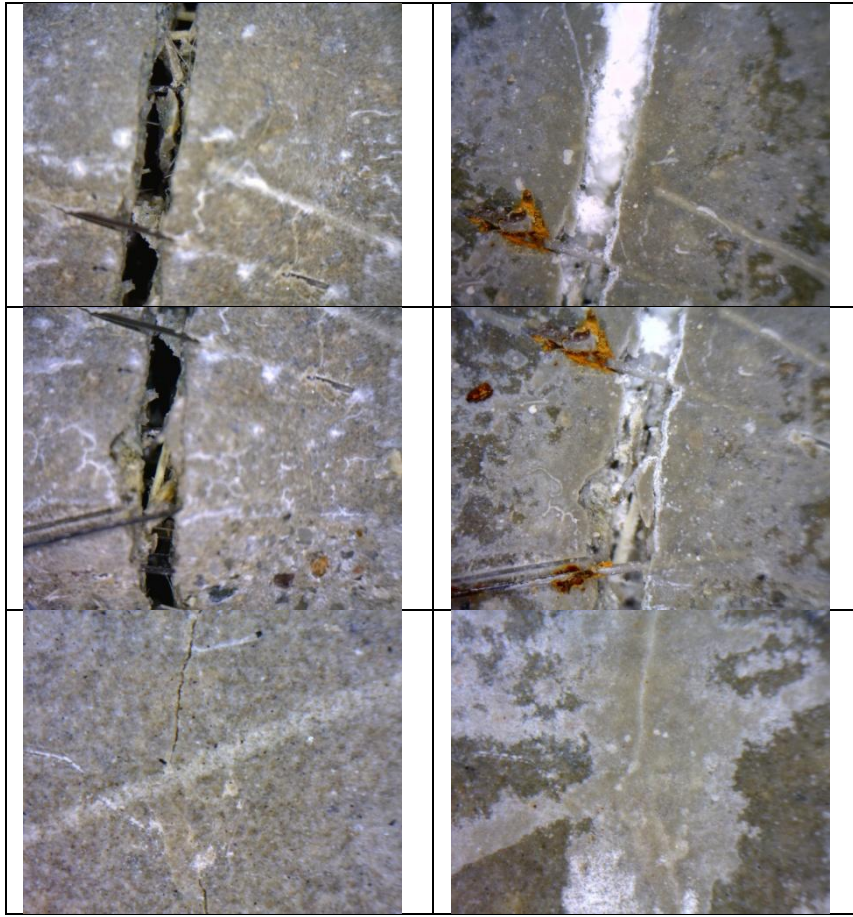


APPENDICE B1

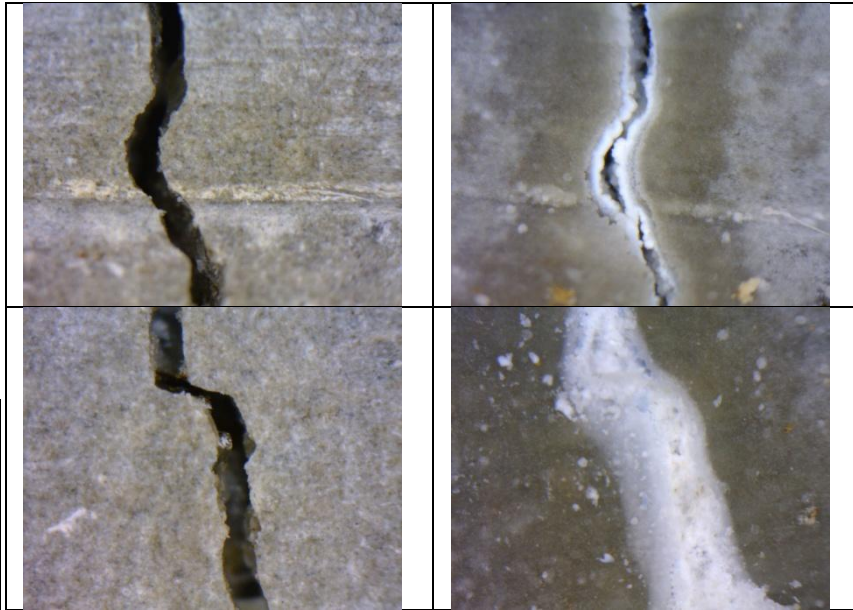
A seguire le immagini al microscopio per i provini con fibre parallele e tempo di esposizione 3 mesi. Quelle mostrate sono solo parte di quelle raccolte durante l'indagine.

A-1-6-II	WATER
PRECRACK 27/11/13	3 MONTHS CURING 06/03/14
	
	
	
	

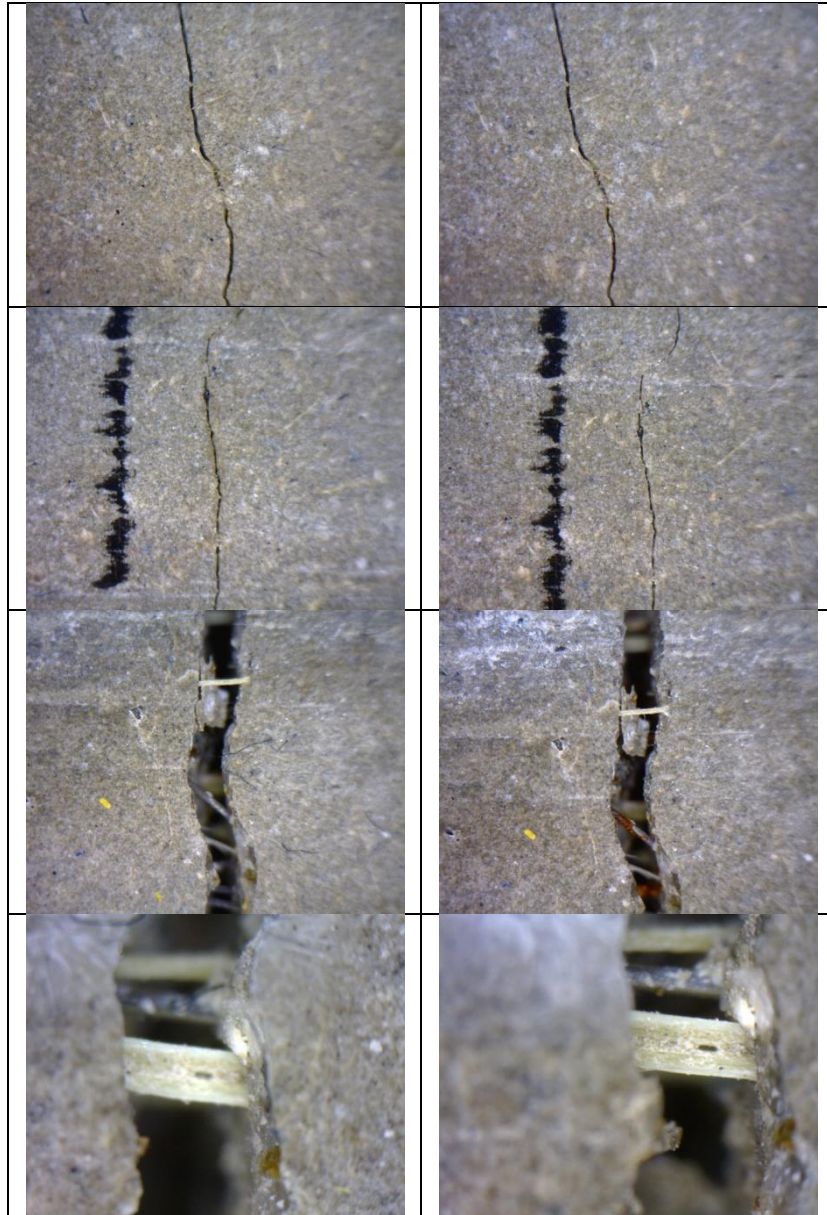
A-1-7-II	WATER
PRECRACK 27/11/13	3 MONTHS CURING 06/03/14





A-1-9-II	90%
PRECRACK 27/11/13	3 MONTHS CURING 06/03/14



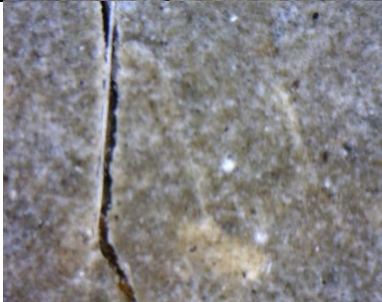



A-2-6-II	90%
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 03/03/14



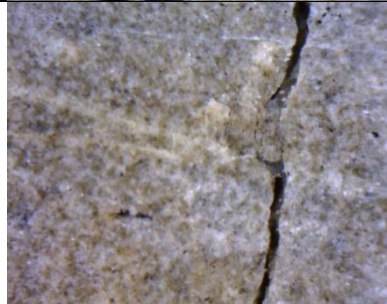



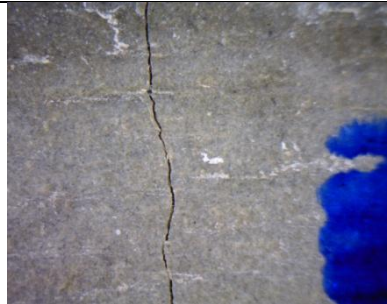
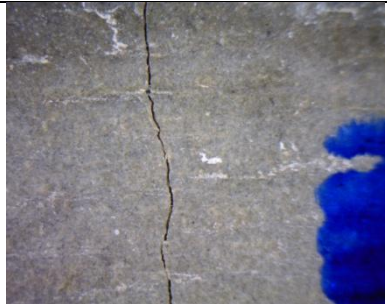


A-2-7-II	90%
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 03/03/14
	



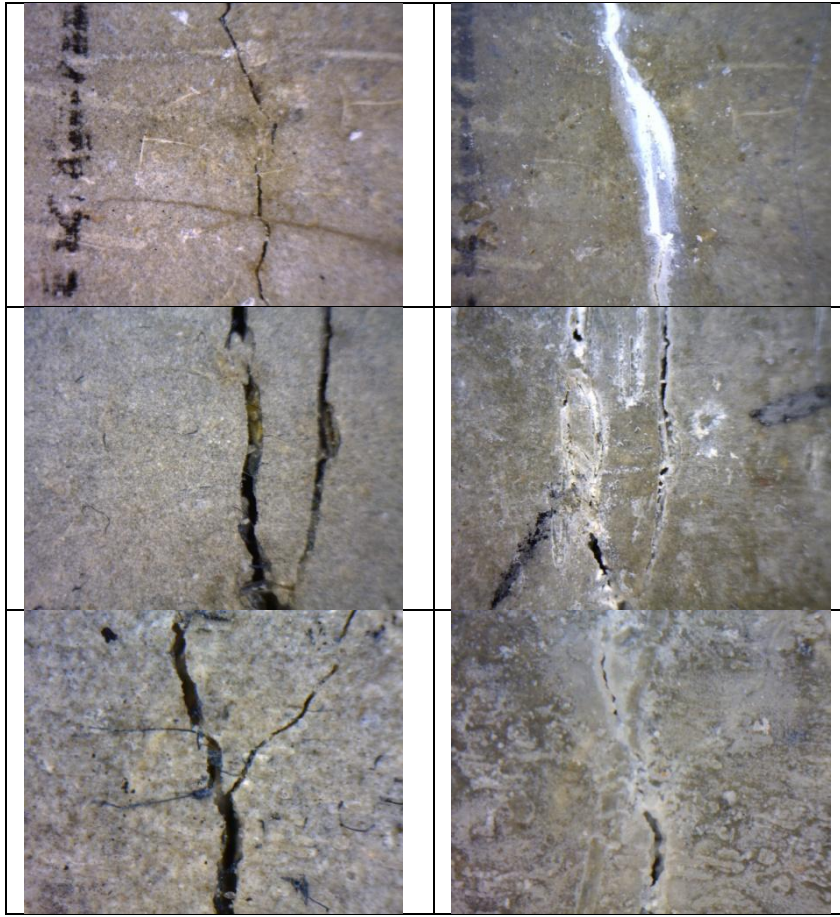
A-2-8-II	50%
PRECRACK 27/11/13	3 MONTHS CURING 03/03/14
	
	

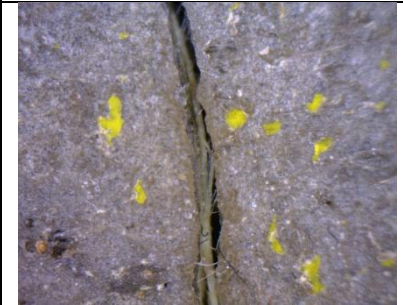
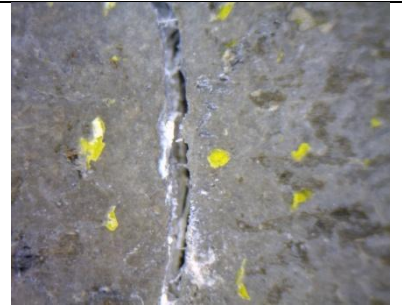


A-2-9-II	50%
----------	-----

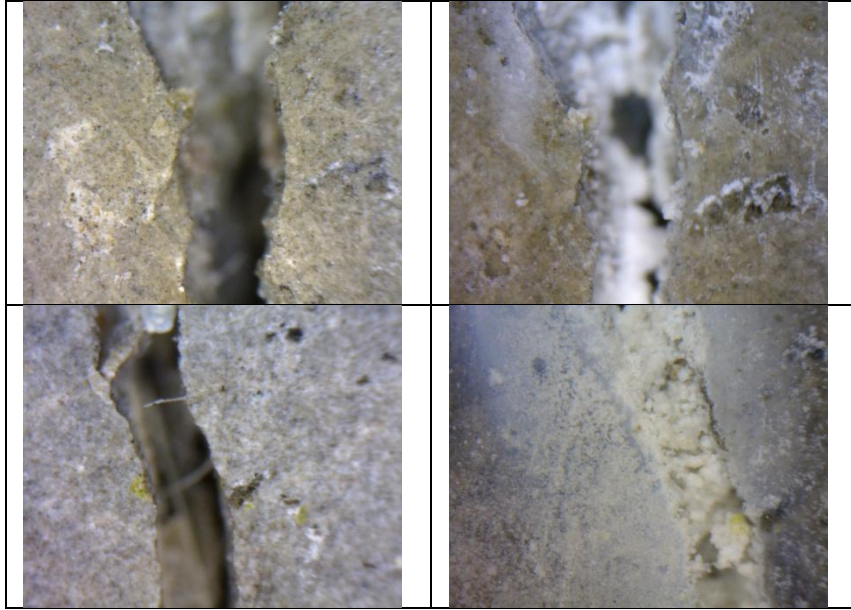
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 03/03/14
	
	


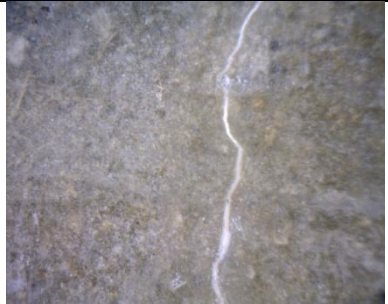



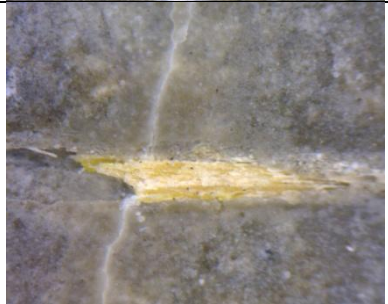
A-2-10-II	50%
PRECRACK 27/11/13	3 MONTHS CURING 03/03/14
	
	

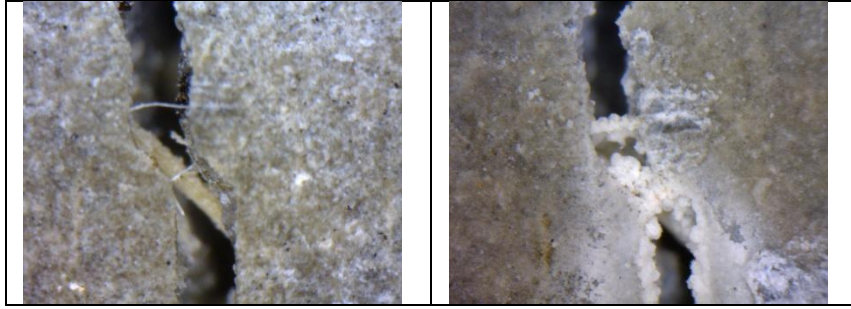
A-3-6-II	W&D
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 07/03/14



A-3-7-II	W&D
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 07/03/14
	
	













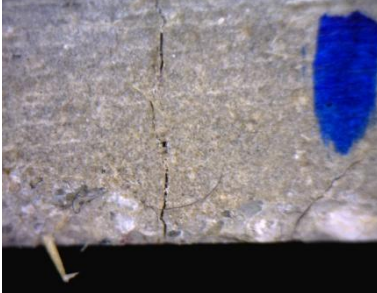









A-3-8-II	W&D
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 06/03/14
	
	
	













APPENDICE B2



A seguire le foto al microscopio per provini con fibre parallele e 6 mesi di esposizione

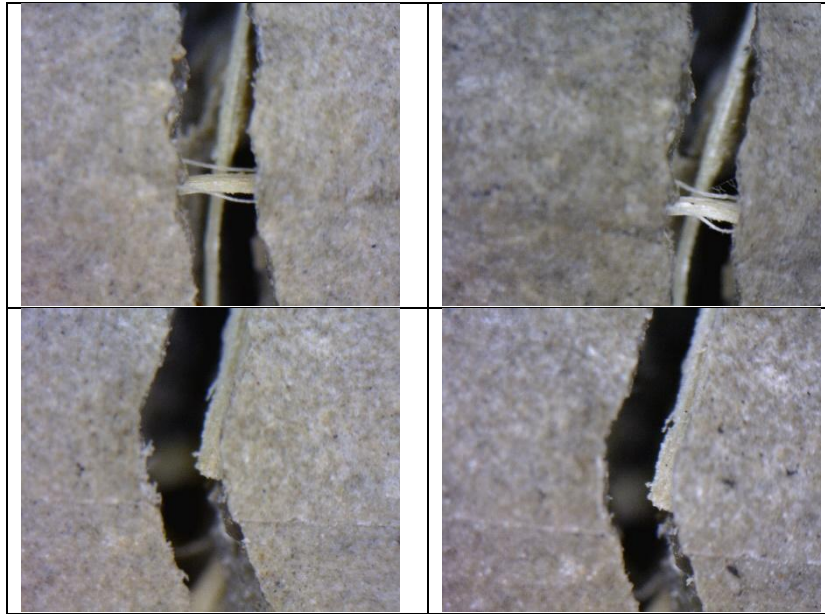
A-3-9-II	WATER
PRECRACK 29/11/13	FAILURE CRACK 29/05/14
	
	
	
	
	


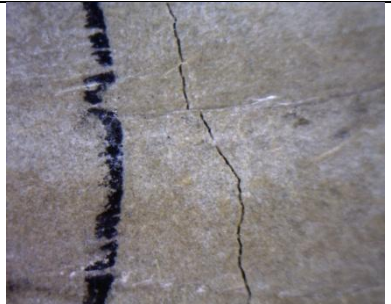
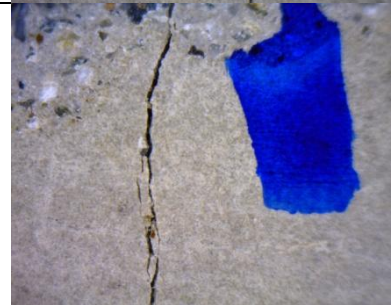
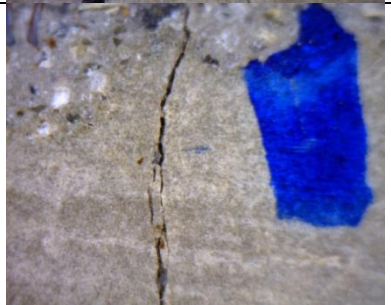
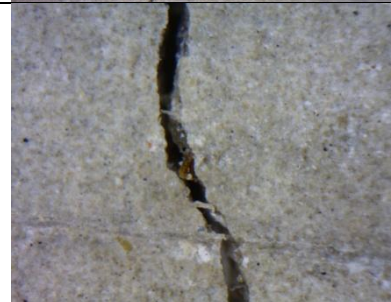
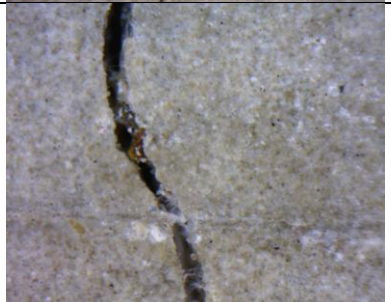
A-3-10-II	WATER
PRECRACK 29/11/13	FAILURE CRACK 28/05/14
	
	
	
	
	





E-1-6-II	WATER
PRECRACK 10/12/13	FAILURE CRACK 04/06/14
	
	
	
	
	






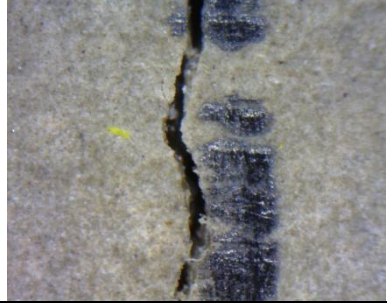
E-1-7-II	90%
PRECRACK 10/12/13	FAILURE CRACK 03/06/14
	
	
	
	



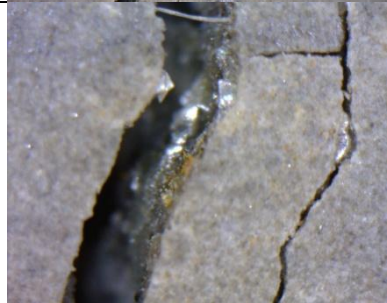

E-1-8-II	90%
PRECRACK 11/12/13	FAILURE CRACK 03/06/14
	







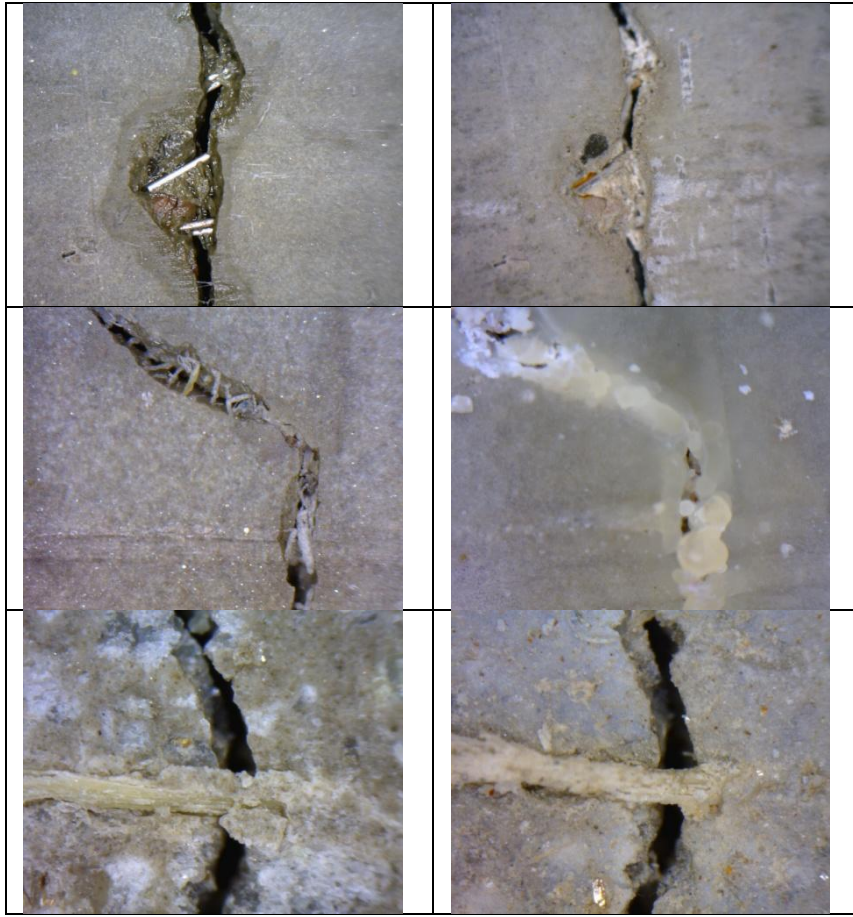
E-1-9-II	90%
PRECRACK 10/12/13	FAILURE CRACK 03/06/14
	
	
	





E-1-10-II	50%
PRECRACK 11/12/13	FAILURE CRACK 03/06/14
	
	

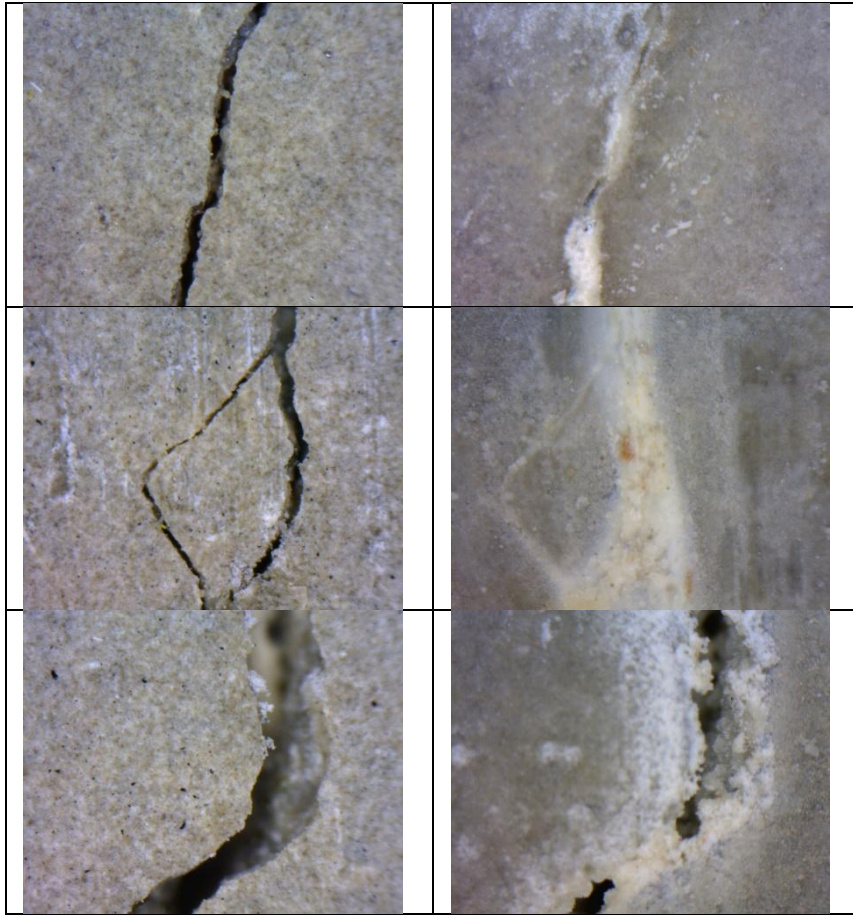
E-2-6-II	50%
PRECRACK 10/12/13	FAILURE CRACK 29/05/14
	
	
	





E-2-7-II	50%
PRECRACK 10/12/13	FAILURE CRACK 29/05/14
	
	

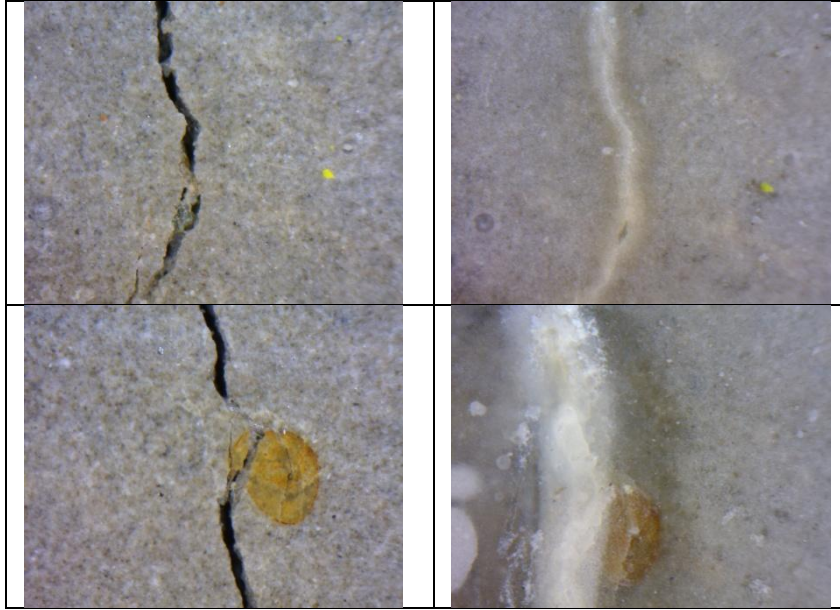
E-2-8-II	W&D
PRECRACK 11/12/13	FAILURE CRACK 04/06/14
	
	



E-2-9-II	W&D
PRECRACK 10/12/13	FAILURE CRACK 04/06/14
	
	



E-2-10-II	W&D
PRECRACK 11/12/13	FAILURE CRACK 04/06/14
	
	







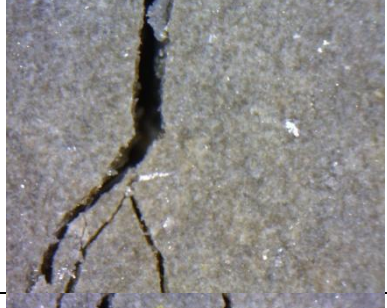

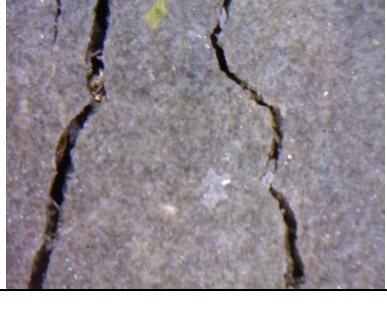



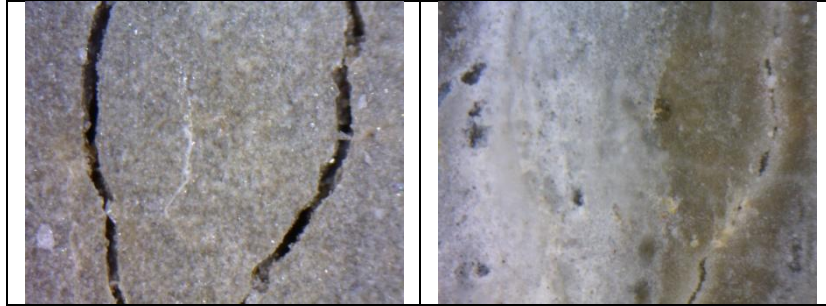
APPENDICE B3

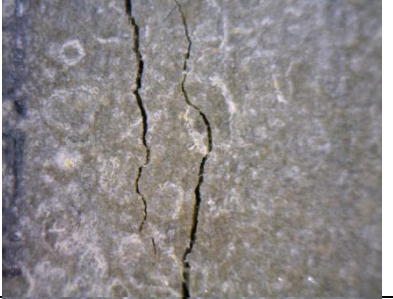





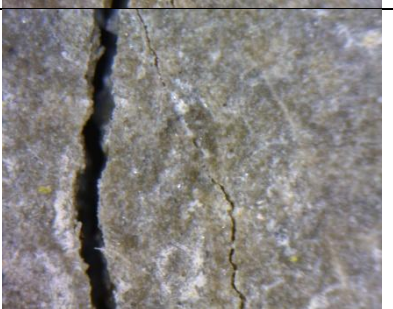

A seguire vengono mostrate le foto al microscopio estratte dell'indagine condotte per provini con fibre ortogonali e dopo 3 mesi di esposizione

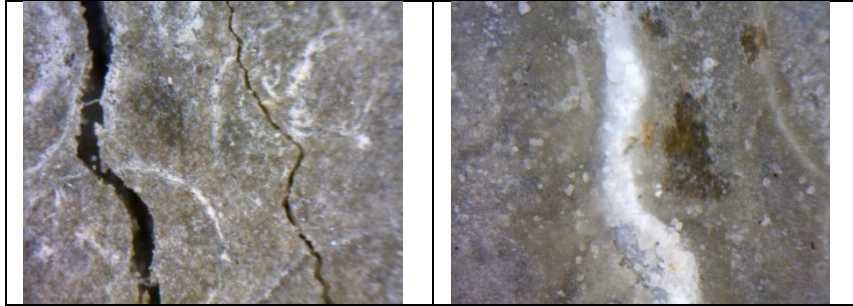
A-1-2-T	WATER
Precrack 20/11/13	3 months curing 06/03/14
	
	
	
	







A-1-3-T	WATER
PRECRACK 20/11/13	3 MONTHS CURING

	06/03/14
	
	
	
	
	

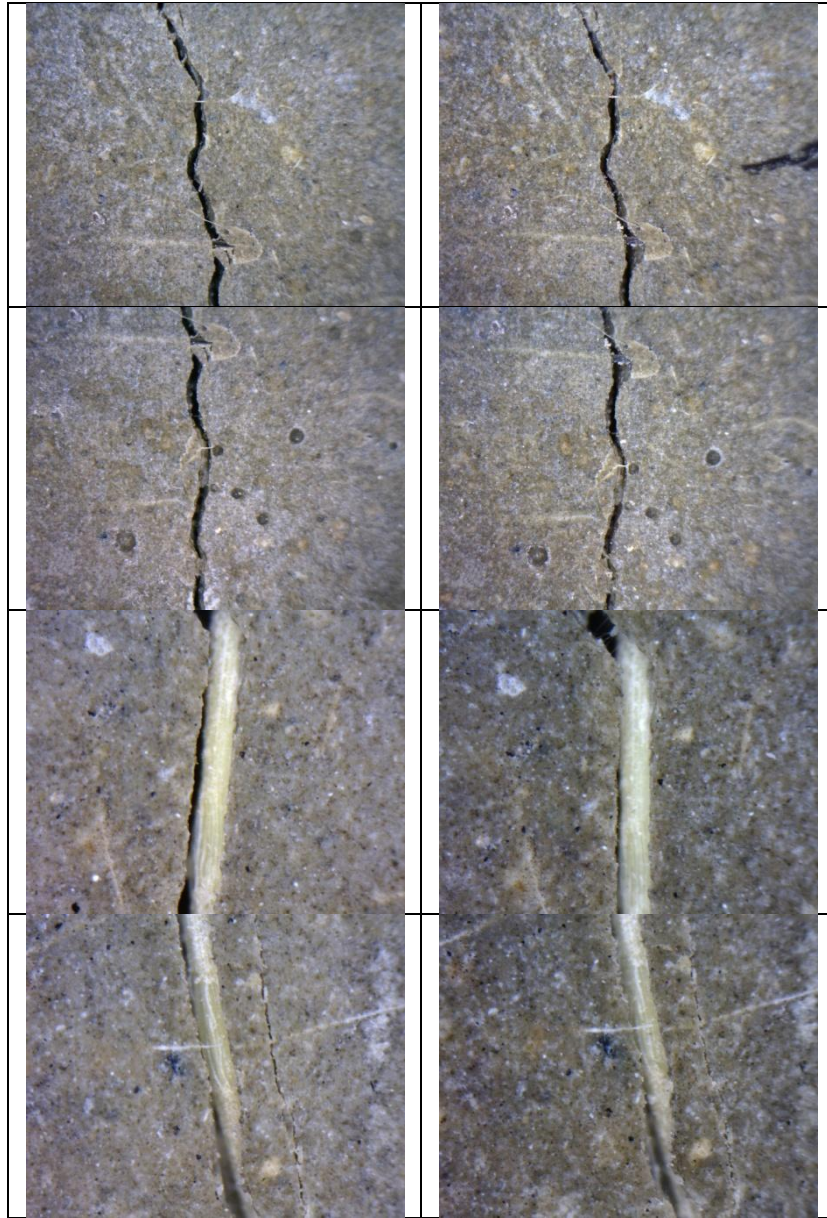




A-1-4-T	WATER
PRECRACK 20/11/13	3 MONTHS CURING 06/03/14
	
	
	
	

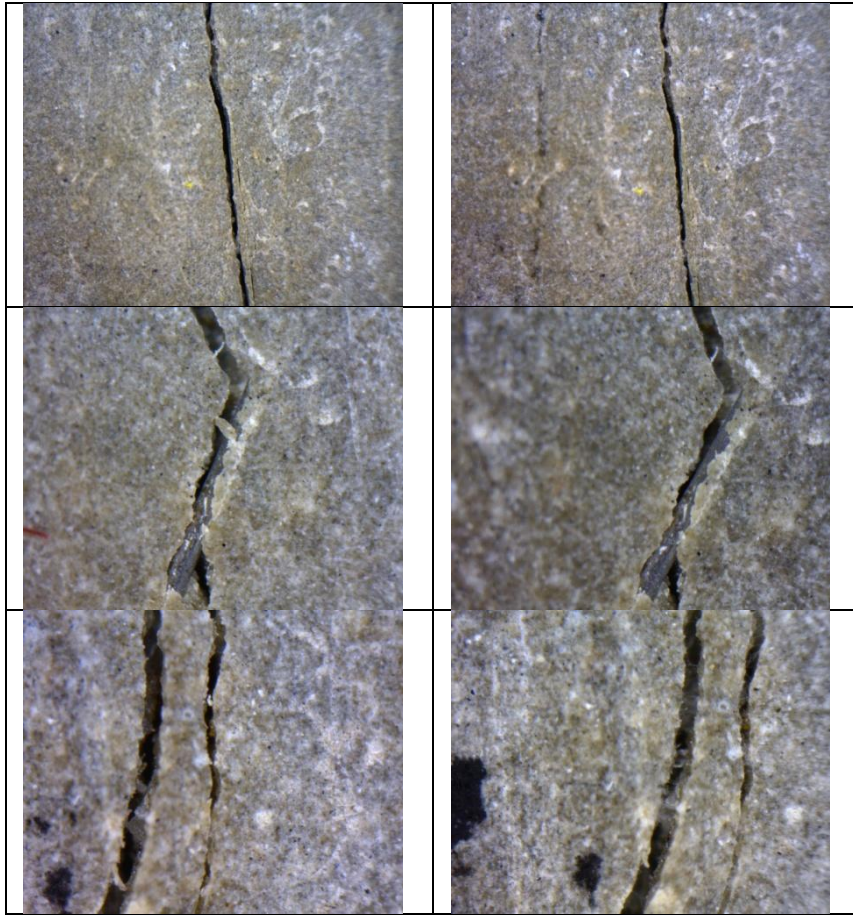






A-1-5-T	90%
PRECRACK 20/11/13	3 months curing 06/03/14
	
	
	

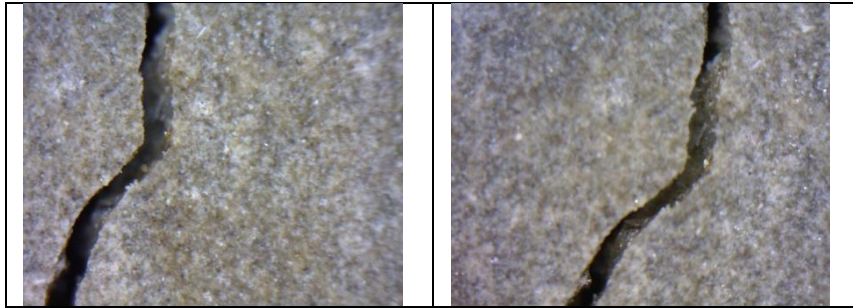
A-2-1-T	90%
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 03/03/14





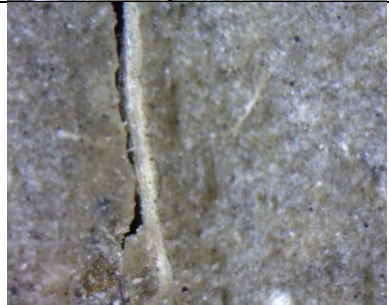
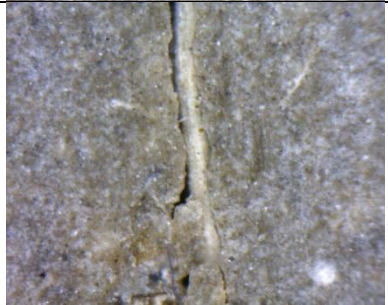




A-2-2-T	90%
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 03/03/14
	

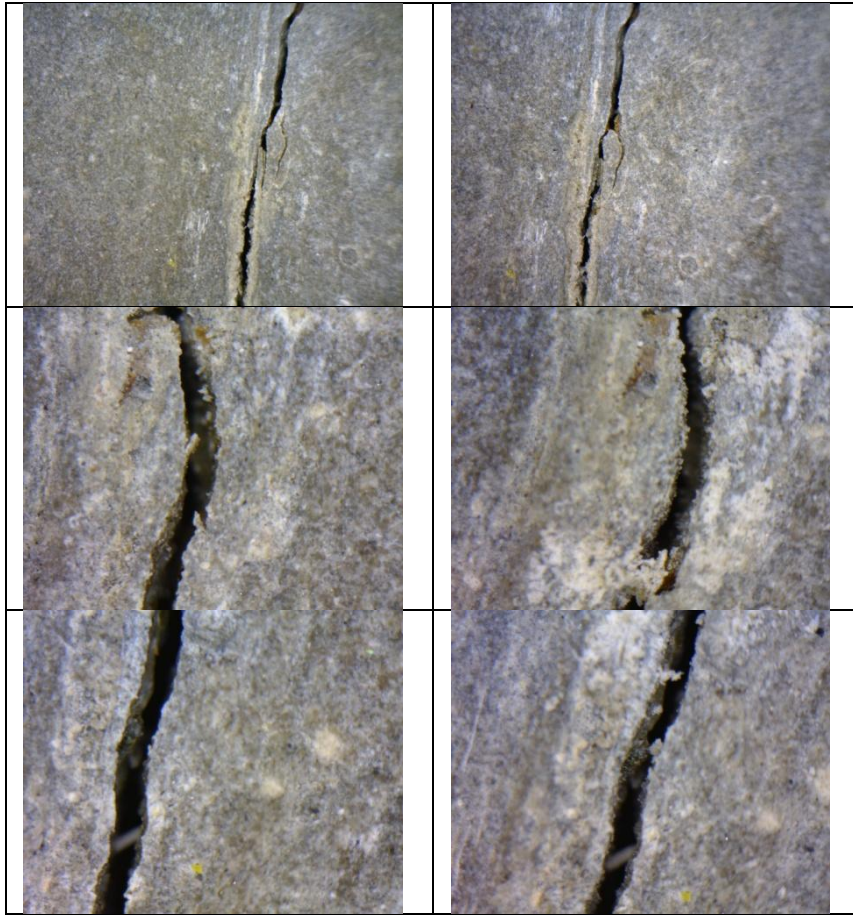


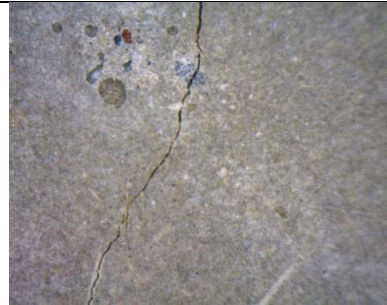



A-2-3-T	50%
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 03/03/14
	
	

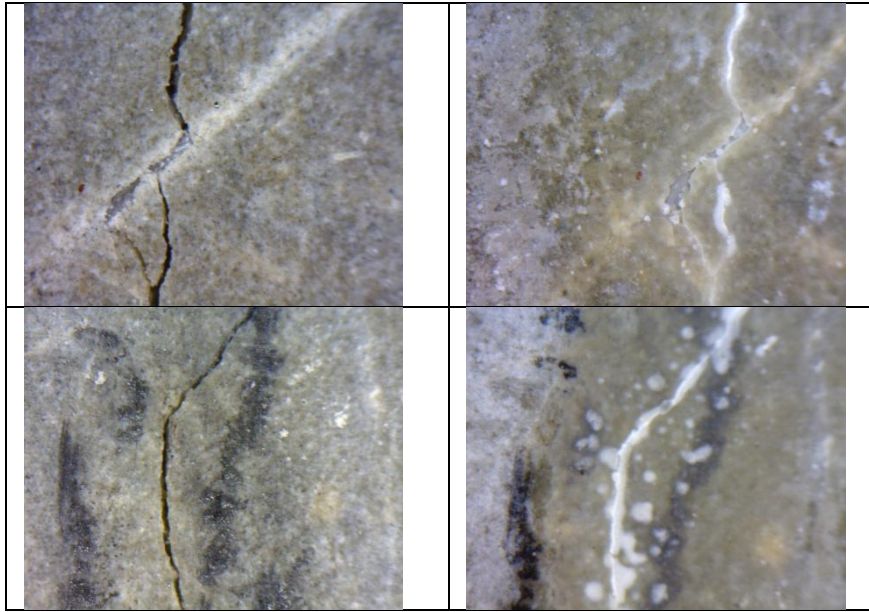







A-2-4-T	50%
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 06/03/14
	
	
	

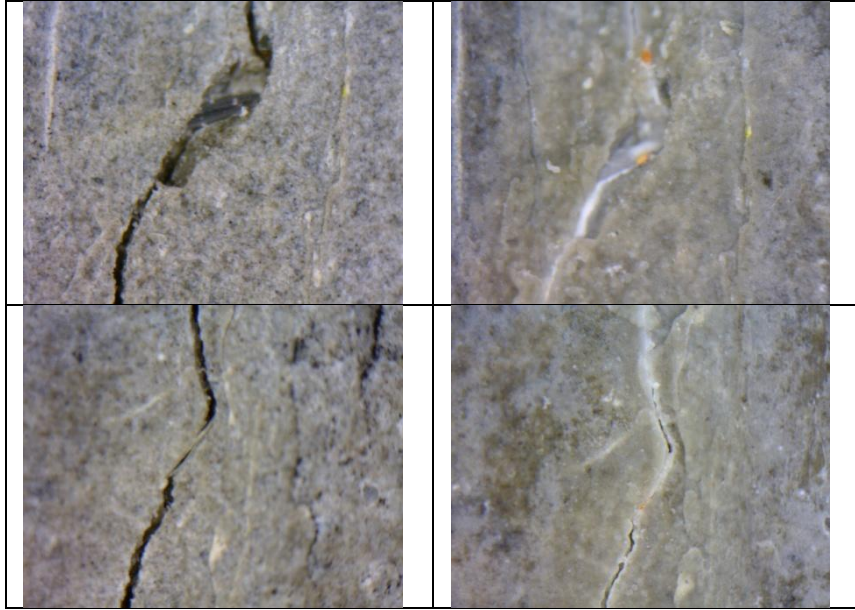
A-2-5-T	50%
PRECRACK 27/11/13	3 MONTHS CURING 03/03/14
	







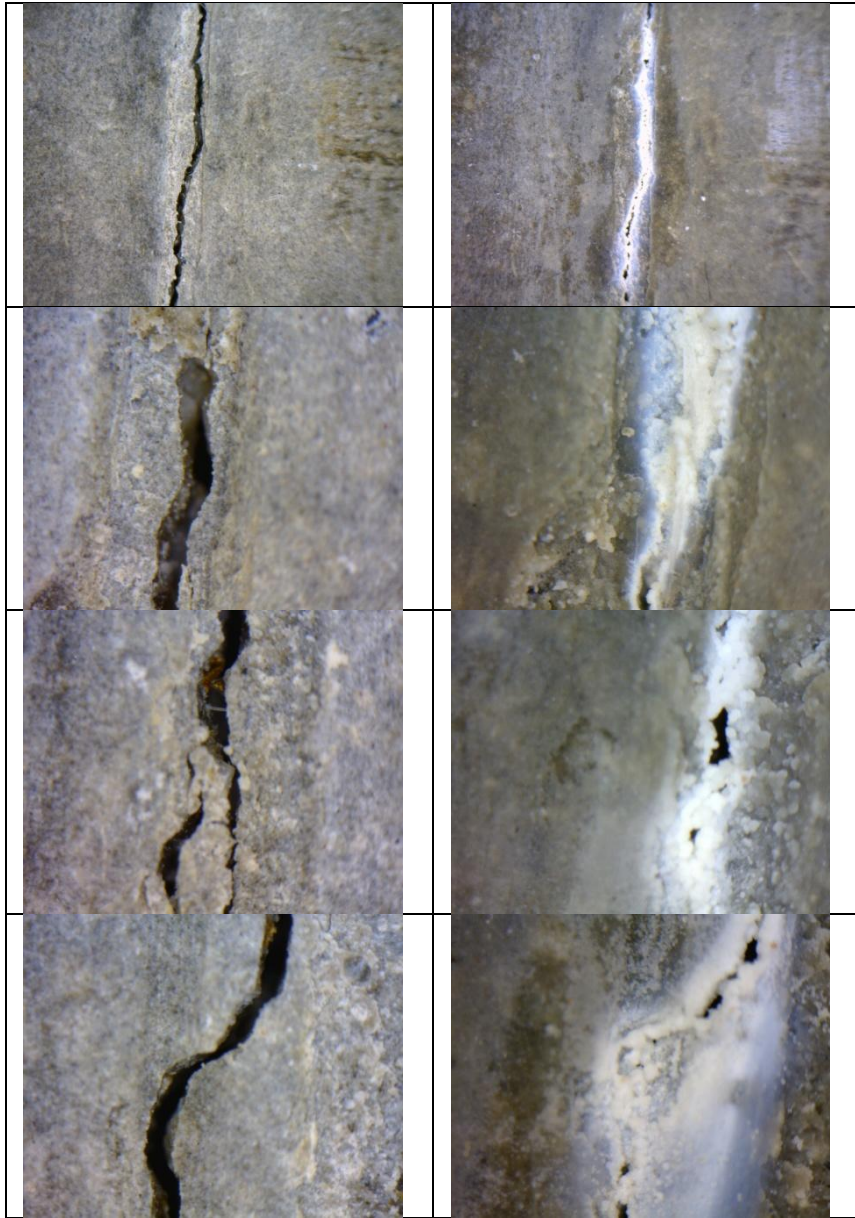
A-3-1-T	W&D
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 06/03/14
	
	



A-3-2-T	W&D
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 07/03/14
	
	
	













A-3-3-T	W&D
PRECRACK 29/11/13	3 MONTHS CURING 06/03/14
	
	













APPENDICE B4





A seguire un estratto delle foto al microscopio riguardanti i provini con fibre perpendicolari con 6 mesi di stagionatura

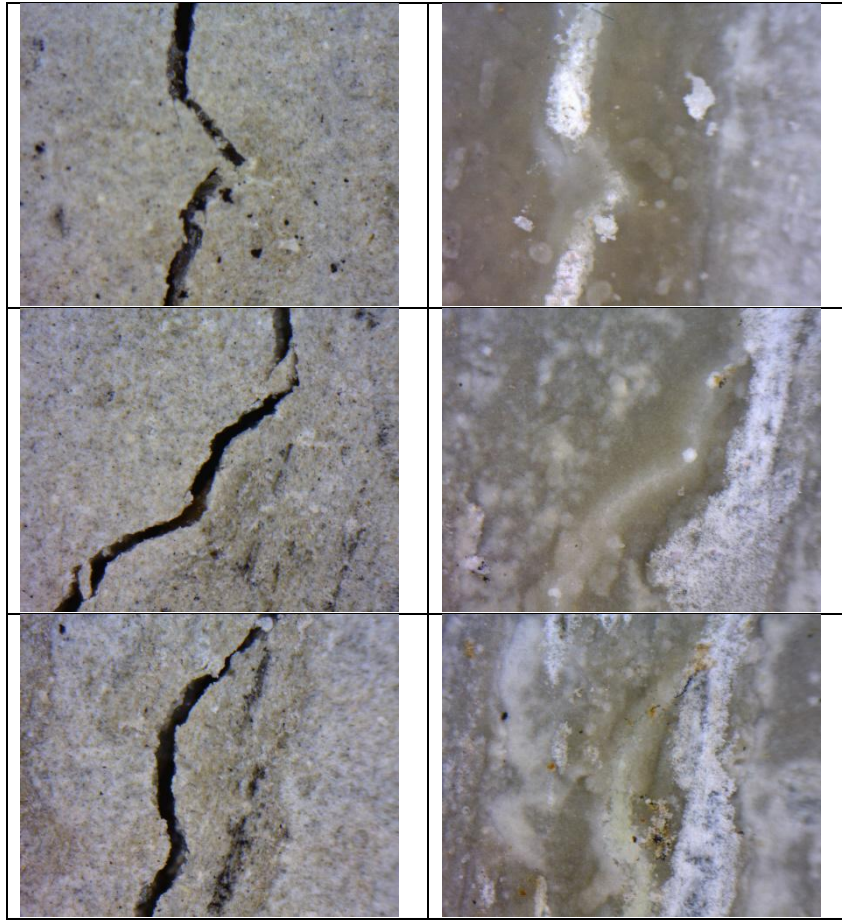
A-3-4-T	WATER 6 M
PRECRACK 29/11/13	FAILURE CRACK 28/05/14
	
	
	
	
	


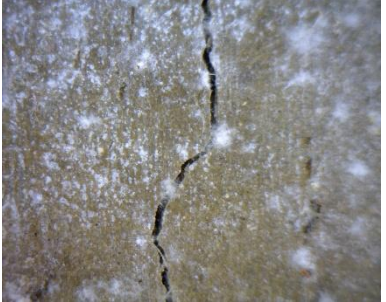


A-3-5-T	WATER
---------	-------

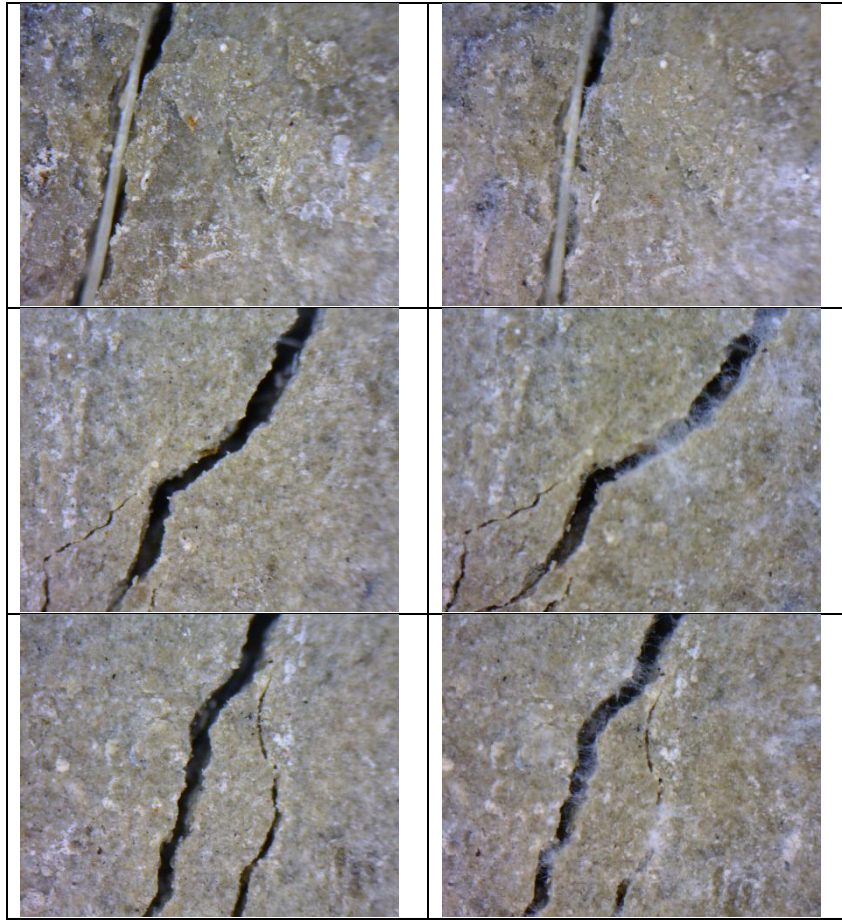
PRECRACK 29/11/14	FAILURE 26/05/14
	
	
	
	
	







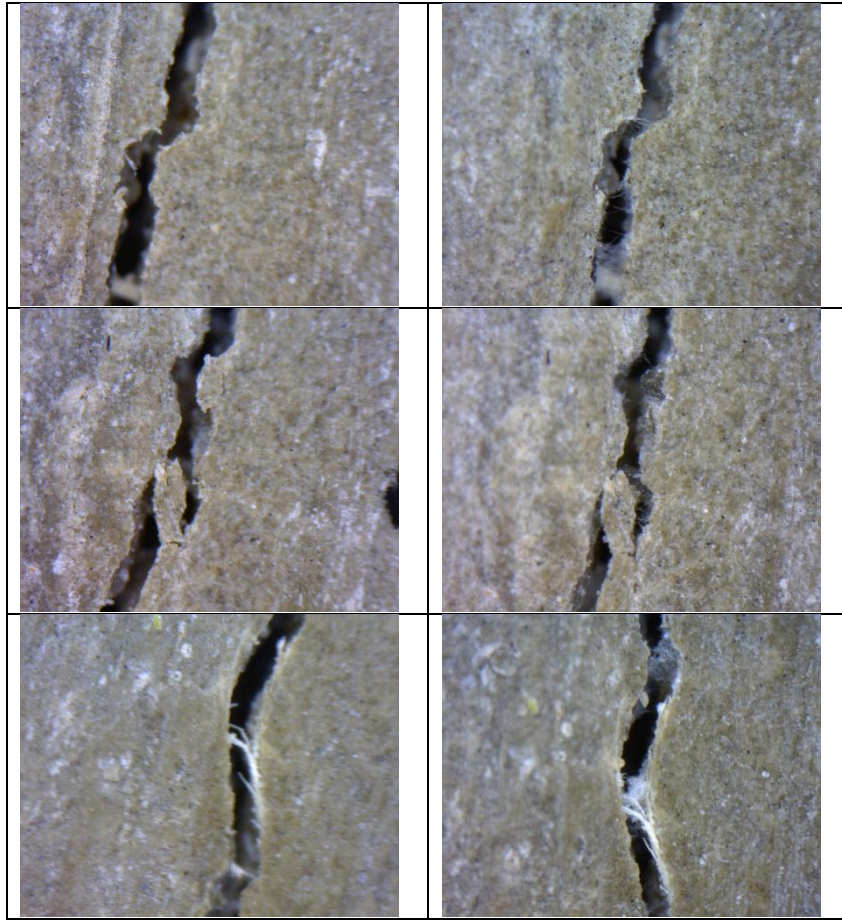
E-1-1-T	WATER
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 26/05/14
	
	







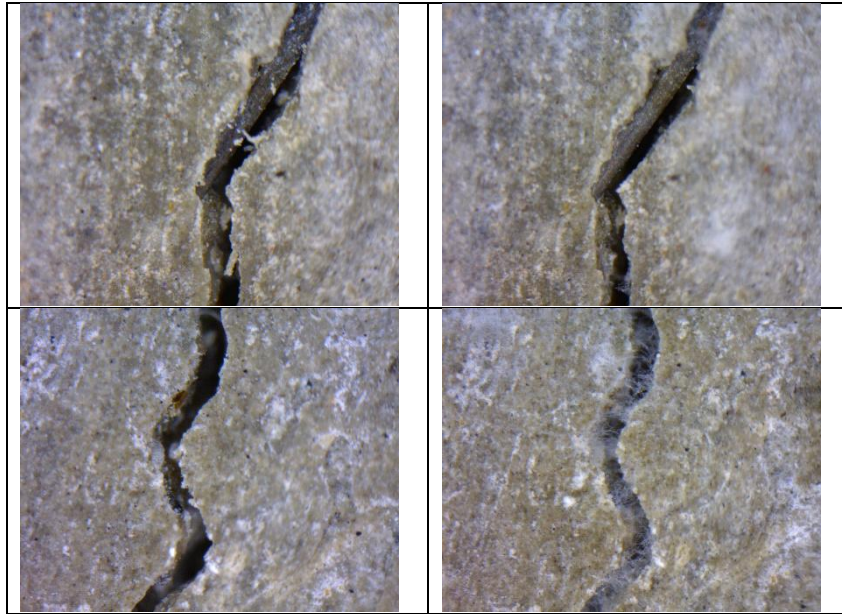
E-1-2-T	90%
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 29/05/14
	
	









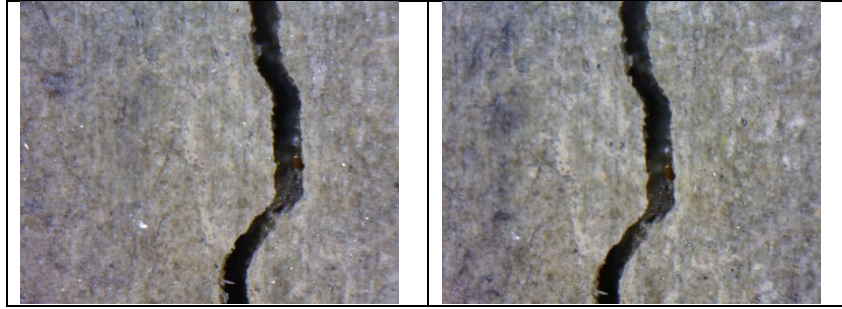
E-1-3-T	90%
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 29/05/14
	
	



















E-1-4-T	90%
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 28/05/14
	
	





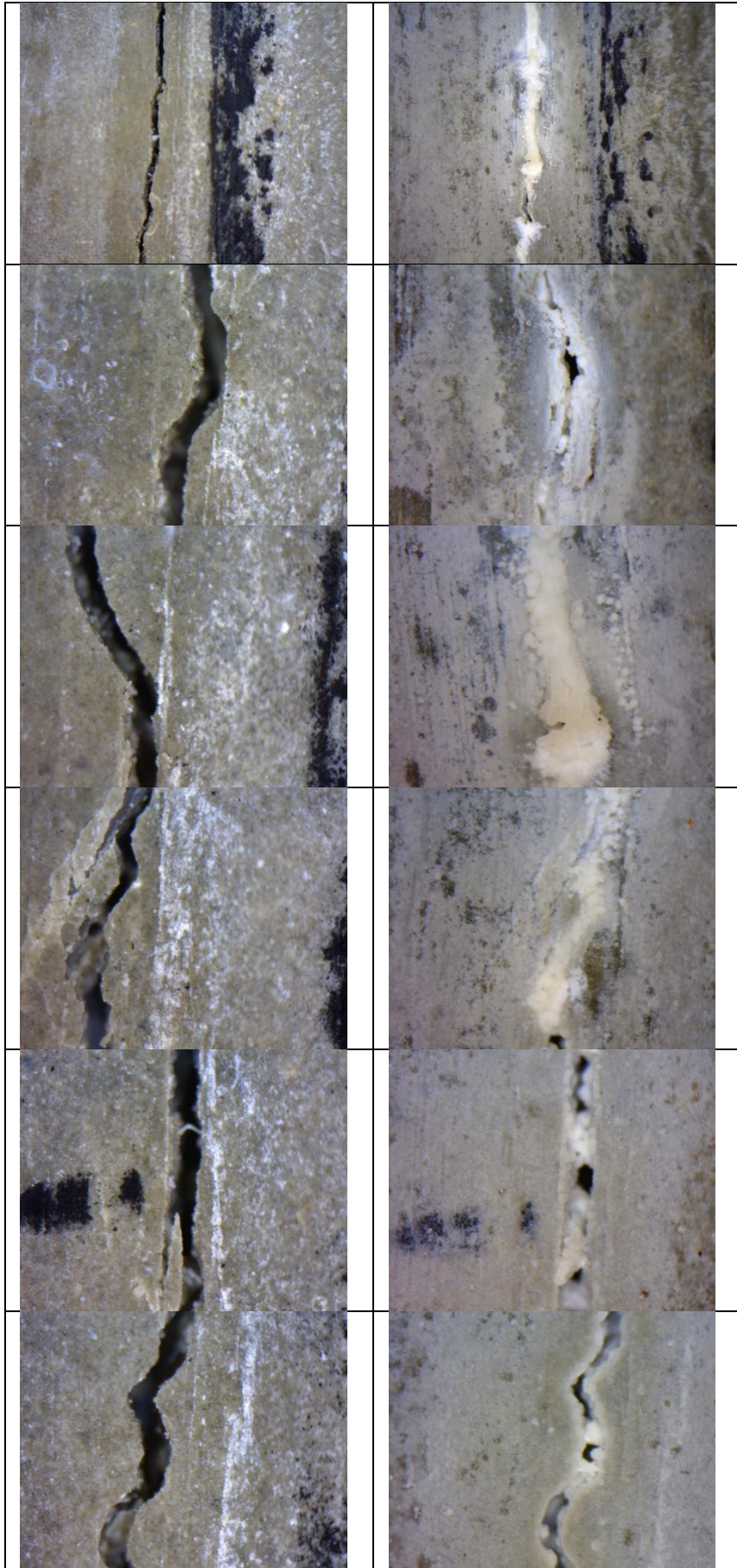
E-1-5-T	50%
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 29/05/14
	
	
	

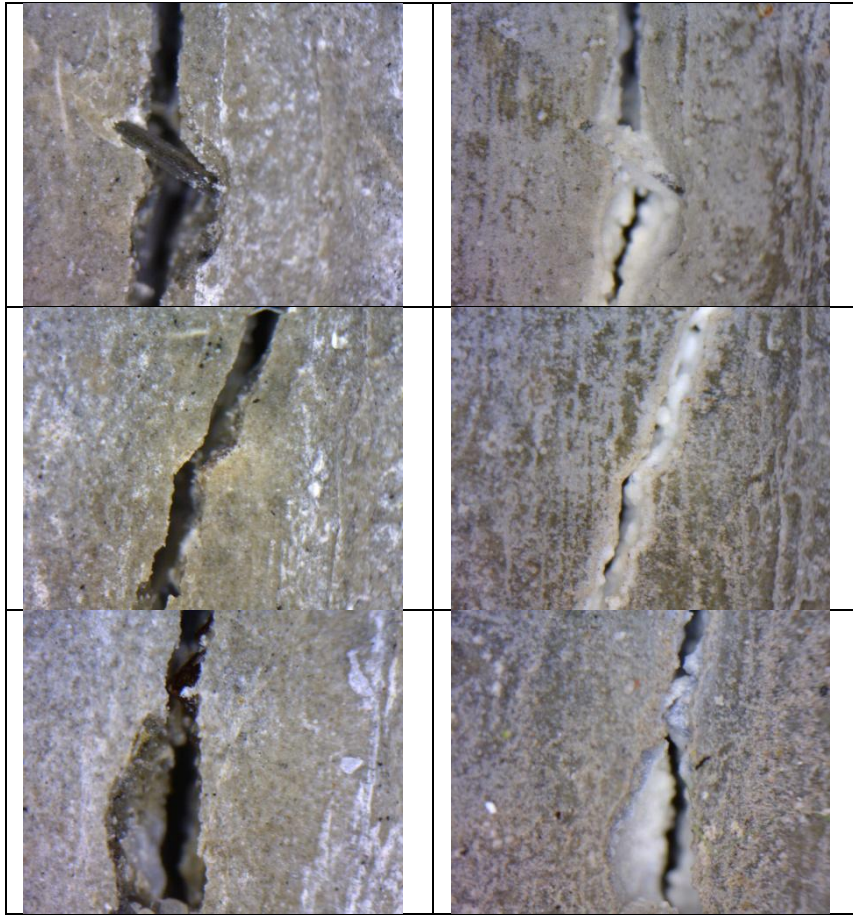






E-2-1-T	50%
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 29/05/14
	
	
	
	

E-2-2-T	50%
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 28/05/14
	
	
	
	

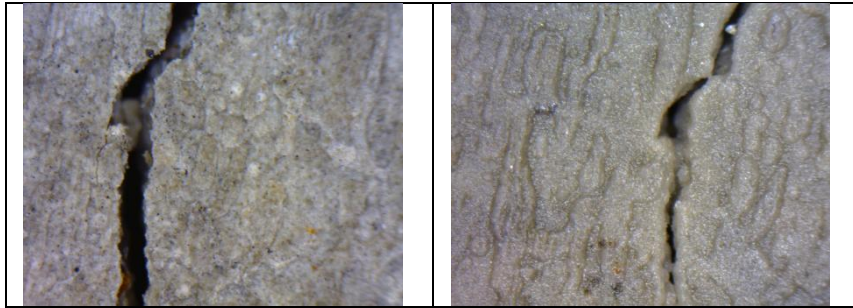
E-2-3-T	W&D
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 29/05/14
	













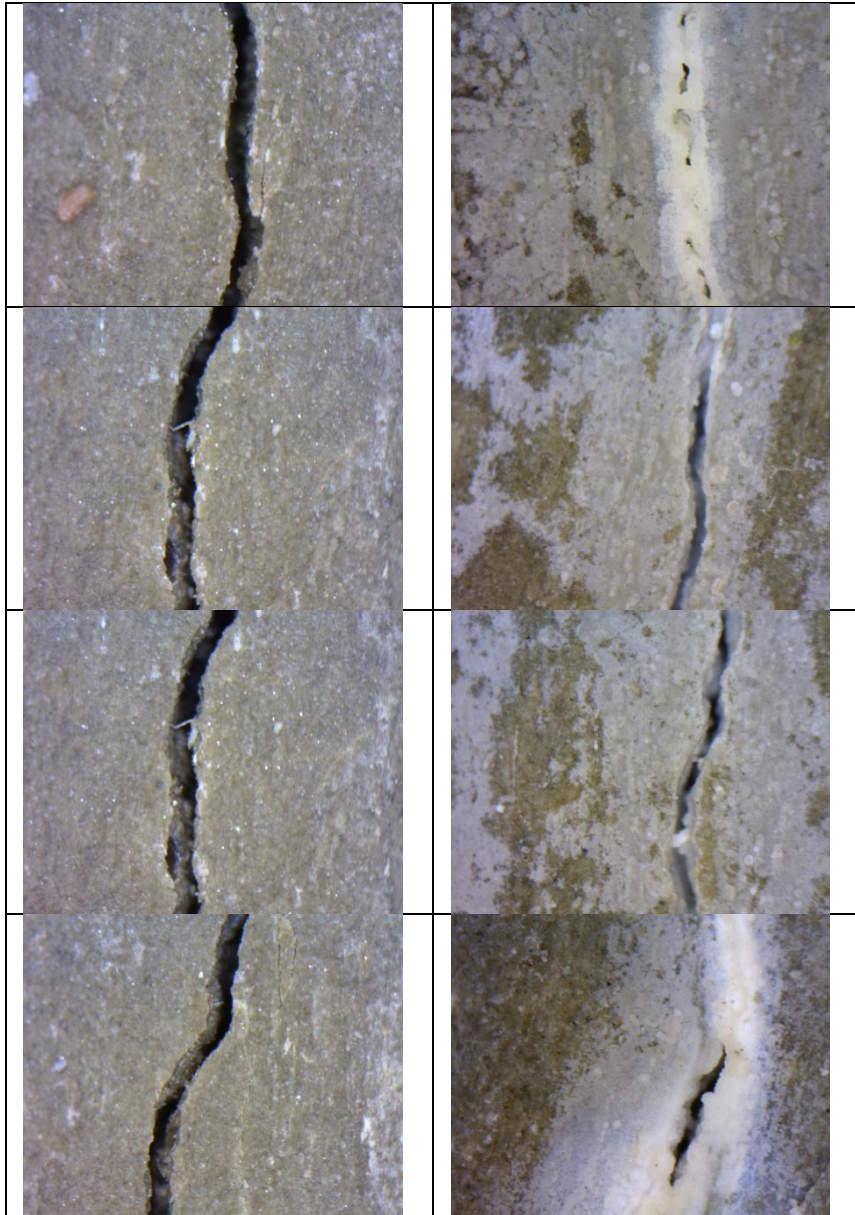
E-2-4-T	W&D
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 28/05/14
	
	





E-2-5-T	W&D
PRECRACK 04/12/13	FAILURE CRACK 29/05/14
	
	
	
	





APPENDICE C1

A seguire vengono riportati i valori ottenuti dalle prove meccaniche per i provini *Steel+Sisal* con fibre perpendicolari

A-1-2-T	PEAK PRE	COD Stress	0,134 mm	K, Load		74,26
			7,474 M Pa	K, Unload		34,95
	UNLOAD	COD Stress	0,523 mm	K, ReLoad		53,48
			4,511 M Pa	1	61,03	%
	Residual	COD Stress	0,397 mm	2	47,13	%
		0,090 M Pa	EmCC		49,62	%
	PEAK POST	COD Stress	0,762 mm			
			6,319 M Pa			

A-1-3-T	PEAK PRE	COD Stress	0,110 mm	K, Load		80,51
			7,705 M Pa	K, Unload		38,83
	UNLOAD	COD Stress	0,500 mm	K, ReLoad		51,24
			4,171 M Pa	1	50,40	%
	Residual	COD Stress	0,394 mm	2	29,78	%
		0,075 M Pa	EmCC		53,14	%
	PEAK POST	COD Stress	0,856 mm			
			5,952 M Pa			

A-1-4-T	PEAK PRE	COD Stress	0,129 mm	K, Load		74,57
			7,789 M Pa	K, Unload		34,27
	UNLOAD	COD Stress	0,502 mm	K, ReLoad		42,92
			3,393 M Pa	1	36,46	%
	Residual	COD Stress	0,406 mm	2	21,47	%
		0,103 M Pa	EmCC		56,11	%
	PEAK POST	COD Stress	0,788 mm			
			4,996 M Pa			

A-1-5-T	PEAK PRE	COD Stress	0,086 mm	K, Load		111,49
			7,253 M Pa	K, Unload		40,64
	UNLOAD	COD Stress	0,501 mm	K, ReLoad		38,07
			3,074 M Pa	1	26,88	%
	Residual	COD Stress	0,427 mm	2	-3,63	%
		0,067 M Pa	EmCC		6,09	%
	PEAK POST	COD Stress	0,968 mm			
			4,197 M Pa			

A-2-1-T	PEAK PRE	COD Stress	0,115 mm 7,375 M Pa	K, Load	97,76
	UNLOAD	COD Stress	0,508 mm 6,120 M Pa	K, Unload	52,66
	Residual	COD Stress	0,393 mm 0,064 M Pa	K, ReLoad	63,20
	PEAK POST	COD Stress	0,777 mm 7,268 M Pa	1	91,48 %
				2	23,37 %
				EmCC	10,47 %

A-2-2-T	PEAK PRE	COD Stress	0,112 mm 7,202 M Pa	K, Load	97,49
	UNLOAD	COD Stress	0,493 mm 5,933 M Pa	K, Unload	45,82
	Residual	COD Stress	0,364 mm 0,022 M Pa	K, ReLoad	49,48
	PEAK POST	COD Stress	0,719 mm 6,527 M Pa	1	46,82 %
				2	7,08 %
				EmCC	7,46 %

A-2-3-T	PEAK PRE	COD Stress	0,134 mm 7,267 M Pa	K, Load	88,93
	UNLOAD	COD Stress	0,498 mm 5,146 M Pa	K, Unload	40,55
	Residual	COD Stress	0,372 mm 0,057 M Pa	K, ReLoad	39,83
	PEAK POST	COD Stress	0,897 mm 5,260 M Pa	1	5,38 %
				2	-1,49 %
				EmCC	8,66 %

A-2-4-T	PEAK PRE	COD Stress	0,146 mm 5,583 M Pa	K, Load	65,05
	UNLOAD	COD Stress	0,498 mm 4,177 M Pa	K, Unload	31,27
	Residual	COD Stress	0,367 mm 0,064 M Pa	K, ReLoad	32,51
	PEAK POST	COD Stress	0,815 mm 4,263 M Pa	1	6,09 %
				2	3,64 %
				EmCC	4,09 %

A-2-5-T	PEAK PRE	COD Stress	0,106 mm 6,956 M Pa	K, Load	83,08
	UNLOAD	COD Stress	0,494 mm 5,208 M Pa	K, Unload	41,17
	Residual	COD Stress	0,370 mm 0,103 M Pa	K, ReLoad	38,89
	PEAK POST	COD Stress	0,805 mm 4,908 M Pa	1	-17,11 %
				2	-5,43 %
				EmCC	5,61 %

A-3-2-T	PEAK PRE	COD Stress	0,308 mm 7,524 M Pa	K, Load	77,76
	UNLOAD	COD Stress	0,509 mm 6,940 M Pa	K, Unload	37,36
	Residual	COD Stress	0,325 mm 0,083 M Pa	K, ReLoad	47,90
	PEAK POST	COD Stress	0,730 mm 8,808 M Pa	1	319,64 %
				2	26,08 %
				EmCC	62,87 %

A-3-3-T	PEAK PRE	COD Stress	0,108 mm 7,071 M Pa	K, Load	78,70
	UNLOAD	COD Stress	0,501 mm 6,290 M Pa	K, Unload	48,65
	Residual	COD Stress	0,373 mm 0,062 M Pa	K, ReLoad	61,38
	PEAK POST	COD Stress	0,732 mm 8,487 M Pa	1	281,33 %
				2	42,36 %
				EmCC	52,27 %

A-3-4-T	PEAK PRE	COD Stress	0,277 mm 8,196 M Pa	K, Load	83,14
	UNLOAD	COD Stress	0,559 mm 6,769 M Pa	K, Unload	35,35
	Residual	COD Stress	0,369 mm 0,052 M Pa	K, ReLoad	54,38
	PEAK POST	COD Stress	0,976 mm 7,404 M Pa	1	44,53 %
				2	39,83 %
				EmCC	100,00 %

A-3-5-T	PEAK PRE	COD Stress	0,549 mm	K, Load		76,71
			6,819 M Pa	K, Unload		47,67
	UNLOAD	COD Stress	0,549 mm	K, ReLoad		58,96
			6,819 M Pa	1	#DIV/0!	%
	Residual	COD Stress	0,409 mm	2	38,88	%
		0,146 M Pa	EmCC		100,00	%
	PEAK POST	COD Stress	0,805 mm			
			7,121 M Pa			

E-1-1-T	PEAK PRE	COD Stress	0,364 mm	K, Load		90,42
			6,467 M Pa	K, Unload		38,39
	UNLOAD	COD Stress	0,493 mm	K, ReLoad		58,51
			5,916 M Pa	1	200,96	%
	Residual	COD Stress	0,340 mm	2	38,66	%
		0,042 M Pa	ECC		100,00	%
	PEAK POST	COD Stress	0,649 mm			
			7,023 M Pa			

E-1-2-T	PEAK PRE	COD Stress	0,139 mm	K, Load		79,83
			7,381 M Pa	K, Unload		41,29
	UNLOAD	COD Stress	0,497 mm	K, ReLoad		50,58
			5,073 M Pa	1	41,19	%
	Residual	COD Stress	0,374 mm	2	24,10	%
		0,015 M Pa	ECC		4,32	%
	PEAK POST	COD Stress	0,809 mm			
			6,024 M Pa			

E-1-3-T	PEAK PRE	COD Stress	0,100 mm	K, Load		73,10
			6,613 M Pa	K, Unload		40,64
	UNLOAD	COD Stress	0,501 mm	K, ReLoad		42,14
			4,580 M Pa	1	38,43	%
	Residual	COD Stress	0,389 mm	2	4,62	%
		0,007 M Pa	ECC		4,65	%
	PEAK POST	COD Stress	0,933 mm			
			5,361 M Pa			

E-1-4-T	PEAK PRE	COD Stress	0,126 mm	K, Load		83,89
			6,277 M Pa	K, Unload		32,67
	UNLOAD	COD Stress	0,531 mm	K, ReLoad		28,36
			3,644 M Pa	1	28,57	%
	Residual	COD Stress	0,420 mm	2	-8,43	%
		0,018 M Pa	ECC	5,75	%	
	PEAK POST	COD Stress	1,016 mm			
			4,397 M Pa			

E-1-5-T	PEAK PRE	COD Stress	0,125 mm	K, Load		76,46
			6,036 M Pa	K, Unload		31,69
	UNLOAD	COD Stress	0,515 mm	K, ReLoad		28,08
			3,368 M Pa	1	8,03	%
	Residual	COD Stress	0,409 mm	2	-8,06	%
		0,010 M Pa	ECC	3,30	%	
	PEAK POST	COD Stress	0,837 mm			
			3,583 M Pa			

E-2-1-T	PEAK PRE	COD Stress	0,121 mm	K, Load		89,24
			7,453 M Pa	K, Unload		55,21
	UNLOAD	COD Stress	0,506 mm	K, ReLoad		65,95
			7,343 M Pa	1	680,00	%
	Residual	COD Stress	0,373 mm	2	31,57	%
		0,000 M Pa	ECC	2,99	%	
	PEAK POST	COD Stress	1,035 mm			
			8,090 M Pa			

E-2-2-T	PEAK PRE	COD Stress	0,103 mm	K, Load		114,13
			6,540 M Pa	K, Unload		42,33
	UNLOAD	COD Stress	0,510 mm	K, ReLoad		38,42
			4,394 M Pa	1	21,28	%
	Residual	COD Stress	0,407 mm	2	-5,45	%
		0,034 M Pa				
	PEAK POST	COD	1,077 mm			

	POST	Stress	4,851 M Pa	ECC	7,77	%
--	------	--------	------------	-----	------	---

E-2-3-T	PEAK	COD	0,124 mm	K, Load		66,42
	PRE	Stress	7,228 M Pa	K, Unload		33,85
	UNLOAD	COD	0,613 mm	K, ReLoad		45,96
		Stress	3,843 M Pa	1	37,50	%
	Residual	COD	0,500 mm	2	37,15	%
		Stress	0,034 M Pa	ECC	62,28	%
	PEAK	COD	0,843 mm			
	POST	Stress	5,112 M Pa			

E-2-4-T	PEAK	COD	0,105 mm	K, Load		65,47
	PRE	Stress	6,233 M Pa	K, Unload		32,29
	UNLOAD	COD	0,499 mm	K, ReLoad		51,01
		Stress	3,520 M Pa	1	30,16	%
	Residual	COD	0,392 mm	2	56,40	%
		Stress	0,065 M Pa	ECC	68,38	%
	PEAK	COD	0,798 mm			
	POST	Stress	4,338 M Pa			

E-2-5-T	PEAK	COD	0,100 mm	K, Load		73,10
	PRE	Stress	6,017 M Pa	K, Unload		39,11
	UNLOAD	COD	0,474 mm	K, ReLoad		62,58
		Stress	4,088 M Pa	1	60,42	%
	Residual	COD	0,370 mm	2	69,07	%
		Stress	0,040 M Pa	ECC	73,73	%
	PEAK	COD	0,687 mm			
	POST	Stress	5,253 M Pa			

E-3-1-T	PEAK	COD	0,196 mm	K, Load		75,81
	PRE	Stress	6,772 M Pa	K, Unload		31,23
	UNLOAD	COD	0,524 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	6,380 M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD	0,321 mm			

	Stress	0,039 M Pa		
	PEAK COD	#N/A mm	2	#N/A %
	POST Stress	#N/A M Pa		

E-3-2-T	PEAK COD	0,146 mm	K, Load		83,57
	PRE Stress	6,852 M Pa	K, Unload		37,53
	UNLOAD COD	0,516 mm	K, ReLoad		#N/A
	Stress	5,414 M Pa	1	#N/A	%
	Residual COD	0,373 mm	2	#N/A	%
	Stress	0,047 M Pa			
	PEAK COD	#N/A mm			
	POST Stress	#N/A M Pa			

E-3-3-T	PEAK COD	0,133 mm	K, Load		83,85
	PRE Stress	7,037 M Pa	K, Unload		42,84
	UNLOAD COD	0,498 mm	K, ReLoad		#N/A
	Stress	5,169 M Pa	1	#N/A	%
	Residual COD	0,378 mm	2	#N/A	%
	Stress	0,028 M Pa			
	PEAK COD	#N/A mm			
	POST Stress	#N/A M Pa			

E-3-4-T	PEAK COD	0,134 mm	K, Load		78,73
	PRE Stress	7,120 M Pa	K, Unload		34,34
	UNLOAD COD	0,516 mm	K, ReLoad		#N/A
	Stress	4,577 M Pa	1	#N/A	%
	Residual COD	0,384 mm	2	#N/A	%
	Stress	0,028 M Pa			
	PEAK COD	#N/A mm			
	POST Stress	#N/A M Pa			

E-3-5-T	PEAK COD	0,157 mm	K, Load		76,71
	PRE Stress	6,869 M Pa	K, Unload		40,65
	UNLOAD COD	0,481 mm	K, ReLoad		#N/A

	Stress		4,488	M Pa
	Residual	COD	0,372	mm
		Stress	0,057	M Pa
	PEAK POST	COD	#N/A	mm
Stress		#N/A	M Pa	

1	#N/A	%
2	#N/A	%

E-4-1-T	PEAK PRE	COD	0,162	mm
		Stress	7,454	M Pa
	UNLOAD	COD	0,488	mm
		Stress	7,454	M Pa
	Residual	COD	0,319	mm
		Stress	0,052	M Pa
PEAK POST	COD	#N/A	mm	
	Stress	#N/A	M Pa	

K, Load		96,85
K, Unload		43,80
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

E-4-2-T	PEAK PRE	COD	0,113	mm
		Stress	6,918	M Pa
	UNLOAD	COD	0,479	mm
		Stress	4,229	M Pa
	Residual	COD	0,379	mm
		Stress	0,064	M Pa
PEAK POST	COD	#N/A	mm	
	Stress	#N/A	M Pa	

K, Load		86,82
K, Unload		41,65
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

E-4-3-T	PEAK PRE	COD	0,131	mm
		Stress	6,336	M Pa
	UNLOAD	COD	0,458	mm
		Stress	3,618	M Pa
	Residual	COD	0,328	mm
		Stress	0,099	M Pa
PEAK POST	COD	#N/A	mm	
	Stress	#N/A	M Pa	

K, Load		68,59
K, Unload		26,97
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

E-4-4-T	PEAK	COD	0,140	mm
---------	------	-----	-------	----

K, Load		82,50
---------	--	-------

	PRE	Stress	6,408	M Pa
	UNLOAD	COD	0,487	mm
		Stress	5,013	M Pa
	Residual	COD	0,364	mm
		Stress	0,225	M Pa
PEAK	COD	#N/A	mm	
POST	Stress	#N/A	M Pa	

K, Unload		39,09
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

E-4-5-T	PEAK	COD	0,149	mm
	PRE	Stress	7,177	M Pa
	UNLOAD	COD	0,498	mm
		Stress	4,810	M Pa
	Residual	COD	0,356	mm
Stress		0,010	M Pa	
PEAK	COD	#N/A	mm	
POST	Stress	#N/A	M Pa	

K, Load		74,28
K, Unload		33,93
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-1-T	PEAK	COD	0,165	mm
	PRE	Stress	13,820	M Pa
	UNLOAD	COD	0,494	mm
		Stress	7,914	M Pa
	Residual	COD	0,366	mm
Stress		0,017	M Pa	
PEAK	COD	#N/A	mm	
POST	Stress	#N/A	M Pa	

K, Load		85,40
K, Unload		61,69
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-2-T	PEAK	COD	0,194	mm
	PRE	Stress	13,685	M Pa
	UNLOAD	COD	0,496	mm
		Stress	5,878	M Pa
	Residual	COD	0,373	mm
Stress		0,076	M Pa	
PEAK	COD	#N/A	mm	
POST	Stress	#N/A	M Pa	

K, Load		73,41
K, Unload		47,17
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-3-T	PEAK PRE	COD Stress	0,158 mm
			13,932 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,495 mm
			4,799 M Pa
	Residual	COD Stress	0,402 mm
		0,045 M Pa	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm
			#N/A M Pa

K, Load		91,31
K, Unload		50,84
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-4-T	PEAK PRE	COD Stress	0,165 mm
			12,251 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,503 mm
			3,366 M Pa
	Residual	COD Stress	0,414 mm
		0,024 M Pa	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm
			#N/A M Pa

K, Load		76,46
K, Unload		37,75
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-5-T	PEAK PRE	COD Stress	0,143 mm
			12,017 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,494 mm
			3,720 M Pa
	Residual	COD Stress	0,415 mm
		0,009 M Pa	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm
			#N/A M Pa

K, Load		84,69
K, Unload		46,97
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-6-T	PEAK PRE	COD Stress	0,237 mm
			12,602 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,498 mm
			7,905 M Pa
	Residual	COD Stress	0,309 mm
		0,076 M Pa	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm
			#N/A M Pa

K, Load		56,38
K, Unload		41,42
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-7-T	PEAK PRE	COD Stress	0,173 mm
			12,642 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,498 mm
			6,314 M Pa
	Residual	COD Stress	0,378 mm
		0,087 M Pa	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm
			#N/A M Pa

K, Load		76,41
K, Unload		52,11
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-8-T	PEAK PRE	COD Stress	0,205 mm
			12,695 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,481 mm
			7,468 M Pa
	Residual	COD Stress	0,318 mm
		0,044 M Pa	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm
			#N/A M Pa

K, Load		62,76
K, Unload		45,55
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-9-T	PEAK PRE	COD Stress	0,147 mm
			12,069 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,501 mm
			7,341 M Pa
	Residual	COD Stress	0,370 mm
		0,030 M Pa	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm
			#N/A M Pa

K, Load		84,51
K, Unload		55,81
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-1-10-T	PEAK PRE	COD Stress	0,182 mm
			15,180 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,497 mm
			9,464 M Pa
	Residual	COD Stress	0,343 mm
		0,051 M Pa	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm

K, Load		89,72
K, Unload		60,92
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

	POST	Stress	#N/A	M Pa
--	------	--------	------	------

F-2-1-T	PEAK	COD	0,152	mm
	PRE	Stress	13,510	M Pa
	UNLOAD	COD	0,551	mm
		Stress	8,592	M Pa
	Residual	COD	0,419	mm
	Stress	0,050	M Pa	
	PEAK	COD	#N/A	mm
	POST	Stress	#N/A	M Pa

K, Load		91,33
K, Unload		64,47
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-2-2-T	PEAK	COD	0,149	mm
	PRE	Stress	11,812	M Pa
	UNLOAD	COD	0,505	mm
		Stress	4,640	M Pa
	Residual	COD	0,407	mm
	Stress	0,030	M Pa	
	PEAK	COD	#N/A	mm
	POST	Stress	#N/A	M Pa

K, Load		83,33
K, Unload		47,29
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-2-3-T	PEAK	COD	0,138	mm
	PRE	Stress	10,019	M Pa
	UNLOAD	COD	0,501	mm
		Stress	3,286	M Pa
	Residual	COD	0,410	mm
	Stress	0,075	M Pa	
	PEAK	COD	#N/A	mm
	POST	Stress	#N/A	M Pa

K, Load		75,42
K, Unload		35,49
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-2-4-T	PEAK	COD	0,135	mm
	PRE	Stress	10,528	M Pa
	UNLOAD	COD	0,501	mm
		Stress	2,432	M Pa
	Residual	COD	0,417	mm

K, Load		80,17
K, Unload		28,83
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%

	Stress	0,011 M Pa		
	PEAK COD	#N/A mm		2
	POST Stress	#N/A M Pa		#N/A %

F-2-5-T	PEAK COD	0,127 mm		K, Load	91,55
	PRE Stress	10,870 M Pa		K, Unload	42,15
	UNLOAD COD	0,497 mm		K, ReLoad	#N/A
	UNLOAD Stress	3,612 M Pa		1	#N/A %
	Residual COD	0,414 mm		2	#N/A %
	Residual Stress	0,135 M Pa			
	PEAK COD	#N/A mm			
	POST Stress	#N/A M Pa			

F-2-8-T	PEAK COD	0,140 mm		K, Load	76,16
	PRE Stress	10,224 M Pa		K, Unload	0,13
	UNLOAD COD	0,000 mm		K, ReLoad	#N/A
	UNLOAD Stress	0,000 M Pa		1	#N/A %
	Residual COD	0,368 mm		2	#N/A %
	Residual Stress	0,048 M Pa			
	PEAK COD	#N/A mm			
	POST Stress	#N/A M Pa			

F-2-9-T	PEAK COD	0,139 mm		K, Load	84,15
	PRE Stress	11,252 M Pa		K, Unload	55,29
	UNLOAD COD	0,499 mm		K, ReLoad	#N/A
	UNLOAD Stress	7,697 M Pa		1	#N/A %
	Residual COD	0,363 mm		2	#N/A %
	Residual Stress	0,150 M Pa			
	PEAK COD	#N/A mm			
	POST Stress	#N/A M Pa			

F-2-10-T	PEAK COD	0,157 mm		K, Load	90,03
	PRE Stress	13,338 M Pa		K, Unload	60,76
	UNLOAD COD	0,500 mm		K, ReLoad	#N/A

	Stress		9,818 M Pa
	Residual	COD	0,339 mm
		Stress	0,036 M Pa
	PEAK POST	COD	#N/A mm
Stress		#N/A M Pa	

1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-3-1-T	PEAK PRE	COD	0,140 mm
		Stress	11,362 M Pa
	UNLOAD	COD	0,501 mm
		Stress	7,890 M Pa
	Residual	COD	0,367 mm
		Stress	0,034 M Pa
PEAK POST	COD	#N/A mm	
	Stress	#N/A M Pa	

K, Load		81,55
K, Unload		58,62
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-3-2-T	PEAK PRE	COD	0,143 mm
		Stress	10,787 M Pa
	UNLOAD	COD	0,496 mm
		Stress	5,099 M Pa
	Residual	COD	0,386 mm
		Stress	0,078 M Pa
PEAK POST	COD	#N/A mm	
	Stress	#N/A M Pa	

K, Load		76,84
K, Unload		45,65
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-3-3-T	PEAK PRE	COD	0,154 mm
		Stress	11,722 M Pa
	UNLOAD	COD	0,501 mm
		Stress	6,226 M Pa
	Residual	COD	0,367 mm
		Stress	0,030 M Pa
PEAK POST	COD	#N/A mm	
	Stress	#N/A M Pa	

K, Load		77,79
K, Unload		46,24
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-3-4-T	PEAK	COD	0,173 mm
---------	------	-----	----------

K, Load		71,40
---------	--	-------

	PRE	Stress	12,041	M Pa
	UNLOAD	COD	0,500	mm
		Stress	5,251	M Pa
	Residual	COD	0,369	mm
		Stress	0,031	M Pa
PEAK POST	COD	#N/A	mm	
		Stress	#N/A	M Pa

K, Unload		40,00
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-3-5-T	PEAK PRE	COD	0,139	mm
		Stress	12,062	M Pa
	UNLOAD	COD	5,005	mm
		Stress	2,618	M Pa
	Residual	COD	4,887	mm
Stress		0,103	M Pa	
PEAK POST	COD	#N/A	mm	
		Stress	#N/A	M Pa

K, Load		88,52
K, Unload		21,32
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-3-7-T	PEAK PRE	COD	0,151	mm
		Stress	12,455	M Pa
	UNLOAD	COD	0,498	mm
		Stress	8,999	M Pa
	Residual	COD	0,353	mm
Stress		0,036	M Pa	
PEAK POST	COD	#N/A	mm	
		Stress	#N/A	M Pa

K, Load		84,15
K, Unload		61,81
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-3-8-T	PEAK PRE	COD	0,159	mm
		Stress	11,555	M Pa
	UNLOAD	COD	0,501	mm
		Stress	7,985	M Pa
	Residual	COD	0,358	mm
Stress		0,050	M Pa	
PEAK POST	COD	#N/A	mm	
		Stress	#N/A	M Pa

K, Load		76,13
K, Unload		55,49
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

F-3-9-T	PEAK PRE	COD Stress	0,154 mm
			10,389 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,500 mm
			8,671 M Pa
	Residual	COD Stress	0,329 mm
		0,053 M Pa	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm
			#N/A M Pa

K, Load		68,86
K, Unload		50,40
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

APPENDICE C2

A seguire vengono riportati i valori dalle prove meccaniche per i provini *Steel+Sisal* con fibre II

A-1-6-II	FIRST CRACK	COD	0,104 mm	K, Load		72,73
		Stress	6,891 M Pa	K, Unload		26,22
	PEAK PRE	COD	0,781 mm	K, ReLoad		46,60
		Stress	8,122 M Pa	1	175,43 %	
	85% Pre	COD	1,814 mm	2	43,81 %	
		Stress	6,900 M Pa	3,1	44,24 %	
	UNLOAD	COD	2,166 mm	3,2	69,65 %	
		Stress	6,477 M Pa	4,1	66,19 %	
	Residual	COD	1,921 mm	5,1	58,68 %	
		Stress	0,066 M Pa	5,2	66,68 %	
	PEAK POST	COD	2,465 mm	5,5	65,84 %	
		Stress	9,363 M Pa	5,6	75,63 %	
85% Post	COD	3,291 mm	6	123,25 %		
	Stress	7,963 M Pa	7	74,94 %		

A-1-7-II	FIRST CRACK	COD	0,120 mm	K, Load		89,43
		Stress	8,698 M Pa	K, Unload		36,72
	PEAK PRE	COD	0,526 mm	K, ReLoad		45,64
		Stress	9,059 M Pa	1	134,11 %	
	85% Pre	COD	1,388 mm	2	16,93 %	
		Stress	7,696 M Pa	3,1	59,66 %	
	UNLOAD	COD	1,887 mm	3,2	81,08 %	
		Stress	6,849 M Pa	4,1	69,55 %	
	Residual	COD	1,703 mm	5,1	60,74 %	
		Stress	0,093 M Pa	5,2	65,66 %	
	PEAK POST	COD	2,130 mm	5,5	91,88 %	
		Stress	9,813 M Pa	5,6	97,30 %	
85% Post	COD	3,052 mm	6	88,79 %		
	Stress	8,336 M Pa	7	112,09 %		

A-1-8-II	FIRST CRACK	COD	0,224 mm	K, Load		90,95
		Stress	8,138 M Pa	K, Unload		32,24
	PEAK PRE	COD	0,470 mm	K, ReLoad		49,39
		Stress	8,590 M Pa	1	197,06 %	
	85% Pre	COD	2,106 mm	2	29,21 %	
		Stress	7,298 M Pa	3,1	154,07 %	
	UNLOAD	COD	2,173 mm	3,2	126,17 %	

	Residual	Stress	7,126 M Pa	4,1	127,18 %
		COD	1,959 mm	5,1	70,75 %
	PEAK POST	Stress	0,226 M Pa	5,2	76,47 %
		COD	2,552 mm	5,5	72,10 %
	85% Post	Stress	10,011 M Pa	5,6	74,63 %
		COD	3,530 mm	6	178,68 %
		Stress	8,504 M Pa	7	55,26 %

A-1-9-II	FIRST CRACK	COD	0,124 mm	K, Load		77,52
		Stress	7,318 M Pa	K, Unload		24,03
	PEAK PRE	COD	1,054 mm	K, ReLoad		37,38
		Stress	8,574 M Pa	1	53,57 %	
	85% Pre	COD	1,990 mm	2	24,95 %	
		Stress	7,288 M Pa	3,1	60,02 %	
	UNLOAD	COD	2,194 mm	3,2	81,21 %	
		Stress	7,189 M Pa	4,1	66,58 %	
	Residual	COD	1,896 mm	5,1	102,37 %	
		Stress	0,040 M Pa	5,2	110,05 %	
	PEAK POST	COD	2,752 mm	5,5	105,23 %	
		Stress	7,931 M Pa	5,6	113,65 %	
	85% Post	COD	4,157 mm	6	67,92 %	
		Stress	6,735 M Pa	7	132,25 %	

A-2-6-II	FIRST CRACK	COD	0,139 mm	K, Load		77,18
		Stress	9,245 M Pa	K, Unload		21,08
	PEAK PRE	COD	2,077 mm	K, ReLoad		25,87
		Stress	11,535 M Pa	1	7,55 %	
	85% Pre	COD	3,081 mm	2	8,53 %	
		Stress	9,788 M Pa	3,1	27,57 %	
	UNLOAD	COD	3,139 mm	3,2	47,66 %	
		Stress	9,696 M Pa	4,1	31,39 %	
	Residual	COD	2,683 mm	5,1	90,22 %	
		Stress	0,093 M Pa	5,2	106,40 %	
	PEAK POST	COD	3,673 mm	5,5	58,81 %	
		Stress	9,835 M Pa	5,6	70,97 %	
	85% Post	COD	4,869 mm	6	61,12 %	
		Stress	8,377 M Pa	7	129,48 %	

A-2-7-II	FIRST	COD	0,157 mm	K, Load	74,70
----------	-------	-----	----------	---------	-------

	CRACK	Stress	9,278 M Pa	K, Unload		22,43
	PEAK	COD	1,388 mm	K, ReLoad		29,71
	PRE	Stress	10,712 M Pa	1	35,80 %	
	85%	COD	2,720 mm	2	13,92 %	
	Pre	Stress	9,109 M Pa	3,1	52,54 %	
	UNLOAD	COD	3,065 mm	3,2	73,66 %	
		Stress	8,591 M Pa	4,1	52,19 %	
	Residual	COD	2,689 mm	5,1	119,26 %	
		Stress	0,169 M Pa	5,2	129,62 %	
	PEAK	COD	3,711 mm	5,5	89,27 %	
POST	Stress	9,350 M Pa	5,6	97,96 %		
85% Post	COD	5,352 mm	6	63,56 %		
	Stress	7,952 M Pa	7	158,74 %		

A-2-8-II	FIRST	COD	0,117 mm	K, Load		88,92
	CRACK	Stress	8,861 M Pa	K, Unload		22,44
	PEAK	COD	1,366 mm	K, ReLoad		30,27
	PRE	Stress	10,966 M Pa	1	-400,00 %	
	85%	COD	#N/A mm	2	11,79 %	
	Pre	Stress	#N/A M Pa	3,1	80,54 %	
	UNLOAD	COD	1,946 mm	3,2	109,04 %	
		Stress	10,902 M Pa	4,1	88,72 %	
	Residual	COD	1,463 mm	5,1	123,77 %	
		Stress	0,065 M Pa	5,2	139,06 %	
PEAK	COD	2,952 mm	5,5	#N/A %		
POST	Stress	10,643 M Pa	5,6	#N/A %		
85% Post	COD	4,320 mm	6	1098,10 %		
	Stress	9,042 M Pa	7	25,34 %		

A-2-9-II	FIRST	COD	0,164 mm	K, Load		70,37
	CRACK	Stress	8,615 M Pa	K, Unload		22,40
	PEAK	COD	1,170 mm	K, ReLoad		28,33
	PRE	Stress	10,064 M Pa	1	-13,71 %	
	85%	COD	2,081 mm	2	12,36 %	
	Pre	Stress	8,557 M Pa	3,1	56,44 %	
	UNLOAD	COD	2,397 mm	3,2	77,30 %	
		Stress	7,780 M Pa	4,1	49,61 %	
	Residual	COD	2,060 mm	5,1	107,85 %	
		Stress	0,243 M Pa	5,2	117,06 %	
PEAK	COD	2,964 mm	5,5	107,90 %		

	POST	Stress	7,467 M Pa	5,6	115,63 %
	85% Post	COD	4,465 mm	6	39,43 %
		Stress	6,342 M Pa	7	235,70 %

A-2-10-II	FIRST	COD	0,149 mm	K, Load		81,29
	CRACK	Stress	7,834 M Pa	K, Unload		21,42
	PEAK	COD	1,013 mm	K, ReLoad		24,91
		PRE	Stress	9,550 M Pa	1	-20,87 %
	85%	COD	1,943 mm	2	5,82 %	
		Pre	Stress	8,130 M Pa	3,1	81,71 %
	UNLOAD	COD	2,475 mm	3,2	103,21 %	
		Stress	7,446 M Pa	4,1	66,07 %	
	Residual	COD	2,136 mm	5,1	99,32 %	
		Stress	0,174 M Pa	5,2	109,25 %	
	PEAK	COD	3,181 mm	5,5	106,22 %	
		POST	Stress	7,007 M Pa	5,6	115,61 %
	85% Post	COD	4,380 mm	6	57,73 %	
		Stress	5,955 M Pa	7	156,36 %	

A-3-1-T	FIRST	COD	0,110 mm	K, Load		80,74
	CRACK	Stress	7,755 M Pa	K, Unload		17,63
	PEAK	COD	1,299 mm	K, ReLoad		42,71
		PRE	Stress	8,487 M Pa	1	184,46 %
	85%	COD	2,390 mm	2	39,74 %	
		Pre	Stress	7,229 M Pa	3,1	34,23 %
	UNLOAD	COD	2,565 mm	3,2	61,53 %	
		Stress	6,961 M Pa	4,1	56,95 %	
	Residual	COD	2,173 mm	5,1	74,69 %	
		Stress	0,052 M Pa	5,2	88,81 %	
	PEAK	COD	2,972 mm	5,5	62,82 %	
		POST	Stress	9,776 M Pa	5,6	76,37 %
	85% Post	COD	3,998 mm	6	115,09 %	
		Stress	8,312 M Pa	7	78,94 %	

A-3-6-II	FIRST	COD	0,132 mm	K, Load		100,12
	CRACK	Stress	8,783 M Pa	K, Unload		22,84
	PEAK	COD	1,904 mm	K, ReLoad		45,42
		PRE	Stress	11,929 M Pa	1	411,65 %
	85%	COD	#N/A mm	2	29,21 %	

	Pre	Stress	#N/A M Pa	3,1	69,61 %
	UNLOAD	COD	2,465 mm	3,2	90,39 %
		Stress	11,144 M Pa	4,1	97,24 %
	Residual	COD	1,977 mm	5,1	124,58 %
		Stress	0,008 M Pa	5,2	140,03 %
	PEAK POST	COD	3,698 mm	5,5	#N/A %
		Stress	14,374 M Pa	5,6	#N/A %
85% Post	COD	4,854 mm	6	128,59 %	
	Stress	12,211 M Pa	7	75,88 %	

A-3-7-II	FIRST CRACK	COD	0,166 mm	K, Load		94,48
		Stress	9,053 M Pa	K, Unload		37,20
	PEAK PRE	COD	0,526 mm	K, ReLoad		70,43
		Stress	10,066 M Pa	1	382,69 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	58,01 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	341,81 %	
	UNLOAD	COD	1,246 mm	3,2	280,89 %	
		Stress	9,188 M Pa	4,1	356,73 %	
	Residual	COD	0,999 mm	5,1	121,56 %	
		Stress	0,000 M Pa	5,2	125,50 %	
	PEAK POST	COD	2,476 mm	5,5	#N/A %	
		Stress	12,549 M Pa	5,6	#N/A %	
	85% Post	COD	3,577 mm	6	122,96 %	
Stress		10,674 M Pa	7	87,26 %		

A-3-8-II	FIRST CRACK	COD	0,139 mm	K, Load		82,67
		Stress	8,949 M Pa	K, Unload		22,02
	PEAK PRE	COD	1,322 mm	K, ReLoad		57,56
		Stress	10,722 M Pa	1	755,00 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	58,60 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	74,69 %	
	UNLOAD	COD	1,961 mm	3,2	102,08 %	
		Stress	10,303 M Pa	4,1	111,91 %	
	Residual	COD	1,496 mm	5,1	107,61 %	
		Stress	0,063 M Pa	5,2	123,10 %	
	PEAK POST	COD	2,845 mm	5,5	#N/A %	
		Stress	13,471 M Pa	5,6	#N/A %	
	85% Post	COD	4,025 mm	6	247,11 %	
Stress		11,457 M Pa	7	56,34 %		

A-3-9-II	FIRST CRACK	COD	0,131 mm	K, Load		91,08
		Stress	8,376 M Pa	K, Unload		23,07
	PEAK PRE	COD	1,464 mm	K, ReLoad		47,42
		Stress	10,699 M Pa	1	156,76 %	
	85% Pre	COD	2,075 mm	2	35,80 %	
		Stress	9,169 M Pa	3,1	51,91 %	
	UNLOAD	COD	2,088 mm	3,2	76,30 %	
		Stress	9,873 M Pa	4,1	68,89 %	
	Residual	COD	1,663 mm	5,1	113,50 %	
		Stress	0,067 M Pa	5,2	126,65 %	
	PEAK POST	COD	2,780 mm	5,5	111,99 %	
		Stress	11,168 M Pa	5,6	125,46 %	
85% Post	COD	4,265 mm	6	62,36 %		
	Stress	9,493 M Pa	7	137,10 %		

A-3-10-II	FIRST CRACK	COD	0,255 mm	K, Load		54,56
		Stress	8,498 M Pa	K, Unload		15,82
	PEAK PRE	COD	1,904 mm	K, ReLoad		28,61
		Stress	10,167 M Pa	1	259,46 %	
	85% Pre	COD	2,518 mm	2	33,03 %	
		Stress	8,828 M Pa	3,1	101,67 %	
	UNLOAD	COD	2,544 mm	3,2	120,29 %	
		Stress	9,786 M Pa	4,1	116,73 %	
	Residual	COD	1,932 mm	5,1	197,37 %	
		Stress	0,113 M Pa	5,2	214,02 %	
	PEAK POST	COD	4,220 mm	5,5	167,31 %	
		Stress	10,775 M Pa	5,6	174,80 %	
85% Post	COD	6,329 mm	6	40,67 %		
	Stress	9,168 M Pa	7	186,09 %		

E-1-6-II	FIRST CRACK	COD	0,108 mm	K, Load		82,05
		Stress	7,833 M Pa	K, Unload		23,17
	PEAK PRE	COD	1,137 mm	K, ReLoad		49,92
		Stress	8,892 M Pa	1	863,64 %	
	85% Pre	COD	1,483 mm	2	45,43 %	
		Stress	7,158 M Pa	3,1	182,26 %	
	UNLOAD	COD	1,522 mm	3,2	197,62 %	
		Stress	8,600 M Pa	4,1	242,24 %	
	Residual	COD	1,152 mm	5,1	199,30 %	
		Stress	0,040 M Pa	5,2	204,04 %	

	PEAK POST	COD	3,396 mm	5,5	278,00 %
		Stress	11,114 M Pa	5,6	282,86 %
	85% Post	COD	5,344 mm	6	22,90 %
		Stress	9,447 M Pa	7	205,79 %

E-1-7-II	FIRST CRACK	COD	0,129 mm	K, Load		72,85
		Stress	6,415 M Pa	K, Unload		19,62
	PEAK PRE	COD	1,567 mm	K, ReLoad		33,77
		Stress	8,088 M Pa	1	2600,00 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	26,58 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	97,04 %	
	UNLOAD	COD	1,814 mm	3,2	115,18 %	
		Stress	8,019 M Pa	4,1	124,75 %	
	Residual	COD	1,407 mm	5,1	165,15 %	
		Stress	0,035 M Pa	5,2	173,98 %	
	PEAK POST	COD	3,209 mm	5,5	#N/A %	
		Stress	9,819 M Pa	5,6	#N/A %	
85% Post	COD	4,981 mm	6	164,30 %		
	Stress	8,342 M Pa	7	18,62 %		

E-1-8-II	FIRST CRACK	COD	0,137 mm	K, Load		70,40
		Stress	7,359 M Pa	K, Unload		40,62
	PEAK PRE	COD	0,626 mm	K, ReLoad		46,85
		Stress	8,434 M Pa	1	191,23 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	20,95 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	180,04 %	
	UNLOAD	COD	1,228 mm	3,2	170,90 %	
		Stress	7,722 M Pa	4,1	176,14 %	
	Residual	COD	1,038 mm	5,1	113,27 %	
		Stress	0,025 M Pa	5,2	114,97 %	
	PEAK POST	COD	2,107 mm	5,5	#N/A %	
		Stress	9,084 M Pa	5,6	#N/A %	
85% Post	COD	3,400 mm	6	72,17 %		
	Stress	7,722 M Pa	7	134,48 %		

E-1-9-II	FIRST CRACK	COD	0,145 mm	K, Load		63,18
		Stress	6,814 M Pa	K, Unload		17,38
	PEAK PRE	COD	1,838 mm	K, ReLoad		26,30
		Stress	8,505 M Pa	1	723,81 %	

	85% Pre	COD	#N/A mm	2	19,49 %
		Stress	#N/A M Pa	3,1	64,19 %
	UNLOAD	COD	2,273 mm	3,2	85,03 %
		Stress	8,294 M Pa	4,1	83,55 %
	Residual	COD	1,798 mm	5,1	141,71 %
		Stress	0,040 M Pa	5,2	155,41 %
	PEAK POST	COD	3,360 mm	5,5	#N/A %
		Stress	9,824 M Pa	5,6	#N/A %
	85% Post	COD	4,991 mm	6	79,75 %
		Stress	8,344 M Pa	7	127,47 %

E-1-10-II	FIRST CRACK	COD	0,165 mm	K, Load		84,00
		Stress	7,156 M Pa	K, Unload		24,52
	PEAK PRE	COD	1,270 mm	K, ReLoad		27,35
		Stress	9,299 M Pa	1	6,98 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	4,76 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	95,16 %	
	UNLOAD	COD	1,605 mm	3,2	111,38 %	
		Stress	8,907 M Pa	4,1	95,60 %	
	Residual	COD	1,242 mm	5,1	136,11 %	
		Stress	0,018 M Pa	5,2	144,71 %	
	PEAK POST	COD	2,657 mm	5,5	#N/A %	
		Stress	8,934 M Pa	5,6	#N/A %	
	85% Post	COD	4,215 mm	6	63,45 %	
		Stress	7,594 M Pa	7	141,12 %	

E-2-6-II	FIRST CRACK	COD	0,147 mm	K, Load		77,64
		Stress	7,505 M Pa	K, Unload		24,60
	PEAK PRE	COD	1,525 mm	K, ReLoad		27,45
		Stress	8,680 M Pa	1	219,51 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	5,38 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	84,87 %	
	UNLOAD	COD	1,935 mm	3,2	98,95 %	
		Stress	8,361 M Pa	4,1	88,40 %	
	Residual	COD	1,597 mm	5,1	130,27 %	
		Stress	0,047 M Pa	5,2	138,06 %	
	PEAK POST	COD	3,104 mm	5,5	#N/A %	
		Stress	9,062 M Pa	5,6	#N/A %	

	85% Post	COD	4,433 mm	6	130,21 %
		Stress	7,699 M Pa	7	87,56 %

E-2-7-II	FIRST CRACK	COD	0,129 mm	K, Load		90,63
		Stress	8,849 M Pa	K, Unload		46,36
	PEAK PRE	COD	0,510 mm	K, ReLoad		51,92
		Stress	9,479 M Pa	1	5,32 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	12,57 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	129,40 %	
	UNLOAD	COD	1,191 mm	3,2	132,84 %	
		Stress	8,608 M Pa	4,1	111,99 %	
	Residual	COD	1,006 mm	5,1	83,52 %	
		Stress	0,056 M Pa	5,2	86,96 %	
	PEAK POST	COD	1,684 mm	5,5	#N/A %	
		Stress	8,655 M Pa	5,6	#N/A %	
85% Post	COD	2,793 mm	6	108,99 %		
	Stress	7,357 M Pa	7	95,15 %		

E-2-8-II	FIRST CRACK	COD	0,152 mm	K, Load		88,83
		Stress	8,798 M Pa	K, Unload		32,21
	PEAK PRE	COD	1,072 mm	K, ReLoad		63,77
		Stress	9,575 M Pa	1	757,58 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	55,73 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	96,68 %	
	UNLOAD	COD	1,485 mm	3,2	109,71 %	
		Stress	9,247 M Pa	4,1	124,34 %	
	Residual	COD	1,200 mm	5,1	101,43 %	
		Stress	0,050 M Pa	5,2	108,59 %	
	PEAK POST	COD	2,375 mm	5,5	#N/A %	
		Stress	11,737 M Pa	5,6	#N/A %	
85% Post	COD	3,431 mm	6	284,86 %		
	Stress	9,974 M Pa	7	14,79 %		

E-2-9-II	FIRST CRACK	COD	0,129 mm	K, Load		86,64
		Stress	8,352 M Pa	K, Unload		26,23
	PEAK PRE	COD	1,644 mm	K, ReLoad		70,33
		Stress	11,115 M Pa	1	363,79 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	73,00 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	52,23 %	

	UNLOAD	COD	2,042 mm	3,2	72,53 %
		Stress	10,519 M Pa	4,1	76,20 %
	Residual	COD	1,642 mm	5,1	109,88 %
		Stress	0,041 M Pa	5,2	122,02 %
	PEAK POST	COD	2,833 mm	5,5	#N/A %
		Stress	12,687 M Pa	5,6	#N/A %
85% Post	COD	4,149 mm	6	55,59 %	
	Stress	10,786 M Pa	7	138,02 %	

E-2-10-II	FIRST CRACK	COD	0,208 mm	K, Load		86,53
		Stress	8,829 M Pa	K, Unload		21,90
	PEAK PRE	COD	1,935 mm	K, ReLoad		53,50
		Stress	11,239 M Pa	1	941,67 %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	48,90 %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	125,04 %	
	UNLOAD	COD	2,355 mm	3,2	137,33 %	
		Stress	10,995 M Pa	4,1	155,20 %	
	Residual	COD	1,859 mm	5,1	216,27 %	
		Stress	0,122 M Pa	5,2	226,06 %	
	PEAK POST	COD	4,515 mm	5,5	#N/A %	
		Stress	13,294 M Pa	5,6	#N/A %	
85% Post	COD	6,503 mm	6	29,24 %		
	Stress	11,300 M Pa	7	175,12 %		

E-3-6-II	FIRST CRACK	COD	0,087 mm	K, Load		99,87
		Stress	7,560 M Pa	K, Unload		26,23
	PEAK PRE	COD	1,565 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	10,339 M Pa	1	#N/A %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A %	
	UNLOAD	COD	1,951 mm	3,2	#N/A %	
		Stress	9,788 M Pa	4,1	0,00 %	
	Residual	COD	1,579 mm	5,1	#N/A %	
		Stress	0,017 M Pa	5,2	#N/A %	
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A %	
85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A %		
	Stress	#N/A M Pa	7	#N/A %		

E-3-7-II	FIRST CRACK	COD	0,121 mm	K, Load		87,84
		Stress	9,444 M Pa	K, Unload		34,56
	PEAK PRE	COD	1,077 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	9,599 M Pa	1	#N/A	%
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A	%
	UNLOAD	COD	1,613 mm	3,2	#N/A	%
		Stress	9,199 M Pa	4,1	0,00	%
	Residual	COD	1,351 mm	5,1	#N/A	%
		Stress	0,127 M Pa	5,2	#N/A	%
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A	%
	85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	7	#N/A	%

E-3-8-II	FIRST CRACK	COD	0,129 mm	K, Load		77,45
		Stress	8,217 M Pa	K, Unload		37,91
	PEAK PRE	COD	0,236 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	8,260 M Pa	1	#N/A	%
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A	%
	UNLOAD	COD	0,842 mm	3,2	#N/A	%
		Stress	7,416 M Pa	4,1	0,00	%
	Residual	COD	0,647 mm	5,1	#N/A	%
		Stress	0,043 M Pa	5,2	#N/A	%
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A	%
	85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	7	#N/A	%

E-3-9-II	FIRST CRACK	COD	0,129 mm	K, Load		82,52
		Stress	9,478 M Pa	K, Unload		36,38
	PEAK PRE	COD	0,129 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	9,478 M Pa	1	#N/A	%
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A	%
	UNLOAD	COD	0,888 mm	3,2	#N/A	%
		Stress	9,154 M Pa	4,1	0,00	%
	Residual	COD	0,639 mm	5,1	#N/A	%
		Stress	0,095 M Pa	5,2	#N/A	%

	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A %
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A %
	85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A %
		Stress	#N/A M Pa	7	#N/A %

E-3-10-II	FIRST CRACK	COD	0,102 mm	K, Load		79,79
		Stress	6,879 M Pa	K, Unload		20,66
	PEAK PRE	COD	1,844 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	10,063 M Pa	1	#N/A %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A %	
	UNLOAD	COD	2,199 mm	3,2	#N/A %	
		Stress	9,812 M Pa	4,1	0,00 %	
	Residual	COD	1,725 mm	5,1	#N/A %	
		Stress	0,010 M Pa	5,2	#N/A %	
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A %	
	85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	7	#N/A %	
E-4-6-II	FIRST CRACK	COD	0,000 mm	K, Load		0,00
		Stress	0,000 M Pa	K, Unload		0,00
	PEAK PRE	COD	0,000 mm	K, ReLoad		0,00
		Stress	0,000 M Pa	1	0,00 %	
	85% Pre	COD	0,000 mm	2	0,00 %	
		Stress	0,000 M Pa	3,1	0,00 %	
	UNLOAD	COD	0,000 mm	3,2	0,00 %	
		Stress	0,000 M Pa	4,1	0,00 %	
	Residual	COD	0,000 mm	5,1	0,00 %	
		Stress	0,000 M Pa	5,2	0,00 %	
	PEAK POST	COD	0,000 mm	5,5	0,00 %	
		Stress	0,000 M Pa	5,6	0,00 %	
	85% Post	COD	0,000 mm	6	0,00 %	
		Stress	0,000 M Pa	7	0,00 %	

E-4-7-II	FIRST CRACK	COD	0,179 mm	K, Load		103,10
		Stress	9,142 M Pa	K, Unload		24,28
	PEAK PRE	COD	1,695 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	10,861 M Pa	1	#N/A %	
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A %	

	UNLOAD	COD	2,052 mm	3,2	#N/A	%
		Stress	10,657 M Pa	4,1	0,00	%
	Residual	COD	1,615 mm	5,1	#N/A	%
		Stress	0,049 M Pa	5,2	#N/A	%
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A	%
85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A	%	
	Stress	#N/A M Pa	7	#N/A	%	

E-4-8-II	FIRST CRACK	COD	0,140 mm	K, Load		97,31
		Stress	8,287 M Pa	K, Unload		23,71
	PEAK PRE	COD	1,402 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	9,642 M Pa	1	#N/A	%
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A	%
	UNLOAD	COD	1,776 mm	3,2	#N/A	%
		Stress	9,137 M Pa	4,1	0,00	%
	Residual	COD	1,397 mm	5,1	#N/A	%
		Stress	0,138 M Pa	5,2	#N/A	%
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A	%
85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A	%	
	Stress	#N/A M Pa	7	#N/A	%	

E-4-9-II	FIRST CRACK	COD	0,136 mm	K, Load		86,57
		Stress	8,754 M Pa	K, Unload		21,04
	PEAK PRE	COD	1,658 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	10,236 M Pa	1	#N/A	%
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A	%
	UNLOAD	COD	2,043 mm	3,2	#N/A	%
		Stress	9,674 M Pa	4,1	0,00	%
	Residual	COD	1,590 mm	5,1	#N/A	%
		Stress	0,151 M Pa	5,2	#N/A	%
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A	%
85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A	%	
	Stress	#N/A M Pa	7	#N/A	%	

E-4-10-II	FIRST CRACK	COD	0,136 mm	K, Load		71,56
		Stress	8,498 M Pa	K, Unload		39,55
	PEAK PRE	COD	0,136 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	8,498 M Pa	1	#N/A	%
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A	%
	UNLOAD	COD	0,842 mm	3,2	#N/A	%
		Stress	8,208 M Pa	4,1	0,00	%
	Residual	COD	0,638 mm	5,1	#N/A	%
		Stress	0,140 M Pa	5,2	#N/A	%
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A	%
85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A	%	
	Stress	#N/A M Pa	7	#N/A	%	

F-2-6-II	FIRST CRACK	COD	0,108 mm	K, Load		73,20
		Stress	7,363 M Pa	K, Unload		54,96
	PEAK PRE	COD	0,461 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	9,722 M Pa	1	#N/A	%
	85% Pre	COD	0,944 mm	2	#N/A	%
		Stress	8,713 M Pa	3,1	#N/A	%
	UNLOAD	COD	0,948 mm	3,2	#N/A	%
		Stress	9,040 M Pa	4,1	0,00	%
	Residual	COD	0,784 mm	5,1	#N/A	%
		Stress	0,055 M Pa	5,2	#N/A	%
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A	%
85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A	%	
	Stress	#N/A M Pa	7	#N/A	%	

F-2-7-II	FIRST CRACK	COD	0,159 mm	K, Load		81,74
		Stress	12,050 M Pa	K, Unload		44,11
	PEAK PRE	COD	0,159 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	12,050 M Pa	1	#N/A	%
	85% Pre	COD	#N/A mm	2	#N/A	%
		Stress	#N/A M Pa	3,1	#N/A	%
	UNLOAD	COD	0,671 mm	3,2	#N/A	%
		Stress	10,304 M Pa	4,1	0,00	%
	Residual	COD	0,439 mm	5,1	#N/A	%
		Stress	0,093 M Pa	5,2	#N/A	%

	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A %
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A %
	85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A %
		Stress	#N/A M Pa	7	#N/A %

F-3-6-II	FIRST CRACK	COD	0,140 mm	K, Load		81,40
		Stress	10,965 M Pa	K, Unload		32,23
	PEAK PRE	COD	1,013 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	10,998 M Pa	1	#N/A %	
	85% Pre	COD	1,473 mm	2	#N/A %	
		Stress	9,300 M Pa	3,1	#N/A %	
	UNLOAD	COD	1,501 mm	3,2	#N/A %	
		Stress	10,680 M Pa	4,1	0,00 %	
	Residual	COD	1,170 mm	5,1	#N/A %	
		Stress	0,011 M Pa	5,2	#N/A %	
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A %	
	85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	7	#N/A %	

F-3-10-II	FIRST CRACK	COD	0,000 mm	K, Load		72,38
		Stress	0,000 M Pa	K, Unload		15,94
	PEAK PRE	COD	0,146 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	10,073 M Pa	1	#N/A %	
	85% Pre	COD	1,650 mm	2	#N/A %	
		Stress	8,557 M Pa	3,1	#N/A %	
	UNLOAD	COD	4,288 mm	3,2	#N/A %	
		Stress	6,159 M Pa	4,1	0,00 %	
	Residual	COD	4,018 mm	5,1	#N/A %	
		Stress	1,846 M Pa	5,2	#N/A %	
	PEAK POST	COD	#N/A mm	5,5	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	5,6	#N/A %	
	85% Post	COD	#N/A mm	6	#N/A %	
		Stress	#N/A M Pa	7	#N/A %	

APPENDICE C3

A seguire si mostrano i valori meccanici relativi ai provini *Sisal Non-Sat* (D1), *Sisal SAT* (D2), *Sisal+Euc* (B1), *Sisal+Nanopulp* (C1).

D-1-1-T	PEAK PRE	COD Stress	0,104 mm	K, Load		60,15
			5,685 M Pa	K, Unload		11,17
	UNLOAD	COD Stress	0,495 mm	K, ReLoad		1,99
			1,184 M Pa	1	-11,68	%
	Residual	COD Stress	0,397 mm			
		0,089 M Pa	2	-18,75	%	
	PEAK POST	COD Stress	0,635 mm			
			0,414 M Pa			

D-1-2-T	PEAK PRE	COD Stress	0,100 mm	K, Load		64,29
			6,452 M Pa	K, Unload		10,06
	UNLOAD	COD Stress	0,560 mm	K, ReLoad		#N/A
			0,767 M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD Stress	0,494 mm			
		0,103 M Pa	2	#N/A	%	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm			
			#N/A M Pa			

D-1-3-T	PEAK PRE	COD Stress	0,127 mm	K, Load		75,74
			4,750 M Pa	K, Unload		#DIV/0!
	UNLOAD	COD Stress	1,013 mm	K, ReLoad		#N/A
			0,563 M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD Stress	1,013 mm			
		0,563 M Pa	2	#N/A	%	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm			
			#N/A M Pa			

D-1-4-T	PEAK PRE	COD Stress	0,091 mm	K, Load		68,25
			6,328 M Pa	K, Unload		12,84
	UNLOAD	COD Stress	0,482 mm	K, ReLoad		#N/A
			0,934 M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD Stress	0,416 mm			
		0,093 M Pa	2	#N/A	%	
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm			
			#N/A M Pa			

D-1-5-T	PEAK PRE	COD Stress	0,113 mm	K, Load		73,40
			7,679 M Pa	K, Unload		19,29
	UNLOAD	COD Stress	0,551 mm	K, ReLoad		4,38
			0,333 M Pa	1	-2,15	%
	Residual	COD Stress	0,536 mm			
		0,044 M Pa	2	-27,54	%	
	PEAK POST	COD Stress	0,755 mm			
			0,175 M Pa			

D-1-6-II	PEAK PRE	COD Stress	0,147 mm	K, Load		47,89
			6,685 M Pa	K, Unload		19,94
	UNLOAD	COD Stress	0,499 mm	K, ReLoad		18,44
			2,213 M Pa	1	-19,51	%
	Residual	COD Stress	0,390 mm			
		0,039 M Pa	2	-5,38	%	
	PEAK POST	COD Stress	0,577 mm			
			1,340 M Pa			

D-1-7-II	PEAK PRE	COD Stress	0,139 mm	K, Load		50,15
			6,793 M Pa	K, Unload		20,66
	UNLOAD	COD Stress	0,498 mm	K, ReLoad		12,39
			1,453 M Pa	1	-8,74	%
	Residual	COD Stress	0,429 mm			
		0,038 M Pa	2	-28,06	%	
	PEAK POST	COD Stress	0,636 mm			
			0,987 M Pa			

D-1-8-II	PEAK PRE	COD Stress	0,094 mm	K, Load		89,14
			7,131 M Pa	K, Unload		17,65
	UNLOAD	COD Stress	0,540 mm	K, ReLoad		7,37
			1,868 M Pa	1	-17,08	%
	Residual	COD Stress	0,443 mm			
		0,147 M Pa	2	-14,38	%	
	PEAK POST	COD Stress	0,664 mm			
			0,969 M Pa			

D-1-9-II	PEAK PRE	COD Stress	0,134 mm	K, Load		60,21
			7,594 M Pa	K, Unload		17,45
	UNLOAD	COD Stress	0,494 mm	K, ReLoad		22,60
			1,885 M Pa	1	-12,89	%
	Residual	COD Stress	0,386 mm			
			0,000 M Pa	2	12,04	%
	PEAK POST	COD Stress	0,542 mm			
			1,149 M Pa			

D-1-10-II	PEAK PRE	COD Stress	0,116 mm	K, Load		87,74
			5,694 M Pa	K, Unload		#DIV/0!
	UNLOAD	COD Stress	3,167 mm	K, ReLoad		#N/A
			0,810 M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD Stress	3,167 mm			
			0,810 M Pa	2	#N/A	%
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm			
			#N/A M Pa			

D-2-1-T	PEAK PRE	COD Stress	0,152 mm	K, Load		59,85
			8,607 M Pa	K, Unload		18,45
	UNLOAD	COD Stress	0,486 mm	K, ReLoad		17,64
			1,999 M Pa	1	-8,54	%
	Residual	COD Stress	0,383 mm			
			0,107 M Pa	2	-1,95	%
	PEAK POST	COD Stress	0,607 mm			
			1,236 M Pa			

D-2-2-T	PEAK PRE	COD Stress	0,132 mm	K, Load		70,41
			7,325 M Pa	K, Unload		9,13
	UNLOAD	COD Stress	0,498 mm	K, ReLoad		#N/A
			0,951 M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD Stress	0,399 mm			
			0,047 M Pa	2	#N/A	%
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm			
			#N/A M Pa			

D-2-3-T	PEAK PRE	COD Stress	0,147 mm	K, Load	49,21
			6,100 M Pa	K, Unload	15,25
	UNLOAD	COD Stress	0,500 mm	K, ReLoad	#N/A
			0,863 M Pa	1	#N/A %
	Residual	COD Stress	0,448 mm	2	#N/A %
		0,078 M Pa			
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm		
			#N/A M Pa		

D-2-4-T	PEAK PRE	COD Stress	0,138 mm	K, Load	63,27
			7,591 M Pa	K, Unload	#DIV/0!
	UNLOAD	COD Stress	1,066 mm	K, ReLoad	#N/A
			0,594 M Pa	1	#N/A %
	Residual	COD Stress	1,066 mm	2	#N/A %
		0,594 M Pa			
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm		
			#N/A M Pa		

D-2-5-T	PEAK PRE	COD Stress	0,091 mm	K, Load	74,02
			5,330 M Pa	K, Unload	18,47
	UNLOAD	COD Stress	0,489 mm	K, ReLoad	1,72
			1,087 M Pa	1	-12,09 %
	Residual	COD Stress	0,432 mm	2	-30,16 %
		0,025 M Pa			
	PEAK POST	COD Stress	0,753 mm		
			0,504 M Pa		

D-2-6-II	PEAK PRE	COD Stress	0,136 mm	K, Load	70,55
			7,455 M Pa	K, Unload	#DIV/0!
	UNLOAD	COD Stress	1,202 mm	K, ReLoad	#N/A
			1,614 M Pa	1	#N/A %
	Residual	COD Stress	1,202 mm	2	#N/A %
		1,614 M Pa			
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm		
			#N/A M Pa		

D-2-7-II	PEAK PRE	COD Stress	0,121 mm	K, Load		75,89
			6,584 M Pa	K, Unload		16,89
	UNLOAD	COD Stress	0,489 mm	K, ReLoad		14,28
			1,701 M Pa	1	-13,71	%
	Residual	COD Stress	0,391 mm			
		0,045 M Pa	2	-4,43	%	
	PEAK POST	COD Stress	0,569 mm			
			1,031 M Pa			

D-2-8-II	PEAK PRE	COD Stress	0,121 mm	K, Load		76,91
			7,301 M Pa	K, Unload		14,97
	UNLOAD	COD Stress	0,657 mm	K, ReLoad		3,99
			1,407 M Pa	1	-8,49	%
	Residual	COD Stress	0,564 mm			
		0,007 M Pa	2	-17,71	%	
	PEAK POST	COD Stress	0,885 mm			
			0,906 M Pa			

D-2-9-II	PEAK PRE	COD Stress	0,106 mm	K, Load		78,48
			6,204 M Pa	K, Unload		18,60
	UNLOAD	COD Stress	0,480 mm	K, ReLoad		9,21
			1,589 M Pa	1	-13,84	%
	Residual	COD Stress	0,395 mm			
		0,008 M Pa	2	-15,69	%	
	PEAK POST	COD Stress	0,619 mm			
			0,950 M Pa			

D-2-10-II	PEAK PRE	COD Stress	0,109 mm	K, Load		82,84
			7,079 M Pa	K, Unload		18,59
	UNLOAD	COD Stress	0,500 mm	K, ReLoad		18,88
			2,154 M Pa	1	-12,71	%
	Residual	COD Stress	0,385 mm			
		0,016 M Pa	2	0,46	%	
	PEAK POST	COD	0,633 mm			

	POST	Stress	1,528	M Pa
--	------	--------	-------	------

B-1-1-T	PEAK	COD	0,190	mm	K, Load		50,21
	PRE	Stress	8,873	M Pa	K, Unload		-0,09
	UNLOAD	COD	0,098	mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	4,738	M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD	1,235	mm	2	#N/A	%
	Stress	0,627	M Pa				
	PEAK	COD	#N/A	mm			
	POST	Stress	#N/A	M Pa			

B-1-2-T	PEAK	COD	0,143	mm	K, Load		48,18
	PRE	Stress	7,022	M Pa	K, Unload		5,54
	UNLOAD	COD	0,431	mm	K, ReLoad		16,56
		Stress	0,468	M Pa	1	4,71	%
	Residual	COD	0,355	mm	2	25,86	%
	Stress	0,047	M Pa				
	PEAK	COD	0,482	mm			
	POST	Stress	0,776	M Pa			

B-1-3-T	PEAK	COD	0,130	mm	K, Load		68,61
	PRE	Stress	8,698	M Pa	K, Unload		10,15
	UNLOAD	COD	0,537	mm	K, ReLoad		-0,14
		Stress	0,504	M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD	0,493	mm	2	-17,60	%
	Stress	0,057	M Pa				
	PEAK	COD	#N/A	mm			
	POST	Stress	#N/A	M Pa			

B-1-4-T	PEAK	COD	0,166	mm	K, Load		46,67
	PRE	Stress	7,859	M Pa	K, Unload		10,94
	UNLOAD	COD	0,749	mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	0,167	M Pa	1	#N/A	%
Residual	COD	0,740	mm				

	Stress	0,068	M Pa			
	PEAK	COD	#N/A	mm	2	#N/A %
	POST	Stress	#N/A	M Pa		

B-1-5-T	PEAK	COD	0,137	mm	K, Load		58,68
	PRE	Stress	8,198	M Pa	K, Unload		7,87
	UNLOAD	COD	0,700	mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	0,110	M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD	0,697	mm	2	#N/A	%
	Stress	0,087	M Pa				
	PEAK	COD	#N/A	mm			
	POST	Stress	#N/A	M Pa			

B-1-6-II	PEAK	COD	0,121	mm	K, Load		78,68
	PRE	Stress	8,149	M Pa	K, Unload		15,26
	UNLOAD	COD	0,492	mm	K, ReLoad		1,65
		Stress	0,702	M Pa	1	-6,48	%
	Residual	COD	0,447	mm	2	-21,47	%
	Stress	0,007	M Pa				
	PEAK	COD	0,551	mm			
	POST	Stress	0,219	M Pa			

B-1-7-II	PEAK	COD	0,153	mm	K, Load		54,87
	PRE	Stress	7,910	M Pa	K, Unload		17,89
	UNLOAD	COD	0,491	mm	K, ReLoad		-0,87
		Stress	0,904	M Pa	1	-11,33	%
	Residual	COD	0,442	mm	2	-50,72	%
	Stress	0,028	M Pa				
	PEAK	COD	0,871	mm			
	POST	Stress	0,110	M Pa			

B-1-8-II	PEAK	COD	0,130	mm	K, Load		68,56
	PRE	Stress	7,541	M Pa	K, Unload		14,05
	UNLOAD	COD	0,496	mm	K, ReLoad		14,20

	Stress		0,696 M Pa	1	-0,31	%
	Residual	COD	0,448 mm			
		Stress	0,021 M Pa	2	0,27	%
	PEAK	COD	0,628 mm			
POST	Stress	0,675 M Pa				

B-1-9-II	PEAK	COD	0,131 mm	K, Load		68,93
	PRE	Stress	8,118 M Pa	K, Unload		10,44
	UNLOAD	COD	0,508 mm	K, ReLoad		15,27
		Stress	1,039 M Pa	1	-1,83	%
	Residual	COD	0,410 mm			
		Stress	0,015 M Pa	2	8,26	%
PEAK	COD	0,594 mm				
POST	Stress	0,909 M Pa				

B-1-10-II	PEAK	COD	0,139 mm	K, Load		73,18
	PRE	Stress	7,973 M Pa	K, Unload		#DIV/0!
	UNLOAD	COD	1,376 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	0,682 M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD	1,376 mm			
		Stress	0,682 M Pa	2	#N/A	%
PEAK	COD	#N/A mm				
POST	Stress	#N/A M Pa				

C-1-1-T	PEAK	COD	0,128 mm	K, Load		61,64
	PRE	Stress	7,335 M Pa	K, Unload		-28,26
	UNLOAD	COD	1,089 mm	K, ReLoad		#N/A
		Stress	1,101 M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD	1,102 mm			
		Stress	1,101 M Pa	2	#N/A	%
PEAK	COD	#N/A mm				
POST	Stress	#N/A M Pa				

C-1-2-T	PEAK	COD	0,116 mm	K, Load		70,78
---------	------	-----	----------	---------	--	-------

	PRE	Stress	6,654 M Pa
	UNLOAD	COD	0,509 mm
		Stress	0,959 M Pa
	Residual	COD	0,448 mm
		Stress	0,024 M Pa
PEAK POST	Stress	0,655 M Pa	

K, Unload		15,32
K, ReLoad		4,96
1	-5,33	%
2	-18,68	%

C-1-3-T	PEAK PRE	COD Stress	0,135 mm
	UNLOAD	COD	0,502 mm
		Stress	0,588 M Pa
	Residual	COD	0,479 mm
		Stress	0,091 M Pa
PEAK POST	Stress	0,362 M Pa	

K, Load		69,60
K, Unload		22,13
K, ReLoad		6,03
1	-2,93	%
2	-33,90	%

C-1-4-T	PEAK PRE	COD Stress	0,095 mm
	UNLOAD	COD	0,484 mm
		Stress	0,395 M Pa
	Residual	COD	0,466 mm
		Stress	0,028 M Pa
PEAK POST	Stress	#N/A M Pa	

K, Load		77,83
K, Unload		19,86
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%

C-1-5-T	PEAK PRE	COD Stress	0,134 mm
	UNLOAD	COD	0,495 mm
		Stress	0,389 M Pa
	Residual	COD	0,471 mm
		Stress	0,009 M Pa
PEAK POST	Stress	0,326 M Pa	

K, Load		64,63
K, Unload		16,18
K, ReLoad		2,26
1	-0,98	%
2	-28,72	%

C-1-6-II	PEAK PRE	COD Stress	0,126 mm	K, Load		57,94
			6,025 M Pa	K, Unload		17,89
	UNLOAD	COD Stress	0,498 mm	K, ReLoad		4,45
			1,297 M Pa	1	-12,06	%
	Residual	COD Stress	0,425 mm	2	-33,58	%
		0,000 M Pa				
	PEAK POST	COD Stress	0,672 mm			
			0,727 M Pa			

C-1-7-II	PEAK PRE	COD Stress	0,129 mm	K, Load		61,76
			7,815 M Pa	K, Unload		14,25
	UNLOAD	COD Stress	0,500 mm	K, ReLoad		#N/A
			1,210 M Pa	1	#N/A	%
	Residual	COD Stress	0,424 mm	2	#N/A	%
		0,120 M Pa				
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm			
			#N/A M Pa			

C-1-8-II	PEAK PRE	COD Stress	0,098 mm	K, Load		65,95
			6,218 M Pa	K, Unload		14,97
	UNLOAD	COD Stress	0,496 mm	K, ReLoad		5,90
			0,696 M Pa	1	-8,03	%
	Residual	COD Stress	0,449 mm	2	-17,79	%
		0,000 M Pa				
	PEAK POST	COD Stress	0,638 mm			
			0,605 M Pa			

C-1-9-II	PEAK PRE	COD Stress	0,111 mm	K, Load		64,25
			6,158 M Pa	K, Unload		18,36
	UNLOAD	COD Stress	0,526 mm	K, ReLoad		4,97
			1,049 M Pa	1	-8,18	%
	Residual	COD Stress	0,470 mm	2	-29,17	%
		0,021 M Pa				
	PEAK POST	COD Stress	0,707 mm			
			0,632 M Pa			

C-1-10-II	PEAK PRE	COD Stress	0,150 mm
			7,560 M Pa
	UNLOAD	COD Stress	0,500 mm
			2,154 M Pa
	Residual	COD Stress	1,037 mm
			1,514 M Pa
	PEAK POST	COD Stress	#N/A mm
			#N/A M Pa

K, Load		58,81
K, Unload		-1,19
K, ReLoad		#N/A
1	#N/A	%
2	#N/A	%